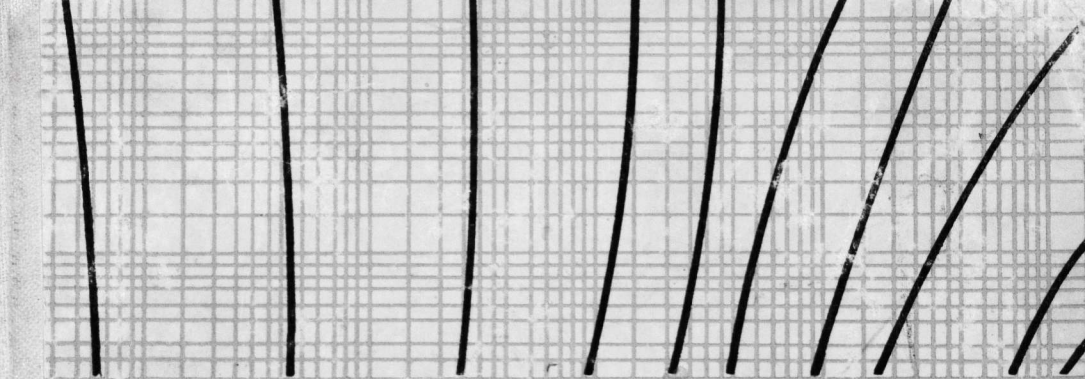




А. И. КУРНОСОВ , В. В. ЮДИН

**ТЕХНОЛОГИЯ
ПРОИЗВОДСТВА
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ
ПРИБОРОВ**

А. И. КУРНОСОВ, В. В. ЮДИН

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

Допущено Министерством высшего и среднего специального образования СССР в качестве учебного пособия для студентов вузов, обучающихся по специальности «Полупроводники и диэлектрики»



МОСКВА «ВЫСШАЯ ШКОЛА» 1974

6Ф0.32

K93

УДК 621.38.032

Куриосов А. И., Юдин В. В.

K93 Технология производства полупроводниковых приборов. Учеб. пособие для специальностей «Полупроводники и диэлектрики» и «Производство полупроводниковых приборов», М., «Выш. школа», 1974.

400 с. с ил.

В книге дано описание технологических процессов, используемых при изготовлении полупроводниковых приборов и интегральных схем; рассмотрены механическая, химическая и фотолитографическая обработки, применение методов сплавления, диффузии, эпитаксии, элоники и конденсации в вакууме при создании полупроводниковых структур, технологические особенности изготовления интегральных схем, методы защиты поверхности *p-n*-переходов, сборка и герметизация приборов, конструкции корпусов и методы испытаний полупроводниковых приборов.

К $\frac{30407-027}{001(01)-74}$ 135-74

6Ф0.32

ГОС. ПУБЛИЧНАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА СССР

44-20565a

44

28947

Как показывает отечественная и зарубежная практика, производство большинства типов полупроводниковых приборов основано на одних и тех же процессах, например, фотолитографии, диффузии и др., а технологические схемы производства имеют много общих этапов: создание *p-n*-переходов, химическая обработка, сборка и т. д. Исходя из современной тенденции к унификации и созданию универсальных базовых технологий, авторы стремились изложить материал в соответствии с основными общими этапами производства полупроводниковых приборов, в пределах каждого этапа дать систематизированный обзор технологических методов и их разновидностей и не относить методы изготовления приборов к производству каких-либо конкретных типов диодов, транзисторов и т. д.

Описание каждого технологического метода начинается с кратких сведений о физических основах данного процесса; рассматриваются его особенности, используемые материалы и оборудование, режимы проведения, даются примеры встречающихся в практике расчетов; указываются дефекты, возникающие в структурах на различных операциях; в заключение приводятся методы контроля качества полученных структур и элементов приборов.

Введение, главы II, IV—VIII написаны кандидатом физико-математических наук В. В. Юдиным, главы I, III, IX—XIII — кандидатом технических наук А. И. Курносовым.

Авторы выражают глубокую благодарность профессору ЛЭТИ им. В. И. Ульянова (Ленина), доктору технических наук В. В. Пасынкову, профессору МЭИ, доктору физико-математических наук К. В. Шалимовой, профессору, доктору технических наук Я. А. Федотову, профессору, доктору физико-математических наук А. Л. Рвачеву, а также коллективам кафедры «Полупроводниковые приборы», МИСИС, кафедры «Полупроводниковые приборы» МЭИ, кафедры «Полупроводниковые материалы» ОПИ, кафедры «Химия, радиоматериалы и конструирование РЭА» МЭИС за просмотр и ценные замечания по рукописи.

Замечания и пожелания по книге просим высылать по адресу: Москва, К-51, Неглинная ул., 29/14, издательство «Высшая школа».

Авторы

ВВЕДЕНИЕ

§ В.1. Основные этапы в технологии производства полупроводниковых приборов

Развитие технологии производства полупроводниковых приборов определяется стремлением к максимальному удовлетворению требований, предъявляемых к их эксплуатационным характеристикам и экономическим показателям. Эти требования можно сформулировать следующим образом:

- а) увеличение частотного диапазона и быстродействия;
- б) увеличение или уменьшение рабочей мощности;
- в) уменьшение величины собственных шумов;
- г) расширение рабочего диапазона температур;
- д) обеспечение высокой надежности;
- е) уменьшение габаритов и веса;
- ж) снижение трудоемкости изготовления и себестоимости приборов.

Способы изготовления различных полупроводниковых приборов весьма многообразны. Однако во всех случаях кристалл полупроводника подвергается ряду общих основных технологических операций, последовательность которых составляет технологический маршрут.

Технологию производства полупроводниковых приборов можно подразделить на несколько этапов.

Входной контроль электрофизических параметров слитков исходного полупроводникового материала, т. е. определение типа электропроводности, удельного сопротивления, времени жизни и подвижности носителей заряда, плотности дислокаций.

Механическая обработка полупроводниковых материалов — осуществление ориентации слитков в требуемом кристаллографическом направлении, резка на пластины или кристаллы, которые шлифуют и полируют с целью придания им заданной толщины, формы и качества поверхности.

Химическая и электрохимическая обработка пластин и кристаллов, т. е. химическая и электрохимическая полировка поверхностного слоя, нарушенного при механической обработке. Для получения на поверхности пластин какого-либо рельефа, участки, которые должны остаться не тронутыми травителем, защищают специальными веществами. Так производят, например, вытравливание меза-

структур или локальное удаление диэлектрических и металлических пленок. Важную роль играет промывка пластин и кристаллов. Химические и электрохимические процессы широко применяют и на следующих стадиях обработки пластин, например, при создании омических контактов путем осаждения металлов.

Обработка пластин и кристаллов при получении p - n -переходов. Операция создания p - n -перехода является основной в технологическом процессе. Поэтому название полупроводникового прибора почти всегда базируется на названии метода обработки.

Первые плоскостные промышленные транзисторы, появившиеся в 1951 г., были изготовлены с помощью метода выращивания из расплава. В том же году появились первые образцы сплавных транзисторов, а в 1953 г. — поверхностно-барьерных. В последующие годы развивался метод диффузии, в 1956—1957 гг. были созданы диффузионные приборы. В 1960 г. для изготовления полупроводниковых приборов был применен метод эпитаксиального наращивания полупроводниковых пленок. В то же время на основе методов диффузии появилась мезотехнология изготовления полупроводниковых приборов, а затем начали развиваться планарная и планарно-эпитаксиальная технологии.

Электронно-ионную обработку пластин и кристаллов называют элионикой. Элионная технология возникла в середине 50-х годов, но активно начала развиваться только в первой половине 60-х годов. Она включает в себя применение электронных и ионных пучков для легирования полупроводников и других целей.

Нанесение тонких пленок на пластины и кристаллы — термическое, катодное и ионно-плазменное распыление для нанесения на пластины металлических, диэлектрических и полупроводниковых пленок при создании омических контактов, барьеров Шоттки, изолирующих покрытий, тонкопленочных элементов микросхем и др.

Травление и защита поверхности p - n -переходов — удаление дефектных областей и загрязнений в месте выхода p - n -перехода на поверхность кристалла и защита поверхности от воздействия окружающей среды путем нанесения диэлектрических покрытий.

Сборка прибора — присоединение полупроводникового кристалла к внешним электрическим выводам пайкой, термокомпрессией, ультразвуковой сваркой и другими способами, герметизация кристалла путем помещения в корпус или с помощью пластмасс.

Измерение электрических параметров, классификация и испытания приборов (климатические, механические, электрические) с целью отбраковки дефектных образцов.

Перечисленные этапы (все или частично) могут осуществляться в различной последовательности. Каждая технологическая операция сопровождается контролем качества обработки, например, измерением глубины диффузии, толщины эпитаксиальной пленки, удельного или поверхностного сопротивления. После создания p - n -переходов на следующих операциях контролируются электрические параметры, например, ток утечки.

§ В.2. Разновидности активных структур

Основу большинства полупроводниковых приборов составляет кристалл полупроводника, содержащий один или более электронно-дырочных переходов или других выпрямляющих и невыпрямляющих контактов. В зависимости от распределения концентрации примесей в переходной области среди выпрямляющих и невыпрямляющих контактов можно выделить несколько основных групп (рис. В.1).

Резкие p - n -переходы (рис. В.1, а, б). Изменение типа электропроводности совершается в таких переходах скачкообразно, а концентрации примесей по обе стороны от плоскости контакта остаются неизменными на всей протяженности приконтактной области. Идеальных резких переходов не существует. Наиболее близки к ним сплавные и эпитаксиальные структуры. Области с более высокой удельной проводимостью обозначают знаком «+»: p^+ - n -переход, n^+ - p -переход.

Структуры типа pin (рис. В. 1, в, г). Если между n - и p -областями находится область с собственной электропроводностью, так называемый i -слой (intrinsic — собственный), то структуры этого типа обозначают pin , p^+in^+ и т. д. Так как получить собственный полупроводник трудно, то вместо i -слоя между p - и n -областями располагают высокоомный материал p -типа, обозначаемый буквой π , или n -типа, обозначаемый буквой ν : $p\pi n$, $p\nu n$.

Структуры типа pin , $p\pi n$ и другие получают путем сплавления или диффузии в противоположные стороны пластины высокоомного полупроводника или эпитаксиального наращивания этих областей. Поэтому каждый из переходов (pi или ni) может быть резким (сплавление и эпитаксия) или плавным (диффузия).

Плавные p - n -переходы (рис. В.1, д). Изменение типа электропроводности или величины проводимости происходит в таких переходах постепенно и изменение концентрации примеси — плавное (в первом приближении линейно) в направлении, перпендикулярном плоскости контакта. Плавные p - n -переходы получают методом выращивания полупроводника из расплава, при программируемом эпитаксиальном выращивании и путем глубокой диффузии примеси. Одной из основных характеристик плавного p - n -перехода является градиент концентрации примеси в области перехода.

При получении p - n -переходов методом диффузии или ионного легирования изменение концентрации примеси вдоль направления диффузии или внедрения легирующих ионов описывается плавной кривой с переменным градиентом концентрации примеси (рис. В.1, е).

Наиболее распространенным среди таких p - n -переходов является переход с обратным градиентом концентрации примеси, получаемый, например, после сплавления электрода в диффузионный слой (рис. В.1, ж). По одну сторону от перехода концентрация примеси скачком принимает некоторое значение, постоянное для данной области кристалла, а по другую сторону от перехода кон-

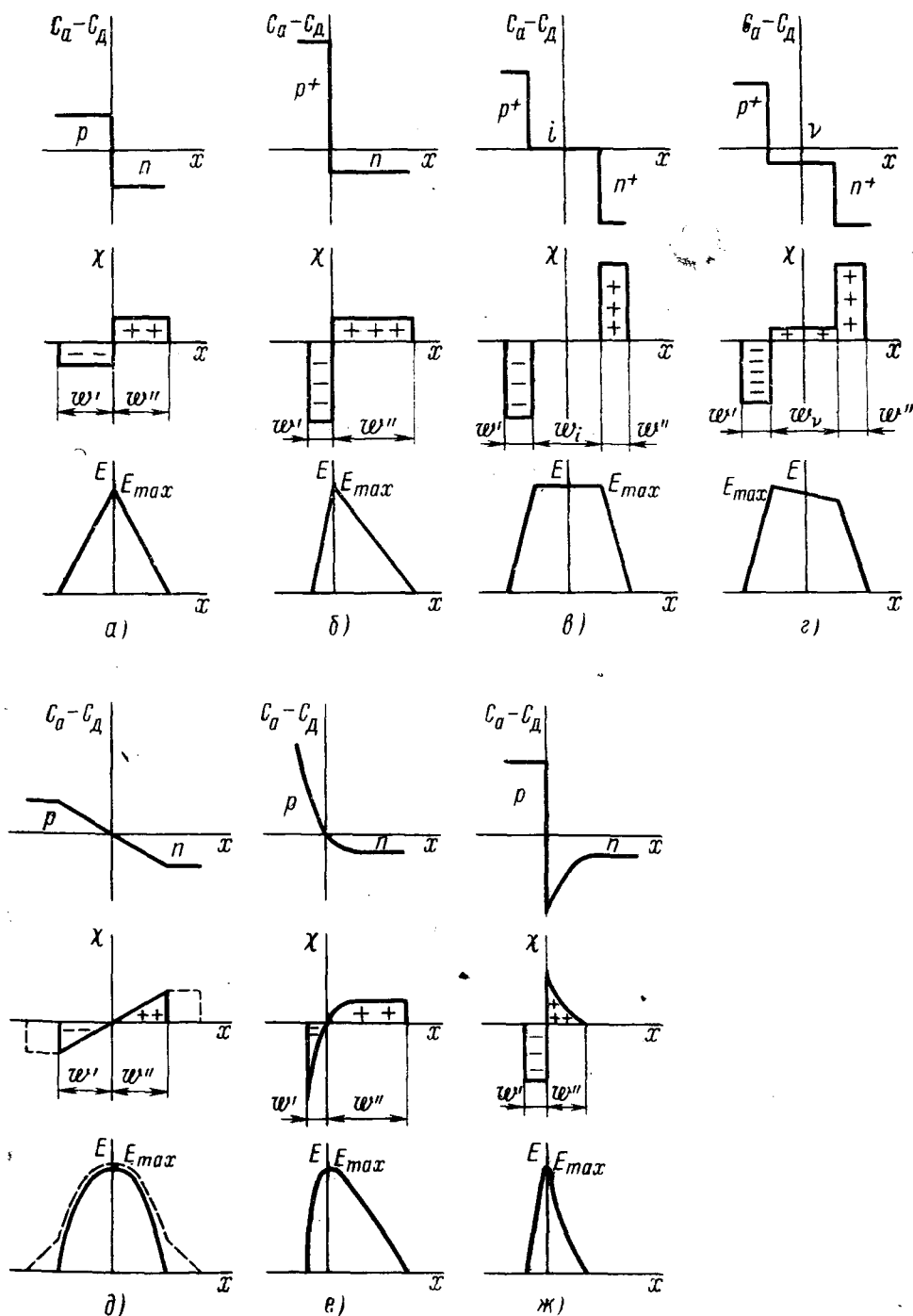


Рис. В.1. Распределение концентрации примеси $C_a - C_d$, плотности объемного заряда χ и электрического поля E

центрация примеси противоположного типа электропроводности плавно уменьшается до некоторого значения, присущего основной части данной области кристалла, что и обуславливает обратное по сравнению с диффузионными переходами направление градиента концентрации.

Резкие, плавные p - n -переходы и pin -структуры могут быть симметричными (рис. В.1, а, в, д) или асимметричными (рис. В.1, б, г), в зависимости от распределения примеси относительно плоскости геометрического перехода.

Многие из перечисленных типов структур можно создать в виде гетеропереходов — контактов двух различных полупроводниковых материалов: Ge—Si, Ge—GaAs и др. К гетеропереходам можно отнести структуры металл — полупроводник (m — s , metal — semiconductor), структуру МДП (металл — диэлектрик — полупровод-

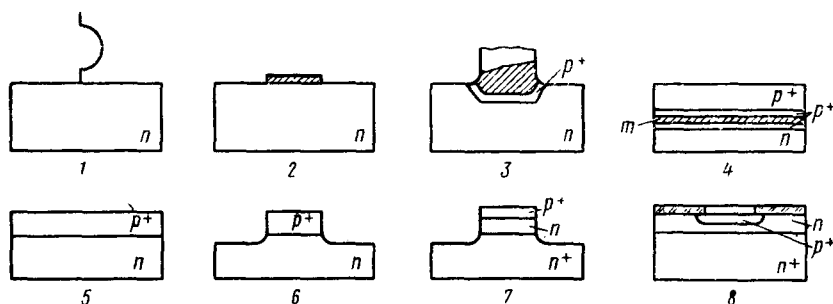


Рис. В.2. Простейшие полупроводниковые структуры:

1 — с точечным контактом; 2 — поверхностно-барьерная; 3 — сплавная локальная; 4 — сплавная на большой площади; 5 — диффузионная; 6 — меза-диффузионная; 7 — меза-эпитаксиальная; 8 — планарно-эпитаксиальная

ник). Последняя имеет много обозначений: MIS (insulator — изолятор), MOS (oxide — окисел); MNS (nitride — нитрид).

На рис. В.2 показаны простейшие структуры, изготовленные различными методами. Структуры типа 2—5 были характерными для первого десятилетия развития плоскостных полупроводниковых приборов. На рубеже второго десятилетия появились меза-структура (6, 7) и планарно-эпитаксиальная структура (8) (mesa — столовая гора, planar — плоский).

Мезаструктура представляет собой кристалл исходного полупроводника, над которым возвышается плато, несущее активный элемент прибора с одним, двумя или тремя p - n -переходами, полученными методами диффузии, эпитаксии или сплавления. Преимуществами мезаструктур являются возможность уменьшения площади и тем самым емкости p - n -перехода, получения приборов на большие и малые мощности, технологичность и достаточно высокая надежность.

Планарная структура представляет собой кристалл полупроводника, содержащего один или несколько p - n -переходов, боковые границы которых выходят на плоскую поверхность кристалла под изолирующим покрытием.

К преимуществам планарной структуры следует отнести пассивацию поверхности перед созданием p - n -переходов, что уменьшает обратный ток коллекторного перехода, обеспечивает стабильность параметров транзисторов и большое значение коэффициента усиления при малых токах, возможность создания p - n -переходов различной конфигурации с высокой точностью, большие возможности миниатюризации.

До появления меза- и планарных структур большинство приборов изготавливались индивидуальным способом — каждый кристалл проходил последовательно все технологические операции. Внедрение новых структур позволило перейти на групповой способ обработки, что значительно технологичнее, более экономично, позволяет значительно улучшить качество приборов и воспроизводимость их параметров, дает возможность автоматизировать производство.

§ В.3. Технологические схемы получения некоторых транзисторов

Используя методы диффузии, сплавления, эпитаксиального нанесения слоев полупроводника и различные их комбинации, изготавливают различные типы планарных и мезаприборов.

Мезатранзистор типа n - p - n с двойной диффузией (рис. В.3, а). Исходным материалом для данного транзистора служит пластина кремния с электропроводностью n -типа.

Для получения коллекторного p - n -перехода по всей поверхности пластины проводится диффузия акцепторной примеси. Затем пластину подвергают нагреву в атмосфере кислорода, и над диффузионным слоем образуется изолирующая пленка двуокиси кремния. Далее методом фотолитографии (см. гл. III) в окисной пленке создаются отверстия под будущие эмиттерные p - n -переходы.

Для создания эмиттерного p - n -перехода диффузانت (примесь донорного типа) вводится только в области эмиттерных окон; при этом окисная пленка кремния играет роль защитной маски.

Следующим этапом является удаление пленки SiO_2 в плавиковой кислоте со всей поверхности пластины и напыление в вакууме через соответствующий трафарет металлических контактов. Контакты наносят один на эмиттер и два на базу по обе стороны от эмиттера.

На этой стадии пластина содержит несколько сотен транзисторных структур, имеющих общий коллекторный p - n -переход. Чтобы изолировать коллекторы и уменьшить их размеры, производят селективное травление. Поверхность, содержащую активную структуру, обычно защищают с помощью пчелиного воска, битума, пичина, наносимых через отверстия в металлической маске.

Незащищенный кремний между структурами травится в смеси кислот так, чтобы граница коллекторного p - n -перехода оказалась на некоторой высоте над поверхностью пластины. Таким образом, вся активная часть прибора сосредоточивается в столбике, возвышающемся над исходной пластиной,— это и есть мезаструктура.

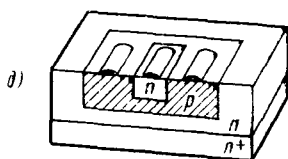
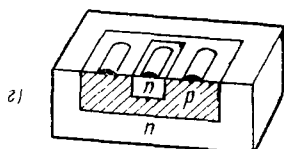
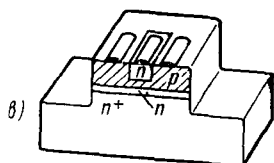
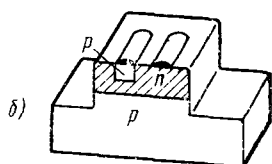
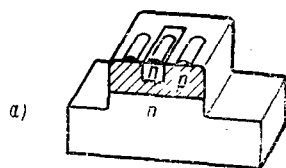


Рис. В.3. Различные структуры транзисторов

Изготовление прибора завершается резкой пластины на кристаллы с мезаструктурами, сборкой и герметизацией.

Сплавно-диффузионный мезатранзистор типа p - n - p (рис. В.3,б). Этот прибор отличается от предыдущего вплавленным эмиттером.

После получения коллекторного диффузионного p - n -перехода пластину помещают в вакуумную камеру и на нее накладывают металлическую маску с одним отверстием. С помощью двух испарителей, размещенных по бокам от пластины, осуществляют напыление электродов для эмиттера и базового контакта. Образуются две параллельные полоски. Поскольку пластина подогревается, напыляемые металлы вплавляются, образуя эмиттерный p - n -переход и базовый n - n^+ -контакт. Мезаструктуру получают так же, как и в предыдущем случае.

Эпитаксиальный мезатранзистор с двойной диффузией (рис. В.3,в). На исходную низкоомную подложку осаждается эпитаксиальный слой, служащий в дальнейшем коллектором. В этот слой с электропроводностью n -типа осуществляют диффузию акцепторов и затем, используя окисную защиту, доноров для получения эмиттера. Далее все процессы производят так же, как при изготовлении мезатранзисторов с двойной диффузией.

Планарный транзистор с двойной диффузией (рис. В.3,г). В планарной технологии коллекторный p - n -переход ограничивается путем оксидного маскирования, а не вытравливанием мезы.

Перед диффузией исходную пластину кремния с электропроводностью n -типа подвергают окислению и методом фотолитографии производят селективное удаление части окисла для создания будущих базовых областей. Затем в окислительной среде проводят диффузию акцепторной примеси, образующей коллекторный p - n -переход и базовую область. Одновременно благодаря примене-

нию окислительной среды на поверхности растёт. слой SiO_2 , необходимый как для защиты поверхности базы от последующей диффузии, так и для защиты поверхности коллектора p - n -перехода готового прибора от воздействия внешней среды.

Эмиттер получают с помощью диффузии донорной примеси, проводимой через окна в плёнке SiO_2 . С тех частей базы и эмиттера, где требуется получить омические контакты, методом фотолитографии снимается окисный слой и производится нанесение электродного материала.

После этого пластины режутся на кристаллы, которые монтируют в корпус.

Эпитаксиальный планарный транзистор с двойной диффузией (рис. В.3, д). Эпитаксиальный слой с электропроводностью n -типа наращивают на n^+ -подложке. Дальнейшее маскирование, диффузию и нанесение контактов производят так же, как и для планарного транзистора.

МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

§ 1.1. Структура кристаллического твердого тела

Большинство полупроводниковых материалов представляет собой кристаллические твердые вещества с упорядоченной периодической структурой. При описании различных структур используют следующие термины:

элементарная ячейка — наименьший объем кристаллического вещества в виде параллелепипеда, перемещая который вдоль трех независимых направлений можно получить весь кристалл;

постоянная решетки, определяемая как длина элементарной ячейки вдоль одного из ребер параллелепипеда;

кристаллографические оси, определяемые направлениями ребер элементарной ячейки.

Рассмотрим наиболее распространенные типы кристаллических решеток.

Простая кубическая решетка состоит из атомов, расположенных в вершинах куба. Типичным материалом с такой структурой является хлористый цезий. В решетке этого кристалла последовательно чередуются положительные ионы цезия и отрицательные ионы хлора.

Гранецентрированная кубическая решетка более сложна, чем простая кубическая, так как в ней атомы располагаются не только в вершинах куба, но и в центре каждой грани. Типичным для такой группы кристаллических веществ является алюминий.

Объемноцентрированная кубическая решетка состоит из атомов, расположенных в вершинах и в центре куба (но не на его гранях). Такой структурой обладает, например, железо.

Кроме этих сравнительно простых структур, существует большое количество сложных, но также с кубической элементарной ячейкой. Большинство полупроводниковых материалов (германий, кремний и др.) имеют структуру решетки типа алмаза (рис. 1.1.).

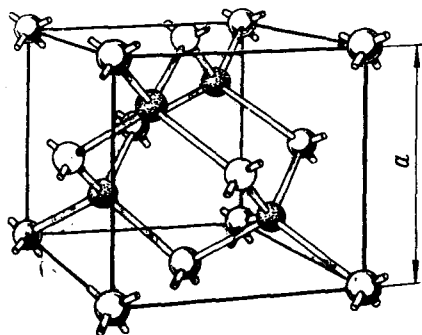


Рис. 1.1. Структура элементарной ячейки кристаллической решетки типа алмаза

Основную роль в этой решетке играет наличие тетраэдрических связей: каждый атом имеет четырех ближайших соседей, взаимодействующих с ним силами ковалентных связей. Решетка типа алмаза представляет собой модификацию гранецентрированной кубической решетки и как бы состоит из двух гранецентрированных решеток, сдвинутых относительно друг друга на четверть постоянной решетки.

В табл. 1.1. приведены некоторые параметры кристаллических решеток, в том числе координационное число, означающее число ближайших эквивалентных соседей данного атома, и коэффициент компактности, характеризующий плотность упаковки атомов в кристаллической структуре.

Т а б л и ц а 1.1

Параметры кристаллических решеток

Тип решетки	Координационное число	Кратчайшее межатомное расстояние	Число атомов в элементарной ячейке	Коэффициент компактности структуры
Простая кубическая	1	a	6	$\frac{\pi}{6}$
Гранецентрированная кубическая .	12	$a \frac{\sqrt{2}}{2}$	4	$\frac{\sqrt{2} \pi}{6}$
Объемноцентрированная кубическая	8	$a \frac{\sqrt{3}}{2}$	2	$\frac{\sqrt{3} \pi}{8}$
Типа алмаза : :	4	$a \frac{\sqrt{3}}{4}$	8	$\frac{\sqrt{3} \pi}{16}$

a — межатомное расстояние.

Классифицируют кристаллы в зависимости от размеров и формы элементарной ячейки, которые определяют по результатам анализа рентгеновских исследований. Систематизация кристаллов основана на соотношениях между длинами ребер (a , b , c) элементарной ячейки и ее углами (α , β , γ). Существует несколько кристаллических систем:

Триклинная	a , b , c	и	α , β , γ
Моноклиная	a , b , c	и	90° , 90° , β
Ромбическая	a , b , c	и	90° , 90° , 90°
Ромбоэдрическая	a , a , a	и	a , a , a
Тетрагональная	a , a , c	и	90° , 90° , 90°
Гексагональная	a , a , c	и	90° , 90° , 120°
Кубическая	a , a , a	и	90° , 90° , 90°

Таким образом, наиболее общим типом является триклинная система кристаллов, так как у нее все ребра элементарной ячейки различны и ни одно из них не составляет с другим прямого угла, а наиболее упорядоченной — кубическая система. Прочие системы занимают промежуточные положения.

Все кристаллические вещества обладают анизотропностью, т. е. свойства кристаллов изменяются в зависимости от кристаллографического направления. Поэтому в различных случаях применения кристаллических материалов задают ориентацию определенной кристаллографической плоскости.

Для задания нужных плоскостей используют так называемые индексы Миллера, смысл которых заключается в следующем. Если принимают за систему координат оси, проходящие через один из узлов решетки и параллельные трем ребрам элементарной ячейки, то эти оси называют кристаллографическими осями и обозначают X, Y, Z . Любая плоскость в такой системе координат обозначается $A_X B_Y C_Z$ и отсекает на осях X, Y и Z отрезки OA_X, OB_Y и OC_Z соответственно. Можно выбрать любую единицу измерения при рассмотрении величин отрезков OA_X, OB_Y и OC_Z , например одинаковую для всех трех осей X, Y, Z ($OA_1 = OB_1 = OC_1$). В общем случае эти отрезки, принятые за единицы измерения, могут отличаться друг от друга, т. е. $OA_1 \neq OB_1 \neq OC_1$.

После выбора единицы измерения можно определить положение нужной плоскости $A_X B_Y C_Z$. Для этого вычисляется соотношение

$$\frac{OA_X}{OA_1} : \frac{OB_Y}{OB_1} : \frac{OC_Z}{OC_1} = m : n : p.$$

Если взять обратные отношения этих величин, получим

$$\frac{1}{\frac{OA_X}{OA_1}} : \frac{1}{\frac{OB_Y}{OB_1}} : \frac{1}{\frac{OC_Z}{OC_1}} = \frac{1}{m} : \frac{1}{n} : \frac{1}{p}.$$

После приведения дробей $1/m, 1/n, 1/p$ к общему знаменателю получим индексы Миллера h, k, l , которые являются целыми числами.

Таким образом, произвольную плоскость $A_X B_Y C_Z$ обозначают тремя целыми числами, представляющими собой отношения трех дробей, числители которых соответствуют ребрам единичной грани (OA_1, OB_1, OC_1), а знаменатели — ребрам заданной грани (OA_X, OB_Y, OC_Z).

Если плоскость не пересекает какую-либо из координатных осей, то индекс Миллера для этой координатной оси будет равен нулю.

В качестве примера рассмотрим следующий случай. Пусть значения m, n и p равны соответственно 1, 4 и 2, тогда числа $1/m, 1/n, 1/p$ будут соответственно 1, $1/4, 1/2$ и индексы Миллера h, k, l данной плоскости будут 4, 1 и 2.

Обычно индексы Миллера для обозначения плоскости заключают в круглые скобки без каких-либо знаков между ними, например: (121), (111), (100).

Из сказанного следует, что диагональные плоскости куба имеют индексацию (110), (101), (011), а грани куба — (100), (010), (001). Направления кристаллографических осей, перпендикулярных соответствующим плоскостям, записывают с помощью индексов Миллера, заключенных в квадратные скобки. Например, ось X обозначают как [100], ось Y как [010], ось Z как [001].

На рис. 1.2 показаны основные кристаллографические плоскости кубической решетки.

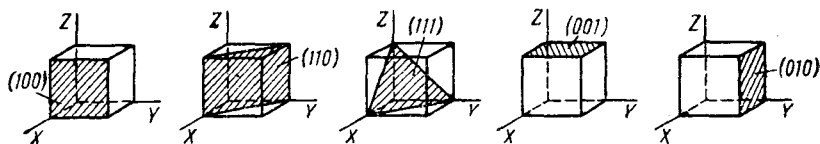


Рис. 1.2. Основные кристаллографические плоскости кубической решетки

§ 1.2. Абразивные материалы

Слово «абразив» латинского происхождения, в переводе на русский язык означает скоблить. Это понятие и определяет характер обработки, выполняемой абразивными материалами — снятие тонких слоев с поверхности обрабатываемого материала. Обычно абразив представляет собой смесь зерен неправильной формы разного размера. Зерном абразива называют отдельный кристалл, сростки кристаллов или их осколки при отношении их наибольшего размера к наименьшему не более 3:1.

Характеристики абразивных зерен. Основными необходимыми качествами абразивных материалов являются высокая твердость, минимальная хрупкость, высокая абразивная способность.

Под твердостью понимают способность материала сопротивляться вдавливанию в него другого материала, не получающего остаточных деформаций. Минерал высшего класса оставляет царапину на всех предыдущих. Согласно минералогической шкале Мооса по твердости абразивные материалы подразделяют на 10 классов. Эта шкала включает в качестве эталонов следующие минералы: тальк (1); гипс (2); кальцит (3); флюорит (4); апатит (5); ортоклаз (6); кварц (7); топаз (8); корунд (9); алмаз (10).

Более точной характеристикой абразива является микротвердость, определяемая вдавливанием в исследуемый материал алмазной пирамидки. Величина отпечатка, оставляемого алмазом, в зависимости от физико-механических свойств исследуемого абразива может меняться от 7 до 50 мкм с изменением нагрузки от 10^{-2} до 2н, что соответствует микротвердости материала от 10^9 до $7 \cdot 10^{10}$ н/м².

Абразивная способность характеризуется количеством материала, сошлифованного за определенное время при номинальном режиме работы станка. Абразивная способность зависит от твердости, остроты граней и других физико-механических свойств абразива.

Размер зерен абразива определяют по диаметру. Если зерно неправильной формы, то его «вписывают» в параллелепипед с линейными размерами: l — длина, d — ширина, h — высота. Диаметр зерна определяют как среднее (арифметическое или геометрическое) этих трех величин по одной из формул:

$$\varnothing = \frac{l+d+h}{3}, \quad \varnothing = \sqrt[3]{ldh}.$$

Виды и свойства абразивных материалов. По способу получения абразивные материалы подразделяют на природные и искусственные. К природным абразивным материалам относятся: алмаз, корунд и кремнь.

Алмаз — самый твердый из известных материалов. Его твердость по минералогической шкале Мооса равна 10, микротвердость — $9,8 \cdot 10^{10}$ н/м². Удельный вес алмаза составляет 3,4—3,6 г/см³. Наиболее чистые кристаллы нашли применение в ювелирном деле. В промышленности используют только черные минералы. Применение алмаза ограничено в виду его малой распространенности в природе.

Корунд — безводный глинозем Al_2O_3 по твердости (по шкале Мооса — 9) уступает только алмазу. Удельный вес его 3,9—4,0 г/см³. Глинозем способен изоморфно кристаллизоваться с окислами хрома, железа, титана. Примеси в кристалле глинозема придают ему различные оттенки. Бесцветный прозрачный корунд называют лейко-корундом, синий — сапфиром, красный — рубином, желтый — топазом.

В качестве абразивного материала используют кристаллы полупрозрачные, помутневшие (они не имеют другого применения). Месторождения корунда, известные в настоящее время, почти исчерпаны, что ограничивает его широкое применение в промышленности.

Кремнь представляет собой минеральное образование, состоящее из кристаллического и аморфного кремнезема SiO_2 . Твердость его по шкале Мооса — 7, микротвердость — $1 \cdot 10^{10}$ н/м²; удельный вес — 2,6 г/см³. В качестве примесей в кварцевых песках (кремнях) могут быть глинистые минералы, слюды и т. д.

Относительно малые запасы месторождений природных абразивов, обладающих высокой твердостью, обусловили развитие производства искусственных абразивных материалов: электрокорунда, карбида кремния, карбида бора и синтетических алмазов.

Электрокорундом называют кристаллический глинозем $\alpha - Al_2O_3$, получаемый плавкой глиноземистого сырья в дуговой электрической печи. Электрокорунд, выпускаемый промышлен-

ностью, бывает трех сортов: белый, черный, нормальный. Белый электрокорунд, содержащий 98,5—99,5% Al_2O_3 , получают плавкой чистого глинозема; нормальный электрокорунд (являющийся основным продуктом производства), содержащий 91—96% Al_2O_3 — плавкой боксита с углем; черный электрокорунд, содержащий 65—75% Al_2O_3 — плавкой железистого боксита без добавки восстановителя (угля). Твердость электрокорунда по шкале Мооса 9—9,2, микротвердость — $2 \cdot 10^{10}$ н/м², удельный вес — 3,2—4 г/см³.

Карбид кремния (SiC) получают нагреванием смеси кварцевого песка с коксом в электрической печи при температуре не ниже 2000°С. Химически чистый карбид кремния бесцветный, технический — в зависимости от количества примесей приобретает оттенки от светло-зеленого до черного. Наиболее часто в полупроводниковой промышленности используют зеленый и черный карбиды кремния. Твердость карбида кремния (по шкале Мооса) составляет 9,5—9,7, микротвердость — $3 \cdot 10^{10}$ н/м², удельный вес — 3,1—3,4 г/см³.

Карбид бора получают плавлением смеси борного ангидрида и малозольного кокса в электрических печах при температуре около 2500°С. Удельный вес карбида бора — 2,5 г/см³. Его твердость близка к твердости алмаза, а микротвердость — $4,8 \cdot 10^{10}$ н/м². Это наиболее дорогой искусственный абразивный материал.

Синтетические алмазы получают из графита, обработанного под большим давлением при высокой температуре. В результате кристаллическая решетка графита превращается в кристаллическую решетку алмаза. Полученные искусственные алмазы обладают высокой твердостью и по механическим свойствам не уступают естественным алмазам.

Таблица 1.2

Соотношение номера
зернистости и размера
зерна абразива

Номер зернистости	Размер зерна, мкм
М 28	28—20
М 20	20—14
М 14	14—10
М 10	10—7
М 7	7—5
М 5	5—3

Таблица 1.3

Соотношение номера
зернистости и размера
алмазного зерна основной
фракции

Номер зернистости	Размер зерна, мкм
АМ 20/14	20—14
АМ 14/10	14—10
АМ 10/7	10—7
АМ 7/5	7—5
АМ 5/3	5—3
АМ 3/2	3—2
АМ 2/1	2—1
АМ 1/0	1—0

Классификацию абразивных материалов по номерам зернистости производят с помощью рассеивания на специальных ситах. Каждое сито обозначают номером, который характеризует размер зерна. Соотношение номера зернистости и размера зерна абразива приведено в табл. 1.2, а номера зернистости и размера алмазного зерна основной фракции — в табл. 1.3.

§ 1.3. Кристаллографическая ориентация полупроводниковых слитков

Перед резкой слитков полупроводникового материала на пластины важно знать расположение основных кристаллографических плоскостей в этом слитке.

При выращивании монокристаллических слитков полупроводниковых материалов их обычно ориентируют по какому-то заданному кристаллографическому направлению (для кремния чаще всего по оси $[111]$).

Однако точность заданной ориентации невелика и зависит от многих технологических факторов, в частности от точности ориентации и закрепления затравки. В результате у выращенного монокристаллического слитка полупроводника продольная ось не совпадает с кристаллографической осью $[111]$.

Поэтому для получения пластин, ориентированных строго в заданной плоскости до резки производят ориентацию слитков, т. е. определяют на сколько и как ось слитка отклонена от кристаллографической оси $[111]$. Точная ориентация слитков перед резкой необходима также для получения воспроизводимых электрофизических параметров приборов при сплавлении, диффузии, эпитаксии и др.

Используют два способа ориентации монокристаллических слитков полупроводников: рентгеновский и оптический.

Рентгеновский способ основан на отражении рентгеновских лучей от поверхности полупроводникового материала. Интенсивность отраженных рентгеновских лучей зависит от плотности упаковки атомами данной плоскости и чем больше эта плотность, тем интенсивнее отражение рентгеновских лучей. Поскольку плоскость (111) наиболее плотно упакована атомами, ей соответствует и большая интенсивность отраженных лучей.

Кристаллографические плоскости полупроводниковых материалов характеризуются определенными углами отражения падающих на них рентгеновских лучей. В табл. 1.4 приведены величины этих углов для германия и кремния.

Для ориентации слитков используют установки УРС-50И, УРС-25И, УРС-70К1.

Слиток полупроводникового материала с торцом, перпендикулярным его продольной оси, располагают на предметном столе установки. На поверхность торца слитка направляют пучок рентгеновских лучей под углом α , равным углу отражения от соответствующей кристаллографической плоскости, а под углом 2α от

Углы отражения для германия и кремния

Полупроводниковый материал	Углы отражения от плоскости		
	(111)	(110)	(100)
Германий	17°14'	28°56'	43°10'
Кремний	17°56'	30°12'	45°23'

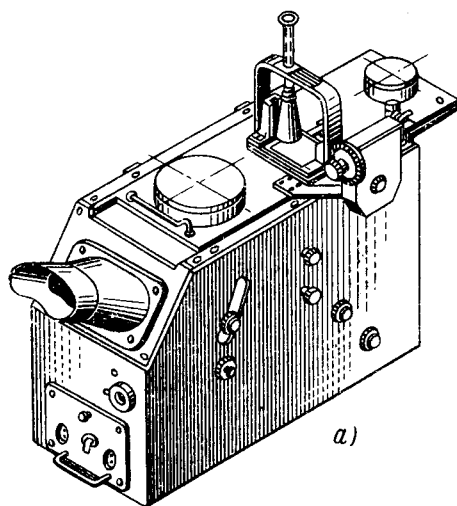
плоскости падения рентгеновских лучей устанавливают приемник, фиксирующий наличие отраженных лучей. Вращая предметный стол со слитком, находят такое положение, при котором индикатор приемника показывает максимальную интенсивность отраженных лучей. Угол между новым положением плоскости торца слитка и его исходным положением является одним из углов ориентации слитка.

Так как плоскость (111) слитка может быть отклонена относительно его торцевой плоскости в двух различных направлениях, то необходимо определить второй угол ориентации. Этот угол находят таким же образом, только пучок рентгеновских лучей направляют не на торец слитка, а на его сошлифованную боковую грань.

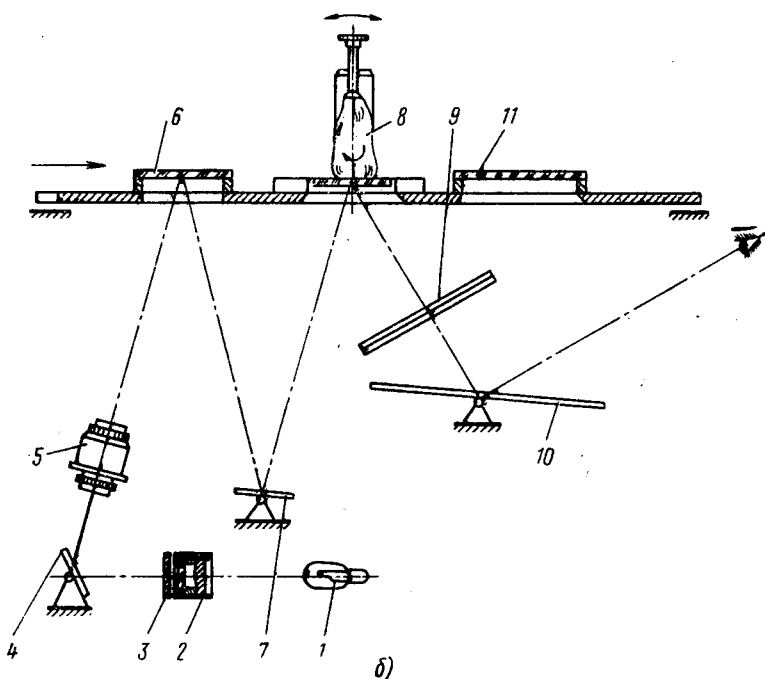
Оптический способ заключается в следующем. Если торец полупроводникового слитка предварительно отполировать и обработать в селективном травителе, то вследствие различной скорости растворения полупроводникового материала по разным кристаллографическим направлениям на поверхности торца слитка будут выявляться наиболее развитые грани плоскостей (111), (100), (110) в зависимости от ориентации затравки. Освещая протравленный торец слитка лучом света, по характеру отраженного луча судят об ориентации слитка. В зависимости от того, насколько сильно отклонена кристаллографическая плоскость от плоскости торца слитка, фигура, образованная отраженным лучом, будет отстоять ближе или дальше от центра экрана.

На рис. 1.3 показана установка для ориентации слитков оптическим способом ЖК78-08.

Принцип действия установки заключается в следующем. Луч света от источника 1 (лампа накаливания), пройдя конденсор 2, состоящий из двух линз, фокусируется сменной диафрагмой 3. Отразившись от зеркала 4, луч света суживается длиннофокусным объективом 5 и отразившись последовательно от зеркал 6, 7 и поверхности образца 8, попадает на матовый экран 9. Изображение на матовом экране фиксируется на просвет с помощью зеркала 10 и наблюдается через смотровое окно. Зеркала 6 и 11 укреплены на перемещающемся столе. На схеме он изображен в крайнем правом положении. В этом положении расстояние между монокристаллическим слитком и экраном равно 114,5 мм (одно деление шкалы,



a)



б)

Рис. 1.3. Установка для ориентации слитков оптическим способом (а) и ее оптическая схема (б)

равное 1 мм, соответствует отклонению кристаллографической оси слитка на 15'). При крайнем левом положении стола место зеркала 6 занимает образец 8, а его место — зеркало 11. При этом расстояние от образца до экрана (по ходу луча) увеличивается до 522 мм, а одно деление шкалы соответствует отклонению кристаллографической оси слитка на 3'.

Юстировку установки производят с помощью эталонного образца или зеркала, установленного вместо образца 8. При этом поворотом зеркала 7 изображение в виде светящейся точки выводится в центре экрана. Слиток монокристаллического полупроводникового материала торцом помещают на предметный стол и прижимают сверху винтом. Световая фигура, отраженная от торца слитка, попадает на матовый экран, занимая на нем произвольное положение. После этого световую фигуру выводят на вертикальную ось и совмещают с горизонтальной осью. По отклонению светового пятна от нулевого деления экрана определяют угол отклонения кристаллографической плоскости от плоскости торца слитка.

Точность определения углов ориентации световым способом зависит от четкости изображения световых фигур на экране и, следовательно, от четкости структуры травления на поверхности торца слитка и может достигать $\pm 3'$ для кремния и $\pm 15'$ для германия.

§ 1.4. Крепление слитков и пластин

Крепление полупроводниковых материалов — одна из очень важных и сложных задач в общем цикле механической обработки. От качества крепления полупроводниковых материалов в значительной степени зависят такие характеристики, как плоскостность, плоскопараллельность изготавливаемых пластин, глубина нарушенного слоя, производительность процесса и т. п.

Существует много способов крепления полупроводниковых материалов при их механической обработке. К наиболее распространенным относятся крепления с помощью различных клеев и замазок на основе парафина, воска, плицина, шеллака, канифоли, а также с помощью глифталевых лаков.

Основные требования, предъявляемые к крепящим составам — это надежное сцепление с поверхностями полупроводникового материала и подложки в процессе механической обработки и быстрое снятие с этих поверхностей в соответствующих растворителях или при нагреве до определенной температуры после проведения процесса.

Крепление полупроводниковых материалов к подложке осуществляют в двух случаях: крепление слитков при резке их на пластины (рис. 1.4) и крепление пластин при шлифовке, полировке и резке их на кристаллы.

При резке слитков на пластины широко распространен способ крепления с помощью эпоксидных смол. Слиток длиной 5—7 см и диаметром 2,5—3 см крепится к металлическому блоку-держателю

тонкой пленкой из пластмассы, которая состоит из 36% эпоксидной смолы, 53% карбоната кальция, 2% коллоидного кремнезема и 9% алифатических аминов. После этого вся композиция выдерживается при комнатной температуре в течение 4 ч. При этом пленка затвердевает и превращается в корку, которая жестко крепляется с полупроводниковым материалом и подложкой. Снятие пленки после резки производят в воде, где пленка набухает и легко удаляется. В качестве соединяющей пленки может быть использована пленка из полистирола толщиной 100—1000 мкм, которая после нанесения на полупроводниковый материал и подложку подвергается термообработке при температуре 85—95°С в течение 5 ч. Кроме того, используют материалы, обладающие хорошей адгезией: $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{NH}_4 \cdot \text{Al}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$, $\text{KCr}(\text{SO}_4) \cdot 12\text{H}_2\text{O}$. Эти вещества

представляют собой стеклообразующую массу, которая прочно соединяет полупроводниковый материал и подложку. Снять такую крепежную массу можно в горячей воде.

Для крепления пластин при резке их на кристаллы используют жидкость, которая замерзает на поверхности и таким образом жестко соединяет пластину с поверхностью подложки; затем вся композиция нагревается для отделения кристаллов от поверхности подложки.

Для получения пластин с высокой степенью плоскопараллельности часто используют способ

крепления пластин к подложке с помощью различных мембран.

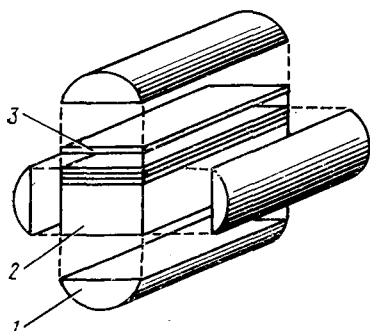


Рис. 1.4. Раскрой слитка на прямоугольные пластины:

1 — боковые части слитка, 2 — слиток, 3 — пластины

§ 1.5. Виды резки полупроводниковых материалов

В полупроводниковом производстве освоены следующие методы резки полупроводниковых материалов: резка абразивом с помощью полотен, проволоки или ультразвука; резка с помощью алмазосодержащих дисков и алмазных резцов.

Исходными критериями для выбора того или иного метода являются скорость резания, предельные размеры заготовок и вероятная возможность появления сколов.

Резка абразивом с помощью полотен — наиболее освоенный и распространенный метод резки слитков полупроводниковых материалов на пластины.

До резки слитки ориентируют и наклеивают на столик станка с помощью клеящей мастики из смеси клея БФ-2 и микропорошка

(электрокорунда) с зернистостью М14. Наклеенный слиток помещают в термостат для подсушки клеящей мастики при $T=160^{\circ}\text{C}$. Чтобы абразивная суспензия не размывала клеящей мастики, столик со слитком покрывают слоем БФ-2. Применяют также более совершенные способы закрепления слитка на столике с помощью цеклевочной замазки из шеллака, бакелита, талька и других веществ. Кроме того, используют заливку слитка эпоксидной смолой.

Резание слитков производят металлическими полотнами толщиной 0,15 мм из стали У7А или У10А с использованием абразивной суспензии на основе карбида кремния или электрокорунда с зернистостью М14.

Режущие полотна набирают в скобу станка. Величина зазора между ними регулируется прецизионными прокладками. В скобе закрепляется до 100 полотен одновременно. Полотна совершают возвратно-поступательное движение. Расход суспензии составляет 1,5—2 л/мин. Слой суспензии толщиной 0,05—0,06 мм удерживается на полотнах силой поверхностного натяжения. Нагрузка на полотна составляет $1 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$. Ширина прореза зависит от толщины полотна, размера зерна абразива, состава суспензии и некоторых других факторов. На обработку оставляется значительный припуск, так как затем необходимо снять нарушенный слой, прилегающий к зоне резания, устранить шероховатость, неплоскостность. При резке полотнами отходы полупроводникового материала достигают 60—70%.

Одной из существенных особенностей данного способа является удобство при резке слитков большего диаметра (до 80 мм) как на круглые пластины, так и на пластины прямоугольной формы (вдоль оси слитка). На рис. 1.4 показан раскрой слитка на пластины прямоугольной формы. Размеры и форма таких пластин более удобны, чем круглых, при проведении различных технологических процессов (фотолитографии, диффузии и др.). При таком раскрое материала в ряде случаев можно получить большее число годных кристаллов на несколько десятков процентов по сравнению с круглыми пластинами.

Преимущество способа резки полотнами состоит в том, что он позволяет резать слитки с любой заданной ориентацией.

Для резки слитков на пластины используют станки ЖК10-02, В0732-2, ЛМ-3642, С-13, СЖ-2126000, ЖК10-05.

Кинематическая схема одного из них показана на рис. 1.5. На стойках 1 жестко крепятся направляющие 2, по которым перемещаются салазки 3. Салазки получают возвратно-поступательное движение от кривошипа 13, который приводится во вращение двигателем 12, через блок 11. К салазкам крепится скоба 4, на которой закреплены режущие полотна 5. На режущие полотна по шлангу 7 подается абразивная суспензия. Слиток материала 6 прикрепляется к столику 8, находящемуся на рычаге 9. Столик жестко крепится на механизме подачи 10. Груз обеспечивает нажатие слитка на полотна и дает возможность регулировать давление.

Технические данные станка для резки полотнами ЖК10-02

Ширина реза	0,3—0,4 мм
Максимальная длина реза	70 мм
Максимальный диаметр слитка	50 мм
Минимальная толщина пластин	0,3 мм
Число двойных ходов в минуту	200—400

Для увеличения производительности процесса резания применяют металлические полотна, шаржированные алмазной крошкой. В качестве охлаждающей жидкости при резке полотнами с алмазной крошкой используют водный раствор соды.

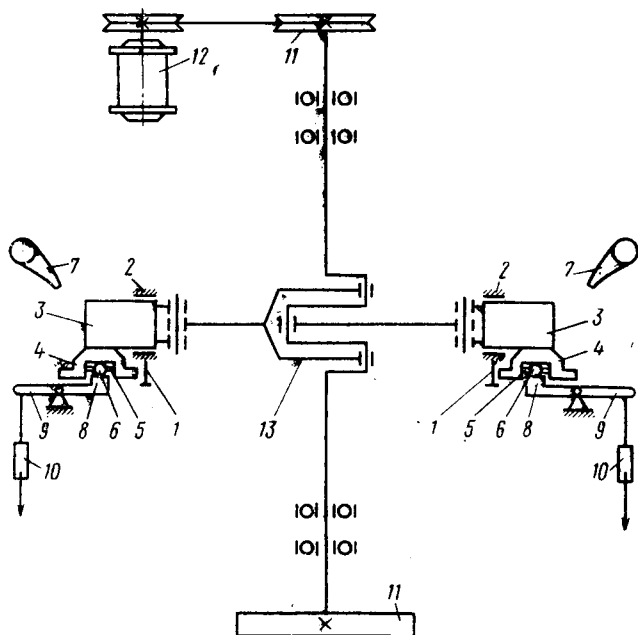


Рис. 1.5. Кинематическая схема станка резки полотнами

Для улучшения качества обрабатываемой поверхности полупроводниковых пластин, а также для увеличения производительности процесса резания металлическим режущим полотнам кроме обычных возвратно-поступательных движений сообщаются колебательные движения с малой амплитудой в направлении, перпендикулярном плоскости реза.

Резка с помощью алмазосодержащих дисков. Необходимость в повышении скорости резки и в уменьшении отходов полупроводниковых материалов обусловила поиск более производительных и экономичных методов. В качестве режущего инструмента стали

применять диски с внутренней и внешней режущей кромкой, армированные искусственными или природными алмазами.

Резку полупроводниковых материалов с помощью алмазосодержащих дисков с внутренней режущей кромкой производят на станках 2405.

Приспособление для крепления разрезаемой заготовки устанавливают на столе станка, который перемещается по направляющим станины с помощью гидравлического механизма, что дает возможность плавно менять величину подачи от значения, близкого к нулевому, до 700 мм/мин. В направлении, перпендикулярном направлению подачи, стол перемещается с помощью храпового механизма. Поворот храповика на 1 зуб смещает стол на 0,25 мм.

Разрезаемый слиток приклеивают с помощью шеллака или клея БФ-2 к установочной пластине и к поворотному приспособлению на столе станка. Это приспособление дает возможность менять положение слитка в горизонтальной и вертикальной плоскости в пределах $\pm 10^\circ$. Максимальный диаметр заготовки 40—42 мм.

В область резки подают охлаждающую жидкость. Расход жидкости 1,5—2 л/мин. В станке имеется бак с охлаждающей жидкостью и отстойники для сбора отходов разрезаемого полупроводникового материала. Внешний вид основной части станка для резки показан на рис. 1.6.

Алмазный диск (рис. 1.7, а) крепят к патрону, помещая его между кольцами со сферическими поверхностями и скрепляя эти кольца болтами. Между патроном и кольцами устанавливают прокладки из текстолита, которые предохраняют возможные разрывы диска при регулировке его натяжения (рис. 1.7, б).

Стойкость алмазных дисков зависит от режимов резания, рода обрабатываемого материала и степени натяжения диска. Процесс изнашивания рабочей поверхности алмазного диска характеризуется тремя периодами: 1) выкрашиванием из связки отдельных непрочно закрепленных алмазных зерен; 2) округлением вершин и расщеплением алмазных зерен, а также частичным скалыванием отдельных зерен по плоскостям спайности; 3) увеличением усталостных явлений в основе диска, зерне и связке.

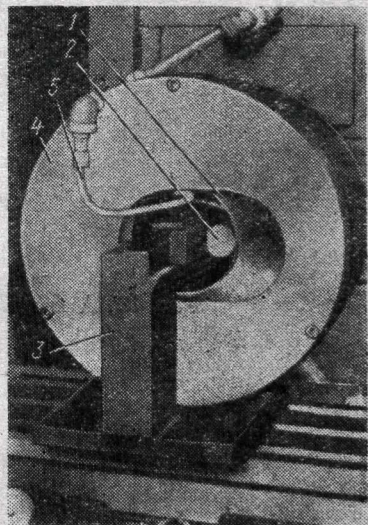


Рис. 1.6. Внешний вид основной части станка для резки алмазным диском:

1 — алмазный диск; 2 — слиток;
3 — держатель слитка; 4 — кожух;
5 — шланг

Величина стойкости алмазных дисков связана с основными технологическими факторами соотношением

$$G = \frac{C_G \cdot v^a}{s^b},$$

где v — скорость резания;
 s — скорость подачи;
 C_G — коэффициент, характеризующий материал;
 a, b — постоянные величины.

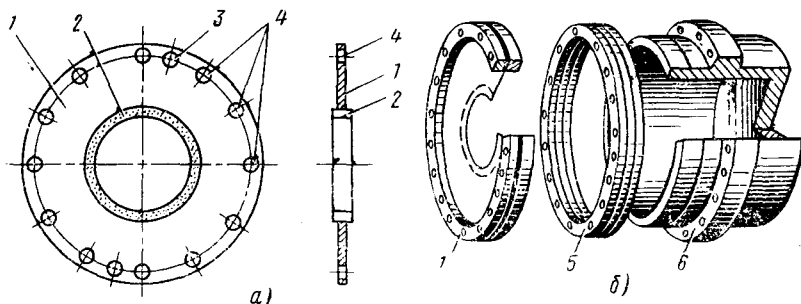


Рис. 1.7. Алмазный диск (а) и его крепление (б):

1 — диск; 2 — алмазная кромка; 3 — установочные отверстия; 4 — растяжные отверстия; 5 — прокладки; 6 — патрон шпинделя

Большое влияние на стойкость алмазных дисков оказывает величина натяжения их на шпиндель станка. Недостаточное натяжение диска приводит к заворачиванию режущей кромки, искажению формы отрезаемых пластин, поломке пластин, отклонению от плоскости ориентации пластин и т. п. Чрезмерное натяжение диска ведет к ускоренному его износу.

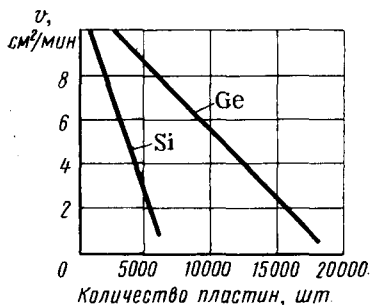


Рис. 1.8. График зависимости скорости съема материала от количества пластин

С увеличением скорости вращения алмазного диска возрастает производительность процесса резки. Однако имеется предел максимальной скорости вращения, обусловленный тремя основными факторами: возрастанием вибрации алмазного круга, увеличением температуры зоны резания и снижением срока службы алмазных дисков.

На рис. 1.8 приведена зависимость скорости съема материала от количества отрезанных пластин германия и кремния.

При резке слитка алмазным кругом на него действуют две составляющие силы: радиальная и тангенциальная. Эти силы зави-

сят от скорости вращения алмазного диска и скорости подачи разрезаемого образца. Радиальная составляющая силы направлена нормально к режущей кромке. Действие этой силы приводит к неустойчивости и изгибу алмазного диска, в результате чего на нем образуется выпуклость.

Тепловые явления, возникающие при резке слитка на пластины, значительно влияют на величину нарушенного слоя, остаточные напряжения, микронеровности, структурные изменения поверхности и износостойкость режущей кромки алмазного диска. Вследствие возникновения высоких температур

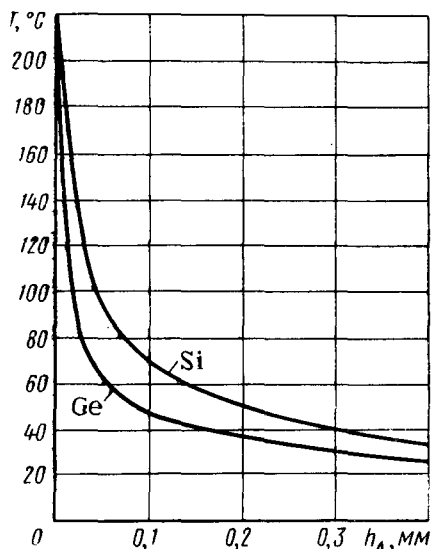


Рис. 1.9. График распределения температуры в слитке при резке

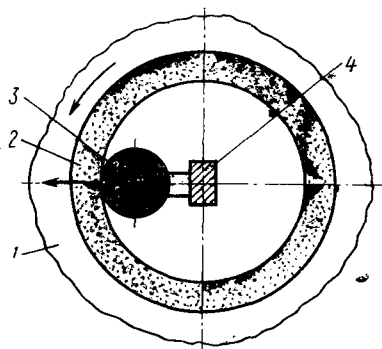


Рис. 1.10. Схема резки слитка на пластины алмазным диском с внутренней режущей кромкой:

1 — металлический диск; 2 — алмазная кромка; 3 — слиток; 4 — держатель слитка

в зоне резки, а также в результате резкой смены температур в этой зоне на поверхности отрезаемых пластин возникают термомеханические напряжения, которые приводят к появлению микротрещин в полупроводниковом материале. Количество тепла, выделяемое в процессе резки, можно определить по формуле

$$Q = P v A,$$

где P — тангенциальная составляющая силы резки;

v — линейная скорость внутренней режущей кромки алмазного диска;

A — тепловой эквивалент работы.

На рис. 1.9 приведены типичные графики распределения температуры в слитке полупроводникового материала при резке; по оси абсцисс отложено расстояние h_A от поверхности реза до любой точки в объеме слитка.

Резка слитков полупроводникового материала с помощью диска, армированного алмазами, показана на рис. 1.10. Резку слитка на пластины производят внутренней частью диска, где нанесено алмазное покрытие. Толщина диска отечественного производства составляет 0,10—0,11 мм, толщина диска вместе с алмазным покрытием 0,18 мм. С помощью этого метода, меняя условия резки, можно отрезать пластины толщиной до 0,2 мм.

Чистота поверхности пластин, отрезанных алмазным диском, может достигать $\nabla 8$ — $\nabla 9$. Отклонение толщины отрезанных пластин от номинального заданного значения имеет следующие предельные величины: у германия — $+0,015 \div -0,03$ мм, у кремния — $+0,025 \div -0,04$ мм.

Метод резки с помощью алмазных дисков в отличие от метода резки абразивом с помощью полотен примерно в 2,5—3 раза производительней; при этом отход полупроводниковых материалов снижается примерно на 30—35%.

Технические данные полуавтомата для резки алмазным диском с внутренней алмазной кромкой 2405

Максимальный диаметр разрезаемого слитка	35 мм
Максимальная длина слитка	70 мм
Максимальная толщина отрезаемой пластины	0,6 мм
Минимальная толщина отрезаемой пластины	0,2 мм
Отклонение от задаваемой толщины	$\pm 0,03$ мм
Отклонение отрезаемой пластины на диаметре 35 мм:	
по плоскостности	0,015 мм
по параллельности	0,015 мм
Скорость вращения шпинделя	3000, 4000, 5000 об/мин
Внутренний диаметр отверстия алмазного диска	83 ± 1 мм
Ход стола:	
продольный	65 мм
поперечный	85 мм
Величина шага автоматической подачи	0,4—0,85 мм
Габаритные размеры	$970 \times 840 \times 1520$ мм ³
Вес	650 кг

Для резки слитков полупроводниковых материалов на пластины можно использовать также диски с внешней режущей кромкой. Этот метод не нашел широкого распространения из-за сравнительно больших отходов при резке слитков большого диаметра, из-за сколов, частой поломки дисков.

Метод резки дисками с внешней режущей кромкой используют при резке пластин на кристаллы. Резку производят набором алмазных дисков с общей длиной набора 150—700 мм. Скорость вращения шпинделя, на котором укрепляют алмазные диски,

800—1000 об/мин, ширина реза — 0,5 мм. Требуемые размеры кристаллов обеспечивают подбором соответствующей толщины прокладочных колец.

Резку абразивом с помощью проволоки применяют для получения кристаллов квадратной и прямоугольной формы из пластин полупроводникового материала.

Отечественной промышленностью выпускаются станки двух видов:

1) станки, на которых скорость перемотки проволоки мала, но ролики, укрепленные на специальной вилке, кривошипно-шатунным механизмом приводятся в быстрое возвратно-поступательное движение;

2) станки, на которых образец режется с помощью проволоки, движущейся с большой скоростью между двумя роликами. Вольфрамовая проволока натягивается между двумя роликами с кольцевыми пазами, задающими шаг и тем самым необходимый размер кристаллов.

При резке на проволоку непрерывно подается абразивная суспензия, состоящая из смеси порошка карбида кремния М14 с водой в соотношении 1:3. Скорость резки зависит от свойств обрабатываемого материала, скорости движения проволоки и ее диаметра, от количества и величины зерен абразива. Диаметр проволоки обычно не меньше 0,08—0,1 мм в связи с ее малой механической прочностью, число двойных ходов достигает 1000 и более в минуту.

В некоторых случаях используют проволоку из нержавеющей или струнной стали, покрытую тонким слоем эпоксидной смолы (связки) и алмазной крошки с размером зерна 1—20 мкм. Общий диаметр проволоки после нанесения алмазной крошки и соответствующей термообработки не превышает 150 мкм. Такой проволокой можно резать слитки на пластины и пластины на кристаллы. Иногда используют проволоку из магнитного материала и абразивный порошок из феррита.

Движущаяся проволока воздействует на находящийся в суспензии абразивный порошок и шлифует паз в пластине, разрезая его на кристаллы. Для предотвращения обрыва проволоки за счет истирания в процессе резки ее непрерывно перематывают через роликовый механизм с одной катушки на другую.

В станках другого типа отсутствует шатунный механизм, и резка в этом случае происходит за счет быстрой перемотки проволоки с одного ролика на другой.

Кинематические схемы станка для резки проволокой приведены на рис. 1.11,а и б. На рис. 11,а проволока наматывается на ролики, которые находятся на механизме 1, совершающем возвратно-поступательное движение, обеспечиваемое шатуном 2. Проволока перематывается через роликовый механизм с катушки 3 на катушку 5 посредством тормозного диска 4 и механизма подачи 6.

На рис. 1.11,б проволока с высокой скоростью перематывается с одного ролика на другой, проходя через слиток полупроводни-

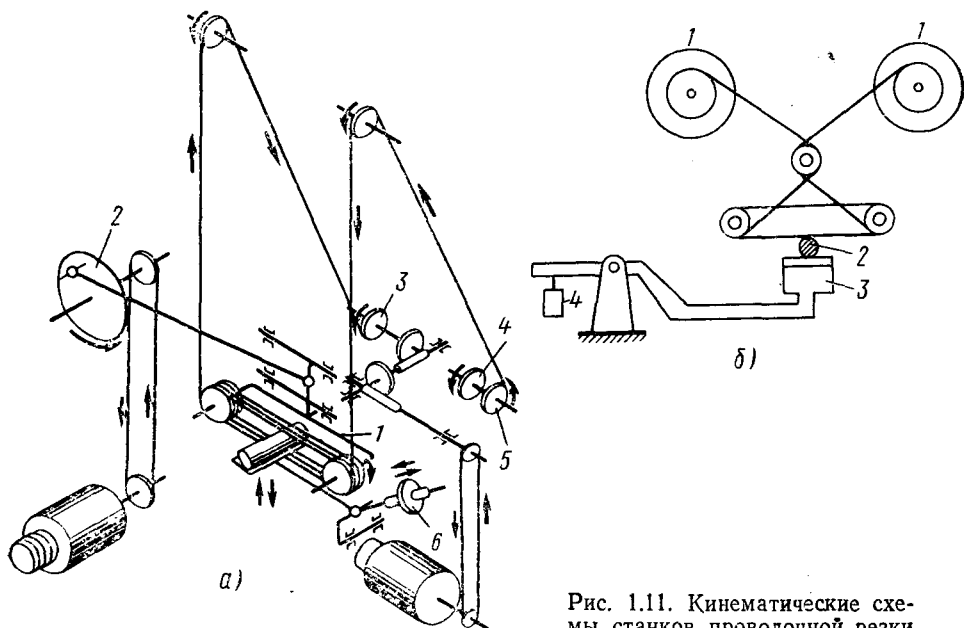


Рис. 1.11. Кинематические схемы станков проволоочной резки

кового материала 4 и ролик 3. С помощью столика и груза слиток прижимается с определенным давлением к режущей проволоке. В область резания по шлангу 2 подается абразивная суспензия.

Станки для резки на кристаллы с помощью проволоки отличаются большой производительностью, достаточной точностью и высоким качеством реза.

Ультразвуковая резка абразивом полупроводниковых материалов имеет ряд существенных преимуществ по сравнению с описанными методами: возможность обработки сверхтвердых и хрупких материалов, легкость выполнения фасонных изделий, достаточную точность и чистоту обработки.

Для резки полупроводниковых материалов ультразвуковым способом используют способность ферромагнитных материалов под действием магнитного поля изменять свои геометрические размеры.

Первые разработки оборудования и технологии ультразвукового резания относятся к 1951—1952 гг.; в настоящее время имеются станки различных типов, размеров, мощности и назначения: 4772А, 4773, 4773А, МЭ-34, С-15.

На рис. 1.12 показано устройство станка 4773А для ультразвукового резания. Ток от генератора ультразвуковых колебаний с частотой 15—70 кГц подается на обмотку электрического преобразователя-вибратора 1. Здесь электромагнитные колебания превращаются в упругие механические колебания, которые усиливаются с помощью концентратора 2 и поступают на режущий ин-

струмент 3. В зону обработки насосом 4 непрерывно подается из бака 5 абразивная суспензия под давлением.

Разрезаемая деталь 6 располагается на рабочем столе станка 7. С помощью груза 8 ползун станка 9 уравнивается. Груз 10 обеспечивает необходимый постоянный прижим режущего инструмента к обрабатываемой детали.

Функцией вибратора является приведение рабочего торца инструмента в колебательное движение. Источником питания акустических головок ультразвуковых станков служит ламповый генератор, высокочастотная энергия которого в вибраторе (из никелевого сплава) преобразуется в энергию упругих колебаний. Для осуществления резки амплитуда получаемых колебаний обычно оказывается недостаточной. Поэтому к торцу преобразователя

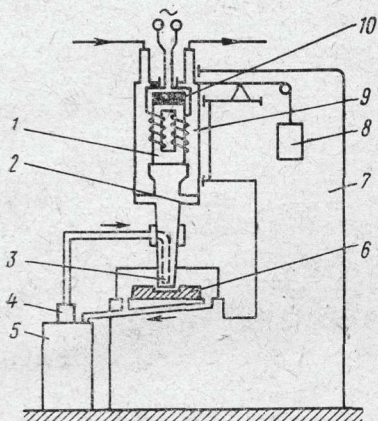


Рис. 1.12. Устройство станка для ультразвукового резания

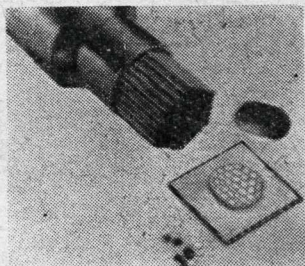


Рис. 1.13. Режущий инструмент для ультразвукового станка

подсоединяют концентратор, на котором и крепится режущий инструмент.

Для получения на вибраторе большой амплитуды колебаний его делают резонансным, т. е. размер его в направлении распространения колебаний берут равным или кратным половине длины волны выбранной частоты. Концентратор выполняют также резонансным, т. е. он является объемным резонатором, настроенным на частоту вибратора (это очень важно для максимального отбора акустической энергии у вибратора). Форму концентратора выбирают такой, чтобы на его выходном конце амплитуда колебаний увеличивалась в необходимой пропорции к амплитуде колебаний поверхности преобразователя.

В качестве абразива применяют карбид бора, алмазный порошок, электрокорунд и карбид кремния. Обычно концентрацию абразивного порошка выбирают равной 30—40% по весу к жидкой части суспензии.

При ультразвуковой резке происходит разрушение зерен абра-

жива и режущего инструмента за счет кавитационной эрозии и истирания. Поэтому инструменты изготавливают из дешевых малоуглеродистых нетермообработанных марок стали ст. 20, ст. 35.

На рис. 1.13 показан режущий инструмент для ультразвукового вырезания круглых заготовок. Для резки квадратов и прямоугольников используют инструмент, режущая часть которого представляет собой набор параллельных лезвий. Ультразвуковая обработка не нашла применения для резки слитков на пластины, так как при достаточно большой глубине реза его форма становится клиновидной. Клиновидность почти незаметна при резке тонких пластин на длине реза около 1 мм, но на длине 10—30 мм вызывает заметную непараллельность граней пластин.

Резка пластин на кристаллы методом термоудара. При использовании этого метода на поверхности полупроводниковой пластины появляется сетка из отдельных рисок толщиной 0,13 мм. Нанесение сетки из рисок производят с помощью вольфрамовых проволок диаметром 0,1 мм (или лент толщиной до 0,012 мм), которые накладываются на поверхность пластины полупроводника. Через эти проволочки пропускают импульс тока большой величины. В результате резкого нагрева и охлаждения приповерхностных областей полупроводника происходит возникновение локальных термомеханических напряжений, по которым в дальнейшем происходит разламывание пластин на отдельные кристаллы.

Нанесение сетки из рисок можно производить с помощью острофокусированного электронного луча. Режим воздействия электронным лучом можно выбрать таким образом, что поверхность пластины в месте действия луча будет деформироваться или слегка оплавляться. Это приведет к возникновению локальных термомеханических напряжений, по которым происходит разламывание пластин на кристаллы.

Скрайбирование. Этот метод нашел наиболее широкое применение для деления пластин на кристаллы квадратной и прямоугольной формы. Сущность метода заключается в том, что на поверхности полупроводниковой пластины алмазным резцом-скрайбером наносят риски в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Под рисками образуются напряженные области. Пластину подвергают слабому механическому воздействию, в результате которого она разламывается на отдельные кристаллы.

Для скрайбирования используют станки ЖК10-11, ШАР-0160001 СМ-23А, ЭМ-201.

Схема станка для скрайбирования приведена на рис. 1.14. Разрезаемая пластина 2 вакуумным присосом прижимается к столу 3 подвижного механизма 4. Алмазный резец 1 с помощью кривошипно-шатунного механизма совершает возвратно-поступательное движение и процарапывает на поверхности пластины ровную канавку. Затем столик с пластиной автоматически передвигается на величину стороны будущего кристалла, и при возвратном движении резец оставляет канавку, параллельную первой. После про-

хождения алмазным резцом всей площади пластины она поворачивается на 90° , и процесс повторяется.

К преимуществам данного метода следует отнести: незначительные потери материала, простоту метода, малые затраты времени, отсутствие клеев для крепления пластин и различных загрязняющих веществ.

Оптимальными условиями для резки пластин на кристаллы можно считать следующие: толщина пластин 125 мкм, минимальный шаг резки 0,4 мм для германия и 0,5 мм для кремния; глубина рисок после алмазной резки 7 мкм; нагрузка резца на пластину

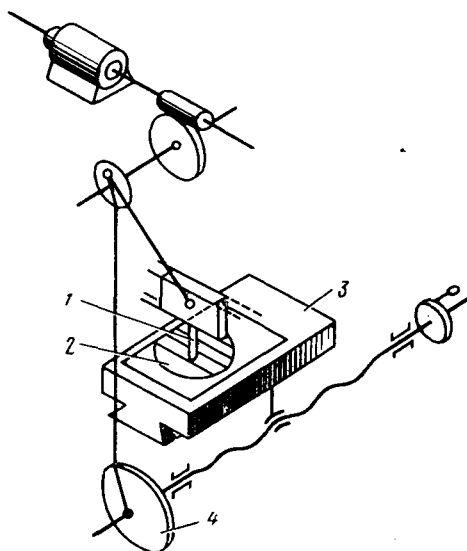


Рис. 1.14. Кинематическая схема станка резки алмазным резцом

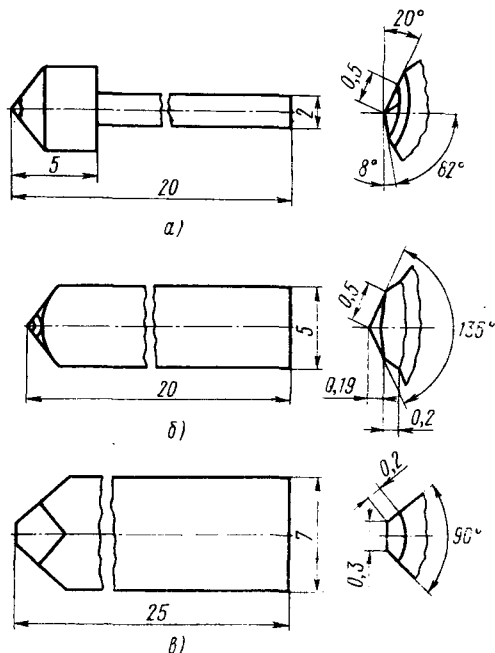


Рис. 1.15. Устройство алмазных резцов

тину равна 0,2 н для кремния и 0,1 н для германия; скорость нанесения рисок 0,025 м/мин для кремния и 0,03 м/мин для германия.

Минимальный размер кристаллов h и толщина исходной пластины l связаны следующим соотношением: $h = kl$, $k = 4$ для Si и $k = 32$ для Ge.

Технические данные установки для скрайбирования ЭМ-201

Диаметр рабочей поверхности	65 мм
Перемещение стола	55×55 мм ²
Число двойных ходов в минуту	10
Диапазон шагов	0,01—9,99 мм

Точность шага	$\pm 0,005 \text{ мм}$
Накопленная ошибка шага	$\pm 0,01 \text{ мм}$
Параллельность нанесенных линий на длине 30 мм	0,04 мм
Нагрузка резца на пластину	2,45 н
Габаритные размеры	$960 \times 640 \times 1155 \text{ мм}^3$
Вес	160 кг

Для скрайбирования применяют резцы с алмазным наконечником. В зависимости от геометрической формы режущей части алмазного наконечника все резцы делятся на три основных типа (рис. 1.15): с рабочей частью в виде трехгранной пирамиды (рис. 1.15,а), четырехгранной пирамиды (рис. 1.15,б) и четырехгранной усеченной пирамиды (рис. 1.15,в).

Геометрические параметры режущей части алмазных резцов определяются физико-механическими свойствами обрабатываемого материала. Так, для резки пластин из германия толщиной от 100 до 250 мкм применяют резцы с режущей частью в виде трехгранной пирамиды, а для резки пластин из кремния толщиной от 250 до 500 мкм — резцы с алмазным наконечником, имеющим форму четырехгранной пирамиды с острой вершиной.

Широкое распространение получили резцы с алмазным наконечником в виде четырехугольной усеченной пирамиды. Такой резец может производить резку любой из четырех заостренных граней.

Износостойкость алмазных резцов достаточно велика. Одним резцом можно разрезать до 30 пластин диаметров 30 мм на отдельные кристаллы размером $1,0 \times 1,0 \text{ мм}^2$.

Разламывание пластин после скрайбирования. Разламывание пластины полупроводникового материала после нанесения на ее поверхность рисунок является ответственным этапом технологического процесса.

Разламывание пластин с нанесенными на ее поверхность рисками основано на создании растягивающих усилий, которые вызывают появление трещин вдоль нанесенных рисок. В этом случае наиболее критичной является величина угла раскалывания. От величины этого угла зависит отклонения геометрических размеров разрезаемых элементов от номинала. Так, например, при толщине пластины 125 мкм и угле разламывания 79° и больше отклонение геометрических параметров отдельных элементов не превышает $\pm 25 \text{ мкм}$.

Применяют различные способы разламывания пластин на кристаллы. Так, например, после нанесения рисок пластины наклеиваются на фольгу из пружинной стали толщиной 100 мкм и разламываются путем сгибания листа по определенному радиусу. Преимущество этого способа заключается в том, что во время разламывания вся пластина получает нагрузку на растяжение. Недостаток способа — наличие лишней технологической операции отделения кристаллов от металлической ленты. Согласно другому

способу пластину с нанесенными рисками помещают между двумя листами фольги. Всю сборку располагают на мягкой подложке рисками вниз. Путем нажатия на обратную сторону пластины ее разламывают. Этот способ свободен от недостатка предыдущего, однако при этом возможны появления сколов в результате трения отдельных элементов друг о друга.

Наиболее распространенным является способ, когда пластину с рисками кладут на резиновую подложку и прокатывают сверху резиновым валиком в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Иногда пластины с рисками закрепляют между двумя листами клейкой бумаги; всю композицию пропускают между двумя ремнями по сложной кривой, имеющей несколько различных радиусов закругления. После разламывания кристаллы отделяются от бумаги с помощью растворителей.

Величина изгибающего напряжения, необходимого для разламывания пластин:

$$S = \frac{mh^2}{kbl^2} = \frac{m}{kb} \left(\frac{h}{l} \right)^2,$$

где m — изгибающий момент;

h — длина ребра кристалла, получаемого при скрайбировании;

b — ширина пластины;

l — толщина пластины;

k — коэффициент.

Величину $(h/l)^2$ в этом выражении называют показателем способности к разламыванию. Оптимальная величина этого показателя должна быть равна 24.

В ряде случаев удобно пластины с рисками помещать в конверт из пластичного материала. Конверт вакуумно-плотно закрывается и из него откачивается воздух. В результате откачки конверт плотно прижимается к пластинам и разламывает их по рискам. Преимуществом способа является то, что кристаллы остаются в том же порядке после снятия вакуума и вскрытия конверта.

§ 1.6. Шлифовка полупроводниковых материалов

После проведения процесса резки слитков на пластины обязательной технологической операцией является шлифовка, необходимая для получения плоскопараллельности сторон пластин, точного соответствия заданным размерам и уменьшения глубины нарушенного слоя.

Для получения хороших результатов шлифовки необходимо выполнять следующие требования:

1) шлифовку нужно проводить в чистых, свободных от пыли помещениях и под защитными кожухами с избыточным давлением очищенного воздуха;

2) все установки для шлифовки должны быть разделены по виду обработки и типу используемого абразива;

3) все материалы (шлифовальники, абразивные порошки) должны быть тщательно рассортированы и храниться в отдельных герметичных скафандрах.

Шлифовальные станки полупроводниковых пластин и кристаллов (рис. 1.16) состоят из следующих основных элементов. На шлифовальном круге, изготовляемом из стекла или чугуна, имеются три круглых сепаратора-кассеты с отверстиями (гнездами) для загрузки полупроводниковых пластин. На круг в процессе шлифовки непрерывно подается абразивная суспензия. При вра-

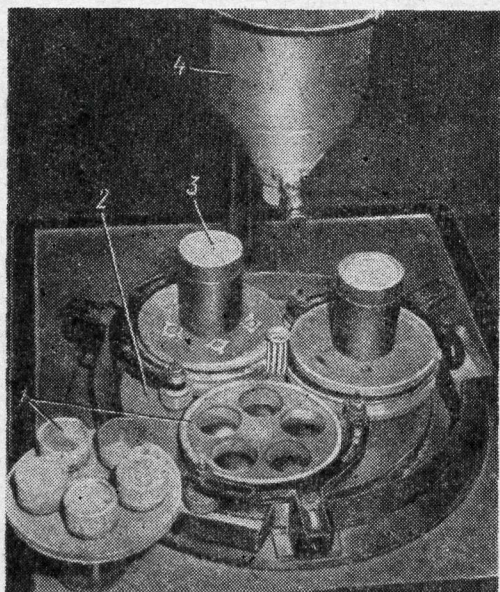


Рис. 1.16. Станок для шлифовки пластин:

1 — сепаратор-кассета, 2 — шлифовальник, 3 — груз, 4 — капельница абразива

щении шлифовального круга сепараторы-кассеты вращаются вокруг своей оси с помощью роликов под действием силы, возникающей за счет различной окружной скорости по радиусу шлифовальника. Пластины, загруженные в гнезда сепаратора-кассеты, совершают при шлифовке сложное движение, которое складывается из вращения шлифовального круга, вращения сепаратора-кассеты и вращения пластины внутри гнезда сепаратора. Такое движение дает возможность снимать слой материала равномерно со всей плоскости пластины с достаточной для полупроводниковых приборов плоскопараллельностью и точностью

Разброс по толщине на пластине $\varnothing = 40$ мм составляет 0,005—0,008 мм, а разброс по плоскопараллельности — 0,003—0,004 мм.

Во время шлифовки обрабатывается сторона пластины, обращенная к шлифовальнику. Поэтому для двусторонней шлифовки пластины переворачивают. Контроль величины сошлифованного слоя производят с помощью упоров и индикатора часового типа. Упор, коснувшись верхней поверхности сепаратора-кассеты, прекращает передачу нагрузки на пластины и воздействует на сепаратор, шлифовка пластин прекращается. Заменяв упор индикатором, контролируют величину сошлифованного слоя.

Для шлифовки используют станки различных типов: ШП-200, ДП-300, ЖК14-08, СПШ-1, ЮФ7219000000.

Станок ЮФ7219000000 в отличие от перечисленных типов станков предназначен для одновременного двустороннего шлифования полупроводниковых пластин свободным абразивом.

Технические данные станка ЮФ7219000000

Размер шлифуемых пластин:

максимальный диаметр	45 мм
толщина	0,1—9,0 мм

Количество одновременно шлифуемых пластин 5 шт.

Плоскопараллельность на диаметре пластин 40 мм 0,002

Чистота обработки поверхности $\nabla 8$

Габаритные размеры 575×486×950 мм³

Вес 150 кг

Процесс шлифовки. При вращении шлифовального круга и сепаратора-кассеты с пластинами зерна абразивной суспензии вдавливаются одними своими гранями в стекло (чугун), а другими — в полупроводниковую пластину. В местах соприкосновения с зернами абразива на поверхности полупроводниковой пластины возникают микротрещины, максимальная глубина которых зависит от природы и величины выбранных абразивных зерен. Когда в результате многократных воздействий зерен весь поверхностный слой покроется трещинами, последующие перемещения зерен по тем же местам будут способствовать извлечению осколков полупроводника. Благодаря этим воздействиям образуются так называемые выколки, характеризующие собой начало процесса шлифовки. Множество расположенных рядом выколок образуют шероховатую поверхность, характерную для шлифованной поверхности полупроводниковых кристаллов. Глубина выколок в зависимости от применяемого абразивного порошка составляет 3—30 мкм.

Производительность и качество шлифовки. Процесс шлифовки материалов характеризуется двумя факторами: производительностью, т. е. количеством материала, удаляемого в единицу времени, и качеством отшлифованной поверхности.

Производительность процесса шлифовки зависит от веса или толщины материала, удаляемого в единицу времени; качество шлифованной поверхности определяется толщиной нарушенного слоя, состоящего из рельефного и расположенных под ним трещиноватого и напряженного слоев.

Толщину рельефного слоя шлифованной поверхности измеряют с помощью профилографа ИЗП-5 в различных точках поверхности образца. Кроме того, параметрами, влияющими на производительность и качество шлифовки, являются природа абразива и жидкости, размеры зерен, концентрация абразивных зерен в суспензии и скорость ее подачи, давление на шлифуемый образец, скорость вращения и материал шлифовальника. Изменяя их сочетание, можно управлять процессом шлифовки, замедлять его или ускорять, получать пластины с большой и малой глубиной выколки.

Оптимальный расход абразивного порошка пропорционален величине его зерен и увеличивается с уменьшением микротвердости шлифуемых монокристаллов. Зависимость производительности процесса шлифовки германия и кремния от величины зерен абразивных материалов с различной микротвердостью показана на рис. 1.17. Сошлифовка полупроводникового материала зависит от прочности абразивных зерен: так, при одинаковой величине зерен более глубокие выколки дают абразивные материалы с большей микротвердостью. Поэтому в зависимости от свойств обрабатываемого материала, степени чистоты поверхности и целевого назначения необходимо выбирать абразив соответствующей дисперсности. Практически первоначально шлифовку кристаллов полу-

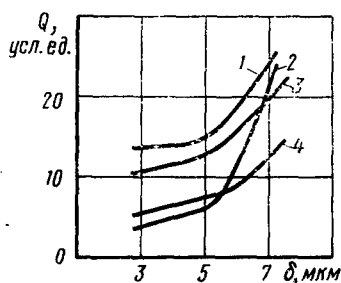


Рис. 1.17. Зависимость производительности процесса шлифовки от величины зерен абразива:

Q — скорость съема; δ — размер зерна абразива; 1 — сталь; 2 — медь; 3 — стекло; 4 — латунь

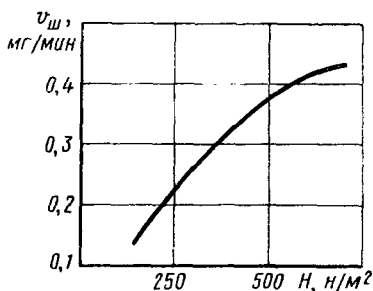


Рис. 1.18. Зависимость скорости шлифовки от микротвердости абразивных материалов

проводникового материала осуществляют грубодисперсными порошками карбида бора, а затем — доводят до необходимых размеров и требуемой чистоты поверхности порошками электрокорунда или карбида кремния с зернистостью M14, M10, M5.

При шлифовке микротвердость применяемого абразива должна быть в 2—3 раза выше микротвердости шлифуемого материала. Этому требованию удовлетворяют электрокорунд, карбид кремния зеленый, карбид бора, алмаз.

В табл. 1.5 приведены значения отношения микротвердости абразива к микротвердости полупроводникового материала.

Скорость шлифовки в значительной степени зависит от микротвердости абразивных материалов.

На рис. 1.18 приведен график зависимости скорости шлифовки $v_{ш}$ полупроводникового материала от микротвердости абразива.

Наибольшую производительность дают высокотвердые микропорошки КЗ* и КБ с зернистостью 20 мкм. Однако чем тверже абразив, тем более глубокий рельеф и нарушенный слой они оставляют в полупроводниковом материале при одной и той же величине

Таблица 1.5

Отношение микротвердости абразива к микротвердости полупроводникового материала

Материал	ЭБ*	КЗ*	КБ*	Алмаз
Арсенид галлия	2,8	4,7	7,1	13
Германий	2,3	3,3	5,3	11,0
Кремний	1,8	2,6	4,1	8,6

* ЭБ — электрокорунд белый, КЗ — карбид кремния зеленый, КБ — корунд белый.

не зерен. Поэтому на конечных операциях шлифовки рекомендует-ся применять микропорошки электрокорундовой группы.

Порошок с зернистостью М14 применяют при шлифовке в основном для выравнивания пластин по толщине и выведения клина, полученного при резке слитка на пластины. Шлифовку при этом производят без приклейки пластин к шлифовальным головкам. Окончательное шлифование проводят с использованием порошков с зернистостью М10 и М5 с обязательной приклейкой к шлифовальным головкам.

Скорость съема материала и класс получаемой чистоты при шлифовке различными порошками приведены в табл. 1.6.

Таблица 1.6

Скорость съема материала и класс чистоты обработанной поверхности полупроводника

Наименование операции	Скорость съема материала, мм/мин			Класс чистоты обработанного материала		
	Si	Ge	GaAs	Si	Ge	GaAs
Шлифование на порошке КЗМ14 . . .	2,5	4	5	▽7	▽7	▽8
Шлифование на порошке КЗМ10 . . .	1	3	3,5	▽8	▽8	▽9
Шлифование на порошке ЭБМ5 . . .	0,15	0,4	0,7	▽10	▽10	▽10

§ 1.7. Полировка полупроводниковых материалов

Для того чтобы уменьшить повреждения поверхности, оставшиеся после шлифовки, пластины полупроводника подвергают полировке.

Механическую полировку полупроводниковых материалов проводят оптическим или металлографическим методом.

При оптической полировке абразивы — окись хрома, окись церия или смеси окисей других редкоземельных металлов —

применяют в виде водных суспензий, которые распыляют на полированную плоскость станка для полировки оптических стекол.

Металлографическую полировку производят на дисках, обтянутых шелком, нейлоном, батистом, фланелью, замшей, фетром или велюром, с применением в качестве абразива порошков алмаза, окиси алюминия и окиси хрома.

Различие между оптической и металлографической полировкой заключается в механизме удаления следов предшествующей обработки. При металлографической полировке доминируют эффекты резания, а при оптической полировке — тепловые эффекты. Обнаружено, что после механической полировки зоны деформации залегают послойно. Глубина каждого слоя зависит от вида доминирующих эффектов полировки: резания или нагрева. Однако независимо от того, насколько тщательно проводилась механическая обработка, некоторая деформация поверхности остается. Глубина нарушенного слоя для механически полированного германия — порядка 1,5 мкм, для кремния — 0,7—1,0 мкм.

При полировке окисью алюминия используют две модификации α и γ в виде сухого микропорошка или пасты. Модификация α - Al_2O_3 имеет гексагональную кристаллическую структуру и среднюю величину зерна 0,3 мкм; модификация γ - Al_2O_3 — кубическую структуру с размером зерна около 0,05 мкм. Для полировки берут 50—200 г порошка Al_2O_3 , разведенного в воде. При добавлении в абразивную суспензию небольшого количества HCl до получения величины $pH=8,3$ —10 окись алюминия агломерирует. Перед полировкой в суспензию добавляют небольшое количество гидроокиси натрия или калия. Процесс полировки проводят в две стадии — сначала на порошке α - Al_2O_3 , затем на порошке γ - Al_2O_3 . Скорость вращения полировального круга не должна превышать 120 об/мин.

При полировке окисью кремния используют 75—200 г порошка, разведенного в 1 л деионизованной воды. В эту суспензию добавляют NaOH до получения величины $pH=10$. Скорость вращения полировального круга может быть выбрана в пределах 40—200 об/мин, а нагрузка на пластины в пределах $(2-5) \cdot 10^4 \text{ н/м}^2$. Суспензия должна подаваться непрерывно со скоростью 10 см³/мин.

В качестве полирующего абразивного материала могут быть использованы окислы циркония, церия и железа, а также различные смеси этих окислов. В качестве щелочных соединений применяют гидроокиси и карбонаты щелочных металлов (NaOH , Na_2CO_3 , $\text{Ca}(\text{OH})_2$).

Полирующим составом может служить раствор, который непрерывно смачивает поверхность полупроводниковых пластин и содержит избыточное количество ионов меди или серебра и ионов фтора. Величина pH раствора не должна превышать 7. В процессе полировки на поверхность полупроводникового материала осаждается металлическая медь или серебро. Пластина полупроводника непрерывно притирается твердой поверхностью полировального

круга. Скорость полировки зависит от концентрации ионов меди или серебра.

На рис. 1.19 приведен график зависимости скорости полировки кремния от концентрации $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$. На рис. 1.20 показана зависимость скорости полировки кремния от величины pH раствора $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$.

Процесс полировки состоит из трех основных этапов.

Первый этап полировки заключается в следующем. На стеклянный диск натягивается мягкий материал (батист) с помощью металлических пальцев. Поверхность батиста смачивается маслом МБП. На вспомогательный стеклянный диск диаметром 150 мм наносят алмазный порошок АСМЗ в количестве одного карата.* На этот же диск наносят несколько капель масла и растирают алмазный порошок по всей поверхности стеклянного диска другим

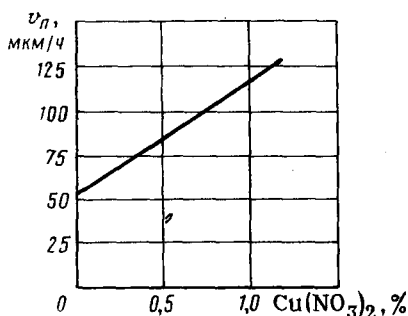


Рис. 1.19. Зависимость скорости полировки от концентрации $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$

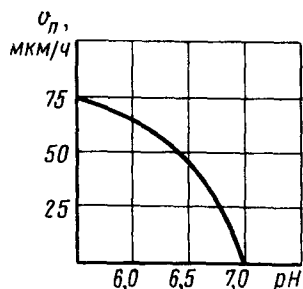


Рис. 1.20. Зависимость скорости полировки от величины pH

таким же диском до полного распределения порошка по всей поверхности дисков. После этого поочередно каждый диск переносят на батистовый полировальный и втирают алмазный порошок по всей его поверхности. Втирание производят до тех пор, пока весь алмазный порошок не перейдет на поверхность полировального.

На приготовленный таким образом полировальный помещают полировальные головки с приклеенными на них полупроводниковыми пластинами. Нагрузка на полупроводниковые пластины устанавливается равной $5,5 \cdot 10^3 \text{ н/м}^2$, а скорость вращения полировальника 30 об/мин.

Второй этап полировки — это смена материала полировального. Для этого на стеклянный полировальный натягивается велюр, смоченный горячей водой. На поверхность велюра наносят тем же способом слой масла МБП и алмазный порошок АСМ1. Полировальные головки с полупроводниковыми пластинами, прошедшими

* Вес одного карата равен приблизительно 0,2 г.

первый этап полировки, помещают на велюровый полировальныйник, и процесс полировки продолжается. Режим полировки: нагрузка на пластины $9,8 \cdot 10^3 \text{ н/м}^2$, скорость 30 об/мин.

Третий этап полировки заключается в том, что на вновь приготовленный полировальныйник из велюра наносят мягкой кисточкой окись хрома. Полировальные головки с полупроводниковыми пластинами, прошедшими второй этап полирования, обрабатывают также окисью хрома.

Для полировки используют окись хрома двух сортов: грубую с размером зерна 0,6—0,8 мкм, полученную путем восстановления бихромата калия серой, и тонкую с размером зерна 0,2—0,4 мкм, полученную в результате термического разложения бихромата аммония. Грубую окись хрома применяют на начальном этапе полировки, а тонкую — на окончательном этапе.

Последний этап полировки имеет большое значение — он дает возможность удалить так называемый алмазный фон с поверхности пластин и значительно уменьшить величину нарушенного слоя.

Для обработки указанным методом 1000 пластин необходимо затратить 50 карат алмазного порошка АСМЗ и 16 карат АСМ1.

Широкое применение нашли также полировальные пасты на основе синтетических алмазов АПЗН, АП2Н, АП1Н. Применение алмазных паст по сравнению с алмазными порошками повышает производительность процесса в 10 раз. В качестве смачивающих жидкостей для алмазных паст используют спирт, скипидар или чашевое масло МБП-12.

Для полировки можно использовать тугоплавкие соединения W_2B_5 , ZrC , Mo_2B_5 , ZrB . Высокие результаты дает применение абразивных порошков из этих соединений.

Все процессы полировки осуществляют на станке ЖК 14-09.

Технические данные станка для полировки ЖК14-09

Максимальный диаметр пластин	45 мм
Диаметр:	
шлифовальника	384 мм
головок	174 мм
Скорость вращения шлифовальника	0—46 об/мин
Число одновременно устанавливаемых головок	3
Предел регулирования времени шлифовки	8—240 мин
Подача абразива	60—80 капель/мин
Габариты	730×648×970 мм ³
Вес	225 кг

§ 1.8. Качество приповерхностного слоя полупроводника после механической обработки

Электрические характеристики полупроводниковых приборов существенно зависят от степени совершенства поверхности пластин после механической обработки. Несовершенства кристаллической

структуры поверхности пластин снижают время жизни носителей заряда, неблагоприятно сказываются на процессах сплавления, диффузии, эпитаксии и значительно повышают токи утечки.

Несовершенства кристаллической решетки полупроводника после резки, шлифовки и полировки обнаруживаются в тонком поверхностном слое, называемом поврежденным или нарушенным.

Толщина этого механически нарушенного слоя является одним из критериев качества обработанной поверхности полупроводника.

Результаты исследований показали, что наибольшая глубина залегания нарушенного слоя имеет место при резке слитка на пластины. Процессы шлифовки и полировки пластин приводят к образованию нарушенного слоя того же характера, но менее глубокого по сравнению с процессом резки.

Структура нарушенного слоя имеет сложное строение и может быть разделена по толщине на три различные зоны. Первая зона представляет собой нарушенный рельефный слой, состоящий из хаотически расположенных выступов и впадин с углами порядка $150-170^\circ$. Далее расположена вторая (самая большая) зона, которая характеризуется одиночными выколками и идущими вглубь трещинами, начинающимися от неровностей рельефа (трещиноватый слой). Третья зона представляет собой монокристалл без механических повреждений, но имеющий упругие деформации (напряженный слой). Толщину нарушенного слоя можно определить приближенно по формуле:

$$F = k\delta,$$

где $k=1,7$ для Si, $k=2,2$ для Ge; δ — размер зерна.

Толщина нарушенного слоя зависит от диаметра зерна абразивного порошка, а также от метода обработки, природы обрабатываемого полупроводникового материала, кристаллографической плоскости, по которой проводится механическая обработка, режима механической обработки и давления на полупроводниковый материал при механической обработке (см. табл. 1.7).

Различные методы обработки полупроводниковых материалов одним и тем же абразивным порошком дают разные результаты по величине нарушенного слоя. Максимальные величины нарушенных слоев получают при резке полупроводниковых материалов металлическими полотнами.

Процесс тонкой полировки дает минимальные величины нарушенных слоев. Различие физико-механических свойств полупроводниковых материалов (см. табл. 1.8) оказывает существенное влияние на толщину нарушенного слоя.

Наименьшие повреждения приповерхностного слоя имеют место у кремния; более значительные — у германия.

Глубина нарушенного слоя при данной абразивной обработке зависит еще от ориентации исходного полупроводникового материала. Наименьшая глубина нарушенного слоя имеет место на поверхности, совпадающей с плоскостью (111), и несколько увеличенная на поверхностях, совпадающих с плоскостями (100), (110).

Величина нарушенного слоя при обработке

Способ механической обработки	Германий		Кремний	
	Максимальный нарушенный слой, $\mu\text{км}$	Минимальный нарушенный слой, $\mu\text{км}$	Максимальный нарушенный слой, $\mu\text{км}$	Минимальный нарушенный слой, $\mu\text{км}$
Резание слитка на пластины полотнами с абразивом КЗМ14	130	70	50	30
Резание слитка на пластины алмазным диском со скоростью, об/мин :				
3000	15	12	10	8
4000	20	15	20	10
5000	50	30	30	15
Шлифовка пластин на порошке КЗМ14	80	60	35	20
Шлифовка пластин на порошке КЗМ10	40	25	15	10
Шлифовка пластин на порошке ЭБМ5	30	20	10	6
Шлифовка пластин на порошке АСМ3	3	2	2	1
Шлифовка пластин на порошке АСМ1	1	0,5	0,5	0,2
Полировка пластин тонкой окисью хрома на мягком полировальнике	0,5	0,2	0,2	0,1

Таблица 1.8

Физико-механические свойства основных полупроводниковых материалов

Свойства	Германий	Кремний	Арсенид галлия
Модуль сдвига, н/м^2	412	559	353
Модуль Юнга, н/м^2	1815	1431	893
Коэффициент Пуассона	0,21	0,28	0,29
Микротвердость, н/м^2	$8,27 \cdot 10^9$	$10,25 \cdot 10^9$	$6,89 \cdot 10^9$
Микротвердость на отрыв, н/м^2	$1,66 \cdot 10^9$	$3,94 \cdot 10^9$	$1,85 \cdot 10^9$
Критерий хрупкости	4,4	2,0	3,0
Относительная поверхностная энергия, дж/м^2	0,280	0,650	0,181
Коэффициент объемной сошлифовываемости при взаимной обработке с кварцем	3,6	1,5	4,6

Режим механической обработки и особенно скорости резания и шлифования также влияют на величину нарушенного слоя. Так, например, изменение скорости резания алмазным диском с 3000 до 5000 *об/мин* приводит к увеличению толщины нарушенного слоя с 15 до 50 *мкм* для германия и с 12 до 30 *мкм* для кремния. Глубина нарушенного слоя пропорциональна величине приложенного к полупроводниковому материалу внешнего давления.

Для определения толщины нарушенного слоя существуют несколько методов.

Один из них заключается в последовательном травлении тонких слоев нарушенной области и контроле полученной поверхности на электронографе. Операцию проводят до тех пор, пока вновь полученная поверхность полупроводника будет иметь совершенную монокристаллическую поверхность.

Разрешающая способность данного метода лежит в пределах одного микрона. Разновидностью его является предварительное окисление механически обработанной поверхности и последующее травление полученного окисла в плавиковой кислоте. Этот метод применяют для определения тонких нарушенных слоев толщиной менее одного микрона.

Другой метод определения толщины нарушенного слоя основан на зависимости предельного тока анодного растворения полупроводникового материала от наличия дефектов на поверхности полупроводникового материала. Этот метод обладает высокой точностью.

Так как скорость растворения слоя с дефектами структуры выше, чем монокристаллического материала, то величина анодного тока при растворении пропорциональна этой скорости. Поэтому при переходе от растворения нарушенного слоя к растворению монокристалла будет наблюдаться резкое изменение как величины скорости растворения, так и величины анодного тока. По моменту резкого изменения анодного тока судят о величине нарушенного слоя.

Третий метод основан на том, что скорость травления полупроводникового материала с поврежденным слоем значительно больше скорости травления монокристаллического исходного материала. Поэтому толщину нарушенного слоя можно определить по моменту получения постоянной скорости травления материала.

ХИМИЧЕСКАЯ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ

§ 2.1. Механизм процесса травления

Процесс травления полупроводника состоит в растворении его поверхности при взаимодействии с соответствующими химическими реагентами: щелочами, кислотами, их смесями и солями. Наибольшее распространение получили две теории саморастворения полупроводников в травителях — химическая и электрохимическая.

Согласно химической теории растворение полупроводника происходит в две стадии: окисление приповерхностного слоя и растворение окисла. При травлении полупроводника этот процесс многократно повторяется. Следовательно, травитель состоит из сильного окислителя и растворителя. Для различных целей добавляются ингибиторы (замедлители реакций) или катализаторы.

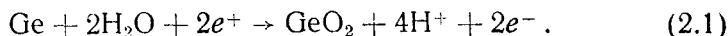
Согласно электрохимической теории взаимодействие между полупроводником и травителем обусловлено тем, что на поверхности полупроводника существуют анодные и катодные микроучастки, между которыми возникают локальные токи. На анодных участках полупроводник переходит в раствор, на катодных участках происходит восстановление окислителя. Если процесс травления не селективный, т. е. происходит равномерное травление по всей поверхности, то микроаноды и микрокатоды непрерывно меняются местами. Если микроанод много больше сопряженного микрокатода, то на его месте развивается ямка травления. При обратном соотношении микроанод становится бугорком. Первое условие встречается при растворении границ зерен и линий дислокаций.

Травление германия. Одним из сильных окислителей германия является азотная кислота. Плавиковая кислота хорошо растворяет двуокись германия. Эти кислоты входят в состав большого класса травителей, называемых кислотными. Одним из первых (исторически) и наиболее употребительным является состав СР-4 (в латинской транскрипции), который состоит из азотной, плавиковой и ледяной уксусной кислот, взятых в соотношении 5 : 3 : 3 объемных частей, и 0,06 частей брома.

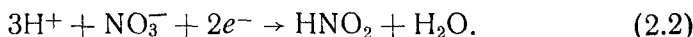
Наличие брома ускоряет реакцию растворения, но скорость травления сильно возрастает и ее трудно регулировать. С целью ограничения скорости травления до приемлемых значений в этот состав добавляют уксусную кислоту. Она обладает по сравнению с водой меньшей диэлектрической проницаемостью и способна сама диссоциировать, что уменьшает диссоциацию азотной кислоты. Кроме того, диссоциация уксусной кислоты дает более высокую

концентрацию протонов (H^+), чем диссоциация воды, что также подавляет диссоциацию азотной кислоты. Диссоциация молекул плавиковой кислоты также уменьшается в присутствии уксусной кислоты.

С точки зрения электрохимической теории на поверхности пластины германия протекают две реакции: анодная, обусловленная переходом ионов германия в раствор, и катодная, обусловленная восстановлением азотной кислоты. Анодная реакция происходит с присоединением двух дырок и отдачей двух электронов:



Катодная реакция совершается с присоединением двух электронов:



Существование этих реакций объясняет ход кривых скоростей растворения германия в чистой азотной кислоте, представленных на рис. 2.1.

Без перемешивания при концентрации азотной кислоты менее 6 г-экв/л скорость растворения возрастает пропорционально произведению концентраций азотной и образующейся в соответствии с формулой (2.2) азотистой кислот в растворе. При концентрации азотной кислоты больше 6 г-экв/л германий пассивируется в результате образования слоя двуокиси германия, толщина которого достигает нескольких десятых долей микрона. Скорость пассивации увеличивается с ростом концентрации азотной кислоты, поэтому на кривой рис. 2.1 появляется максимум, за которым скорость растворения падает до нуля. Перемешивание способствует удалению молекул HNO_2 и уменьшению скорости травления.

Плавиковая кислота растворяет пленку двуокиси германия:

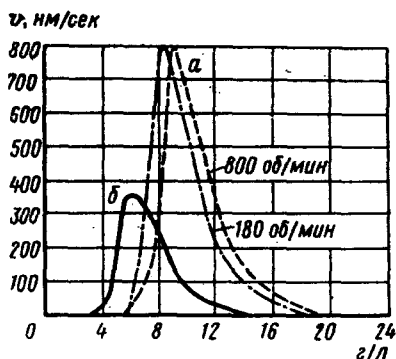
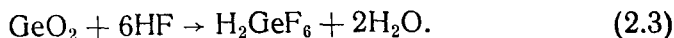


Рис. 2.1. Зависимость скорости растворения германия в азотной кислоте от концентрации:

а — с перемешиванием; б — без перемешивания

В травителе «супероксоль» в качестве окислителя используют перекись водорода — пергидроль ($H_2O_2 : HF : H_2O = 1 : 1 : 4$). Максимальную скорость травления получают при равных объемных

Таблица 2.1

Составы растворов для травления германия

Состав травителя	Скорость травления, мм/сек	Примечания
HF — 4 см^3 HNO_3 — 2 см^3 H_2O — 4 см^3 AgNO_3 — 200 мг	0,15—0,3	Предпочтителен для поверхностей с ориентацией (111)
H_2O_2 — 1 см^3 (30%) HF — 1 см^3 H_2O — 4 см^3	0,01—0,02	Предпочтителен для плоскости (100), где получается зеркальная поверхность. Используется для травления пластин и кристаллов
CH_3COOH — 15 см^3 HNO_3 — 25 см^3 HF — 15 см^3 Br — 0,3 см^3	0,15—0,5	Предпочтителен для травления p - n -переходов, полирующее травление
HF — 4 см^3 HNO_3 — 2 см^3 H_2O — 4 см^3 $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ — 200 мг	0,05—0,15	Используется для выявления p - n -переходов на поперечных и косых шлифах
HNO_3 — 25 см^3 HF — 15 см^3 CH_3COOH — 15 см^3	0,1 — 0,15	Используется для травления пластин и структур
HF — 4 см^3 HNO_3 — 2 см^3 PdCl_2 — 5 мг	0,15—0,2	Блестящая зеркальная поверхность
HNO_3 — 40 см^3 HF — 20 см^3 CH_3COOH — 30 см^3 $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ — 10 см^3	0,5—0,6	Хорошо контролируется процесс травления. Образуется полированная поверхность. С увеличением бихромата увеличивается скорость травления

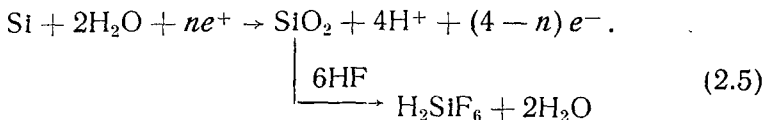
отношениях H_2O_2 и HF . Суммарную реакцию растворения можно представить в виде



Расчет показывает, что равные объемные отношения пергидроля и плавиковой кислоты соответствуют стехиометрическому составу реакции (2.4). В табл. 2.1 приведены составы для травления германия.

Травление кремния. В качестве кислотных травителей для кремния применяют смеси азотной и плавиковой кислот разного состава. На рис. 2.2 показана зависимость скорости растворения кремния от состава травителя. Максимальная скорость травления соответствует соотношению $\text{HNO}_3 : \text{HF} = 1 : 4,5$ в молярных долях.

Механизм травления кремния включает инжекцию избыточных дырок и электронов. На микроанодах идет растворение кремния:



В растворах с избытком HNO_3 $n=4$, однако при избытке HF $n=2$.

Правая часть (2.5) показывает, что вначале образуется двуокись кремния, которая взаимодействует с плавиковой кислотой, образуя кремниевое фтористый комплекс. Главная роль окисляющего реагента заключается в обеспечении легко восстанавливаемого вещества для катодной реакции. При отсутствии такого окислителя на катоде возможно лишь одно взаимодействие — разрядка протонов, происходящая с очень малой скоростью, что существенно уменьшает скорость травления. Окисляющие реагенты изменяют распределение подвижных носителей заряда в поверхностном районе так, что уровень Ферми на поверхности полупроводника смещается к валентной зоне. Процесс электронных переходов при восстановлении окислителя включает переход электрона из валентной зоны к восстанавливаемому иону, что эквивалентно инжекции дырки с иона на поверхность кремния:

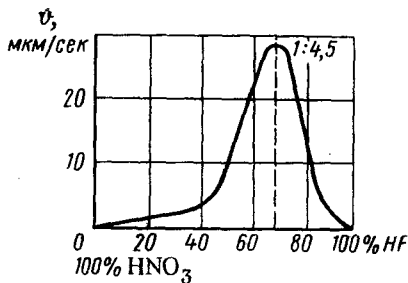
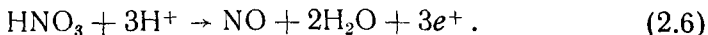
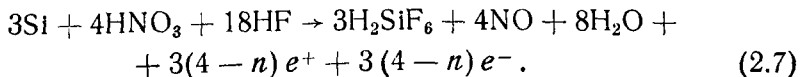


Рис. 2.2. Зависимость скорости растворения кремния от состава травителя



Образовавшиеся дополнительные дырки значительно ускоряют анодную реакцию растворения. Суммарную реакцию травления можно представить:



Молярное отношение HNO_3 и HF в (2.7) равно 1 : 4,5.

Согласно закону действующих масс скорость взаимодействия реагирующих веществ прямо пропорциональна произведению их концентраций. Коэффициентом пропорциональности является константа скорости реакции, экспоненциально зависящая от температуры. Поэтому при нагреве скорость травления резко возрастает, и становится трудно контролировать глубину травления.

Скорости растворения германия и кремния не зависят от типа электропроводности и величины проводимости полупроводника.

Анизотропия химических связей в кристалле обуславливает различие скоростей растворения кристаллографических плоскостей. На

Таблица 2.2

Составы растворов для травления кремния

Состав травителя		Скорость травления, мм/сек	Примечание
HNO_3	— 2 ч.	1,3	Применяется в основном для травления пластин
HF	— 1 ч.		
HNO_3	— 1 ч.	2÷3	Применяется для травления кристаллов с <i>p-n</i> -переходами
HF	— 1 ч.		
HNO_3	— 4 ч.	0,7	Применяется при повторном травлении
HF	— 1 ч.		
HNO_3	— 10 ч.	0,2	Применяется для освежения
HF	— 1 ч.		
NaOH	(30 %)	0,01	Шероховатая поверхность после травления
KOH	(30 %)		
HNO_3	— 100 см ³	1,5	Полирующий травитель
HF	— 50 см ³		
CH_3COOH	— 100 см ³		
Br	— 0,3 см ³		
HNO_3	— 125 см ³	0,8	—
HF	— 25 см ³		
CH_3COOH	— 100 см ³		
Br	— 0,3 см ³		

этом явлении основано применение так называемых селективных травителей. Селективные (избирательные) травители — это травители, вызывающие образование на поверхности кристалла хорошо очерченных ямок травления, грани которых являются кристаллографическими плоскостями с низкими индексами. Скорости травления основных кристаллографических плоскостей германия и кремния находятся в следующих соотношениях:

для кислотных травителей $(110) > (100) > (111)$;

для щелочных травителей $(100) > (110) > (111)$.

Адсорбция ионов фтора или гидроксила происходит по-разному на каждой плоскости, что и обуславливает различие в скоростях.

Некоторые составы растворов для травления кремния приведены в табл. 2.2.

Травители с бихроматом натрия. Для получения более стабильной поверхности, что особенно важно при обработке *p-n*-переходов, используют травители, содержащие бихромат натрия ($\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$). Эти растворы позволяют получить хорошую химически полированную поверхность, на которой отсутствуют ямки травления, а приборы (германиевые и кремниевые), обработанные в них, имеют улучшенные значения обратного тока, пробивного напряжения и коэффициента усиления. Кроме того, процесс травления в таких растворах более управляем. Скорость травления возрастает с увеличением концентрации бихромата натрия.

§ 2.2. Способы травления и промывки

Предварительная отмывка. Прежде чем подвергнуть пластины химическому травлению, их отмывают от следов шлифовального микропорошка и загрязнений органического происхождения. Отмывку производят в ультразвуковой ванне в толуоле или четыреххлористом углероде. Возникающие кавитационные пузырьки создают в отдельных точках у поверхности пластины большое локальное давление, что способствует эффективному удалению всех макрозагрязнений. Окончательную отмывку ведут в деионизованной воде. Наряду с этим применяют кипячение в толуоле или в четыреххлористом углероде, а также — отмывку в парах толуола.

Травление. Травление пластин и кристаллов полупроводников производят в сосудах из фторопласта. Реакции травления происходят экзотермически, поэтому для достижения равномерного и контролируемого травления травильный раствор охлаждают.

В первый момент реакция идет более стремительно, а затем становится равномерной. Это объясняется наличием поверхностно-механически нарушенного слоя с сильно развитым рельефом, увеличивающим эффективную площадь взаимодействия. Травитель проникает в микротрещины, существующие на поверхности, расширяет их и сглаживает остроугольный рельеф. В результате образуется ячеистая структура из различных по величине ямок травления. При более длительном травлении ямки исчезают и поверх-

ность выравнивается. После удаления деформированного слоя растворение ненарушенной кристаллической решетки идет равномерно, если действие травителя не зависит от кристаллографической ориентации поверхности. Если травитель селективный, то образуются фигуры травления.

Скорость травления определяется скоростью удаления продуктов реакции и скоростью доставки новых порций травителя. Перемешивание способствует быстрейшему выравниванию состава травителя, вследствие чего скорость травления обычно возрастает.

Наиболее широко в промышленности применяют так называемое химико-динамическое травление (рис. 2.3). Во фторопластовый барабан 1, ось которого наклонена на угол $15\text{--}45^\circ$ относительно нормали и соединена через редуктор с валом электромотора 2, заливают порцию травителя 3. Обрабатываемые пластины 4 наклеивают лицевым на фторопластовые диски 5, которые помещают на дно барабана пластинами вверх. Барабан вращается со скоростью 120 об/мин и диски катятся по его внутренней стенке, что обеспечивает хорошее перемешивание находящегося в нем травителя и равномерность травления.

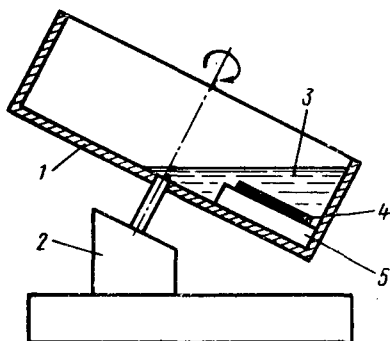


Рис. 2.3. Схема химико-динамического травления

Этот способ применяют также при вытравливании мезоструктур (рис. 2.4). Для защиты поверхности, не подлежащей травлению, пласти-

ну через металлическую маску покрывают инертным к травителю веществом — битумом. После вытравливания незащищенных участков пластины на нужную глубину процесс прекращают и битум удаляют с помощью органического растворителя.

Промывка пластин и кристаллов после травления. Для удаления следов травителя пластины и кристаллы после окончания травления промывают в деионизованной воде. Наибольший эффект получают на установках финишной промывки (рис. 2.5). Вода последовательно омывает катионитовую и анионитовую смолы.

О качестве промывки судят по значению удельного сопротивления воды на выходе промывочной камеры. Исходное сопротивление составляет 10—20 Мом·см; сопротивление воды на выходе тем выше, чем меньше остаточных ионов. Когда сопротивление воды на выходе сравняется с сопротивлением на входе промывочной камеры, промывку прекращают.

Удаление ионов, осажденных на поверхность полупроводника в результате травления, производят в комплексообразователях — веществах, образующих с ионами металлов прочные соединения с малой степенью диссоциации: в бихромате натрия, цианистом калия, цианистом метиле, дитизоне, трилоне Б и др.

После промывки пластины или кристаллы с p - n -переходами сушат в термостате или под инфракрасной (ИК) лампой при температуре 120—150° С.

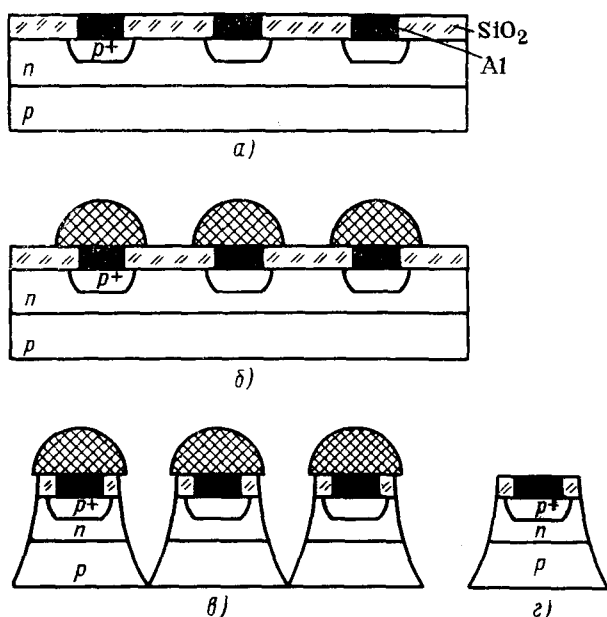


Рис. 2.4. Последовательность вытравливания мезаструктур:

a — исходная пластина; b — нанесение битума; $в$ — травление мезаструктур, $г$ — разделение структур

Контроль качества поверхности после травления. На стадии разработки приборов и в лабораторных условиях контроль качества химической обработки поверхности полупроводников осуществляют путем измерения поверхностного потенциала и скорости поверхностной рекомбинации. Чем меньше их значения, тем ближе свойства поверхности и объема полупроводника, тем совершеннее поверхность.

В производственных условиях основным методом контроля является визуальное наблюдение поверхности. При этом обращают внимание на появление видимых разводов или пленок, неоднородность рельефа, «чечевицеобразность» пластины, соблюдение

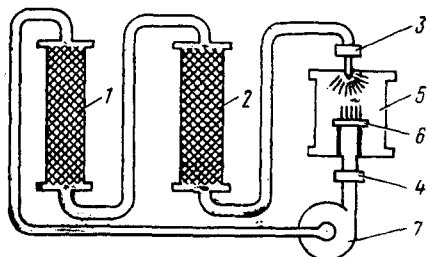


Рис. 2.5. Схема установки финишной промывки с замкнутым циклом:

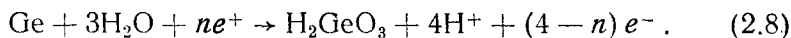
1, 2 — ионообменные смолы; 3, 4 — датчики солемеров; 5 — промывочная камера; 6 — пластины полупроводника; 7 — насос

геометрических размеров и нужной конфигурации локальных элементов — мезаструктур, *p-n*-переходов и пр. Визуальный контроль осуществляют как невооруженным глазом, так и под микроскопом с увеличением в 10—100 $\times$.

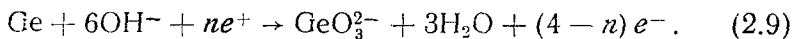
§ 2.3. Электрохимическая обработка поверхности полупроводников

Если через пластину полупроводника и металлический электрод, погруженные в электролит, пропускать электрический ток, то начинается процесс электролиза. При электролизе химические превращения происходят на электродах (там, где ионный механизм электропроводности в растворе изменяется на электронный) полупроводника или металла. Весь процесс является окислительно-восстановительной реакцией, причем анод служит окислителем, так как он принимает электроны, а катод — восстановителем, так как отдает их. Следовательно, электрохимическое травление полупроводников состоит из двух электродных процессов — анодного окисления (растворения) и катодного восстановления. Анионы и катионы, теряя свой заряд на электродах, вступают во вторичное взаимодействие с электродами, раствором или между собой.

Травление германия. Анодное окисление германия происходит в кислотных и щелочных электролитах. В кислотных растворах продуктом анодного окисления является метагерманиевая кислота:

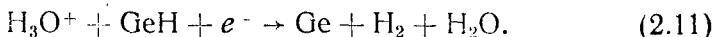
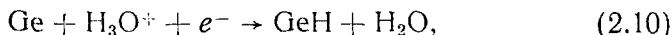


В щелочных растворах таким продуктом являются соли метагерманиевой кислоты — германаты:



Скорость анодного окисления пропорциональна концентрации дырок на поверхности германия, поэтому повышение температуры, освещение или иной способ увеличения концентрации дырок ускоряют этот процесс.

В кислотных электролитах процесс выделения водорода на германиевом катоде можно представить следующим образом:

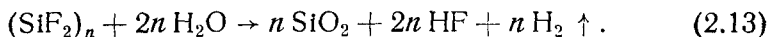
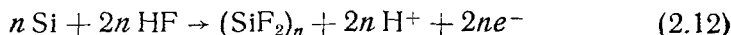


Стадия электрохимической десорбции (2.11) является наиболее медленной и определяет скорость всей реакции.

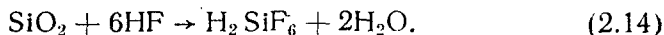
Травление кремния. Если в германии требующиеся для анодного окисления дырки диффундируют к поверхности кристалла из объема, то в анодных реакциях на кремнии участвуют дырки, генерируемые на поверхности полупроводника.

Электрохимическое травление кремния производят главным образом в растворах, содержащих плавиковую кислоту. При концентрациях кислоты 2,5—8,5% образуется зеркальная полированная поверхность. Вследствие возникновения в кремнии *n*-типа на границе с электролитом потенциального барьера, препятствующего переходу ионов в раствор, окисление затрудняется. В кремнии *p*-типа барьер не образуется.

При малых плотностях тока во время анодного окисления кремний покрывается толстой коричневой пленкой окисла. В состав этой пленки входит фтористокремниевый комплекс SiF_2 , окисляющийся в водных растворах с выделением водорода:



При достижении критической плотности тока происходит разложение толстой коричневой пленки согласно реакции (2.13) с образованием тонкой пленки двуокиси кремния, являющейся анодным продуктом электрополировки. Окончательным результатом анодного растворения кремния в плавиковой кислоте служит реакция:



Анодные процессы применяют в полупроводниковой технологии для окисления и травления полупроводников в тех случаях, когда требуется высокая точность в толщине анодируемого слоя (0,05—0,1 мкм) или необходима локальная обработка.

Анодно-механическое травление. В основе этого процесса лежит анодное окисление полупроводника, сопровождаемое механическим воздействием (рис. 2.6). Пластины полупроводника 1 наклеивают пиццей на анодный электрод 2 и приводят в соприкосновение с катодным диском 3, обтянутым капроном и содержащим радиальные пазы. Катодный диск наклонен на 20° и вращается со скоростью 80—200 об/мин. В место контакта диска и пластин подается электролит 4.

Образцы *n*-типа для генерации необходимых при анодной реакции дырок подсвечивают через катодный диск мощной лампой 5. Скорость полировки составляет 150—400 нм/сек.

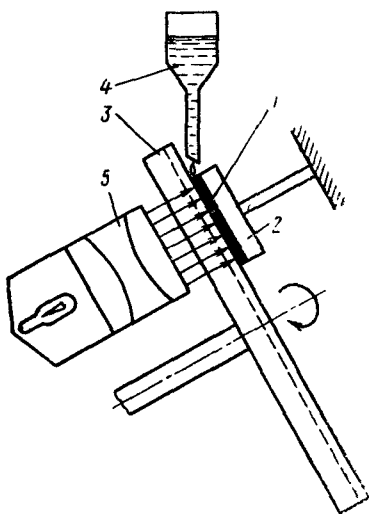


Рис. 2.6. Схема анодно-механического травления

Особенно эффективен данный метод при локальном травлении пластин кремния с использованием в качестве защитной маски пленок двуокиси или нитрида кремния. Над участками полупроводника, которые должны быть подвергнуты травлению, защитная пленка удаляется с помощью фотолитографии. Форму вытравливаемых мезаобластей или углублений получают более правильной, чем при использовании битумной маски, а глубину травления до 200—300 мкм.

Локализацию травления можно осуществлять и другими способами.

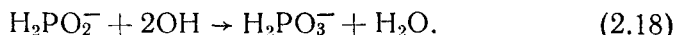
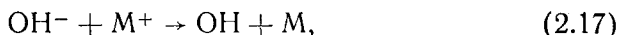
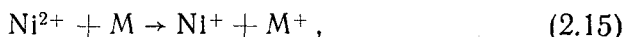
Локализация травления с помощью катода. Если размеры катода малы (порядка размеров вытравливаемой области) и он расположен в непосредственной близости к аноду, которым является полупроводник, то при прохождении тока преимущественное растворение будет происходить только вблизи катода. Изменяя расстояние анод — катод, можно вытравливать углубления различного диаметра, а придавая катоду ту или иную форму, производить фигурное травление.

§ 2.4. Осаждение гальванических покрытий

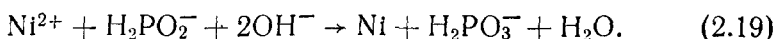
В основе процесса осаждения металлов электролитическим способом лежит реакция катодного восстановления. Гальванические покрытия кристаллов полупроводников применяют в основном для создания омических контактов и нанесения электродов.

Создание контакта металл — полупроводник. Гальваническое и химическое осаждение металлов широко используют для создания невыпрямляющих контактов на германии и кремнии. Наиболее распространенным является химическое никелирование.

Химическое никелирование состоит в каталитическом восстановлении никеля из раствора его соли на пластине полупроводника. Процесс ведется в щелочной среде ($pH=7-8$). Взаимодействие идет поэтапно:



Суммарная реакция имеет вид



Начальная стадия процесса заключается в переходе электронов от металла-катализатора к ионам никеля и превращении их в одновалентные ионы (2.15). Далее реакция диспропорционирования (2.16) приводит к образованию металлического никеля. Возвраще-

ние электронов к катализатору осуществляется посредством ионов гидроксила, превращающегося при этом в радикал (2.17), восстанавливающийся затем гипофосфитом (2.18).

В табл. 2.3 приведены некоторые составы растворов, применяемые для никелирования при $T=92-95^{\circ}\text{C}$.

Таблица 2.3

Составы растворов, применяемые для никелирования

Компоненты раствора	Концентрация, г/л			
	1	2	3	4
Никель хлористый	30	30	30	22
Гипофосфит натрия	10	8	10	16
Хлористый аммоний	50	—	56	—
Цитрат натрия	65	65	65	—
Аммоний фосфорнокислый двухзамещенный . .	—	160	—	—
Натрий янтарнокислый	—	—	—	15

Для повышения адгезии и уменьшения сопротивления контакта после осаждения никеля производят термообработку в вакууме $5 \cdot 10^{-6}-1 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. в течение 15—20 мин при температурах $500-700^{\circ}\text{C}$ для кремния. Во избежание образования больших механических напряжений скорость охлаждения не должна превышать 10 град/мин. После термообработки осуществляют вторичное никелирование, а вслед за ним — нанесение золотого покрытия, позволяющего присоединить к кристаллу электрический вывод методами пайки или термокомпрессии.

Благодаря преимуществам золота — кислотостойкости, отсутствию окисления, большим электрической и тепловой проводимостям, простоте пайки — оно является одним из наиболее употребительных видов металлических покрытий, применяемых для маскирования при химическом травлении, для создания омических контактов и барьеров Шоттки, для электродных покрытий омических контактов, облегчающих присоединение электрических выводов.

Гальваническое золочение проводят в цианистых или железистосинеродистых электролитах, допускающих плотность тока $0,1-0,3$ а/дм². Увеличение плотности тока приводит к интенсивному выделению водорода и рыхлому покрытию. Повышение температуры способствует устранению этих явлений. Составы электролитов, применяемых для гальванического осаждения золота, и основные режимы золочения приведены в табл. 2.4.

Создание электродных выводов. Электродные выводы выращивают гальванически для облегчения присоединения кристаллов к держателям и к внешним электрическим выводам.

Компоненты и основные режимы золочения

Компоненты электролита и режим электролиза	Цианистые	Железисто-синеродистые
Комплексная цианистая соль золота в пересчете на металл, г/л	3—5	—
Калий цианистый общий, г/л	15—25	—
Калий цианистый свободный, г/л	3—6	—
Золотохлористоводородная кислота в пересчете на металл, г/л	—	2,65
Калий железистосинеродистый, г/л	—	15—20
Сода безводная, г/л	—	20—25
Температура электролита, °С	60—70	50—55
Катодная плотность тока, а/дм ²	0,2—0,3	0,1—0,2
Выход по току, %	60—80	25—35

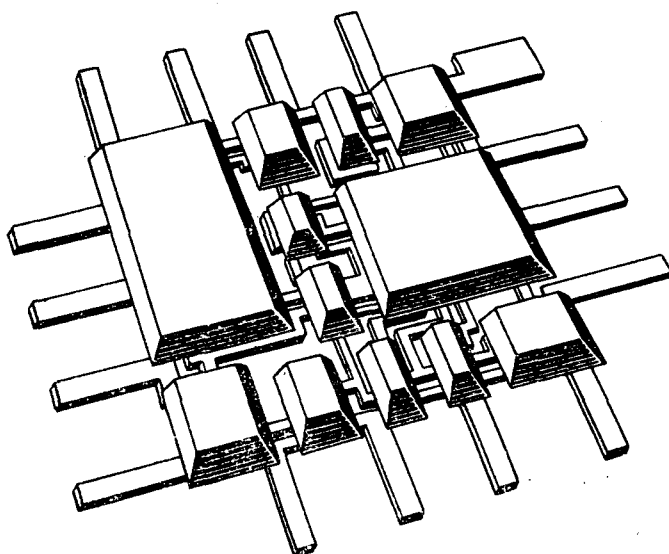


Рис. 2.7. Интегральная схема с консольными выводами (вид с непланарной стороны)

В результате поиска эффективной конструкции полупроводникового кристалла, поддающегося автоматизированной сборке, разработаны консольные (балочные) и шариковые выводы. Кристаллы первого типа после разделения полупроводниковой пластины на планарной стороне имеют несколько консольно выступающих выводов (рис. 2.7). Кристаллы второго типа содержат выращенные на

контактных площадках полусферы (рис. 2.8). При сборке приборов или интегральных схем кристаллы переворачивают выводами вниз и в таком положении закрепляются.

Балочные выводы создают путем золочения. Локализацию осаждения обеспечивают применением фотолитографической маски, наносимой на сплошной металлический подслоу толщиной 0,5—1 мкм из платины, палладия или никеля. Пластину закрепляют на катоде, имеющем электрический контакт с подслоем. Осаждение золота ведут из железистосинеродистого электролита. На рис. 2.9 показана последовательность изготовления балочных выводов на диодных структурах.

В исходной пластине кремния с эпитаксиальной и окисной пленками создают p^+ -анодные и n^+ -катодные области; после чего с помощью фотолитографии над этими областями в окисной пленке

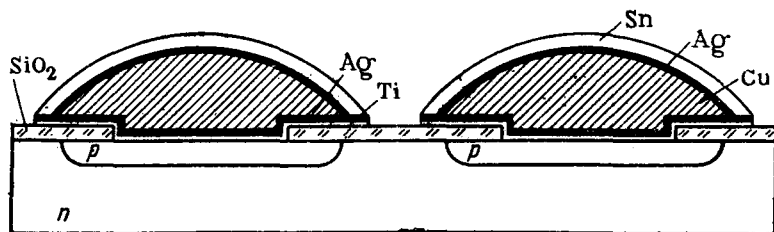
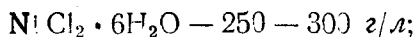
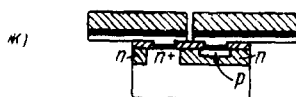
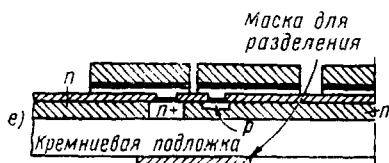
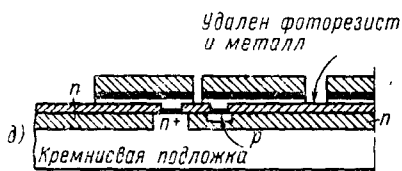
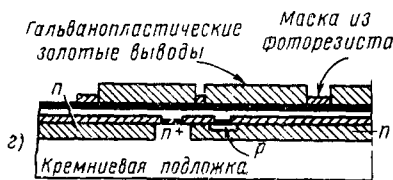
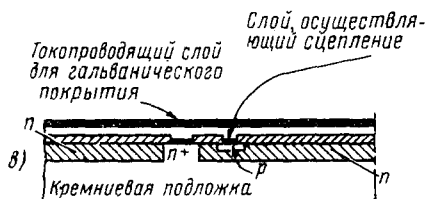
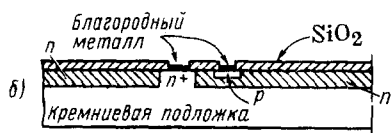
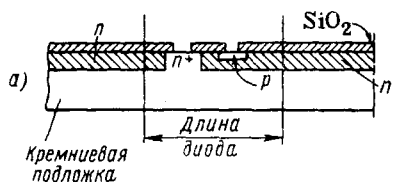


Рис. 2.8. Структура кристалла с шариковыми выводами на основе меди

вытравливают отверстия заданного размера (а). Методом термического напыления создают омические контакты (б). Затем по всей поверхности напыляют двухслойное металлическое покрытие (в) и планарную сторону пластины защищают маской из фоторезиста. В маске остаются отверстия нужной конфигурации на тех участках, где должны разместиться выводы. Пластину помещают в гальваническую ванну, где на этих участках осаждаются золотые выводы (г) толщиной 10—15 мкм. Фоторезист и биметаллическое покрытие под ним удаляют катодным распылением (д). Пластины наклеивают планарной стороной на фторопластовые диски, подвергают химико-динамическому травлению с противоположной стороны до толщины 50—70 мкм, и области будущих диодов защищают маской из фоторезиста или битума (е). Разделение на диоды производят путем травления в селективном травителе, поэтому отдельные структуры после разделения (ж) имеют форму, показанную на рис. 2.7.

При выращивании шариковых выводов наличие сплошного металлического подслоя на пластине не обязательно, так как они свободно растут над локализованными омическими контактами. Шариковые выводы могут быть образованы из серебра, меди, олова или из сплавов на их основе. Сплав SnNi осаждается из электролита





$\text{Sn Cl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ — 40 — 50 г/л;

NaF — 30 г/л;

NH_4F — 35 г/л.

Температура электролита 55—65° С, плотность тока 0,3—1,5 а/дм², pH=3—3,5, время осаждения 40—60 мин. Диаметр полусферы 10—15 мкм, состав осадка 65% Sn и 35% Ni.

Медь осаждается из электролита:

$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ — 250 г/л;

H_2SO_4 — 5 г/л;

сегнетовая соль — 0,2 г/л.

При плотности тока 1 а/дм² в течение 1 ч толщина осадка достигает 30 мкм.

§ 2.5. Химический участок

Химические участки располагают в производственных помещениях, изолированных от других участков завода (термических, измерительных, сборочных), так как пары травителей, растворителей, влага, выделяющиеся при обработке, оказывают отрицательное воздействие на параметры структур и приборов. Удаление различных паров и других загрязнений атмосферы является важной задачей по организации рабочих мест на самих химических участках. Рассмотрим основные требования, предъявляемые к чистоте производственных помещений и касающиеся всех технологических участков.

Рис. 2.9. Технологическая последовательность изготовления балочных выводов на диодных структурах

Чистота производственных помещений. К производственным помещениям, в которых изготавливают полупроводниковые приборы и интегральные схемы, предъявляют строгие требования в отношении их чистоты. В зависимости от размеров пылевых частиц и их количества в воздухе производственные комнаты и пылезащитные камеры подразделяют на три класса чистоты. Максимальные количества частиц размером 0,5 и 5 мкм в 1 л воздуха не должно превышать соответственно: 1-й класс — 3500 и 25, 2-й класс — 300 и 3, 3-й класс — 4 и 0.

При проведении химической обработки пластин рекомендуются комнаты 2-го класса, финишной химической обработки и гальванических покрытий пластин — комнаты 3-го класса. Для других технологических операций рекомендуются: 1-й класс — для резки слитков, исследования физических свойств и надежности; 2-й класс — для шлифовки и полировки пластин, изготовления оригиналов фотошаблонов, сборки и измерения; 3-й класс — для фотолитографии, изготовления фотошаблонов, эпитаксии, диффузии, напыления тонких пленок.

По характеру воздушного потока, циркулирующего в помещении, чистые комнаты подразделяют на комнаты с ламинарным и с неламинарным потоками. В комнаты с ламинарным потоком через всю площадь потолка или стены подается очищенный кондиционированный воздух, отводящийся через соответствующие площади пола или противоположную стену. В комнатах с неламинарным потоком очищенный кондиционированный воздух подается через воздухораспределительное устройство в потолке, а отводится через устройство, расположенное в полу или на небольшой высоте в стенах. Скорость протока воздуха лежит в пределах 0,2—0,5 м/сек.

Пылезащитные камеры (скафандры) также бывают с ламинарным и неламинарным потоками. В зависимости от характера выполняемой работы в камере устанавливают избыточное давление при работах, не связанных с вредными веществами, и пониженное при наличии вредных веществ.

В чистых комнатах работающему персоналу необходимо соблюдать ряд требований по поддержанию чистоты, например, не разрешается проводить производственную гимнастику, пользоваться карандашом и ластиком, применять косметику, принимать пищу.

Рабочее место. Все химические операции осуществляют в вытяжных шкафах с местной вытяжной вентиляцией. Стол, сливная раковина и водяные краны этих шкафов обычно изготовлены из винипласта, а стенки — из прозрачного плексигласа. К шкафу подводят холодную и горячую воду, электропитание для нагревательных плиток с закрытыми спиралями и других электроприборов, например, гальванических ванн.

Для травления, промывки и осаждения гальванических покрытий используют посуду из фторопласта, кварца, платины, винипласта, плексигласа и термостойкого стекла. Оператор, ведущий химическую обработку, работает обязательно в резиновых перчатках. Пластины полупроводника загружают в приспособления для

травления и промывки пинцетами с фторопластовыми наконечниками. В шкафах хранится дневной запас кислот, щелочей, растворителей или электролитов. Деионизованную воду либо подводят непосредственно в шкаф, либо подносят в канистрах из полиэтилена для непосредственного употребления в течение смены. Для хранения воды стеклянная и кварцевая посуда непригодна, так как в воду переходят щелочные ионы натрия и калия. Нельзя также длительное время держать воду на воздухе, потому что она поглощает углекислый газ и загрязняется.

Основные требования техники безопасности. На химических участках сосредоточиваются агрессивные и ядовитые вещества: кислоты, щелочи, растворители, цианистые соединения и т. п., поэтому необходимо помнить о технике безопасности и мерах оказания первой помощи.

Кислоты. Используются азотная, плавиковая, соляная и серная кислоты. При составлении растворов не следует забывать, что заливают кислоту в воду, а не наоборот, во избежание расплескивания кислоты. При попадании кислоты на кожу пораженное место нужно немедленно промыть обильной струей воды, затем нейтрализовать раствором двууглекислой соды. При ожоге плавиковой кислотой после промывки нейтрализацию осуществляют раствором нашатырного спирта или 10%-ным раствором углекислого аммония.

Пролитую кислоту засыпают песком, собирают и выбрасывают или нейтрализуют водой. Концентрированная азотная кислота, являясь сильным окислителем, огнеопасна.

Щелочи: едкий натр и едкое кали. Щелочи разъедают кожу и вызывают ожоги. Если щелочь попала в глаза, то их промывают большим количеством воды, а затем 2%-ным раствором борной кислоты. Кожу промывают водой и 10%-ным раствором борной кислоты.

При приготовлении растворов щелочи отмеренное количество воды заливают в сосуд со щелочью небольшими порциями при перемешивании.

Растворители. Четыреххлористый углерод — бесцветная жидкость, невоспламеняющаяся, с характерным сладковатым запахом. Пораженный участок кожи необходимо обмыть спиртом.

Дихлорэтан — бесцветная жидкость со сладковатым запахом. Ядовит, вызывает общее отравление и местное поражение кожи. Большая концентрация дихлорэтана вызывает тяжелые отравления как наркотическое средство и воздействует на печень. Предельно допустимое содержание паров дихлорэтана в воздухе 0,05 мг/л. При попадании дихлорэтана на кожу пораженное место необходимо промыть водой; увлажненную одежду — сменить.

Спирт, ацетон, бензин, толуол — легко воспламеняющиеся вещества.

Цианистые соединения. Все цианистые соединения — сильные яды. Вдыхание цианистого водорода, являющегося продуктом разложения цианидов, особенно опасно. Предельно допу-

стимая концентрация цианистого водорода в воздухе 0,0003 мг/л.

Признаки легкого отравления цианидами — головная боль, тошнота, сердцебиение. При тяжелых отравлениях начинаются судороги и человек теряет сознание. В случае отравления пострадавшего необходимо вынести на свежий воздух, ввести ему внутрь 30—40 см³ 3%-ного водного раствора перекиси водорода или дать вдыхать нашатырный спирт.

Все нейтрализующие вещества должны находиться рядом с рабочим местом.

§ 2.6. Получение деионизованной воды

При составлении травителей, электролитов и отмывке полупроводниковых пластин и кристаллов используют деионизованную воду. Если в воде присутствуют примеси, то они адсорбируются полупроводником, что ведет к ухудшению электрических характеристик, стабильности параметров и надежности приборов.

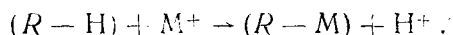
В табл. 2.5 приведены данные о поверхностной плотности атомов некоторых элементов, адсорбирующихся германиевыми и кремниевыми пластинами после обработки в пергидроле, растворе едкого кали и смеси азотной и плавиковой кислот, содержащих добавки этих элементов. Промывка пластин в дистиллированной воде практически не уменьшает количество адсорбированных атомов, а иногда даже увеличивает его (табл. 2.6). Поэтому промывочную воду подвергают тщательной очистке — деионизации.

Удаление неорганических примесей. Деионизованную воду, используемую в полупроводниковом производстве, обозначают двумя марками. Для получения воды марки Б вода должна пройти предварительную очистку дистилляцией и иметь удельное сопротивление не ниже 0,1 Мом·см. Для получения воды марки А предварительная очистка должна дать удельное сопротивление не ниже 0,2 Мом·см.

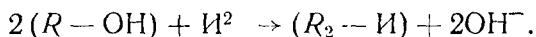
Основные параметры деионизованной воды

	Марка А	Марка Б
Удельное сопротивление при 20° С, Мом·см .	7,0	1,0
Окисляемость в пересчете на мг/л кислорода .	2,0	5,0
Содержание кремниевой кислоты, мг/л	0,2	1,0

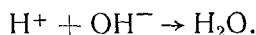
Для удаления неорганических примесей используют ионообменные смолы. Все неорганические примеси находятся в воде в виде ионов — катионов Fe^{2+} , Cu^{+2} , Na^{+} или анионов NO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} и др. Существуют два типа смол: катиониты, связывающие катионы, и аниониты, связывающие анионы. Их условные обозначения имеют вид: $R-\text{H}$ и $R-\text{OH}$ соответственно, где R — органический радикал. Смолы гранулированы в шарики размером 3—5 мм. Первоначально вода поступает в колонку с катионитовой смолой, где происходит связывание положительно заряженных ионов M^{+} путем замещения ими протонов, входящих в состав смолы:



Затем вода поступает во вторую колонку, где происходит связывание отрицательно заряженных ионов H^- путем замещения ими гидроксильной группы, входящей в состав анионита. Для двухвалентных ионов:



Протоны и гидроксильные радикалы соединяются в молекулу воды:



Т а б л и ц а 2.5

Данные о поверхностной плотности атомов некоторых элементов

		Элемент	Концентрация элементов в растворе, об. %	Концентрация элементов на поверхности, атом/см ²	Концентрация элементов в растворе, об. %	Концентрация элементов на поверхности, атом/см ²
Ge			H ₂ O ₂		KOH	
		P	6,16 · 10 ⁻²	2,08 · 10 ¹⁵	2,59 · 10 ⁻³	1,36 · 10 ¹⁷
		Fe	1,41 · 10 ⁻²	2,90 · 10 ¹⁵	7,00 · 10 ⁻⁵	4,75 · 10 ¹⁵
		Cu	9,90 · 10 ⁻³	3,28 · 10 ¹⁷	1,34 · 10 ⁻⁴	8,36 · 10 ¹⁴
		Ag	3,72 · 10 ⁻³	2,06 · 10 ¹⁶	1,08 · 10 ⁻⁴	4,34 · 10 ¹⁶
		Au	1,01 · 10 ⁻³	1,80 · 10 ¹⁶	1,0 · 10 ⁻⁶	1,22 · 10 ¹²
		Zn	1,93 · 10 ⁻³	4,76 · 10 ¹⁴	3,58 · 10 ⁻³	6,80 · 10 ¹⁴
		In	1,80 · 10 ⁻²	2,85 · 10 ¹⁶	1,0 · 10 ⁻⁴	2,69 · 10 ¹⁶
		Na	1,0 · 10 ⁻¹	5,92 · 10 ¹⁶	2,06 · 10 ⁻²	9,40 · 10 ¹⁵
		Pb	7,18 · 10 ⁻³	1,12 · 10 ¹⁵	1,0 · 10 ⁻²	8,95 · 10 ¹³
		Sb	1,0 · 10 ⁻²	4,57 · 10 ¹³	1,0 · 10 ⁻³	3,38 · 10 ¹⁸
Si			HNO ₃ +HF		KOH	
		P	2,1 · 10 ⁻²	1,85 · 10 ¹⁶	2,59 · 10 ⁻³	2,16 · 10 ¹⁶
		Fe	1,45 · 10 ⁻²	3,44 · 10 ¹⁶	—	—
		Cu	4,5 · 10 ⁻²	2,59 · 10 ¹⁵	1,26 · 10 ⁻⁴	8,5 · 10 ¹⁷
		Ag	7,12 · 10 ⁻³	6,59 · 10 ¹⁵	1,08 · 10 ⁻⁴	2,5 · 10 ¹⁴
		Au	3,6 · 10 ⁻⁴	1,11 · 10 ¹⁶	1,0 · 10 ⁻⁵	6,04 · 10 ¹⁴
		Zn	1,15 · 10 ⁻²	9,55 · 10 ¹³	3,58 · 10 ⁻³	1,37 · 10 ¹⁵
		In	8,75 · 10 ⁻³	9,31 · 10 ¹⁴	1,0 · 10 ⁻⁴	3,82 · 10 ¹⁸
		Sb	6,52 · 10 ⁻³	1,11 · 10 ¹⁶	1,0 · 10 ⁻³	2,21 · 10 ¹⁸
		Na	5,0 · 10 ⁻¹	4,92 · 10 ¹⁶	1,0 · 10 ⁻¹	8,10 · 10 ¹⁵
		Pb	6,71 · 10 ⁻³	7,56 · 10 ¹³	1,0 · 10 ⁻²	8,90 · 10 ¹³

Данные о поверхностной плотности атомов после промывки пластин
в дистиллированной воде

Эле- мент	Концентрация эле- ментов в воде, об. %	Концентрация элемен- тов на поверхности, атом/см ²	Концентрация элемен- тов в воде, об. %	Концентрация элемен- тов на поверхности, атом/см ²
	Ge		Si	
P	$6,1 \cdot 10^{-2}$	$1,16 \cdot 10^{16}$	$6,1 \cdot 10^{-2}$	$9,85 \cdot 10^{16}$
Fe	$5,74 \cdot 10^{-3}$	$4,65 \cdot 10^{14}$	$5,0 \cdot 10^{-4}$	$1,50 \cdot 10^{15}$
Cu	$9,90 \cdot 10^{-3}$	$1,38 \cdot 10^{18}$	$1,12 \cdot 10^{-4}$	$2,15 \cdot 10^{16}$
Ag	$5,0 \cdot 10^{-3}$	$3,84 \cdot 10^{17}$	$2,45 \cdot 10^{-3}$	$1,63 \cdot 10^{15}$
Au	$1,45 \cdot 10^{-5}$	$3,20 \cdot 10^{16}$	$8,80 \cdot 10^{-4}$	$2,24 \cdot 10^{17}$
Zn	$1,92 \cdot 10^{-3}$	$8,55 \cdot 10^{14}$	$3,19 \cdot 10^{-3}$	$2,59 \cdot 10^{14}$
In	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$2,48 \cdot 10^{17}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$1,24 \cdot 10^{17}$
Na	$2,06 \cdot 10^{-2}$	$9,35 \cdot 10^{15}$	$1,03 \cdot 10^{-1}$	$6,46 \cdot 10^{16}$
Rb	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$2,27 \cdot 10^{15}$	$8,10 \cdot 10^{-3}$	$8,70 \cdot 10^{14}$
Sb	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$1,11 \cdot 10^{17}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$2,12 \cdot 10^{16}$

Измерение удельного сопротивления воды. О чистоте воды судят по величине ее удельного сопротивления, которое в значительной степени зависит от температуры. Собственное сопротивление воды при температуре 20°С составляет 24 Мом·см. На рис. 2.10 показана номограмма для определения зависимости удельного сопротивления деионизованной воды от температуры. На правой оси указано сопротивление воды при 20°С, например 10 Мом·см. Средняя криволинейная шкала указывает температуры, при которых надо узнать величину удельного сопротивления, например 40 и 0°С. Соединяя прямыми линиями точки 10 Мом·см — 40°С и 10 Мом·см — 0°С и проводя их до пересечения с левой осью сопротивлений, находим, что удельное сопротивление составит 4,8 и 18 Мом·см соответственно.

Для измерения сопротивления воды применяют датчики — солемеры, состоящие из стеклян-

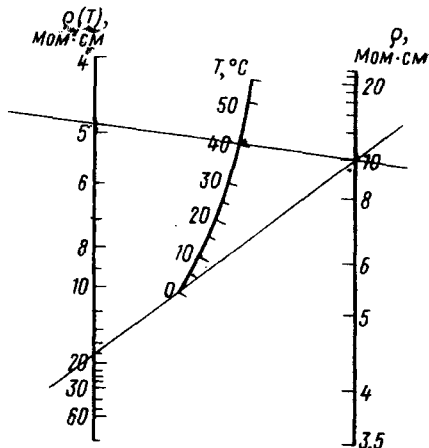


Рис. 2.10 Номограмма для определения удельного сопротивления деионизованной воды при различных температурах

ной трубы, через которую проходит вода, с диаметрально противоположно впаянными платиновыми электродами.

Удельное сопротивление воды определяют по формуле

$$\rho = R/k,$$

где R — сопротивление воды, замеренное датчиком, Мом ;

k — постоянная датчика, см^{-1} .

Значение k зависит от диаметра трубы, размеров и расположения электродов. Величину k определяют экспериментально, пропуская через трубу воду с известным удельным сопротивлением. Во избежание поляризации электродов измерения проводят при переменном токе.

Конструкция установок. Промышленные установки для получения деионизованной воды состоят из первичной очистительной колонки и трех пар ионообменных колонок. В первичной колонке вода продувается очищенным от углекислого газа воздухом, который насыщается углекислотой, растворенной в воде, и удаляет ее. В первой паре ионообменных колонок происходит предварительная очистка воды, во второй — тонкая очистка, третья пара находится на регенерации. Все три пары последовательно меняются местами.

Для регенерации анионитовой смолы через колонку пропускают 5%-ный раствор едкого натра, катионитовую смолу регенерируют 5%-ным раствором соляной или серной кислот. Затем идет промывка водой марок А или Б в зависимости от назначения колонки. Из установок вода по винипластовым и полиэтиленовым трубам транспортируется на рабочие участки.

ФОТОЛИТОГРАФИЯ

§ 3.1. Основные сведения о фотолитографии

Фотолитографию широко используют в технологии производства полупроводниковых приборов и интегральных схем; ее применяют для нанесения на поверхность обрабатываемой полупроводниковой пластины одновременно большого числа одинаковых рисунков заданных конфигураций элементов.

Сущность процесса фотолитографии заключается в следующем. На поверхность специально обработанной пластины кремния наносят тонкий слой фоточувствительного лака — фоторезиста. После подсушки на пластину помещают фотошаблон — стеклянную фотопластинку с предварительно нанесенным на ней рисунком, который необходимо «перевести» на пластину. Освещение пластины с фоторезистом через фотошаблон приводит к задубливанию открытых участков фоторезиста; остальная часть фоторезиста легко смывается в соответствующих растворителях. Через образовавшиеся в фоторезисте окна производят химическую обработку (травление) незащищенных участков поверхности пластины полупроводника или пленок (диэлектрических, металлических, полупроводниковых), нанесенных на нее. Так осуществляют перенесение рисунка с фотошаблона на поверхность пластины, причем использование лишь фотолитографических и химических процессов обеспечивает возможность групповой обработки.

Результаты и возможность фотолитографической обработки находятся в прямой зависимости от свойств фоторезистов, качества используемых фотошаблонов, степени отработанности всех технологических операций, характеристик используемого оборудования.

§ 3.2. Фоторезисты

Фоторезистами называют светочувствительные вещества, устойчивые к воздействию кислотных и щелочных травителей.

Назначение фоторезистов заключается в образовании на поверхности полупроводниковой пластины тонкой защитной пленки нужной конфигурации, получающейся в результате светового воздействия на отдельные участки пленки. После проявления пленки фоторезиста часть ее (нужного рисунка) остается на поверхности полупроводниковой пластины и служит маской при последующих технологических процессах.

По способу образования рисунка на поверхности полупроводниковой пластины фоторезисты подразделяют на две основные группы: негативные и позитивные.

Негативные фоторезисты под действием света образуют нерастворимые участки рисунка на поверхности пластины и после проявления остаются на ее поверхности. Рисунок фоторезиста на поверхности пластины представляет собой негативное изображение оригинала (фотошаблона).

Позитивные фоторезисты, наоборот, под действием света образуют растворимые участки, в этом случае рисунок оригинала в точности повторяется на поверхности пластины.

В качестве негативного фоторезиста в полупроводниковой технологии применяют состав на основе сложного эфира поливинилового спирта и коричной кислоты — поливинилциннамат (ПВЦ). Максимальная светочувствительность фоторезиста ПВЦ лежит в ультрафиолетовой области спектра. Готовый фоторезист ПВЦ представляет собой порошок белого или желтоватого цвета, растворяющийся в органических составах — растворах толуола с хлорбензолом, ацетата метилентгликоля с метаксилолом.

Кислотостойкость слоев фоторезиста ПВЦ по отношению к применяемым в полупроводниковой технологии травителям на основе плавиковой и азотной кислот не очень высока. Так, например, на кремнии с защитным слоем фоторезиста толщиной 0,5 мкм удается вытравить рельеф на глубину не более 10 мкм, а на германии — 40 мкм. Наибольшее применение фоторезист ПВЦ находит в планарной технологии для защиты двуокиси кремния от травителя, состоящего из плавиковой кислоты, фтористого аммония и воды.

Фоторезист ФН-11 — раствор циклокаучука, фотосшивающего агента и смеси ксилола с толуолом; применяют его в процессах фотолитографии металлов: меди, стали, хрома, анодированного алюминия. В качестве фотосшивающего агента используют 2,6-бис-(4 азидобензаль)-4 метилциклогексана. По внешнему виду фоторезист ФН-11 представляет собой прозрачную жидкость светлокоричневого цвета. Вязкость его равна 7—9 сст. Разрешающая способность фоторезиста при толщине пленки 2,5 мкм равна 100 лин/мм. Светочувствительность на уровне 0,5 мкм равна 10 Дж/см². Величина сухого остатка в фоторезисте не превышает 15%, а содержание азота в сухом остатке — 1,1%.

Фоторезист ФН-103 — раствор циклокаучука в смеси толуола и *n*-ксилола и содержит в качестве светочувствительной добавки 2,6-ди-(4 азидобензаль)-4 метилциклогексанон (ДЦГ). В состав фоторезиста входят: 15 вес. % циклокаучука, 0,4 вес. % 2,6-ди-(4 азидобензаль)-4 метилциклогексана; 56,4 вес. % толуола и 28,2 вес. % *n*-ксилола. Фоторезист ФН-103 является негативным и применяется при фотолитографических процессах изготовления пленочных микросхем, твердых монокристаллических интегральных схем, печатных плат, масок, а также в качестве защитного электроизоляционного слоя микросхем.

По внешнему виду фоторезист ФН-103 представляет собой вязкую прозрачную жидкость от красновато-желтого до темновато-красного цвета. Вязкость фоторезиста от 11 до 15 сст. Показатель преломления 1,5. Плотность фоторезиста 0,85—0,89 г/см³. Разрешающая способность при толщине пленки фоторезиста 1,5 мкм равна 50 лин/мм.

В качестве позитивного фоторезиста используют состав, состоящий из 1,2-нафтохинондиазида (2)-5-сульфозефира новолака с различными полимерами. Растворителями служат спирты, кетоны, аро-

матические углеводороды, диоксан, ксилол. Нередко используют смеси из нескольких растворителей с различными значениями упругости паров. Это в значительной мере улучшает процесс пленкообразования, снижает количество пор и напряжение в пленке. Ультрафиолетовое поглощение фоторезистов на основе нафтохинондиазидов (НХДА) по сравнению с фоторезистом ПВЦ несколько сдвинуто в сторону длинных волн.

Позитивные фоторезисты ФП-330 и ФП-383 представляют собой растворы светочувствительных продуктов и новолачной смолы в диоксане. Применяют их в качестве светочувствительных материалов при изготовлении полупроводниковых приборов и тонкопленочных интегральных схем. Внешний вид позитивных фоторезистов — вязкая прозрачная жидкость оранжевого цвета. Вязкость кинематическая равна $5,9 \pm 0,5$ сст. Разрешающая способность 400 лин/мм. Кислотопроницаемость пленки фоторезиста толщиной 1 мкм характеризуется плотностью дефектов двуокиси кремния. Для фоторезиста ФП-330 она составляет $0,75 \text{ мм}^{-2}$, а для фоторезиста ФП-383 — $0,5 \text{ мм}^{-2}$. Устойчивость в проявителе (2%-ный водный раствор тринатрийфосфата) необлученной пленки фоторезиста равна 60 сек. Основой позитивных фоторезистов являются светочувствительные продукты № 330 и № 383.

Светочувствительный продукт № 330 состоит из эфира 1,2-нафтохинондиазид-(2)-5-сульфокислоты и новолачной смолы № 18. Этот продукт растворим в диоксане и диметилформамиде, нерастворим в воде, этиловом спирте, толуоле и бензоле. Его используют для изготовления позитивного фоторезиста ФП-330.

Светочувствительный продукт № 383 состоит из эфира 1,2-нафтохинондиазид-(2)-5-сульфокислоты и бромированной новолачной смолы № 18. Этот продукт растворим в диоксане, диметилформамиде; плохо растворим в ацетоне, этилацетате, нерастворим в воде, этиловом спирте, толуоле. Его используют для изготовления позитивного фоторезиста ФП-383.

Светочувствительные продукты представляют собой порошок желтого цвета. Они содержат до 5% азота, 0,5% влаги и 1,5% нерастворимых примесей.

Для определения применимости фоторезистов в технологии изготовления полупроводниковых приборов используют три основных критерия: чувствительность, разрешающую способность и кислотоустойчивость.

Критерием *чувствительности* для негативных фоторезистов является образование после экспонирования и проявления локальных участков задубленных или полимеризованных областей пленки; для позитивных фоторезистов — полнота разрушенного локального участка пленки. Таким образом, критерием чувствительности служит четкость изображения, полученного в пленке фоторезиста после экспонирования и проявления. Для получения четкого изображения необходимо, чтобы пленка фоторезиста имела резко очерченную границу между областями вымытого и оставшегося на поверхности пластины фоторезиста.

Существует зависимость между толщиной пленки фоторезиста и экспозицией. При малых экспозициях (недодержках) пленка фоторезиста коробится и ее свойства ухудшаются. При больших экспозициях (передержках) качество края изображения ухудшается за счет рассеяния света на границах непрозрачных участков фотошаблона.

Разрешающая способность фоторезиста определяется числом линий равной толщины, которые могут быть получены (без

слияния) на 1 мм поверхности пластины в результате проведения процесса фотолитографии. Особую роль этот критерий играет при выборе фоторезистов для получения изображений элементов с размерами порядка 1 мкм. Для получения изображений элементов размером 5—10 мкм необходимо выбирать фоторезисты с разрешающей способностью не менее 500—1000 линий на 1 мм. На величину разрешающей способности может оказывать влияние толщина исходной пленки фоторезиста. Обычно используют пленку фоторезиста толщиной 0,5—1 мкм.

Для определения разрешающей способности фоторезистов применяют штриховые миры. Миры представляют собой стеклянную пластину с нанесенными на нее штрихами, ширина которых изменяется от одного до нескольких десятков микрон. Определение разрешающей способности фоторезиста производится путем экспонирования его через миру и подсчета числа задубленных линий, приходящихся на 1 мм поверхности пластины.

Нередко то или иное значение разрешающей способности относят не к фоторезисту, а ко всему процессу фотолитографии.

Кислотостойкость фоторезистов является важным критерием его оценки, так как последующие после экспонирования технологические операции связаны с использованием сильных травителей, составленных из азотной, плавиковой, соляной и других кислот. Нестойкость фоторезиста определяют по следующим признакам: частичное разрушение пленки, отслаивание пленки от подложки, локальное растравливание и подтравливание пленки на границе микроизображения. Первые два вида нарушения пленки фоторезиста при химической обработке свидетельствуют о полной его непригодности для изготовления полупроводниковых приборов и могут служить критериями забраковывания всей партии приготовленного фоторезиста. Два других вида нестойкости пленки (локальные и краевые растравливания) допустимы в определенных пределах. Критерием кислотостойкости фоторезиста в этом случае может служить величина краевого и локального растравливания.

Для определения кислотостойкости используют способы, которые основаны на измерении величины стравливания края изображения. Обычно измеряют ширину клина, который образуется на краю пленки после травления. Степень локального растравливания и пористости слоя фоторезиста выявляют микроскопическим анализом поверхности пластины после процесса травления.

§ 3.3. Фотошаблоны и способы их получения

Фотошаблоны могут быть прямыми и обратными в зависимости от того, повторяет рисунок на фотошаблоне оригинал или является его негативным отображением.

Чаще всего основу фотошаблонов изготавливают из оптического стекла, рисунок на поверхность стекла наносят фотографическим методом.

К фотошаблонам предъявляют следующие основные требования:

- а) высокая разрешающая способность;
- б) достаточно большая площадь рабочего поля;
- в) высокая контрастность;
- г) высокая оптическая плотность непрозрачных участков;
- д) точность воспроизведения всех размеров рисунка;
- е) точность размеров шага между элементами;
- ж) стабильность рисунка и его размеров во времени;
- з) стойкость к истиранию;
- и) плоскостность рабочей поверхности.

Требование высокой разрешающей способности фотошаблона диктуется необходимостью получения изображений порядка единиц и десятых долей микрона. Для получения рисунка с такими малыми размерами разрешающая способность эмульсии фотошаблона должна быть выше 1000 *линий/мм*.

Рабочая поверхность фотошаблона обычно имеет размеры 40×40 мм², что соответствует диаметру полупроводниковой пластины 35—40 мм. Это позволяет расположить на ней от 50 до нескольких тысяч (в зависимости от типа полупроводникового прибора) однотипных элементов.

В последнее время наметилась тенденция на использование кремниевых пластин значительно большего диаметра (60 и даже 80—90 мм), что в свою очередь требует и соответствующего увеличения площади рабочего поля фотошаблонов.

Увеличение диаметра пластин ведет к дальнейшему повышению производительности процессов групповой обработки.

Наличие чередующихся прозрачных и непрозрачных участков на малых площадях фотошаблона требует высокой контрастности и большой оптической плотности непрозрачных участков и отсутствия вуали на прозрачных участках. Обычно берется оптическая плотность непрозрачных участков не менее 2.

Точность геометрических размеров рисунка фотошаблона связана с геометрическими размерами активной структуры готового прибора.

Точность размера шага между отдельными элементами обусловлена необходимостью последовательного совмещения нескольких фотошаблонов, входящих в один комплект, а также тем, что на заключительной стадии обработки проводится скрайбирование. Точность по шагу должна быть не хуже 0,5 мкм.

Фотошаблоны не должны иметь на поверхности царапин, проколов фотоэмульсионного слоя, пятен и т. п. Количество дефектных элементов рисунка не должно превышать 1%.

Требования высокой стойкости фотошаблонов к истиранию обусловлены многократным технологическим процессом экспозиции фоторезиста, который проводится контактным способом. Частое прижатие фотошаблона к полупроводниковой пластине приводит к его истиранию. Эмульсионные фотошаблоны выдерживают около 20 операций контактной печати, а металлизированные фотошаблоны — до 500.

Плоскостность рабочей поверхности фотошаблона должна быть не хуже $0,5 \text{ мкм}$ на длине 25 мм во избежание зазоров между фоторезистом и шаблоном при контактной печати.

Существует несколько способов изготовления фотошаблонов. Рассмотрим основные из них.

Опико-механический способ создания фотошаблона начинают с вычерчивания увеличенного оригинала изображения. Предварительно рассчитывают размеры оригинала с увеличением в $100\text{—}1000$ раз. Вычерчивание производят с помощью координатографа на стекле, покрытом непрозрачным лаком. Резцом из алмаза или карбида вольфрама обводят контур оригинала изображения, и лишнюю пленку лака удаляют пинцетом. Вокруг оригинала обычно

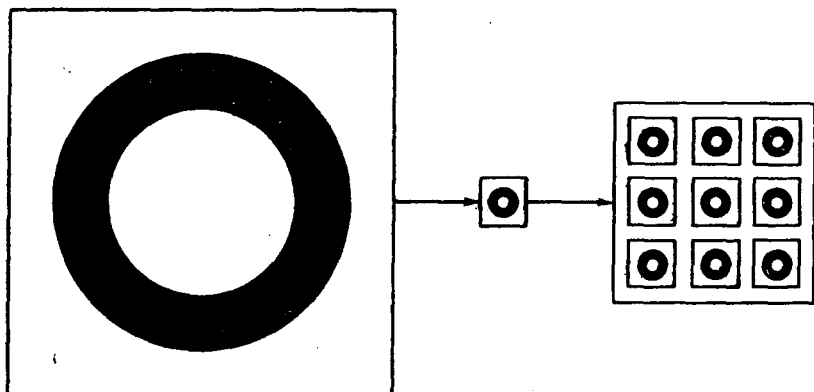


Рис. 3.1. Схема изготовления фотошаблона

вычерчивают прямоугольную или квадратную рамку, отграничивающую область, которая принадлежит одному структурному элементу и является базой для расположения микроизображений. Оригинал изображения фотографируют на фотопластинку с уменьшением в $50\text{—}100$ раз в проходящем свете для повышения контрастности. Полученный фотооригинал помещают в проекционный автоматический фотоштамп, где производится экспонирование изображения на фотошаблон с уменьшением до окончательных размеров и мультипликация (размножение) рисунка (рис. 3.1). Столик фотоштампа, на котором расположен будущий фотошаблон, перемещается в двух направлениях с заданным шагом с точностью до 1 мкм . При этом рамки, обрамляющие микроизображения, частично перекрываются, образуя прямоугольную сетку, облегчающую процесс совмещения фотошаблонов.

Фотоштампы обычно многоместные (9 мест), что позволяет проводить распечатку всего комплекта фотошаблонов (3—7 шт.) одновременно.

Заключительной операцией технологического процесса изготовления фотошаблонов является создание рабочих копий. Эту операцию осуществляют путем контактной перепечатки. Количество копий, которые можно снять с первого образца (эталона), не превышает 20—30.

Наиболее радикальным способом улучшения стойкости фотошаблонов к истиранию является контактное изготовление с эмульсионных эталонов металлизированных копий.

Для изготовления металлизированных фотошаблонов на поверхность оптического стекла наносят тонкий слой хрома толщиной около 1 мкм. Пленку хрома напыляют в вакууме или осаждают из металлоорганических соединений.

На стеклянные пластинки, покрытые пленкой хрома, наносят фоторезист и проводят контактную печать. После экспонирования

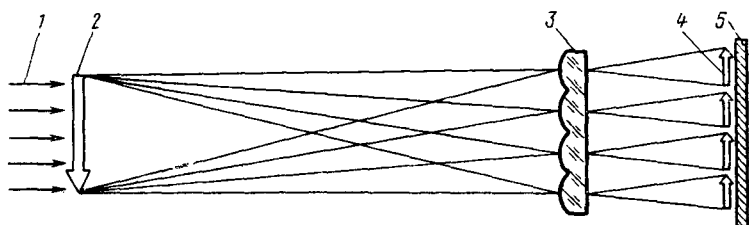


Рис. 3.2. Схема получения изображения с помощью линзового растра:

1 — пучок света; 2 — диафрагма-оригинал; 3 — линзовый растр; 4 — проекция изображения оригинала; 5 — фотопластинка

и снятия фоторезиста для получения нужного рисунка осуществляют травление открывшихся участков хрома. Готовые металлизированные фотошаблоны выдерживают несколько часов при повышенной температуре (порядка 100—150°С) для упрочнения пленки металла и улучшения сцепления ее со стеклом.

Линзоворастровый способ изготовления фотошаблонов отличается от предыдущего тем, что мультипликация изображений осуществляется автоматически.

Линзовый растр представляет собой множительную оптическую систему, состоящую из большого количества маленьких линз — объективов, размещенных по определенному закону на одной основе, имеющей вид плоскопараллельной пластины. Светофокусирующая поверхность линзовых элементов растра может быть сферической, цилиндрической, эллиптической, параболической, конической и др. Наиболее часто используют сферическую поверхность линзовых элементов.

Если перед линзовым растром поставить фотографируемый предмет, а в фокальной плоскости растра — фотопластинку, то каждая линза растра спроектирует данный предмет на фотослой в заданном размере. На рис. 3.2 показана схема получения изображения с помощью линзового растра.

Таким образом, линзовый растр позволяет получать от одного экспонируемого предмета большое количество его фотоизображений.

Данным методом можно получать как прямые (позитивные), так и обратные (негативные) фотоизображения. Если на белом фоне поместить черный предмет (непрозрачный к падающему на него свету), то на фотопластинке получится фон черный, а изображение белое, и наоборот, если на черном фоне (непрозрачном) поместить белый предмет (прозрачный к падающему на него свету), то его фотография будет черная, а фон белый.

Размеры изображений, получаемые на фотопластинке, могут регулироваться изменением расстояния между предметом и плоскостью линзового растра или изменением геометрических размеров фотографируемого предмета.

Для получения нужного расстояния между изображениями на фотопластинке выбирают линзовый растр с определенным шагом.

В настоящее время линзовые растры изготавливают из пластической массы, которую наносят на стеклянную подложку в виде отдельных сферических линз.

Процесс изготовления фотошаблонов данным методом состоит в следующем. На стекло или металл (в зависимости от того, какое изображение необходимо получить — позитивное или негативное) наносят объект фотографирования. В результате нанесения рисунка на стекло или металл получается диафрагма, контур и форма которой тождественны рисунку, получаемому на фотопластинке. Эту диафрагму располагают на определенном расстоянии от линзового растра, за которым помещается фотографическая пластинка. Все три объекта располагают параллельно друг другу. При экспозиции свет от источника падает перпендикулярно к плоскости диафрагмы и линзового растра на фотопластинку. Свет проходит через отверстие в диафрагме и попадает на линзовый растр. Каждая линза растра формирует изображение отверстия диафрагмы на определенном участке фотопластинки.

Таким образом, на фотопластинке получается количество изображений, равное числу линз в растре. Регулируя расстояние между диафрагмой и линзовым растром, подбирают необходимый геометрический размер изображения на фотопластинке. После соответствующей химической обработки фотопластинки получается фотошаблон с определенным рисунком по всему полю.

Для получения комплекта (набора) фотошаблонов процесс фотографирования необходимо последовательно повторить с помощью того же линзового растра, меняя диафрагмы с различными изображениями (рисунками). Изготовленный таким образом комплект фотошаблонов при процессах фотолитографии обладает высокой совмещаемостью отдельных фотошаблонов.

Получение смежных фотошаблонов с неповторяющимися элементами схемы осуществляют путем маскирования отдельных элементов или участков линзового растра по заданной программе.

Фотонаборный способ изготовления фотошаблонов основан на последовательном экспонировании перемещаемой фотопластины путем проекции на нее изображений в форме окна диафрагмы или промежуточных фотошаблонов. Свет от источника (лампа ДРШ-250) попадает на объектив и диафрагму, которая определяет заданную геометрическую форму светового пятна. Далее с помощью проекционных объективов световое пятно фокусируется на фотопластинку будущего фотошаблона.

Таким образом, изменяя форму окна диафрагмы и ее геометрические размеры, а также направление перемещения фотопластины, можно получать смежный рисунок на фотоэмульсии по всему полю фотошаблона.

Этот способ обеспечивает высокую производительность процесса изготовления фотошаблонов и позволяет применять ЭВМ.

Для изготовления фотошаблонов фотонаборным способом используют универсальные фотонаборные установки ЭМ-508, ЭМ-519 и ЭМ-527.

Рассмотрим особенности установки ЭМ-519, имеющей систему диафрагм, которые могут создавать до 9 млн. различных прямоугольных элементов, наклоняемых под любым углом с дискретностью 0,5°.

Полуавтоматическое устройство впечатывания элементов произвольной формы установки позволяет кроме генерирования изображения осуществлять и их мультипликацию. Установка снабжена прецизионным координатным столом для высокоточного перемещения фотопластины и мощной осветительной системой.

Технические характеристики установки ЭМ-519

Размер рабочего поля	75×75 мм ²
Точность установки координат	±0,0015 мм
Повторяемость установки координат	±0,0005 мм
Максимальные размеры элемента наборной диафрагмы	30×30 мм ²
Дискретность изменения размеров элемента	0,01 мм
Угол поворота диафрагмы	±45°
Масштабы оптического уменьшения в режимах фотонабора и мультипликации	10; 2 ^x
Диапазон времени изменения экспозиций	0,1—60 сек
Рабочая длина волны света	425±25 нм
Производительность	1200 экспозиций/ч

§ 3.4. Процесс фотолитографии

Планарная технология благодаря использованию процесса фотолитографии позволяет получать на одной кремниевой пластине более тысячи заготовок для отдельных приборов.

Фотолитографию используют в первую очередь для селективного удаления пленки двуокиси кремния над теми участками пластин, где должны быть созданы диффузионные структуры. Эту операцию именуют «вскрытие» окон в пленке двуокиси». Окна имеют

различные размеры и конфигурацию, чаще всего, однако, это — круг, кольцо или прямоугольник с размерами от единиц до сотен микрон.

Применение методов фотолитографии в полупроводниковой технологии позволяет решить ряд сложных конструктивных проблем: воспроизводимость и точность геометрии *p-n*-переходов в кристалле полупроводника; возможность создания интегральных схем; получение профилей сложной конфигурации, любых размеров на поверхности кристалла полупроводникового материала без нарушения структуры материала; осаждение металлов и сплавов на поверхность кристалла заданного рисунка известными методами (электролитическим, химическим, распылением в вакууме); создание омических контактов и выводов в конструкциях очень малых размеров.

Качество процесса фотолитографии определяется условиями, в которых он проводится. Для обработки фоторезиста, изготовления фотошаблонов, во избежание пор в пленке SiO_2 при окислении и т. д. используют специальные сверхчистые помещения. Помещение состоит из двух комнат — чистой и особо чистой. В особо чистую комнату нагнетается осушенный воздух с температурой 18°C и точкой росы — 45°C через полумикронные фильтры и выдувается в небольшое отверстие с фильтром в двери. Стены комнаты облицованы пластмассовыми панелями, к которым не прилипает пыль. Люди, входящие в особо чистую комнату, надевают белые нейлоновые сапоги, халаты, колпаки. Пластины переносят обязательно в герметичных контейнерах.

При отсутствии таких комнат оборудование, на котором производят основные технологические операции, монтируют в скафандры, обеспечивающие постоянную влажность, обеспыленную атмосферу и защиту от освещения.

Технологический процесс фотолитографии (рис. 3.3) состоит из нескольких основных операций: подготовки поверхности полупроводниковой пластины (обезжиривания и удаления грязи), нанесения на поверхность пластины слоя фоторезиста, сушки фоторезиста, экспонирования, проявления и задубливания фоторезиста, контроля геометрических размеров изображения, травления пленки SiO_2 , промывки пластин после травления, удаления пленки фоторезиста с поверхности окисного слоя кремния, контроля обработанных пластин.

Подготовка поверхности пластин перед нанесением фоторезиста — это ряд последовательных промывок с целью удаления загрязнений и обезжиривания. Наиболее эффективной является промывка пластин в жидком трихлорэтилене и его парах, а также в кипящей азотной кислоте. Кроме того, промывку пластин можно проводить в толуоле, амилацетате, ацетоне и этиловом спирте.

Для нанесения слоя фоторезиста на пластину используют методы центрифугирования, пульверизации, окунания в раствор, полива и т. д. Наиболее широко в полупроводниковой технологии применяют метод центрифугирования, так как при сравнительно не-

сложном оборудовании он позволяет получать равномерные пленки фоторезиста с разбросом по толщине, не превышающим $\pm 10\%$. Для нанесения слоя фоторезиста пластину с помощью вакуумного присоса закрепляют в центре вращающегося диска и в процессе его вращения на пластину из пипетки наносят несколько капель фоторезиста. Толщина слоя фоторезиста в сильной степени зависит от скорости вращения диска центрифуги и густоты фоторезиста. Обе эти характеристики подбирают эмпирически.

После нанесения слоя фоторезиста его подвергают сушке, во время которой происходит испарение растворителя и пленкообра-

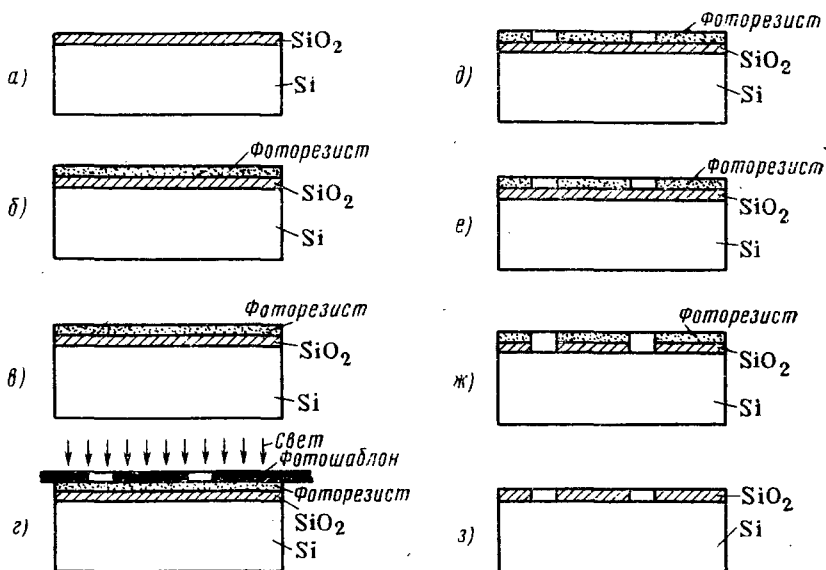


Рис. 3.3. Технологические операции фотолитографического процесса:

а — обезжиривание пластин; б — нанесение фоторезиста; в — сушка фоторезиста; г — совмещение и экспонирование; д — проявление фоторезиста; е — задубливание фоторезиста; ж — травление открытых участков пленки SiO₂; з — удаление пленки фоторезиста

зование. Для получения высококачественной пленки сушку фоторезиста осуществляют в два этапа. Сначала фоторезист в течение 15—30 мин подсушивают при комнатной температуре, а затем в течение 30—60 мин сушат при температуре 100—150°С. В некоторых случаях используют инфракрасную и вакуумную сушку фоторезиста.

Экспонирование осуществляют контактным способом. Под действием света в слое фоторезиста образуются локальные участки с изменившимися свойствами. Для экспонирования фоторезистов используют различные источники света, спектры излучения которых

содержат достаточно мощные линии в требуемом диапазоне длин волн. Наиболее часто применяют лампы ПРК-2, ПРК-4, СВДШ-250, СВД-120.

До проведения процесса экспонирования опытным путем подбирают необходимую величину экспозиции, при которой получается наиболее качественное воспроизведение рисунка. При изменении рисунка фотошаблона или другой какой-либо технологической операции величину экспозиции нужно подбирать заново.

Процесс проявления полученного изображения для негативных и позитивных фоторезистов заключается в удалении ненужных участков пленки фоторезиста. В результате такой обработки на поверхности пластины остается слой фоторезиста, рельеф которого воспроизводит необходимый рисунок.

Для негативных фоторезистов процесс проявления сводится к удалению неполимеризованных областей в тех же растворителях, которые используются для приготовления фоторезиста (толуол, трихлорэтилен, хлорбензол).

Для позитивных фоторезистов процесс проявления связан с химической реакцией превращения инденкарбоновых кислот в растворимые соли. Для проявления фоторезистов на основе хинондиазидов обычно используют сильноразбавленные водные растворы едкого натра или тринатрийфосфата.

Задубливание фоторезиста после его проявления проводят при более высоких температурах, чем сушку фоторезиста после его нанесения на пластину полупроводника. Процесс задубливания осуществляют в две стадии: при комнатной температуре и при температуре 150—200° С в течение 1 ч.

После задубливания пластины контролируют на отсутствие дефектов. Наиболее распространенными дефектами фотолитографии являются наличие клина, неровность края рисунка в виде выступов и впадин, локальные проколы и нарушения пленки фоторезиста. Эти дефекты выявляют, просматривая готовые пленки фоторезиста под микроскопом.

Процесс травления существует для того, чтобы удалить пленку SiO_2 или какого-либо металла, например Al, Ni, Cr и т. д. с поверхности пластины, не защищенной слоем задубленного фоторезиста. Травление в случае SiO_2 проводят в плавиковой кислоте. При выборе травителя учитывают, что чистый водный раствор плавиковой кислоты быстро проникает под пленку фоторезиста, вызывая подтравливание окисла и образование клина между пленкой SiO_2 и поверхностью полупроводникового материала. Для уменьшения этого явления в травильный раствор плавиковой кислоты вводят фтористый аммоний. Наиболее часто используют травитель следующего состава: 30 г NH_4F , 60 мл H_2O , 9 мл HF (48%).

После травления пластины подвергают тщательной промывке в деионизованной воде.

Удаление задубленного слоя фоторезиста производят в горячей концентрированной серной кислоте или щелочи.

После удаления фоторезиста с поверхности окисного слоя осуществляют контроль геометрических размеров полученного в окисном слое рисунка.

Кроме удаления пленки SiO_2 с поверхности полупроводниковых пластин для проведения процессов локальной диффузии фотолитографию используют для гравировки тонкопленочных металлических покрытий, служащих омическими контактами, токоведущими дорожками или сопротивлениями.

Фоторезист наносят на металлизированную поверхность пластины и подвергают обычной обработке.

Для травления алюминия с негативным фоторезистом используют 5—20%-ные растворы NaOH и KOH . Травление проводят при температуре 50—80°С. Скорость травления составляет 200—500 А/мин. Для позитивных фоторезистов щелочное травление алюминия заменяют кислотным. Для травления применяют 50%-ный раствор ортофосфорной кислоты, нагретой до температуры 60—70°С. Для травления алюминия можно использовать и другие травители. Например, состав, содержащий 3,8 л хлорного железа и 360 мл 38%-ного раствора соляной кислоты.

Травление хрома с защитным рельефом из позитивного фоторезиста проводят в разбавленной соляной кислоте. Реакция травления идет достаточно быстро.

Травлению золота в царской водке хорошо противостоят позитивные фоторезисты на основе нафтохинондиазида и новолака.

Пленку тантала с защитным рельефом из негативного фоторезиста сначала подвергают травлению в щелочных растворах для снятия слоя окиси тантала, затем в кислотном травителе, содержащем плавиковую кислоту.

§ 3.5. Проекционная оптическая фотолитография

Перенос изображения с фотошаблонов на полупроводниковые пластины можно осуществлять кроме контактной перепечатки методом проекционной печати.

Существуют три основных способа проекционной фотолитографии.

Первый способ состоит в одновременной передаче всех элементов, входящих в фотошаблон, на поверхность полупроводниковой пластины, покрытой слоем фоторезиста.

Второй способ заключается в поэтапном «шаговом» переносе изображения на пластину, покрытую фоторезистом.

Третий способ основан на вычерчивании изображения на пластине тонким лучом ультрафиолетового света.

Проекционный метод переноса изображения на полупроводниковую пластину позволяет избежать недостатков, присущих контактному методу. Изображение фотошаблона проектируется через специальный объектив с высокой разрешающей способностью, совмещение проводится также с помощью этого объектива. Из-за отсутствия контакта между полупроводниковой пластиной и фото-

шаблоном время использования последнего становится теоретически безграничным, повышается процент выхода годных, снижаются общие затраты на фотошаблоны. Устраняется также проблема глубины резкости объективов и связанная с ней проблема точности установки малых зазоров между фотошаблоном и пластиной, так как оператор может проводить совмещение изображений в одной плоскости: либо в плоскости фотошаблона, либо в плоскости полупроводниковой пластины.

Таким образом, проекционный метод повышает точность совмещения, упрощает процесс совмещения, снижает затраты времени.

На рис. 3.4 приведены три варианта оптических схем для проведения проекционной фотолитографии.

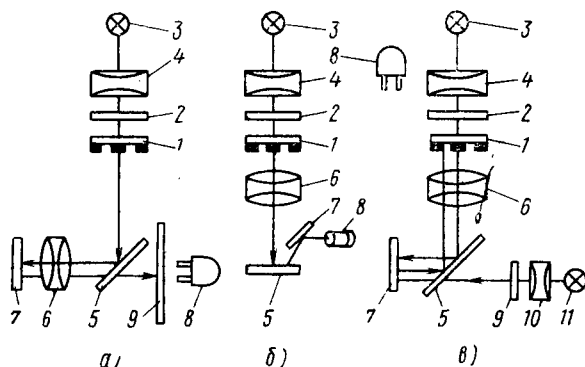


Рис. 3.4. Схемы оптической проекционной фотолитографии:

a — прямого проецирования; *б* — совмещения; *в* — обратного отображения: 1 — фотошаблон; 2 — конденсор; 3 и 11 — источники света; 4 и 10 — фильтры; 5 — зеркало; 6 — объектив; 7 — пластина; 8 — микроскоп; 9 — экран

На рис. 3.4, *a* фотошаблон 1 освещается через конденсор 2 источником света 3. Изображение проецируется через фильтр 4 и фотошаблон 1 на полупрозрачное зеркало 5 и через проекционный объектив 6 на полупроводниковую пластину 7. При обратном ходе лучей через объектив и зеркало с помощью микроскопа 8 в плоскости экрана 9 наблюдают расположенную на пластине структуру и спроецированное на нее изображение фотошаблона. Преимущество данной схемы в том, что ничего не требуется менять при переходе от операции совмещения к операции экспонирования.

Данная схема обладает следующими недостатками:

а) лучи света при совмещении проходят через наклонно расположенное полупрозрачное зеркало, что приводит к искажениям изображения;

б) при проведении совмещения проецируемое изображение фотошаблона дважды проходит через объектив и, следовательно, ошибки изображения, обусловленные погрешностями объектива, удваиваются;

в) рассеяние проецируемого пучка лучей на линзах объектива вызывает потерю контрастности изображения.

На рис. 3.4, б совмещение фотошаблона производят на небольшом зеркале с помощью микроскопа. Эта схема не имеет недостатков предыдущей схемы. Однако угловая апертура лучей света, используемых для экспонирования и совмещения, в наблюдаемой области под зеркалом уменьшается, что в свою очередь приводит к искажению изображения.

На рис. 3.4, в показана оптическая схема, в которой используется принцип обратного отображения поверхности полупроводниковой пластины на плоскость фотошаблона. С оптической точки зрения данная схема является оптимальной. В этой схеме ход лучей света, проецируемых с помощью источника света 3 через фотошаблон 1 на объектив 6 и далее посредством полупрозрачного зеркала на полупроводниковую пластину 7, полностью совпадает с наблюдаемым в микроскоп ходом лучей в обратном направлении. Данная схема позволяет выбрать оптимальные условия освещения как при экспонировании, так и при совмещении. Между фотошаблоном и полупроводниковой пластиной нет никаких дополнительных оптических элементов, кроме объектива и зеркала. Недостатком схемы при экспонировании является необходимость замещения микроскопа источником света и конденсором. Кроме того, для освещения полупроводниковой пластины при совмещении нужны второй источник света и второй конденсор.

При изготовлении полупроводниковых приборов и микросхем с малыми размерами элементов экспонирование проводят через микроскопические объективы. Эти объективы обеспечивают получение на фоторезисте линий шириной 0,4 мкм на площади $0,2 \times 0,2 \text{ мм}^2$, шириной 0,6 мкм на площади $0,5 \times 0,5 \text{ мм}^2$ и шириной 1 мкм на площади $2 \times 2 \text{ мм}^2$.

Для изготовления приборов и схем большого размера, требующих меньшей точности, применяют фотообъективы с высокой разрешающей способностью. Эти объективы обеспечивают получение линий шириной 3 мкм на площади $20 \times 20 \text{ мм}^2$.

При проведении проекционной фотолитографии учитывают совместимость элементов системы источник — объектив — фоторезист, т. е. определяют спектральную чувствительность используемых фоторезистов и выбирают источник света для экспонирования, распределение спектрального излучения которого близко к распределению спектральной чувствительности применяемого фоторезиста. Обычно выбирают источник света с линейчатым спектром (так как объективы можно корректировать по абберациям на одну длину волны света), такие, например, как ртутные лампы высокого давления. При выборе источника света следует также оценивать интенсивность излучения на выбранных длинах волн.

Минимальный размер изображения h можно рассчитать по формуле

$$h_{\min} = 1,22 \frac{f}{D} \lambda \left(1 + \frac{1}{M}\right),$$

где f — фокусное расстояние;

D — диаметр входного отверстия;

λ — длина волны света;

M — постоянная уменьшения масштаба ($M=1, 2, 3 \dots$).

В промышленной практике проекционная фотолитография значительно меньше распространена, чем контактная.

§ 3.6. Бесшаблонная линзоворастровая фотолитография

Получение комплекта фотошаблонов высокого качества — дорогостоящий и трудоемкий процесс. Совмещаемости шаблонов могут препятствовать разномасштабность вследствие погрешностей, вно-

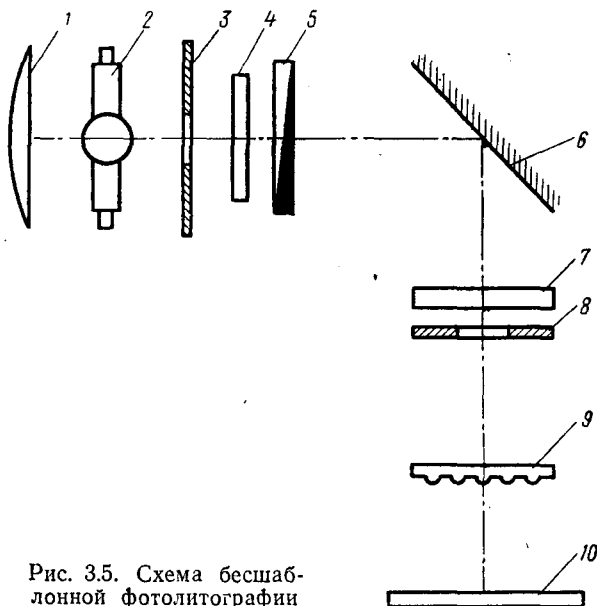


Рис. 3.5. Схема бесшаблонной фотолитографии

симых оптическими системами при съемках, шаговая погрешность, обусловленная, например, изменением окружающей температуры на $1-2^\circ\text{C}$ при работе фотоумножителя. Кроме того, необходим плотный контакт между шаблоном и пластиной полупроводника.

Теоретические и экспериментальные исследования показали, что линзоворастровый метод фотолитографии обладает большой точностью и высокой экономической эффективностью. Его приме-

нение без фотошаблонов позволяет устранить многие связанные с этим недостатки.

Данный метод получения микроизображений на поверхности полупроводниковой пластины исключает трудоемкий и сложный процесс изготовления фотошаблонов на оптическом стекле и состоит в получении микроизображений проекцией их на полупроводниковую пластину с помощью линзовых растров. Оптическая схема метода показана на рис. 3.5.

На этой схеме осветительная ртутно-кварцевая лампа 2 высокого давления (ДРШ-500) крепится в зеркальном цилиндрическом рефлекторе 1 с отверстием в центре для получения направленного пучка света. Пучок света проходит последовательно через диафрагму 3, тепловой фильтр 4, который выполнен из оптического кварцевого стекла, затвор 5 и попадает на зеркало 6. Отраженный от зеркала пучок света попадает на рассеивающее матовое стекло 7 и через оригинал-трафарет 8 падает на линзовый растр 9. Линзовый растр преобразует общий пучок света в отдельные пучки света, которые воздействуют на пленку фоторезиста, нанесенную на поверхность полупроводниковой пластины 10.

Для получения высококачественного изображения рисунка на полупроводниковой пластине ее необходимо размещать в фокальной плоскости линзового растра, а линзовые растры брать с высокой глубиной резкости.

§ 3.7. Изготовление металлических масок

Разработка новых типов полупроводниковых приборов требует локального нанесения различных материалов через металлические маски, в которых имеются сквозные отверстия соответствующего рисунка. Металлические маски представляют собой плоские тонкие пластины размером $70 \times 70 \text{ мм}^2$ и рабочим полем $40 \times 40 \text{ мм}^2$.

Существует несколько различных методов изготовления металлических масок: механическое фрезерование, химическое и электролитическое травление, фотолитография.

Механический метод применяют при изготовлении металлических масок с крупным рисунком (не менее $0,5\text{--}1 \text{ мм}$); химический и электролитический методы — масок меньших размеров.

В качестве материала для металлических масок используют фольгу из меди, латуни или молибдена толщиной $50\text{--}100 \text{ мкм}$. На медные и латунные маски часто наносят слой никеля, для защиты их от окисляющего воздействия окружающей среды.

Наиболее высокими качествами обладают маски, изготовленные фотолитографическим методом из молибдена. Фотослоем для молибдена служит фоторезист НХДА, так как все диазосоединения имеют хорошую адгезию к металлам. Фоторезист с двух сторон наносят на пластину из молибденовой фольги, которую предварительно обезжиривают. Пластины молибдена с задубленными слоями фоторезиста помещают в ванну с кислотным травителем для получения сквозных отверстий нужного рисунка. Существуют два

способа сквозного протравливания молибдена: химический и электролитический.

Химическое вытравливание микроизображений в молибденовой фольге осуществляют в кислотной смеси следующего состава: азотная кислота — 60%; серная кислота — 5%; вода деионизованная — 35%.

Для улучшения процесса травления можно использовать травильную ванну с вибратором.

Процесс электролитического вытравливания микроизображений дает возможность получать рисунок высокого качества с минимальной величиной неровности края изображения. В качестве электролита при вытравливании микроизображений используют следующий состав: серная кислота — 16%; ортофосфорная кислота — 40%; вода деионизованная — 44%.

При изготовлении металлических масок наиболее сложным технологическим процессом является совмещение двух фотошаблонов для двустороннего копирования, т. е. для получения идентичного рисунка с двух сторон металлической пластины прикладывают два фотошаблона-близнеца, предварительно совмещенных относительно рисунка в копировальной рамке.

Процесс совмещения двух фотошаблонов-близнецов требует высокой квалификации оператора и весьма трудоемок.

Поэтому для двустороннего копирования используют другой способ получения фотошаблонов-близнецов. Этот способ заключается в том, что на верхней части копировальной рамки закрепляют один из фотошаблонов с нужным изображением, а на нижней части — стекло со слоем фоторезиста. Полученную систему подвергают экспонированию и последующей обработке. В результате получается второй фотошаблон, который по отношению к первому фотошаблону является близнецом и располагается с ним на одной копировальной рамке. Для получения двустороннего однотипного изображения металлическую фольгу с нанесенным фоторезистом помещают в копировальную рамку между двумя фотошаблонами-близнецами и подвергают экспонированию.

§ 3.8. Дефекты при проведении процесса фотолитографии

Основными дефектами при проведении процессов фотолитографии являются:

- а) наличие проколов в пленке фоторезиста;
- б) неровность пленки фоторезиста по всей поверхности пластины;
- в) наличие клина в окисной пленке;
- г) неровность края изображения пленки фоторезиста;
- д) изменение заданных, геометрических размеров;
- е) наличие ореола по краю изображения.

Все перечисленные дефекты оказывают большое влияние на последующие технологические операции изготовления приборов, ухудшая их электрические параметры.

Наличие проколов в пленке фоторезиста — наиболее распространенный вид фотолитографических дефектов. Возникают эти дефекты в результате использования некачественных или износившихся фотошаблонов, а также от наличия в фоторезисте пылинок, субполимерных частиц и других посторонних включений. Проколы в пленке фоторезиста могут возникать также в результате перегрева этой пленки при экспонировании. Количество проколов в значительной степени зависит от качества смачивания поверхности пластины фоторезистом. Плохое смачивание приводит к появлению большого числа проколов. Проколы в пленке фоторезиста при химическом травлении пластины в плавиковой кислоте для вскрытия окон под диффузию переходят в защитный окисный слой. При последующей диффузионной обработке пластины под проколами в окисном слое возникают «паразитные» локальные диффузионные области. Если проколы в окисной пленке находятся вблизи границы основного рабочего элемента, то после процесса диффузии может произойти смыкание основной рабочей области прибора с «паразитной» областью. В высокочастотных транзисторах проколы могут вызвать закорачивание эмиттерной и базовой областей.

Для того чтобы оценить влияние проколов на изменения электрических характеристик приборов, необходимо знать плотность, размер и характер распределения проколов по поверхности пластины полупроводника. Эти характеристики обычно определяют путем визуального наблюдения с помощью микроскопов МИМ-7, МБИ-6.

Неровность пленки фоторезиста по всей поверхности пластины определяется как способом нанесения пленки, так и предварительной обработкой поверхности пластины. Основными параметрами предварительной обработки пластин, влияющими на неровность пленки фоторезиста, являются чистота обработки поверхности (класс чистоты), плоскостность и плоскопараллельность. Однако даже при получении высоких показателей по предварительной обработке могут быть случаи неравномерного нанесения пленки фоторезиста на поверхность пластины. Основными факторами, которые обуславливают неровность пленки фоторезиста, могут быть чрезмерная густота фоторезиста, низкая скорость вращения центрифуги, отклонение плоскости столика центрифуги от горизонтальной плоскости. Неровности в пленке фоторезиста приводят к трудностям контактирования с фотошаблоном, выбора времени экспозиции и, как следствие этого, к дефектам в последующих технологических операциях.

Наличие клина в окисной пленке — один из часто встречающихся в фотолитографическом процессе дефектов. Клин возникает в окисном слое между исходным кремнием и пленкой фоторезиста на границе вскрытого окна для последующей диффузии (рис. 3.6). Этот вид дефекта оказывает существенное влияние на размер создаваемой диффузионной области и, следовательно, на параметры изготавливаемого полупроводникового прибора. Без клина в окисной пленке распространение диффузанта вбок строго определяется

режимом диффузии и однозначно связано с глубиной диффузии. При наличии клина дополнительно увеличиваются размеры диффузионной области за счет проникновения диффундирующей примеси через тонкую область клина в исходный полупроводниковый материал. Это происходит потому, что толщина окисла в области клина является недостаточной для защиты полупроводника от диффундирующей примеси. Поэтому, чем больше клин, тем шире его тонкая область и, следовательно, больше дополнительное неконтролируемое увеличение диффузионной области.

Для круглых отверстий диаметр диффузионной области можно определить из следующего эмпирического выражения:

$$d_{\text{дифф}} = d_{\text{окна}} + 2h_{\text{дифф}} \left(1 + \frac{k}{10l} \right),$$

где k — величина клина;

l — толщина SiO_2 ;

$d_{\text{к}}$ — диаметр окна в окисном слое;

$h_{\text{дифф}}$ — глубина диффузионного слоя.

На негативных фоторезистах величина клина может достигать 1—2 мкм при толщине окисного слоя 0,7—0,8 мкм. Позитивные фоторезисты дают меньшую величину клина — порядка 0,3—0,4 мкм при той же толщине окисного слоя.

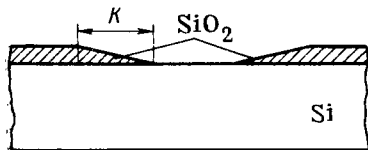


Рис. 3.6. Схема образования клина в окисной пленке

Причинами, вызывающими появление клина в фотолитографическом процессе, могут быть неправильно подобранная экспозиция фоторезиста, наличие плохого контакта между пластиной и фотошаблоном при экспонировании, недоста-

точная оптическая плотность непрозрачных участков фотошаблона, неперпендикулярное падение света на фотошаблон, а также некачественное проявление фоторезиста после экспонирования.

Неровность края изображения пленки фоторезиста появляется в тех случаях, когда плохо подобраны режимы экспозиции и проявления. Мельчайшие неровности края в виде периодических выступов и впадин могут возникать из-за наличия в фоторезистах субполимерных частиц размером 0,3—0,5 мкм. Появление таких частиц связано с неполной растворимостью сухого резиста в используемых составах. Более крупные и нерегулярные выступы (вырывы) и впадины обычно появляются при использовании некачественных фотошаблонов. Наиболее часто этот вид дефекта возникает при употреблении металлизированных шаблонов, имеющих зубчатые края элементов изображения. Для предупреждения этого вида дефекта необходимо тщательно фильтровать фоторезист и проверять качество используемого фотошаблона.

Изменение заданных геометрических размеров изображения имеет место при плохом контакте между полупроводниковой пластиной и фотошаблоном. Плохой контакт между этими элементами приводит к появлению воздушного зазора, который при экспонировании изменяет характер и размер переносимого с фотошаблона изображения. Чем больше зазор между контактируемыми элементами, тем сильнее искажается первоначальный рисунок изображения. Кроме того, на изменения геометрических размеров изображения могут оказывать существенное влияние неправильно подобранные режимы экспонирования и проявления.

Наличие ореола по краю изображения связано с рассеянием света, проходящего через фотошаблон при экспонировании. Рассеяние света приводит к образованию по краю изображения «нерезкой зоны», которая после проявления дает ореол. Этот вид дефекта приводит к ухудшению геометрических параметров изображения и последующих технологических операций.

§ 3.9. Технологическое оборудование для фотолитографии

Агрегат, используемый для проведения процесса фотолитографии, состоит из двенадцати однотипных соединенных между собой скафандров. В этих скафандрах размещены семь различных установок для: обезжиривания, нанесения фоторезиста, сушки, совмещения и экспонирования, проявления и травления, удаления фоторезиста, контроля.

На рис. 3.7 показана последовательность расположения этих установок в агрегате фотолитографии. Пластины кремния после процесса окисления в герметизированных контейнерах через шлюз загружаются в скафандр 1, в котором расположена установка обезжиривания. Обезжиренные пластины из скафандра 1 через шлюз поступают в скафандр 2, в котором расположена установка для нанесения фоторезиста. Пластины с нанесенным фоторезистом через шлюз переносятся в скафандр 3, где находится печь для сушки фоторезиста. В скафандрах 4 и 5 расположены две одинаковые установки для совмещения и экспонирования, которые соединены между собой и скафандром 3 герметичными шлюзами. После совмещения и экспонирования пластины поступают в скафандр 6, в котором расположена установка проявления. Проявленные пластины передаются в скафандр 7 для проведения контроля полученного проявленного рисунка микроизображения. В скафандре 8 установлена печь для сушки проявленного фоторезиста. После сушки пластины подвергают травлению в установках, которые расположены в скафандрах 9 и 10. Пластины с вытравленным в окисном слое рисунком поступают в скафандр 11 для снятия слоя фоторезиста. Последний скафандр 12 аналогичен седьмому и служит для контроля качества пластин после проведения всего фотолитографического процесса.

Все составные части агрегата имеют систему пылезащиты, которая включает устройства подачи в скафандры очищенного азота

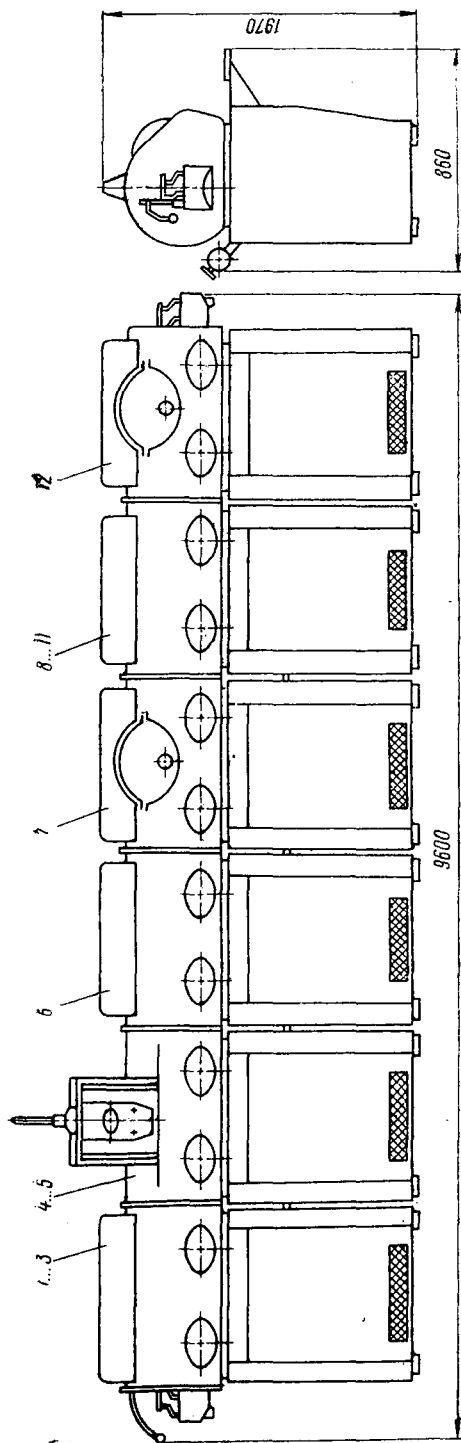


Рис. 3.7. Последовательность расположения скафандров в линии фотолитографии

и формирования электрических зарядов большой мощности для собирания пыли в определенных участках установок (допустимая норма запыленности внутри скафандров не должна превышать 5 пылинкок на $1 \text{ см}^2/\text{ч}$).

Рассмотрим устройство и принцип действия основных установок агрегата фотолитографии.

Установка для обезжиривания состоит из стола, скафандра и ванны и предназначена для промывки пластин в парах кипящего толуола или трихлорэтилена. Полупроводниковые пластины загружают в кассету из фторопласта, опускают в пары кипящего толуола с температурой $80-90^\circ \text{C}$ и выдерживают в течение 3—5 мин. Кассета соединяется с механическим приводом, с помощью которого она опускается в ванну с растворителем. Ванна, изготовленная из нержавеющей стали, имеет змеевик, в котором пары растворителя конденсируются и сливаются в магистраль для сброса активных веществ. Ванна с механизмом привода располагается на рабочем столе установки и накрывается сверху герметичным и прозрачным скафандром. Установка имеет два шлюза для ввода пластин в рабочую камеру и передачи их на следующую операцию. На задней

стенке скафандра смонтировано устройство для создания электростатического поля, которое обеспечивает захват и оседание пылинок на заряженной пластине.

Схема установки для обезжиривания и травления показана на рис. 3.8. От электродвигателя 2 через муфту 3 передается усилие на вал 1 и шестерню 4. Вал 1 проходит через корпус ванны 5 и соединяется с кассетой 6. В корпусе 5 имеется загрузочное отверстие 7. С помощью двигателя 2 кассета опускается в ванну 8 и после проведения процесса обезжиривания поднимается в верхнюю часть рабочей камеры. Ванна 8 снабжена внешним нагревателем 9 для подогрева рабочей жидкости.

Установка для нанесения фоторезиста включает два дозатора, две центрифуги, стол и скафандр. Дозаторы 1 с центрифугами 3

(рис. 3.9) размещают на столе 4 установки и герметично закрывают прозрачным колпаком. Нанесение фоторезиста на полупроводниковые пластины производят следующим образом. На диск центрифуги помещают полупроводниковую пла-

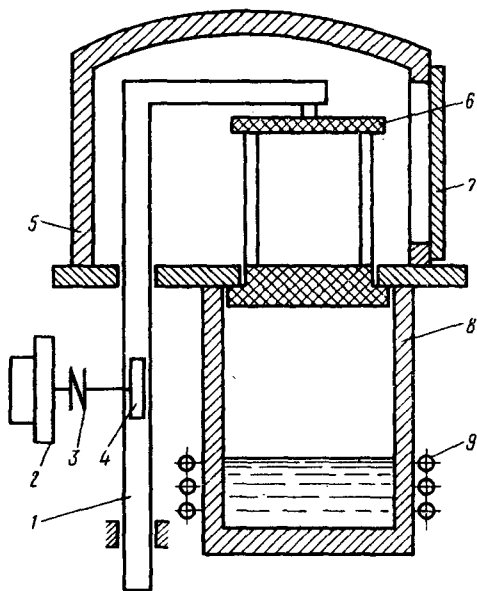


Рис. 3.8. Установка для обезжиривания и травления пластин кремния

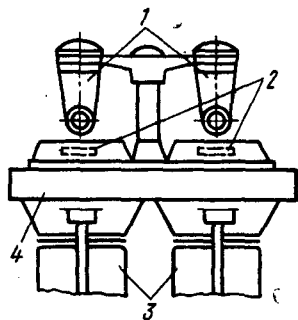


Рис. 3.9. Установка для нанесения фоторезиста:

1 — дозаторы; 2 — пластины; 3 — центрифуги; 4 — стол

стину и закрепляют ее с помощью вакуумного присоса. Из дозатора на пластину наносят фоторезист. Объем наносимого фоторезиста зависит от площади исходной пластины, консистенции фоторезиста и скорости вращения центрифуги. При вращении центрифуги под действием центробежных сил фоторезист растекается по поверхности пластины тонким ровным слоем.

Один дозатор служит для нанесения фоторезиста, а другой для подачи растворителя (толуола). Две центрифуги используют

поочередно таким образом, чтобы при работе одной вторая проходила процесс промывки в растворе.

При работе на установке внутрь скафандра подается очищенный азот.

Скафандр имеет два шлюза для получения и передачи пластин с одной технологической операции на другую. Для очистки внутренней полости скафандра от пыли имеется устройство, создающее электростатическое поле, которое обеспечивает оседание пыли на заряженной пластине, расположенной вдоль задней стенки скафандра.

Установка сушки пластин с фоторезистом включает стол, на котором смонтирована печь, и герметичный скафандр. Печь имеет две зоны и изготавливается из нержавеющей стали. Первая зона представляет собой предварительную камеру для загрузки кассет, а вторая зона является сушильной камерой. Предварительная камера печи снабжена двойными стенками, между которыми циркулирует сжатый воздух для ее охлаждения. Для охлаждения кассет с пластинами, находящимися внутри предварительной камеры, в нее подается очищенный азот. Сушка фоторезиста производится в среде азота. Температура печи может устанавливаться в диапазоне от 100 до 200° С и поддерживаться с точностью $\pm 10^\circ$ С.

Установка совмещения и экспонирования предназначена для совмещения рисунков на пластине с рисунком на фотошаблоне, получения между ними плотного механического контакта и экспонирования слоя фоторезиста через отверстия в рисунке фотошаблона. Установка состоит из стола, манипулятора, проектора, осветителя и скафандра. Прозрачный скафандр герметично закрывает все элементы установки, смонтированные на ее столе.

Основным элементом для совмещения рисунка на пластине с рисунком на фотошаблоне является манипулятор (рис. 3.10), состоящий из столика со сферическим основанием, рамки, двух эксцентриковых дисков для перемещения столика, устройства для вращения столика и корпуса.

Перед процессом совмещения пластину 1, покрытую фоторезистом, помещают на сферический столик 2 и сжатым воздухом поднимают до соприкосновения с поверхностью фотошаблона 3, который расположен на рамке 4. Фотошаблон в свою очередь тоже может перемещаться вместе с рамкой под действием сжатого воздуха. Совмещение рисунка фотошаблона с рисунком на пластине производится с помощью вращения двух эксцентриковых дисков 5 и 6, которые перемещают камеру с рамкой в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Кроме того, манипулятор снабжен устройством 7, которое позволяет вращать столик с пластиной вокруг вертикальной оси. Фиксация столика в нужном положении производится с помощью тороида 8, расположенного по окружности столика в неподвижном корпусе манипулятора 9.

После процесса совмещения производят экспонирование фоторезиста осветителем, выполненным на основе лампы ДРШ-250.

Время экспонирования автоматически задается с помощью реле времени.

Установка для проявления фоторезиста и травления окисного слоя кремния состоит из трех ванн (проявления, травления и промывки), камеры сушки и герметичного скафандра. Все узлы установки монтируются на столе и защищаются от внешних воздействий прозрачным скафандром.

Ванна для проявления фоторезиста одновременно служит ванной для травления окисного слоя кремния. Для проявления фото-

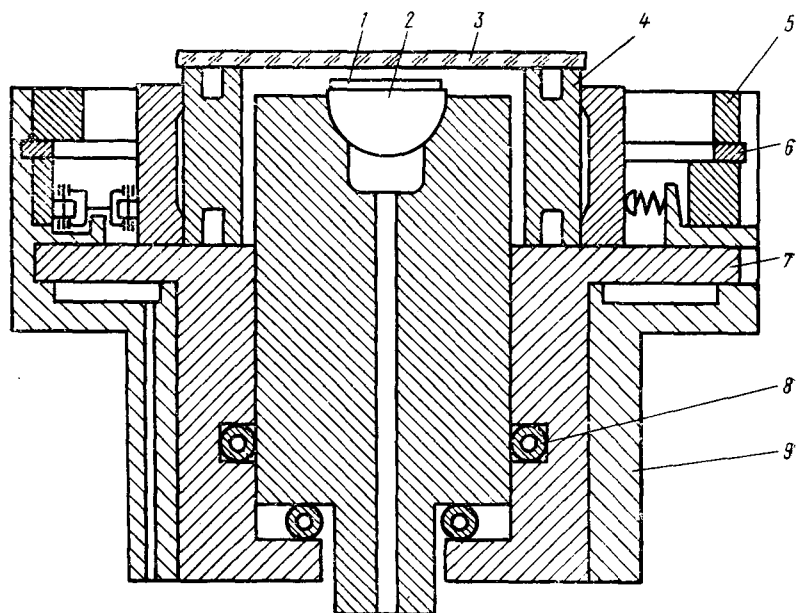


Рис. 3.10. Установка для совмещения микроизображений

резиста в ванну заливают толуол, а для травления окиси кремния — смесь плавиковой кислоты с фтористым аммонием. После травления кассета с пластинами просушивается в струе азота и промывается в дистиллированной воде.

Ванна для промывки имеет в верхней части радиальные отверстия. При прохождении через эти отверстия струи воды образуется душ, который промывает пластины.

Промытые пластины поступают в камеру сушки, в которую подается нагретый до 40—50° С азот.

Установка контроля предназначена для оперативного контроля основных характеристик и дефектов фотолитографического процесса. На столе установки смонтирован микроинтерферометр, который заключен в прозрачный герметичный скафандр. В качестве интерферометра часто используют микроскоп МИИ-4.

МЕТОД СПЛАВЛЕНИЯ

§ 4.1. Физико-металлургические основы образования сплавного p - n -перехода

Метод сплавления широко используют в технологии производства полупроводниковых приборов для создания p - n -переходов и омических контактов.

Для образования сплавного p - n -перехода на поверхность полупроводникового кристалла помещают электродный материал — металл или сплав; система нагревается до температуры, при которой осуществляется сплавление, и после небольшой выдержки охлаждается. Характер протекания процесса сплавления и качество получаемых переходов определяются поверхностными свойствами металла и полупроводника, чистотой реагирующей системы, состоянием окружающей атмосферы, взаимной растворимостью компонентов, диффузией атомов металла и полупроводника в жидкой фазе, растеканием расплава.

Физические процессы, происходящие при сплавлении, делятся на три последовательных этапа:

- 1) смачивание электродным материалом поверхности полупроводника;
- 2) растворение некоторого объема полупроводника в электродном сплаве, определяемое диаграммой состояния;
- 3) образование p - n -перехода или омического контакта вследствие кристаллизации растворенного полупроводникового материала при охлаждении расплава.

Смачивание. До растекания расплавленного металла или растворения должно иметь место смачивание поверхности полупроводника расплавом.

Чем больше молекулярное сродство между контактирующими веществами, тем лучше смачивание и тем больше растекание расплава.

На рис. 4.1 показаны в виде векторов составляющие сил поверхностного натяжения, действующие на край капли расплава, находящейся на поверхности твердого тела. Условие равновесия сил поверхностного натяжения, если они значительно больше силы тяжести, определяет величину краевого угла смачивания θ :

$$\cos \theta = \frac{\gamma_S - \gamma_{SL}}{\gamma_L}, \quad (4.1)$$

где γ_S — сила поверхностного натяжения на границе твердое тело — окружающая среда;
 γ_L — сила поверхностного натяжения на границе расплав — окружающая среда;
 γ_{SL} — сила поверхностного натяжения на границе расплав — твердое тело.

Как видно из рис. 4.1, смачивание и растекание тем больше, чем меньше угол θ ; это удовлетворяется при большой величине γ_S и малых γ_L и γ_{SL} . Для хорошего растекания расплава по полупроводнику должно выполняться условие $\gamma_S \geq \gamma_L$. Чем больше различие между γ_S и γ_L , тем больше угол смачивания.

Поверхностное натяжение большинства материалов, находящихся в жидкой фазе, изменяется при изменении температуры по закону, близкому к линейному, уменьшаясь с нагревом:

$$\gamma_L = \gamma_0 \left(1 - \frac{T}{T_{кр}}\right)^{11/9}, \quad (4.2)$$

где $T_{кр}$ — критическая температура, при которой поверхностное натяжение практически равно нулю;

γ_0 — некоторая константа.

Для различных температур сплавления величина краевого угла различна. При сплавлении германия с индием или свинцом эти изменения имеют вид кривых с максимумами (рис. 4.2).

Вначале с ростом температуры краевой угол увеличивается и принимает максимальное значение $\pi/2$ при 300°C для индия и $2\pi/3$ при 500°C для свинца, после чего начинает уменьшаться. Это явление не может быть связано с уменьшением поверхностного натяжения сплава, так как оно изменяется монотонно. Изменение краевого угла смачивания объясняется тем, что при определенных температурах начинается интенсивное растворение полупроводника, в результате чего изменяется направление действия сил поверхностного натяжения.

Наличие примесей на поверхности твердого тела, как правило, ухудшает ее смачивание металлами. Примеси в расплаве, уменьшая его поверхностное натяжение, напротив, способствуют смачиванию. Окисление поверхности полупроводника в большинстве случаев является серьезным фактором, препятствующим равномерному смачиванию.

При создании сплавных приборов на германии и кремнии наиболее широко употребляют индий, алюминий, олово и золото. Золото не образует стабильных окислов при повышенных температурах. Однако многие металлы, используемые в полупроводниковой металлургии, а также кремний, германий и их эвтектики с золотом

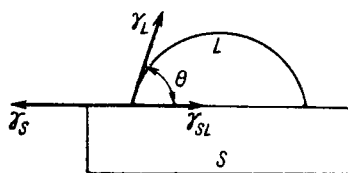


Рис. 4.1. Направление действия сил поверхностного натяжения при сплавлении металла в полупроводник

очень быстро образуют окислы на поверхности; их смачивание может быть обеспечено только после механического разрыва пленки окисла. Окислы, возникающие на индии или германии, легко восстанавливаются водородом при температурах сплавления. На поверхностях алюминия и кремния образуются наиболее стабильные и устойчивые окислы, которые не восстанавливаются в водороде. Источником кислорода часто являются водяные пары. Окисление может быть замедлено, если процесс сплавления осуществляется в восстановительной или в нейтральной атмосфере.

Наличие на поверхности твердых тел окислов или иных поверхностных слоев не всегда существенно препятствует смачиванию.

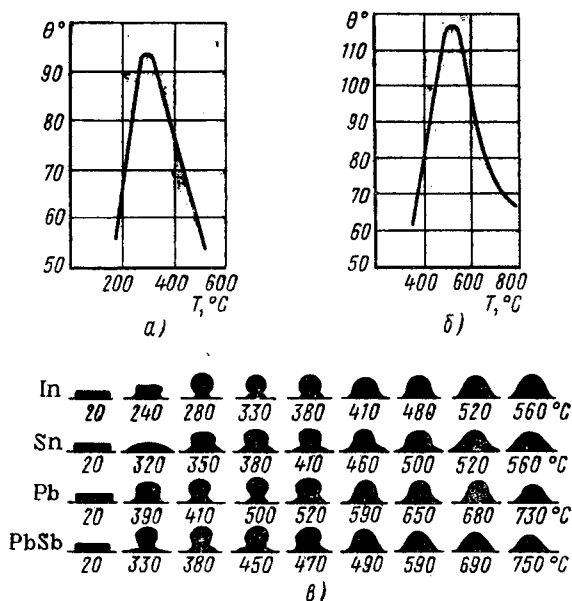


Рис. 4.2. Изменение краевого угла смачивания при сплавлении германия с индием (а) и свинцом (б) и кинограммы профилей цилиндрических электродов из In, Sn, Pb, PbSb в различные моменты нагрева на германиевой пластине (в)

Многие расплавленные металлы способны отслаивать пленку окисла от подложки, на которой они образовались. Это происходит либо вследствие диффузии через окисел, либо в результате проникновения расплава в приповерхностную область через микропоры в слое окисла и последующего растекания вдоль этой приповерхностной области.

Иногда наблюдается явление дифференциального смачивания, состоящее в постепенном изменении смачиваемости поверхности. Оно обусловлено изменением состава расплава, происходящим

в процессе сплавления, образованием многофазного неомогенного района в пограничной области, осаждением второй фазы на одной из твердых поверхностей, а также благодаря наличию градиента температуры.

Между смачиванием и взаимной растворимостью в жидком состоянии существует связь. Если полупроводник не растворим в находящемся на нем расплаве металла, то смачивание не происходит. Если он хорошо растворим, то наблюдается эрозия, предшествующая растеканию расплава по поверхности раздела. Поэтому для равномерного растекания предпочтительным является условие частичного смачивания расплавом поверхности твердого тела.

Большинство жидких металлов на германиевой поверхности в атмосфере водорода имеет меньший краевой угол смачивания, чем в вакууме.

Значения краевых углов большинства расплавленных металлов на кремнии слабо зависят от природы окружающей атмосферы и определяются в основном подготовкой поверхности, температурой, увлажненностью используемого газа. В водороде восстанавливается пленка GeO_2 , а SiO_2 — остается.

При сплавлении алюминия с кремнием в водороде растекание и глубина впаивания при малых размерах алюминиевого электрода и невысоких температурах наименьшие, а при высоких температурах и больших размерах электрода — наибольшие. В азоте растекание получается сравнительно большим, а глубина впаивания — малой. Атмосфера формир-газа (80% азота и 20% водорода) обеспечивает малое растекание, но наиболее глубокое впаивание и облегчает контроль операции сплавления. В аргоне растекание получается большим, а глубина впаивания — невелика.

Для равномерного смачивания и растекания электродного сплава при сплавлении с германием и кремнием применяют следующие меры: подбирают материал электрода, растворяющего окисную пленку (например, алюминий для кремния); травят поверхность полупроводника перед сплавлением для удаления загрязнений и окислов; используют раскисляющие флюсы, позволяющие получать чистую поверхность полупроводника и сплава (например, фтористый цезий или гидрид титана при сплавлении олова и свинца с кремнием); проводят сплавление в восстановительной среде (водороде или формир-газе); добавляют в электродный материал поверхностно-активные элементы, уменьшающие поверхностное натяжение капли на границе сплав — полупроводник (например, эвтектики титана и циркония с серебром, никелем и медью); обеспечивают давление на электродную каплю с помощью специальных касет для более равномерного растекания и плотного прилегания к поверхности полупроводника; повышают температуру сплавления, что ведет к уменьшению поверхностного натяжения, и, следовательно, к лучшему смачиванию; предварительно наносят на поверхность полупроводника тонкие слои металлов, способствующих растеканию капли сплава, например золото — на поверхность кремния.

Растворение. Для получения ровных фронтов сплавления полупроводниковые пластины обычно ориентируют таким образом, чтобы плоскость пластины совпадала с кристаллографической плоскостью (111). Атомы связаны в этой плоскости наиболее сильно, поэтому в направлении [111] освобождение атомов из узлов кристаллической решетки и переход их в расплав идут с наименьшей скоростью, что обеспечивает плоский фронт сплавления. Кроме того, замечено, что плоскость (111) лучше других плоскостей смачивается различными металлами.

Процесс растворения описывается на основе представления о химическом потенциале. Химический потенциал характеризует величину свободной энергии, приходящейся на каждый моль вещества, для смесей или растворов веществ, показывая, как изменяется свободная энергия при удалении или прибавлении к раствору одного моля данного вещества. Чем выше химический потенциал твердого полупроводника по отношению к химическому потенциалу этого полупроводника в растворе электродного материала, тем большей растворимостью этот полупроводник обладает.

Свободную энергию одного моля раствора можно выразить суммой:

$$g = \mu_m s_m + \mu_n s_n, \quad (4.3)$$

где μ_m , μ_n — химические потенциалы металла и полупроводника соответственно;

s_m , s_n — растворимость (молярная доля или молярная растворимость) металла и полупроводника.

Под растворимостью s_A какого-либо вещества A в сплаве $A+B$ понимают отношение количества атомов этого вещества N_A в данном сплаве к общему количеству атомов данного сплава $N_A + N_B$:

$$s_A = \frac{N_A}{N_A + N_B}. \quad (4.4)$$

В формуле (4.4) растворимость выражена в атомных долях. Практически нередко требуется определить растворимость в весовых соотношениях. В этом случае под растворимостью σ_A какого-либо вещества A в сплаве $A+B$ понимают отношение веса этого вещества P_A в данном сплаве к общему весу сплава $P_A + P_B$:

$$\sigma_A = \frac{P_A}{P_A + P_B}. \quad (4.5)$$

Переход от атомной растворимости к весовой производят с помощью следующих формул:

$$\sigma_A = \frac{s_A}{s_A + s_B \frac{M_B}{M_A}}; \quad \sigma_B = \frac{s_B \frac{M_B}{M_A}}{s_A + s_B \frac{M_B}{M_A}};$$

$$s_A = \frac{\sigma_A}{\sigma_A + \sigma_B} \frac{M_A}{M_B}; \quad s_B = \frac{\sigma_B}{\sigma_A + \sigma_B} \frac{M_A}{M_B},$$

где M_A , M_B — атомные веса компонентов.

Растворимость данного компонента в сплаве определяется линией ликвидуса диаграммы состояния. Величины растворимостей откладывают по оси абсцисс диаграммы состояния, в атомных или весовых процентах. По оси ординат откладывают температуру. Линия ликвидуса на ограниченном участке фазовой диаграммы описывается выражением

$$\ln(1 - s_A) = - \frac{\Delta H_B}{R} \left(\frac{1}{T_B} - \frac{1}{T} \right), \quad (4.6)$$

где ΔH_B и T_B — теплота и температура плавления растворителя;
 R — универсальная газовая постоянная.

Процесс растворения тесно связан с диффузией. Перешедшие в расплав атомы полупроводника стремятся распределиться в нем равномерно вследствие диффузии. Уходящие от поверхности сплавления атомы дают возможность раствориться новому слою полупроводника.

Равновесие между расплавом и твердым полупроводником будет достигнуто, когда химический потенциал полупроводника в растворе станет равен его химическому потенциалу в твердом состоянии. Если концентрация раствора меньше равновесной, то будет происходить дальнейшее растворение полупроводника, так как это способствует уменьшению свободной энергии. Если же концентрация больше равновесной, то из раствора будет выкристаллизовываться твердое вещество, пока химические потенциалы обеих фаз не будут одинаковы.

В насыщенном расплаве в условиях термодинамического равновесия на границе фаз происходит непрерывное растворение и кристаллизация полупроводника, что символически можно представить:



где β — образующийся твердый раствор металла в полупроводнике;

L — жидкая фаза.

Увеличение температуры сдвигает равновесие вправо, понижение — влево.

Время установления термодинамического равновесия определяется скоростью растворения полупроводника и скоростью диффузии растворенных атомов в расплаве.

Обычно скорость растворения весьма велика, поэтому для установления равновесия большое значение имеет перемешивание расплава.

Следует, однако, отметить, что часто условия сплавления в технологическом процессе значительно отличаются от равновесных.

Сила связи атомов в кристалле в большой степени зависит от концентрации дефектов структуры. Поэтому энергия, необходимая для разрыва этой связи, различна для совершенной и нарушенной кристаллической решеток. При сплавлении одновременно действуют два механизма растворения: растворение совершенной поверхности монокристалла и растворение, происходящее на дислокационных линиях. Однако наличие дислокаций, если их плотность не превышает $3 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2}$ в германии, не влияет существенным образом на скорость растворения.

Образование p - n -перехода. После того как равновесное состояние достигнуто и электродный сплав растворил полупроводник на заданную глубину, осуществляется охлаждение расплава. В результате пересыщения раствора полупроводником последний кристаллизуется в твердую фазу. Процесс кристаллизации полупроводника из расплава называют рекристаллизацией, потому что его осаждение происходит как доразращивание твердой подложки.

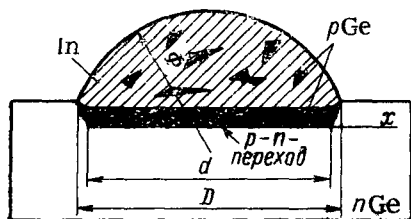


Рис. 4.3. Образование p - n -перехода при сплавлении индия с германием

На границе раздела твердой и жидкой фаз, существовавшей до начала охлаждения, образуется контакт различно легированных областей полупроводника (рис. 4.3). Если вплаваемый металл

представляет собой акцепторную примесь, а исходная пластина полупроводника обладает электропроводностью n -типа, или если металл является донорной примесью, а полупроводник обладает электропроводностью p -типа, то образованный контакт будет p - n -переходом.

Концентрация примеси в закристаллизовавшемся полупроводнике определяется коэффициентом распределения (сегрегации) примеси. Коэффициентом распределения k называют отношение концентрации примеси в твердой фазе (C_S) к концентрации примеси в жидкой фазе (C_L) при температуре кристаллизации сплава:

$$k = C_S / C_L.$$

Максимальная концентрация примеси, которая может раствориться в германии или кремнии при температуре кристаллизации, определяется выражениями:

$$C_{\max} = 4,4 \cdot 10^{21} k, \quad \text{см}^{-3} (\text{Ge});$$

$$C_{\max} = 5,2 \cdot 10^{21} k, \quad \text{см}^{-3} (\text{Si}).$$

Зависимость между растворимостью примеси в твердой фазе и температурой кристаллизации сплава определяется на фазовой

диаграмме состояния линией солидуса. Обычно растворимости примесей в твердом германии и кремнии малы и линии солидуса идут вблизи осей ординат диаграмм состояния.

Кривые солидуса для различных примесей в германии показаны на рис. П.8 и в кремнии — на рис. П.9. Они имеют так называемый ретроградный характер, обусловленный изменением коэффициента распределения при изменении температуры. С увеличением температуры растворимость примесных атомов в твердой фазе растет. При температурах, близких к температуре плавления полупроводника, растворимость примеси в жидкой фазе может достигать практически неограниченного значения, тогда как растворимость в твердой фазе остается ограниченной ($C_S \ll C_L$). В результате коэффициент распределения уменьшается, что ведет в свою очередь к уменьшению растворимости в твердой фазе.

Предельная растворимость в твердой фазе определяется концентрацией вакансий и энергией связи примесных атомов в вакансиях. При данной температуре кристалла, которая определяет концентрацию вакансий, чем больше энергия связи между примесным атомом и вакантным узлом, тем больше вероятность занятия этого узла и тем значительнее растворимость.

Необходимым условием образования твердых растворов замещения является близость атомных размеров атомов растворителя и растворенного вещества. Эмпирически установлено, что если их атомные размеры отличаются более чем на 14%, то возможность образования твердых растворов замещения весьма ограничена и, наоборот, различие менее 14% благоприятствует образованию растворов замещения. В табл. 4.1 приведены значения тетраэдрических ковалентных радиусов германия, кремния и некоторых примесных элементов (в ангстремах).

Таблица 4.1

Ge	Si	B	Al	Ga	In	P	As	Sb
1,22	1,17	0,88	1,26	1,26	1,44	1,10	1,18	1,36

Почти все эти элементы обладают благоприятным объемным фактором для образования твердых растворов замещения, что обуславливает их сравнительно большую растворимость.

Необходимым условием образования твердых растворов замещения является также наличие у примесных атомов валентных электронов в тех же квантовых состояниях, что и у атомов полупроводника. Например, в кристаллах кремния ковалентная тетраэдрическая связь осуществляется посредством электронов $3s^2 3p^2$. Следовательно, для того чтобы примесные элементы могли образовывать в кремнии стабильные твердые растворы замещения, их атомы должны обладать валентными электронами на

s- и p-орбитах. При этом основную роль в образовании ковалентной связи играют p-электроны.

У элементов III группы в p-состоянии находится только по одному электрону, а у элементов V группы — по три. Поэтому растворимость P, As и Sb в кремнии по сравнению с Al, Ga и In выше.

Отметим общие закономерности поведения атомов примеси в полупроводниках:

а) в твердых растворах внедрения примесные атомы металлов являются донорами, а атомы металлоидов — акцепторами;

б) в растворах замещения в атомарных полупроводниках типа германия и кремния примеси III группы создают акцепторные энергетические уровни, а примеси V группы — донорные;

в) если различие в валентности полупроводника и примеси больше единицы, то возникают глубокие уровни, обладающие большой энергией ионизации. Эти уровни определяют процесс рекомбинации (типичные из них — золото, никель, серебро, медь).

Наличие донорных примесей в полупроводнике способствует возрастанию растворимости акцепторных и наоборот. Например, растворимость мышьяка в германии, содержащем достаточно большое количество алюминия, на порядок выше, чем в чистом германии.

Добавление алюминия приводит к значительному увеличению растворимости фосфора как в германии, так и в кремнии. При $T=800^{\circ}\text{C}$ растворимость фосфора в кремнии при равном атомном количестве алюминия увеличивается в 3 раза, а в германии — в 5 раз. Растворимость алюминия в присутствии фосфора также заметно возрастает.

Сплавление алюминия с кремнием. Диаграмма состояния бинарной системы алюминий—кремний является наиболее общим типом фазовых диаграмм, встречающихся при сплавлении металла с полупроводником в полупроводниковом производстве. Диаграмма Al—Si типична для компонентов, обладающих полной растворимостью в жидком состоянии и ограниченной в твердом (рис. 4.4). На диаграмме имеется эвтектическая точка, соответствующая температуре плавления и затвердевания эвтектики — сплава эвтектического состава.

Эвтектикой называют структуру сплава, состоящего из однородной механической смеси кристаллитов двух или нескольких веществ, которая обладает минимальной температурой плавления. Структура эвтектического сплава такова, что атомные и молекулярные связи в нем менее прочные, чем в порознь взятых веществах, и разрываются под действием меньшей тепловой энергии.

Эвтектическая смесь (11,7% Si) при температуре 577°C содержит кристаллы α твердого раствора кремния в алюминии (αAl) с концентрацией 1,65% Si и кристаллы β твердого раствора алюминия в кремнии (βSi) с концентрацией $\sim 0,5\%$ Al.

Если производить охлаждение системы, то βSi откладывается в основном на исходной пластине, являясь продолжением моно-

кристалла. При 577°C формирование β -области заканчивается, и весь оставшийся расплав затвердевает в мелкокристаллическую эвтектическую смесь $\alpha\text{Al} + \beta\text{Si}$. Данная эвтектика не является однородной. Она состоит из довольно крупных дендритов твердого раствора βSi и окружающего их αAl . Дисперсность эвтектики определяется скоростью охлаждения. Для получения более однородной мелкокристаллической структуры необходима большая скорость охлаждения.

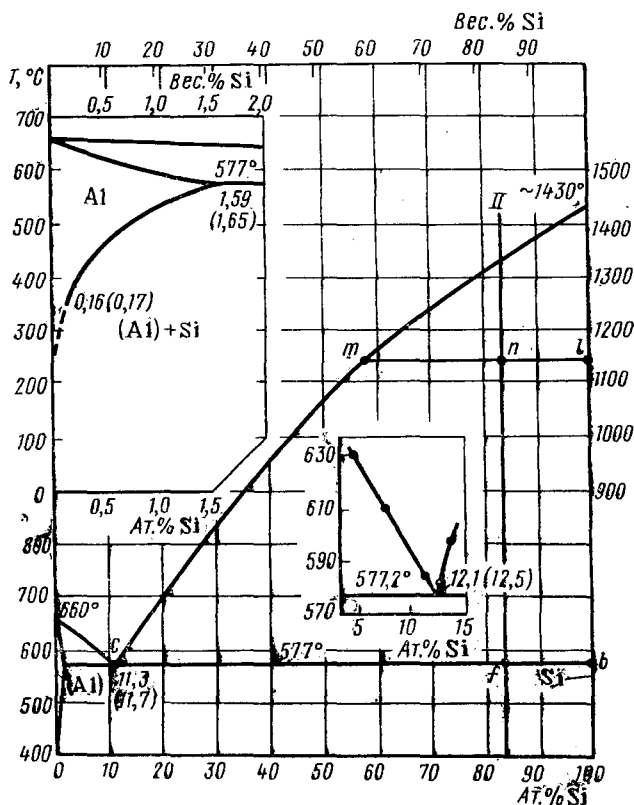


Рис. 4.4. Диаграмма состояния алюминий — кремний

Если провести охлаждение раньше, чем система достигнет равновесного состояния, когда состав L находится еще в доэвтектической зоне ($0 < \% \text{Si} < 11,7$), то в расплаве кристаллизуется αAl , а при охлаждении до 577°C — эвтектическая смесь $\alpha\text{Al} + \beta\text{Si}$. Кристаллы βSi в эвтектике ориентированы произвольно, и p - n -переход не образуется.

§ 4.2. Технология получения сплавных структур

Способы сплавления. Полупроводниковые приборы в зависимости от назначения изготавливают различными способами сплавления.

По характеру проведения технологических операций способы сплавления подразделяют на индивидуальные и групповые.

При индивидуальных способах электродный материал сплавляется с кристаллом полупроводника, являющегося основой одного прибора. Каждый полупроводниковый прибор проходит все стадии изготовления, и из одного кристалла получается один прибор. Этот способ распространен в производстве маломощных диодов и транзисторов и преобладает в производстве мощных приборов.

При групповых способах сплавления на одной пластине полупроводникового материала получают несколько десятков, сотен или тысяч идентичных *p-n*-переходов. После сплавления или создания омических контактов пластину механически или химически режут на кристаллы определенных размеров, число которых равно количеству созданных *p-n*-переходов. Этот способ распространен в производстве сплавных диодов различной мощности, сплавно-диффузионных транзисторов и четырехслойных диодов.

Мощность, рассеиваемая в приборе, определяется в первую очередь площадью *p-n*-переходов. В связи с этим выделяют два способа сплавления: на малой (не более 1 мм²) и большой площади. При сплавлении на большой площади заметное влияние на качество сплавления оказывает состояние поверхности полупроводника и металла, в том числе однородность поверхностных свойств. Наибольшее распространение способ сплавления на большой площади получил при изготовлении кремниевых выпрямительных диодов малой и средней мощности, кремниевых стабилитронов, а также мощных диодов и транзисторов на кремнии и германии при индивидуальном изготовлении.

По способу введения электрически активной примеси существует деление на сплавление непосредственно с легирующим элементом, сплавление с нейтральным сплавом, содержащим легирующий элемент, и сплавление с композицией элементов, каждый из которых служит определенным целям.

Электродный сплав должен удовлетворять следующим требованиям:

1) должен равномерно смачивать полупроводник при температурах сплавления;

2) должен быть твердым при всех температурах во время последующих процессов изготовления прибора, а также быть механически и химически стабильным во время хранения и работы при повышенных температурах (100—200° С);

3) должен обладать низким давлением паров при всех температурах процесса сплавления. Несоблюдение этого требования ведет к тому, что легирующая примесь будет испаряться из сплава и, осаждаясь на чистой поверхности пластины полупроводника,

изменит тип электропроводности в тех участках, где это нежелательно;

4) не должен содержать примесей, ухудшающих электрофизические свойства полупроводника и параметры прибора;

5) должен обладать хорошей теплопроводностью, чтобы обеспечить отвод тепла, выделяемого в приборе;

6) после затвердевания не должны появляться чрезмерные напряжения в кристаллах полупроводника.

Свойства некоторых элементов, применяемых для электродных сплавов, приведены в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Элемент	Температура плавления, °C	Температура испарения, °C	Плотность $\times 10^{-3}$, кг/м ³	$TKI \times 10^6$, 1/°C
Al	659,7	996	2,7	23,8
Sb	630,5	678	6,6	10,9
As	817,0	280	5,7*	3,8
Bi	271,3	698	9,8	14,0
B	2300,0	1365	2,5*	8,0
Ga	29,7	1093	5,9	18,0
Ge	936,0	1251	5,4	5,3
Au	1063,0	1465	19,3	14,2
In	156,4	952	7,3	33,0
Pb	327,4	718	11,3	29,5
Mo	2620	2533	10,2	5,1
Ni	1455,0	1510	8,9	13,0
P (красн.)	590,0**	—	2,2	124,0
Pt	1773,5	2090	21,4	9,0
Se	220,3	234	7,1	36,8
Ag	961,0	1047	10,5	18,7
Si	1420,0	1343	2,3	4,2
Te	452,0	670	6,2*	16,7
Sn	231,9	1189	7,3	26,7
W	3370,0	3310	19,3	4,5
Zn	419,4	343	7,1	26,3

* Кристаллический.

** При давлении 93 ат.

Если чистый элемент удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к электродному материалу, то он сплавляется с полупроводником без каких-либо добавок. Примером этого может служить

сплавление индия с германием на малой и большой площади и сплавление алюминия с кремнием на малой площади. Если чистый элемент не удовлетворяет ряду требований, то готовится сплав, состоящий из электрически нейтрального компонента, какими для германия и кремния являются элементы IV группы и ряд элементов других групп (например, с некоторыми допущениями, золото и серебро), и легирующих элементов. Для улучшения смачивания или увеличения пластичности в двойные сплавы могут добавляться дополнительные компоненты.

Способы формовки и нанесения электродных материалов. В зависимости от назначения прибора электродному сплаву придают различные размеры и форму. Чаще всего электродный материал формируется в шарики, цилиндры и кольца.

Вначале слиток сплава протягивают в проволоку нужного диаметра (обычно от 100 мкм до 1 мм), затем специальным ножом с фиксатором размера проволоку разрезают на цилиндрики одинаковой длины. Если электрод одновременно является контактным выводом, то цилиндрики имеют длину 10—20 мм, если же контактный вывод будет изготовлен в дальнейшем из другого материала, то длина цилиндрика составляет 0,5—2 мм. Если при сплавлении требуется сохранить цилиндрическую форму электрода, например для удобства последующих операций присоединения вывода, то применяют кассеты, удерживающие цилиндр в вертикальном положении так, чтобы он касался поверхности полупроводника только торцом.

При производстве высокочастотных триодов, где неизменность ширины базовой области и площади p - n -перехода имеют решающее значение, у каждого шарика необходима повторяемость не только веса и размеров, но и формы. В таком случае проволоочные цилиндры предварительно оплавливают на кварцевой или керамической подложке в вакууме или инертной атмосфере, что придает им сферическую форму. Полученные шарики просеивают через сита с заданными размерами отверстий. Обычно это два сита — одно отделяет шарики большего размера, другое — меньшего. Оплавление для придания сферической формы производят также в нейтральной жидкости, например в глицерине. Если требования к форме электрода не столь важны, то используют цилиндрики с высотой, равной диаметру основания, так как при плавлении они образуют каплю, близкую к сферичной.

Коллекторный электрод или базовый контакт часто выгодно иметь кольцевым, окружающим эмиттер. Кольца вырубают приспособленными для этого штампами из тонкого листового сплава.

С увеличением мощности прибора увеличивается площадь электрода. Применение шариков больших размеров (свыше 2 мм) нецелесообразно ввиду образования сферического фронта при сплавлении, поэтому электродный материал формируется в виде таблеток. Слиток сплава раскатывают на вальцах в фольгу толщиной от 50 до 500 мкм, и из нее вырубают таблетки диаметром 2—10 мм.

При групповом способе изготовления некоторых приборов сплавлением на большой площади используют тонкую (40—50 мкм) фольгу алюминия, вырезаемую по всему диаметру пластин (20—40 мм).

Широко применяют способ вакуумного напыления электродных материалов в виде пленок толщиной от единиц до десятков микрон. Данный способ весьма производителен и позволяет наносить слой металла на большие площади. Он также позволяет применять различные трафареты для защиты той части поверхности, куда попадание металла нежелательно. Напыленные слои позволяют улучшить смачивание и равномерность фронта сплавления. На кремниевых пластинах используют алюминий, на германиевых — индий.

Загрузка кассет для сплавления. При проведении сплавления детали полупроводниковой структуры механически соединяют между собой для получения после сплавления *p-n*-переходов с нужной площадью и взаимным расположением электродов. На рис. 4.5 изображена структура транзистора П15, полученного путем сплавления. В сплавлении участвуют пять деталей, которые собирают в специальную кассету, ориентирующую детали относительно друг друга и скрепляющую их механически между собой. При загрузке деталей структуры в кассету необходимо соблюдать максимальную чистоту. Сборку ведут с помощью пинцетов, не касаясь деталей руками, в резиновых перчатках или напалечниках. Все вспомогательные приспособления, используемые при сборке, протирают спиртом. Материал кассет должен удовлетворять следующим требованиям:

- 1) не смачиваться электродными сплавами при сплавлении;
- 2) при высоких температурах не окисляться и не выделять летучих компонентов;
- 3) не содержать примесей, которые могут диффундировать при высокой температуре в германий или кремний;
- 4) иметь малый коэффициент линейного расширения, чтобы не происходило смещение деталей структуры при нагреве;
- 5) легко подвергаться механической обработке.

В большей степени этим требованиям отвечает графит. Графитовые кассеты имеют разнообразные конструкции, одна из которых приведена на рис. 4.6. Кассета состоит из корпуса 1, нижней пробки 2 и верхней пробки 3. На одном торце в кассете имеется углубление для термопары, контролирующей температуру при сплавлении. Снизу кассета имеет отверстия под съемник 4, облегчающий

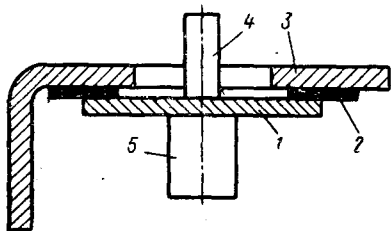


Рис. 4.5. Структура транзистора П15, полученного путем сплавления:

1 — кристалл германия; 2 — кольцо бакового сплава; 3 — кристаллодержатель; 4 — электрод эмиттера; 5 — электрод коллектора

загрузку и разгрузку кассет. Рассмотрим порядок загрузки кассеты для сплавного транзистора.

Кассету помещают на съемник. В отверстия кассеты вставляют нижние (коллекторные) пробки, в отверстия которых пинцетом помещают дозированные цилиндрики коллекторного сплава. На коллекторные пробки кладут кристаллы, на кристаллы — кольца из базового сплава, а на них — кристаллодержатели. Поднимая кассету над съемником, опускают коллекторные пробки в глубь кассеты. В отверстия кассеты вставляют верхние (эмиттерные) пробки, через сквозные отверстия которых загружают электроды эмиттера.

Сборку мощных транзисторов, имеющих электроды в форме дисков больших диаметров, производят более просто. Диски помещают в отверстия коллекторных пробок и уплотняют оправкой.

Затем в кассету вставляют поочередно коллекторные пробки, кристаллы, базовые электроды и эмиттерные пробки, загрузка которых аналогична загрузке коллекторных пробок.

Недостатком графитовых кассет является то, что они обладают плохой теплопроводностью и легко поддаются повреждениям. Графитовый порошок, попадающий на отдельные участки поверхности сплавления, загрязняет их и препятствует

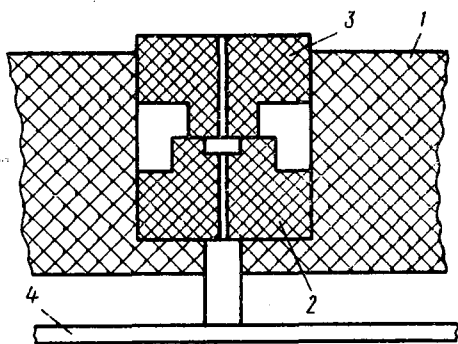


Рис. 4.6. Графитовая кассета

смачиванию. Кассеты из нержавеющей стали не имеют этих недостатков, но могут смачиваться расплавленным материалом. Для предотвращения смачивания эти кассеты окисляют в увлажненном водороде при $1250\text{--}1300^\circ\text{C}$, чернят сажей, азотируют при $850\text{--}900^\circ\text{C}$ или обрабатывают в расплавленных неорганических солях.

Отработка режима сплавления. Параметрами режима сплавления являются максимальная температура нагрева, скорость увеличения температуры, длительность времени выдержки при определенной температуре и скорость охлаждения.

Максимальную температуру определяют с помощью диаграммы состояния сплавляемых элементов исходя из условия достаточной растворимости в жидкой и твердой фазах. Для того чтобы колебания температуры не сильно сказывались на глубине сплавления, рекомендуются температуры, при которых линия ликвидуса имеет наибольший наклон. Для лучшего смачивания температура сплавления нужна по возможности выше. Эти требования противоречивы для системы индий — германий, поэтому экспериментальным путем определяют оптимальную температуру, соответствующую данному сочетанию. Для германиевых приборов мак-

симальная температура колеблется в пределах от 500 до 700°С, для кремниевых — от 700 до 1000°С.

Режим сплавления должен обеспечить ровный и плоский фронт сплавления. Форма фронта сплавления зависит от скорости подъема и спада температуры. При нагреве со скоростью менее 50 град/мин электродный сплав успевает равномерно смочить поверхность кристалла, но фронт сплавления получается сферическим, благодаря имеющемуся температурному градиенту от центра сплавляемого электрода к краям. При быстром росте температуры не все участки кристалла оказываются равномерно смоченными электродным сплавом; причем на хорошо смоченных участках сплав проплавляется глубже, чем на плохо смоченных. Оптимальным является ступенчатый подъем температуры. Вначале температуру повышают до значения, на 100—150°С превышающего температуру плавления электродного сплава. Затем делают выдержку, во время которой происходит смачивание поверхности кристалла сплавом. Установление равновесного угла смачивания требует 5—10 мин. Во время этой выдержки проплавления не происходит, так как температура еще мала. После выдержки температуру быстро повышают до максимальной, а затем снова делают выдержку от 1 до 10 мин.

При ступенчатом нагреве фронт сплавления получается плоским и ровным. Суммарное время нагрева в процессе сплавления необходимо выбирать так, чтобы при сплавлении достигалось равновесное состояние в течение 15 мин.

Скорость охлаждения влияет в первую очередь на геометрию *p-n*-перехода. При охлаждении со скоростью около 20 град/мин происходит равномерный рост рекристаллизованного слоя полупроводника. При наличии градиента температуры от центра расплава к периферии возникает сферический фронт сплавления. При быстром охлаждении (свыше 100 град/мин) получается рекристаллизованный слой с большим содержанием примеси. Однако быстрое охлаждение не всегда возможно. Например, на кристаллах кремния с электродами из алюминия при быстром охлаждении происходит растрескивание, вследствие различия в коэффициентах термического расширения.

Сплавление эмиттерных, базовых и коллекторных контактов стараются производить одновременно, так как уменьшение числа термических операций способствует получению приборов высокого качества. Если это невозможно, то осуществляют раздельное сплавление. Во избежание разброса параметров изготавливаемых приборов кассета с деталями структуры при сплавлении должна находиться в зоне с однородным распределением температуры.

Как уже отмечалось, для каждого конкретного типа приборов отработку режима сплавления производят экспериментальным путем.

Установки для сплавления. При температурах сплавления 500—1000°С кристаллы и электродные материалы на воздухе окисляются. Поэтому процесс сплавления производят в вакууме, в вос-

становительной (водород) или нейтральной (аргон, гелий) средах. Качественные *p-n*-переходы при сплавлении германия с индием получают в атмосфере чистого водорода. Сплавление кремниевых *p-n*-переходов производят в вакууме и чистом аргоне. Атмосфера чистого водорода не всегда дает хорошие результаты для кремния. При работе с водородом следует учитывать его способность образовывать взрывчатые смеси с кислородом, серой, фосфором и хлором.

Для проведения процессов сплавления выпускают печи периодического действия и конвейерные, оба типа — прямонакальные, с радиационным нагревом, а также печи высокочастотного нагрева.

На рис. 4.7 изображена схема прямонакальной печи периодического действия с температурой нагрева до 800°C. Она состоит

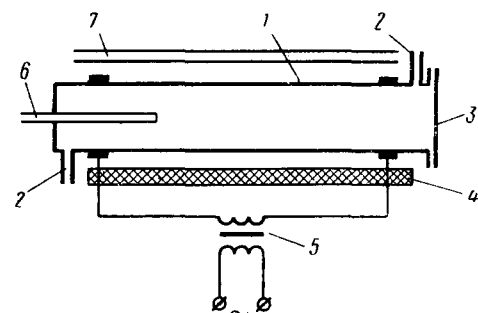


Рис. 4.7. Схема прямонакальной печи периодического действия:

1 — нагреватель; 2 — вход и выход газа; 3 — загрузочный фланец; 4 — теплоизоляция; 5 — система электрического питания нагрева печи; 6 — «карман» для термопары; 7 — кожух с металлическими экранами

из нагревателя, системы регулировки температуры, газовых и водяных коммуникаций и систем электрического питания. Прямонакальный нагреватель — труба из нержавеющей стали марки X18H9T диаметром 42 мм. С одной стороны трубы имеется штуцер для подведения водорода и «карман» для термопары. На противоположном конце находится загрузочная камера с фланцем, имеющим резиновое уплотнение. Печь снабжена автоматическим программным регулятором температуры, обеспечиваю-

щим поддержание заданного режима с точностью $\pm 2^\circ \text{C}$. К преимуществам прямонакальной печи следует отнести однородное распределение температуры вдоль нагревателя, программное регулирование температуры, высокую надежность и большой срок службы. Однако вследствие некоторой инерционности и возможности загрязнения трубы при высоких температурах она не всегда удовлетворяет требованиям полупроводникового производства.

На рис. 4.8 показана схема прямонакальной конвейерной печи. Кассета с элементами структуры в течение рабочего процесса движется на конвейерной ленте 1, проходя последовательно зоны нагрева, выдержки и охлаждения. Основными блоками печи являются нагреватель 2, малый и большой холодильники 3, системы регулирования и питания. Холодильники, охлаждаемые водой, дают возможность регулировать режим охлаждения при движении кассеты через эти участки. Конвейер состоит из ленты 1, которая перемещается в нижней части рабочего пространства, устройства натяга ленты и привода. Наклонный вход и выход 4 из печи позволяют

обеспечить атмосферу чистого водорода в рабочей зоне и так называемый беспламенный путь кассет, потому что на концах наклонных камер подается азот, образующий газовую завесу, ниже которой водород не проходит.

В ряде случаев сплавление проводят в вакуумных установках с высокочастотным индукционным нагревом. Такая установка имеет кварцевый колпак диаметром 10—15 см, который после откачки силой атмосферного давления прижимается к резиновому уплотнению. Вокруг колпака размещается спиральный индуктор, питаемый от ВЧ-генератора. Элементы структуры помещают в графитовые кассеты, находящиеся в зоне, охватываемой индуктором. Рабочее давление составляет около 10^{-5} мм рт. ст., что обеспечивает высокую чистоту при сплавлении. Однако вследствие скин-эффекта нагрев кассет происходит неравномерно.

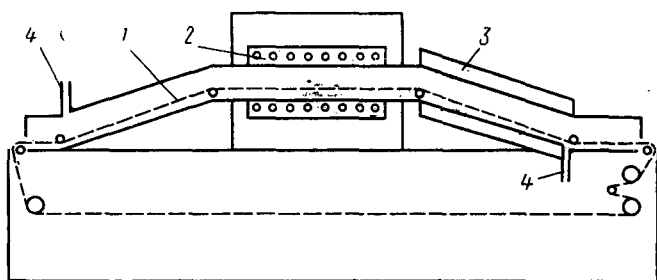


Рис. 4.8. Схема прямонакальной конвейерной печи

§ 4.3. Расчеты при сплавлении

Расчет глубины впавления. Глубиной впавления электрода в полупроводник или глубиной залегания сплавного p - n -перехода называют расстояние от границы раздела сплав — поверхность полупроводниковой пластины, существовавшей перед плавлением сплава, до границы расплав — полупроводник. Глубина впавления определяет тот объем полупроводника, который растворился в электродном сплаве.

Очевидно, что при равновесном процессе впавления глубина зависит от веса электродной капли, площади контакта и растворимости полупроводника при температуре сплавления.

Из определения растворимости полупроводника в жидкой фазе следует, что

$$\sigma_n = \frac{P_n}{P_n + P_m}, \quad (4.7)$$

где P_n — весовое количество полупроводникового материала в расплаве;

P_m — весовое количество электродного материала (металла).

Преобразуя (4.7), получаем выражение зависимости веса растворенного количества полупроводника от веса исходного металла:

$$P_n = \frac{\sigma_n}{1 - \sigma_n} P_m. \quad (4.8)$$

Если электродная капля цилиндрическая и известны площадь контакта A и ее высота h , то весовое количество металла и растворенного полупроводника определяется через удельные веса d_m и d_n и геометрические размеры:

$$\left. \begin{aligned} P_m &= d_m Ah; \\ P_n &= d_n Ax, \end{aligned} \right\} \quad (4.9)$$

где x — глубина вплавления.

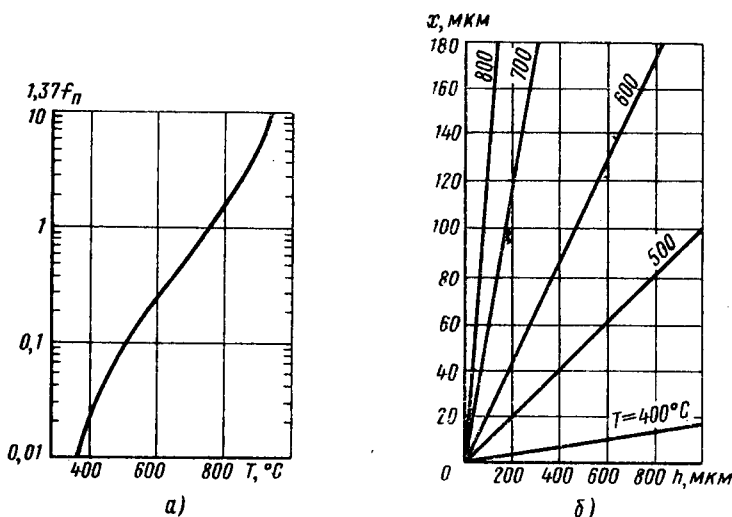


Рис. 4.9. Проплавление индием германия:

а — функция растворимости $1,37 f_n$; б — глубина вплавления

Объединяя выражения (4.8) и (4.9), находим глубину вплавления:

$$x = \frac{\sigma_n}{1 - \sigma_n} \cdot \frac{d_m}{d_n} h = \rho f_n h, \quad (4.10)$$

$$\text{где } \rho = \frac{d_m}{d_n}, \quad f_n = \frac{\sigma_n}{1 - \sigma_n}.$$

На основании выражения (4.10) можно построить графики зависимости глубины вплавления индия и алюминия в германий и кремний. На рис. 4.9 и 4.10

приведены соответствующие кривые: $\rho f_{\text{п}} = f(T)$, $x = f(h)$ ($d_{\text{Ge}} = 5,32 \text{ г/см}^3$; $d_{\text{In}} = 7,31 \text{ г/см}^3$; $d_{\text{Si}} = 2,42 \text{ г/см}^3$; $d_{\text{Al}} = 2,7 \text{ г/см}^3$; поэтому $\rho_{\text{In-Ge}} = 1,37$; $\rho_{\text{Al-Si}} = 1,12$).

Если растворимость выражается в атомных долях, то в выражение (4.10) следует ввести отношение атомных весов полупроводника и металла $\mu = M_{\text{п}}/M_{\text{м}}$:

$$x = \frac{s}{1-s} \cdot \frac{d_{\text{м}}}{d_{\text{п}}} \cdot \frac{M_{\text{п}}}{M_{\text{м}}} \cdot h = \mu \rho f_{\text{п}} h. \quad (4.11)$$

Если электродный металл свободно лежит на поверхности полупроводника и после сплавления образует каплю в форме сферического сегмента диаметром сферы Φ и диаметром окружности растекания D , а фронт сплавления имеет вид усеченного конуса

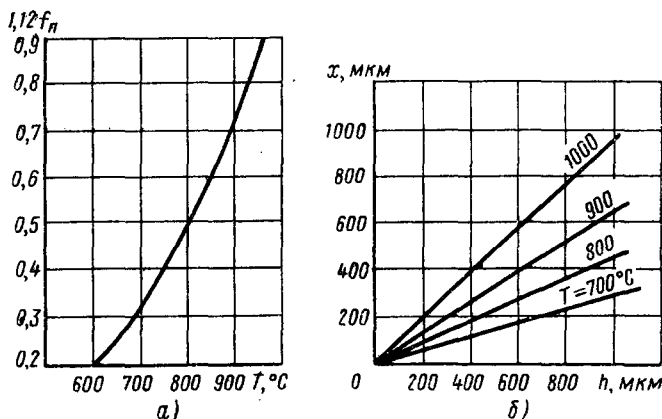


Рис. 4.10. Проплавление алюминием кремния:

а — функция растворимости $1,12 f_{\text{п}}$; б — глубина впавления

с диаметром меньшего основания d (см. рис. 4.3), то глубина впавления

$$x = \mu \rho f_{\text{п}} \frac{2\Phi^3}{D^2 + Dd + d^2}. \quad (4.12)$$

Из выражений (4.10) — (4.12) видно, что размеры электродных материалов и температура сплавления в значительной степени влияют на глубину впавления. Разброс глубины впавления может быть определен для случая, описываемого выражением (4.10):

$$\frac{\Delta x}{x} = \frac{\Delta h}{h} + \frac{\Delta \sigma_{\text{п}}}{\sigma_{\text{п}}(1 - \sigma_{\text{п}})} = \frac{\Delta h}{h} + \frac{1}{\sigma_{\text{п}}(1 - \sigma_{\text{п}})} \cdot \frac{d\sigma_{\text{п}}}{dT} \Delta T. \quad (4.13)$$

Рассмотрим пример использования выражения (4.13). При равновесном впавлении алюминия в кремний при $T = 800^\circ\text{C}$ используют слой алюминия толщиной $h = 3 \text{ мкм}$, измеряемый с точностью $0,1 \text{ мкм}$. Точность поддержания

температуры составляет $\pm 10^\circ \text{C}$. Определим ошибку в задании глубины вплавления.

По диаграмме состояния рис. 4.4 находим, что в точке $T=800^\circ \text{C}$ наклон линии ликвидуса $d\sigma/dT=8 \cdot 10^{-4} \text{ град}^{-1}$ и растворимость кремния в алюминии $\sigma=0,3$. Тогда

$$\frac{\Delta x}{x} = \frac{0,1}{3} + \frac{1}{0,3(1-0,3)} \cdot 8 \cdot 10^{-4} \cdot 20 = 0,1.$$

Расчет ширины рекристаллизованной области. Если металл и полупроводник образуют эвтектику, то при охлаждении после сплавления возникает эвтектическая смесь, и рекристаллизованный слой будет содержать только некоторую часть растворенного полупроводника, определяемую диаграммой состояния.

Рассчитаем ширину рекристаллизованной области на примере сплавления алюминия с кремнием. Количественное соотношение между кристаллизующейся фазой и расплавом определяется на диаграмме состояния так называемым правилом отрезков. Если на диаграмме рис. 4.4 провести прямую, соединяющую изотермические точки ликвидуса m и солидуса l , называемую конодой ml , то линия составов II разделит ее на части, пропорциональные соотношению количеств твердой и жидкой фаз, находящихся в равновесии. Для каждой данной температуры это соотношение будет соответственно изменяться. Правило отрезков гласит, что отношение весового (атомного) количества закристаллизовавшегося при данной температуре вещества P_β к весовому (атомному) количеству оставшегося расплава P_L равно отношению отрезков коноды, проведенной для данной температуры, на которые ее делит линия начального состава:

$$\frac{P_\beta}{P_L} = \frac{mn}{nl}. \quad (4.14)$$

Из выражения (4.14) следует также, что отношение веса твердой фазы, выкристаллизовавшейся из расплава, к весу всего сплава

$$\frac{P_\beta}{P} = \frac{mn}{mL}. \quad (4.15)$$

При охлаждении сплава состава II до 577°C имеем

$$P_\beta = \frac{cf}{cb} P = \beta P. \quad (4.16)$$

Из (4.8) нетрудно вычислить выражение для P :

$$P = \frac{1}{1-\sigma} P_m. \quad (4.17)$$

Сопоставляя (4.16) и (4.17), получим

$$P_\beta = \beta \frac{1}{1-\sigma} P_m. \quad (4.18)$$

Заменив весовые количества компонентов произведениями удельных весов и геометрических размеров, получаем выражение для ширины рекристаллизованной области (в случае цилиндрического электрода)

$$h_{\beta} = \beta \frac{\Gamma}{1-\sigma} \cdot \frac{d_m}{d_n} h = \frac{\beta}{\sigma} \rho f_{\Pi} h. \quad (4.19)$$

На рис. 4.11 представлены зависимости ширины рекристаллизованной области кремния от толщины исходного слоя алюминия при различных максимальных температурах сплавления.

Расчет скорости растворения. Если сплавление осуществляется без перемешивания расплава, то скорость растворения определяется скоростью диффузионного переноса растворенных атомов.

В процессе растворения только в узкой зоне у границы раздела концентрация расплава соответствует диаграмме состояния. Изменение концентрации растворенных атомов полупроводника вдоль расплава описывается выражением

$$C_x = C_0 \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}}, \quad (4.20)$$

где C_0 — равновесная концентрация атомов полупроводника в расплаве (на границе фаз);

erfc — функция распределения концентрации атомов полупроводника вдоль расплава*;

D — коэффициент диффузии атомов полупроводника в расплаве;

x — расстояние от границы раздела в глубь расплава;

t — время протекания процесса растворения.

Интегрируя (4.20) по длине h расплавленной области, можно определить число N атомов полупроводника, перешедших в расплав на площади A :

$$N = A \int_0^h C_x dx. \quad (4.21)$$

Очевидно, что в расплав перешли все атомы, находившиеся ранее под электродным металлом на глубине x :

$$n = Ax C_i, \quad (4.22)$$

где C_i — собственная концентрация атомов полупроводника.

* Более подробно о функции erfc см. в гл. V.

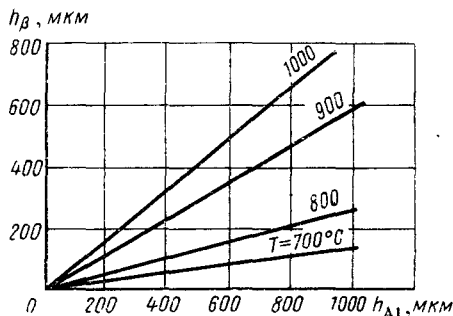


Рис. 4.11. Зависимости ширины рекристаллизованной области кремния от толщины исходного слоя алюминия при различных температурах сплавления

В большинстве практических случаев выполняется соотношение:

$$x \ll 2\sqrt{Dt} \ll h;$$

поэтому для упрощения интегрирования в (4.21) можно заменить h на ∞ и пренебречь перемещением границы раздела.

Решая (4.21) и (4.22) относительно x , получим

$$x = 2 \frac{C_0}{C_i} \sqrt{\frac{Dt}{\pi}}. \quad (4.23)$$

Если растворимость вычисляется в атомных долях, то

$$C_0 = f_n C_m, \quad (4.24)$$

где C_m — собственная концентрация атомов металла (расплавленного).

Скорость растворения при стационарном режиме ($T = \text{const}$)

$$v = 2 \frac{C_m}{C_i} f_n \sqrt{\frac{D}{\pi t}}. \quad (4.25)$$

Из выражения (4.25) видно, что скорость растворения сильно зависит от температуры, так как коэффициент диффузии D изменяется с изменением температуры экспоненциально. При температурах, близких к температуре плавления полупроводника, $s \rightarrow 1$ и $f_n = \frac{1}{1-s}$ резко возрастает. Поэтому даже небольшие колебания температуры приводят к заметному разбросу глубины вплавления. Максимальная скорость растворения наблюдается в первые моменты сплавления, когда t еще мало. С увеличением времени сплавления скорость растворения уменьшается и при достижении равновесного состояния стремится к нулю.

Коэффициент диффузии D может быть определен экспериментально в виде зависимости его от температуры, если вплавление производить при различных температурах, времени выдержки и измерять каждый раз глубину вплавления x . Кроме того, величину D можно определить с помощью зонной плавки в поле температурного градиента, описываемой далее.

Определение скорости движения зоны расплава под действием градиента температуры. Пусть между двух пластин кремния n - и p -типа электропроводности находится тонкий слой алюминия, температура свыше 660°C , вдоль оси пластин существует градиент температуры, направленный так, что более нагретым является $n\text{Si}$. У границы кремния n -типа в расплаве устанавливаются температура T_1 и соответствующая ей равновесная концентрация кремния в жидкой фазе C_1 (рис. 4.12). На границе $p\text{Si}$ — расплав устанавливаются температура T_2 и соответствующая ей концентрация C_2 ($T_2 < T_1$ и $C_2 < C_1$).

Вследствие наличия градиента концентрации возникает диффузионный поток кремния из области с концентрацией C_1 в область

с концентрацией C_2 . Переносимый кремний у границы расплав — pSi пересыщает раствор и выкристаллизовывается. У границы расплав — nSi , наоборот, вследствие ухода части кремния создаются условия для растворения nSi . Если градиент температуры поддерживается постоянным, происходит постепенное растворение пластины кремния n -типа в высокотемпературной зоне, диффузия кремния через расплав и кристаллизация его на пластине кремния p -типа в низкотемпературной зоне. Кинетика этих трех процессов определяет скорость перемещения расплава кремний — алюминий в направлении градиента температуры.

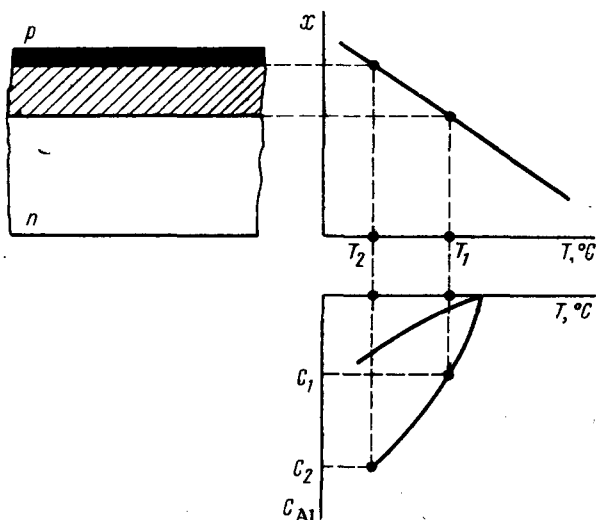


Рис. 4.12. Схема зонной плавки в системе алюминий — кремний

В тех случаях, когда расплавленные зоны достаточно широки (свыше 50 μm), атомно-кинетическими явлениями на границах фаз можно пренебречь и считать, что основным процессом, определяющим скорость движения зоны расплава, является диффузия растворенных атомов полупроводника в жидкой фазе. Плотность потока кремния в соответствии с первым уравнением Фика

$$Q = -D \frac{dC}{dx}, \quad (4.26)$$

где dC/dx — градиент концентрации примеси.

Уравнение (4.26) можно преобразовать:

$$Q = -D \frac{dC}{dT} \cdot \frac{dT}{dx} = -D d_n \cdot \frac{ds}{dT} \cdot \frac{dT}{dx}, \quad (4.27)$$

где ds/dT — наклон линии ликвидуса;
 $dT/dx = \nabla T$ — градиент температуры.

Линия ликвидуса бинарной системы в ограниченном интервале температур, где она непрерывна, в соответствии с выражением (4.6) может быть аппроксимирована кривой вида

$$s = s_0 \exp\left(-\frac{B}{T}\right), \quad (4.28)$$

где s_0 и B — постоянные, определяемые по диаграмме состояния данной системы металл — полупроводник.

Используя (4.27) и (4.28), вычисляем диффузионный поток:

$$Q = D \frac{d_n B s}{T^2} \nabla T. \quad (4.29)$$

Если процесс производится в течение времени t , за которое происходит растворение и перенос через зону расплава слоя полупроводника толщиной x и весом P_n , то поток вещества полупроводника в единицу времени через единицу площади зоны

$$Q = \frac{P_n}{At} = d_n \frac{x}{t} = d_n u.$$

Скорость движения зоны расплава

$$u = \frac{Q}{d_n} = D \frac{Bs}{T^2} \nabla T.$$

Для системы алюминий — кремний в диапазоне температур 1000—1350°C

$$s = 7,2 \exp\left(-\frac{3540}{T}\right);$$

$$D = 10 \exp\left(-\frac{17\,900}{T}\right);$$

$$u = \frac{2,55 \cdot 10^5}{T^2} \nabla T \exp\left(-\frac{21\,440}{T}\right). \quad (4.30)$$

Движение расплавленной зоны через пластину полупроводника применяют для легирования этой пластины примесными атомами металла, образующего зону, или, наоборот, — для очистки пластины, если коэффициент сегрегации достаточно мал. В любом случае выражения (4.30) позволяют определить время, которое необходимо для прохождения зоны расплава через пластину.

Пусть толщина пластины кремния $h=300$ мкм, температура $T=1473^\circ\text{K}$ и градиент концентрации $\nabla T=50$ град/см. Скорость движения зоны расплава алюминий — кремний

$$u = \frac{2,55 \cdot 10^5}{1473^2} \cdot 50 \cdot \exp\left(-\frac{21\,440}{1473}\right) = 0,29 \text{ мкм/сек.}$$

Время прохождения пластины толщиной 300 мкм составляет 17 мин.

Расчет концентрации донорной примеси в рекристаллизованном слое, полученном сплавлением с акцепторным элементом. При сплавлении алюминия с кремнием n -типа электропроводности (например, легированным фосфором) атомы фосфора переходят в расплав. При кристаллизации некоторая их часть захватывается твер-

дой фазой. В зависимости от соотношения атомов фосфора и алюминия изменяются как величина проводимости, так и тип электропроводности рекристаллизованного слоя. Иногда вплавление производят в предварительно созданный в пластине диффузионный n^+ -слой.

Обозначим:

Q_P — количество атомов фосфора в расплавленной части пластины кремния или диффузионного слоя;

C_P^L — концентрация фосфора в расплаве, $см^{-3}$;

C_P — концентрация фосфора в рекристаллизованном слое, $см^{-3}$;

C_{Al} — концентрация алюминия в рекристаллизованном слое, $см^{-3}$.

Если допустить в первом приближении, что растворимости фосфора и алюминия в кремнии взаимно независимы, то величину C_{Al} можно принять равной предельной растворимости алюминия в кремнии, а

$$C_P = k C_P^L, \quad (4.31)$$

где k — равновесный коэффициент распределения.

Для определения коэффициента распределения при температуре кристаллизации T можно воспользоваться эмпирической зависимостью

$$k = (k_{пл})^{T_{пл}/T}, \quad (4.32)$$

где $k_{пл}$ — равновесный коэффициент распределения в точке плавления $T_{пл}$.

Концентрацию фосфора в расплаве определяют из соотношения

$$C_P^L = \frac{Q_P}{V_L}, \quad (4.33)$$

где V_L — объем расплава;

$$V_L = A(x + h). \quad (4.34)$$

Объединяя выражения (4.31) — (4.34), получим

$$C_P = \frac{k q_P}{h(1 + \rho f_n)}, \quad (4.35)$$

где $q_P = Q_P/A$ — количество примесных атомов фосфора под каждым $см^2$ поверхности в слое толщиной h .

Если атомы фосфора равномерно распределены по пластине кремния и их концентрация — N_P , то

$$q_P = N_P x; \quad (4.36)$$

$$C_P = \frac{k N_P}{1 + \frac{\rho f_n}{1}}. \quad (4.37)$$

Величины концентраций N_{PK} , когда в рекристаллизованном слое $C_P = C_{Al}$ можно рассчитать на основании выражения (4.37):

$$N_{PK} = \frac{C_{Al}}{k} \left(1 + \frac{1}{\rho f_n} \right). \quad (4.38)$$

Если сплавление алюминия ведется в диффузионный слой, то распределение концентрации атомов фосфора по глубине z не будет равномерным. Пусть распределение описывается еrfc-функцией с поверхностной концентрацией C_0 (см. гл. V):

$$C_\xi = C_0 \operatorname{erfc} \xi + N_P, \quad (4.39)$$

где

$$\xi = \frac{z}{2\sqrt{Dt}}.$$

Тогда

$$q_P = \int_0^y C_\xi d\xi, \quad (4.40)$$

где

$$y = \frac{x}{2\sqrt{Dt}}.$$

Вычислив (4.40), найдем значение q_P :

$$\begin{aligned} q_P &= 2\sqrt{Dt} C_0 \left\{ \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} - \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left[\exp \left(-\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right)^2 - 1 \right] \right\} + N_P x = \\ &= 2\sqrt{Dt} C_0 f_x + N_P x, \end{aligned} \quad (4.41)$$

где

$$f_x = \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} - \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left[\exp \left(-\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right)^2 - 1 \right].$$

Если допустить, что атомы фосфора за время сплавления равномерно распределяются по расплаву, то концентрация фосфора в рекристаллизованном слое

$$C_P = \frac{k [2\sqrt{Dt} C_0 f_x + N_P x]}{h(1 + \rho f_n)}. \quad (4.42)$$

Как видно, концентрация фосфора в рекристаллизованном слое прямо пропорциональна поверхностной концентрации C_0 , глубине диффузии $\sqrt{Dt}$, в значительной степени зависит от температуры сплавления и, в отличие от равномерного распределения примеси,

от толщины алюминиевого электрода h , определяющей глубину сплавления x .

Из условия $C_{Al} = C_P$ можно определить критическую величину поверхностной концентрации фосфора:

$$C_{0к} = \frac{h\rho f_n}{2\sqrt{Dt}f_x} \left[\frac{C_{Al}}{k} \left(1 + \frac{1}{\rho f_n} \right) - N_P \right]. \quad (4.43)$$

Используя (4.38), получим

$$C_{0к} = \frac{h\rho f_n}{2\sqrt{Dt}f_x} [N_{Pк} - N_P]. \quad (4.44)$$

Так как в большинстве практических случаев $N_{Pк} \gg N_P$, то выражение (4.44) следует упростить:

$$C_{0к} = \frac{h}{2\sqrt{Dt}} \cdot \frac{\rho f_n}{f_x} \cdot N_{Pк}. \quad (4.45)$$

На основании (4.45) можно рассчитать критические значения поверхностной концентрации фосфора в зависимости от соотношения толщины слоя алюминия и глубины диффузии для различных температур сплавления.

Если распределение примеси в диффузионном слое описывается функцией Гаусса:

$$C_z = C_0 \exp\left(-\frac{z^2}{4Dt}\right) + N_P, \quad (4.46)$$

то

$$q_p = \sqrt{\pi Dt} C_0 \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} + N_P x;$$

$$C_P = \frac{k \left(\sqrt{\pi Dt} C_0 \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} + N_P x \right)}{h(1 + \rho f_n)}; \quad (4.47)$$

$$C_{0к} = \frac{h}{\sqrt{\pi Dt}} \cdot \frac{\rho f_n}{\operatorname{erf} y} \cdot N_{Pк}. \quad (4.48)$$

На рис. 4.13, *а* и *б* показаны зависимости $C_{0к} = f(T)$ для различных значений $h/2\sqrt{Dt}$ при *erfc*- и гауссовом распределениях соответственно. При малых глубинах сплавления алюминия критические величины поверхностных концентраций фосфора уменьшаются с увеличением температуры сплавления, что обусловлено ростом коэффициента распределения фосфора, а при больших глубинах — с ростом температуры возрастают. Последнее обусловлено более сильным уменьшением величины C_P^L (за счет роста x), в результате которого несмотря на возрастание коэффициента распределения C_P уменьшается. При некоторых соотношениях между толщиной алюминия h и длиной диффузии $2\sqrt{Dt}$ кривая $C_{0к} = f(T)$

имеет минимум, который обусловлен влиянием обоих рассмотренных факторов.

Графики рис. 4.13 можно использовать для определения значений поверхностной концентрации атомов фосфора, при которой после сплавления алюминия в кремний, содержащий диффузионный

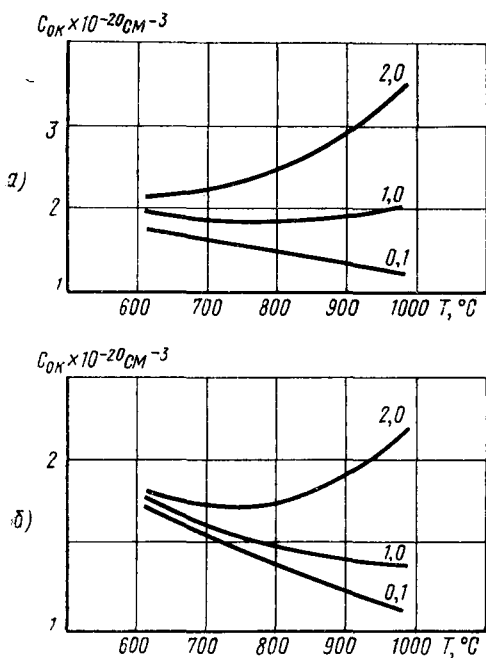


Рис. 4.13. Температурная зависимость C_{0k} для атомов фосфора в кремнии:

а — еfc-распределение; б — гауссово распределение

фосфорный слой, получают p - n -переход или невыпрямляющий контакт. Значения $C_0 > C_{0k}$, т. е. области над кривыми, соответствующими данным $h/\sqrt{Dt}$, позволяют обеспечить преобладание в рекристаллизованном слое атомов фосфора, и контакт будет невыпрямляющим. Значения $C_0 < C_{0k}$ (области под кривыми) дают возможность получить p - n -переход.

§ 4.4. Дефекты, возникающие в p - n -переходах при сплавлении

В p - n -переходах, получаемых методом сплавления, встречаются два основных вида дефектов:

1) несмоченные участки на границе раздела электродного сплава и полупроводника, в результате чего получают неоднородный по глубине фронт сплавления;

2) термомеханические напряжения и как следствие образование дислокаций и трещин.

Несмоченные участки. Исследование p - n -переходов показало, что несмоченные участки являются следствием механических загрязнений, имеющих на поверхности полупроводника или сплава и препятствующих их контакту, или адсорбции молекул газа полупроводником.

При тщательном соблюдении технологической гигиены можно избежать механических загрязнений, однако это не исключает полностью наличия несмоченных участков.

При сплавлении германия с индием было установлено, что если германий содержит малую плотность дислокаций, то несмоченные места отсутствуют, и фронт сплавления получается ровным на площадях порядка 5 мм^2 . Реально используемый германий содержит

значительное количество дислокаций, что является одной из причин плохого смачивания, так как в местах выхода дислокаций на поверхность германия созданы условия для удержания газовых включений.

Помимо дислокаций, имеющихсся в исходном материале и остающихся в рекристаллизованной области вследствие ориентационного характера кристаллизации, на границе фронта сплавления могут возникать новые скопления дислокаций. Это обусловлено тем, что при рекристаллизации в решетку полупроводника внедряются атомы легирующего материала (как правило, в больших концентрациях), атомные радиусы которых отличаются от атомных радиусов узловых атомов кристалла. Это вносит напряжения в кристаллическую решетку, под влиянием которых могут возникать дислокации.

Смачивание можно улучшить, если применять флюс, раскисляющий поверхностные окислы и уменьшающий величину поверхностного натяжения на границе жидкий сплав — полупроводник. Продукты взаимодействия флюса с электродной каплей должны быть инертны и легко удаляться после сплавления или во время него. Для сплавления индия с германием иногда применяют хлористый цинк. При сплавлении олова и свинца с кремнием в качестве флюса используют или фтористый цезий, или гидрид титана. Эти же флюсы можно использовать для сплавления с другими элементами.

Другим способом уменьшения поверхностного натяжения является добавка присадочных элементов в электродную каплю или напыление на полупроводник тонкого слоя металла, по которому капля легко растекается.

Эффективным также является использование для сплавления так называемых активных фаз. Эвтектики, образованные титаном или цирконием с серебром, никелем, медью и некоторыми другими металлами (активные фазы), обладают свойством смачивать при плавлении как металл, так и неметаллические вещества.

Чтобы не возникали неровности фронта сплавления из-за отклонения плоскости пластины от кристаллографической плоскости (111), это отклонение не должно превышать $1-2^\circ$.

Возникновение напряжений. Одним из основных дефектов при сплавлении является возникновение механических напряжений и обусловленное этим образование трещин в полупроводнике как более хрупком элементе сплавленной композиции. Германиевые приборы, изготовленные путем сплавления с индием или свинцом (мягкими, пластичными материалами), почти не содержат трещин и имеют весьма незначительные напряженные области. Кремниевые приборы с электродами из алюминия, олова или золота содержат значительные по величине термические напряжения, обуславливающие при определенных условиях трещины.

При затвердевании и охлаждении алюминиево-кремниевый сплав стремится сжаться вдоль фронта сплавления более интенсивно, чем полупроводник, в силу того что коэффициент термиче-

ского расширения у сплава в несколько раз больше, чем у полупроводника. Но так как обе фазы уже имеют твердую непрерывную структуру, то полупроводник препятствует нужному сжатию и тем самым создает растягивающие усилия в сплаве. Аналогичная картина наблюдается в полупроводнике, где подобным образом возникают сжимающие усилия. Сжимающее или растягивающее усилие вызывает появление усилия противоположного знака, действующего перпендикулярно ему. Таким образом, и в сплаве, и в кристалле полупроводника появляются индуцированные усилия, сжимающие и растягивающие соответственно.

Если в пластичных материалах растягивающие усилия вызывают скольжение вдоль плоскости наибольших напряжений, то в хрупких веществах нарушение структуры происходит без заметных пластических деформаций в сечениях, перпендикулярных направлению растяжения.

Наличие неровного фронта сплавления приводит к тому, что на всех неоднородных участках концентрируются механические напряжения, величина которых может значительно превосходить среднюю величину напряжений в структуре с ровным фронтом сплавления. Кроме того, воздействие растягивающих усилий в этих местах наиболее эффективно. Величина растягивающих напряжений в сплавных структурах алюминий — кремний обычно не превосходит 10^7 н/м², критическим разрушающим усилием для кремния является величина около 10^{10} н/м².

Для устранения или уменьшения механических напряжений, возникающих в кремниевых сплавных структурах, в электродные материалы вводят специальные добавки, изменяющие тепловые и механические свойства сплава (уменьшение температуры затвердевания, изменение коэффициента термического расширения, улучшение пластичности и др.). Уменьшению термомеханических напряжений способствует также отжиг структуры после сплавления. Одним из эффективных способов уменьшения механических напряжений при сплавлении алюминия с кремнием, особенно на большой площади, является применение компенсирующих прокладок.

Когда сплав затвердевает на поверхности пластины кремния, то под действием сжимающих усилий, сконцентрированных на одной плоскости пластины, происходит ее искривление с прогибом под сплавом. На противоположной стороне пластины возникают растягивающие напряжения, приводящие к растрескиванию. Для недопущения искривления пластин при сплавлении алюминий, находящийся на кремниевой пластине, покрывают шайбой из вольфрама или кремния. Диаметр шайбы равен диаметру зоны оплавления, а толщина составляет около 1 мм для вольфрама и равна толщине пластины кремния для кремния. Помимо предотвращения искривления пластины и значительного ослабления напряжений шайба, называемая термокомпенсатором, воспринимает на себя примерно половину усилий, сохраняющихся после затвердевания сплава, что уменьшает величину термомеханических напряжений в кремнии.

§ 4.5. Контроль качества сплавных p - n -переходов

Изготовление поперечных шлифов. Кроме электрических и физических измерений, наиболее ценные сведения о структуре сплавленных полупроводниковых систем и причинах отклонений характеристик получают путем изготовления шлифов.

Основными этапами изготовления шлифов являются запрессовка исследуемого кристалла с p - n -переходом в пластмассу (полистирол), сошлифовка части материала перпендикулярно плоскости p - n -перехода, полировка и селективное травление полученного сечения.

Для выявления внешних дефектов производят тщательный осмотр кристалла под микроскопом. Очень удобны для этих целей

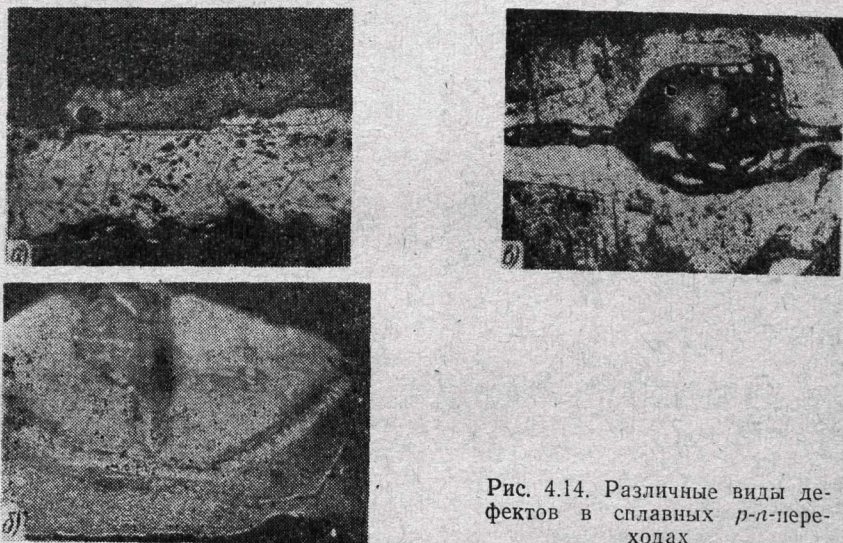


Рис. 4.14. Различные виды дефектов в сплавных p - n -переходах

бинокулярные микроскопы с небольшим увеличением (МБС-2) и металлографические микроскопы с большим увеличением (МИМ-7, МИМ-8М).

Осмотр шлифов после полировки может дать некоторые предварительные сведения о структуре прибора. На шлифе рис. 4.14, например, видны граница металла с полупроводником (а), трещины (б) и неоднородности структуры (в). Наиболее употребительный способ определения структуры — селективное травление и осаждение окислов и металлов.

На рис. 4.14, в виден газовый пузырек, возникший при сплавлении на большой площади (на шлифе выявлен рекристаллизованный слой — по обе стороны от сплава алюминий — кремний).

Удаление электродного сплава. Сведения о том, как прошло сплавление электрода с полупроводником, может дать наблюдение

поверхности их раздела на всей площади соприкосновения. Для этого каплю сплава удаляют путем травли в кислотах или щелочах.

Для удаления индия его растворяют в HNO_3 , для удаления алюминия его растворяют в HCl или в KOH .

На открывшейся поверхности можно заметить несмоченные места. Они выглядят более матовыми по сравнению с блестящей поверхностью рекристаллизованного германия или кремния.

По рельефу рекристаллизованного слоя можно судить о ровности фронта сплавления, так как рельеф обычно воспроизводит фронт во всех деталях. На поверхности рекристаллизованного слоя видны места наибольшего и наименьшего проплавления и другие дефекты.

Для выявления рельефа при сплавлении алюминия с кремнием на большой площади предварительно пластину кремния p -типа

сошлифовывают до алюминиевой фольги, после чего производят травление в подогретой щелочи. На рис. 4.15 приведена фотография рельефа рекристаллизованного слоя, полученного удалением алюминия с кремния.

Просвечивание p - n -переходов рентгеновскими лучами. Рентгеновские лучи благодаря малой длине волны могут проникать через многие вещества. Прозрачность данного вещества для рентгеновского излучения характеризуется степенью поглощения лучей в этом веществе. На изменении

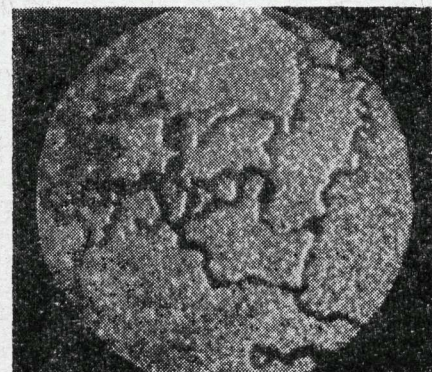


Рис. 4.15. Вид поверхности кремния после удаления алюминия

поглощения рентгеновских лучей при прохождении через неоднородные структуры основана радиография сплавных p - n -переходов. Схема наблюдения проста. Между рентгеновской трубкой — источником излучения и чувствительной к излучению фотопластинкой помещают сплавленный p - n -переход. В тех участках поверхности, где имеются несмоченные места или трещины, т. е. пустоты в структуре, поглощение рентгеновских лучей наименее интенсивно, что приводит к засвечиванию фотопластинки в соответствующих точках. Таким образом можно судить о качестве сплавления.

При отражении пучка рентгеновских лучей от идеального монокристалла ширина пучка очень узкая. При наличии в монокристаллах дефектов отраженный пучок расширяется. По величине расширения отраженного рентгеновского пучка можно судить о плотности дефектов, в частности дислокаций.

Сначала снимают кривую отражения от совершенного монокристалла, а потом от исследуемого образца. Если принять, что

дислокации распределены в объеме кристалла равномерно, то зависимость плотности дислокаций N_d от углового расширения диффузионной кривой k выражается формулой

$$N_d = k^2/9b,$$

где b — вектор Бюргерса.

Следует отметить, что использование рентгеновской аппаратуры связано с применением специальных мер защиты от излучения и является оправданным лишь в лабораторных, но не в производственных условиях.

Исследование напряжений с помощью инфракрасного излучения. Как в отечественной, так и в зарубежной практике лабораторных исследований механических напряжений, возникающих при сплавлении полупроводника с металлом, наиболее распространен метод просвечивания образцов в поляризованном инфракрасном (ИК) свете.

Для наблюдения механических напряжений необходимы две призмы Николя — поляризатор и анализатор. Если на николю-поляризатор направить луч света, то прошедшие через него световые волны оказываются плоскополяризованными. Плоскость поляризации света называют главным сечением николя. Поставив за поляризатором анализатор, в зависимости от взаимного расположения главных сечений николей, можно либо полностью погасить свет, либо частично или полностью пропустить его.

При скрещенных николях, когда главные сечения поляризатора и анализатора взаимно перпендикулярны, и в отсутствие механических напряжений в образце ИК-свет полностью гасится анализатором и экран электронно-оптического преобразователя (ЭОП) остается темным. При наличии напряжений в образце последний оказывается оптически анизотропным, что приводит к повороту плоскости поляризации света, прошедшего через первый николю, в местах искажения кристаллической решетки. Главное сечение анализатора уже не будет перпендикулярно к плоскости поляризации падающего на него ИК-света, и анализатор будет частично его пропускать. Таким образом, просветления, появляющиеся на экране ЭОП, будут соответствовать напряженным участкам образца. Чем больше напряжение, тем на больший угол повернется плоскость поляризации и тем интенсивнее просветлится экран преобразователя. Для количественной оценки напряжений необходимо знать угол поворота плоскости поляризации и коэффициенты фотопругости для данного кристаллографического направления.

Напряжения наблюдают в пластинах, слитках и готовых приборах, если эти образцы можно просмотреть с торцевой поверхности. Следует подчеркнуть, что наблюдение напряжений является довольно трудоемкой операцией, так как поверхность образцов должна быть тщательно отполирована для предотвращения нежелательного рассеяния ИК-лучей.

Просвечивание ИК-лучами в сочетании с методом декорирования позволяет произвести подсчет плотности дислокаций и установить характер распределения дислокаций в объеме. Исследуемую пластину кремния травят и на нее из раствора медного купороса с добавкой нескольких капель плавиковой кислоты осаждают медь. Затем пластину отжигают в вакууме или водороде при 900°C в течение 10 мин. Медь диффундирует по дислокациям и после медленного охлаждения образует осаднения — облака Коттрелла. Из пластины вырезают узкие образцы, которые просматриваются в ИК-свете с торца. Атомы меди поглощают излучение и на экране ЭОП видны темные линии — линии дислокаций (рис. 4.16).

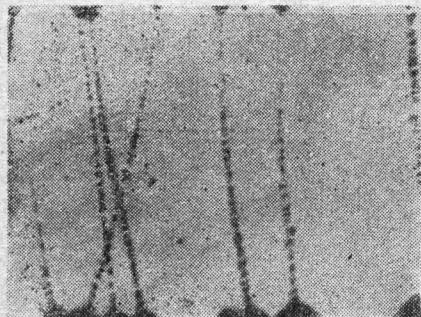


Рис. 4.16. Осаждение меди на дислокациях в кремнии

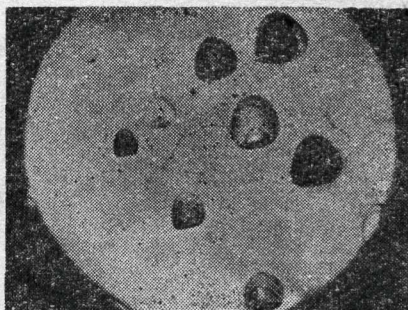


Рис. 4.17. Ямки травления винтовых дислокаций

Выявление дислокаций металлографическим методом. В местах выхода дислокаций на поверхность кристалла атомные связи сильно искажены. Эти участки обладают повышенной скоростью растворения. После травления на поверхности пластины видны ямки травления, соответствующие выходу линий дислокаций. Число ямок на единице площади определяет плотность дислокаций. При плотностях свыше 10^5 см^{-2} ямки травления сливаются и подсчет их затруднен.

Форма и характер ямок травления зависят от условий травления и ориентации поверхности пластины. Поскольку плоскость (100) обладает симметрией четвертого порядка, то ямки травления на ней имеют вид квадратов или прямоугольников. Плоскость (111) обладает симметрией третьего порядка; ямки травления на ней треугольные. Если образец ориентирован неточно, то ямки травления принимают вид вытянутых треугольников или четырехугольников. Выявлять дислокации можно при отклонении ориентации пластин от плоскостей (111), (100) или (110) не более чем на $8\text{--}10^{\circ}$. Наклон линии дислокации к плоскости особой роли не играет. При исследовании дислокаций подобным методом необходимо различать ямки травления, обусловленные дислокациями, и ямки травления, вызванные другими нарушениями решетки. Дислокационные ямки травления имеют воронкообразный вид

(рис. 4.17), а прочие ямки травления — плоское дно. На размеры ямок травления оказывают влияние длительность травления и наличие кислорода. Чем больше кислорода в образце, тем меньше ямка травления.

Из-за малой разницы в скоростях травления выхода винтовых дислокаций и ненарушенных участков поверхности не все винтовые дислокации могут быть выявлены. Лучшие результаты дают медленные травители. Винтовые дислокации, выходящие на поверхность под углами больше 30° , не выявляются, что обусловлено отсутствием у них неспаренных связей.

Процесс выявления дислокаций в полупроводниковых соединениях более сложен. Например, в случае арсенида галлия восемь возможных плоскостей (111) могут быть двух типов: обогащенные галлием или мышьяком. Поэтому для каждой стороны пластинки GaAs применяют свой дислокационный травитель. Основные дислокационные травители для ряда полупроводников приведены в табл. 4.3.

Т а б л и ц а 4.3

Материал	Состав травителя в объемных долях
Германий	$5\text{HNO}_3 + 3\text{HF} + 3\text{CH}_3\text{COOH} + 0,6 \text{ мг Br}_2$
Кремний	$3\text{HNO}_3 + 1\text{HF} + 10\text{CH}_3\text{COOH}$
Антимонид индия	$1\text{C}_2\text{H}_5\text{COOH} + 5\text{HF} + 12\text{H}_2\text{O}$
Арсенид галлия	$1\text{HNO}_3 + 2\text{H}_2\text{O}$

Металлографический метод и изготовление поперечных шлифов нашли наиболее широкое распространение как в производственной, так и в исследовательской практике.

МЕТОД ДИФФУЗИИ

§ 5.1. Физические основы процесса диффузии

Основные определения. Диффузией, точнее гетеродиффузией или химической диффузией, называют перенос вещества, обусловленный хаотическим тепловым движением атомов, возникающий при наличии градиента концентрации данного вещества, и направленный в сторону убывания этой концентрации в той среде, где происходит диффузия.

Иногда используют понятие самодиффузии — перемещение атомов в однородной среде, когда их концентрация везде одинакова. Самодиффузия также обусловлена беспорядочным тепловым движением атомов.

При температуре выше температуры Таммана (температура Таммана равна половине температуры плавления данного вещества, выраженной в абсолютных градусах) подвижность узловых атомов решетки становится значительной, и перемещения атомов в решетке являются основным механизмом диффузии. Этот процесс требует относительно большой энергии для движения каждого атома.

Энергия, которую необходимо сообщить атому для единичного скачка в кристаллической решетке, называют энергией активации диффузии.

С меньшей затратой энергии происходит диффузия по границам зерен и вдоль определенных типов дислокаций. Еще меньшей энергией активации обладает диффузия по поверхности; для некоторых материалов она может быть существенна при температурах выше половины температуры Таммана.

Механизм диффузии в идеальных кристаллах. В идеальных монокристаллах возможны два способа диффузии, не ведущие к нарушению совершенства решетки: непосредственный обмен местами соседних атомов (рис. 5.1, а) и кольцевой обмен (рис. 5.1, б).

В первом случае атомы, окружающие обменивающиеся соседние атомы, должны раздвинуться, чтобы освободить пространство для обмена. Это требует затраты большой энергии — порядка энергии связи между атомами. Во втором случае энергия, приходящаяся на каждый обменивающийся атом, будет меньше, чем для парного обмена, но остается больше реально наблюдаемых значений. Такое различие обусловлено тем, что реальные кристаллы содержат дефекты структуры, облегчающие процесс диффузии.

Точечные дефекты. Я. И. Френкелем в 1926 г. была развита кинетическая теория кристаллов, которая дала возможность объяснить низкую энергию активации диффузии. Атомы, находящиеся в узлах кристаллической решетки, испытывают непрерывные тепловые колебания вокруг центра равновесия. Небольшая часть атомов может обладать энергией, значительно превышающей энергию связи атома с узлом решетки. Такие атомы «испаряются» из узлов и переходят в междоузельное пространство, образуя пустой узел — вакансию или дырку и дислоцированный в междоузлии атом

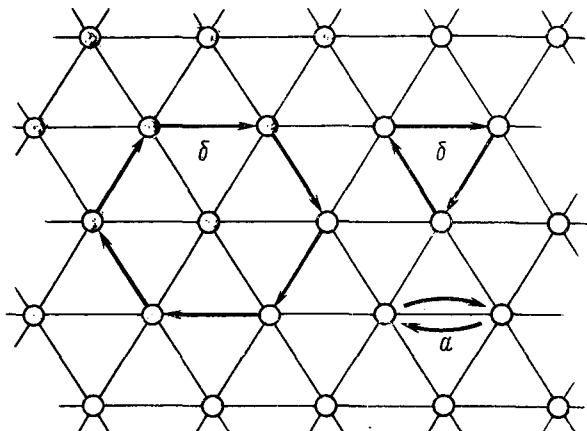


Рис. 5.1. Способы диффузии в идеальном кристалле:
 а — непосредственный обмен мест соседними атомами; б —
 кольцевой обмен мест

(рис. 5.2, а). Совокупность вакансии и дислоцированного атома называют дефектом по Френкелю.

Наряду с этим в кристалле могут образовываться только одни вакансии (рис. 5.2, б). Если переход в междоузлия затруднен, то какой-либо поверхностный атом может быть выброшен из своего места тепловыми колебаниями, сохраняя частичную связь с телом. Образовавшаяся вакансия перемещается внутрь кристалла путем последовательного заполнения ее атомами. Подобные дефекты называют дефектами по Шоттки.

Количество дефектов экспоненциально растет с ростом температуры.

Концентрация дефектов по Френкелю

$$n_{\Phi} = \sqrt{NM} \exp\left(-\frac{\Delta E_{\Phi}}{2kT}\right),$$

концентрация дефектов по Шоттки

$$n_{\text{Ш}} = N \exp\left(-\frac{\Delta E_{\text{Ш}}}{kT}\right),$$

где N — концентрация атомов в узлах;

M — концентрация междоузлий;

ΔE_F — энергия активации перехода атома в междоузлие;

$\Delta E_{ш}$ — энергия активации образования вакансии.

Значения ΔE_F и $\Delta E_{ш}$ с увеличением температуры уменьшаются, что облегчает дефектообразование.

С ростом температуры в кристалле растет количество вакансий. Когда оно достигает величины около одной вакансии на 10^5 узлов, кристалл плавится. Наличие большой концентрации вакансий объясняет также образование трещин. Причиной этого может быть как механическое, так и тепловое воздействие. Быстрое охлаждение после нагрева ведет к замораживанию вакансий, так как ушедшие атомы не успевают заполнить пустые узлы.

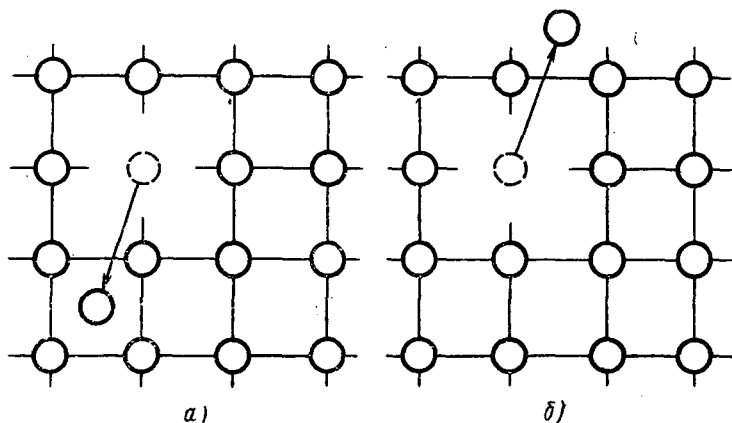


Рис. 5.2. Дефекты Френкеля (а) и Шоттки (б)

Механизм диффузии в реальных кристаллах. Френкель, Вагнер и Шоттки предположили, что диффузия в реальных твердых телах может осуществляться тремя основными механизмами:

1) атомы могут обмениваться местами аналогично тому, как это происходит в идеальном кристалле;

2) атом может покинуть свое обычное положение в узле решетки и двигаться по междоузлиям, пока не попадет в вакантный узел, покинутый другим диффундирующим атомом; этот механизм характеризуется малой энергией активации в кристаллах, где междоузлия достаточно велики;

3) атомы могут диффундировать посредством последовательных перескоков по вакантным узлам.

Для твердых тел, где преобладают дефекты по Френкелю, возможны все три механизма диффузии, а для кристаллов с дефектами по Шоттки наиболее характерен третий механизм. Процесс диффузии в твердых растворах внедрения происходит благодаря

движению примесных атомов по междоузлиям, а в твердых растворах замещения может происходить всеми тремя механизмами.

Влияние примесей в исходном полупроводнике на диффузию. Дефекты типа примесей в исходном материале оказывают влияние на процесс диффузии вследствие двух факторов.

Во-первых, вокруг каждого примесного атома возникает локальная деформация кристаллической решетки, уменьшающая энергию связи соседних атомов между собой, что ведет к возрастанию вероятности образования вакансий. В случае диффузии по вакансиям наличие третьей примесной компоненты способствует увеличению скорости диффузии независимо от того, больше или меньше размер атомов этой компоненты по сравнению с размером атомов основного вещества.

Во-вторых, наличие электрического взаимодействия между примесью и диффузантом может привести к возникновению дополнительной связи, которая увеличит или уменьшит энергию активации диффузии. Для германия и кремния диффузия доноров замедляется при наличии акцепторной примеси и ускоряется, если имеется донорная примесь.

Дислокации и диффузия. Вдоль дислокационных линий диффузия идет быстрее, чем через недислоцированную решетку, так как дислокации окружены примесной атмосферой, концентрация которой может превышать равновесную концентрацию примеси в объеме, а на одной стороне дислокации, имеющей краевую компоненту, создается отрицательное давление, способствующее диффузии. В одном направлении эти эффекты действуют для атомов, расширяющих решетку, и в противоположном — для атомов, сжимающих ее.

Кроме того, атомные перемещения происходят более часто в местах относительно беспорядочно расположенных атомов вблизи ядра дислокации, и район дислокации обладает повышенной концентрацией вакансий.

Связь растворимости и скорости диффузии. Скорость диффузии примесных атомов в металлах и полупроводниках обратно пропорциональна величине их растворимости. Если атомы растворителя и растворенного вещества идентичны, то примесь проникает в кристаллическую решетку в основном по вакансиям, замещая узлы растворителя. В результате образуется твердый раствор замещения и примесные атомы имеют большую величину растворимости. Если растворяемый атом не может замещать узел или не может удержаться там вследствие слабой химической связи, диффузия идет по междоузлиям. Этот механизм характеризуется большей скоростью диффузии; в то же время в междоузельном пространстве может разместиться небольшое число атомов, что обуславливает малую растворимость. Поэтому в полупроводниках типа германия и кремния элементы III группы обладают большей растворимостью, чем элементы II группы, которые в свою очередь имеют большую растворимость, чем элементы I группы. Внутри группы максимальной растворимостью обладают более легкие элементы.

Известно, что в кремнии элементы III группы быстрее диффундируют, чем элементы V группы; для германия характерна обратная картина. Это объясняется взаимодействием между атомами примеси и вакансиями. Вакансии в германии и кремнии являются акцепторами, их энергетические уровни расположены так: $E_v + 0,26 \text{ эВ} (\text{Ge})$ и $E_c - 0,16 \text{ эВ} (\text{Si})$. Будучи заряженными, они вступают в кулоновское взаимодействие с диффундирующими ионами примеси — положительно заряженные ионы притягиваются к отрицательно заряженным вакансиям, что облегчает их перемещение.

В германии преобладает кулоновское взаимодействие, и доноры диффундируют быстрее, чем акцепторы.

В кремнии большинство вакансий находится в нейтральном состоянии, поэтому кулоновское взаимодействие между ними и ионизированными примесными атомами отсутствует. Вследствие значительно большего различия в тетраэдрических ковалентных радиусах атомов акцепторных примесей и атомов кремния по сравнению с атомами донорных примесей и атомами кремния (см. табл. 4.1) акцепторные примеси, как уже указывалось, диффундируют с большей скоростью, чем донорные.

Особенности диффузии в полупроводниковых соединениях. Структура полупроводниковых соединений может быть представлена в виде двух взаимно проникающих гранецентрированных решеток, каждая из которых состоит из атомов одного из составляющих элементов. Для соединения типа $A^{III}B^V$ диффузия в подрешетке атомов III группы характеризуется меньшей энергией активации, чем соответствующая диффузия в подрешетке V группы. Если диффундирующие атомы нейтральны или однократно ионизованы, то на их движение по вакантным узлам V группы затрачивается большая энергия, чем на движение по вакантным узлам III группы. Это происходит потому, что для образования вакансии в V группе из системы связей требуется удалить 5 электронов, а для образования вакансии в III группе необходимо удалить только 3 электрона. Элементы II группы являются акцепторами, что указывает на замещение ими элементов III группы. Элементы VI группы являются донорами и замещают атомы V группы.

§ 5.2. Законы диффузии

Математическое описание диффузионных процессов применительно к идеальным газам и растворам было впервые предложено в 1855 г. А. Фиком в виде двух законов, основанных на уравнениях теплопроводности.

Первый закон Фика характеризует скорость проникновения атомов одного вещества в другое при постоянном во времени потоке этих атомов и неизменном градиенте их концентрации:

$$\bar{F} = -D \nabla C, \quad (5.1)$$

где $\bar{F}$ — вектор плотности потока атомов вещества;

∇C — вектор градиента концентрации диффундирующих атомов;
 D — коэффициент пропорциональности, или коэффициент диффузии.

Коэффициент диффузии определяет величину плотности потока атомов вещества при заданном градиенте концентрации. Так как диффузионный поток атомов вещества идет в направлении выравнивания перепада концентрации, то коэффициент D (см²/сек) является мерой скорости, с которой система способна при заданных условиях выравнивать разность концентраций. Эта скорость зависит только от подвижности диффундирующих атомов в решетке полупроводника.

Скорость диффузии зависит от кристаллографического направления, однако при обычных условиях в полупроводниках обнаруживается только слабая анизотропия. Кроме того, при повышенных температурах в реальном технологическом процессе преимущественное перемещение атомов в наиболее «выгодном» кристаллографическом направлении перекрывается беспорядочным броуновским тепловым движением.

Градиент концентрации при объемной диффузии имеет три составляющих по координатным осям. Если глубина диффузии значительно меньше поперечных размеров площади, на которой она происходит, то принимают, что диффузия идет в одном направлении. Одномерное уравнение Фика имеет вид

$$F(x) = -D \frac{\partial C}{\partial x}, \quad (5.2)$$

где $F(x)$ — плотность потока, или число атомов вещества, переносимых в единицу времени через единичную площадь;
 $\partial C / \partial x$ — градиент концентрации диффундирующей примеси в направлении диффузии.

Второй закон Фика определяет скорость накопления растворенной примеси в любой плоскости, перпендикулярной направлению диффузии. Для одномерного случая он имеет вид

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right), \quad (5.3)$$

где $\partial C / \partial t$ — изменение концентрации диффундирующего вещества со временем.

В общей формуле (5.3) учитывается возможная зависимость коэффициента диффузии от концентрации примеси, так как частота обмена местами атомов зависит от структуры окружающих участков твердого тела. В дальнейшем будет ясно, когда необходимо это явление учитывать. Если коэффициент D можно считать постоянным, то уравнение диффузии принимает вид:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}. \quad (5.4)$$

Это допущение справедливо в большинстве практических случаев диффузии в полупроводниках.

В идеальных диффузионных системах, где силы взаимодействия между диффундирующими частицами одного порядка величины с силами взаимодействия этих частиц с кристаллической решеткой, движущей силой диффузии является градиент концентрации. Этот случай и характеризует рассмотренный закон Фика. В более общем случае законы Фика следует выражать через градиент уровня химического потенциала. Химический потенциал μ является функцией концентрации C , постоянной упругой деформации δ и температуры T соответственно.

Первое уравнение Фика в общем виде записывается так:

$$F(x) = -D \frac{\partial \mu}{\partial x} = D_C \frac{\partial C}{\partial x} + D_\delta \frac{\partial \delta}{\partial x} + D_T \frac{\partial T}{\partial x},$$

где $D_C = -D \frac{\partial \mu}{\partial C}$ — коэффициент диффузии, обусловленной наличием градиента концентрации;

$D_\delta = -D \frac{\partial \mu}{\partial \delta}$ — коэффициент диффузии, обусловленной наличием градиента упругих напряжений;

$D_T = -D \frac{\partial \mu}{\partial T}$ — коэффициент диффузии, обусловленной наличием градиента температуры.

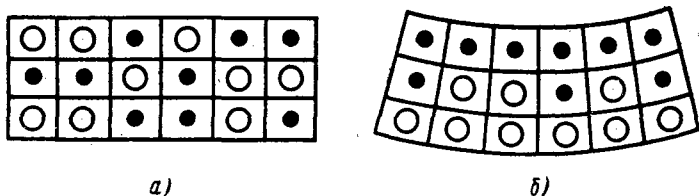


Рис. 5.3. Диффузия, обусловленная градиентом упругих напряжений:

a — начальное расположение атомов; *б* — после диффузии при изгибе

Таким образом, поток вещества определяется градиентами концентрации, упругих напряжений и температуры.

Примером диффузии под действием градиента упругих напряжений является восходящая диффузия (рис. 5.3). При изгибе кристалла атомы различных составляющих твердого раствора, ранее равномерно распределенные по кристаллу, занимают энергетически выгодные для них места: атомы с большим радиусом — в растянутой области, с меньшим радиусом — в сжатой. Конечное положение атомов соответствует равновесному состоянию с минимальной свободной энергией.

Примером диффузии под действием градиента температуры (термодиффузии) является эффект Людвига — Сорэ. Кинетическая картина термодиффузии состоит в следующем. Так как жидкий или твердый раствор имеет перепад температуры, то количество растворенных в нем атомов, которые обладают энергией, необходимой для перехода в соседнее положение, будет изменяться вдоль направления градиента температуры. Излишек «горячих» атомов вызовет термодиффузионный поток их относительно растворителя в более «холодную» часть образца.

В рассмотренных примерах диффузия стремится уменьшить градиент упругих напряжений или температуры, что сопровождается увеличением градиента концентрации.

Описание диффузионного процесса невозможно без коэффициента диффузии, который зависит от температуры, энергии связи примесных атомов в решетке, концентрации вакансий, постоянной решетки, частоты колебаний атомов решетки и ряда других величин. Из анализа кинетики процесса диффузии можно получить

$$D = \frac{l^2 f}{2},$$

где l — длина перемещения диффундирующего атома при единичном скачке;

f — частота скачков в секунду.

Температурная зависимость коэффициента диффузии имеет вид

$$D = D_0 \exp \left(- \frac{\Delta E}{kT} \right), \quad (5.5)$$

где D_0 — постоянная, численно равная коэффициенту диффузии при бесконечно большой температуре;

ΔE — энергия активации диффузии.

Энергия активации составляет 2,2—2,6 эв для большинства элементов в германии и 3,5—4,3 эв — в кремнии. На рис. 5.4 представлены графики температурной зависимости коэффициентов диффузии элементов III и V группы в германии и кремнии. На рис. 5.5 аналогичные графики даны для быстродиффундирующих элементов других групп в кремнии.

Если концентрация диффундирующих атомов превосходит собственную концентрацию электронов и дырок в полупроводнике при

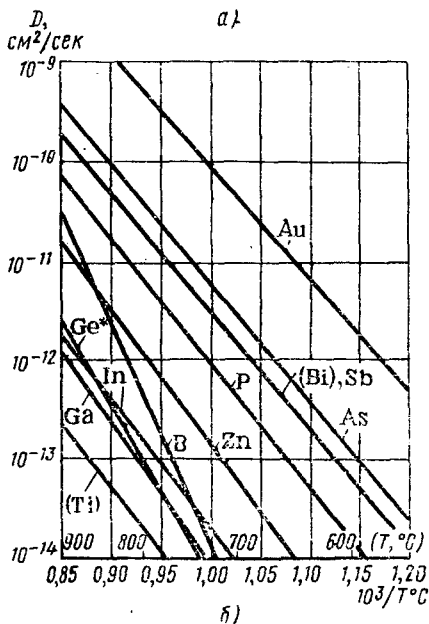
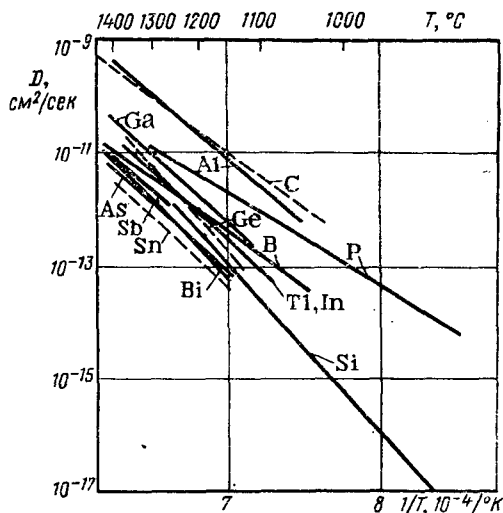


Рис. 5.4. Температурная зависимость коэффициентов диффузии примесных атомов:

а — в германии; б — в кремнии

температуре диффузии, то коэффициент диффузии изменяется по толщине диффузионного слоя вследствие неравномерного распределения концентрации примеси. Из-за большого различия в коэффициентах диффузии примесных атомов и создаваемых ими подвижных носителей заряда, перемещающихся более быстро, возникает область объемного заряда, создающая электрическое поле. Это поле ускоряет диффузию примесных атомов любого типа. Если примесь акцепторная, то подвижные дырки опережают фронт диффузии и создают электрическое поле, тянущее отрицательно заряженные ионы примеси. При диффузии положительно заряженных доноров тянущее поле создают электроны. Зависимость коэффициента диффузии от концентрации имеет вид

$$D_c = D [1 + C (4n_i^2 + C^2)^{-1/2}],$$

где n_i — собственная концентрация носителей заряда при температуре диффузии.

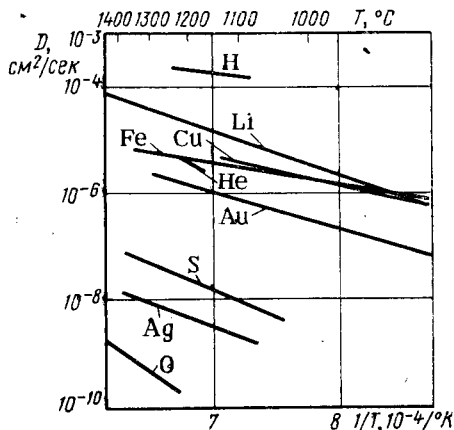


Рис. 5.5. Температурная зависимость коэффициентов диффузии примесных атомов в кремнии с высокой скоростью диффузии

нические условия для решения уравнения диффузии (5.4) имеют вид:

$$C_{x,t=0} = 0 \text{ при } t = 0;$$

$$C_{0,t} = C_0 \text{ при } t > 0 \text{ и } x = 0.$$

При этих условиях распределение концентрации примеси по глубине диффузионного слоя в момент времени t описывается выражением

$$C_{x,t} = C_0 \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}}. \quad (5.6)$$

Символом erfc обозначена функция дополнения интеграла ошибок до единицы (сокращение от error function complementary). Между нею и функцией ошибок erf существует зависимость:

$$\operatorname{erfc} z = 1 - \operatorname{erf} z;$$

$$\operatorname{erf} z = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-\alpha^2} d\alpha;$$

$$\operatorname{erfc} z = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_z^\infty e^{-\alpha^2} d\alpha;$$

$$\operatorname{erf}(-z) = -\operatorname{erf} z.$$

Иногда требуется вычислить интеграл или производную от функции ошибок:

$$\frac{d}{dz} (\operatorname{erf} z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \exp(-z^2);$$

$$\int \operatorname{erf} z dz = z \operatorname{erf} z + \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-z^2) + \text{const.}$$

В табл. 5.1 даны значения функции $\operatorname{erfc} z$, а на рис. 5.6 она представлена в полулогарифмическом и линейном масштабах.

Таблица 5.1

z	$\operatorname{erfc} z$	z	$\operatorname{erfc} z$
0	1,00000	2,00	0,00468
0,10	0,88754	2,10	0,00298
0,20	0,77730	2,20	0,00186
0,30	0,67137	2,30	0,00114
0,40	0,57161	2,40	0,000689
0,50	0,47950	2,50	0,000407
0,60	0,39614	2,60	0,000236
0,70	0,32220	2,70	0,000134
0,80	0,25790	2,80	0,000075
0,90	0,20309	2,90	0,000041
1,00	0,15730	3,00	0,00002209
1,10	0,11980	3,10	0,00001165
1,20	0,08969	3,20	0,00000603
1,30	0,06599	3,30	0,00000306
1,40	0,04772	3,40	0,00000152
1,50	0,03390	3,50	0,000000743
1,60	0,02365	3,60	0,000000356
1,70	0,01621	3,70	0,000000167
1,80	0,01091	3,80	0,000000077
1,90	0,00721	3,90	0,000000035

В выражение (5.6) входит произведение Dt , определяющее «длину диффузии» примесных атомов. Пластина полупроводника, содержащая диффузионный слой, может подвергаться многократ-

ному воздействию повышенной температуры, например, при последовательной диффузии ряда примесей. Для расчета распределения $C_{x,t}$ в этих случаях следует использовать эффективное значение

$$Dt_{\text{эфф}} = D_1 t_1 + D_2 t_2 + D_3 t_3 + \dots$$

Если ведется двойная последовательная диффузия сначала донорной (C_0, D, t_1), а потом акцепторной (C_0, D'', t_2) примесей в полупроводник p -типа, равномерно легированный с концентраци-

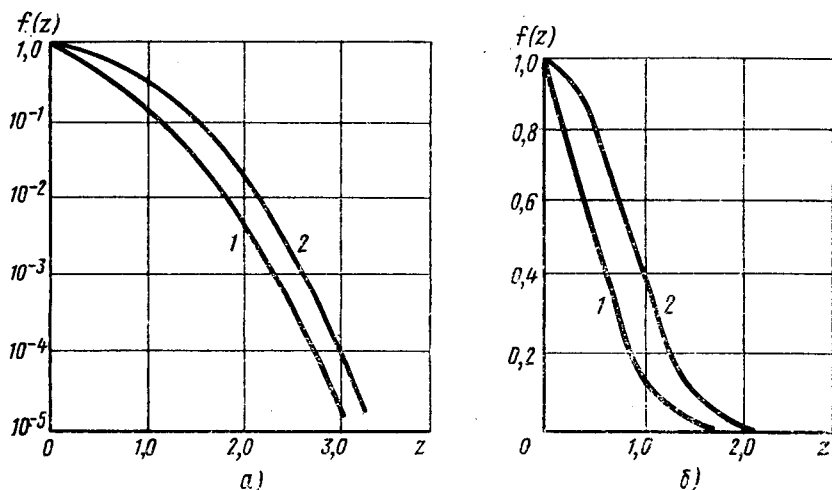


Рис. 5.6. Функции $\operatorname{erfc} z$ (1) и $\exp(-z^2)$ (2) в полулогарифмическом (а) и в линейном (б) масштабах

ей C_B , при различных температурах, то суммарное распределение имеет вид:

$$C_{x,t} = C_B - C'_0 \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt_1 + D't_2}} + C_0 \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{D''t_2}}, \quad (5.7)$$

где D' — коэффициент диффузии акцепторов при температуре диффузии доноров.

Если полупроводник равномерно легирован примесью и такая же примесь является диффузантом, что встречается при создании n - n^+ - и p^+ - p -переходов, и пренебречь концентрацией C_B нельзя, то

$$C_{x,t} = C_B + (C_0 - C_B) \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}}. \quad (5.8)$$

В случае двухстадийной диффузии в слаболегированный полупроводник одной и той же примеси, распределение имеет вид:

$$C_{x,t} = C_{01} \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{D_1 t_1 + D_2 t_2}} + (C_{02} - C_{01}) \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{D_2 t_2}}, \quad (5.9)$$

где значения D_1, t_1, C_{01} и D_2, t_2, C_{02} относятся соответственно к первой и второй фазам диффузии.

При одинарной диффузии местоположение (глубина залегания) p - n -перехода x_j определяется расчетным путем по известным C_0, C_B, D, t с помощью табл. 5.1 и выражения (5.6) для $C_{x,t=0}$ (область полной взаимной компенсации доноров и акцепторов); для двойной последовательной диффузии положение p - n -переходов определяется на основании выражения (5.7). Для обоих случаев соответственно:

$$\operatorname{erfc} \frac{x_j}{2\sqrt{Dt}} = \frac{C_B}{C_0}; \quad (5.10)$$

$$C_B + C_0 \operatorname{erfc} \frac{x_j}{2\sqrt{D't_2}} = C'_0 \operatorname{erfc} \frac{x_j}{2\sqrt{Dt_1 + D't_2}}. \quad (5.11)$$

При расчете транзисторов необходимо знать максимальное значение концентрации в базе $C_{b \max}$ и соответствующую координату $x_{b \max}$. После двойной последовательной диффузии, упростим для удобства записи выражение (5.7) с учетом (5.11):

$$C_{x,t} = C_B - C_0 \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} + C'_0 \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{D't'}}. \quad (5.12)$$

Дифференцируя (5.12), получим

$$\frac{\partial C}{\partial x} = \frac{C_0}{\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right) - \frac{C'_0}{\sqrt{\pi D't'}} \exp\left(-\frac{x^2}{4D't'}\right). \quad (5.13)$$

Приравняв производную нулю, находим $x_{b \max}$, для упрощения полагая, что велась одновременная диффузия, т. е. $t = t'$:

$$x_{b \max} = \left(\frac{4t}{\frac{1}{D} - \frac{1}{D'}} \lg \frac{C_0}{C'_0} \sqrt{\frac{D'}{D}} \right)^{1/2}. \quad (5.14)$$

Подставив (5.14) в (5.12), можно определить $C_{b \max}$. Из выражения (5.14) видно, что отношение $\frac{x_{b \max}}{\sqrt{Dt}}$ не зависит от времени,

а, следовательно, $C_{b \max}$ также инвариантно во времени.

Электрические параметры p - n -переходов. Характер распределения примеси вдоль диффузионного слоя определяет такие электрические параметры p - n -перехода, как емкость (C_g) и напряжение лавинного пробоя (U_B). На рис. В.1, е в произвольном масштабе показано распределение примеси в диффузионном слое, распределение плотности объемного заряда χ и электрического поля E . Ширина p - n -перехода $w = w' + w''$.

На рис. 5.7 построены кривые $w = f(U/C_B)$, которые определены с помощью численного решения уравнения Пуассона для отноше-

ния $C_B/C_0=10^{-5}$, часто встречающегося в практических случаях диффузии. При использовании графиков для $3 \cdot 10^{-6} \leq C_B/C_0 \leq 3 \cdot 10^{-5}$ максимальная ошибка не превышает 5%.

В левой части графиков линии имеют очень малую кривизну и идут почти параллельно. Эта область хорошо соответствует линейной аппроксимации p - n -перехода. При высоких напряжениях линии сходятся в одну прямую, что соответствует резкому переходу.

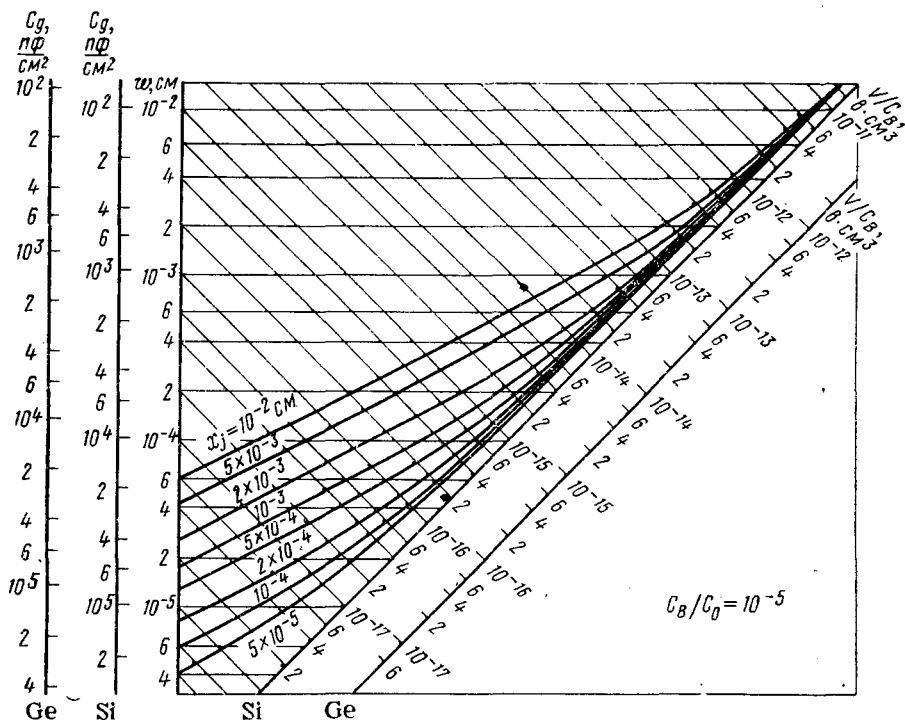


Рис. 5.7. Зависимости $w=f(U/C_B)$, $C_g=f(U/C_B)$ в Ge и Si для erfc -распределения

На рис. 5.8 дана зависимость $w'/w=f(U/C_B)$ для Ge и Si, которую можно использовать при $10^{-6} \leq C_B/C_0 \leq 10^{-4}$, что не повлечет ошибки более 10%. С ростом глубины диффузии переход становится более плавным и лучше соответствует модели перехода с линейным распределением примеси. В плавном переходе $E_1(x)$ и $E_2(x)$ симметричны относительно $E_{\max}$ и $w'/w=w''/w=0,5$. Чем меньше глубина диффузии, тем меньше область w' и тем лучше приближение к резкому переходу. В резком переходе $w' \approx 0$, $w=w''$ и максимальное значение напряженности поля имеет на самой границе, убывая в направлении x .

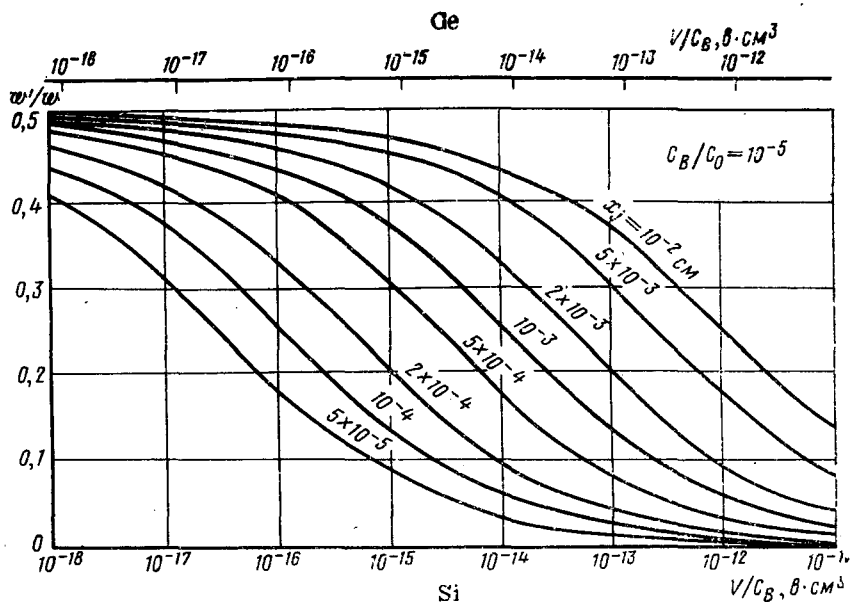


Рис. 5.8. Зависимость $w'/w = f(U/C_B)$ в Ge и Si для erfc-распределения

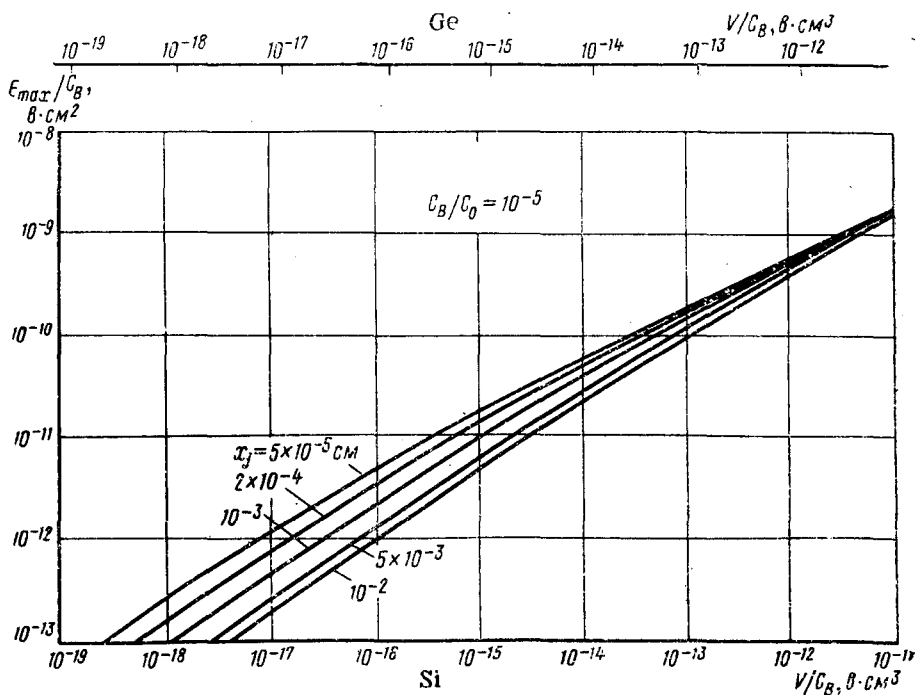


Рис. 5.9. Зависимость $E_{\max}/C_B = f(U/C_B)$ в Ge и Si

На рис. 5.9 приведена зависимость максимальной напряженности поля от прикладываемого напряжения для Ge и Si. Зная C_B и x_j , можно для данного U оценить значение $E_{\max}$ и установить рабочий диапазон напряжений p - n -перехода.

Из рис. 5.9 видно, как изменяются свойства p - n -перехода в зависимости от глубины диффузии и величины исходной концентрации примеси в образце. Для больших значений C_B и малых обратных напряжений величина максимального поля (левая часть графика) сильно зависит от положения p - n -перехода. Для малых концентраций C_B , т. е. больших удельных сопротивлений и больших обратных напряжений, когда $U/C_B > 10^{-13}$ в·см³, величина максимального поля изменяется незначительно с изменением режима диффузии и переход является практически резким.

Пробивное напряжение плавного перехода определяется градиентом концентрации примеси в области перехода, который находят путем дифференцирования функции распределения:

$$a_j = \left. \frac{dC_{x,t}}{dx} \right|_{x=x_j} = - \frac{C_0}{\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(-\frac{x_j^2}{4Dt}\right). \quad (5.15)$$

Из анализа (5.15) понятно, что градиент тем меньше, чем больше температура и время диффузии (возрастает $\sqrt{Dt}$, так как $\frac{x_j^2}{4Dt}$ приблизительно постоянно). Вместе с тем, если два p - n -перехода расположены на одной глубине, то меньшим градиентом концентрации будет обладать тот, у которого меньше поверхностная концентрация. Практически различие будет тем существенней, чем более сильно легирован материал, в который ведется диффузия.

Диффузия из источника ограниченной мощности. При диффузии из поверхностного источника ограниченной мощности, если в начале процесса количество примесных атомов на единице площади поверхности сосредоточено в исчезающе тонком приповерхностном слое и равно Q , а приток диффузанта извне отсутствует, то начальные и граничные условия можно записать так:

$$\text{при } t = 0 \text{ и } x > 0 \quad C_{x,t} = 0;$$

$$\text{при } t > 0 \text{ и } x \rightarrow \infty \quad C_{x,t} = 0;$$

$$\text{при } x = 0 \text{ и } 0 \leq t \leq \infty \quad \frac{dC}{dx} = 0;$$

$$\text{при } 0 \leq t \leq \infty \quad \int_0^{\infty} C_{x,t} dx = Q.$$

В этом случае при решении уравнения диффузии получают распределение концентрации примеси в виде функции Гаусса:

$$C_{x,t} = C_0 \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right); \quad (5.16)$$

$$C_0 = \frac{Q}{V \pi Dt}.$$

Функция (5.16) представлена на рис. 5.6 в линейном и полулогарифмическом масштабах.

В планарной технологии, а также в тех случаях, когда требуется получить хорошо контролируемую низкую поверхностную концентрацию, диффузию проводят в две стадии. Вначале осуществляют короткую диффузию из источника бесконечной мощности (загонка). Поверхностная концентрация при этом определяется предельной растворимостью и концентрацией диффузанта в стеклообразном слое примеси, образовавшемся на поверхности пластин. Затем пластины вынимают из печи, удаляют стеклообразный слой примеси и помещают пластины в чистую печь для второй стадии диффузии — разгонки, проводимой обычно при более высокой температуре, так что $D_2 t_2 \gg D_1 t_1$. Тонкий диффузионный слой после этого является источником с ограниченным количеством примеси.

Количество примесных атомов под единичной площадью поверхности

$$Q = \int_0^{\infty} C_x dx = \int_0^{\infty} C_0 \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{D_1 t_1}} dx = \frac{2C_0}{\sqrt{\pi}} \sqrt{D_1 t_1}. \quad (5.17)$$

С учетом (5.17)

$$C_{x,t} = \frac{2C_0}{\pi} \sqrt{\frac{D_1 t_1}{D_2 t_2}} \exp\left(-\frac{x^2}{4D_2 t_2}\right). \quad (5.18)$$

Если условие $D_2 t_2 \gg D_1 t_1$ не обеспечивается, то нельзя считать, что при разгонке идет диффузия из поверхностного источника ограниченной мощности. Тогда

$$C_{x,t_1,t_2} = \frac{2C_0}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} \exp(-m^2) \operatorname{erf}(\alpha m) dm; \quad (5.19)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{D_1 t_1}{D_2 t_2}}; \quad \beta = \frac{x^2}{4(D_1 t_1 + D_2 t_2)}.$$

Интеграл (5.19) вычислен и табулирован (табл. 5.2) для разных α и β . После второй стадии

$$C'_0 = \frac{2C_0}{\pi} \operatorname{arctg} \alpha. \quad (5.20)$$

Переход будет залегать на глубине, где значение $C_{x,t} = C_B$, т. е.

$$x_j = 2\sqrt{Dt} \sqrt{\ln \frac{C_0}{C_B}}. \quad (5.21)$$

Т а б л и ц а 5.2

$\frac{\beta}{\alpha}$	0,1	0,2	0,3	0,5	1,0	2,0	3,0	5,0
0,1	0,09015	0,8155	0,07376	0,06035	0,03655	0,01340	0,00491	0,00066
0,2	0,17838	0,16119	0,14566	0,11894	0,07167	0,02603	0,00945	0,00125
0,3	0,26295	0,23723	0,21403	0,17422	0,10416	0,03725	0,01333	0,00171
0,4	0,34254	0,30837	0,27761	0,22501	0,13314	0,04668	0,01640	0,00204
0,5	0,41626	0,37374	0,33557	0,27058	0,15812	0,05419	0,01866	0,00224
0,6	0,48366	0,43290	0,38751	0,31062	0,17900	0,05988	0,02021	0,00236
0,7	0,54464	0,48580	0,43340	0,34515	0,19596	0,06398	0,02120	0,00242
0,8	0,59940	0,53264	0,47347	0,37447	0,20940	0,06680	0,02180	0,00244
0,9	0,64829	0,57380	0,50812	0,39903	0,21979	0,06867	0,02213	0,00245
1,0	0,69176	0,60975	0,53784	0,41935	0,22765	0,06985	0,02231	0,00246
1,5	0,84509	0,72899	0,63065	0,47586	0,24431	0,07141	0,02247	0,00246
2,0	0,92838	0,78491	0,66833	0,49303	0,24682	0,07147	0,02247	0,00246
3,0	0,99920	0,82694	0,68698	0,49825	0,24708	0,07147	0,02247	0,00246
∞	1,02843	0,82795	0,68892	0,49843	0,24709	0,07147	0,02247	0,00246

Из (5.21) следует, что при идентичных условиях диффузии, если известно x_j для момента t_1 , то для диффузии на глубину x_j необходимо время

$$t_2 = \left(\frac{x'_j}{x_j} \right)^2 t_1. \quad (5.22)$$

В большинстве практических случаев поверхностная концентрация превосходит концентрацию примеси в исходной пластине полупроводника C_B в 10^3 — 10^5 раз. С точностью до 10% положение p - n -перехода определяется по приближенной формуле, получающейся из выражения (5.21):

$$x_j = 5,4 \sqrt{Dt}. \quad (5.23)$$

На рис. 5.10 и 5.11 приведены результаты расчетов основных электрических характеристик переходов с гауссовым распределением концентрации примеси. Использование этих графиков при $10^{-6} \leq C_B/C_0 \leq 10^{-4}$ может привести к ошибке не более 10%. Все выводы о соотношении крутизны перехода, величины C_B , напряжения и напряженности поля, приведенные ранее для егfc-распределения, справедливы и в данном случае.

Градиент концентрации примеси в p - n -переходе

$$a_j = - \frac{C_0}{2Dt} x_j \exp \left(- \frac{x_j^2}{4Dt} \right). \quad (5.24)$$

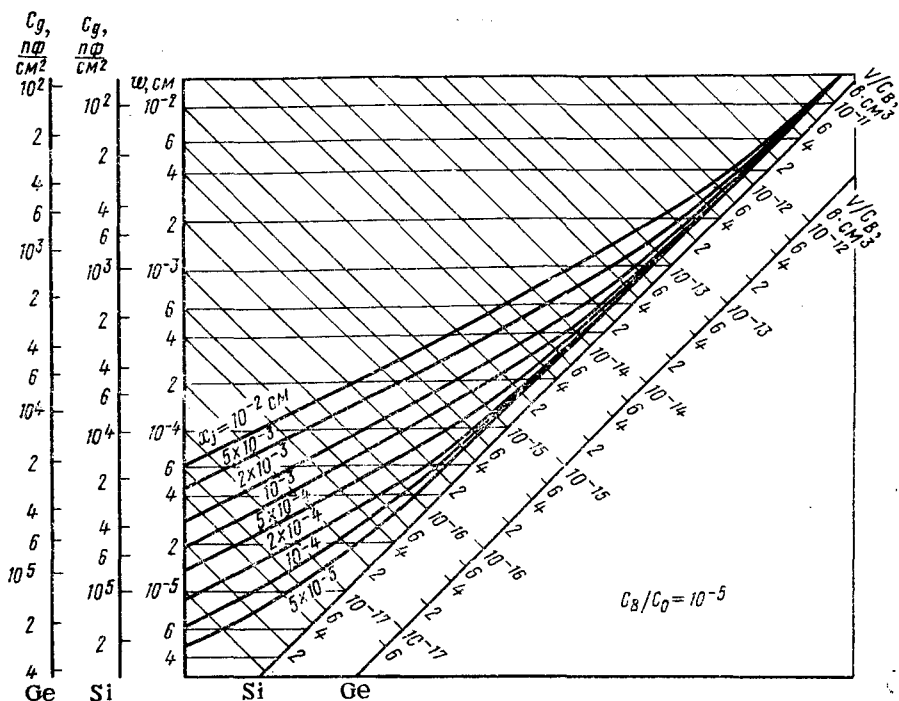


Рис. 5.10. Зависимости $w=f(U/C_B)$, $C_g=f(U/C_B)$ в Ge и Si для гауссова распределения

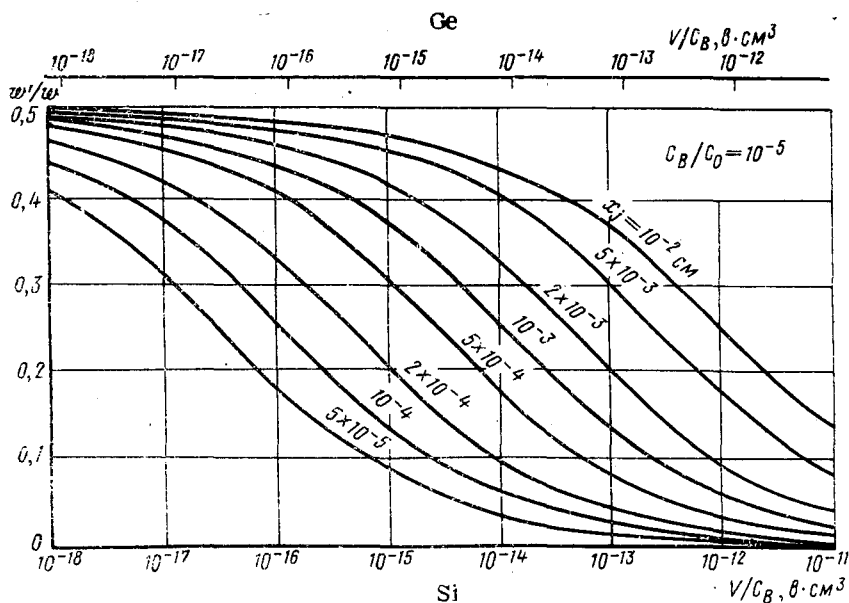


Рис. 5.11. Зависимость $w'/w=f(U/C_B)$ в Ge и Si для гауссова распределения

Зная соотношение между шириной области пространственного заряда, приложенным напряжением, концентрацией примеси и глубиной диффузии, можно вычислить удельную барьерную емкость p - n -перехода. Ее значения приведены на рис. 5.10.

Диффузия из слоя конечной толщины. При изготовлении спавно-диффузионных и эпитаксиальных приборов диффузия ведется из легированного слоя конечной толщины h , сравнимой с глубиной диффузии. Начальное и граничные условия имеют вид: в момент $t=0$

$$\text{при } 0 \leq x \leq h \quad C_x = C_0;$$

$$\text{при } h \leq x \leq \infty \quad C_x = 0.$$

Решение диффузионного уравнения проводится в предположении, что внешняя граница $x=0$ является отражающей (т. е. $\partial C/\partial x=0$ при $x=0$). Тогда

$$C_x = \frac{C_0}{2} \left(\operatorname{erf} \frac{h-x}{2\sqrt{Dt}} + \operatorname{erf} \frac{h+x}{2\sqrt{Dt}} \right). \quad (5.25)$$

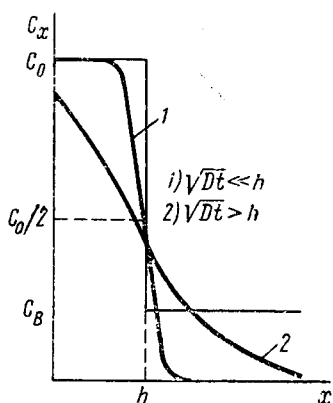


Рис. 5.12. Диффузия из слоя конечной толщины h

Если глубина диффузии $x \ll h$, то $\operatorname{erf} \frac{h+x}{2\sqrt{Dt}} \rightarrow 1$ и распределение

$$C_{x,t} = \frac{C_0}{2} \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}}. \quad (5.26)$$

Начало координат можно перенести в $x=h$, тогда

$$C_{x,t} = \frac{C_0}{2} \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}}. \quad (5.27)$$

Данное распределение описывает диффузионный поток в эпитаксиальных структурах с толстыми слоями, когда $h \gg \sqrt{Dt}$ (рис. 5.12).

Диффузия в испаряющуюся поверхность. При повышенных температурах диффузии поверхностные атомы полупроводника могут испаряться. Если поддерживается постоянная поверхностная концентрация, а испарение происходит с постоянной скоростью v , то через некоторое время распределение примеси достигает установившегося состояния и описывается экспоненциальной функцией

$$C_x = C_0 \exp\left(-\frac{v}{D} x\right). \quad (5.28)$$

Установившееся состояние достигается за время $t > D/v^2$. Положение p - n -перехода

$$x_j = \frac{D}{v} \ln \frac{C_0}{C_B}. \quad (5.29)$$

§ 5.4. Диффузия в планарной технологии

Если на поверхности пластины кремния имеется пленка двуокиси, то образующийся при диффузии p - n -переход обладает в несколько раз меньшей глубиной, чем это следует из теоретических расчетов, а иногда и совсем не образуется. Поверхностная концентрация может уменьшаться на несколько порядков. Исследование данного явления показало, что коэффициент диффузии примесных атомов в пленке двуокиси кремния имеет величину в 10^{-10} раз меньшую, чем в объеме кремния при той же температуре (это лежит в основе использования пленки SiO_2 в планарной технологии).

При диффузии в кремний, поверхность которого покрыта пленкой двуокиси кремния, атомы примеси вначале проходят через слой окисла, а затем диффундируют в объем полупроводника. Объемный поток характеризуется поверхностной концентрацией, определяемой степенью проницаемости окисной пленки. Распределение концентрации примеси в пленке и полупроводнике отличается от функции дополнения к интегралу ошибок или кривой Гаусса, но имеет сходный вид.

Распределение примеси при диффузии через слой окисла кремния. При наличии на поверхности полупроводника пленки окисла диффузия примесных атомов описывается двумя уравнениями:

при $w < x < 0$

$$D_f \frac{\partial^2 C_f}{\partial x^2} = \frac{\partial C_f}{\partial t}; \quad (5.30)$$

при $x > 0$

$$D_v \frac{\partial^2 C_v}{\partial x^2} = \frac{\partial C_v}{\partial t}, \quad (5.31)$$

где символы f и v относятся к пленке и к объему полупроводника соответственно, а w — толщина окисла.

Если на границе раздела пленка — полупроводник не происходит связывания потока примесных атомов и справедлив принцип непрерывности, то при диффузии из источника бесконечной мощности решением уравнений (5.30), (5.31) будут выражения:

$$C_f(x) = C_0 \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{1-\xi}{1+\xi} \right)^n \left[\operatorname{erfc} \frac{w(2n+1)+x}{L_f} - \right. \\ \left. - \frac{1-\xi}{1+\xi} \operatorname{erfc} \frac{w(2n+1)-x}{L_f} \right]; \quad (5.32)$$

$$C_v(x) = \frac{2\xi C_0}{1+\xi} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{1-\xi}{1+\xi} \right)^n \operatorname{erfc} \left[\frac{w(2n+1)}{L_f} + \frac{x}{L_v} \right], \quad (5.33)$$

где

$$\xi = \frac{D_f}{D_v}; \quad L_f = 2\sqrt{D_f t}; \quad L_v = 2\sqrt{D_v t}.$$

Если $\frac{w}{L_f} \geq 1$, то решение упрощается:

$$C_f(x) \simeq C_0 \left(\operatorname{erfc} \frac{w+x}{L_f} - \frac{1-\xi}{1+\xi} \operatorname{erfc} \frac{w-x}{L_f} \right); \quad (5.34)$$

$$C_v(x) \simeq \frac{2\xi C_0}{1+\xi} \operatorname{erfc} \left(\frac{w}{L_f} + \frac{x}{L_v} \right). \quad (5.35)$$

Если на границе раздела происходит связывание примеси [$C_v(0, t) < C_f(0, t)$], т. е. коэффициент сегрегации для атомов примеси, движущихся из пленки в полупроводник $k < 1$, то на границе будет наблюдаться скачок концентраций, причем $C_v(0, t) = kC_f(0, t)$.

Для случая $\frac{w}{L_f} > 1$ решения будут иметь вид:

$$C_f(x) \simeq C_0 \left(\operatorname{erfc} \frac{w+x}{L_f} - \frac{k-\xi}{k+\xi} \operatorname{erfc} \frac{w-x}{L_v} \right); \quad (5.36)$$

$$C_v(x) \simeq \frac{2k\xi}{k+\xi} C_0 \operatorname{erfc} \left(\frac{w}{L_f} + \frac{x}{L_v} \right). \quad (5.37)$$

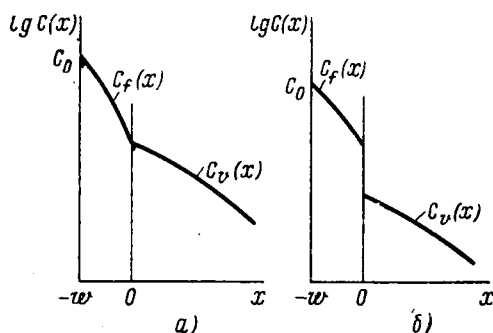


Рис. 5.13. Диффузия через слой окисла без связывания примеси на границе (а) и в случае связывания (б)

Рис. 5.13, а и б характеризует оба случая диффузии примесей через слой окисла в полупроводник.

Представляет интерес определение эффективности применения окисного слоя на кремнии в качестве защитной маски при диффузии. Так как обычно в процессе диффузии происходит рост окисной пленки, то граница раздела Si—SiO₂ перемещается в направлении диффузии со скоростью роста двуокиси v (рис. 5.14).

Распределение концентраций примеси описывается выражениями:

$$C_f(x) = C_0 \left[1 - \frac{DF \operatorname{erf} \frac{x}{L_f}}{\left(DF + \frac{1}{k} \operatorname{erfc} \frac{v}{2r \sqrt{D_v}} \right) \operatorname{erf} \frac{w}{L_f}} \right]; \quad (5.38)$$

$$C_v(x) = C_0 \frac{\operatorname{erfc} \left\{ \frac{v}{2 \sqrt{D_v}} \left[\frac{1}{r} + \frac{y}{w} \right] \right\}}{DF + \frac{1}{k} \operatorname{erfc} \frac{v}{2r \sqrt{D_v}}}, \quad (5.39)$$

где $r = \frac{w - w_0}{\Delta}$ — объемное соотношение SiO_2 и Si ;

y — координата, связанная с кремнием;

x — координата, связанная с окислом;

$$D = \sqrt{\frac{D_v}{D_f}} \exp \left(-\frac{v^2}{4r^2 D_v} \right) - \frac{v \sqrt{\pi}}{2r \sqrt{D_f}} \operatorname{erfc} \frac{v}{2r \sqrt{D_v}}; \quad (5.40)$$

$$F = \frac{v \sqrt{t}}{w} \exp \left(\frac{w^2}{2L_f^2} \right) \operatorname{erf} \frac{w}{L_f}. \quad (5.41)$$

Если k порядка единицы, то членами, содержащими k , можно пренебречь. По имеющимся данным для фосфора $k \leq 0,1$, а для бора $k = 0,016$. Коэффициент сегрегации окисел — кремний для большинства примесей меньше единицы, и при окислении происходит возрастание концентрации примеси в поверхностном слое кремния.

Локальная диффузия.

Для правильного расчета характера распределения

диффундирующей примеси в области полупроводника, расположенной под краем «окна» в пленке двуокиси кремния, при получении планарного p - n -перехода локальной диффузией необходимо решить неоднородное уравнение Фика. Для источника с постоянной поверхностной концентрацией примеси используют двумерное решение, справедливое для диффузии в круглые и квадратные «окна». Для источника с фиксированным количеством примесей может быть получено трехмерное решение. Так как конечные аналитические выражения очень громоздки, то для иллюстрации диффузии из источника с постоянной поверхностной концентрацией в случае двумерной задачи и из источника с фиксированным количеством примеси в случае трехмерной задачи приведены графики

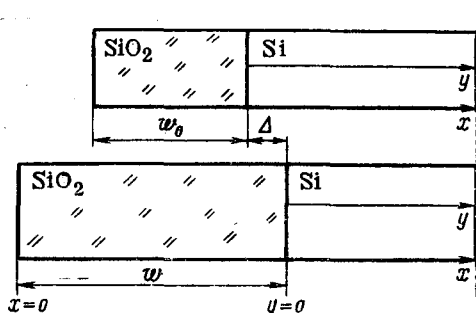


Рис. 5.14. Модель смещения границы раздела SiO_2 — Si после диффузии

рис. 5.15, где показаны распределения концентраций примесных атомов в относительных единицах $C = \frac{C(r, \theta, t)}{C_0}$ и $C = \frac{C(x, y, \infty, t)}{C_0} \sqrt{\pi Dt}$ соответственно. Эти кривые определяют положения p - n -переходов для различных уровней легирования полупроводника. Для

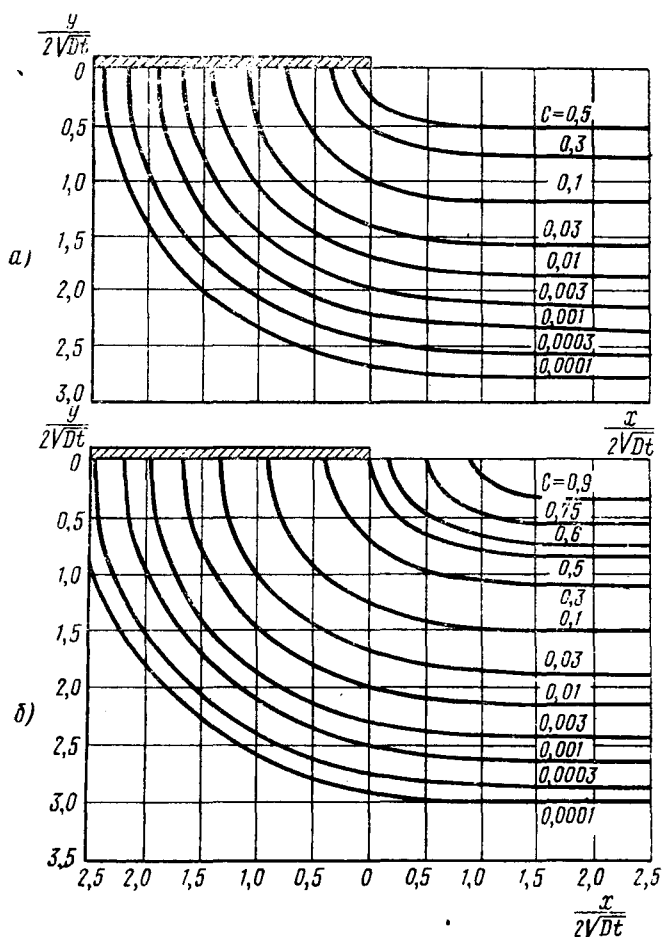


Рис. 5.15. Распределение концентрации примеси у края диффузионной маски:

а — при постоянной поверхностной концентрации; б — при фиксированном количестве примеси

обоих видов распределений диффузия примесных атомов идет более глубоко в направлении, перпендикулярном поверхности пластины, чем вдоль границы окисел — полупроводник.

При расчетах предполагалось, что диффузия через пленку SiO_2 не существенна и что поверхностный коэффициент диффузии (вдоль границы раздела $\text{Si}-\text{SiO}_2$) совпадает с объемным.

Диффузия из источника с постоянной поверхностной концентрацией приводит к увеличению градиента концентрации примеси на поверхности полупроводника непосредственно под окисной маской. Однако это обусловит уменьшение напряжения лавинного пробоя только при соотношении объемной и поверхностной концентраций $C_B \leq 0,1 C_0$, что практически не встречается.

Диффузия из источника с фиксированным количеством примеси приводит к распределению с максимальным градиентом концентрации в глубине полупроводника на достаточно большом удалении от края окисной маски. Этот максимальный градиент равен градиенту концентрации, определяемому одномерным решением уравнения Фика.

Влияние кривизны p - n -перехода на величину напряжения лавинного пробоя. Вследствие малой глубины залегания планарных p - n -переходов (обычно 1—10 мкм) они обладают большой кривизной под краем окисной маски, что вызывает локальное возрастание электрического поля и уменьшение напряжения пробоя.

Как следует из рис. 5.15, боковая граница p - n -перехода приближенно может быть представлена в виде дуги окружности с радиусом,

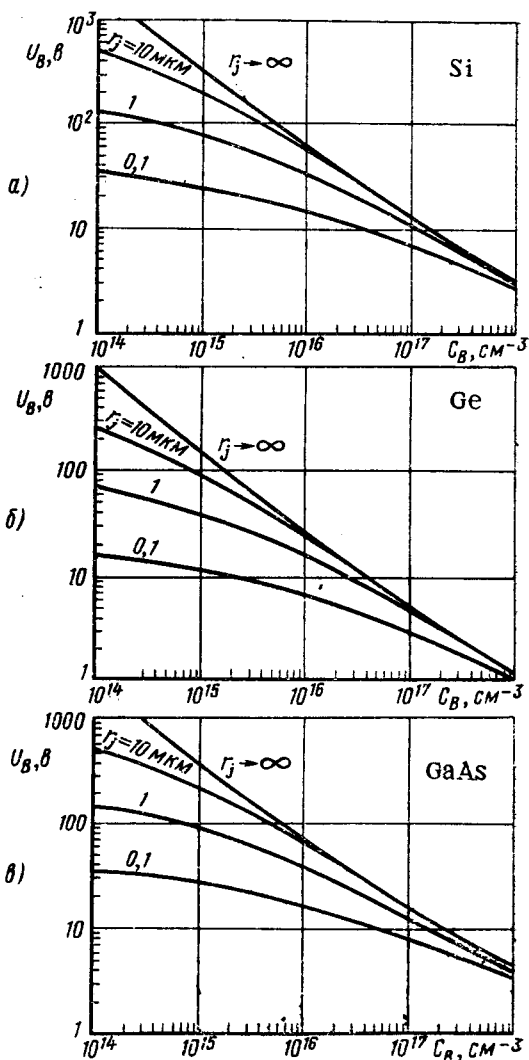


Рис. 5.16. Зависимости напряжений лавинного пробоя планарных p - n -переходов от концентрации примеси и радиуса кривизны перехода:

а — для Si; б — для Ge; в — для GaAs

равным глубине залегания p - n -перехода в плоской его части, т. е. имеет цилиндрическую кривизну. Для перехода с цилиндрической кривизной напряжение лавинного пробоя зависит от электрофизических параметров полупроводникового материала следующим образом:

$$U_B = \frac{4 \ln(1 + \xi) \frac{(1 + \xi)^2}{(1 + \xi)^2 - 1} - 2}{(1 + \xi)^2 - 1} U_{BP}, \quad (5.42)$$

где U_{BP} — напряжение пробоя плоской части p - n -перехода;

$\xi = \frac{w_c}{x_j}$ — отношение ширины области пространственного заряда на краю p - n -перехода к глубине залегания перехода:

$$U_{BP} = \frac{E_{кр}^2 \epsilon \epsilon_0}{2eC_B};$$

$$\xi = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0 E_{кр}}{ex_j C_B}} - 1,$$

где $E_{кр}$ — критическое поле в p - n -переходе.

На рис. 5.16 представлены расчетные значения напряжений лавинного пробоя для диффузионных планарных p - n -переходов на кремнии, германии и арсениде галлия в зависимости от концентрации и радиуса кривизны перехода под краем маски.

§ 5.5. Техника проведения процессов диффузии

Диффузию проводят в сравнительно ограниченном диапазоне температур. Для кремния, например, этот диапазон 1100—1300° С или с учетом процесса загонки при двухстадийной диффузии 1000—1300° С. Ниже 1000° С значения коэффициентов диффузии очень малы и глубина диффузии незначительна. Выше 1300° С качество диффузионных слоев неудовлетворительно.

В зависимости от способа введения в полупроводники диффузанта различают диффузию из газовой (или паровой) фазы, из жидкой фазы и из твердой фазы.

Диффузия из газовой фазы. Если в изолированный объем поместить пластину полупроводника и примесный элемент и нагреть их до некоторой температуры, то вследствие сублимации или испарения примесного элемента в объеме вскоре установится определенное парциальное давление его паров.

В достаточно узком диапазоне температур зависимость между давлением паров p и абсолютной температурой T выражается уравнением

$$p = p_0 \exp\left(-\frac{\Lambda}{RT}\right),$$

где Λ — теплота испарения;

R — газовая постоянная;

p_0 — константа, характеризующая данную систему.

Молекулы пара будут адсорбированы всеми поверхностями, в том числе и поверхностью пластины, а при достаточно большой температуре будут диффундировать вглубь. Если скорость притока новых молекул взамен ушедших в полупроводник равна или больше скорости диффузии, то в поверхностном слое устанавливается равновесная концентрация атомов, равная предельной растворимости при данной температуре. Если скорость притока новых молекул меньше или равна скорости диффузии, но концентрация атомов в паре мала, то поверхностная концентрация определяется только парциальным давлением примесного пара. В идеальном случае равновесная концентрация пропорциональна давлению пара; поэтому управление поверхностной концентрацией осуществляют путем контроля давления пара.

Для разбавленных растворов, какими можно считать твердые растворы примесей в полупроводниках, поверхностная концентрация C_0 связана с давлением примесных паров p_i следующим соотношением:

$$C_0 = C_i \left(\frac{p_i}{p} \right)^{1/n} \exp \left(- \frac{\Lambda_0}{RT} \right),$$

где C_i — собственная концентрация атомов полупроводника;

p — давление пара над чистым примесным веществом при температуре T ;

n — число атомов в молекуле паров примеси;

Λ_0 — постоянная, характеризующая систему.

Если равновесие на поверхности достигается за время, меньшее чем длительность диффузии, то поверхностную концентрацию можно считать постоянной. Поэтому в большинстве случаев распределение примеси при диффузии из газовой фазы описывается функцией дополнения к интегралу ошибок.

Диффузия из жидкой фазы. При больших парциальных давлениях концентрация примеси в поверхностном слое может быть такой, что будет образовываться жидкая фаза, если позволяет диаграмма состояния. Практически различают два типа взаимодействий на поверхности: образование сплава и химическое взаимодействие.

Примесные элементы, например Al, In и Ga, могут быть нанесены на пластину полупроводника испарением в вакууме. При последующей диффузии на поверхности пластин в соответствии с фазовой диаграммой образуется жидкий сплав. Поверхностная концентрация определяется только термодинамическими свойствами системы примесь — полупроводник и равна предельной растворимости примеси при данной температуре диффузии.

Второй тип взаимодействий на поверхности заключается в быстрой химической реакции донорной или акцепторной примеси с полупроводником. Обычно имеет место взаимодействие между полупроводником и жидкой поверхностной фазой, состоящей из окисла,

например SiO_2 , первоначально присутствующего на полупроводнике, и донорным либо акцепторным окислом, используемым при диффузии. При температуре выдержки в реагирующей фазе устанавливается равновесная концентрация доноров или акцепторов. Скорость перехода примеси из этой фазы в полупроводник очень велика, и распределение примеси соответствует случаю источника с постоянной поверхностной концентрацией, как и при наличии сплава.

Диффузия из твердой фазы — это диффузия из твердого раствора примеси в одной области полупроводника в примыкающую к ней другую область этого же полупроводника, свободную от примеси данного типа.

Таким образом, для диффузии из твердой фазы характерно наличие начального резкого перепада концентраций диффундирующей примеси. Структуры со ступенчатым начальным распределением примеси получают при выращивании эпитаксиальных пленок, путем создания рекристаллизованного слоя при сплавлении и путем предварительного диффузионного или ионно-лучевого легирования тонкого поверхностного слоя полупроводника. Эти виды структур различаются по толщине легированного слоя, из которого идет диффузия.

Эпитаксиальные структуры, в которых происходит диффузия из твердой фазы, различаются по соотношению толщин и уровней легирования областей: $h^+ \ll h$ или $h \ll h^+$. В сплавных структурах толщина рекристаллизованного слоя обычно мала и для них характерно $h^+ < h$; в диффузионных и ионно-лучевых структурах $h^+ \ll h$.

Вид кривой распределения, продиффундировавшей в твердой фазе примеси, определяется, кроме соотношения толщин областей h и h^+ , глубиной диффузии $L = \sqrt{Dt}$. Практически важными являются следующие случаи.

1. При $L \ll h \ll h^+$ распределение примеси описывается выражением (5.27). Этот случай встречается при диффузии примеси из сильно легированной подложки в эпитаксиальную пленку, имеющей место при высоких температурах выращивания.

2. При $h^+ \ll L \ll h$ распределение примеси описывается выражением (5.18), что характерно для случая двухстадийной диффузии, загонка (диффузионная или ионно-лучевая) и последующая разгонка. Особую важность этот случай приобретает в связи с развитием метода ионного легирования, позволяющего вводить в полупроводники строго фиксированное количество примеси с высокой воспроизводимостью.

Способы проведения диффузии: Диффузионные процессы проводят в закрытой или открытой трубе.

В первом случае (рис. 5.17, а) пластины полупроводника 1 и источник 2 загружают в кварцевую ампулу 3, которую эвакуируют, герметизируют и помещают в печь 4.

Термин «открытая труба» обусловлен тем, что выходной конец диффузионной трубы сообщается с атмосферой (рис. 5.17, б—д).

Через него в зону диффузии загружают кремниевые пластины 1. Чтобы свести к минимуму загрязнения из атмосферы, над выходом трубы 2 устанавливают вытяжную систему. Во входной конец диффузионной трубы вставляют шлиф 3 для введения газа-носителя 3 — азота или кислорода.

Диффузانت 4 либо наносят на поверхность пластины (рис. 5.17, б) либо вводят в виде пара или газа в газ-носитель (рис. 5.17, в).

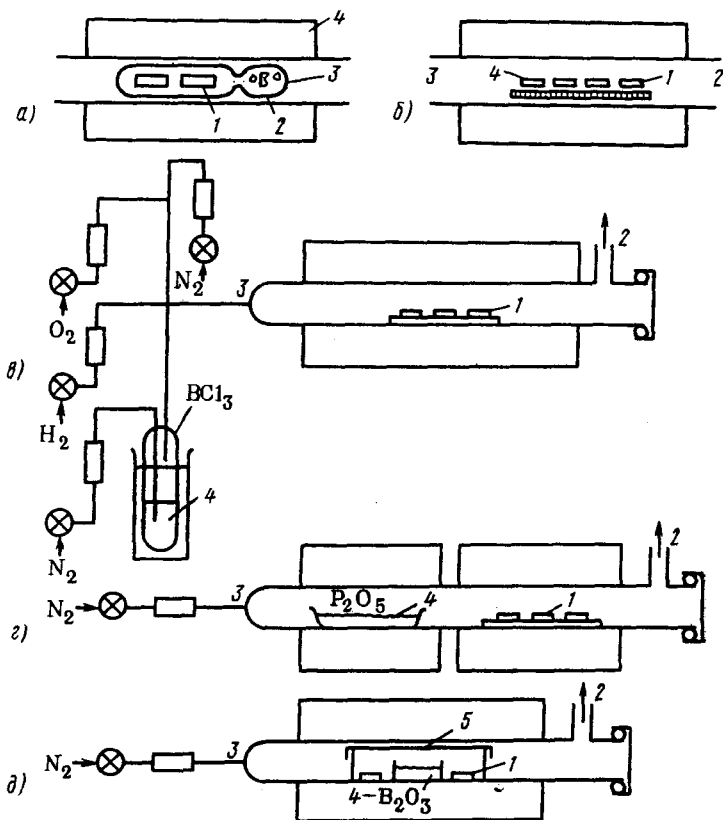


Рис. 5.17. Способы проведения процесса диффузии

На рис. 5.17, в показана схема двухзонной печи, применяемой в основном для диффузии из твердых источников методом открытой трубы, на рис. 5.17, д — схема бокс-метода. В последнем случае пластины и источник находятся в полугерметичном контейнере 5 однозонной печи.

Наибольшее распространение имеет диффузия в открытой трубе, проводимая из твердых, жидких и газообразных источников.

Основными диффузантами при диффузии в кремний являются фосфор и бор.

При изготовлении планарных приборов и интегральных схем процесс диффузии, как уже отмечалось, обычно проводят в две стадии.

На первой стадии (загонке) на поверхности кремния создается тонкий диффузионный слой с $erfc$ -распределением примеси. Загонку осуществляют в печах с двумя температурными зонами при невысоких по сравнению с собственно диффузией температурах. После загонки пластины вынимают из печи и с их поверхности удаляют слой борно- или фосфорносодержащего окисла.

На второй стадии (разгонке) пластины полупроводника нагревают в однозонной печи в атмосфере, не содержащей атомов диффузанта, так что единственным процессом является диффузионное перераспределение примеси. Вторая стадия соответствует диффузии из источника ограниченной мощности.

Двухстадийная диффузия имеет два основных преимущества по сравнению с одностадийной:

1) разделение процесса на две стадии делает его более управляемым, что повышает воспроизводимость и упрощает его контроль;

2) облегчается маскирование, так как первая стадия кратковременная и относительно низкотемпературная, а на второй стадии нет паров диффузанта. Все это повышает стойкость и защитное свойство окисла.

Качество диффузионных слоев во многом определяется поддержанием чистоты при хранении и транспортировке пластин и особенностями нагрева и охлаждения. После химической очистки пластины хранят в метиловом спирте. Для загрузки в печь их вынимают пинцетом с тефлоновыми наконечниками и мокрыми помещают на кварцевую лодочку. В зависимости от конструкции лодочки (рис. 5.18) пластины располагают горизонтально или вертикально.

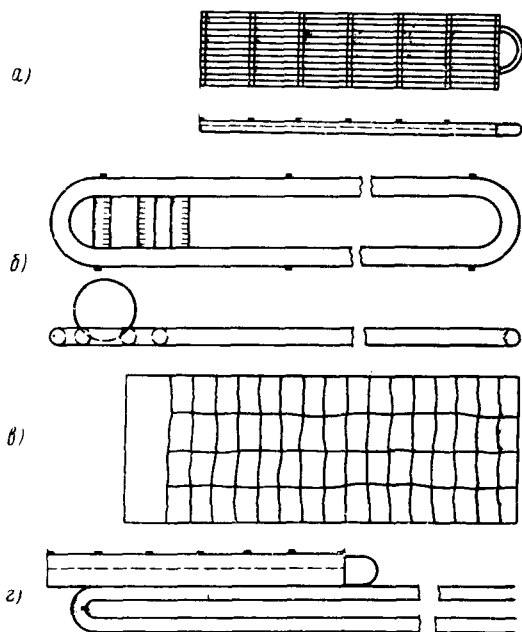


Рис. 5.18. Типы лодочек из кварцевого стекла, применяемые при диффузии:

а — пластина с прорезями; б — лесенка; в — сетчатая корзина; г — комбинация лодочки с полым стержнем

Для того чтобы избежать неравномерного распределения диффузанта в потоке газа-носителя, перед лодочкой ставят экран из кварцевой ваты. Загруженную лодочку постепенно вводят в трубу, нагретую до нужной температуры. Поток примеси следует подводить после того, как пластины достигнут температуры диффузии. В большинстве случаев это происходит в течение нескольких минут. При диффузии из твердого источника до загрузки пластин нужно предусмотреть возможность изменять направление газового потока на противоположное на период ввода пластин. Это предотвращает конденсацию примеси на поверхности холодных пластин, пока они еще не достигли зоны нагрева.

Другой способ, который применяют, когда холодные пластины нужно загрузить в диффузионную печь в потоке примеси, состоит в предварительном нагреве пластин в нейтральной атмосфере. Сложность заключается в том, чтобы при перемещении пластин в печь не подвергнуть их воздействию атмосферы.

По истечении расчетного времени диффузии введение паров примеси прекращается и пластины вынимают. При быстром выдвигании лодочки с пластинами из печи может произойти термозакалка, поэтому лодочку вынимают медленно, чтобы скорость охлаждения не превышала $10\text{--}20$ град/мин. Иногда для этого пластины охлаждают вместе с печью, плавно уменьшая мощность нагрева, что позволяет получить скорость охлаждения $1\text{--}5$ град/мин. После извлечения пластин из печи и охлаждения до комнатной температуры необходимо защитить их от повреждений и загрязнений. С этой целью на поверхность пластин наносят фоторезист или коллоидное покрытие, помещают пластины в обезвоженный органический растворитель или хранят их в скафандре с контролируемой средой.

§ 5.6. Основные диффузаны

К диффузантам предъявляется ряд требований:

- 1) достаточно высокое значение коэффициента диффузии D при рабочих температурах;
- 2) воспроизводимость значения поверхностной концентрации от процесса к процессу;
- 3) возможность задания любой поверхностной концентрации в пределах нескольких порядков вплоть до предельной растворимости;
- 4) отсутствие взаимодействия поверхности с диффузантом, приводящего к образованию трудноудаляемых соединений или дефектов (в том числе трещин);
- 5) отсутствие нежелательных примесей, которые могут внедриться в полупроводник;
- 6) источник не должен быть дефицитным, токсичным и взрывоопасным.

Твердые диффузаны. Фосфор. Наиболее распространенным источником в твердой фазе является безводная пятиокись фосфо-

ра — фосфорный ангидрид P_2O_5 . Пятиокись помещают в зону источника (рис. 5.17, з) и нагревают до температур $230^\circ\text{—}300^\circ\text{C}$, при которых происходит испарение P_2O_5 . При температурах выше 300°C поверхностная концентрация уменьшается и становится невоспроизводимой. Протекая над P_2O_5 , газ-носитель захватывает молекулы пятиокиси и переносит их в зону диффузии.

Системы такого типа обеспечивают регулирование и воспроизводимость параметров при высоких поверхностных концентрациях. Чтобы получить наилучшие результаты при использовании P_2O_5 , нужна обезвоженная система, так как P_2O_5 отличается высокой гигроскопичностью. Для предотвращения воздействия влаги на P_2O_5 его помещают в поливиниловые ампулы, заполненные аргоном.

Для каждого цикла диффузии требуется новая порция источника P_2O_5 . Кроме того, поверхностная концентрация падает через 3—4 ч после помещения P_2O_5 в печь вследствие истощения источника. Перед диффузией в целях сохранения качества поверхности пластин и достижения стабильности источника осуществляют его старение около 30 мин в зоне источника. При этом возможна дегидратация P_2O_5 .

В процессе диффузии между P_2O_5 и кремнием происходит химическая реакция, в результате которой выделяются элементарный фосфор и окись кремния, образующие стекловидное соединение на поверхности пластины. Из этого аморфного соединения идет диффузия. Стекловидный слой защищает кремний от поверхностной эрозии.

Другими источниками в твердой фазе, используемыми для диффузии фосфора в открытой трубе, являются нитрид фосфора P_3N_5 , одноосновный фосфат аммония — $NH_4H_2PO_4$, двуосновный фосфат аммония — $(NH_4)_2HPO_4$. Фосфаты аммония гораздо менее чувствительны к влаге, чем P_2O_5 , хотя для них требуется значительно более высокая температура источника ($450\text{—}900^\circ\text{C}$), чтобы получить удовлетворительную поверхностную концентрацию. Красный фосфор из-за непостоянства его состава и давления паров дает плохую воспроизводимость и практически не используется. Кроме того, красный фосфор взрывоопасен в кислороде.

Недостатком нитрида фосфора P_3N_5 является непостоянство его состава и связанное с этим изменение давления паров, что дает невоспроизводимые результаты. Кроме того, для него требуется обязательное введение старения до диффузии, а из-за различий в составе трудно рассчитать заранее период старения каждой партии. Хотя он позволяет получить более низкую поверхностную концентрацию, чем P_2O_5 , невоспроизводимость P_3N_5 сводит на нет это единственное преимущество.

Бор. Самым распространенным источником в твердой фазе, используемым для диффузии бора в открытой трубе, является борный ангидрид B_2O_3 . Применяют также борную кислоту H_3BO_3 , которая легко дегидратируется при высокой температуре, образуя

окись бора. Установка для диффузии из B_2O_3 в открытой трубе очень сходна с используемой для P_2O_5 , за исключением того, что поддерживается значительно более высокая температура источника B_2O_3 — порядка $900^\circ C$.

С B_2O_3 сравнительно трудно работать, так как при нагреве он вспучивается, пузырится и растекается из керамического контейнера. Эти явления ослабевают, когда диффузант медленно вводят в зону источника, но полностью не устраняются. Поэтому до помещения в зону источника B_2O_3 нагревают и, перемешивая шпателем, заставляют опуститься на дно контейнера. Это повторяют несколько раз.

Кварц, из которого чаще всего изготавливают оборудование для диффузии, нельзя использовать в системе с B_2O_3 . Когда B_2O_3 соприкасается с кварцем, происходит расстекловывание, и кварц становится негодным к употреблению. Можно использовать керамику или платину, но из керамики выделяются примеси, а платина — дорогостоящий материал.

Для устранения недостатков B_2O_3 или H_3BO_3 их смешивают с SiO_2 , используя метод совместного осаждения из тетраэтилорто-силиката — $SiO(CH_3CH_2)_4$.

При использовании B_2O_3 можно получить широкий диапазон величин поверхностных концентраций, но воспроизводимость параметров при этом невысокая.

Жидкие диффузаны. На рис. 5.17, в показана система диффузии в открытой трубе из жидкого источника. Для регулирования температуры жидкого источника и давления паров контейнер с источником термостатируют.

Фосфор. Ряд желательных характеристик имеет оксихлорид — $POCl_3$. Он не гигроскопичен, имеет малый расход, стабилен по концентрации фосфора при длительном использовании. Механизм диффузии из жидкого источника аналогичен диффузии из P_2O_5 , так как жидкие источники реагируют с избыточным кислородом, образуя P_2O_5 . На поверхностную концентрацию влияет расход $POCl_3$, температура источника, диаметр диффузионной трубы, конструкция отражателя паров и состав газа-носителя. Как правило, по воспроизводимости и возможности регулирования параметров системы с источником в жидкой фазе лучше, чем системы с источником в твердой фазе.

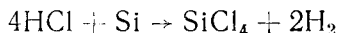
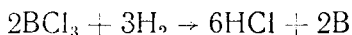
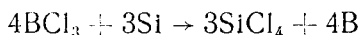
С тем же успехом используют трихлорид фосфора — PCl_3 и пентафторид фосфора — PF_5 .

Бор. Трехбромистый бор BBr_3 — наиболее распространенный источник в жидкой фазе, используемый в системах диффузии бора в открытой трубе. Процесс диффузии почти такой же, как для фосфора из жидкого источника; только азот иногда пропускают над BBr_3 , а не через него. Поверхностной концентрацией можно управлять путем изменения температуры диффузии, температуры источника и расхода потока. В газ-носитель добавляют кислород для окисления BBr_3 до B_2O_3 и для защиты поверхности от образования черных нерастворимых отложений.

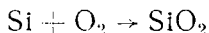
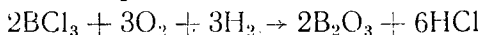
Газообразные диффузенты. Фосфор. Фосфин — PH_3 используют в системах диффузии фосфора в открытой трубе из газообразного источника. PH_3 имеет много преимуществ по сравнению с P_2O_5 , однако он токсичен. Механизм диффузии из PH_3 такой же, как и механизм диффузии из P_2O_5 , поскольку он превращается в P_2O_5 в результате окисления, когда поступает в нагретую диффузионную камеру. Разбавление PH_3 инертным газом является способом регулирования поверхностной концентрации.

Фосфин не поглощает воду. Цилиндра с разбавленным газом хватает на большое число циклов диффузии. С помощью этой системы можно получить низкую поверхностную концентрацию. Однако кварцевая диффузионная труба поглощает PH_3 из газа-носителя и после некоторого периода работы становится источником дополнительного легирования, что затрудняет регулирование и ухудшает воспроизводимость при низких поверхностных концентрациях.

Бор. При комнатных температурах треххлористый бор — BCl_3 является газом. В нейтральной или восстановительной среде при повышенной температуре он взаимодействует с кремнием, образуя летучие соединения:



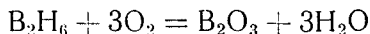
При добавлении кислорода в поток BCl_3 образуется борный ангидрид и диффузия сходна с диффузией из B_2O_3 :



Добавление кислорода позволяет регулировать поверхностную концентрацию.

При высокой концентрации BCl_3 в потоке на поверхности кремниевых пластин образуются темные пятна, которые, по-видимому, являются субокисью бора примерного состава B_6O и не удаляются никаким известным растворителем и могут быть сняты только механически. Поверхностные дефекты обуславливают невоспроизводимость параметров.

Очень удобным источником для управления диффузией является диборан — B_2H_6 . Его можно использовать в восстановительной или нейтральной среде — в потоке аргона, азота и водорода, содержащих до 0,05% диборана. При $T > 300^\circ\text{C}$ происходит пиролиз B_2H_6 с образованием элементарного бора. Лучшей воспроизводимостью обладают системы с окислительной средой, содержащие до 0,01% B_2H_6 и до 2,5% O_2 в аргоне или азоте. Диборан взаимодействует с кислородом, образуя борный ангидрид и воду:



Источники примесей для диффузии бора и фосфора в потоке газа-носителя

Внешний источник примеси	Состояние при комнатной температуре	Температура источника, °С	Концентрация примеси	Преимущества	Недостатки
Диффузия бора					
Борная кислота	Твердое	600—1200	Высокая и низкая	Легко доступна. Надежный (опробованный) источник	Источник загрязняет трубу. Управление процессом затруднительно
Трибромид бора	Жидкое	10—30	Высокая и низкая	Не загрязняет систему. Удовлетворительная регулировка в широком диапазоне концентраций примеси. Позволяет осуществлять диффузию в неокисляющей атмосфере	Сильная зависимость от геометрии системы
Метилборат	»	10—30	Высокая	Простота приготовления и простота в работе	Ограниченность высокими поверхностными концентрациями
Трихлорид бора	Газообразное	Комнатная	Высокая и низкая	Те же, что и у бромидов. Возможность точного регулирования по прибору, измеряющему расход газа. Легкость напуска в систему и простота в работе	
Диборан	»	»	Высокая и низкая	Те же, что и у хлорида бора	Высокая токсичность

Внешний источник примеси	Состояние при комнатной температуре	Температура источника, °С	Концентрация примеси	Преимущества	Недостатки
Диффузия фосфора					
Красный фосфор	Твердое	200—300	Низкая ($< 10^{20}$ см ⁻³)	Низкие поверхностные концентрации	Непостоянный состав, меняющееся давление паров
Пятиокись фосфора	»	200—300	Высокая ($> 10^2$ см ⁻³)	Надежный источник для получения высоких поверхностных концентраций	Чувствительность к присутствию паров воды. Необходимость частой очистки диффузионной трубы
Фосфат аммония	»	450—1200	Высокая и низкая	Не подвержен влиянию паров воды	Необходимость очень тщательной очистки
Хлорид фосфора	Жидкое	2—40	Высокая и низкая	Не загрязняет систему. Удовлетворительная регулировка в широком диапазоне концентраций примеси	Сильная зависимость от геометрии системы
Трибромид фосфора	»	170	Высокая и низкая	Те же, что и у хлоридов фосфора. Может быть использован для диффузии в неокисляющей атмосфере	
Фосфин	Газообразное	Комнатная	Высокая и низкая	Те же, что и у трибромидов фосфора. Возможность точного регулирования по прибору, измеряющему расход газа. Легкость напуска в систему и простота в работе	Высокая токсичность

Присутствие воды значительно увеличивает скорость испарения B_2O_3 , что обуславливает хорошее распределение диффузанта вдоль рабочей зоны вследствие образования летучих борных кислот, особенно метаборной кислоты — HBO_2 .

Недостатком B_2H_6 являются токсичность, легкая воспламеняемость на воздухе при концентрации более 0,8%, взрыв при соприкосновении с хлором.

В табл. 5.3 приведены источники примесей, употребляемые для диффузии бора и фосфора в кремний.

§ 5.7. Аномалии распределения примесей и дефекты в диффузионных слоях

Реально получаемые диффузионные слои могут иметь электрофизические свойства, значительно отличающиеся от ожидаемых. Это несоответствие обусловлено с одной стороны упрощенным теоретическим анализом распределения примесей, а с другой стороны возникновением дефектов в диффузионных слоях в процессе диффузии.

Аномальное распределение примеси. Исследование диффузии серебра в германии показало, что кроме «обычной» быстро диффундирующей компоненты серебро имеет медленно диффундирующую составляющую, для которой характерна большая (около 10^{18} см^{-3}) растворимость.

Тщательное изучение медленно диффундирующих в германии индия и цинка позволило обнаружить у них «быстрые» компоненты. При 800°C их коэффициенты диффузии имеют порядок $10^{-8} \text{ см}^2/\text{сек}$ и растворимость в пределах 10^{14} — 10^{15} см^{-3} . Аналогичные данные получены для теллура. Это позволяет сделать вывод, что в германии для любых примесей могут одновременно действовать два механизма диффузии: по вакансиям — медленная и по междоузлиям — быстрая. Результирующее распределение примеси при этом имеет вид, показанный на рис. 5.19.

При осуществлении двухстадийной диффузии в кремний было найдено, что полученные кривые распределения примесей обладают большей кривизной, чем интеграл вероятности или кривая Гаусса. Существование таких аномальных распределений указывает на то, что полученные из опытных данных значения коэффициентов диффузии не являются истинными. Более точно их следует

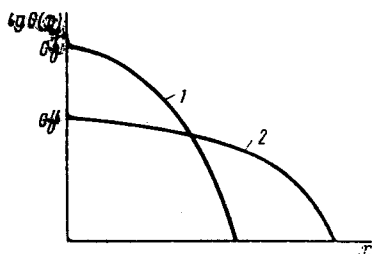


Рис. 5.19. Распределение примеси при наличии медленного (C'_0, D_1) и быстрого (C''_0, D_2) диффузионных потоков:

$$1 - C_1 = C'_0 \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{D_1 t}}; \quad 2 - C_2 = C''_0 \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{D_2 t}}$$

называть эффективными, ибо они в значительной степени зависят от условий проведения процесса.

На рис. 5.20, 5.21 представлены экспериментальные данные значений эффективных коэффициентов диффузии бора и фосфора в кремний в зависимости от температуры, уровня легирования образца и поверхностной концентрации. Возрастание этих трех факторов стимулирует увеличе-

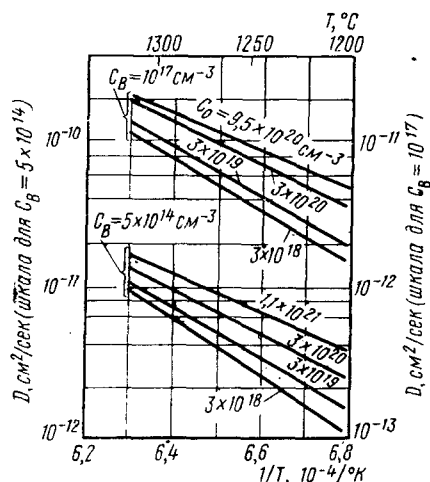


Рис. 5.20. Зависимость коэффициента диффузии фосфора в кремнии от температуры

ние эффективного коэффициента диффузии. Если концентрация примеси превосходит собственную концентрацию носителей заряда при температуре диффузии, сказывается диффузия под действием внутреннего электрического поля. В кремнии она начинает сказываться при $C_B > 10^{19} \text{ см}^{-3}$; при этом коэффициенты диффузии приблизительно удваиваются. Более значительное изменение скорости диффузии может быть связано с изменением микроскопической подвижности, когда существенную роль начинает играть миграция атомов по междоузлиям.

На рис. 5.22 показана кривая экспериментально определенного распределения концентрации фосфора в кремнии. Для сравнения дана кривая распределения, построенная на основании измеренной

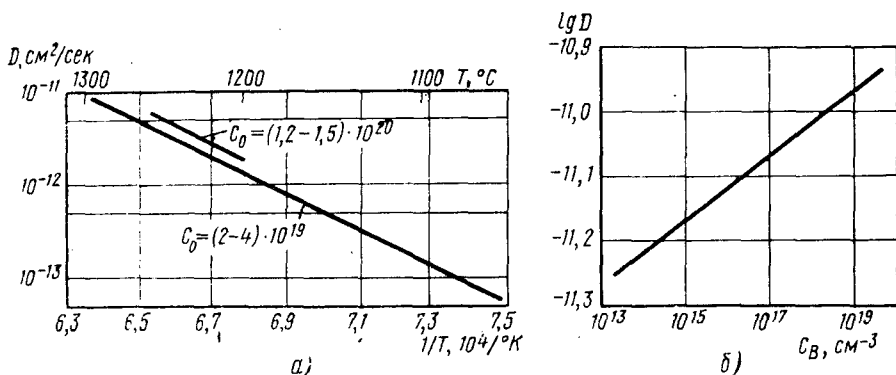


Рис. 5.21. Зависимость коэффициента диффузии бора от температуры при $C_B = 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ (а) и от концентрации при 1250°C и $C_0 = 2 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$ (б)

глубины p - n -перехода и табличного значения коэффициента диффузии. Хотя суммарное количество атомов под обеими кривыми совпадает, поверхностная концентрация для расчетного распре-

ления значительно больше истинного значения. Кроме того, аномалии этого рода могут быть связаны с тем, что при больших концентрациях примеси не вся она является электрически активной, т. е. не все примесные центры ионизованы при комнатной температуре. Это подтверждает рис. 5.23, где приведены кривые распре-

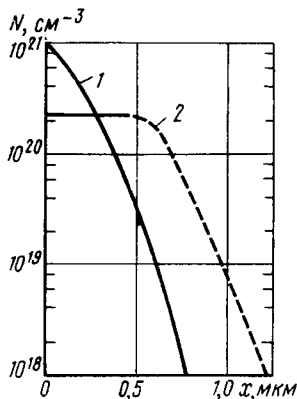


Рис. 5.22. Расчетная (1) и экспериментальная (2) кривые распределения концентрации фосфора при $T=1000^{\circ}\text{C}$, $t=30$ мин, $C_0=9 \cdot 10^{20}$ см $^{-3}$

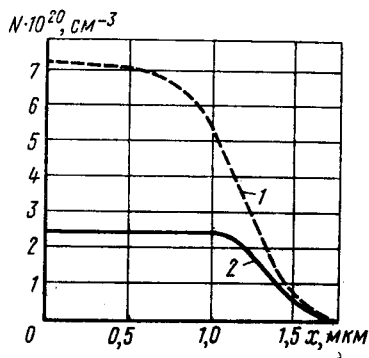


Рис. 5.23. Кривые распределения полной (1) и электрически активной (2) концентраций атомов фосфора

ления полной и электрически активной концентраций атомов фосфора в кремнии, полученные экспериментально.

При проведении диффузии из тонкого слоя с фиксированным количеством примеси при высокой температуре или в течение длительного времени вследствие испарения части примесных атомов из поверхностных слоев происходит обеднение их, и кривая распределения имеет вид, показанный на рис. 5.24. Решение уравнения Фика для испаряющейся примеси дает распределение, хорошо согласующееся с экспериментальной кривой.

Неоднородность диффузионного слоя.

При проведении диффузии в кремний в потоке сухого азота на поверхности его возникают эрозийные ямки, которые могут пересекать неглубокие диффузионные слои и шунтировать p - n -переход. Ямки не образуются, если увлажнить азот или смешать его с кислородом для окисления кремния.

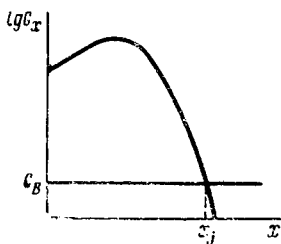


Рис. 5.24. Распределение фосфора при истощении диффузанта

В диффузионных слоях с низкой поверхностной концентрацией иногда обнаруживаются участки большой проводимости. Такие области являются результатом скопления частиц диффузанта на поверхности. Если скопления невелики, то образуются сильнолегированные «трубки». При значительном скоплении диффузанта между ним и полупроводником может происходить металлургическое взаимодействие с образованием жидких фаз, приводящее к проплавлению диффузионного слоя.

Длительное воздействие высокой температуры вызывает изменение природы поверхности. Некоторые кристаллографические плоскости растут и развиваются за счет других плоскостей. В результате возникают термические ямки травления.

Продолжительный нагрев пластин кремния при $T \geq 1300^\circ \text{C}$ вызывает образование на поверхности пластины бугорков высотой в несколько десятков микрон. Это обусловлено диффузией из объема пластины к поверхности растворенного там углерода или насыщением углеродом поверхностного слоя из объема камеры. Аналогичный эффект встречается при нагреве карбида кремния.

Глубина диффузии на различных участках может отличаться (рис. 5.25). Од-

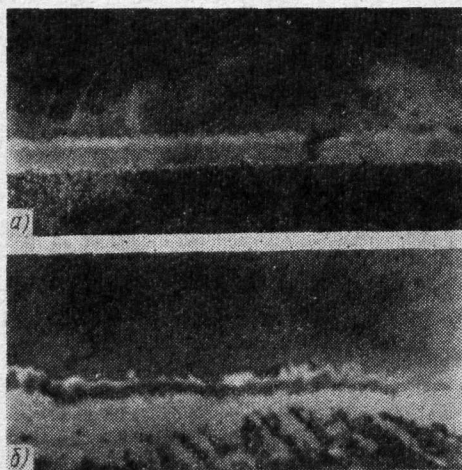


Рис. 5.25. Неоднородность диффузионного слоя:

a — одинарная диффузия бора; *б* — двойная диффузия бора и фосфора

ной из причин неравномерной диффузии являются царапины, нанесенные в процессе шлифовки. Неравномерность диффузии обуславливается наличием нарушения кристаллической решетки под царапиной. Энергия активации диффузии в этом месте уменьшается и коэффициент диффузии возрастает. Другой причиной неравномерной диффузии является присутствие скоплений или стенок дислокаций.

Образование дислокаций. Помимо дислокаций, имеющих в исходном материале, в процессе диффузии также возникают дислокации.

Механизм образования дислокаций состоит в следующем. Примесные атомы, внедряясь в кристаллическую решетку полупроводника и имея другие атомные радиусы, генерируют в ней механические напряжения. Максимальное напряжение имеет место в начале процесса диффузии и у бора равно $6 \cdot 10^2 \text{ н/м}^2$. Это напряжение, обусловленное сжатием решетки диффузантом, достаточно

для создания пластической деформации и образования дислокаций.

Максимальная плотность примесных атомов на поверхности образцов, которая не вызывает напряжений, равных критической величине возникновения дислокаций, равна $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$.

Если диффузия бора проводится при температурах $\leq 1000^\circ \text{C}$, то в поверхностный слой могут внедриться $3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$, если же температура диффузии $\geq 1100^\circ \text{C}$, то это количество возрастает до $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$.

Плотность дислокаций, образующихся во время диффузии фосфора в кремний, меньше, так как меньше величина создаваемых фосфором напряжений — в силу большего соответствия их атомных радиусов.

Вследствие того, что концентрация примеси изменяется по глубине диффузионного слоя, изменяется и плотность дислокаций. Обычно область дислокаций не достигает p - n -перехода, как это видно на рис. 5.26.

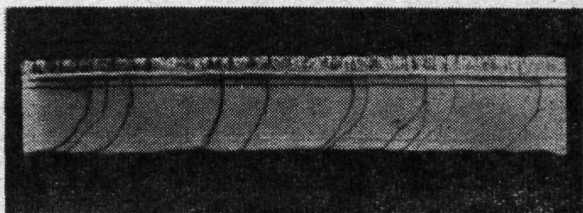


Рис. 5.26. Ямки травления в верхней части диффузионного слоя, обусловленные присутствием дислокаций

Диффузенты, у которых различие в ионных радиусах меньше, чем у бора и кремния или у фосфора и кремния, будут образовывать более совершенные p - n -переходы. К таким диффузантам относятся As, Ga, Al. Сильно легированный бездислокационный слой можно получить, если проводить одновременно диффузию двух примесей, имеющих противоположный разброс в ионных радиусах.

Осаждение примесей. Такие металлы, как Cu, Au и Fe, характеризуются резкой температурной зависимостью их растворимости в твердом кремнии. Обычно, если не соблюдать специальных мер предосторожности, из окружающей атмосферы и температурной камеры они внедряются в объем кремния. Так как при большинстве практически важных температур процесса эти элементы обладают коэффициентами диффузии порядка 10^{-7} — $10^{-6} \text{ см}^2/\text{сек}$, то за время выдержки они пронизывают весь объем полупроводника. При охлаждении, в результате пересыщения кремния твердыми растворами золота, меди и железа, избыток примесей выпадает в объеме полупроводника в виде микроскопических. Преимущественное выпадение их идет на дефектах структуры и в первую очередь — на дислокациях. Так как дислокации пронизывают весь кристалл насквозь, то поперек p - n -перехода могут образоваться

проводящие металлические микромостики. Это приводит к возрастанию обратного тока и появлению так называемых «мягких» вольт-амперных характеристик. Обратный ток возрастает в этом случае с ростом обратного напряжения по закону $I \sim U^n$, где $3 < n < 7$. Чаще всего $n \approx 5$.

Осаждение быстро диффундирующих примесей Au , Cu , Fe и др. при охлаждении обусловлено их большой подвижностью при сравнительно низких температурах, позволяющей атомам этих элементов перемещаться в области с большой концентрацией дефектов и образовывать в них скопления. Такое осаждение определяется в основном скоростью охлаждения и очень слабо зависит от температуры и времени обработки.

Помимо этого, в объеме полупроводника при определенных условиях могут образовываться осаждения медленно диффундирующих элементов, обладающих к тому же достаточной растворимостью. В частности, это относится к алюминию в кремнии. Осаждение также происходит в основном на дислокациях и иных дефектах структуры. Обычно слитки кремния содержат кислород с концентрацией до 10^{18} см^{-3} . Как известно, сила связи комплекса $\text{Al}-\text{O}$ превышает силу связи $\text{Si}-\text{O}$, что и обуславливает возникновение скопления алюминия. Этот процесс определяется в основном температурой и почти не зависит от скорости охлаждения. Найдено, что при $T \geq 1350^\circ \text{C}$ осаждения не образуются, так как связи $\text{Al}-\text{O}$ разорваны, при $1200-1300^\circ \text{C}$ атомы алюминия заполняют дислокации, а при $1100-1200^\circ \text{C}$ образуют дополнительные скопления вокруг дислокаций. Ниже 1000°C эффект осаждения значительно ослабляется и при 700°C почти не обнаруживается.

Осаждение алюминия может приводить к возникновению донорных уровней. Если концентрация кислорода достигает 10^{18} см^{-3} , то при легировании кремния атомами алюминия до $4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ нагрев в диапазоне $450-900^\circ \text{C}$ вызывает конверсию типа электропроводности. Если концентрация Al менее 10^{17} см^{-3} , то максимальное образование доноров соответствует примерно одному на каждый атом алюминия при температуре $450-500^\circ \text{C}$ и менее одного донора при более высокой температуре. Нагрев до $700-900^\circ \text{C}$ приводит к образованию полупроводникового материала, имеющего проводимость, почти равную собственной. Нагрев выше 1000°C вызывает восстановление акцепторных свойств, однако часть акцепторов необратимо исчезает, образуя нейтральные соединения алюминия с кислородом. Термообработка при 1325°C в течение 10 мин вызывает полное восстановление акцепторных свойств.

Аналогичные эффекты образования доноров, но в меньшей степени наблюдаются при легировании кремния галлием и бором. Образующиеся доноры нестабильны и полностью исчезают во время высокотемпературной обработки. Концентрация доноров, созданных в образцах, легированных B и Ga , невелика. В то же время для образцов, легированных алюминием, она достигает $2/3$ от концентрации основной примеси.

Геттерирование. Восстановление удельного сопротивления и времени жизни неравновесных носителей заряда термообработанного полупроводника может быть достигнуто при использовании геттерирования.

Найдено, что покрытие германия перед термообработкой тонкими пленками Au, Ag, Sb, In, Pb, Sn защищает кристалл от проникновения меди и, таким образом, устраняет возможные последствия термообработки.

Более того, если уже термообработанный без защиты кристалл германия покрыть пленкой из этих металлов и нагреть до образования жидкой фазы, то можно восстановить время жизни неравновесных носителей заряда и проводимость почти до значений, предшествовавших термообработке.

Этот эффект извлечения нежелательных примесей из объема полупроводника с помощью жидкой фазы, созданной на его поверхности или в объеме, называют геттерированием. Извлечение становится возможным потому, что коэффициент распределения меди в тройных системах, образованных германием, медью и указанными металлами, значительно меньше единицы. Благодаря этому создается значительный градиент концентрации атомов меди, вследствие чего жидкая фаза будет активно извлекать медь из объема германия.

Кроме способа геттерирования с помощью жидких фаз металлов, экстракция меди из германия может быть осуществлена нагревом германия в контакте с расплавами солей KCN и NaCN. Медь экстрагируется и тогда, когда поверхность германия покрыта слоем железа или родия.

При изучении влияния обработки поверхности образцов на термообработку германия было замечено, что термоакцепторы не образуются внутри тех кристаллов, поверхность которых была грубо отшлифована. Это объясняется осаждением атомов меди во время охлаждения на поверхностных дефектах, образованных в процессе шлифовки. Для удаления термоакцепторов этим способом германий шлифуется и отжигается при 650°C в атмосфере очищенного аргона, после чего медь удаляется с поверхности образцов растворением в азотной кислоте. Повторив эти операции несколько раз, можно получить полное восстановление ρ и τ .

В качестве геттеров для удаления золота из кремния могут быть применены с равным успехом Ni и Cu, наносимые на поверхность пластин в виде тонких пленок. Процесс обработки ведется при температурах эвтектик или немного более высоких.

Такие металлы, как Cu, Fe и Au, могут быть удалены из кремния с помощью стеклообразных окисных слоев, образующихся на поверхности кремния при осаждении паров борного или фосфорного ангидридов.

В результате взаимодействия кремния или всегда присутствующей на нем пленки двуоксида кремния с ангидридом возникают жидкие стеклообразные расплавы. Осажденные металлы Au, Cu, Fe

диффундируют к поверхности, где они образуют со слоем стекла химические соединения типа фосфатов или боратов. Температура обработки должна быть около 1050°C .

§ 5.8. Контроль основных параметров диффузионных структур

В диффузионных структурах обычно контролируют глубину залегания p - n -перехода, поверхностную концентрацию, характер распределения диффундирующей примеси и значение градиента концентрации примеси в области p - n -перехода.

Выявление диффузионных p - n -переходов. Вследствие того что диффузионные слои могут быть очень тонкими — порядка единиц микрон и менее, для их контроля изготавливают косые шлифы (рис. 5.27). Пластины или кристалл полупроводника, содержащие p - n -переход, сошлифовывают под небольшим углом (1 — 5°), и наблюдаемый диффузионный слой может заметно расширяться. Шлиф, выполненный под углом в 1° , увеличивает поперечный размер приблизительно в 60 раз. Для выявления границы диффузионного слоя применяют метод селективного окрашивания p -области в растворе, состоящем из 0,05—0,1% азотной (70%-ной) кислоты в плавиковой (48%-ной) кислоте. Возникающее при этом потемнение обусловлено образованием монооксида

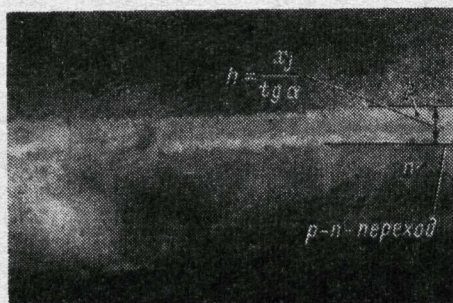


Рис. 5.27. Косой шлиф p - n -перехода, выявленного осаждением меди

кремния вследствие окисления p -области. Для определения глубины залегания p - n -перехода

$$x_j = h \operatorname{tg} \alpha$$

необходимо точное измерение угла α .

Чтобы увеличить точность, применяют сферический шлиф. Металлический шар $\varnothing 30$ — 150 мм вращается по поверхности пластины. В место соприкосновения подается абразивная суспензия. Образовавшаяся лунка сферической кривизны должна быть глубже p - n -перехода, тогда после окрашивания (если диффузионный слой p -типа) в лунке образуется темное кольцо (рис. 5.28).

Глубина p - n -перехода

$$x_j = \frac{d_1^2 - d_2^2}{4D},$$

где d_1 — диаметр лунки;
 d_2 — диаметр нижней границы p - n -перехода;
 D — диаметр шара.

Измерение поверхностной концентрации и распределения диффундирующей примеси. Диффузионный слой можно аппроксимировать последовательностью элементарных слоев с различной, но постоянной в их пределах, концентрацией примеси (рис. 5.29). (Следует отметить, что реально расстояния между зондами намного больше толщины диффузионного слоя.) Проводимость вдоль диффузионного слоя является суммой проводимостей элементарных слоев. Измерив четырехзондовым методом поверхностную проводимость σ_{s0} , удалив элементарный слой толщиной Δ и вновь измерив поверхностную проводимость — σ_s , среднюю концентрацию свободных носителей заряда в удаленном слое можно рассчитать по выражению

$$C_i = \frac{\sigma_{s0} - \sigma_s}{e\mu\Delta}; \quad \sigma_{s0} - \sigma_s = \frac{I}{4,5} \left(\frac{1}{U_0} - \frac{1}{U} \right), \quad (5.43)$$

где I — ток через образец;

U_0, U — значения напряжения на потенциальных зондах;

μ — средняя подвижность носителей заряда.

Подвижность μ является функцией концентрации примеси, поэтому (5.43) лучше решать не относительно C_i , а относительно

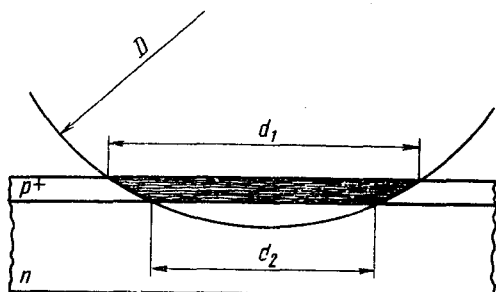


Рис. 5.28. Изготовление сферического шлифа на p^+-n -перехода

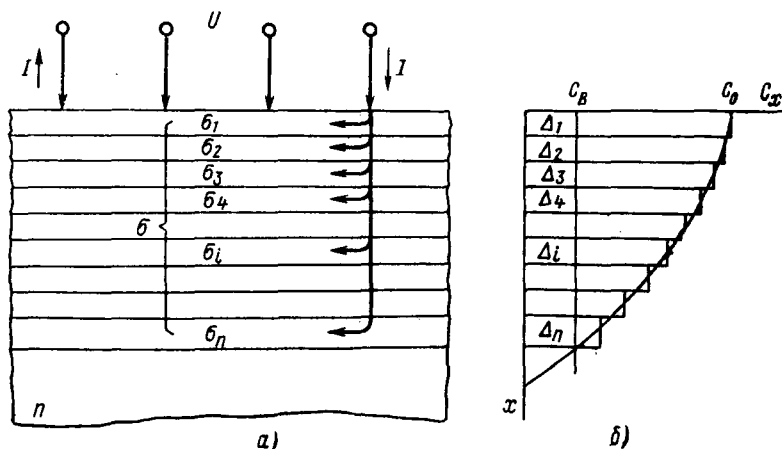


Рис. 5.29. Модель диффузионного слоя:

a — слоевая проводимость; b — распределение концентрации примеси

произведения μC_i и значение C_i вычислять по кривой $C_i = f(\mu C_i)$, легко рассчитываемой для кремния и германия.

Если пластину нельзя разрушать, то для определения C_0 используют другие способы. Пренебрегая компенсирующим действием исходной примеси, находящейся в полупроводнике, можно вычислить среднюю проводимость вдоль диффузионного слоя

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{x_j} \int_0^{x_j} e \mu C_x dx.$$

Так как в основном проводимость диффузионного слоя (80—90%) зависит от поверхностного слоя, то для упрощения вычислений можно принять $\mu = \text{const}$. В этом случае также удобно вести расчет относительно произведения μC .

Если $C_x = C_0 \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}}$ и $\frac{x_j}{2\sqrt{Dt}} \geq 2$, что часто практически имеет место, то

$$\mu C_0 = \frac{1}{e \rho_s} \sqrt{\frac{\pi}{Dt}},$$

где $\rho_s = 4,5 \frac{U}{I}$ — поверхностное сопротивление слоя.

Если

$$C_x = C_0 \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right),$$

то

$$\mu C_0 = \frac{1}{e \rho_s \sqrt{\pi Dt}}.$$

Таким образом, этот способ требует знания режима диффузии (D , t) и измерения поверхностного сопротивления ρ_s .

На основе предыдущего метода были выполнены точные расчеты зависимости C_0 от средней проводимости диффузионного слоя с учетом зависимости подвижности от концентрации и влияния примеси в исходном полупроводнике. В приложении приведены кривые, рассчитанные на ЭВМ, для определения поверхностной концентрации диффузионных слоев на германии и кремнии.

Определение градиента концентрации примеси в p-n-переходе. Если известен закон распределения примеси, то можно вычислить наклон кривой распределения в любой плоскости диффузионного слоя по известным выражениям:

$$a = -\frac{C_0}{2Dt} x \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right);$$

$$a = -\frac{C_0}{\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right).$$

Если закон распределения не известен, то градиент концентрации примеси определяют путем измерения емкости диффузионного p - n -перехода. При достаточно малых обратных смещениях, когда ширина p - n -перехода невелика, распределение примеси в нем с удовлетворительной точностью можно считать линейным. Емкость плавного перехода на единицу площади

$$C_g = \frac{1}{\sqrt{\frac{3U}{\pi e \epsilon \epsilon_0 a_j}}}.$$

Отсюда градиент концентрации

$$a_j = k C_g^3 U,$$

где

$$k = \frac{24}{\pi e \epsilon^2 \epsilon_0^2}.$$

Измерив емкость при данном напряжении, можно оценить градиент концентрации примеси.

МЕТОД ЭПИТАКСИИ

§ 6.1. Основные сведения об эпитаксии

При создании большинства типов полупроводниковых приборов к полупроводниковому материалу предъявляются противоречивые требования. Например, в импульсных диодах для получения более высокого пробивного напряжения необходимо применять материал с большим удельным сопротивлением, а выполнение этого требования приводит к увеличению импульсного сопротивления. В диффузионных транзисторах базовую и эмиттерную области располагают у поверхности кристалла полупроводника. Коллекторная область с высоким удельным сопротивлением обеспечивает высокие рабочие напряжения, но ограничивает максимальную выходную мощность вследствие значительного последовательного сопротивления. Так как объем коллектора велик, то велик и накопленный заряд, и транзистор имеет ограниченное быстродействие.

Эти противоречия в значительной степени разрешила эпитаксиальная технология, позволяющая выращивать на сильно легированной полупроводниковой подложке тонкие пленки полупроводника с небольшим содержанием легирующей примеси, служащие базой диодов или коллекторной областью транзисторов, а также различные другие структуры.

Термин «эпитаксия» (от греческих «эпи» — на-, поверх-, и «таксис» — расположенный в порядке) предложен для описания процесса ориентированного нарастания кристаллов.

Эпитаксиальный слой — это тонкий слой материала, осажденный на монокристаллическую подложку, сохраняющий морфологию этой подложки.

В зависимости от характера переноса атомов от источника осаждаемого вещества к подложке, на которой происходит их кристаллизация, процессы эпитаксии делятся на прямые и непрямые.

В *прямых процессах* атомы полупроводника непосредственно переносятся от исходного кристалла (источника) к подложке без промежуточных взаимодействий; к ним относятся процессы испарения, сублимации, распыления в разряде. Миграция осевших атомов по поверхности приводит к возникновению устойчивых зародышей кристаллизации. Вследствие тепловых колебаний некоторые атомы могут оторваться от зародышей. Вероятность отрыва тем

больше, чем меньше насыщенных связей у осевших атомов. Энергия их связи с растущими гранями кристалла пропорциональна числу смежных сторон. Поэтому образования, перпендикулярные поверхности, не имея боковых связей, быстро распадаются. Скорость образования двухмерных зародышей

$$v \sim N \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right),$$

где N — концентрация атомов полупроводника в паровой фазе;
 T — температура осаждения пленки;
 ΔE — свободная энергия образования зародышей.

При больших значениях v возникает много двумерных образований, что способствует совершенству структуры эпитаксиального слоя. Большие значения v в свою очередь возникают либо при большой плотности потока, либо при высокой температуре осаждения. При низких температурах осаждения двумерные зародыши быстро вырастают до больших размеров и на подложке образуются ступеньки роста. Рост эпитаксиального слоя происходит вдоль поверхности; растущий слой повторяет кристаллографическую структуру подложки. Если подложка и растущая пленка состоят из одного вещества, то процесс называют автоэпитаксиальным, если из различных — гетероэпитаксиальным.

В *непрямых процессах* атомы полупроводника переносятся в составе соединений, которые диссоциируют на подложке. Выращивание состоит из трех основных этапов: 1) перенос паров к поверхности подложки, 2) кристаллизация и рост новых слоев на поверхности подложки, 3) рассеяние скрытой теплоты кристаллизации и теплоты реакции.

Среди гипотез эпитаксиального роста из газовой фазы следует отметить две. Согласно первой полупроводник образуется на подложке в результате реакции, катализируемой поверхностью подложки. Согласно второй разложение соединений полупроводника происходит на некотором удалении от подложки. Атомы полупроводника достигают ее путем диффузии.

В последние годы получила распространение эпитаксия из расплавов и растворов — жидкофазная эпитаксия, особенно для выращивания пленок полупроводниковых соединений. Процессы эти имеют много общего с рассмотренным ранее процессом рекристаллизации из расплава при сплавлении полупроводника с металлом.

Перспективным методом является также процесс пар — жидкость — твердое тело. На поверхность полупроводника наносится тонкий слой металла, образующего жидкую эвтектическую фазу при низкой температуре. Атомы полупроводника осаждаются из газовой фазы и диффундируют через слой жидкости к границе раздела, где происходит их кристаллизация. Так как толщина слоя расплава не превышает микрона, то скорость роста пленки не зависит от времени диффузии.

§ 6.2. Эпитаксия кремния

В производстве интегральных схем и полупроводниковых приборов наибольший объем эпитаксиальных процессов приходится на эпитаксию кремния.

Восстановление тетрахлорида кремния — это наиболее распространенный способ вследствие простоты и доступности исходных материалов. Установки для эпитаксиального выращивания имеют вертикальный или горизонтальный реактор (рис. 6.1). Тетрахлорид кремния 1 охлаждается смесью сухого льда со спиртом. Для осушки и очистки водорода предусмотрены две ловушки — с палладиро-

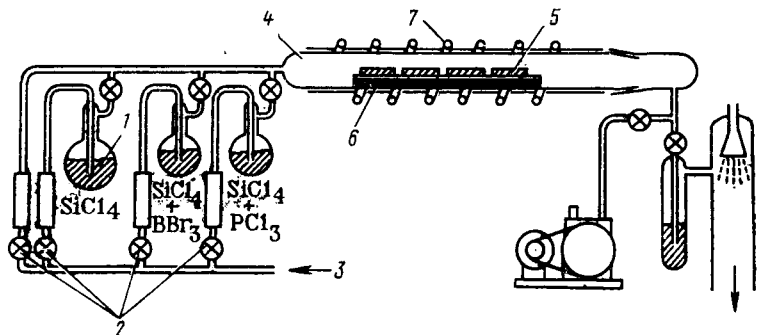
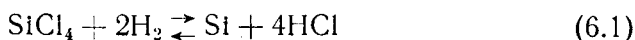


Рис. 6.1. Схема установки для эпитаксиального выращивания пленок кремния

ванным алюмогелем и с молекулярными ситами. Краны 2 на сосудах с SiCl_4 позволяют пропускать водород 3 непосредственно в реактор 4 или через сосуд с SiCl_4 . Пластины кремния 5 помещают на графитовые или стеклографитовые подложки 6, нагреваемые с помощью индуктора 7 токами высокой частоты. Перед осаждением пластины кремния обрабатывают в токе хлористого водорода при 1200°C для удаления остаточной поверхностной пленки SiO_2 . Затем в реактор подается водород, насыщенный парами тетрахлорида, и на пластине происходит восстановление SiCl_4 до атомарного кремния:



На рис. 6.2 изображены кривые температурной зависимости скорости роста пленки кремния v для вертикального (1) и горизонтального (2) реакторов. Энергия активации этой реакции составляет около 105 кДж . Увеличение содержания SiCl_4 до 5% приводит к увеличению скорости роста пленки v (рис. 6.3), затем скорость уменьшается вследствие неполного восстановления SiCl_4 . При невысоких температурах и больших содержаниях SiCl_4 образуют-

ся рыхлые аморфные пленки. Увеличение температуры подложки и уменьшение мольной доли SiCl_4 обуславливает уплотнение пленок.

Вращивание производится при температурах подложки 1200—1280° С, молярном содержании SiCl_4 1—3% и протоке водорода

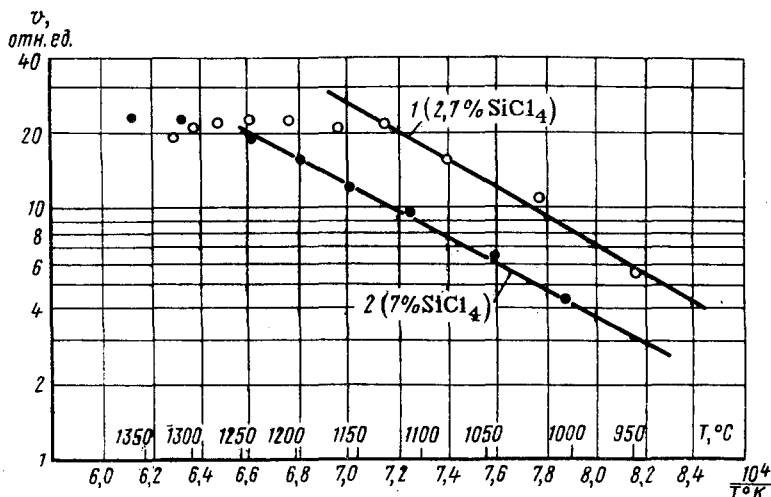
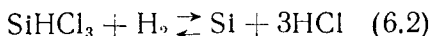


Рис. 6.2. Температурная зависимость скорости роста пленки кремния

$(2-3) \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{сек.}$ Оптимальная скорость роста 16—20 нм/сек. Из-за неплотного прилегания подложки к кассете на обратной стороне может происходить частичное осаждение пленки или травление пластины.

Вместо SiCl_4 можно использовать трихлорсилан SiHCl_3 , восстановление которого происходит в соответствии с реакцией



Энергия активации этого процесса составляет 92 кДж.

При избытке хлористого водорода реакции (6.1) и (6.2) идут справа налево, что обуславливает удаление поверхностного слоя кремния и присутствующих на нем пленок, в частности SiO_2 , о чем уже упоминалось.

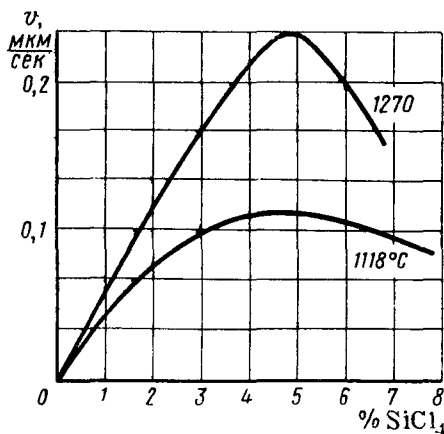
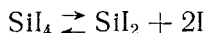


Рис. 6.3. Зависимость скорости роста пленки кремния от молярного содержания SiCl_4

Реакция диспропорционирования. Осаждение кремния можно производить путем пиролиза тетраидида кремния — SiI_4 , но для этого нужны низкие давления и небольшая скорость роста. Для увеличения скорости роста пленки можно использовать реакцию частичного восстановления SiI_4 при нормальном давлении:

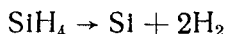


Образующийся диодид нестабилен и существует только в равновесии с SiI_4 и йодом:



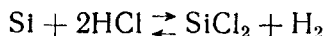
Замкнутая труба содержит пары йода с концентрацией около 1 кг/м^3 , наполнена водородом до давления 300 мм рт. ст. и имеет продольный температурный градиент. Источник и подложка, выполненные из кремния, размещены в ее противоположных концах. В области источника при температуре 1100°C реакция (6.3) идет справа налево — происходит травление источника. Образующиеся пары SiI_2 под действием градиента концентрации переносятся в зону подложки, где поддерживается температура 950°C . При этой температуре реакция (6.3) идет слева направо, в результате чего кремний осаждается на подложку, а пары диффундируют обратно в зону источника. Скорость роста составляет 3—4 нм/сек. Монокристаллическая пленка может быть получена при $T \leq 800^\circ \text{C}$, что значительно ниже температуры других процессов.

Пиролиз силана. При высоких температурах во время осаждения происходит заметная диффузия примесей из сильно легированной пластины в пленку (автолегирование), что изменяет концентрацию примеси в пленке. Для уменьшения диффузии стремятся выбирать легирующую примесь в подложке с минимальным коэффициентом диффузии, например сурьму или мышьяк. Силановый метод позволяет снизить температуру подложки. Уравнение реакции термораспада силана



Температуру подложки можно уменьшить до 1000°C , что практически предотвращает диффузию и способствует росту пленок с равномерным распределением легирующей примеси.

Метод близкого переноса («сэндвич»-метод) основан на использовании обратимых химических реакций переноса. Расстояние между источником и пластиной (подложкой) составляет доли миллиметра. Условия химического переноса в зазоре почти не зависят от состояния других частей системы, так как транспортирующий агент не расходуется при переносе, а используется многократно. В качестве газообразных реагентов для получения кремния обычно применяют безводный хлористый водород и пары SiCl_4 или SiHCl_3 . В поле температурного градиента при температуре источника на $10\text{—}50^\circ \text{C}$ больше температуры подложки протекает обратимая реакция:



Под действием градиента концентрации образовавшиеся пары летучего SiCl_2 переносятся к подложке, где идет обратная реакция. Возникший у подложки хлористый водород диффундирует к источнику, где вновь идет прямая реакция. Наиболее существенным преимуществом «сэндвич»-метода является незначительный обмен между реакционным промежуток и окружающей средой, что уменьшает содержание неконтролируемых примесей и дает возможность получить пленки кремния с высоким удельным сопротивлением. Данный метод применим также для эпитаксии на германии, арсениде и фосфиде галлия.

Селективная эпитаксия. При изготовлении интегральных схем часто оказывается необходимым обеспечить локальный рост эпитаксиальных слоев. Это достигается путем маскировки части полупроводника таким материалом, на котором вследствие отсутствия гидрообразования не происходит осаждения пленки, либо материалом, который впоследствии удаляется совместно с осевшей на него пленкой. Обычно селективную эпитаксию осуществляют с помощью окон в слое SiO_2 , однако поверхность оксида, чтобы на нее не осаждался кремний, должна быть достаточно совершенной. Иногда применяют металлические маски, но они не обеспечивают достаточно четких границ.

Гетероэпитаксия кремния на сапфире. Пленки кремния на изолирующих подложках применяют при изготовлении интегральных схем. Успешное выращивание их в значительной степени зависит от кристаллографических соотношений на границе раздела и от состояния поверхности подложки. Кремний обладает кубической алмазной решеткой с постоянной $a=5,42 \text{ \AA}$. Структура сапфира более сложна, он принадлежит к ромбоэдрическому классу, но ему можно приписать гексагональные символы. Параметры решетки сапфира: $a_0=4,75 \text{ \AA}$, $c_0=12,95 \text{ \AA}$. Химические особенности системы $\text{Si}-\text{Al}_2\text{O}_3$ изучены недостаточно, чтобы можно было указать характер установления граничных связей, однако более вероятно, что рост пленки начинается с замещения кремнием атомов алюминия. Плоскость (111) кремния растет на плоскости (0001) и плоскости (10 $\bar{1}0$) сапфира.

Поверхность подложки подвергают шлифовке, полировке и ультразвуковой очистке. В реакторе сапфировую пластину помещают на алундовый держатель, расположенный на кремниевом держателе, нагреваемом токами высокой частоты. При температуре 1400—1500°С происходит газовая полировка сапфира хлористым водородом, в результате которой удаляются поверхностные несовершенства. Затем подложки очищают путем прогрева при 1200—1300°С в водороде. Выращивание пленки осуществляют хлоридным или силановым методом при температуре подложек 1100—1200°С.

Пленки, выращенные из SiCl_4 , обычно имеют электропроводность p -типа и высокое удельное сопротивление. При использовании силана воспроизводимость результатов хуже, но плотность дислокаций меньше. Образование дислокаций связано с различием

коэффициентов расширения сапфира и кремния, их плотность обычно около 10^8 см^{-2} . Подвижность носителей заряда в пленке вследствие структурных несовершенств на 20—30% меньше, чем в слитках кремния.

Эпитаксия в вакууме. Основными преимуществами эпитаксии в вакууме являются: высокая чистота при использовании вакуума около 10^{-9} — 10^{-10} мм рт. ст., возможность применения масок и создания тонких пленок (менее 1 мкм), что невоспроизводимо при газотранспортных реакциях. При конденсации кремния из молекулярного потока на холодной подложке образуются поликристаллические или аморфные пленки, обладающие высоким сопротивлением и применяемые поэтому при изготовлении резисторов. При температуре подложки свыше 1000°C получают монокристаллические пленки, качество и сопротивление которых в значительной степени зависят от подготовки подложки и остаточного давления.

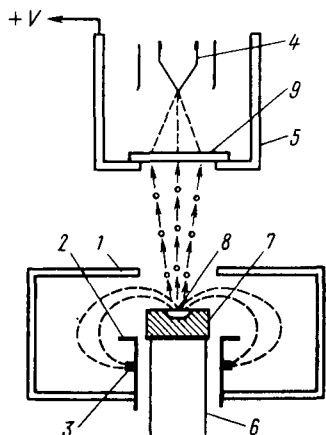


Рис. 6.4. Схема установки для вакуумной эпитаксии:

- 1 — электростатический экран; 2 — экран; 3 — нить нагрева источника; 4 — нагреватель подложки; 5 — держатель подложки; 6 — водоохлаждаемая подставка; 7 — кремниевый кристалл; 8 — зона распыла; 9 — подложка

Для обеспечения чистоты испарение кремния проводят из кремниевого кристалла с помощью электронного луча (рис. 6.4) либо из расплавленной капли в высокочастотном поле. Менее производительным является метод сублимации, при котором испарение кремния на подложку производят путем прямого разогрева электрическим током прямоугольной пластины кремния, отстоящей от подложки на несколько сотен микрон. Получаемые пленки имеют большие удельные сопротивления. На рис. 6.5 приведена зависимость скорости испарения кремния от температуры. Хорошие результаты получены методом рекристаллизации. Пленки кремния наносят на холодную подложку, по которой затем сканирует узкий электронный луч, приводящий к рекристаллизации пленки с образованием монокристалла.

§ 6.3. Эпитаксия германия

Для экспериментального осуществления газотранспортных реакций используют два метода: метод запаянной ампулы и метод открытой трубы.

Метод запаянной ампулы применяют для осаждения эпитаксиальных слоев с помощью реакции диспропорционирования. На рис. 6.6 показана схема метода. Печь имеет две температурные зо-

ны: в зоне источника 1 температура выше, чем в зоне подложки 2. В ампулу, откачанную до давления 10^{-4} — 10^{-5} мм рт. ст., помещают навеску йода, обеспечивающую насыщение камеры парами тетрайодида германия, который образуется в высокотемпературной зоне в результате взаимодействия паров йода с исходным источником германия. В зоне подложки тетрайодид не образуется, так как температура слишком мала для реакции. Под влиянием градиента концентрации пары тетрайодида достигают подложки, где разлагаются на диiodид и германий, осаждающийся на ней. Градиент концентрации паров диiodида обуславливает их перемещение

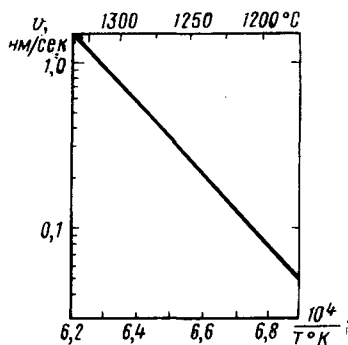


Рис. 6.5. Зависимость скорости испарения кремния от температуры

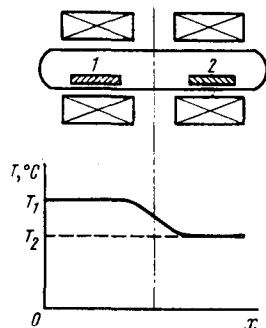


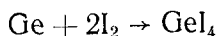
Рис. 6.6. Схема метода отпаянной ампулы для получения эпитаксиальных пленок германия:

1 — источник; 2 — подложка

ние в зону источника, где с их участием вновь образуется тетрайодид. Таким образом, йод транспортирует германий от источника к подложке и возвращается обратно, совершая многократный кругооборот.

В качестве подложек чаще применяют монокристаллический германий с электропроводностью p -типа, а в качестве источника — германий с электропроводностью n -типа, ибо коэффициент переноса доноров больше, чем акцепторов.

Метод открытой трубы применим для осуществления всех видов реакций в газовой фазе. Схема устройства реактора показана на рис. 6.7. Очищенный аргон или водород поступает в зону I, температура в которой равна 50 — 80°C . Здесь из навески 1 образуются пары йода, которые переносятся к источнику германия в зону II, находящемуся при температуре 550 — 700°C . Пары йода реагируют с германием, образуя тетрайодид:



Тетрайодид в свою очередь соединяется с германием источника и превращается в дийодид:



Газообразный дийодид уносится потоком аргона в зону III, где при 300—400° С происходит диспропорционирование. Термодинамическое равновесие в двух последних зонах может быть представлено в виде следующего уравнения:

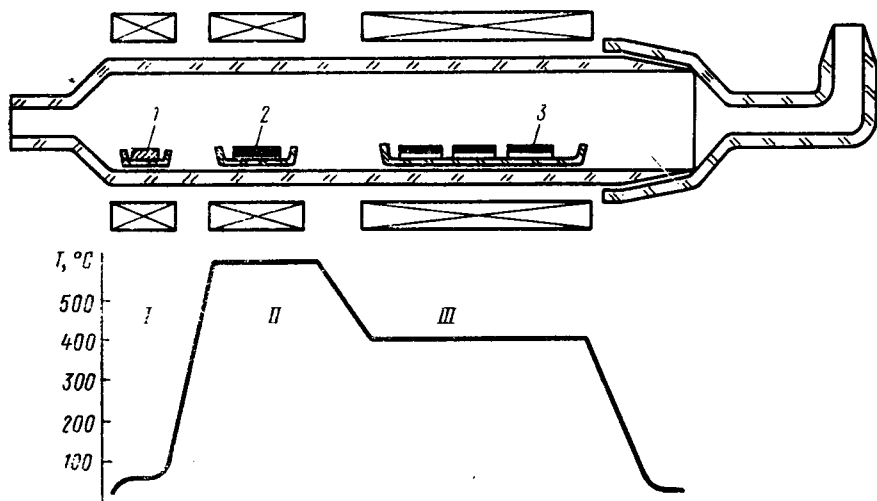


Рис. 6.7. Схема устройства для осаждения пленок германия путем диспропорционирования GeI_2 :

1 — йод; 2 — источник германия; 3 — затравочные пластины

На рис. 6.8 показаны экспериментальные данные изменения скорости роста пленки германия на различных образом ориентированных подложках в зависимости от давления паров дийодида германия. Скорость потока аргона составляла около 10^{-6} м³/сек. Кривые не изменяются, если вместо аргона использовать водород.

§ 6.4. Эпитаксия арсенида галлия

Газотранспортные реакции относятся к перспективным методам синтеза полупроводниковых соединений в виде тонких эпитаксиальных пленок.

Метод открытой трубы является наиболее совершенным и производительным. Газом-носителем служит хлористый водород. На рис. 6.9 изображена схема установки с горизонтальной трубой.

Кварцевая труба 1 с помощью уплотнений 2 закреплена в печи сопротивления 3. В трубу вставлены две термопары 4, а печь имеет водяную рубашку 12. Через ротаметр 5 подается смесь газов $H_2 + N_2$, прошедшая очистку 11. В аппарате 6 получают хлористый водород, из которого удаляют влагу осушками 7 и 8. Кран 9 служит для выпуска хлористого водорода, а кран 10 — для напуска его в установку.

Перед осаждением пластины отжигают в токе водорода при $T = 800^\circ C$ в течение 15—30 мин, затем травят в потоке хлористого водорода. Для выращивания пленки температуру источника повышают до $850^\circ C$, а подложки охлаждают до $700^\circ C$. В зоне источника происходит травление арсенида галлия:

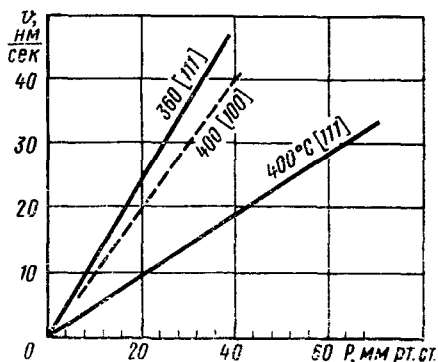
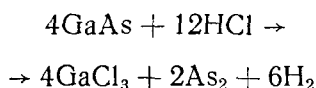


Рис. 6.8. Изменение скорости роста пленок германия на различных образцах ориентированных подложках при различной температуре выращивания в зависимости от давления паров GeI_2

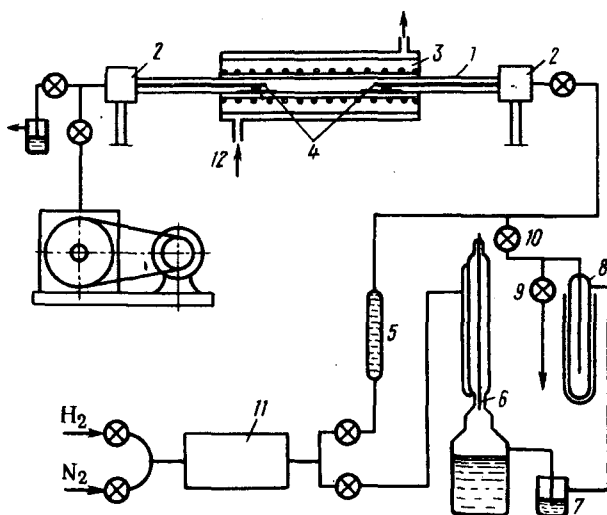
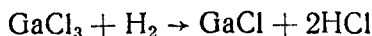
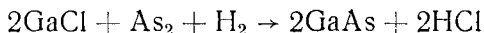


Рис. 6.9. Схема установки с горизонтальной трубой

Благодаря избытку водорода трихлорид галлия восстанавливается до монохлорида:



Наличие монохлорида облегчает восстановление галлия у подложки. Процесс образования арсенида галлия описывается реакцией



После окончания процесса пластины охлаждают в токе водорода.

Кинетика процесса осаждения и качество эпитаксиальных пленок определяются распределением температуры в реакторе. С увеличением температуры источника свыше 900°C возрастает количество переносимого арсенида галлия, но изменяется температурный градиент и осаждение пленки происходит на стенках трубы. Увеличение температуры подложек уменьшает скорость роста вследствие конкурирующего процесса травления, а снижение нагрева ухудшает качество пленок.

Жидкофазная эпитаксия. Эпитаксия арсенида галлия и других полупроводниковых соединений из жидкой фазы обладает рядом преимуществ по сравнению с эпитаксией из газовой фазы: возможность получения высококачественных *p-n*-переходов и сильно легированных эпитаксиальных слоев (до концентраций 10^{20} — 10^{21} см^{-3}), высокие скорости роста (около 1000 нм/сек), возможность выращивания пленок больших толщин (свыше 100 мкм), простота и доступность применяемого оборудования.

Выращивание проводят методом открытой трубы, если используют не летучие легирующие добавки, такие, как германий, кремний, олово, так как обеднение ими расплава за время процесса незначительно. Применение в качестве легирующих добавок цинка, теллура, серы ведет к неравновесным условиям выращивания, и в этих случаях применяют метод закрытой трубы.

Процесс выращивания пленок состоит из двух этапов: смачивание поверхности арсенида галлия расплавом, содержащим легирующие добавки, и эпитаксиальное наращивание.

Рассмотрим получение пленок арсенида галлия методом жидкофазной эпитаксии в закрытой трубе. Пластины арсенида галлия механически и химически полируют. Сплав готовят на основе галлия с добавкой лигатуры в количестве $0,2$ — $2,0$ вес. %: цинка — для выращивания слоев с электропроводностью *p*-типа или теллура — для выращивания слоев с электропроводностью *n*-типа. Чтобы предотвратить разложение подложек арсенида галлия при нагреве в ампуле вследствие сублимации мышьяка, сплав насыщают арсенидом галлия до 15 — 20 %. Пластины и сплав закладывают в расположенные рядом углубления, а затем в графитовую кассету. Кассету устанавливают в кварцевую ампулу, в которой создают давление около 10^{-5} мм рт. ст. Ампулу наполняют формирующим газом и отпаивают, помещают в печь сопротивления с температурой 950 — 1050°C . Сплав плавится и пары мышьяка насыщают ампулу. После небольшой выдержки, способствующей очистке поверхности пластины арсенида галлия, ампулу поворачивают так, чтобы расплав растекался по поверхности пластины и смочил ее. В процессе смачива-

ния происходит травление поверхности подложки материалом растворителя и удаление поверхностных загрязнений и дефектов. Смачивание длится 10—30 мин — до установления равновесного состояния. Часть поверхностного слоя растворяется в сплаве в соответствии с фазовой диаграммой. Затем следует медленное охлаждение, при котором идет эпитаксиальное наращивание. Для роста совершенных пленок необходимо наличие градиента температуры в направлении роста около 10^3 град/м, чтобы кристаллизация происходила в основном на подложке. Увеличение градиента и скорости охлаждения ухудшает качество пленок, так как в них захватывается маточный раствор.

К числу недостатков метода жидкофазной эпитаксии относятся отклонение состава растущих пленок от стехиометрического состава, сильная зависимость качества пленок от ликвации по удельному весу (расслоение расплава вследствие различия в удельных весах его компонентов), наличие эвтектической фазы на поверхности пластин после кристаллизации.

§ 6.5. Легирование в процессе эпитаксии

Для введения легирующей примеси в выращиваемую пленку используют следующие способы:

- 1) легирование с помощью примесей, растворенных в кристалле полупроводника (источнике);
- 2) легирование из паров примеси, находящейся в элементарной форме;
- 3) легирование из газов и паров соединений, содержащих примесные элементы.

Первый способ позволяет изменять тип и концентрацию примеси в очень широком диапазоне. Важным является то, что можно использовать летучие примеси — фосфор, мышьяк, сурьму. Атомы примеси не могут быть перенесены из источника до тех пор, пока не испарятся окружающие их атомы полупроводника. Таким образом, можно точно регулировать концентрацию примеси.

Введение примесей в состав газообразных веществ производят с использованием фосфина — PH_3 , арсина — AsH_3 , диборана — B_2H_6 и некоторых других газов, добавляемых в водород или инертные газы в концентрациях от $5 \cdot 10^{-4}$ до 1 %.

Наиболее широко в методе открытой трубы применяют легирование из паров трехбромистого бора — BBr_3 , треххлористого фосфора PCl_3 или оксихлорида фосфора — POCl_3 , добавляемых в сосуд с SiCl_4 , либо испаряемых из отдельных резервуаров.

Наличие атомов примеси, адсорбированных на растущей поверхности пленки, влияет на активность центров кристаллизации. Акцепторные примеси почти не сказываются на скорости роста пленки, донорные уменьшают ее.

Рост пленки сопровождается перераспределением атомов примеси из подложки в пленку. Уровень легирования и распределение концентрации примеси в эпитаксиальной пленке определяются не

только содержанием примесей в окружающем газе, но также перераспределением примеси в приповерхностной области подложки, на которой растет пленка. Процесс легирования пленки за счет диффузии атомов примеси из подложки называют автолегированием. Распределение концентрации примеси на границе пленка — подложка описывается выражением

$$C_x = C_0 \exp\left(-\frac{x}{L}\right) \pm C_e \left[1 - \exp\left(-\frac{x}{L}\right)\right], \quad (6.5)$$

где C_0 — концентрация примеси на границе пленки с подложкой;
 C_e — равновесная установившаяся концентрация примеси в эпитаксиальном слое;

L — параметр наклона функции распределения, зависящий от коэффициента и времени диффузии.

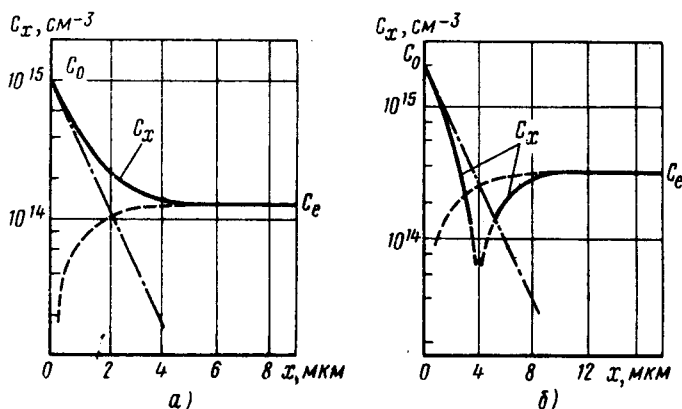


Рис. 6.10. Распределение концентрации примеси в эпитаксиальном слое при создании n - n^+ - (а) и p - n -переходов (б)

Первый член правой части выражения (6.5) характеризует зависимость легирования пленки примесью подложки, второй член — примесью газовой фазы. Если производится выращивание пленки с электропроводностью n -типа на подложке n -типа или пленки p -типа на подложке p -типа, то результирующая концентрация определяется суммой обоих членов. Если пленка и подложка с разным типом электропроводности, то результирующая концентрация определяется их разностью. Соответствующие кривые распределения примесей показаны на рис. 6.10. Положение p - n -перехода можно вычислить, логарифмируя выражение (6.5) с учетом условия $C_x = 0$ при $x = x_j$:

$$x_j = L \ln \left(\frac{C_0}{C_e} + 1 \right).$$

§ 6.6. Дефекты эпитаксиальных пленок

Эпитаксиальные пленки имеют кристаллические дефекты двух типов: дислокации и дефекты упаковки.

Дислокации. Так как при эпитаксиальном росте пленки воспроизводится морфология подложки, то дислокации, имевшиеся в подложке (пластине полупроводника), переходят в пленку. Однако почти во всех случаях плотность дислокаций в пленке превышает плотность дислокаций в подложке. При этом плотность дислокаций возрастает в направлении от поверхности пленки к границе раздела пленка — подложка. Область вблизи раздела характеризуется повышенной плотностью дислокаций, и в ней наблюдаются инородные включения, например йода, йодидов, хлоридов.

Образование несовершенной промежуточной области с большой плотностью дислокаций зависит от состояния поверхности подложки. Для получения пленок с малой плотностью дислокаций требуется тщательная механическая обработка, очистка поверхности пластин и обработка водородом.

Дефекты упаковки встречаются в форме равносторонних треугольников и прямых линий; иногда образуются более сложные формы: комбинации треугольников и линий. В конце каждой линии присутствует линия дислокации.

Форма дефектов упаковки зависит от кристаллографической ориентации эпитаксиального слоя. В слоях, выращенных на подложках, которые ориентированы по плоскости (111), дефекты упаковки могут быть в виде равносторонних треугольников, незамкнутых треугольников, отдельных прямых линий, параллельных сторонам этих треугольников, или более сложных геометрических фигур, образованных в результате пересечения двух или более дефектов упаковки (рис. 6. 11). На слоях с ориентацией (110) возникают равнобедренные треугольники, на плоскостях (100) — квадраты.

Рост кристаллической пленки состоит из зарождения центров кристаллизации, перемещения атомов к этим центрам, бокового роста и соединения отдельных плоских образований в единое целое. Если какой-либо атом выдвигается из своего слоя, то он служит исходной точкой развития дефекта, ибо окружающие его атомы в процессе последующего роста также будут сдвинуты относительно моноатомных слоев всего объема.

Рис. 6.12 иллюстрирует образование трехмерных геометрических дефектов. Рост дефекта начинается в точке N , расположенной на подложке или вблизи от нее, и развивается вдоль трех наклонных плоскостей (111). На поверхности пленки появляется треугольник, а на поперечном срезе — V-образная фигура. Линейный дефект также начинается в точке N , но развивается только вдоль одной из трех плоскостей (111). Более сложные формы образуются в процессе взаимодействия нескольких дефектов.

Большинство дефектов возникает на поверхности раздела пленка — подложка. Это обусловлено тем, что поверхность подложки обычно несовершенна: на ней встречаются царапины от абразива, примесные атомы, остатки окисной пленки и пр. Возникающие дефекты с развитием эпитаксиального слоя увеличивают свои размеры пропорционально его толщине. Часть подобных дефектов образуется в процессе роста пленки внутри слоя. Зародышем в этом случае может стать, например, примесный атом, адсорбированный из газового потока и осевший в неправильной последовательности. На поверхности выращенной пленки такой дефект будет выглядеть уменьшенным, но иметь ориентацию, подобную ориентации всех других дефектов.

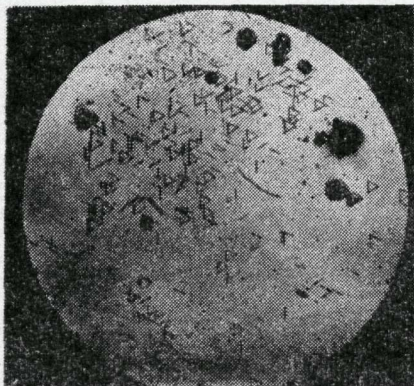


Рис. 6.11. Дефекты упаковки на плоскости (111)

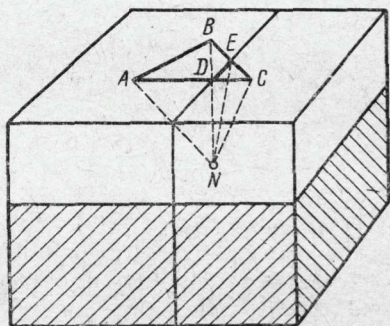


Рис. 6.12. Дефекты упаковки: линейные (DE) и треугольные (ABC); N — зародышевая точка образования дефектов

Установлено, что на хорошо обработанных подложках чаще встречаются дефекты в форме треугольников, так как боковое развитие центров кристаллизации происходит более правильно. Плохо обработанным подложкам сопутствуют линейные дефекты и дефекты в форме треугольников, обнаруживаемых с помощью оптического микроскопа без предварительной химической обработки. Если пластины подвергались только механической обработке (полировке), то плотность дефектов упаковки составляет до 10^7 см^{-2} . Наличие в газовой смеси кислорода с концентрацией около $7,5 \cdot 10^{-3} \%$ приводит к образованию на химических травленых подложках до 10^5 дефектов упаковки на 1 см^2 , а наличие паров воды с концентрацией около $1 \cdot 10^{-3} \%$ обуславливает образование поликристаллических пленок. Наилучшие результаты дает для кремния газовое травление в хлористом водороде — плотность дефектов не превышает 10^2 см^{-2} .

Кроме дислокаций и дефектов упаковки, в эпитаксиальных пленках присутствуют и другие дефекты роста: усеченные пирамиды, прорастающие от подложки и возвышающиеся над поверхностью пленки; дефекты поверхности в виде пустот, выступов и др. Пирамиды роста объясняют включениями карбида кремния. Некоторые исследователи наблюдали на поверхности пленок фигуры в виде лежащего «гвоздя», шляпкой которого являлась примесь из жидкой фазы, перемещавшаяся по поверхности пленки в поле градиента температуры.

§ 6.7. Методы исследования и контроля эпитаксиальных пленок

Основными параметрами, определяющими пригодность эпитаксиальных пленок для изготовления приборов, являются тип электропроводности, удельное сопротивление, толщина, распределение примесей и плотность дефектов в пленке, степень размытия границы пленка — подложка.

Измерение толщины эпитаксиальных пленок

Для определения толщины пленок применяют метод косого и сферического шлифов, особенно для многослойных пленок типа *n-p-n*, *p-n-p* и др., а также метод интерференции инфракрасных (ИК) лучей и наблюдение дефектов упаковки.

Интерференция ИК-лучей. Отражение инфракрасных лучей в диапазоне длин волн 10—35 мкм происходит не только от поверхности пленки, но и от границы раздела пленка — подложка вследствие различия оптических констант (показателей преломления) пленки и подложки, содержащих различную концентрацию примесей. По картине интерференции отраженных лучей можно судить о толщине слоя. Надежные данные получают, если сопротивление пленки выше 0,1 ом·см, а сопротивление подложки ниже 0,02 ом·см. С увеличением концентрации примеси в пленке возрастает поглощение ИК-лучей, с уменьшением концентрации примеси в подложке растет пропускание ею и уменьшается отражение на границе.

Разность хода лучей δ , отраженных от пленки и подложки, определяется толщиной пленки Δ , показателем ее преломления n и углом преломления φ :

$$\delta = 2n\Delta \cos \varphi.$$

Наблюдая интерференционную картину и измеряя разность хода, вычисляют толщину пленки. Неоднородность слоя по толщине или размытие распределения примеси на границе пленка — подложка приводит к ухудшению контрастности интерференционной картины.

Наблюдение дефектов упаковки. Так как дефекты упаковки зарождаются преимущественно на границе пленка — подложка

и образуют правильные тетраэдры, то высота этих тетраэдров равна толщине пленки. При ориентации подложки (111) основанием тетраэдров является равносторонний треугольник и высота тетраэдра:

$$\Delta = L \sqrt{2/3} = 0,816 L,$$

где L — длина стороны равностороннего треугольника. Для других типов ориентации можно найти аналогичные выражения.

Выявление дефектов упаковки производят в травителях:

- | | |
|-------------------------------------|--|
| 1. 40 см ³ HF | 2. 30 см ³ HNO ₃ |
| 20 см ³ HNO ₃ | 120 см ³ CH ₃ COOH |
| 40 см ³ H ₂ O | 10 см ³ HF |
| 20 г Ag NO ₃ | |

Травление ведется 5—20 сек.

Измерение удельного сопротивления

Если пленка образует на границе с подложкой p - n -переход, то измерение удельного сопротивления не составляет особых трудностей и производится четырехзондовым методом или его упрощенной модификацией — двухзондовым методом. Для контроля пленок типа n - n^+ и p - p^+ применяют трехзондовый метод.

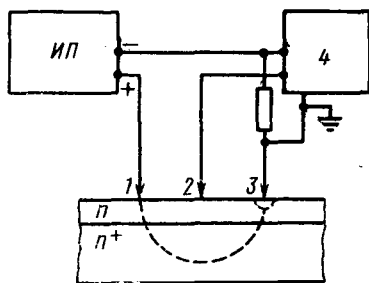


Рис. 6.13. Схема измерения удельного сопротивления пленки трехзондовым методом

Двухзондовый метод. На поверхности пленки устанавливают два зонда с известным диаметром острия, и между ними прикладывают разность потенциалов. Измеряя ток в цепи зондов, вычисляют последовательное сопротивление R и сопротивление растекания, равное удельному сопротивлению

$$\rho = 2kaR,$$

где k — коэффициент, учитывающий сопротивление контактов (для p — Si $k=0,57$, для n — Si $k=0,25$);

a — радиус зонда.

При таком методе измерения к сопротивлению полупроводника добавляется сопротивление контактов, которое необходимо учесть, если они одного порядка. Прикладываемая разность потенциалов не должна превышать 30 мВ, чтобы максимальное поле в пленке не было выше 1 кВ/см и подвижность основных носителей заряда и их концентрация не изменялись.

Трехзондовый метод. Схема этого метода показана на рис. 6.13. Три зонда 1, 2, 3 служат для наблюдения на экране характеристики графа 4 характеристики пробоя точечного контакта. Измерив напряжение пробоя, по ранее построенной экспериментальной кривой зависимости пробивного напряжения такой же структуры от удельного сопротивления полупроводника находят удельное сопротивление пленки.

При использовании трехзондового метода нет необходимости знать толщину пленки, но она должна быть больше ширины области объемного заряда при пробое, иначе одно и то же напряжение пробоя может соответствовать различным сочетаниям сопротивления и толщины эпитаксиальной пленки. Точность измерения $\pm 10\%$ гарантируется для удельных сопротивлений от 0,1 до 1,0 ом·см.

Измерение распределения концентрации примеси

Распределение концентрации примеси в эпитаксиальной пленке определяют путем последовательного удаления тонких слоев и измерения проводимости с помощью четырехзондового метода для пленок противоположного с подложкой типа электропроводности или измерения вольт-фарадной характеристики для пленок одного типа электропроводности. В выращенной эпитаксиальной пленке на разной глубине путем сплавления или диффузии создают *p-n*-переходы. Толщину базовой области, однако, чаще изменяют не путем изменения режима создания перехода, а за счет удаления части эпитаксиального слоя. К *p-n*-переходу прикладывают небольшое обратное смещение и с помощью мостовой схемы измеряют емкость. Затем эталонную емкость моста изменяют примерно на 1% и, изменяя смещение, добиваются баланса моста. Эта манипуляция позволяет определить наклон вольт-фарадной характеристики $\Delta C/\Delta U \approx dC/dU$ при данных *C* и *U*. На основании формулы Шоттки можно записать:

$$N = \frac{C^3}{\epsilon e} \left(-\frac{1}{dC/dU} \right); \quad (6.6)$$

$$\omega = \frac{\epsilon}{C_g}, \quad (6.7)$$

где *N* — концентрация примеси в пленке;

C_g — удельная емкость перехода;

ω — ширина области объемного заряда;

ε — абсолютная диэлектрическая проницаемость;

e — единичный заряд.

На рис. 6.14 приведена номограмма для кремния, построенная на основании выражений (6.6) и (6.7). По известным *C_g*, *dC/dU* с ее помощью можно определить концентрацию примеси и ширину области *ω*, что необходимо для контроля возможной погрешности.

Метод вольт-фарадной характеристики применяется для слаболегированных пленок и ограничивается пробоем p - n -перехода.

Пример использования номограммы, показанной на рис. 6.14. Известно, что площадь p - n -перехода равна 10^{-3} см^2 , емкость при смещении 10 в равна $10,25 \text{ нф}$, при смещении 11 в — $9,75 \text{ нф}$. Определяем удельную емкость

$$C_g = \frac{10,25 + 9,75}{2 \cdot 10^{-3}} = 10^4 \text{ нф/см}^2$$

и наклон вольт-фарадной характеристики

$$\frac{\Delta C}{\Delta U} = \frac{0,5}{1 \cdot 10^{-3}} = 5 \cdot 10^2 \text{ нф/в} \cdot \text{см}^2.$$

По правой шкале центральной оси номограммы находим, что ширина области пространственного заряда составляет около 1 мкм . Соединяя точки

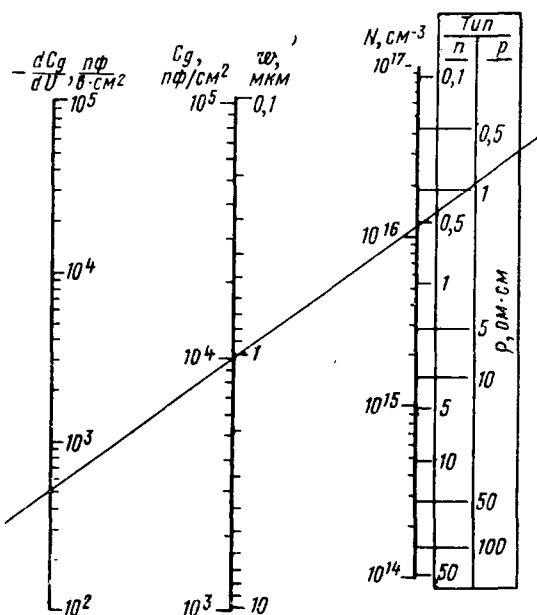


Рис. 6.14. Номограмма для определения концентрации примеси на основании вольт-фарадной характеристики p - n -перехода

$dC/dU = 5 \cdot 10^2$ и $C = 10^4$ прямой линией и продолжая ее до правой оси, находим, что на глубине $x = w$ концентрация примеси в пленке составляет $1,3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Если эта пленка с электропроводностью n -типа, то $\rho \approx 0,5 \text{ ом} \cdot \text{см}$, если пленка с электропроводностью p -типа, то $\rho \approx 1 \text{ ом} \cdot \text{см}$.

ЭЛИОНИКА

§ 7.1. Основы электронно-лучевой обработки

Большие возможности в полупроводниковой технике и микроэлектронике связаны с использованием электронных и ионных пучков. Технологию получения микроэлектронных устройств с помощью электронных и ионных лучей называют элионной, а все вопросы, относящиеся к ее реализации,—элионикой.

В 1907 г. для плавки тантала и других тугоплавких металлов был предложен электронно-лучевой нагрев. В 1938 г. электронный

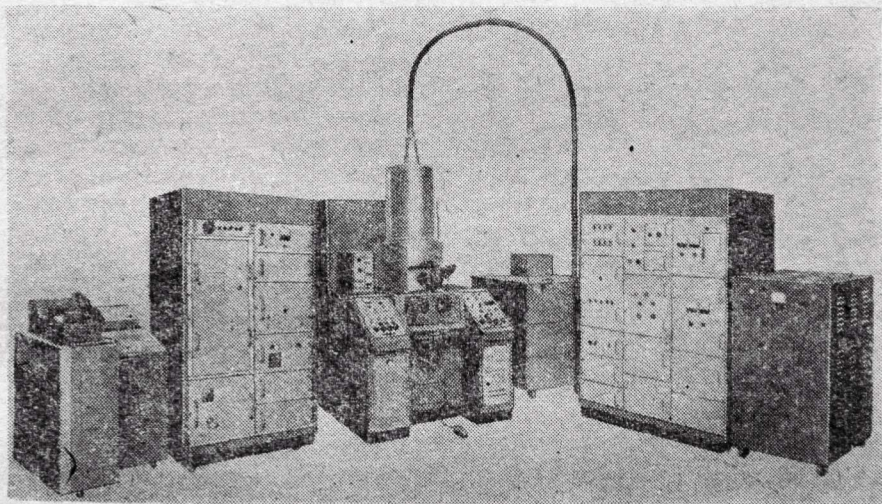


Рис. 7.1. Универсальная электронно-лучевая установка

луч с большой удельной мощностью применили в качестве теплового источника при изготовлении отверстий в диафрагмах электронных микроскопов. Первая технологическая установка была запатентована в 1942 г. В 1950 г. осуществили сварку электронным лучом при ускоряющем напряжении 50 кВ, а в 1957 г. электронный пучок с энергией 25 кэВ применили для сварки топливных элементов космических ракет. В том же году началось промышленное использование электронно-лучевой плавки. В 1959 г. появились первые образцы высококачественных универсальных

электронно-лучевых установок с острой фокусировкой луча. В дальнейшем были созданы автоматизированные установки с программным управлением, одна из которых представлена на рис. 7.1.

Оборудование для обработки. Электронно-лучевые установки (рис. 7.2) содержат катод 1, анод 3, управляющий электрод 2, фокусирующую систему 5 из одной или трех электромагнитных линз, отклоняющую систему 6, импульсный модулятор, с помощью которого можно запира́ть электронный луч. Образец 7 помещают на стол с двухкоординатным перемещением. Работа импульсного модулятора, отклонение луча и перемещение стола программируются.

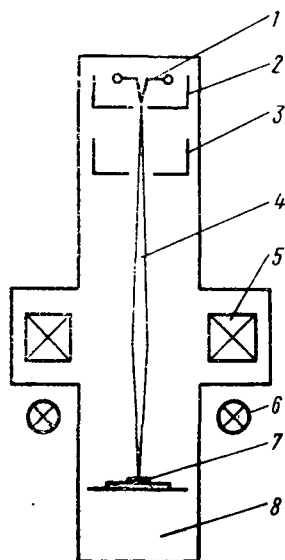


Рис. 7.2. Схема электронно-лучевой установки:

1 — катод; 2 — управляющий электрод; 3 — анод; 4 — электронный луч; 5 — фокусирующая система; 6 — отклоняющая система; 7 — образец; 8 — вакуумная камера

Электронны́е эмиттируются из накали́ного вольфрамового катода и под воздействием ускоряющего анодного напряжения от 10 до 200 кВ устремляются через диафрагмы электрода Винельта и анода в колонну, где стоят электромагнитные линзы, фокусирующие луч на плоскости образца. Для устранения приосевого астигматизма — искажений, обусловленных несимметрией электронных линз вследствие погрешностей изготовления, — служит стигматор — корректирующая магнитная линза. Для предотвращения геометрических aberrаций электронного пучка применяют систему магнитной юстировки.

Электронно-лучевой нагрев. Теоретически предел минимального диаметра электронного луча, который можно получить путем фокусировки, ограничивается дифракцией:

$$\Phi, \text{ \AA} = \frac{h}{\sqrt{2meU}} = \frac{12,3}{\sqrt{U}},$$

где h — постоянная Планка;
 m — масса покоя электрона;
 U — ускоряющее напряжение.

При $U=150$ кВ $\Phi=1$ Å, что практически пока недостижимо.

Диаметр фокального стигматического пятна составляет обычно 1—100 мкм в технологических установках и 50—100 Å — в исследовательских.

Мощность электронного пучка равна произведению тока в пучке на ускоряющее напряжение:

$$P = IU.$$

При облучении твердого тела часть электронов отражается от поверхности. Кроме того, возникает вторичная электронная эмис-

сия. Энергия, уносимая всеми вторичными электронами, составляет около 30% энергии пучка. Энергия электронов, проникших в вещество, в итоге переходит в тепло, вызывающее локальный разогрев.

Потеря энергии быстрыми электронами при прохождении через вещество происходит вследствие неупругих соударений с электронными оболочками атомов. Изменение скорости электронов подчиняется закону Томаса — Виддингтона

$$v^4 = c\gamma (R_m - x),$$

где

$$R_m = \frac{v_0^4}{c\gamma};$$

$$c = \frac{48\pi e^4 z N_A}{m^2 M};$$

v_0 — начальная скорость электронов;

N_A — число Авогадро;

e, m — заряд и масса электрона;

γ, Z, M — плотность, атомный номер и грамм-атомный вес вещества.

Наибольшая часть энергии расходуется электронами в конце пробега, поэтому температура достигает максимума на некоторой глубине вещества. Электроны, ускоренные напряжением ≤ 100 кВ, проникают в материал с плотностью γ на глубину

$$R = 2,1 \cdot 10^{-12} \frac{U^2}{\gamma}.$$

Для кремния:

$$\text{при } U = 10 \text{ кВ} \quad R = 0,9 \text{ мкм};$$

$$\text{при } U = 30 \text{ кВ} \quad R = 8,1 \text{ мкм};$$

$$\text{при } U = 100 \text{ кВ} \quad R = 90 \text{ мкм}.$$

При больших ускоряющих напряжениях возникает достаточно мощное рентгеновское излучение, как тормозное, так и характеристическое.

Методы обработки. Технологические методы, основанные на использовании энергии электронных пучков, подразделяют на две категории: тепловые и нетепловые.

Тепловые процессы состоят в плавлении, испарении, сплавлении или диффузии. Их применяют для микрофрезерования и резания тонких пленок, полупроводниковых и металлических пластин, для микросварки электродных выводов и деталей корпуса, для получения тонких монокристаллических пленок германия и кремния, для создания p - n -переходов, омических контактов и межэлектродных соединений.

Нетепловые процессы состоят в интенсификации физико-химических процессов, совершающихся на поверхности полупроводниковой или диэлектрической подложки: десорбции, полимеризации, конденсации, деструкции и др.

§ 7.2. Применение электронно-лучевых процессов

Электронно-лучевая технология имеет следующие основные преимущества:

1) локальное воздействие. При термических процессах можно обрабатывать области с минимальным размером до 1 $\mu\text{м}$, при нетермических процессах диаметр луча может быть уменьшен до 50—100 $\text{\AA}$;

2) большая плотность энергии — до 10^{13} вт/м^2 , что позволяет производить обработку за доли секунды и обрабатывать тугоплавкие материалы;

3) большая производительность и широкие возможности для автоматизации и программирования, что позволяет добиться высокой воспроизводимости обработки;

4) универсальность — в одной специализированной установке можно производить следующие операции: очистку поверхности, напыление легирующих примесей, микролегирование или микросплавление с целью создания p - n -перехода, осаждение полупроводниковых, изолирующих и проводящих пленок, микрозонную рекристаллизацию, микрофрезерование и резание пластин на элементы, микросварку электродных выводов и герметизацию приборов.

Наиболее перспективным применением электронно-лучевого метода является создание локальных p - n -переходов малой площади путем микролегирования и электронная литография с разрешающей способностью менее 0,1 $\mu\text{м}$.

Создание p - n -переходов. Для получения p - n -переходов пластинку кремния с электропроводностью n -типа подвергают окислению. На окисную пленку напыляют акцепторный элемент — алюминий или бор в составе борного ангидрида. Под воздействием электронного пучка окисная пленка разрушается, а кремний и алюминий плавятся. Диаметр зоны расплава больше диаметра отверстия в окисной пленке вследствие значительного различия в температуре плавления Si и SiO_2 . Зона расплава имеет форму полусферы или шарового сегмента.

Для равномерного легирования необходимо, чтобы за время облучения атомы примеси равномерно распределились по объему расплава. При отсутствии конвекции диффузия в расплаве описывается уравнением Фика, решаемым для случая диффузии примеси из объема конечной толщины h с отражающей границей:

$$C_{x,t} = C_0 \left[1 - \frac{4}{\pi} \exp\left(-\frac{\pi^2 D t}{h^2}\right) \sin \frac{\pi x}{2h} \right], \quad (7.1)$$

где C_0 — концентрация примеси у поверхности расплава;

D — коэффициент диффузии примеси в расплаве;

x, t — координаты по глубине и времени диффузии.

Коэффициенты диффузии большинства примесей в расплаве кремния близки к величине $5 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2/\text{сек}$. С помощью выраже-

ния (7.1) можно определить, что на границе $x=h$ установится концентрация $C_{x,t}=0,9 C_0$ за время $t=0,05-0,1$ сек.

После кристаллизации расплава на границе фронта оплавления образуется p - n -переход. Так как длительность воздействия электронного пучка не превосходит 1 сек, то заметной диффузии в твердой фазе не происходит, и образовавшийся p - n -переход имеет ступенчатое распределение примеси.

На рис. 7.3 показан поперечный шлиф p - n -перехода, полученного электронно-лучевым микролегированием. В зависимости от особенностей оборудования могут быть получены переходы $\varnothing 5-300$ мкм.

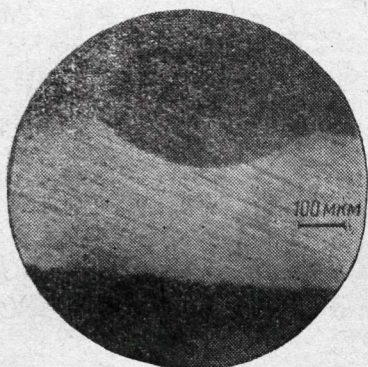


Рис. 7.3. Поперечный шлиф p - n -перехода, полученного электронно-лучевым микролегированием

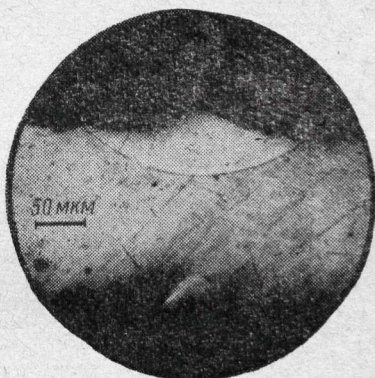


Рис. 7.4. Конусообразный бугорок над электронно-лучевым переходом

Электронно-лучевой метод отличается от других методов создания p - n -переходов наличием очень высоких градиентов температуры, что обуславливает появление больших механических напряжений и скоплений дислокаций в окрестности перехода. Это ухудшает статические характеристики диодов, но иногда оказывается полезным, так как позволяет получить без специальных приемов быстродействие приборов порядка единиц наносекунд. После кристаллизации расплава в центральной части зоны нагрева образуется конусообразный бугорок, форма которого зависит от условий облучения, а размеры — от длительности облучения (рис. 7.4).

Электронная литография. При облучении органических веществ нетермическими электронными пучками молекулярные связи разрываются, что приводит к изменению химического состава и физических свойств облученного вещества. Между отщепленными атомами и атомными группами возникают новые углеродные связи, что способствует изменению растворимости, прочности и термостойкости облученных веществ.

Эти процессы лежат в основе электронной литографии. Теоретически предел оптической фотолитографии ограничен минимальными размерами 0,2—0,3 мкм. Однако их нельзя реализовать практически, так как неплоскостность фотошаблонов составляет ± 5 мкм, а максимальная глубина резкости объектива с высокой разрешающей способностью 1,5 мкм. Микроизображения в 1—2 мкм поэтому являются предельными. Электронная оптика имеет практически разрешающую способность в 50—100 Å при глубине резкости 20 мкм.

Применение электронного пучка позволяет повысить точность проработки элементов микроизображений и уменьшить их размеры. Экспонирование ведется при энергии 10—20 кэв. Полное задубливание пленки резиста площадью 125×500 мкм² сканирующим пучком $\varnothing 1$ мкм при экспозиции 10^{-1} к/м² осуществляется за 50 мсек. На рис. 7.5 показан участок фотошаблона, изготовленного электронным экспонированием.

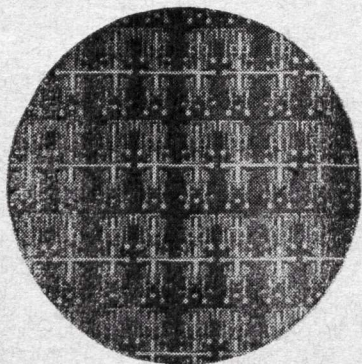


Рис. 7.5. Участок фотошаблона, изготовленного электронным экспонированием

Электронно-лучевая литография может осуществляться и без применения пленки резиста. Участок окисной пленки, облученный пучком малой интенсивности, химически активируется. Растворение облученных областей в травителях идет в три раза быстрее, чем необлученных, поэтому после вскрытия окон на пластине остается пленка SiO_2 .

§ 7.3. Взаимодействие ускоренных ионов с твердым телом

Пучок положительных ионов впервые получил в 1910 г. Дж. Дж. Томсон. Он же исследовал воздействие на траекторию пучка электростатического и магнитного полей и открыл, что отклонение ионов в однородном магнитном поле обратно пропорционально их массе. Этот эффект был положен в дальнейшем в основу действия масс-спектрометров и сепараторов изотопов. Развитие техники ионных пучков тесно связано с развитием атомной физики. Наиболее важным техническим применением ионных пучков явилось ионное легирование полупроводниковых материалов, идея которого была предложена В. Шокли в 1954 г.

Экспериментальное оборудование. Устройства для ионного легирования (рис. 7.6) по физико-техническим данным среди электрофизических приборов занимают промежуточное положение между измерительными масс-спектрометрами и производственными электромагнитными сепараторами изотопов. Основными блоками ионно-лучевой установки являются (рис. 7.7): источник

ионов 1, вакуумная камера 2, магнитный анализатор секторного типа 3, вакуумная система 4, блоки электрического питания 5 и приемник ионов 6. Пучок ионов обозначен цифрой 7. Источник ионов состоит из камеры, в которой производится ионизация па-

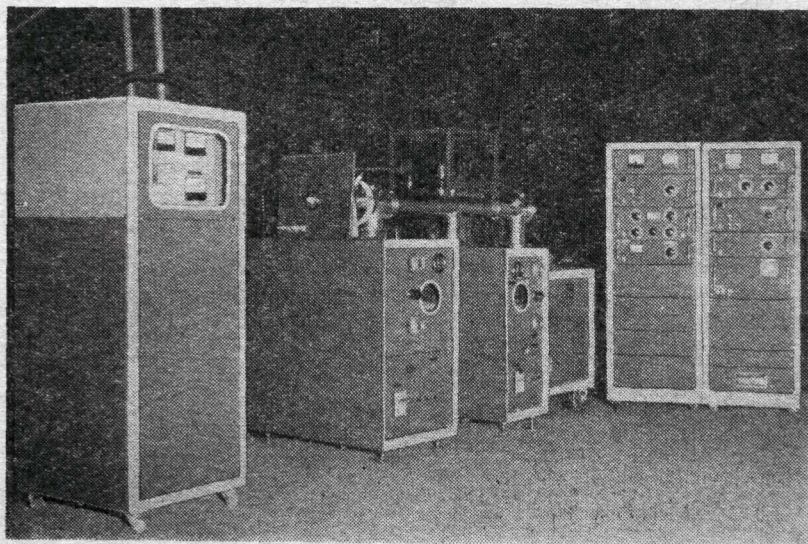


Рис. 7.6. Ионно-лучевой ускоритель

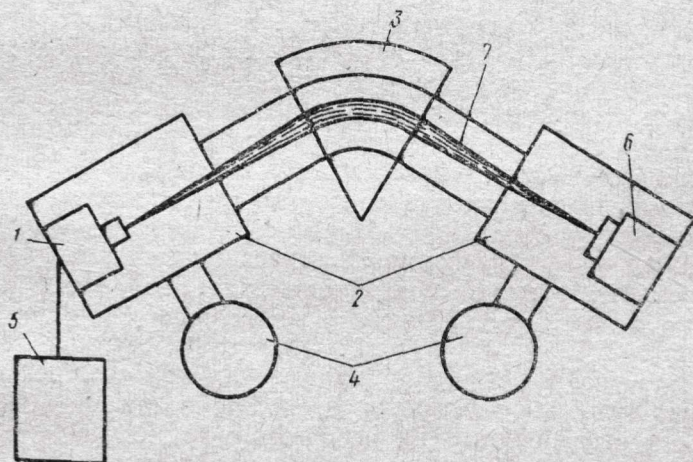


Рис. 7.7. Структурная схема ионно-лучевого ускорителя

ров легирующих элементов, экстрагирующего ионы зонда, электростатической фокусирующей линзы и ускоряющего электрода, сообщаящего ионному пучку требуемую энергию. Ионизация

осуществляется в высокочастотном или дуговом разряде, поэтому источник ионов называют высокочастотным или дуговым. Электроны, эмиттируемые из термокатода, ускоряются в направлении полюс камеры полюсного наконечника под действием разности потенциалов 100 в. В эту же камеру подаются разряженные пары легирующих элементов, которые ионизируются. Магнитное поле с индукцией 0,1 тл концентрирует пучок до больших плотностей. Положительные ионы экстрагируются отсюда с помощью отрицательно заряженного пустотелого зонда и фокусируются в пучок под действием электрического поля зонда (5—10 кв). Плотность ионного тока в экстрагирующем канале может достигать 100 а/м², а ток пучка — до 0,5 а. На ускоряющий электрод подается напряжение 20—200 кв. От источника ионов до магнитного анализатора и от магнитного анализатора до приемника ионов располагаются области дрейфа, в которых на ионы не действуют никакие электрические или магнитные поля, кроме поля, создаваемого собственным объемным зарядом пучка. Обладая большими по сравнению с электронами массами, ионы, ускоренные до тех же энергий, имеют соответственно меньшие скорости. Траектории, описываемые теми и другими в электростатическом поле, идентичны. Магнитное поле, действующее на участке анализатора, заставляет ионы с массой M_1 и зарядом q двигаться по дуге окружности, радиус которой определяется магнитной индукцией B , ускоряющим напряжением и массой иона:

$$r = \frac{1}{B} \left(\frac{2M_1 U}{q} \right)^{1/2}.$$

Напряженность магнитного поля в зазоре электромагнита составляет $(4—5) \cdot 10^5$ а/м. После прохождения магнитного анализатора пучок ионов, если он содержит примеси других элементов, разделяется в соответствии с их массами на несколько пучков с различными траекториями. Сепарирование по массам обуславливает высокую чистоту легирования. На обрабатываемую пластину попадает моноизотопный пучок. Ионный пучок может быть широким, щелевым, острофокусированным, а также стационарным или сканирующим в зависимости от технологических требований. В вакуумной системе поддерживается разряжение $5 \cdot 10^{-7}$ — $1 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст., чтобы ионы не испытывали столкновений при движении.

Понятие пробега. Важным параметром, определяющим свойства ионно-лучевых p - n -переходов, является пробег иона. Ионы с атомными весами более 10, ускоренные до энергий 10—200 кэв, теряют свою энергию при внедрении в кристаллическую решетку как вследствие взаимодействия с электронами, возбуждая или ионизируя их, так и вследствие столкновений с ядрами атомов, передавая им энергию при квазиупругом столкновении. Полный пробег иона до остановки в решетке складывается из отдельных прямолинейных участков (рис. 7.8):

$$\bar{R} = \bar{r}_1 + \bar{r}_2 + \bar{r}_3 + \dots + \bar{r}_n.$$

Изменение направления движения обусловлено столкновениями ионов с атомами вещества. Между столкновениями потеря энергии ионами происходит только вследствие электронного взаимодействия, не влияющего на изменение направления движения. Вектор, соединяющий начальную и конечную точки пути иона, называют векторным пробегом, а проекцию его на направление начальной скорости иона — нормальным или проекционным пробегом. Средний полный пробег иона с начальной энергией E_0 определяется интегралом:

$$R = \frac{1}{N} \int_0^{E_0} \frac{dE}{S_n + S_e},$$

где S_n — поперечное сечение ядерного торможения, т. е. ядерная тормозная способность, эв·см²;

S_e — поперечное сечение электронного торможения, т. е. электронная тормозная способность, эв·см²;

N — концентрация атомов вещества мишени.

Поперечные сечения торможения зависят от масс и зарядов взаимодействующих частиц:

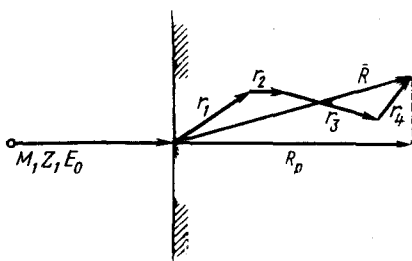


Рис. 7.8. Пробег иона в твердом теле

$$S_n = 2,8 \cdot 10^{-15} \frac{Z_1 Z_2}{(Z_1^{1/3} + Z_2^{1/3})^{1/4}} \cdot \frac{A_1}{A_1 + A_2};$$

$$S_e = 3,25 \cdot 10^{-17} \frac{Z_1 + Z_2}{\sqrt{A_1}} E^{1/2} = k E^{1/2},$$

где Z_1, Z_2 — заряды ядер иона и атома;

A_1, A_2 — атомные веса иона и атома.

Произведя интегрирование, получим выражение для среднего полного пробега ионов в веществе с непериодическим расположением атомов, т. е. в аморфном:

$$R = \frac{2}{N k^2} \left[S_e - S_n \ln \left(1 - \frac{S_e}{S_n} \right) \right].$$

Это выражение справедливо и для кристаллических веществ, если разориентация начальной скорости ионов и кристаллографического направления с малыми индексами превосходит 7°; в этом случае периодичность решетки почти не сказывается на движении ионов.

Нормальный пробег связан с полным приближенным соотношением

$$R_p = \frac{R}{1 + \frac{1}{3} \mu},$$

где
$$\mu = \frac{A_2}{A_1}.$$

Среднеквадратичное отклонение (дисперсия) пробега

$$\frac{\Delta R_p^2}{R_p^2} \simeq \frac{\Delta R^2}{R^2} = \frac{2}{3} \cdot \frac{A_1 A_2}{(A_1 + A_2)^2}.$$

Таблица 7.1

Тип ионов		Энергия E_0 , кэв									
		20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
В	R_p Å	714	1413	2074	2695	3275	3802	4289	4745	5177	5588
	ΔR_p	276	443	562	653	726	793	855	910	959	1004
N	R_p Å	491	961	1414	1847	2260	2655	3034	3391	3728	4046
	ΔR_p	191	312	406	479	540	590	633	672	710	745
Al	R_p Å	289	564	849	1141	1438	1737	2036	2335	2633	2929
	ΔR_p	107	192	271	344	412	476	535	591	644	693
P	R_p Å	255	488	729	976	1228	1483	1740	1998	2256	2514
	ΔR_p	90	161	228	291	350	405	459	509	557	603
Ga	R_p Å	155	272	383	492	602	712	823	936	1049	1163
	ΔR_p	37	64	88	111	133	155	176	197	218	238
As	R_p Å	151	263	368	471	574	677	781	885	991	1097
	ΔR_p	34	59	81	101	122	141	161	180	198	217
In	R_p Å	133	223	304	381	456	529	601	673	744	815
	ΔR_p	23	38	51	63	75	86	97	108	119	129
Sb	R_p Å	132	221	300	376	448	519	590	659	728	797
	ΔR_p	22	36	49	60	71	82	92	102	112	122

В табл. 7.1 приведены значения R_p и ΔR_p для различных ионов и энергий в кремнии, вычисленные по более строгому расчету. Основными примесными ионами, внедряемыми в кремний, являются бор и фосфор. Практически с достаточной точностью значения пробега для них в диапазоне энергий 20—100 кэв определяют с помощью выражения

$$R_p = 375 \frac{E}{A_1},$$

где при размерности E в кэв, A_1 в а. е. м. величину R_p получают в ангстремах.

Особенности пробегов ионов в монокристаллах. В монокристаллах пробеги ионов могут быть значительно больше, чем в том же веществе с аморфной структурой, вследствие эффекта каналирования.

Под каналированием понимают явление, при котором траектории частиц, проходящих вблизи середины междоузельных пространств вдоль главных осей кристалла — каналов, могут иметь определенную стабильность на протяжении всего пробега. Различают межосевое и межплоскостное каналирование: межосевое связано с движением частицы вдоль атомных рядов по оси кристалла; межплоскостное — с движением вдоль атомных плоскостей. Если траектория налетающей частицы проходит вдоль канала, то углы столкновений ее с атомами не будут превышать 1—5°. При малоугловых столкновениях атомные ряды действуют как фокусирующие линзы. Наибольший угол, при котором исчезает направляющее действие канала, в результате чего частица покидает канал, называют критическим углом каналирования. Критический угол зависит от энергии частицы.

В табл. 7.2 даны значения критических углов для ионов бора, азота и фосфора в кремнии с различной ориентацией.

Таблица 7.2

Типы ионов	Энергия E_0 , кэв	Направление		
		[110]	[111]	[100]
В ⁺	30	4,2	3,5	3,3
	50	3,7	3,2	2,9
N ⁺	30	4,5	3,8	3,5
	50	4,0	3,4	3,0
Р ⁺	30	5,2	4,3	4,0
	50	4,5	3,8	3,5

Пучки ионов с углами каналирования меньше критического тормозятся в узкой области вдоль канала. Пробег их может на порядок превышать пробег в неориентированной мишени. Для решетки типа алмаза существует следующая зависимость эффекта каналирования от кристаллографической ориентации: $[110] \gg [112] > [111] \geq [100]$.

При дозе облучения свыше 10^{12} см^{-2} пробег значительно уменьшается, что указывает на изменение кристаллической структуры. При дозах 10^{15} см^{-2} эффект каналирования исчезает.

Профиль распределения примесей, внедренных в кристалл при углах, меньших критических, можно представить в виде суперпозиции трех кривых (рис. 7.9). Кривая 1 обусловлена рассеянием ионов на атомах решетки и хорошо описывается теорией пробегов в аморфных мишенях, кривая 2 является следствием

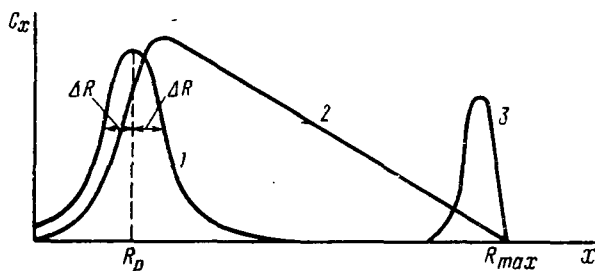


Рис. 7.9. Профиль распределения концентрации примеси при ориентированном внедрении в монокристалл

ухода ионов из каналов (деканалирования) под влиянием рассеяния на несовершенствах кристаллической решетки, кривая 3 образована ионами, прошедшими в каналах. В реальных мишенях при строгой ориентации преобладает кривая 2 и различим пик кривой 3. При разориентации в $7-10^\circ$ преобладает кривая 1.

Распыление под действием ионного пучка. Энергетическая отдача узловых атомов, с которыми столкнулись ионы, может быть достаточно велика, чтобы положить начало каскаду столкновений, включающему до 10^4 атомов. Если такой каскад замыкается на поверхности и атомы имеют энергию свыше энергии поверхностной связи (5 эв), то поверхностные атомы распыляются. При малых энергиях (1–10 кэв) и больших плотностях токов (свыше 10 а/м^2) коэффициент распыления близок к единице. С поверхности полупроводника удаляются окисные пленки, загрязнения и верхние слои решетки. При уменьшении плотности тока коэффициент распыления уменьшается и преобладающим процессом становится ионное внедрение.

Отжиг легированных слоев. Примесные атомы в полупроводнике могут занимать положение внедрения или замещения, но только в последнем случае они обладают электрической активностью

и влияют на проводимость. Непосредственно после ионного легирования существуют как бы два различных профиля распределения концентрации примеси: полный или физический и часть от него — электрически активный. При малых дозах облучения соотношение этих профилей примерно постоянно вдоль глубины внедрения; с увеличением дозы отношение резко возрастает у поверхности, оставаясь примерно тем же по глубине. Поверхностная концентрация может быть очень высокой; при этом вероятность нахождения ионов в замещенном состоянии мала, а во внедренном — велика.

При увеличении температуры подвижность дефектов возрастает и кристаллическая решетка возвращается к упорядоченному состо-

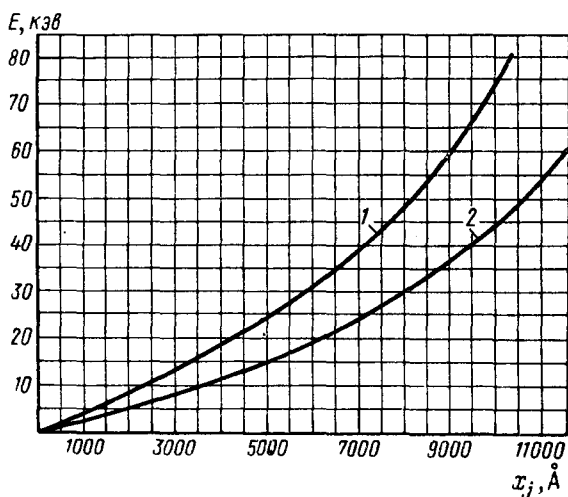


Рис. 7.10. Зависимость глубины внедрения ионов P_{31} в кремний от энергии до отжига (1) и после (2)

янию, так как вакансии и междоузельные атомы рекомбинируют или исчезают на поверхности. Поэтому процесс отжига является необходимой операцией, проводимой после или во время процесса внедрения ионов. Отжиг в диапазоне $500\text{--}700^\circ\text{C}$ устраняет радиационные повреждения решетки и способствует уменьшению различия между физическим и электрически активным профилями распределения концентрации. С ростом температуры отношение их стремится к единице, что свидетельствует о переходе атомов примеси из состояния внедрения в состояние замещения. Отжиг при температуре выше 700°C приводит к изменению физического профиля распределения концентрации, что обусловлено влиянием диффузии.

На рис. 7.10 показана зависимость глубины внедрения ионов фосфора (глубины залегания p - n -перехода) в кремний с электро-

проводностью p -типа $\rho = 4,5 \text{ ом} \cdot \text{см}$, ориентированного в плоскости (110), от энергии до и после отжига. Доза облучения составила 10^{14} см^{-2} .

В отличие от диффузионного легирования или легирования в расплаве, в данном случае концентрация вводимой примеси определяется только дозой облучения.

§ 7.4. Применение ионного легирования

Структура ионно-лучевого p - n -перехода. В неориентированных мишенях распределение длин пробегов и соответственно концентрации примеси описывается функцией Гаусса:

$$C_x = C_{\max} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - R_p}{\Delta R_p} \right)^2 \right] \pm C_B,$$

где знак «+» перед C_B означает, что вводимая примесь однотипна с примесью в мишени.

Максимальная концентрация примеси соответствует среднему нормальному пробегу:

$$C_{\max} = \frac{N}{\sqrt{2\pi} \Delta R_p}.$$

Полная плотность внедренных ионов, отнесенных к единице поверхности, $N \text{ (см}^{-2}\text{)}$ или равная ей доза облучения $Q \text{ (к/м}^2\text{)}$ определяется плотностью ионного тока j и времени облучения t :

$$N = Q/q = jt/q,$$

где q — заряд иона, равный произведению единичного заряда e (κ) на количество удаленных при ионизации электронов $n = 1, 2, 3$ и т. д.

Глубина залегания p - n -перехода $x = x_j$ при $C_x = 0$

$$x_j = R_p + \Delta R_p L,$$

где

$$L = \sqrt{2 \ln \frac{N}{\sqrt{2\pi} \Delta R_p C_B}}.$$

Градиент концентрации примеси в p - n -переходе

$$a_j = \frac{C_B}{\Delta R_p} L.$$

Так как максимум концентрации примеси залегает в глубине под поверхностным слоем (в отличие от диффузионного введения

примеси), то возможно одновременное образование двух p - n -переходов, разделенных базовым слоем толщиной

$$w_6 = 2\Delta R_p L.$$

Поверхностная концентрация

$$C_0 = C_{\max} \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{R_p}{\Delta R_p} \right) \right] \pm C_B.$$

Основные преимущества метода ионного легирования:

а) низкие температуры во время процесса, что позволяет сохранить заданное распределение примесей в структурах и не вызывает заметного изменения электрофизических параметров полупроводника;

б) изотопная чистота легирующей примеси вследствие сепарирования ионов по массам в магнитном поле;

в) возможность внедрения в полупроводники любых примесей до концентраций, определяемых предельной растворимостью, что не всегда достигается методами сплавления или диффузии;

г) возможность создания тонких базовых областей и тонких поверхностных сильно легированных слоев, толщина которых 0,05—0,1 мкм;

д) возможность точного регулирования профиля распределения концентрации примесных атомов путем изменения энергии, интенсивности потока, длительности облучения и угла падения ионов;

е) высокая однородность и воспроизводимость результатов легирования;

ж) возможность осуществления в одной установке комплекса операций, включающих создание активной структуры, контактов и защиты ее поверхности.

С помощью ионных пучков различных элементов можно производить очистку и микрофрезерование поверхности, наносить металлические, диэлектрические и полупроводниковые пленки, осуществлять локальное или сплошное легирование полупроводников.

Вещества — источники ионов. Для создания активных областей в кремнии применяют главным образом легирование ионами бора и фосфора. Причем используют красный порошкообразный или кристаллический фосфор. Ионы бора получают из галогенидов бора. Основное требование к рабочим веществам — обеспечение большого парциального содержания легирующего элемента в образующихся при диссоциации парах. Вследствие выделения изотопной линии при внедрении, в отличие от других методов обработки полупроводников, к рабочим веществам не предъявляются жестких требований по чистоте.

Вещество, используемое в твердой фазе, загружают в тигель источника, пары галогенидов и газы поступают в источник через нагнетатель. Плотности потоков ионов бора находятся в пределах 10^{-3} — 10^{-1} а/м², ионов фосфора — 10^{-3} —1 а/м². Следует отметить, что основную часть ионов, образующихся в источнике, составляют

однозарядные ионы. Кроме них имеются двух- и трехзарядные ионы, но в количествах на 1—2 порядка меньше, что не исключает возможность их практического использования. Так как энергия иона

$$E = qU = enU,$$

то при одном и том же ускоряющем напряжении U ионы с различной кратностью электрического заряда обладают разной энергией. Эта особенность используется при получении ионов с энергиями 400—600 кэв на ионных ускорителях с максимальным напряжением 200 кВ, выпускаемых серийно.

Создание приборов с помощью ионного легирования. Одно из основных преимуществ данного метода — получение базовых областей толщиной в 500—1000 Å — позволяет повысить предельную частоту усиления транзисторов до 10—50 ГГц. При изготовлении транзистора активную область базы создают внедрением ионов бора через окно в окисном слое. Энергия ионов 30 кэв, глубина p - n -перехода 0,2 мкм. Эмиттерную область образуют внедрением или диффузией фосфора или мышьяка. Глубина эмиттерного слоя не должна быть менее 0,1 мкм и более 0,15—0,18 мкм. Ионное внедрение позволяет получать область базы со значительной равномерностью концентрации примеси.

Возможность получения тонких сильно легированных однородных слоев используется для изготовления лавинно-пролетных диодов. Диод изготавливают на эпитаксиальной пленке типа n - n^+ , в которую вводят бор. При диффузионном легировании вследствие большой чувствительности диффузии к несовершенствам кристалла образованные p - n -переходы неоднородны по электрическому пробую. Ионное внедрение при неориентированном облучении не чувствительно к дефектам решетки, и получаемые слои и переходы имеют высокую однородность. Так как ионно-лучевые p - n -переходы имеют глубину 0,1—0,2 мкм, то температура в них может быть ниже, чем в более глубоких диффузионных.

Толщина эпитаксиальной пленки уменьшается до 2—3 мкм, а воспроизводимость процесса эпитаксии становится единственным фактором, определяющим воспроизводимость толщины базы, так как отпадает необходимость в технологических запасах на погрешности диффузии и смещение границы пленки — подложка. Однородность перехода снижает уровень шумов более чем в два раза. Лавинно-пролетные диоды, полученные ионным легированием, при работе на частоте 10 ГГц имеют выходную мощность 1,5 Вт, тогда как диффузионные — около 1 Вт.

Одним из первых промышленных ионно-лучевых приборов были кремниевые солнечные элементы. Уменьшение глубины p - n -перехода до 0,2 мкм позволило повысить чувствительность приборов к коротковолновой части спектра. Разработаны ИК-детекторы на основе InAs и InSb с однородностью в пределах 2% по чувствительности, что на порядок лучше, чем у диффузионных детекторов. Трудность работы с полупроводниковыми соединениями, разлагающи-

мися при нагреве до температур диффузии, делает незаменимым ионное легирование при создании оптикоэлектронных приборов и устройств на арсениде галлия и карбиде кремния.

Преимущества метода ионного легирования реализуются при изготовлении МОП-транзисторов. Частотные ограничения МОП-транзисторов связаны с процессами диффузии и маскирования. В диффузионном МОП-транзисторе необходимо задавать границы металлизации затвора над зазором между областями стока и истока. Из-за допусков на операциях фотолитографии затвор перекрывает сток на 2—3 мкм, что приводит к появлению емкостной обратной связи и ограничивает частотные характеристики приборов. При ионном легировании исток и сток получают внедрением ионов через слой окисла, применяя металлизацию затвора в качестве маски и достигая тем самым самосовмещения (рис. 7.11). Энергия ионов

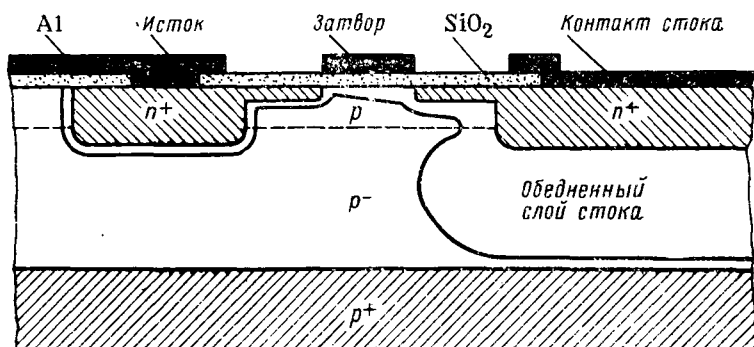
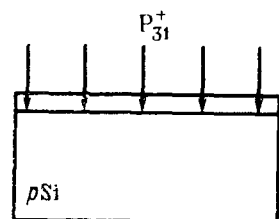


Рис. 7.11. Структура ионно-лучевого МОП-транзистора

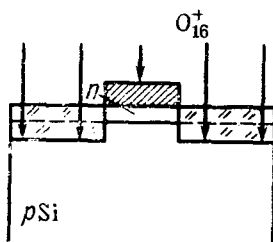
достаточна для прохождения через окисел, но мала для проникновения через металлизацию затвора, что позволяет с высокой точностью совместить границы областей истока и стока с затвором. Емкость обратной связи уменьшается в несколько десятков раз, что обуславливает максимальную частоту генерации 1—2 Гц и коэффициент усиления на ней 4 дБ. Прибор изготовляют на кремнии с электропроводностью n -типа с ориентацией (111) и $\rho = 10 \text{ ом} \cdot \text{см}$. Толщина слоя двуоксида кремния около 1500 Å, толщина алюминиевой металлизации около 4000 Å. Энергия ионов бора — 100 кэв, доза облучения 1—5 · 10¹⁵ см⁻².

Для создания различных диодных структур перспективным является процесс, совмещающий локализацию и пассивацию структуры. Исходную пластину кремния с эпитаксиальным слоем типа p - p^+ подвергают легированию ионами фосфора с $E = 20$ —100 кэв и дозой 1—10 к/м² (рис. 7.12, а). Глубина внедрения ионов фосфора не превышает 0,2—0,3 мкм. Затем на пластину через трафарет напыляют металл, являющийся омическим контактом, например алюминий толщиной 0,4 мкм. Диаметр алюминиевых пятен равен

диаметру проектируемых p - n -переходов. Для локализации структур пластину облучают ионами кислорода или азота с энергией 40—200 кэв и дозой 10^2 — 10^3 к/м². При этом ионы кислорода или азота проникают в кремний на глубину 0,5—1,0 мкм и образуют пассивирующий слой SiO_2 или Si_3N_4 вокруг локализованных p - n -переходов. Омический контакт служит защитной маской, не пропускающей пассивирующие ионы (рис. 7.12, б). Такая структура обладает всеми преимуществами планарных переходов и свободна от основного их недостатка — большой кривизны перехода под краем пассивирующей маски, уменьшающей их рабочие напряжения.



а)



б)

Рис. 7.12. Основные этапы изготовления ионно-лучевого диода

§ 7.5. Методы контроля эллионных структур

Для контроля электронно-лучевых структур применяют металлографические и электрофизические методы, описанные ранее. Использование их для контроля ионно-лучевых структур затруднительно в связи с малой толщиной легированного слоя. Поэтому эти методы претерпели некоторую модернизацию.

Исследование концентрации электрически активных примесей осуществляют с помощью описанного ранее метода дифференциальной электропроводности. Существенной трудностью является удаление слоев кремния толщиной 0,02—0,05 мкм, что необходимо для точного измерения. Удаление таких слоев производят путем анодного окисления. В качестве электролитов используют

растворы азотнокислого калия в этиленгликоле и N-метилацетамиде с концентрацией 0,04 н. Анодное напряжение не превышает 200—250 в, плотность тока 50—60 а/м². Толщина слоя окисла составляет 500—1000 Å, причем доля кремния в нем в среднем 0,35. Окисел удаляют в плавиковой кислоте. Измерение толщины удаленного слоя кремния производят методом взвешивания пластины до и после удаления слоя. Применяют также измерение толщины пленки окисла и пересчет ее в толщину удаленного кремния с помощью приведенного коэффициента 0,35. Перед каждым окислением измеряют поверхностное сопротивление, что позволяет с помощью выражения (5.43) вычислить концентрацию примесей в удаленном слое, влияющих на проводимость.

Исследование полной концентрации внедренной примеси. Этот метод не требует предварительного отжига и основан на радиоактивационном анализе внедренных ионов. Нейтронная активация является наиболее подходящим методом определения концентрации

ионов фосфора и мышьяка. Исследуемые образцы помещают в реактор, где подвергают бомбардировке нейтронами. Вследствие захвата ядрами некоторых атомов фосфора нейтрона образуется радиоактивный изотоп P^{32} с периодом полураспада около 14 суток. Одновременно возникает изотоп кремния Si^{31} с периодом полураспада около 2,6 ч, поэтому пластины перед измерением выдерживают, чтобы активность кремния упала. Затем производят послойное удаление тонких слоев кремния, а растворенный окисел выпаривают. Полученный осадок исследуют с помощью счетчика Гейгера — Мюллера и определяют интенсивность β -распада. На основании сравнения интенсивности излучения каждого осадка с эталонами

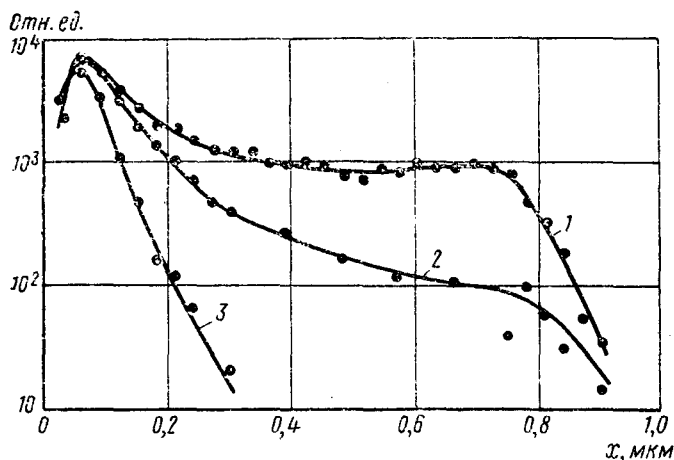


Рис. 7.13. Кривые распределения концентрации фосфора в кремнии при различных углах отклонения пучка от направления [110]:
1— 0° ; 2— 2° ; 3— 8°

в абсолютных единицах строят кривую распределения концентрации ионов фосфора по глубине пробега. Для этой же цели применяют ионное легирование радиоактивным изотопом фосфора. На рис. 7.13 приведены кривые распределения концентрации ионов фосфора в кремнии при различных углах отклонения пучка ионов от направления [110], исследованные радиоактивационным методом.

Метод p - n -перехода. Недостатком двух описанных методов является трудность определения толщины удаленного слоя. Метод p - n -перехода облегчает эту задачу. Для исследования готовят 6—10 образцов кремния с удельным сопротивлением, различающимся между каждым последующим образцом на порядок. Процесс подготовки пластин и внедрение ионов противоположного типа электропроводности осуществляют в идентичных условиях. После

отжига изготавливают сферические или косые микрошлифы, на которых выявляют p - n -переходы. Так как глубина залегания p - n -перехода может быть измерена достаточно точно, а концентрация внедренных ионов на этой глубине равна концентрации примеси в исходной пластине кремния, то на основании этих данных можно построить точные кривые распределения концентрации внедренных ионов. На рис. 7.14 приведены определенные этим методом профи-

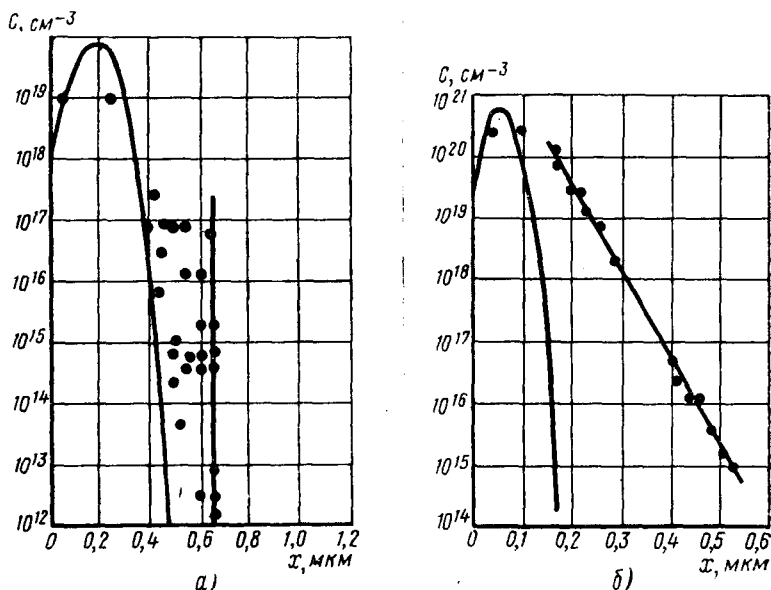


Рис. 7.14. Кривые распределения концентрации ионов, внедренных с энергией 50 кэв в кремний:

а — бора, $N = 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$; б — фосфора, $N = 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$

ли распределения концентрации различных ионов в кремнии с ориентацией (111) и показаны теоретические кривые.

§ 7.6. Использование оптических квантовых генераторов

Наряду с электронными и ионными лучами в производстве полупроводниковых приборов используют световые лучи оптических квантовых генераторов (ОКГ) — лазерную обработку.

К преимуществам лазерной обработки относятся: высокая удельная плотность энергии, простота управления установкой, высокая производительность, возможность автоматизации обработки и возможность проведения технологических операций в окружающей атмосфере или при необходимости — в нейтральной или восстановительной средах. Одной из основных трудностей является

фокусировка светового луча, обладающего высокой плотностью энергии.

С помощью луча ОКГ можно производить микрофрезерование, отверстия в металлах, полупроводниках и диэлектриках при монтаже, изготовлении масок и шаблонов, осуществлять микросварку (в том числе металла с керамикой), приваривать тонкие проволоочные электроды и создавать *p-n*-переходы. Применяя луч ОКГ, многие операции можно выполнять более просто и эффективно, чем при использовании электронного луча.

Для пробивания отверстий, микрофрезерования и других подобных работ успешно применяют установки ОКГ на базе кристалла рубина, функционирующие в импульсном режиме. Для сварки, пайки, создания *p-n*-переходов предпочтительнее использовать газовые лазеры непрерывного действия.

В связи с тем что отсутствуют достаточно полные сведения о механизме воздействия луча ОКГ на различные материалы и о возможных путях управления этим воздействием, ведутся значительные теоретические и экспериментальные работы по исследованию этих процессов.

Комбинирование технологии диффузии, эпитаксиального наращивания, вакуумного напыления, электронного, ионного и светового (оптического) лучей, видимо, откроет новые возможности в производстве полупроводниковых приборов.

МЕТОД КОНДЕНСАЦИИ В ВАКУУМЕ

§ 8.1. Основные положения кинетической теории газов

Создание тонких металлических, полупроводниковых и изолирующих пленок методом конденсации вещества в вакууме занимает большое место в полупроводниковом приборостроении и микроэлектронике. Металлические пленки применяют при изготовлении омических контактов, нанесении электродных металлов при сплавлении, создании барьеров Шоттки, изготовлении коммутирующих элементов и резисторов в микросхемах. Диэлектрические пленки используют при защите тонкопленочных сопротивлений, создании тонкопленочных конденсаторов, защите поверхности полупроводниковых пластин и *p-n*-переходов, изоляции электродов и других целей.

Метод конденсации состоит в получении в вакууме направленного потока атомных частиц (отдельных атомов, молекул или ионов) исходного твердого или расплавленного вещества и последующей их конденсации на подложке, в результате которой образуются аморфные, поликристаллические или монокристаллические пленки данных веществ.

Существуют два метода создания направленных потоков атомных частиц в вакууме: термическое испарение и катодное распыление.

Исторически первым начал развиваться метод катодного распыления. Возможность применения электрического разряда в разреженных газах для осаждения металлических пленок была отмечена в 1858 г., но только в 1886 г. была сконструирована специальная установка катодного распыления, применявшаяся для осаждения металлических пленок при изготовлении зеркал.

Термическое испарение для создания тонких пленок впервые было опробовано Т. Эдисоном в 1890 г., а в 1928 г. были применены проволочные испарители. На рис. 8.1 показана универсальная установка, позволяющая производить получение пленок обоими названными методами.

Наибольшее развитие оба метода получили сначала в электровакуумной, а затем и в полупроводниковой промышленности.

Для характеристики процессов в вакууме справедлива формула Менделеева — Клайперона

$$pV = \frac{M}{\mu} R_0 T, \quad (8.1)$$

где p — давление газа, н/м^2 ;
 V — объем газа, м^3 ;
 M — масса газа, кг ;
 μ — молекулярный вес (молекулярная масса), кг/моль ;
 $R_0 = 8,314 \cdot 10^3$ — универсальная газовая постоянная, $\text{дж/моль} \cdot \text{град} = \text{нм/кмоль} \cdot \text{град}$;
 T — абсолютная температура, $^\circ\text{К}$.
 R_0 — это работа, затраченная на расширение одной грамм-молекулы газа при нагревании на 1° и постоянном давлении.

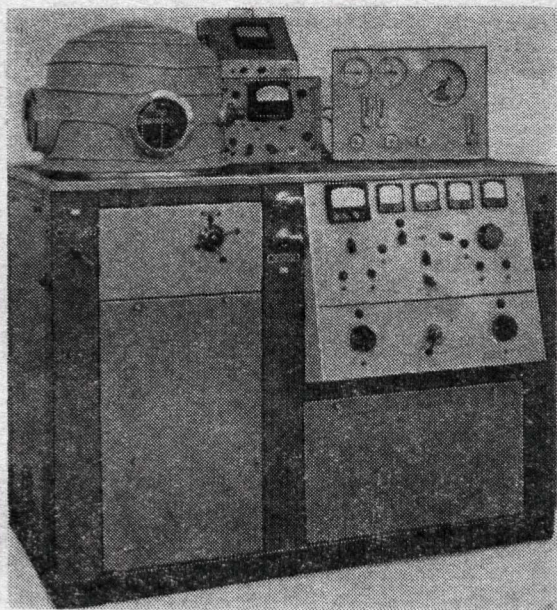


Рис. 8.1. Универсальная установка термического испарения и катодного распыления

Давление, обусловленное ударом молекул о стенку сосуда,

$$p = \frac{2}{3} n \frac{mv^2}{2}. \quad (8.2)$$

Здесь n — концентрация молекул, м^{-3} ;
 v — среднеквадратичная скорость молекул, м/сек ;
 m — масса одной молекулы;

$$m = \mu / N_A, \quad (8.3)$$

где $N_A = 6,023 \cdot 10^{26} \text{ кмоль}^{-1}$ — число молекул в 1 кмоль любого газа (число Авогадро).

Концентрация молекул газа при нормальных условиях определяется числом Лошмидта

$$n_A = N_A/V_A = 2,687 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}, \quad (8.4)$$

где $V_A = R_0 T/p = 22,4135 \text{ м}^3/\text{кмоль}$ — мольный объем.

Средняя кинетическая энергия молекул газа прямо пропорциональна температуре:

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{3}{2} kT, \quad (8.5)$$

где $k = R_0/N_A = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/град}$ — постоянная Больцмана.

На основании равенств (8.2) и (8.5) находим выражение, связывающее концентрацию молекул и давление газа:

$$n = \frac{p}{kT} = 7,244 \cdot 10^{23} \frac{p}{T}. \quad (8.6)$$

Если газ является смесью нескольких газов, то его давление складывается из парциальных давлений каждого газа, входящего в смесь (закон Дальтона):

$$p = \sum_1^k p_i.$$

Среднеквадратичная скорость молекул газа

$$v = \sqrt{\frac{3kT}{m}} = \sqrt{\frac{3R_0T}{\mu}} = 157,94 \sqrt{\frac{T}{\mu}}. \quad (8.7a)$$

Среднеарифметическая скорость молекул газа

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} = \sqrt{\frac{8R_0T}{\pi \mu}} = 145,51 \sqrt{\frac{T}{\mu}}. \quad (8.7b)$$

Средняя наиболее вероятная скорость молекул газа

$$v_0 = \sqrt{\frac{2kT}{m}} = \sqrt{\frac{2R_0T}{\mu}} = 128,95 \sqrt{\frac{T}{\mu}}. \quad (8.7b)$$

Значения v_0 , $\bar{v}$, v для некоторых газов приведены в табл. 8.1.

Количество частиц, ударяющихся в течение 1 сек о поверхность вакуумной камеры размером 1 м²,

$$\nu = \frac{1}{4} n \bar{v}. \quad (8.8)$$

По этой же формуле определяют количество частиц, испаряющихся за 1 сек с 1 м² поверхности твердого или жидкого тела в вакууме.

Таблица 8.1

Газ	v_0	$\bar{v}$	v'
	м/сек		
He	1487	1694	1838
O ₂	377	425	461
N ₂	398	453	492
CO ₂	318	361	392

Средняя длина свободного пробега $\bar{\lambda}$ определяется среднеарифметической скоростью и числом столкновений молекулы с другими молекулами в 1 сек (z):

$$\bar{\lambda} = \frac{\bar{v}}{z} = \frac{1}{\sqrt{2} \pi n \sigma^2} = \frac{kT}{\sqrt{2} \pi \sigma^2 p}, \quad (8.9)$$

где σ — эффективный диаметр молекулы газа (для воздуха $\sigma = 3,7 \cdot 10^{-10}$ м).

В табл. 8.2 приведены соотношения между величинами давления и $\bar{\lambda}$ (1 мм рт. ст. = 133,3 н/м² = 1 тор).

Таблица 8.2

p , мм рт. ст.	$\bar{\lambda}$	p , мм рт. ст.	$\bar{\lambda}$
760	620 Å	10 ⁻⁶	47 м
1	47 мкм	10 ⁻⁸	4,7 км
10 ⁻²	4,7 мм	10 ⁻¹²	47000 км
10 ⁻⁴	47 см		

Для конденсации в вакууме стремятся использовать молекулярные потоки, в которых атомы или молекулы движутся прямолинейно, без столкновений. Для молекулярных потоков справедливы законы Кнудсена, являющиеся аналогами световых законов Ламберта:

1) интенсивность испускания под углом φ относительно нормали к испускающей плоскости пропорциональна $\cos \varphi$; падение молекулярного потока на плоскую поверхность также подчиняется этому закону;

2) количество атомов, падающих в единицу времени на единицу поверхности из точечного источника, обратно пропорционально квадрату расстояния от источника до поверхности.

Форма и взаимное расположение источника атомов и подложки, на которой они конденсируются, определяют распределение конденсата по поверхности плоской подложки.

Толщина конденсата на подложке Δ для точечного источника

$$\Delta = \frac{G_0}{4\pi\gamma} \cdot \frac{\cos \theta}{r^2},$$

где G_0 — скорость испарения;

γ — плотность конденсата;

θ — угол падения молекулярного потока на поверхность;

r — расстояние от источника.

§ 8.2. Термическое испарение

Устройства для испарения. На рис. 8.2 показана схема вакуумной системы. Она состоит из вакуумной камеры 1, в которой размещаются образцы 2, испаритель 3 и заслонка 4. Измерение да-

вления до $1 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст. производят термопарным манометром, а ниже $1 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст. — ионизационным, которые объединяются в одном приборе 5. В установку может быть вмонтирован измеритель парциальных давлений. Предварительный вакуум достигается с помощью форвакуумного насоса 6 при закрытом клапане 7 диффузионного насоса и кране 8 и открытом кране 9. После получения давления около 10^{-2} мм рт. ст. кран 9 закрывают и открывают кран 8 и клапан 7, в результате чего осуществляется откачка высоковакуумным диффузионным насосом 10. В случае аварийного отключения форвакуум-

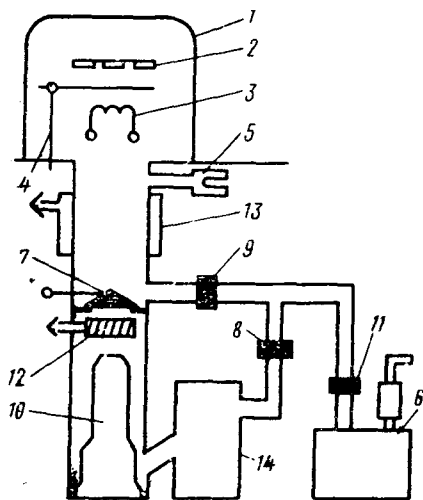


Рис. 8.2. Схема вакуумной установки

ного насоса срабатывает электромагнитный клапан 11, предохраняющая систему от натекания в нее атмосферного воздуха через неработающий форвакуумный насос. На входе диффузионного насоса находится водоохлаждаемый маслоотражатель 12, препятствующий попаданию в камеру паров масла. Для этого же, а также для конденсации паров остаточных газов служит ловушка, наполняемая жидким азотом 13. На выходе диффузионного насоса расположен форбаллон 14 объемом в 10—20 л, позволяющий диффузионному насосу длительное время (до 30 мин) работать без форвакуумного насоса. В настоящее время все шире используют безмасляную откачку с применением молекулярных и титановых геттеро-

ионных насосов. Последние позволяют достигать разрежение до 10^{-12} мм рт. ст.

Испарители. Термическое испарение материалов в вакууме производят из испарителей, изготовленных из проволоки либо фольги, или тиглей.

Чаще всего применяют испарители с косвенным нагревом. Прямонакальные испарители можно использовать только для материалов, обладающих заметной сублимацией (хром, титан, железо). Наиболее распространенные материалы для испарителей с косвенным нагревом — вольфрам и тантал (проволока $\varnothing$ 0,5—1 мм), молибден и тантал (фольга $\varnothing$ 0,1—0,3 мм), так как они практически не взаимодействуют с большинством испаряемых веществ и не загрязняют конденсат.

Тигли изготавливают из кварца, графита, стеклографита, керамики.

Форма испарителя зависит от агрегатного состояния, в котором находится испаряемый материал. Порошкообразные вещества испаряют из тиглей и лодочек, что особенно удобно для несмачивающих материалов. Для испарения крупнозернистых порошков используют проволочные спиральные конические испарители. В этих случаях подложки располагают над источниками и крепят с помощью прижимов.

Если испаряемый металл в виде проволоки или фольги относится к числу смачивающих, то применяют линейные ленточные или линейные и цилиндрические спиральные проволочные испарители. Металл навешивают на них в виде гусариков или навивают тонкой проволочной спиралью. Подложку можно

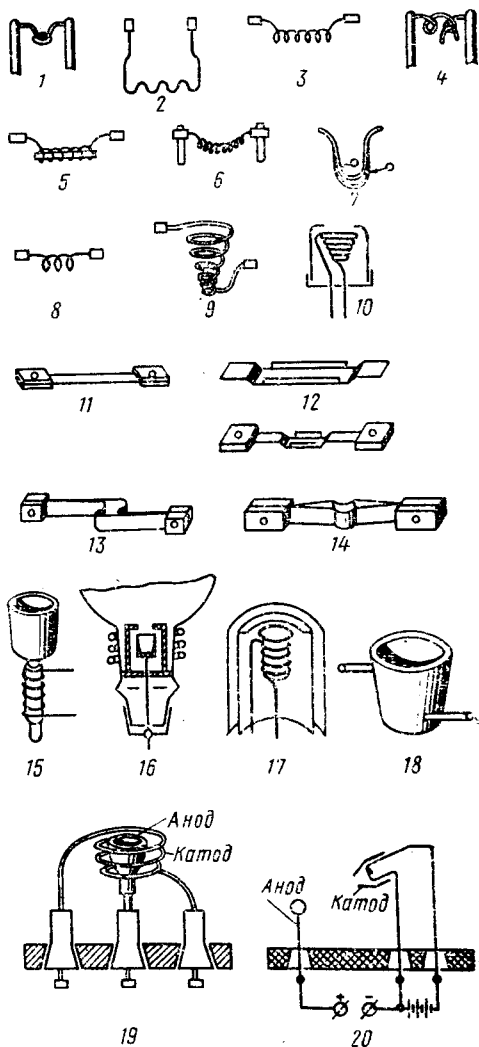


Рис. 8.3. Виды испарителей: проволочные (1—10), ленточные (11—14) тигли (15—19) и электронно-лучевой (20)

размещать как над испарителем, так и под ним. На спиральные и линейные испарители нанесение металла можно производить гальванически, что удобно для порошкообразных материалов, например хрома.

На рис. 8.3 показаны некоторые испарители.

В соответствии с физическими процессами, совершающимися при испарении или распылении материалов в вакууме, в вакуумной камере можно выделить три основных области: источника паров, переноса паров и конденсации паров.

Область источника паров

В области источника происходит испарение материала. Молекулы, обладающие наибольшей кинетической энергией, преодолевают силы молекулярного притяжения и уходят с поверхности расплава. Испарение может происходить непосредственно из твердой фазы (сублимация).

Средняя энергия молекул, оставшихся в расплаве после удаления наиболее «нагретых», уменьшается; поэтому процесс испарения может сопровождаться охлаждением расплава. Практически к испарителю непрерывно подводится тепло и процесс испарения идет изотермически. Количество тепла, которое необходимо подвести для испарения единицы массы жидкости при неизменном внешнем давлении, называют *удельной теплотой испарения*. Некоторое количество испаренных молекул проникает обратно в расплав и конденсируется с выделением теплоты испарения. В замкнутой системе устанавливается динамическое равновесие между испарением и конденсацией, которому соответствует равновесное давление паров (насыщающий пар). Давление насыщающего пара зависит только от температуры:

$$p = BT^{-1/2} \exp\left(-\frac{C}{T}\right). \quad (8.10)$$

На рис. 8.4 приведена зависимость давления паров от температуры для различных металлов.

Если система не является замкнутой, то равновесное давление паров существует только над расплавом и уменьшается по мере удаления от источника. При достаточно длительном времени весь расплав испаряется.

Несмотря на глубокий вакуум в испарителе не наблюдается кипения расплавленного металла. Чтобы началось кипение, необходимо перегреть объем расплава относительно поверхности, тогда появится вероятность испарения внутри расплава. Однако создать заметный градиент температуры практически невозможно вследствие хорошей теплопроводности расплавленного металла. Кроме того, для кипения в расплаве должны образоваться газовые пузырьки. Внутри этих пузырьков происходит испарение, они растут и выходят на поверхность. Газ, содержащийся в источнике, для большинства металлов при нагреве до температуры испарения

полностью десорбируется и пузырьки не образуются. Иногда, если десорбция не завершилась, происходит локальное вскипание расплава, сопровождающееся разбрызгиванием капель. Чтобы защитить поверхность подложки от конденсации десорбирующихся веществ, от капель расплава и возможных загрязнений, находящихся на поверхности источника, перед нею ставят заслонку, отодвигаемую через некоторое время после начала испарения.

Скорость испарения зависит от давления паров испаряемого вещества и давления остаточных газов. При больших давлениях происходит рассеяние испарившихся молекул, приводящее к их хаотическому диффузионному перемещению, и эффективная скорость

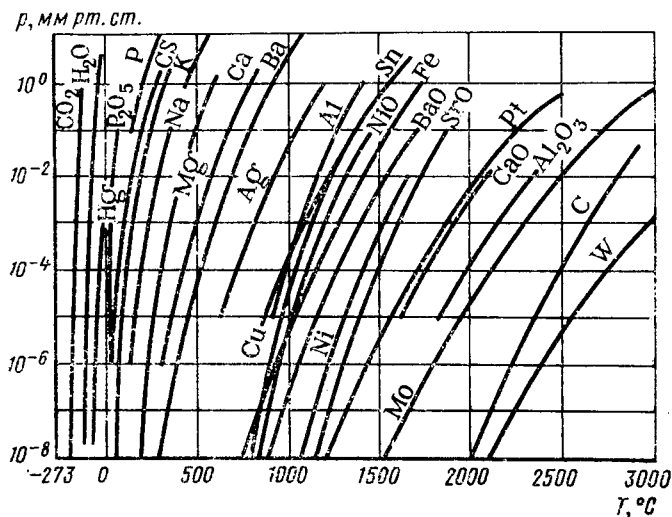


Рис. 8.4. Зависимость давления паров для различных материалов от температуры

испарения уменьшается. При молекулярном режиме испарения, когда остаточное давление газов мало, а упругость паров не превосходит 1 мм рт. ст., можно считать скорость испарения не зависящей от давления.

Скорость испарения G определяется числом частиц, покидающих в единицу времени единицу поверхности испаряемого вещества. Подставляя выражения (8.6) и (8.76) в (8.8), получим

$$G = v = 2,635 \cdot 10^{24} \frac{p}{\sqrt{\mu T}}. \quad (8.11)$$

Обратная зависимость G от $\sqrt{T}$ обусловлена тем, что в (8.11) не раскрыта температурная зависимость давления. С учетом (8.10)

$$G = 2,635 \cdot 10^{24} \frac{B}{T \sqrt{\mu}} \exp\left(-\frac{A}{T}\right).$$

Чтобы выразить значение скорости испарения в единицах массы, следует выражение (8.8) умножить на массу одной молекулы испаряемого вещества:

$$G = m \nu. \quad (8.12)$$

В табл. 8.3 приведены значения скоростей испарения материалов при температурах, соответствующих давлению паров 10^{-2} мм рт. ст. Для Cd, Si, Mg и Zn даны температуры сублимации.

Таблица 8.3

Материал	T°, C	$G \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{сек}}$	Материал	T°, C	$G \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{сек}}$
Al	996	0,85	Cu	1273	1,18
B	1335	4,75	Mo	2533	1,05
Bi	698	2,7	As	280	—
W	3309	1,45	Ni	1510	1,06
Ga	1093	1,32	Sn	1189	1,65
Ge	1251	1,27	Pd	1566	1,4
Fe	1447	1,02	Pt	2090	1,68
Au	1465	1,95	Pb	718	2,65
In	952	—	Ag	1047	1,67
Cd	264	2,65	Sb	678	2,95
Si	1312	0,77	Ta	3070	1,35
Mg	443	1,08	Ti	1546	0,95
Mn	980	1,22	Cr	1205	1,1
			Zn	343	1,9

Испарение сплавов. Практически часто бывает необходимо получить не элементарный конденсат, а бинарный или более сложный сплав. При испарении сплава вследствие различия в упругости паров составляющих компонентов состав конденсата отличается от состава источника.

Для оценки парциального давления применим закон Рауля: «относительное понижение давления насыщенного пара растворителя над раствором равно мольной доле растворенного вещества»:

$$\frac{p_A^0 - p_A}{p_A^0} = S_B,$$

где p_A^0 — давление насыщенного пара элементарного компонента A;

$p_A = s_A p_A^0$ — давление пара компонента A над раствором;
 s_B, s_A — молярные доли компонентов B и A в растворе.

Таким образом, парциальное давление над раствором ниже, чем давление паров над чистым веществом при той же температуре.

Для получения состава конденсата, соответствующего составу исходного сплава, рекомендуется применять форсированный режим — испарение при повышенной температуре в течение небольшого отрезка времени. Поверхность источника быстро обедняется более летучим компонентом и происходит испарение второго компонента, так как диффузия из объема не успевает восполнить ушедшее летучее вещество.

Этим же целям служит дискретное испарение, при котором небольшие порции испаряемого сплава периодически сбрасываются в разогретый тигель, из которого тут же без остатка испаряются на подложку. Разновидностью этого способа является создание молекулярного потока из замкнутого тигля со специальным клапаном. В объеме тигля устанавливается равновесное давление паров сплава, после чего открывается клапан и молекулярный поток устремляется на подложку. Этот процесс может совершаться многократно.

Для получения конденсата в виде сплава эффективным является метод В. А. Векшинского. Испарение чистых компонентов бинарного сплава производится одновременно из двух источников, нагретых до различных температур, что и определяет состав сплава. Для испарения более сложных сплавов используют соответствующее число испарителей.

Область переноса паров

Условия для молекулярного потока создаются при длине свободного пробега молекул остаточного газа, в 5—10 раз превышающей размер области переноса паров. Последняя составляет 10—20 см. Следовательно, для обеспечения $\bar{\lambda} > 0,5—2,0$ м вакуум должен быть не хуже $10^{-4}—10^{-5}$ мм рт. ст. (табл. 8.2). Однако это не устраняет возможности загрязнения конденсата молекулами остаточных газов, концентрация которых составляет согласно выражению (8.6) $3,2 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$ для $p = 10^{-5}$ мм рт. ст. и $T = 300^\circ \text{К}$. Эта концентрация сравнима с плотностью атомов в молекулярном потоке n_m , которая равна количеству молекул или атомов испаряемого вещества N , находящихся в области переноса паров, деленному на объем этой области (V):

$$n_m = N/V. \quad (8.13)$$

Будем считать, что испарение происходит из капли $\varnothing 1 \text{ мм}$, а подложка расположена от нее на расстоянии $r = 10 \text{ см}$. Объем области переноса паров

$$V = \frac{4}{3} \pi r^3. \quad (8.14)$$

Количество молекул испаренного вещества связано с весом известным соотношением

$$N = P \frac{N_A}{\mu}. \quad (8.15)$$

Вес испаренного вещества можно определить, зная скорость испарения G , время испарения t и площадь, с которой происходит испарение $\pi\Phi^2$:

$$P = Gt\pi\Phi^2. \quad (8.16)$$

Время испарения равно среднему времени пролета испаренными атомами области переноса:

$$\bar{t} = r/\bar{v}. \quad (8.17)$$

Объединяя выражения (8.13) — (8.17) и используя (8.3), (8.6), (8.8), (8.12), получим формулу для расчета концентрации атомов испаряемого вещества в области переноса для сферического испарителя:

$$n_m = 1,357 \cdot 10^{22} \left(\frac{\Phi}{r} \right)^2 \frac{p}{T}. \quad (8.18)$$

Концентрация испаряемых атомов у подложки равна $6,0 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-3}$, т. е. в 50 раз меньше, чем концентрация молекул остаточных газов. Следовательно, только в вакууме около $2 \cdot 10^{-8} \text{ мм рт. ст.}$ концентрация молекул остаточного газа будет на порядок меньше концентрации атомов испаряемого вещества.

Область конденсации паров

После соударения атомов паровой фазы с подложкой могут происходить три явления: адсорбция, приводящая к окончательному оседанию атома, адсорбция, приводящая к реиспарению через некоторое время, и отражение сразу после удара. Отражение обычно имеет небольшую вероятность. Вероятность реиспарения (в секунду)

$$\omega = f \exp \left(- \frac{\Delta E_a}{kT} \right),$$

где $f = 10^{14} \text{ сек}^{-1}$ — частота колебаний адсорбированного атома;
 ΔE_a — энергия активации десорбции или энергия связи адсорбированного атома с поверхностью.

При $\Delta E_a \gg kT$, что бывает при низких температурах или больших ΔE_a , вероятность реиспарения мала.

Адсорбированные атомы мигрируют по поверхности и при столкновении друг с другом образуют скопления. В скоплениях между атомами действуют силы связи, определяемые энергией

конденсации, поэтому такие агрегаты (дублеты, триплеты и т. д.) обладают повышенной стабильностью. Однако при малых размерах агрегатов отношение их поверхности к объему велико, поэтому велика их поверхностная энергия. Последнее обуславливает увеличение давления пара над поверхностью, что ведет к диссоциации скопления. Существует критический размер скоплений, при котором они обладают минимальной устойчивостью. Добавление атома к такому критическому зародышу приводит к его стабилизации. В дальнейшем зародыш приобретает тенденцию к росту. Удаление одного атома приводит к распаду критического зародыша. Начальный рост пленок в вакууме состоит из трех этапов: конденсация атомов пара на подложке, образование многоатомных зародышей и превращение зародышей в большие агрегаты.

Вероятность испарения атомов с подложки тем больше, чем выше ее температура и ниже температура испарения вещества. Для каждого вещества существует критическая температура подложки, выше которой атомы молекулярного потока полностью отражаются от подложки. Энергия теплового движения, которую они приобретают от подложки, превышает энергию связи атомов с поверхностью, миграция оказывается незначительной, скопления не образуются и атомы испаряются с подложки. Увеличение плотности молекулярного потока приводит к тому, что атомы, испаряющиеся с подложки, захватываются частицами молекулярного потока и, вновь осаждаясь на подложке, образуют ядра конденсации. Кроме того, с увеличением плотности потока уменьшается длина пути, необходимая мигрирующим атомам для объединения в критические зародыши. Поэтому с увеличением плотности молекулярного потока возрастает критическая температура.

Чем большее число атомов бомбардирует подложку в единицу времени, тем, следовательно, больше вероятность образования центров конденсации, обусловленных либо столкновением с ранее осажденными атомами, либо миграцией по поверхности.

Таким образом, можно говорить о критической плотности молекулярного потока, ниже которой при данной температуре конденсат не образуется.

Критическая плотность паров экспоненциально зависит от температуры подложки и пропорциональна вероятности ω .

Следует отметить, что критические плотности потока наблюдаются только на подложках, поверхность которых содержит загрязнения — адсорбированные остаточные газы или пары масла из диффузионного насоса. Это уменьшает число поверхностных атомов, с которыми могут быть установлены стабильные связи атомами молекулярного потока. Кроме того, сила связи через адсорбированный слой меньше. При тщательной очистке подложки конденсат образуется при потоках весьма малой интенсивности.

Сопоставим количество остаточных атомов (молекул) воздуха, находящихся на единице поверхности в единицу времени v , и количество атомов молекулярного потока, попадающих на ту же поверхность также в единицу времени n_s . Величина v рассчитывается

по формуле (8.8) или (8.11). Для воздуха $\mu = 29 \cdot 10^{-3}$ кг/моль $T = 300^\circ\text{К}$. При этом в случае давления $p = 10^{-5}$ мм рт. ст. $v = 1,2 \cdot 10^{21}$ м⁻²·сек⁻¹.

Молекулярный поток атомов испаряемого вещества на поверхности сферической капли имеет интенсивность $G\pi\Phi^2$. Его плотность на поверхности подложки площадью $4\pi r^2$

$$n_s = 6,6 \cdot 10^{23} \left(\frac{\Phi}{r} \right) \frac{p}{\sqrt{\mu_n T_n}}, \quad (8.19)$$

где T_n — температура атомов испаренного вещества, которую можно принять близкой к температуре подложки.

В случае испарения алюминия для ранее приведенного примера $\mu_{\text{Al}} = 27 \cdot 10^{-3}$ кг/моль и $n_s = 3,1 \cdot 10^{19}$ м⁻²·сек⁻¹. Следовательно, на каждый попадающий на подложку атом алюминия приходится около 40 адсорбированных атомов воздуха. Чтобы соотношение было $v : n_s \leq 1 : 10$ нужен вакуум не хуже $2,5 \cdot 10^{-8}$ мм рт. ст. Эксперименты показывают, что только вакуум не хуже 10^{-9} мм рт. ст. дает улучшенные свойства конденсата. Улучшить отношение v/n_s можно и другим путем — увеличив интенсивность молекулярного потока, т. е. увеличив температуру (скорость) испарения. Этот способ называют форсированным нагревом.

Коэффициент конденсации. Для большинства материалов каждый атом, ударившийся о подложку, адсорбируется ею. Наряду с этим может происходить отражение части атомов от поверхности подложки. Коэффициент конденсации определяется отношением числа атомов, сконденсировавшихся на поверхности, к числу атомов, ударившихся о нее. Он численно равен отношению скорости конденсации к скорости испарения.

Начальное значение коэффициента конденсации зависит от давления остаточных газов. Оно тем ближе к единице, чем ниже это давление. По мере роста пленки величина его возрастает, пока не достигнет установившегося значения, которое также зависит от давления остаточных газов. При высоких давлениях газы, адсорбированные подложкой, значительно уменьшают число центров конденсации. Атом пара, поступающий на подложку, должен пройти большой путь, прежде чем он достигнет центра конденсации. С увеличением времени существования несвязанных атомов в значительной степени возрастает вероятность испарения и отражения. Конденсация происходит главным образом на нескольких участках осаждения до тех пор, пока не образуется островковая структура.

Структура тонких пленок может быть стабильной в форме, близкой к моноатомным слоям, или в форме агломератов. Если L — скрытая теплота испарения атома металла с подложки, а L_m — металла с металла, то при $L < L_m$ образуются агломераты, а при $L > L_m$ — однородный слой. Большинство материалов образуют агломераты. Склонность к агломерации уменьшается при увеличении скорости конденсации пленки. Это связано с большим чис-

лом зародышей, из которых развивается мелкозернистая структура.

Пленка на ранних стадиях роста обладает островковой структурой. Если размеры критических зародышей и свободная энергия их образования велики, то пленка состоит из небольшого числа крупных агрегатов. Если эти величины малы, то пленка состоит из многочисленных мелких скоплений. Такая пленка становится сплошной при относительно малом значении средней толщины. Крупная островковая структура сохраняется до сравнительно больших толщин пленки. Следовательно, условия роста пленки определяют соответственно мелкозернистую или крупнозернистую структуру.

§ 8.3. Катодное распыление

Металлы с высокой температурой испарения и низким давлением паров целесообразнее наносить катодным распылением, так как термическое испарение их связано с созданием специальных высокотемпературных испарителей.

Тлеющий разряд. Между двумя электродами, находящимися в газе при небольшом давлении ($1-10^{-2}$ мм рт. ст.) и при подаче постоянного или переменного напряжения, зажигается тлеющий разряд. Он может быть самостоятельным или несамостоятельным. Последний требует для своего поддержания эмиссии электронов из катода или образования зарядов в межэлектродном промежутке под действием других внешних факторов. Самостоятельный разряд горит без дополнительной ионизации или эмиссии электронов.

Вначале с увеличением напряжения сила тока растет очень медленно. Эту область называют несамостоятельным тлеющим разрядом, так как какое-либо свечение отсутствует. При достижении потенциала зажигания возникает нормальный тлеющий разряд с характерным неравномерным свечением.

В пространстве между катодом и анодом можно видеть следующие основные области: узкое темное астоново пространство 1, заметное только при низких давлениях; узкое катодное свечение 2; более широкое темное круково или катодное пространство 3; наиболее яркое, но не широкое, отрицательное тлеющее свечение 4, для которого характерно не нарастание, а спад потенциала; темное фарадеево пространство 5; широкий светящийся положительный столб 6; яркое анодное свечение 7 и узкое темное анодное пространство 8 (рис. 8.5).

Уменьшение давления ведет к расширению крукова пространства и к такому же сокращению положительного столба. При $p=10^{-2}$ мм рт. ст. круково пространство имеет длину в несколько сантиметров. Когда оно расширяется до анода, разряд прекращается. В темном катодном пространстве, где сосредоточено максимальное электрическое поле, происходит ускорение электронов до энергии ионизации газа, что необходимо для поддержания разряда. Положительный столб только осуществляет проводимость

между анодом и областью отрицательного тлеющего свечения. Для поддержания самостоятельного разряда каждый электрон, движущийся в газе, должен возбуждать такое количество положительных ионов, которое при соударении с катодом освобождает из него не менее одного нового электрона. Уменьшение давления увеличивает длину пробега электронов; поэтому для той же степени ионизации электрон должен пройти большой путь и кружково пространство расширяется. При сближении электродов вначале уменьшается длина положительного столба, вплоть до полного исчезновения, затем — темного фарадеева пространства и отрицательного тлеющего свечения, после чего заряд гаснет.

Это связано с тем, что длина ионизационного пути электронов при неизменном напряжении на электродах уменьшается незначи-

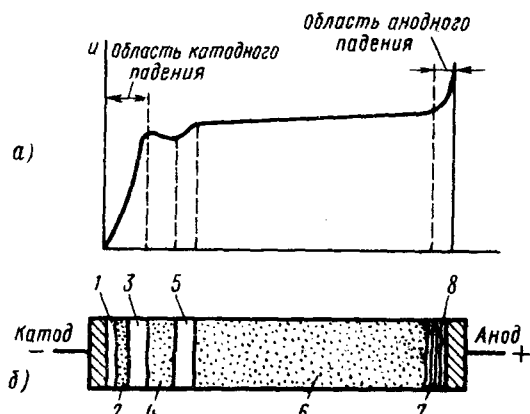


Рис. 8.5. Падение потенциала в тлеющем разряде (а) и структура разрядного столба (б)

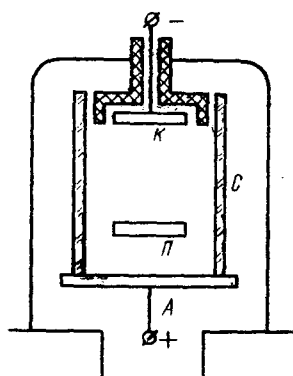


Рис. 8.6. Схема камеры для катодного распыления

тельно (но уменьшается, так как электрическое поле в катодном пространстве немного возрастает вследствие перераспределения падения потенциала между прикатодным пространством и положительным столбом). При нормальном тлеющем разряде только часть поверхности катода покрыта свечением. С увеличением напряжения вырастает сила тока, но плотность тока остается постоянной. Когда свечение охватывает всю поверхность катода, рост силы тока связан с ростом плотности тока. Эту область называют аномальным тлеющим разрядом. При дальнейшем увеличении тока значительная мощность, рассеиваемая на катоде, приводит к его разогреву и появлению термоэлектронной эмиссии — тлеющий разряд переходит в дуговой. Напряжение падает и сила тока определяется сопротивлением внешней цепи.

Теория катодного распыления. В рабочей камере устройства для катодного распыления, показанной на рис. 8.6, размещены водоох-

лаждаемый катод K из распыляемого материала, анод A , подложка Π и кварцевый стакан C . При напряжении 1—3 кВ и вакууме 10^{-1} — 10^{-2} мм рт. ст. зажигается тлеющий разряд. Ионы рабочего газа (например, аргона), ускоренные в круковом пространстве, бомбардируют поверхность катода, в результате чего материал катода распыляется и переносится на подложку, а также на внутреннюю поверхность стакана C .

Существует несколько теорий катодного распыления. Одна из наиболее ранних — теория химического распыления. Ионы газа вследствие большой энергии, попадая на катод, образуют с металлом газообразные соединения, которые разлагаются в области положительного столба. Освободившиеся атомы металла осаждаются на подложке. Доказано, что процесс химического распыления не может быть преобладающим. Более достоверна теория ударного распыления. При бомбардировке ионами поверхности катода возникают сильные локальные перегревы, в результате которых происходит испарение отдельных атомов металла. Вследствие хорошей теплопроводности локальная температура быстро падает и средняя температура подложки остается невысокой. Интенсивность распыления определяется зарядом, массой и энергией ионов и возрастает с ростом атомного веса и электроотрицательности газов. Любой металл распыляется быстрее в азоте, чем в водороде. Скорость распыления в аргоне в 6 раз больше, чем в водороде. Ударная теория, однако, не может объяснить всех экспериментальных зависимостей.

Наибольшее признание получила гипотеза об импульсном механизме катодного распыления. Ионы, ускоренные в прикатодной области, — медленные, их энергии недостаточно для выбивания атомов из катода. Ионы только увеличивают частоту колебаний атомов. Ударная волна более эффективно передается вдоль плотно упакованных атомных рядов кристаллической решетки. Часть энергии может передаваться по ним к поверхностным слоям и в результате наложения многих колебаний поверхностный атом может получить от соседних атомов энергию, достаточную для преодоления силы связи. В этом случае атом вылетает с поверхности катода.

Количество вещества катода, распыляемого в единицу времени, пропорционально силе ионного тока i , разности напряжений между приложенным U и величиной, названной критическим катодным падением U_k^* , и обратно пропорционально произведению pd (d — ширина темного катодного пространства):

$$Q = k \frac{(U - U_k) i}{pd}.$$

Обычно величина U_k близка к 500 в.

* При малых катодных напряжениях скорость распыления очень мала. Если $U > 500$ в, то скорость значительно возрастает. Граничную величину $U_k \approx 500$ в называют критическим катодным падением.

Скорость распыления во многом определяется коэффициентом или выходом распыления — количеством атомов, покидающих катод, на каждый бомбардирующий его ион. Выход распыления зависит от материала, энергии и угла падения иона. В табл. 8.4 приведены значения коэффициентов распыления для некоторых металлов при бомбардировке ионами аргона с энергией 100 и 600 эв при нормальном падении.

На рис. 8.7 показаны зависимости коэффициентов распыления от массы и энергии ионов. Коэффициент катодного распыления рас-

считывают на основании экспериментальных данных по формуле

$$S = N_A Q \frac{eZ}{A_i},$$

где Z — атомный номер иона;

A — атомный вес вещества.

При заданной подводящей мощности плотность ионов в разряде уменьшается с уменьшением давления, но падение потенциала в круговом пространстве возрастает. Вакуум в камере следует поддерживать таким, чтобы ширина области темного катодного пространства простиралась вплоть до подложки.

Средняя скорость частиц, покидающих катод, зависит от энергии бомбардирующих ионов, т. е. от катодного падения напряжения. Распределение частиц по направлениям вылета подчиняется закону косинуса. Но только небольшая доля частиц достигает под-

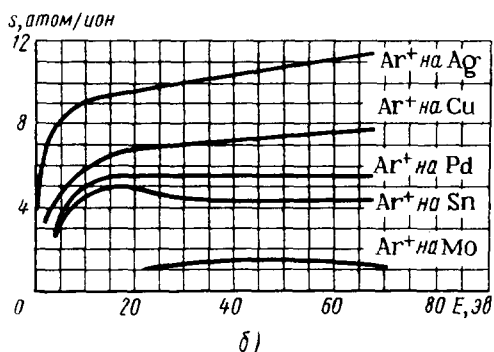
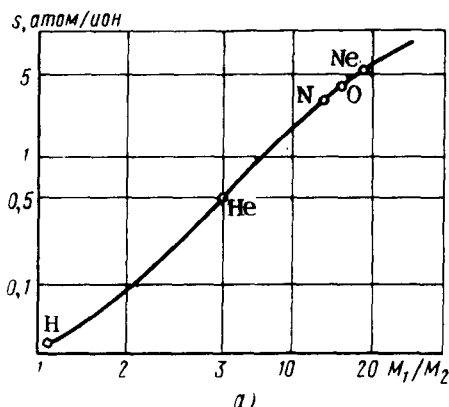


Рис. 8.7. Зависимость коэффициента распыления от массы M_1 (а) и энергии ионов E (б)

ложки по прямолинейной траектории.

Средняя длина свободного пробега в вакууме 10^{-1} — 10^{-2} мм рт. ст. не превышает нескольких миллиметров, поэтому частицы металла теряют свою энергию при соударениях с молекулами и ионами остаточного газа и достигают подложки с помощью диффузии. Для получения слоя конденсата, равномерного по толщине, градиент концентрации атомов металла в диффузионном слое должен быть всегда направлен перпендикулярно подложке; следова-

Материал	Коэффициент распыления при энергии, эв		Материал	Коэффициент распыления при энергии, эв	
	100	600		100	600
Si	0,07	0,53	Fe	0,20	1,26
Ta	0,10	0,62	Ni	0,28	1,52
Nb	0,07	0,63	Cu	0,48	2,30
Mo	0,13	0,93	Au	0,32	2,43
Ge	0,22	1,22	Ag	0,83	3,40
Al	0,11	1,24			

тельно, подложка должна располагаться параллельно катоду. Достоинством катодного распыления является отсутствие нагрева подложки, недостатком — наличие остаточного газа. Его молекулы, будучи химически активированы тлеющим разрядом, адсорбируются подложкой, взаимодействуют с атомами металла и загрязняют конденсат.

Реактивное распыление. Распыление называют реактивным, если на подложке вследствие взаимодействия ионов газа и атомов распыляемого вещества образуется химическое соединение. Реактивное распыление применяют для покрытий из оксидов, нитридов, сульфидов, гидридов; например, двуокиси кремния, полутораксиды индия, нитрида кремния, пентоксида тантала, азотистого тантала и др.

Тип химического соединения, получаемого в разряде, можно задавать путем подбора материала катода и газообразного вещества. Основное условие получения требуемого соединения состоит в тщательной очистке реагентов и отсутствии натекания и газовой выделения в камере. Недостатком реактивного распыления является возможность образования соединений на катоде и в пролетном пространстве, что существенно уменьшает скорость роста конденсата.

С помощью реактивного распыления создают пленки двуокиси кремния на кремнии, германии, арсениде галлия. В качестве катода применяют пластину чистого кремния. Рабочий газ — смесь аргона с кислородом. Добавление аргона позволяет увеличить скорость распыления и препятствует образованию пленки двуокиси на катоде. Ионы кислорода на поверхности подложки взаимодействуют с конденсирующимися атомами кремния, в результате чего образуется пленка SiO_2 , позволяющая проводить планарный процесс на германии и арсениде галлия. Для аналогичных целей используют пленки нитрида кремния. Для их получения реактивным распылением в камеру напускают тщательно осушенный и очищенный от кислорода аргон с добавкой азота. Кремниевый катод бомбардируется ионами аргона и азота, которые выбивают атомы

кремния. На подложке вследствие большой химической активности ионизированного азота возникает нитрид кремния Si_3N_4 , отличающийся высокой химической стойкостью.

Ионно-плазменное распыление. Для получения тонких пленок высокой чистоты парциальное давление химически активных газов должно быть низким, а скорость напыления высокой. Эти условия обеспечивает метод распыления в плазме газового разряда при низком давлении (ионно-плазменное или трехэлектродное распыление). Рабочий вакуум составляет $5 \cdot 10^{-3}$ — $5 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст., поэтому длина свободного пробега ионов на два порядка выше, чем при простом двухэлектродном способе катодного распыления. Энергия частиц распыляемого вещества, осаждающихся на подложку, значительно больше. При термическом испарении она составляет доли

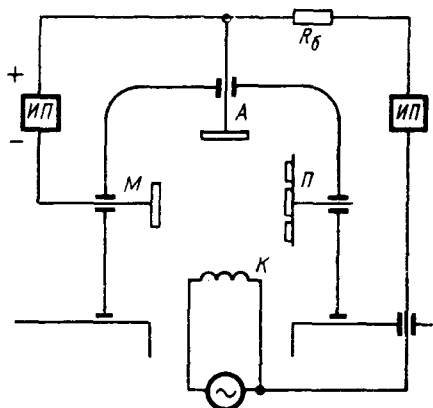


Рис. 8.8. Схема ионно-плазменного распыления

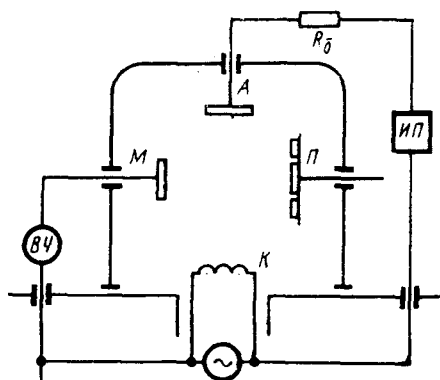


Рис. 8.9. Схема высокочастотного распыления

электронвольт, при двухэлектродном катодном — единицы, а при ионно-плазменной — десятки. В низком вакууме самостоятельный разряд не зажигается, и для инжекции электронов служит подогреваемый катод, ток эмиссии которого достигает 10—20 а. Разряд является дуговым. Между анодом и катодом приложено напряжение 200—300 в. Распыляемый материал в виде пластины, называемой мишенью *М*, размещается в качестве третьего электрода между анодом *А* и катодом *К*. На нее подается отрицательное относительно анода смещение 1—3 кВ, напротив располагается заземленная подложка *П* (рис. 8.8).

Для напыления сплавов или многослойных металлических покрытий вводят две или более мишени. Для двустороннего напыления две параллельно соединенные мишени размещают по обе стороны от пластины полупроводника.

Вследствие большой энергии атомов распыляемого материала и очищающего действия ионов газа на подложку полученные по-

крытия обладают высокой адгезией — на 1—2 порядка выше, чем при термическом испарении.

Высокочастотное распыление. С помощью ионно-плазменного метода можно производить распыление диэлектриков. При использовании схемы рис. 8.8, когда мишень — диэлектрик, положительный заряд упавших на нее ионов не может нейтрализоваться, что препятствует дальнейшей бомбардировке и распыления не происходит. Для распыления используют схему, показанную на рис. 8.9. Между землей и мишенью прикладывают высокочастотное напряжение. При отрицательном знаке на мишени происходит распыление, при положительном — на мишень из плазмы разряда приходят электроны, нейтрализующие положительный заряд. Так как подвижность электронов больше подвижности ионов, то в целом мишень оказывается под отрицательным потенциалом.

Очистка подложки в тлеющем разряде. Полупроводниковую или диэлектрическую подложку помещают на алюминиевый катод или рядом расположенный держатель, и в камере зажигается тлеющий разряд. Вследствие различия в массах электроны в разряде приобретают значительно большую скорость, чем ионы, и поверхность подложки заряжается отрицательно. Ее бомбардируют ионы, вся энергия которых освобождается на поверхности подложки. Это приводит к десорбции газов и разложению органических загрязнений, что способствует их удалению.

Наиболее эффективно идет очистка, если подложку вводят в катодное пространство, так как энергия ионов там максимальна.

§ 8.4. Создание омических контактов

Для создания омических контактов с развитием планарной технологии начали широко применять вакуумное распыление металлов. Преимуществами этого способа являются: малая глубина проникновения контакта, высокая чистота, возможность получения контактов с малым переходным сопротивлением, возможность локального осаждения через маски, групповые методы обработки.

Известно, что если работа выхода из полупроводника n -типа меньше работы выхода из металла (и при обратном соотношении для p -типа), то контакт металл — полупроводник обладает выпрямлением. Для создания омических контактов необходимо, чтобы работа выхода из металла была меньше работы выхода из полупроводника n -типа, тогда образуется антизапирающий слой.

Соотношения, полученные теоретически, реализуются только для слабо легированных материалов с тщательно очищенной поверхностью. Наличие поверхностных энергетических состояний и сильное легирование полупроводника не позволяют установить воспроизводимой корреляции между работой выхода, типом контакта и его сопротивлением.

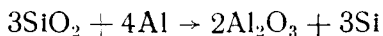
Контакты характеризуются адгезией, сопротивлением и линейностью в рабочем диапазоне токов. Адгезия в значительной степени зависит от очистки поверхности, метода нанесения пленки,

применяемых материалов и подогрева подложки. Предварительной очисткой кремния, например освежением в плавиковой кислоте непосредственно перед напылением, можно добиться уменьшения переходного сопротивления контакта. Этому же способствует наличие перед подложкой заслонки, отодвигаемой после начала активного испарения, и подогрев подложки в процессе напыления до 250—300°C. Одним из основных способов уменьшения переходного сопротивления контакта является сильное легирование поверхности полупроводника. Создание низкоомного контакта на кремнии при $\rho \geq 0,01$ ом·см представляет значительную трудность. Термообработка после напыления металла при температурах до 300°C практически мало влияет на величину сопротивления.

Контакт на основе алюминия. Наибольшее распространение для планарных кремниевых приборов вследствие простоты и технологичности имеет омический контакт из алюминия на кремнии с электропроводностью *p*- и *n*-типа.

Нанесение алюминия производят путем термического испарения в вакууме около $5 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст. с вольфрамовых спиралей. Толщина пленки составляет около 1 мкм. Алюминий применяют в виде гусариков или плюшенки. Температура подложки не должна превышать 577°C, так как радиация спирали и микроразогрев в местах конденсации паров может обусловить плавление. Последнее нежелательно, так как наличие эвтектики усложняет присоединение выводов, осуществляемое термокомпрессией.

При температуре подложки 500—550°C адгезия алюминия значительно выше, чем при низких температурах. Сильное сцепление обусловлено частичным связыванием алюминия с пленкой окисла:



Однако вероятность этой реакции невелика. Более существенным фактором является диффузия кремния в пленку алюминия, так как коэффициент диффузии кремния в объеме алюминия при 500—550°C достигает значений $1-2 \cdot 10^{-9}$ см²/сек. В пленке, очевидно, его величина еще больше.

Сопротивление алюминиевого контакта примерно линейно зависит от сопротивления кремния (табл. 8.5).

Сопротивление контакта на кремнии с электропроводностью *n*-типа на два порядка выше, чем с электропроводностью *p*-типа.

Создание локального контакта производят или напылением через маску, или с помощью последующей фотолитографии, в процессе которой удаляется лишний слой алюминия.

Если присоединение вывода осуществляют пайкой, то на алюминий напыляют слой золота. Напыление ведется последовательно с двух испарителей через маску. Пайку производят оловом или сплавом олово-свинец.

Контакты на основе золота. Для омических контактов на кремнии с электропроводностью *n*-типа применяют золото, напыленное термическим испарением из молибденовой лодочки. Для улучшения адгезии используют катодное распыление золота или вжигание

Таблица 8.5

	ρ , ом·см	R_K , ом·см ²
<i>p</i> -тип	0,002	$3,7 \cdot 10^{-5}$
	0,005	$5,2 \cdot 10^{-5}$
	0,05	$6,0 \cdot 10^{-4}$
	0,5	$1,1 \cdot 10^{-3}$
<i>n</i> -тип	0,5	$2,9 \cdot 10^{-1}$
	0,05	$6,4 \cdot 10^{-2}$
	0,005	$4,1 \cdot 10^{-3}$

полученной пленки при температуре 370—500°С. При создании контакта на тонких диффузионных слоях осаждают пленку золота толщиной 200 Å и сплавляют ее с кристаллом кремния при 500°С. Затем на пленку золота осаждают слой серебра толщиной 0,5—15 мкм при температуре подложки 500°С.

Высокотемпературный непроникающий контакт на кремнии получают путем последовательного напыления слоев хрома толщиной около 1000 Å и золота толщиной около 3000 Å. Структуру подвергают термообработке при 900°С, в результате которой происходит вжигание хрома в кремний. Вследствие того что хром сублимируется, термическое испарение хрома и золота можно производить одновременно из одной молибденовой или танталовой лодочки. Вначале напыляют слой чистого хрома, затем слой с переменным содержанием компонентов и сверху — слой чистого золота. Сцепление хрома с кремнием значительно выше, чем золота. Сопротивление контакта имеет величины, приведенные в табл. 8.6 для электропроводности *p*-типа. Напыление золота является хорошей защитой в тех случаях, когда требуется травление мезаструктур.

Вместо дорогостоящего золота на слой хрома можно напылить никель. Испарение хрома производят с вольфрамовых спиралей, на которые его наносят электрохимически, или из молибденовой лодочки. Никель испаряется с вольфрамовой или танталовой спирали. Вакуум должен быть не хуже 10^{-6} мм рт. ст. Температура кремния около 250°С. Слой никеля допускает пайку обычными припоями. Рекомендуется припой на базе эвтектического сплава золото-свинец с добавкой олова.

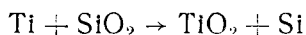
Таблица 8.6

ρ , ом·см	R_K , ом·см ²
1,0	$1,5 \cdot 10^{-2}$
0,1	$4 \cdot 10^{-3}$
0,005	$1 \cdot 10^{-3}$

Контакт с малым сопротивлением получают на сильно легированном кремнии напылением молибдена и золота. Молибден трудно поддается термическому испарению, поэтому применяют или испаритель прямого подогрева или нагрев с помощью электронного луча. Подложку нагревают до 300° С. Если кремний *p*-типа имеет удельное сопротивление $\rho = 0,005 \text{ ом} \cdot \text{см}$, то сопротивление контакта $R_k \approx 3 \cdot 10^{-4} \text{ ом} \cdot \text{см}^2$.

Контакты с подслоем титана. Большое распространение имеют контакты на кремнии с подслоем титана. Известно, что тугоплавкие металлы, имеющие сильное сродство с кислородом, обладают высокой адгезией к кремнию, двуокиси кремния и стеклообразным слоям. Адгезия тем больше, чем меньше радиус катиона.

Титан, нанесенный на двуокись кремния, при нагреве до 400—500° С взаимодействует с нею:



Образующаяся двуокись титана обладает сравнительно хорошей проводимостью, поэтому сопротивление контакта невелико (табл. 8.7).

Таблица 8.7

	$\rho, \text{ ом} \cdot \text{см}$	$R_k, \text{ ом} \cdot \text{см}^2$
<i>p</i> -тип	0,005	$5 \cdot 10^{-5}$
	0,02	$2,5 \cdot 10^{-4}$
<i>n</i> -тип	0,01	$2,6 \cdot 10^{-3}$
	0,005	$1 \cdot 10^{-4}$

На воздухе титан быстро окисляется, что препятствует присоединению к нему электрического вывода. Поэтому в вакуумной камере на слой титана напыляют слой металла, предохраняющего его от окисления. Такими металлами могут быть золото, серебро, протактиний, никель.

Распыление титана производят с вольфрамовой спирали; серебра или золота — из молибденовой или танталовой лодочки. Чтобы при напылении не происходило образования окислов титана, давление в камере должно быть около $10^{-7} \text{ мм рт. ст.}$

Кроме титана можно применять ниобий, тантал, торий, ванадий, хром.

Свойство титана образовывать прочное сцепление с пленкой SiO_2 используется при создании контактных площадок на слое двуокиси кремния. Площадки активных областей быстродействующих приборов могут составлять единицы квадратных микрон. Сделать

термокомпрессионный, сварной или паяный вывод к ним и не повредить p - n -переход очень трудно. Поэтому создают контакт на большой площади, или так называемый расширенный контакт, центральная часть которого соприкасается с поверхностью активной области кремния, а периферия располагается на слое окисла.

Контактные площадки можно выполнять с подслоем титана ($Ti-Ni$, $Ti-Ag$, $Ti-Au$) или из чистого алюминия, также имеющего высокую активность по кислороду.

Если металлический слой располагается на слое двуокиси кремния над p - n -переходом, то расширенный контакт является экранирующим (рис. 8.10). Применение экранирующего омического контакта позволяет повысить стабильность обратного тока планарного p - n -перехода и тем самым — надежность прибора. При отрицатель-

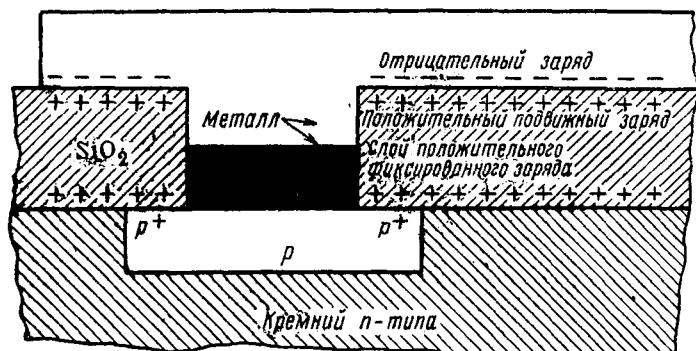


Рис. 8.10. Экранирующий контакт

ном смещении заряд положительных ионов, находящихся в пленке двуокиси кремния (ионов натрия и протонов), оттягивается от поверхности раздела $Si-SiO_2$ к металлическому электроду, что устраняет также миграцию зарядов по поверхности окисной пленки, так как она эквипотенциальна.

Измерение сопротивления контакта. Существует несколько способов измерения сопротивления контакта, использующихся в зависимости от особенностей измеряемых структур.

Если образец имеет форму параллелепипеда, на торцах которого нанесены два одинаковых контакта с площадью A , то, измерив полное сопротивление структуры R и вычислив сопротивление полупроводника R_n , определим

$$R_k = \frac{R - R_n}{2} A.$$

Это выражение приемлемо, если контакт линейный, сопротивления обоих контактов равны и $R_k \geq R_n$. При $R_k \gg R_n$ не обязательно иметь образец в виде параллелепипеда, оба контакта можно

наносить просто на пластину полупроводника, рядом или с противоположных сторон.

Более точно сопротивление контакта можно оценить, измеряя компенсационным методом распределение потенциала вдоль прямоугольного образца, через который течет ток I . В объеме полупроводника оно будет линейным, а на границе контакт — полупроводник будет иметь место скачок потенциала ΔU_k вследствие наличия переходного сопротивления. Тогда

$$R_k = \frac{\Delta U_k}{I} A. \quad (8.20)$$

При использовании данного метода требуется специальная подготовка образца и прецизионный микроманипулятор.

От большинства отмеченных недостатков свободен метод, основанный на измерении распределения потенциала вдоль радиуса контакта. Образец имеет форму пластины толщиной w , на всю нижнюю сторону которой наносится сплошной контакт, а на верхнюю сторону — локальный контакт с радиусом r . Через контакты пропускается ток I и компенсационным методом измеряется разность потенциалов U между локальным контактом и отстоящим от него на расстоянии l подвижным точечным зондом, перемещаемым по верхней плоскости пластины. Если $w \ll r$, то разность потенциалов не зависит от расстояния и в любой точке равна падению напряжения на локальном контакте U_k . Если $w \gg r$, то

$$U = U_k + U_n,$$

где U_n — падение напряжения на полупроводнике.

Значение U_k определяется в этом случае путем экстраполяции экспериментально измеряемой зависимости $U=f(l)$ в точке $l=r$.

Измеряя $U=f(l)$ при различных токах I , можно построить вольт-амперную характеристику контакта $U_k=f(I)$ и определить сопротивление контакта по выражению (8.20). Для уменьшения переходного сопротивления между измерительным зондом и полупроводником и повышения чувствительности схемы на верхнюю сторону образца целесообразно одновременно с локальным контактом напылять через специальные трафареты контактные точки малого диаметра (около 50 мкм), на которые можно устанавливать зонд.

§ 8.5. Создание тонкопленочных пассивных элементов

Тонкопленочные схемы изготавливают с помощью методов осаждения на подложку различных материалов в виде пленок, из которых формируются резисторы, конденсаторы, индуктивные элементы.

Большое значение при изготовлении тонкопленочных приборов имеет выбор материала подложки, от которого зависит процесс ядрообразования, сцепление, возникновение механических напря-

жений и др. В качестве подложек используют стекло, ситалл, керамику или кремний, покрытый пленкой двуокиси. Подложки тщательно шлифуют и полируют, так как наличие царапин, микротрещин и влаги на поверхности обуславливает нестабильность тонкопленочной схемы.

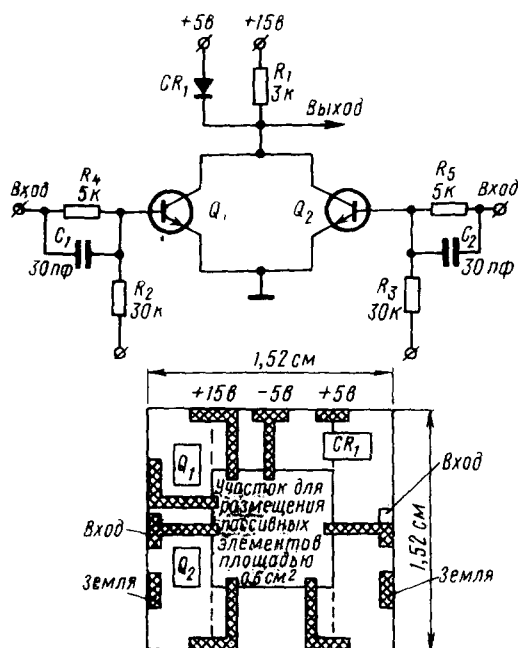
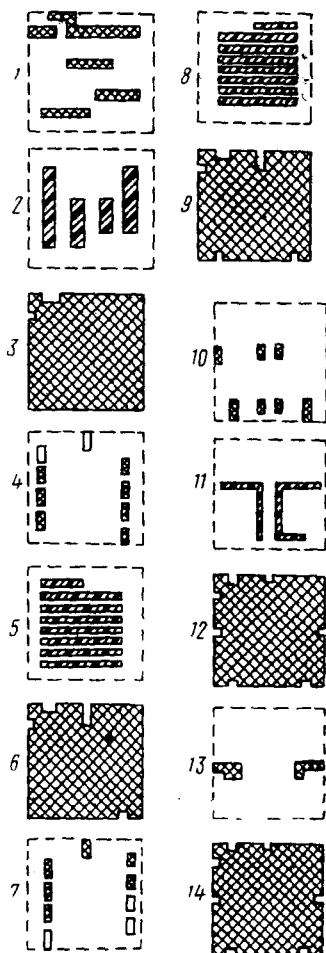


Рис. 8.11. Схема тонкопленочного мультивибратора и последовательность его изготовления



Активные пленочные компоненты в настоящее время находятся в стадии разработки и лабораторного применения. Поэтому в качестве транзисторов в пленочных схемах применяют навесные полупроводниковые приборы в миниатюрном оформлении.

Конфигурация тонкопленочных элементов задается либо с помощью фотолитографии, либо с помощью металлических масок. Плотность монтажа элементов в микросхемах составляет 100—200 эл/см². На рис. 8.11 показана схема тонкопленочного мультивибратора и последовательность его создания.

Центральная часть исходной керамической подложки предназначена для размещения пассивных элементов. На нее наносится уплотняющий слой SiO.

Через металлические маски с различной конфигурацией отверстий производят напыление алюминиевых пленок для создания контактных участков (слои 1, 4, 7 и 10) и нижних обкладок конденсаторов C_1 и C_2 (слой 13). Так же напыляют нихромовые пленки для создания резистивных слоев с поверхностным сопротивлением 200 ом/квадрат — слой 2 — R_1 ; 5 — R_2 ; 8 — R_3 и 11 — R_4 и R_5 . Пленки SiO напыляют по всей поверхности, так как они служат для междуслойной изоляции элементов (слои 3, 6, 9 и 12) и в качестве диэлектрика в конденсаторах C_1 и C_2 с удельной емкостью 4650 пф/см² (слой 14). Затем наносят верхние обкладки конденсаторов из алюминия и вновь напыляют монооксид кремния для защиты. На поверхность платы приклеивают эпоксидной смолой бескорпусные транзисторы и диоды, выводы которых подсоединяют к соответствующим точкам с помощью термокомпрессии.

Создание резисторов

Проводимость чистых металлов столь велика, что для получения требуемых в микросхемах резисторов необходимы пленки в несколько атомных слоев. Такие пленки практически не могут быть изготовлены. Поэтому для тонкопленочных резисторов используют сплавы, сопротивление у которых во много раз больше, чем у чистых металлов.

Тонкопленочные резисторы принято характеризовать поверхностным сопротивлением, определяемым как сопротивление квадрата тонкопленочного материала, к двум противоположным сторонам которого подведены контактные выводы.

Сопротивление пленки R протяженностью l , сечением Δw и удельным сопротивлением ρ

$$R = \rho \frac{l}{\Delta w} = \rho_s \frac{l}{w},$$

где $\rho_s = \rho/\Delta$ — поверхностное сопротивление, ом/квадрат;
 Δ — толщина пленки.

Для квадрата $l=w$ и $R=\rho_s$, т. е. величина сопротивления не зависит от размера стороны квадрата и равна поверхностному сопротивлению.

Сопротивление резистора R зависит от его формы. Если, например, длина резистора в 10 раз больше ширины, то это эквивалентно тому, что резистор составлен из десяти последовательно соединенных квадратов и его сопротивление в 10 раз больше поверхностного сопротивления. Таким образом, один и тот же номинал сопротивления можно получить при различных значениях l и w , если $l/w = \text{const}$.

Минимальную длину l и ширину w резистора подсчитывают по заданной величине номинала R , поверхностному сопротивлению, мощности рассеяния P и допустимой мощности рассеяния P_1 :

$$w = \sqrt{\frac{P \rho_s}{P_1 R}};$$

$$l = \sqrt{\frac{PR}{P_1 \rho_s}};$$

или

$$l = w \frac{R}{\rho_s}.$$

Конфигурация резистивных элементов бывает линейной или зигзагообразной (рис. 8.12) в зависимости от номинала. Зигзагообразная форма задается с помощью фотолитографии (так как маска неплотно прилегает к подложке) или с помощью микрофрезерования сплошной резистивной пленки остросфокусированным электронным лучом. При многослойном напылении (рис. 8.11) зигзагообразные резисторы изготавливают с помощью масок в две ступени. Резистивные элементы напыляют в форме отдельных полосок (слои 1, 4 и 7 на рис. 8.11), что обеспечивает плотное прилегание маски к подложке. Затем с помощью поперечных проводников, напыляемых через другие маски, производят последовательное соединение полосок (слои 2, 5, 8 на рис. 8.11).

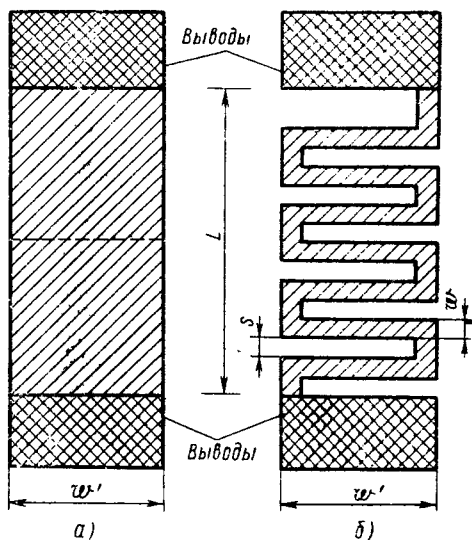


Рис. 8.12. Линейная (а) и зигзагообразная (б) конфигурация пленочных сопротивлений

Применяемые материалы (нихром, сплавы МЛТ, азотистый тантал, смесь хрома и монооксида кремния, двуокись олова) позволяют получать поверхностные сопротивления в пределах 10—5000 ом/квадрат. Практически применяются величины $\rho_s = 100$ —300 ом/квадрат. Разброс номиналов резисторов во многом зависит от точности изготовления маски (абсолютная погрешность приблизительно 10 мкм) или микроизображения при фотолитографии (абсолютная погрешность около 5 мкм). Желаемая точность часто обуславливает размеры элементов. Например, если номинал $R = 90$ ком сделан при $\rho_s = 300$ ом/квадрат, то нужно 300 квадратов. Если требуется точность 5%, то ширина линии не может быть

сделана меньше 100 мкм, т. е. длина будет 3 см, а площадь зигзагообразного резистора — 0,06 см². При точности 20% ширина линии может быть около 25 мкм, длина резистора около 7,5 мм, а площадь около 0,00375 см². Если необходимо получить резистор с высокой точностью (около 1%), то номинал подгоняют путем окисления, анодирования или микрофрезерования.

Температурные характеристики пленочных резисторов зависят от толщины, определяющей также ρ_s . Толстые пленки имеют положительный ТКС, что характерно для объемных материалов. Тонкие пленки имеют тенденцию к отрицательному ТКС. Если $\rho_s < 100$ ом/квадрат, то $\text{ТКС} = 0 \div 200 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$, если $\rho_s > 250$ ом/квадрат, то $\text{ТКС} = 0 \div -300 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$. Отрицательный температурный коэффициент сопротивления, имеющий место для тонких пленок, обычно обусловлен присутствием в пленке полупроводящих окислов или туннелированием электронов между гранулами.

Нихром состоит из 80% Ni и 20% Cr. Температура плавления 1395°С. Вследствие значительного различия в скоростях испарения компонентов ($G_{\text{Cr}} > G_{\text{Ni}}$) пленки, полученные испарением из жидкой фазы, имеют состав, обогащенный хромом (около 60% Cr + 40% Ni). Расплав обедняется хромом и состав напыляемых пленок все время изменяется. Поэтому для создания нихромовых резисторов обычно применяют дискретное или форсированное испарение и сублимацию. Вариантом первого является испарение с помощью электронного луча, фокусируемого на кончике непрерывно подаваемой проволоки. Сублимация требует длительного времени для установления стационарного потока, а скорость сублимации невелика.

Поверхностные сопротивления нихромовых пленок изменяются от 300 до 50 ом/квадрат при изменении толщины от 50 до 500 Å. При осаждении температура подложки составляет 200—350°С. Для стабилизации характеристик при этих же температурах производится последующий отжиг в вакууме или на воздухе в течение 30 мин. В зависимости от атмосферы рекристаллизация пленок при отжиге может сопровождаться уменьшением или ростом сопротивления; последнее происходит при окислении поверхности и границ зерен. Для обеспечения стабильности нихромовых сопротивлений необходима тщательная герметизация, так как пленки очень чувствительны к электролизу. Герметизацию производят с помощью монооксида кремния.

Для создания высокоомных резисторов широко распространен сплав МЛТ-3м, состоящий из 44,4% Si; 23,5% Bi; 17,6% Cr; 14,5% Fe.

Он представляет собой мелкодисперсный порошок, который испаряют либо из алунового тигля, либо из молибденовой лодочки. Особенности испарения те же, что и для нихрома. Диапазон поверхностных сопротивлений 300—500 ом/квадрат.

Для получения сопротивлений в диапазоне 300—1000 ом/квадрат применяют пленки керметов, состоящие из смесей металлов

и изолирующих материалов, чаще всего окислов. Электропроводность осуществляют через сетку соприкасающихся зерен металла или туннелированием электронов через промежуточные слои окислов.

Пленки нихром — моноокись кремния, осажденные при температуре подложки 300°C , имеют высокую стабильность и механическую прочность. Испарение производят из порошкообразной смеси, преобладание нихрома ведет к снижению сопротивления. Хорошие результаты дало взрывное испарение.

Пленки двуокиси олова и азотистого тантала получают реактивным распылением: олова — в атмосфере кислорода, тантала — в азоте. Сопротивление пленок двуокиси олова составляет $300\text{—}5000\text{ ом/кв.дм}$, азотистого тантала — $10\text{—}100\text{ ом/кв.дм}$.

Создание конденсаторов

Величину удельной емкости плоского конденсатора C (ф/м^2) определяют с помощью выражения

$$C = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\epsilon}{\Delta},$$

где Δ — толщина слоя диэлектрика;

ϵ — диэлектрическая проницаемость.

Точность обеспечения номинала тонкопленочного конденсатора определяется точностью, с которой может быть сформирован диэлектрический слой, и точностью задания конфигурации. Управление толщиной и диэлектрической проницаемостью — достаточно сложная задача; допуск по ним составляет $\pm 15\%$ и допуск на номинал равен $\pm 20\%$. Ошибка за счет маски существенна при $C < 100\text{ пф}$, поэтому допуск на такие конденсаторы задается до $\pm 30\%$. Удельные емкости лежат в пределах $2 \cdot 10^{-4}\text{—}4 \cdot 10^{-3}\text{ ф/м}^2$, что практически достаточно. Конденсатор в $10\,000\text{ пф}$ имеет размер $2,5 \times 2,5\text{ мм}^2$.

Температурный коэффициент емкости (ТКЕ) обычно положительный и близок к $250 \cdot 10^{-6}\text{ град}^{-1}$.

Наиболее значительное различие между дискретными и тонкопленочными конденсаторами заключается в значениях тангенса угла диэлектрических потерь. Потери в последних почти полностью определяются последовательным сопротивлением обкладок конденсатора — от нескольких ом при большой емкости до нескольких сотен ом при малой емкости конденсаторов. Поэтому получить маленькие значения $\text{tg } \delta$ достаточно сложно. Имеются ограничения по пробивному напряжению, составляющему обычно всего $10\text{—}20\text{ в}$ и до 100 в в лучших образцах. Электрическая прочность пленок ослабляется вследствие сквозных пор и других дефектов. Поэтому линейная зависимость емкости и пробивного напряжения от толщины пленки справедлива только для толстых пленок (при их толщине свыше $1000\text{ \AA}$). Диэлектрические пленки толщиной менее

150 Å непригодны для конденсаторов вследствие резкого усиления эмиссии Шоттки и туннелирования электронов или дырок.

Наиболее часто для тонкопленочных конденсаторов в качестве диэлектрика используют моноокись кремния — SiO_2 . Моноокись кремния обычно поставляют в виде гранул различной дисперсности. Температура плавления ее равна 2300°C . Ее испаряют из цилиндрического аксиального испарителя со специальным отражателем, стоящим на пути молекулярного потока и препятствующим пролету макрочастиц, ухудшающих при конденсации однородность пленки. На рис. 8.13 представлена температурная зависимость давления паров SiO_2 . Оптимальная температура испарения монооксида

близка к 1250°C , что соответствует скорости испарения около 10 Å/сек . При этом получают пленки SiO_2 характерного янтарного цвета. Если подложка не подогревается, то вследствие больших механических напряжений на границе пленка — подложка может происходить растрескивание и отслоение монооксида.

Среднее значение диэлектрической проницаемости в пленках SiO_2 составляет $6 \pm 10\%$, величина $\text{TKE} = 60 - 500 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$, тангенс угла диэлектрических потерь на низких частотах $0,01 - 0,1$, электрическая прочность до $3 \cdot 10^8 \text{ в/м}$. При толщине пленки монооксида $0,3 - 3 \text{ мкм}$ можно получить

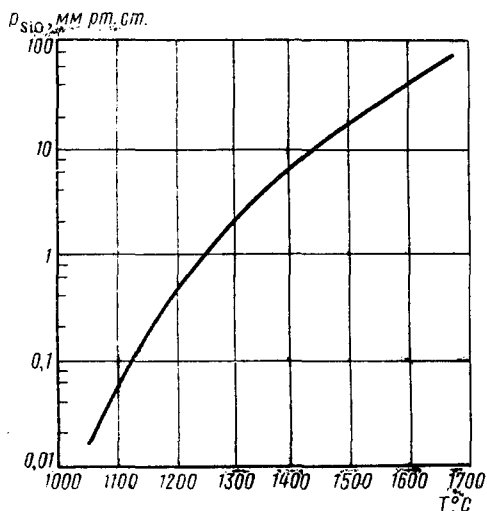


Рис. 8.13. Зависимость давления паров SiO_2 от температуры

удельные емкости $2 \cdot 10^{-4} - 2 \cdot 10^{-5} \text{ ф/м}^2$.

В качестве материала электродов наиболее приемлем алюминий, имеющий малую температуру испарения и малую подвижность атомов на поверхности пленки SiO_2 .

В табл. 8.8 представлены основные свойства некоторых соединений, применяемых для создания тонкопленочных конденсаторов. В последнее время используют также халькогенидные стекла.

При создании пленочных конденсаторов наилучшие результаты получены при использовании пленок окиси тантала. Однако эти пленки очень трудно получить достаточно толстыми, чтобы можно было работать с более высокими напряжениями, так как скорость осаждения их очень низкая. Тем не менее, пленки толщиной $0,1 \text{ мкм}$ на рабочее напряжение 15 в обладают удельной емкостью $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ ф/м}^2$.

Свойство	TiO ₂	Ta ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	SiO ₂
T _{пл} , °C	1640 (разлагается)	1875	2050	1710
ε	100	25	9	4
ТКЕ · 10 ⁻⁶ , град ⁻¹	+800	+230	+200	+100

Пленки Ta₂O₅ могут быть выращены также с помощью анодного окисления тантала. В качестве металлических обкладок чаще всего применяют напыленное золото. Для увеличения емкости осуществляют многослойное напыление проводящих и диэлектрических пленок, соединяемых параллельно.

§ 8.6. Контроль качества тонких пленок

Качество тонких пленок оценивают, контролируя толщину пленки, ее адгезию с подложкой и структуру. Обычно в зависимости от целевого назначения пленок определяется метод контроля и контролируется какой-либо один или два параметра.

Измерение толщины пленок

Определение толщины пленок представляет значительные методические трудности, так как понятие «толщина» в применении к слоям от 50 Å до 5 мкм теряет свою определенность. Плотность, удельное сопротивление, оптические свойства пленок и массивных материалов различаются. Поэтому измеренная каким-либо методом толщина будет эффективной, отличающейся от значения «истинной» толщины. Значения эффективных толщин пленки, полученные различными способами измерения, не совпадают.

При выборе способа определения эффективной толщины следует ориентироваться на требования, связанные с использованием изготавливаемых тонких пленок. Например, при использовании тонких пленок в интерферометрии нередко имеет значение фазовый сдвиг, вносимый наличием пленки, и, следовательно, необходимо знание ее «интерферометрической» толщины. При измерении толщины диэлектрических пленок, применяемых для изготовления пленочных конденсаторов, определяют емкость этих пленок.

Наиболее распространенными методами измерения толщины тонких пленок являются: микровзвешивание, многолучевая интерферометрия, наблюдение цвета пленок, измерение электрического сопротивления или емкости, использование кварцевого резонатора, ионизация молекулярного потока.

В основе *метода микровзвешивания* лежит определение толщины пленок по приращению в весе ΔP подложки после осаждения пленки:

$$\Delta = \frac{\Delta P}{\gamma S}, \quad (8.21)$$

где γ — удельный вес вещества пленки;

S — площадь, занимаемая пленкой.

При измерении толщины пленки путем взвешивания принимают, что плотность вещества пленки равна плотности массивного вещества. При этом под эффективной толщиной пленки понимают ту толщину, которую имел бы слой, если бы образующий его материал был равномерно распределен по поверхности с плотностью, равной плотности массивного вещества.

В зависимости от чувствительности весов и площади S абсолютная чувствительность метода составляет 1—10 мкм/м².

Из *методов многолучевой интерферометрии* чаще всего применяют способ *полос равной толщины*. В основе его лежит получение разности фаз двух когерентных лучей, отраженных от подложки и поверхности пленки. Перед измерением на образце получают так называемую ступеньку — резкую боковую границу пленки на подложке. Это достигается либо с помощью маскирования части подложки при осаждении пленки, либо путем химического удаления части осажденной пленки. Чередующиеся светлые и темные интерференционные полосы с шагом L как на поверхности пленки,

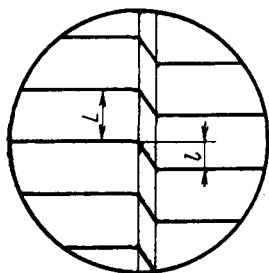


Рис. 8.14. Картина сдвига интерференционных полос

так и на подложке смещены относительно друг друга у границы пленки на величину l (рис. 8.14). Измерение смещения l производят с помощью микроинтерференционного микроскопа. Толщину пленки рассчитывают по формуле

$$\Delta = \frac{\lambda}{2} \cdot \frac{l}{L},$$

где λ — длина волны монохроматического света.

Точность измерения составляет 20—30 Å на лучших интерферометрах и 150—300 Å на обычных. В отличие от метода взвешивания данный метод применим только для непрозрачных пленок. Если пленка прозрачная, то на пленку и подложку в районе «ступеньки» осаждают дополнительно непрозрачную хорошо отражающую металлическую пленку, например, алюминия. Для уменьшения вносимой погрешности ее толщина должна быть много меньше толщины измеряемой пленки.

Для определения толщин диэлектрических пленок, таких как SiO_2 , Si_3N_4 , Al_2O_3 и др., на отражающих подложках *наблюдают*

цвет пленки. Если падение луча на поверхности пленки близко к нормальному и пленки достаточно тонкие (менее 1 мкм), то расстояние между соседними интерференционными максимумами столь велико, что вся пленка окрашивается равномерно в один цвет. С увеличением толщины пленки окраска ее меняется, причем, один и тот же цвет повторяется несколько раз с достижением пленкой толщин, кратных $\lambda/4$. Поэтому для измерения толщины пленки по ее цвету нужно знать не только соответствующую данному цвету длину волны, но и порядок интерференции $k=1, 2, 3, \dots$. Толщина пленки с коэффициентом преломления n

$$\Delta = k \frac{\lambda}{4} \cdot \frac{1}{n},$$

где λ — длина волны, соответствующая данному цвету пленки.

В этом случае под толщиной пленки понимают ту толщину, которую имела бы пленка с показателем преломления, равным n , определенному для массивного диэлектрика.

Чувствительность метода составляет 200—300 Å. Недостаток заключается в его субъективности — различные люди не наблюдают одного и того же цвета для пленок одинаковой толщины.

Образец, на котором производят измерение толщины пленки, в большинстве случаев не пригоден для производства. Поэтому из нескольких одновременно напыляемых в идентичных условиях образцов один служит только для измерения толщины. Его называют «свидетелем».

При изготовлении проводящих и резистивных пленок толщину определяют непосредственно в процессе напыления путем измерения продольного электрического сопротивления на «свидетеле», обладающем известными геометрическими размерами. Измерительный прибор (мостовая компенсационная схема) отградуирован в единицах измерения либо поверхностных сопротивлений, либо толщин. Толщина пленки

$$\Delta = \rho \frac{L}{Rh},$$

где ρ — удельное сопротивление пленки;
 R — сопротивление пленки на «свидетеле» между контактами;

L, h — длина и ширина пленки.

В данном случае под толщиной пленки понимают толщину, которую имел бы слой, если бы удельное сопротивление этого слоя было равно удельному сопротивлению массивного металла. Чувствительность метода 10—50 Å, предельная толщина измеряемых пленок около 1 мкм. Точность измерения невелика вследствие неопределенности значения ρ .

Толщину диэлектрических пленок в процессе осаждения определяют путем измерения емкости между металлическими полосками, нанесенными на «свидетель». «Свидетель» проходит

предварительную калибровку для каждого напыляемого материала. Предельная толщина наносимой пленки около 30 мкм, но точность также невелика.

Для более точного измерения толщины пленок в процессе напыления используют *метод кварцевого резонатора*, пригодный для любых материалов. Частота колебаний f кварцевого кристалла с массой m линейно меняется с изменением массы осажденного вещества Δm . Сдвиг резонансной частоты

$$\Delta f = \frac{\Delta m}{m} f.$$

Исходя из общей формулы (8.21), связывающей геометрические размеры и вес пленки, можно получить следующее выражение для определения толщины пленки:

$$\Delta = \frac{m}{\gamma S} \cdot \frac{\Delta f}{f}.$$

Выбор частоты f зависит от диапазона измеряемых толщин пленок. Для тонких пленок и большой чувствительности используют высокие частоты. Чувствительность кварцевого резонатора $\Delta m/\Delta f = 10^{-10}$ кг/кгц. Применение радиотехнической аппаратуры при $f = 20$ Мгц позволяет определять сдвиг $\Delta f = 20$ гц, что дает возможность измерять приращения массы около 10^{-8} кг/м² или 0,1—1 Å толщины. Практически точность равна 50—200 Å.

Выпускаемые серийно кварцевые измерители толщин предназначены для измерения толщин тонких металлических, полупроводниковых и диэлектрических пленок в диапазоне толщин от 100 Å до 5 мкм с точностью $\pm 10\%$. Приборы позволяют задавать требуемую толщину пленки, после достижения которой подается сигнал на прекращение напыления. Для точного измерения толщины производят градуировку приборов.

Принцип действия приборов для измерения скорости осаждения пленок основан на частичной *ионизации паров* напыляемого вещества и измерения полученного тока, пропорционального плотности молекулярного потока, проходящего через рабочий объем датчика. Для разделения молекулярного потока и остаточных газов используется модуляция молекулярного потока. В измерительном приборе переменная составляющая ионного тока датчика, пропорциональная скорости осаждения испаряемого вещества, выделяется, усиливается, детектируется и подается на стрелочный индикатор, показания которого пропорциональны скорости осаждения, и на цифровой интегратор, фиксирующий толщину осажденной пленки. Чувствительность метода составляет около 1 Å/сек, погрешность — 1—5%.

Выпускаемые серийно измерители скорости осаждения и толщины пленки измеряют скорости осаждения в диапазоне 10—200 Å/сек и толщину пленки в диапазоне 0,1—1 мкм с погрешностью $\pm 15\%$.

Измерение адгезии пленок

В настоящее время не существует доступных промышленных методов точного количественного измерения адгезии тонких пленок с подложками.

Сравнительный контроль адгезии осуществляют путем измерения усилия, которое надо приложить к стальной закругленной игле, для того чтобы при движении этой иглы вдоль поверхности пленки вызвать ее отслаивание от подложки. Усилие, при котором пленка отслаивается, характеризует адгезию. Метод применим для сравнения адгезии пленок постоянной толщины и одного состава.

Адгезию металлических пленок с подложкой измеряют по усилию отрыва пленки с напаянным на ее поверхность металлическим цилиндром. В центре свободного торца цилиндра закрепляют гибкий тросик, связанный через рычаг с чашкой весов. Чтобы по усилию отрыва P вычислить адгезию F , нужно точно знать площадь контакта S и исключить перекося цилиндра, вызывающий неравномерное распределение усилия по площади контакта. Адгезия

$$F = P/S.$$

Площадь торца цилиндра составляет около 1 мм^2 . Для получения надежных данных необходимо измерить адгезию несколько раз, каждый раз контролируя, не произошел ли отрыв по месту спая и не растрескалась ли пленка в припое.

Разновидностью данного метода является контроль адгезии металлических пленок по отрыву от подложки с помощью тонкой золотой или алюминиевой проволоки, присоединяемой к пленке методом термокомпрессии. Площадь контакта составляет при этом $50\text{--}200 \text{ мкм}^2$, что позволяет более точно определять адгезию в локальных участках пленки.

Контроль структуры пленок

Изучение структуры тонких пленок сводится к различным методам лабораторного контроля, что позволяет устанавливать связь между физическими свойствами пленок и условиями их осаждения. Наиболее распространенными методами контроля структуры поликристаллических и монокристаллических пленок являются электронная микроскопия, электронография и рентгенография. Эти же методы применяют для исследования аморфных пленок.

Метод *электронной микроскопии* чаще всего осуществляют с помощью просвечивающей микроскопии, что дает возможность контролировать пленки толщиной $100\text{--}1000 \text{ \AA}$. Тонкие пленки получают путем напыления вещества в вакууме на свежий скол кристалла каменной соли. После напыления соль растворяют в воде, а оставшуюся пленку помещают в электронный микроскоп. Наблюдение структуры и дефектов пленки возможно благодаря амплитудному контрасту, который создается главным образом упруго и неупруго рассеянными электронами в области углов, лежащих за пределами

апертурного угла микроскопа. Электроны, рассеянные на меньшие углы и испытавшие небольшие неупругие потери энергии, образуют светлоспольное изображение. Темнопольное изображение получают при наклоне конденсорной электромагнитной линзы или путем перемещения апертурной диафрагмы до тех пор, пока дифрагированные пучки электронов не попадут в апертуру микроскопа. Благодаря высокой разрешающей способности (около 10 Å) и гибкому управлению серийные электронные микроскопы используют для стандартных структурных исследований тонких пленок. В аморфных пленках контролируют сплошность, зернистость, наличие пустот, включений инородных веществ и пр.

Вследствие большого поперечного сечения рассеяния электронов веществом для изучения тонких пленок хорошо подходит *электронография*. Так как длина пробегов электронов в веществе мала, то электронный пучок направляют под очень малым углом к поверхности, по которой он «скользит» и отражается. Отраженные электроны образуют дифракционные картины, на основании которых исследуют строение поверхностных слоев: дефекты, напряжения, наличие чужеродных атомов и др.

Аморфные пленки создают на электронограммах рассеянный диффузный фон и небольшое число широких колец. Поликристаллические пленки образуют много сравнительно резких концентрических колец, расстояние между которыми удовлетворяет уравнению Вульфа — Брегга:

$$k\lambda = 2d \sin \theta,$$

где θ — угол падения и отражения пучка — угол Брегга;

k — порядок спектра; в практических расчетах $k=1$;

d — межплоскостное расстояние.

Если часть кольца отсутствует или имеет иную интенсивность, образуя симметричную картину, то поликристаллическая пленка текстурирована, т. е. кристаллики имеют предпочтительную ориентацию в одном или более кристаллографических направлениях и случайную ориентацию — в других. Монокристаллические пленки дают дифракционные картины, состоящие из отдельных рефлексов. Хорошо упорядоченные монокристаллы образуют на электронограммах так называемые кикучи-линии, получающиеся в результате многократного рассеяния электронов.

По диаметру колец судят о типе рассеивающих атомов, а по ширине интерференционного максимума — о размерах зерен, если они лежат в пределах от единиц до нескольких сотен ангстрем.

Задачей *рентгеновского структурного анализа* является нахождение точных позиций атомов в элементарной ячейке, установление пространственной группы структур, распределение электронной плотности.

Дифракция рентгеновских лучей дополняет дифракцию электронов при определении кристаллической структуры пленки. По величине уширения интерференционных линий можно определить раз-

меры зерен от 50 до 1200 Å, т. е. почти на порядок больше, чем с помощью электронографии.

Рентгеновская эмиссионная спектроскопия позволяет установить элементарный состав пленок при минимальной толщине около 100 Å.

В последние годы получили развитие рентгеновские микроанализаторы для локального определения состава в областях с площадью около 1 *мкм*².

МЕТОДЫ ЗАЩИТЫ ПОВЕРХНОСТИ p - n -ПЕРЕХОДОВ§ 9.1. Физика поверхности p - n -перехода

Поверхностью p - n -перехода считают область выхода p - n -перехода на поверхность кристалла. Состояние поверхности, степень ее совершенства во многих случаях оказывают на электрические свойства и характеристики приборов влияние более сильное, чем физические свойства объема полупроводника. Если p - n -переход внутри кристалла надежно защищен от различных внешних воздействий, то его поверхность не всегда может противостоять влиянию этих воздействий.

Например, при механическом вырезании кристалла из пластины в поверхностной области возникают столь сильные нарушения, что p - n -переход оказывается зашунтированным низким сопротивлением и кристалл не может выполнять свои выпрямительные или усилительные функции. Подобным же образом влияет влага или какие-либо загрязнения, осевшие на p - n -переходе с совершенной боковой поверхностью. Как показали теоретические данные, наличие поверхностной границы у полупроводников обуславливает качественно иную картину энергетических зон по сравнению с известной картиной энергетических зон бесконечно-протяженного кристалла.

Структура поверхности состоит из атомов с частично оборванными связями. Поскольку каждому атому не хватает «напарников» для ковалентной связи, то эти связи остаются ненасыщенными, что эквивалентно энергетическим состояниям, уровни которых лежат внутри запрещенной зоны. Так как атомы стремятся насытить свои связи путем захвата электронов, то образующиеся уровни являются акцепторными, независимо от типа электропроводности объема монокристалла. Гипотезу о наличии этих уровней впервые высказал советский ученый лауреат Нобелевской премии академик И. Е. Тамм.

Наряду с уровнями Тамма в полупроводнике могут образовываться дополнительные поверхностные состояния в результате наличия адсорбированных атомов чужеродных жидких или газообразных веществ. В зависимости от свойств адсорбированных атомов возникающие в запрещенной зоне энергетические уровни могут быть как донорными, так и акцепторными. Когда монокристаллом адсорбируется атом или молекула, захватывая электроны, то возникают акцепторные уровни. Если исходный полупроводник обладает электропроводностью n -типа, то электроны из зоны проводимости или с донорных уровней стремятся заполнить акцепторные

уровни, лежащие ниже уровня Ферми. Это приводит к тому, что тонкий слой полупроводника, находящийся непосредственно под поверхностью, обедненной подвижными электронами, оказывается положительно заряженным оставшимися там донорными центрами. Возникающее электрическое поле направлено таким образом, что отталкивает электроны, приходящие из объема, и создает энергетический барьер; наблюдается искривление энергетических зон на границе (рис. 9.1). Величина искривления

$$E_s = e\psi_s = \frac{e^2 N_s^2}{2\epsilon C_B}, \quad (9.1)$$

где ψ_s — поверхностный потенциал;
 N_s — плотность поверхностных состояний, расположенных ниже уровня Ферми;
 C_B — концентрация примеси в полупроводнике.

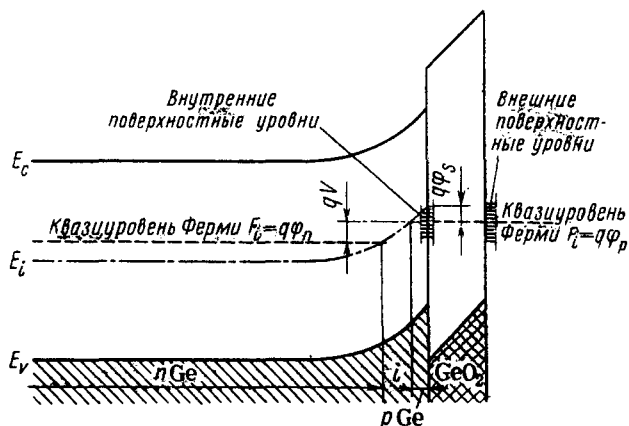


Рис. 9.1. Искривление энергетических зон на границе

Из выражения (9.1) видно, что с увеличением плотности поверхностных состояний и уменьшением концентрации примесей в объеме увеличивается искривление зон, т. е. возрастает поверхностный потенциал. Если поверхностный потенциал значителен, то искривление зон столь велико, что валентная зона на поверхностной границе приближается к уровню Ферми. В этом случае приповерхностная область обладает электропроводностью p -типа; причем концентрация дырок будет тем больше, чем ближе граница валентной зоны к уровню Ферми. Подобная же область с электропроводностью n -типа может образоваться на поверхности полупроводника p -типа. Области такого типа называют инверсными; они всегда нежелательны при производстве полупроводниковых приборов.

Поверхности германия и кремния после любой очистки при непродолжительном соприкосновении с воздухом покрываются

пленкой окисла, которая усложняет картину энергетических уровней. Кроме уровней, связанных с наличием примесей или иных дефектов непосредственно на поверхности и обусловленных характером обработки полупроводника, существуют уровни, связанные со структурой окисного слоя и характером окружающей газовой среды.

Первые из упомянутых энергетических уровней называют «быстрыми» или внутренними, так как время их релаксации (время заполнения или опустошения при изменении состояния термодинамического равновесия) не превышает единиц микросекунд. Эти уровни определяют процессы рекомбинации и величину времени жизни неосновных носителей заряда в приповерхностной области. Плотность «быстрых» уровней в германии составляет порядка 10^{11} см^{-2} .

Вторые названные энергетические уровни принято называть «медленными» или внешними, так как время их релаксации не менее миллисекунд и доходит до сотен секунд. Эти уровни расположены в окисном слое или на его поверхности. Они имеют плотность порядка 10^{13} см^{-2} , определяют концентрацию носителей заряда в поверхностном слое и тем самым — поверхностный потенциал и поверхностную проводимость. Причина большого времени релаксации медленных уровней заключается в том, что для заполнения их зарядом требуется пройти через слой окисла, на что затрачивается достаточно большое время. Толщина окисла, образующегося на чистой поверхности германия или кремния, колеблется в пределах 10—50 Å. Плотность поверхностных уровней находится в значительной зависимости от характера среды, контактирующей с окисным слоем.

Адсорбция молекул газов или паров может быть физической или химической. В случае физической адсорбции пары и газы удерживаются на поверхности силой кулоновского взаимодействия между ионами твердого тела и поляризующимися молекулами газа или пара. В случае химической адсорбции (хемосорбции) молекулы диссоциируют на атомы, и между ними и поверхностными атомами происходит перераспределение валентных электронов с образованием устойчивых химических связей.

Пары воды адсорбируются полупроводниками с помощью обоих механизмов. Причем два-три первых слоя («химические») прочно сцеплены с атомами решеток и неподвижны, а в последующих слоях («физических») молекулы могут перемещаться. Адсорбция различных газов и паров приводит к образованию пространственного заряда в приповерхностной области. Опыт показывает, что влияние азота, аргона, углекислого газа и окиси углерода на поверхностные свойства весьма незначительно. Это объясняется главным образом тем, что они адсорбируются физически. Наиболее активными являются хемосорбированные газы (кислород) и пары воды. Адсорбция кислорода, озона, а также хлора способствует созданию поверхностного заряда с отрицательным знаком, так как атомы газа захватывают электроны полупроводника, действуя, таким образом, как

акцепторы. В результате проводимость образцов n -типа убывает. Адсорбция паров воды, спирта или ацетона обуславливает образование положительного заряда вследствие захвата из полупроводника подвижных дырок (или освобождения в полупроводнике электронов) и создания донорных уровней.

§ 9.2. Влияние поверхности на электрические характеристики p - n -переходов

Очистку поверхности p - n -перехода осуществляют, чтобы исключить образование инверсных слоев и стабилизировать состояние поверхности.

Адсорбированная на поверхности кристалла влага может содержать ионы металлов (Na^+) в количестве до 10^{14} см^{-2} и быть таким образом ионным проводником. Под воздействием приложенного к p - n -переходу обратного напряжения возникает ионный ток, величина которого может на несколько порядков превышать величину объемного тока.

Помимо ионного тока большую роль играют токи утечки, обусловленные каналами. Инверсный слой, образовавшийся на какой-либо части кристалла и примыкающий к p - n -переходу, увеличивает эффективную площадь перехода, что способствует возрастанию обратного тока. Таким образом, обратный ток через p - n -переход может сильно возрасти вследствие ионной или канальной проводимости. По характеру изменения обратного тока и напряжения можно судить о том, какой механизм преобладает. Для ионных токов зависимость близка к линейной, канальный ток изменяется пропорционально корню квадратному из приложенного напряжения.

Величина пробивного напряжения p - n -перехода определяется удельным сопротивлением полупроводника. Электрический пробой чаще всего носит лавинный характер. В ряде случаев пробой наступает при напряжениях меньших, чем это должно быть для данного полупроводника. Такое явление объясняется появлением канала n -типа на низкоомной части кристалла p^+ -типа. Напряжение пробоя p - n -перехода в районе канала меньше, чем в объеме, так как проводимость канала больше проводимости базы.

Поверхность, характеризуемая нарушением периодичности кристалла и средоточением разного рода дефектов, обуславливает усиленную рекомбинацию носителей заряда. Интенсивность процесса рекомбинации характеризуется скоростью поверхностной рекомбинации.

$$s = \frac{J}{\Delta p}, \quad (9.2)$$

где J — рекомбинационный поток электронно-дырочных пар через единицу поверхности в единицу времени;
 Δp — избыточная плотность неосновных носителей заряда в приповерхностном слое.

Обычно поверхностная рекомбинация значительно превышает интенсивность рекомбинации в объеме, и действительное время жизни неосновных носителей заряда в кристалле заметно меньше времени жизни, определяемого одними объемными дефектами. Скорость поверхностной рекомбинации зависит от обработки поверхности. Грубая шлифовка дает s порядка тысяч и десятков тысяч, травление — сотни сантиметров в секунду. Большая величина s значительно уменьшает коэффициент переноса носителей заряда и тем самым коэффициент усиления транзисторов.

Поверхностная составляющая в значительной степени определяет нулевой ток коллектора, состоящего из объемного и поверхностного токов.

В большинстве случаев ухудшение параметров прибора при длительной работе происходит вследствие изменения состояния поверхности, обусловленного изменением окружающей среды, например, попадания влаги на p - n -переход или свойств защитного покрытия. Таким образом, поверхностные явления определяют срок службы и надежность полупроводниковых приборов.

§ 9.3. Защита лаками и эмалями

Для защиты поверхности p - n -переходов от внешних воздействий на нее наносят тонкие слои специальных лаков и эмалей.

Покрытие плотно сцепляется с поверхностью полупроводника и предотвращает доступ водяных паров, кислорода и иных веществ. Достоинством метода является его простота и технологичность.

В то же время защита p - n -переходов методом лакировки имеет много недостатков. К основным из них следует отнести то, что применяемые лаки не отвечают требованиям полупроводниковой технологии. Они недостаточно влагостойки, плохо переносят резкое изменение температуры окружающей среды, растрескиваются или отслаиваются при низких температурах.

Кроме того, очень важным недостатком лаков является их способность создавать в приповерхностном слое полупроводника значительные механические напряжения, что связано с различием коэффициентов термического расширения полупроводника и высушенной пленки лака.

Таким образом, качество защиты p - n -переходов и свойства «лакированных» приборов сильно зависят от свойств лаков.

В качестве исходных материалов часто используют кремнийорганические лаки, обладающие высокой влагостойкостью и хорошими диэлектрическими свойствами.

Чистые кремнийорганические лаки имеют ряд недостатков (трескаются при низких температурах, недостаточно сцепляются с полупроводниками, хрупки); их устраняют путем введения модифицирующих добавок и специальных наполнителей.

При выборе защитного покрытия (лака или эмали) исходят из эксплуатационных требований, предъявляемых к полупроводнико-

Лаки и эмали для защиты *p-n*-переходов

Наименование защитного покрытия	Связующее вещество	Наполнитель	Режим сушки	Удельное сопротивление
Эмаль РПЭ-401	ФМ-34 85% БМК-5 15%	Рутил — 20% Кварц — 20% Слюда — 30% Тальк — 30%	5 ч при 200°C	При 20°C — 10^{14} ом·см При 200°C — 10^{12} ом·см После пребывания в воде — 0,028 ом·см
Лак МК-4У	Кремнийорганическая смола, модифицированная полиэфирными и эпоксидными смолами	Мелкодисперсная слюда — мусковит	2 ч при 180°C	При 20°C — 10^{14} ом·см При 200°C — 10^{10} ом·см
Компаунд К-18	Кремнийорганический каучук	—	3 суток при 20°C	При 20°C — 10^{12} — 10^{14} ом·см При 150°C — 10^{10} ом·см
Эмаль ЭС-50	Лак МК-25	Рутил	2 ч при 180°C	При 20°C — 10^{14} ом·см
Компаунд МБК-3	Кремнийорганическая пластифицированная смола	—	8—12 ч при 80—100°C	При 20°C — 10^{12} — 10^{13} ом·см При 100°C — 10^{10} — 10^{11} ом·см После 10 суток пребывания в воде — 10^{12} — 10^{13} ом·см
Лак К-55	Полиорганосилоксановая смола	—	4 ч при 130—150°C	При 20°C — 10^{13} ом·см При 200°C — 10^{11} ом·см После 24 ч пребывания в воде 98%-ной — 10^{11} ом·см

вому прибору. В табл. 9.1 приведены некоторые данные наиболее часто употребляемых лаков и эмалей.

Очень важным фактором при защите *p-n*-перехода лаком является чистота лакируемой поверхности, поэтому переходы должны быть тщательно протравлены, промыты и высушены.

После сушки кристаллы переносят в специальных вакуумных эксикаторах в скафандры, где производят нанесение лака на их поверхность.

Техника нанесения лакового покрытия заключается в следующем: лак набирают в шприц и осторожно небольшими порциями выдавливают на поверхность полупроводникового кристалла. Для покрытия круглых структур можно применять различные полуавтоматические приспособления. Сушку лака производят в специальных термостатах. Режим сушки зависит от вида лака или эмали, а также от типа прибора.

§ 9.4. Защита вазелинами

При производстве полупроводниковых приборов в корпусном исполнении в целях стабилизации параметров в капсулу прибора вводят кремнийорганический вазелин в сочетании с влагопоглощающими добавками (геттерами), например с цеолитом.

Изоляционный вазелин представляет собой смесь кремнийорганической жидкости с мелкодисперсным наполнителем в виде вязкой пасты. Широко применяют кремнийорганические вазелины КВ-3, КВ-2, КВ-2А.

Названные вазелины обладают высокими изоляционными свойствами. Удельное объемное сопротивление вазелинов при температуре 20° С порядка 10^{14} ом·см, а при 150° С оно равно 10^{12} ом·см. Тангенс угла диэлектрических потерь при частоте 10^6 гц порядка 0,006. Диэлектрическая проницаемость равна 2,8, а диэлектрическая прочность — 15 кВ/мм.

Перед нанесением вазелина на полупроводниковые кристаллы или в оболочки корпусов его подвергают вакуумной сушке при температуре 150° С в течение 8—10 ч.

Технологический процесс нанесения вазелина проводят в скафандрах в атмосфере осушенного азота.

§ 9.5. Защита силанированием

Защита поверхности *p-n*-переходов с помощью кремнийорганических полимерных лаков и эмалей долгое время была самым распространенным методом в промышленности. Однако при производстве ряда приборов выяснилось, что более надежной защиты поверхности *p-n*-перехода и стабилизации электрических параметров можно достигнуть, используя метод силанирования.

В процессе силанирования защитная кремнийорганическая полимерная пленка создается непосредственно на увлажненной

поверхности *p-n*-переходов в результате реакции гидролиза алкилгалоидсиланов. Формула алкилгалоидсилана имеет вид:

$$R_{4-i} \text{Si} \cdot x_i \quad (\text{при } i = 1, 2, 3, \dots), \quad (9.3)$$

где *R* — органический радикал (обычно углеводород с короткой цепочкой);

x — гидролизуемая часть соединения (галоид).

В качестве органических радикалов могут быть метил (CH_3), этил (C_2H_5) и фенил (C_6H_5); из галоидов используют хлор и бром. Силаны способны полимеризоваться в полисиланы, где атомы кремния связаны в цепочку. При этом происходит химическое связывание пленки с поверхностью перехода кремния. Атом кремния в большинстве соединений электроположительный, что обуславливает его притяжение к электроотрицательным атомам и группам и достаточно сильный ионный характер таких связей. Относительно высокие энергии связи кремния с другими элементами делают кремнийорганические соединения термически стойкими. Особенно прочны связи кремния с кислородом. Большое практическое значение имеет термическая устойчивость связи $\text{Si}-\text{O}$, существующей в полисилоксанах



Для защиты *p-n*-переходов предпочтительнее использовать галоидсиланы с короткой цепочкой, чтобы обеспечить довольно быстрое образование пленки. Наряду с этим, соединения с низшими алифатическими радикалами $[(\text{CH}_3 \cdot \text{CH}_2) \cdot \text{OH}]$ образуют более термостойкие полимеры. Было замечено, что полимеры с длинными цепочками, т. е. с большими молекулами, а также с сетчатой разветвленной структурой, значительно лучше стабилизируют обратные токи, чем с короткими цепочками. Полагают, что при силанировании образуются очень тонкие пленки, которые обладают высокой влаго- и газонепроницаемостью, инертностью к различным химическим реагентам, высокой адгезионной способностью. Главная отличительная особенность этих пленок — это термостойкость (до 300°C). Наиболее перспективными являются диметил- и триметилзамещенные силаны. К недостаткам метилзамещенных галоидсиланов относится выделение при гидролизе хлористого водорода, который взаимодействует с элементами, образующими *p-n*-переход, например с алюминием. Хлористый алюминий, образующийся при гидролизе, весьма гигроскопичен и может шунтировать переход. Незначительные количества хлористого алюминия не должны влиять на электрические параметры *p-n*-перехода, так как известно, что для ускорения конденсации силанов применяют хлориды алюминия, железа и др., и, следовательно, можно ожидать, что некоторое количество хлористого алюминия благоприятно скажется на качестве пленки.

Другим важным фактором при гидролизе и поликонденсации является кислотность среды. От нее и от чистоты исходного продукта зависят молекулярный вес полимера и однородность его химического состава. Существует несколько способов нанесения полимерных пленок (при условии предварительного увлажнения поверхности переходов):

- 1) погружение в жидкие метилхлорсиланы;
- 2) погружение в растворы метилхлорсиланов или их смесей;
- 3) выдержка в парах силанов или их смесей.

Первый способ дает лучшие результаты, но при его использовании создается высокая концентрация хлористого водорода, который интенсивно разрушает алюминий. Этот же недостаток неизбежен и при силанировании из газовой фазы, что отрицательно влияет на сплавные кремниевые приборы, имеющие алюминиевые электроды. Используя способ силанирования *p-n*-переходов из растворов, можно предотвратить некоторые недостатки, потому что:

а) имеется возможность регулировки концентрации метилхлорсиланов;

б) подбирая соответствующий растворитель, можно удалить продукты реакции из сферы реакции;

в) возрастает технологичность процесса, поскольку есть возможность вводить нейтрализующие соляную кислоту добавки;

г) создается гомогенная среда для поликонденсации пленки, так как в растворитель переходят продукты гидролиза.

Практически для получения полисилоксанов в качестве растворителей обычно применяют ксилол, толуол и бензол. Повышение молекулярного веса полимеров происходит в процессе испарения растворителя. В это же время наблюдается перегруппировка силоксановых связей и химическое взаимодействие их с поверхностными соединениями, защищаемыми *p-n*-переходами. Большое значение при создании полимерной пленки имеет толщина водного покрытия и стабильность давления паров воды над увлажняемой поверхностью. Кроме того, не меньшее влияние на толщину полимерной пленки, удерживаемой на поверхности *p-n*-перехода, имеет структура поверхности, ее химический состав, степень гидрофильности. Например, экспериментально установлено, что при взаимодействии газообразного $(\text{CH}_3)_2\text{SiCl}_2$ с водой, адсорбированной при относительной влажности 100% стеатитом, толщина образовавшегося слоя полисилоксана составляет примерно 0,2 мкм, что соответствует 300 звеньям $(\text{CH}_3)_2\text{SiO}_2$. Наличие значительного количества групп в мономерах и образующихся макромолекулах существенно улучшает адгезию пленки, так как эти группы способны к химическому взаимодействию с поверхностными соединениями кремния. Силанирование не только закрепляет существующую структуру поверхности, но и в некоторых случаях улучшает электрические параметры *p-n*-переходов, поскольку при нанесении пленки устраняются структурные дефекты поверхности.

Технологический процесс нанесения защитной силановой пленки состоит в следующем.

После травления в кислотном травителе и промывки в деионизованной воде кристаллы с *p-n*-переходами погружают в жидкость органо-замещенного силана на время, в течение которого происходит полное смачивание поверхности. Обычно используют смесь органо-замещенного хлорсилана, которая состоит из одной части метилтрихлорсилана и двух частей триметилхлорсилана. Реакция этой смеси с влагой, которая имеет место на поверхности кремниевого кристалла, вызывает расщепление соляной кислоты и образование цепи полимеризации, которая дает тонкую защитную пленку кремниевых полимеров. В результате такой реакции возникает сильная химическая связь между атомами кремния и кислородом. Это приводит к образованию термостабильной защитной пленки. Толщина пленки составляет около 0,6 мкм.

Другой процесс силанирования заключается в том, что кристаллы с *p-n*-переходами покрывают изоляционным слоем пиролитически осажденного органо-кремниевого соединения. Кристаллы помещают в молибденовую лодочку, расположенную на нагревателе в кварцевой реакционной трубе. Через эту трубу пропускают гелий, который предварительно насыщается тетраэтоксимоносиланом. Температура нагревателя поддерживается равной 800°C. Скорость пропускания газовой смеси над пластинами с *p-n*-переходами выбирается от 50 до 60 м³/ч. Толщина изолирующей пленки близка к 2,5 мкм. Скорость выращивания пленки 800 Å/мин.

После этого наносят второй слой изоляционной пленки при пропускании гелия через сосуд, содержащий жидкий этил триэтоксисилан. Смесь пропускается через реакционную трубу в течение 5 мин при температуре 800°C. Толщина второго защитного покрытия составляет 0,2 мкм. Скорость выращивания второго слоя выбирается равной 400 Å/мин.

Одним из основных преимуществ метода силанирования по сравнению с методом защиты переходов лаками и эмалями является возможность химического связывания защитной пленки с поверхностью полупроводника. Это обеспечивает не только надежную адгезию, но и позволяет устранить некоторые структурные нарушения поверхности, что способствует заметному улучшению электрических параметров переходов.

§ 9.6. Защита пленками окислов металлов

Для защиты поверхности *p-n*-переходов иногда применяют пленки на основе окислов металлов: алюминия, титана, бериллия, циркония и др. Исходный материал берут в виде порошка. В качестве несущего агента можно использовать галоген или галогидное соединение водорода. При добавлении в рабочую камеру инертных газов скорость реакции снижается. В рабочей камере устанавливается градиент температуры между источником и полупроводниковым кристаллом. Температуру источника

выбирают выше, чем температуру кристаллов. С увеличением градиента температуры скорость реакции увеличивается. Для осаждения защитных пленок Al_2O_3 , BeO , TiO_2 , ZrO_2 , AlN температуру источника необходимо выбирать в диапазоне 700—1200°C, а температуру кристаллов — в диапазоне 350—500°C. Расстояние между источником и кристаллами определяют в зависимости от требуемой величины температурного градиента (10—15 см).

В табл. 9.2 приведены материалы источника, несущие агенты и оптимальные режимы осаждения защитных пленок.

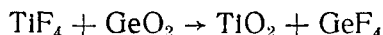
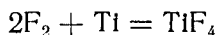
Таблица 9.2

Материалы источника	Несущие агенты	Температура источника, °C	Температура кристаллов, °C
Al_2O_3	$\text{HCl}(\text{HBr})$	800—1000	400—500
BeO	$\text{HCl}(\text{HBr})$	900—1200	500
TiO_2	$\text{HCl}(\text{HBr}; \text{Cl}_2)$	800—1000	500
ZrO_2	$\text{HCl}(\text{HBr})$	1000—1200	500

Для защиты поверхности и стабилизации электрических параметров p - n -переходов используют процесс титанирования. Этот процесс состоит в том, что на поверхности кристалла с p - n -переходом осаждается один из сложных эфиров: негидролизированный титановый эфир, тетраизопропилтитанат, тетрабутилтитанат или тетраэтилгексинтитанат. Затем покрытие стабилизируют путем термического прогрева или с помощью катализаторов. В результате получают прочные, химически связанные с поверхностью полупроводникового кристалла пленки двуокиси титана.

Процесс титанирования используют для защиты германиевых и кремниевых транзисторов.

Другой способ титанирования заключается в замещении слоя окиси германия на поверхности кристалла германия покрытием из окиси титана. Это покрытие наносят с помощью потока фтора и источника титана. Фтор проходит по трубопроводу и, насыщаясь титаном, образует газообразный фторид титана. Фторид титана реагирует с поверхностью кристаллов, покрытых слоем окиси германия. При этом на поверхности кристаллов образуется окись титана и парообразный фторид германия:



Способ получения защитных покрытий на основе Pb_3O_4 , ZnCrO_4 , SrCrO_4 и их смесей заключается в смешивании порошка Pb_3O_4 , ZnCrO_4 или SrCrO_4 с летучим растворителем до получе-

ния суспензии. Эту суспензию наносят на поверхность кристалла с *p-n*-переходом распылением. После испарения летучего растворителя кристаллы нагревают до температуры 200°C в течение 30 мин.

Другой способ защиты поверхности кристаллов с *p-n*-переходами включает в себя нагрев этих кристаллов в окисляющей атмосфере в присутствии ванадия или его соединений. Ванадий присутствует в рабочей камере в виде порошкообразной пятиокиси ванадия V_2O_5 . Температура процесса нанесения защитной пленки 1200°C. Через рабочую камеру пропускают водяные пары, содержащие кислород с парциальным давлением 25 мм рт. ст. После получения толщины пленки около 1 мкм лодочка с порошком V_2O_5 медленно выдвигается из печи.

Для защиты поверхности *p-n*-перехода используют пленки окиси вольфрама. Пленки наносят методом плазменного распыления в атмосфере кислорода. Толщина пленок 0,01—1 мкм. Давление газа в рабочей камере может быть выбрано близким к $5 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст. Катодом служит чашеобразный диск из вольфрама, а анодом — полупроводниковые пластины с *p-n*-переходами. Температура процесса не должна превышать 300°C. Напряжение на электродах зависит от выбранного давления газа внутри рабочей камеры и не должно превышать 500 в. Внутри камеры образуется плазма, содержащая положительные ионы газа.

§ 9.7. Защита гидрофобными пленками

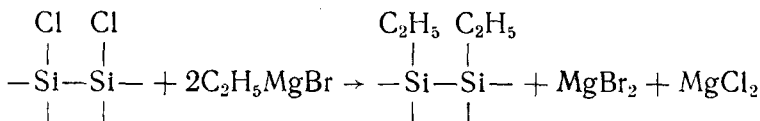
Для защиты поверхности кристаллов с *p-n*-переходами гидрофобными (влагоотталкивающими) пленками используют различные способы. Например, галоидирование поверхности пластины с последующей обработкой ее реактивным алкилирующим агентом, таким, как соединение щелочного металла с алкилом- и магнийгаллоидами.

Полупроводниковые пластины германия или кремния с *p-n*-переходами травят и промывают. Затем поверхность кристаллов галоидируется. Процесс проводят сначала в потоке очищенного и нагретого инертного газа (азот, аргон) в течение 15 мин при температуре 130°C. Потом температуру в печи понижают до 85°C и через пластины пропускают смесь хлористого водорода с хлором в равных соотношениях в течение 10 мин. После этого процесс повторяют.

В результате такой обработки возникают связи между атомами поверхности полупроводника и атомами хлора. Обработанную пластину погружают в реактивный органический алкилирующий агент. Этот агент характеризуется произведением MR , где M — щелочной металл (литий, натрий, калий и др.); R — органический радикал.

Другим реактивным органическим алкилирующим агентом могут служить вещества, характеризуемые формулой $RMg \cdot x$, где x — элемент из группы хлора, брома, йода; R — алкильная группа.

Например, реакция между кремнием и магнийбромэтилом протекает следующим образом:



Для удаления солей магния и избытка алкилирующего агента пластину промывают в растворе хлорида аммония или уксусной кислоты. Затем пластину промывают в деионизованной воде и сушат.

Второй способ получения защитной пленки заключается в том, что кристаллы с *p-n*-переходами после травления и промывки обрабатывают соединениями бора. Для этой цели можно использовать эфир борной кислоты или триэтиловый эфир борной кислоты. В качестве растворителей можно применять спирты.

Обработку производят путем погружения кристаллов в ванну с раствором эфира борной кислоты. После этого кристаллы сушат при температуре 80—150°C. В результате такой обработки на поверхности германия или кремния образуется защитная пленка.

По третьему способу кристаллы с *p-n*-переходами после травления и промывки помещают в раствор, состоящий из моноатомного или многоатомного алифатического спирта с одним или четырьмя углеродными атомами в молекуле. Кристалл выдерживают в этом растворе в течение 1—5 мин. В результате на поверхности образуется гидрофобная пленка сложного эфира. Эта пленка имеет молекулярную связь с кремнием. Толщина пленки обычно 0,01—0,1 мкм. Пленка обладает высокой механической прочностью и электрической стабильностью во времени. После нанесения пленки кристаллы промывают в ацетоне и сушат при 150°C.

Четвертый способ получения защитной пленки включает в себя процесс этерификации. Этот способ дает возможность пассивировать поверхность полупроводникового материала, покрытого окисной пленкой. После травления и промывки пластины окисляют в среде кислорода при давлении 0,75 ат в течение 2 ч при температуре 1000°C. При этом образуется гидрофильная пленка, которая переходит в гидрофобную после процесса этерификации.

Процесс этерификации проводят в автоклаве при давлении 10—30 ат и температуре 250°C. В рабочую камеру автоклава помещают пластины с *p-n*-переходами и заливают этерифицирующую жидкость, например, триметилметоксисилан.

§ 9.8. Защита окислением

Методы оксидирования считаются наиболее совершенными методами защиты поверхности *p-n*-переходов. Поверхность германия и кремния после травления при выдержке на воздухе покрывается пленкой окисла. Хотя окислы германия и кремния облада-

ют хорошими диэлектрическими свойствами и поэтому потенциально пригодны для защиты поверхности p - n -переходов, образовавшаяся пленка очень чувствительна к воздействию окружающей среды и не может служить пассивирующим покрытием. Для защиты можно использовать только достаточно толстые окисные пленки, получаемые специальным выращиванием. Получение стабильной пленки двуокиси на германии достаточно сложно. Более просто окислирование осуществить на кремнии. Известны несколько основных способов выращивания окисных пленок на поверхности кремниевых пластин и кристаллов с целью стабилизации поверхностных свойств:

- 1) термическое окисление;
- 2) пиролитическое окисление;
- 3) химическое окисление;
- 4) анодное окисление.

Термическое окисление

Выращивание окисной пленки на поверхности кремния производят чаще всего методом открытой трубы. Тщательно очищенный азот пропускается через деионизованную воду и увлажнен-

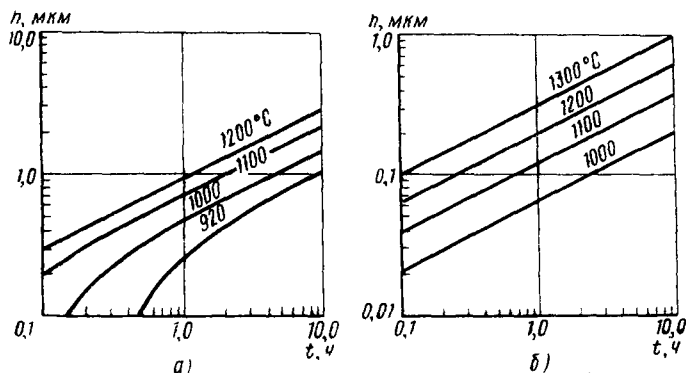


Рис. 9.2. Графики скорости роста толщины пленки SiO_2 для различных температур процесса:

а — в водяном паре; б — в чистом кислороде

ный водяным паром попадает в трубу, где в высокотемпературной зоне печи (1100—1300 °C) находятся пластины кремния. Для создания совершенной пленки двуокиси пластины перед окислением полируют механически или химически.

Иногда окисление ведут в чистом кислороде или в специально очищенном атмосферном воздухе (чаще в протоке).

На рис. 9.2 представлены графики скорости роста толщины пленки SiO_2 для различных температур процесса.

Кинетика роста пленки SiO_2 в различных условиях характеризуется выражением

$$h^m = kt,$$

где h — толщина пленки;

t — время;

k — константа, определяемая давлением и температурой.

Если окисление ведется в чистом кислороде или в водяном паре при давлениях, отличающихся от атмосферного не более чем на порядок, то $m=2$.

При окислении в водяном паре

$$h^2 = 2,5 \cdot 10^{15} \cdot p^{1,6} t \exp\left(-\frac{1,7}{kT}\right).$$

При окислении в чистом кислороде

$$h^2 = 8,4 \cdot 10^{10} \cdot p^{0,8} t \exp\left(-\frac{1,7}{kT}\right).$$

Если давление p выразить в атмосферах, время t — в минутах, то толщина пленки будет в ангстремах.

Из формул видно, что коэффициенты диффузии окисляющих агентов при использовании водяного пара на несколько порядков больше, чем в случае чистого кислорода, и по-разному зависят от давления.

Так как в процессе окисления в водяном паре получают большие коэффициенты диффузии окисляющих агентов, при достаточно высоких температурах и давлениях диффузия перестает быть ограничивающим фактором скорости роста окисной пленки и кинетические зависимости изменяются.

Практически широко распространен комбинированный способ термического окисления, который основан на одновременном использовании чистого кислорода и водяного пара.

Окисел, выращенный в атмосфере чистого осушенного кислорода, имеет более совершенную структуру, поэтому часто окисление осуществляют в три стадии — в осушенном кислороде, в увлажненном (для убыстрения процесса и наращивания достаточно толстой пленки) и вновь в осушенном. Однако предельная толщина термически выращенной совершенной окисной пленки не превышает 1,5 мкм. Более толстые пленки содержат трещины. Практически выращивают пленки SiO_2 толщиной 0,2—1,2 мкм.

Чтобы получить высокую скорость выращивания защитных окисных пленок, используют водяной пар под давлением. После травления и промывки кристаллы с p - n -переходами обрабатывают в течение 15 мин в азотной кислоте при температуре 100°C и сушат на воздухе. Далее кристаллы оксидируются при температуре 650°C и давлении водяных паров около 50 ат в течение 2 ч. В результате на поверхности пластины образуется защитная окисная пленка толщиной 0,3 мкм.

Выращивание окисной пленки в среде водяного пара можно производить при температуре 1200°C в течение 5 ч при атмосферном давлении. После окислирования водяной пар заменяется инертным газом, который пропускается через пластины в течение 1 ч при той же температуре. Толщина пленки получается равной 2 мкм.

Термическое окисление применяют для получения более совершенной поверхности кремния. Для этого образовавшийся окисел удаляют, растворяя в плавиковой кислоте.

Пиролитическое окисление

Описанная технология для германия непригодна, так как образующаяся пленка гексагональной двуокиси германия нестабильна и не может служить надежной защитой при проведении диффузии. Начиная с 700°C двуокись германия в инертной или восстановительной среде реагирует с объемом, образуя летучую моноокись.

Нагрев в окислительной среде при $T \geq 700^{\circ}\text{C}$ вызывает эрозию поверхности. Защиту поверхности германия осуществляют выращенной на ней пленкой SiO_2 .

Для защиты поверхности германия гексагональную пленку GeO_2 преобразуют в тетрагональную, выдерживая ее при $700\text{—}750^{\circ}\text{C}$ в течение нескольких часов (или суток), используя в качестве катализатора флюс на основе углекислого лития. Получаемые таким образом пленки GeO_2 имеют толщину до 1,2 мкм и являются газо- и влагостойкими.

Более широкое распространение получили защитные пленки SiO_2 на германии, выращиваемые методом термораспада кремнийорганических соединений. Покрытие образуется при термическом разложении органооксисиланов (см. табл. 9.3). Оно очень просто наносится, обладает хорошей механической стойкостью и легко удаляется при травлении в HF .

Таблица 9.3

Температура кипения органооксисиланов

Название органооксисилана	Химическая формула	Точка кипения при 760 мм рт. ст., $^{\circ}\text{C}$
Тетраэтоксисилан . . .	$\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$	167
Этилтриоксисилан . . .	$\text{C}_2\text{H}_5\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_3$	160,9
Амилтриэтоксисилан . .	$\text{C}_5\text{H}_{11}\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_3$	198
Винилтриэтоксисилан . .	$\text{CH}_2=\text{CHSi}(\text{OC}_2\text{H}_5)_3$	160,5
Фенолтриэтоксисилан . .	$\text{C}_6\text{H}_5\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_3$	233,5
Диметилдиэтоксисилан	$(\text{CH}_3)_2\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_3$	111
Дифенилдиэтоксисилан	$(\text{C}_6\text{H}_5)_2\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_3$	296

На рис. 9.3 приведены графики скорости роста толщины пленки SiO_2 на германии для трех температур процесса получения защитных пленок.

Пиролитическое наращивание пленки SiO_2 вследствие сравнительно низкой температуры процесса необходимо в тех случаях, когда окислению подвергается структура с заданным распределением примеси. Воздействие высокой температуры (в случае термического окисления) приводит к заметной диффузии примесей и изменению свойств структуры. Поэтому пиролитическая пленка SiO_2 выращивается также и на кремнии. Иногда делают комбинированное покрытие — на термически выращенный слой SiO_2 осаждают пиролитический окисел.

Технологический способ получения защитной пленки на кристаллах с p - n -переходами путем пиролитического окисления заклю-

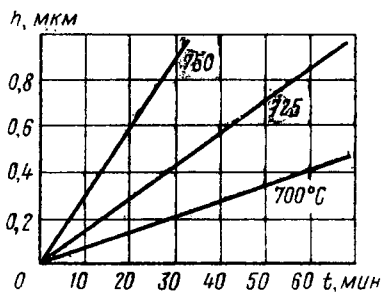


Рис. 9.3. Графики скорости роста толщины пленки SiO_2 на германии для трех температур процесса

чается в осаждении слоя SiO_2 из паровой фазы. Кристаллы с p - n -переходами помещают в трубу, которую нагревают до температуры 700° С. Через трубу пропускают кислород и тетраэтоксисилан со скоростью 0,5 л/мин. Тетраэтоксисилан подвергается термическому разложению с образованием пленки двуокиси кремния на поверхности кристаллов. В течение 8 мин образуется пленка толщиной 0,15 мкм. Кристаллы, покрытые окисной пленкой, отжигают в вакууме при температуре 750° С в течение 2 ч. После

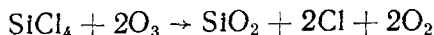
этого процесс полностью повторяется. Общая толщина защитной пленки составляет 0,75 мкм.

Другой способ получения окисной пленки заключается в нагреве полупроводникового кристалла в среде, содержащей окислительный газ и два или более газа, реагирующих друг с другом с образованием кремния. Эта смесь газов может состоять из двуокиси углерода, двуокиси водорода и тетрахлорида кремния. Температура процесса получения пленки равна 1250°С. Общая скорость течения газовой смеси составляет 1 л/мин. Молярное отношение двуокиси углерода и тетрахлорида кремния должно быть 0,8 и 0,15 соответственно.

Пары тетрахлорида кремния и водород реагируют между собой с образованием кремния и хлористого водорода. Кремний окисляется двуокисью углерода и осаждается на полупроводниковую пластину. Скорость осаждения пленки окиси кремния составляет 0,4 мкм/мин.

Защитные пленки можно получить с помощью электрического разряда в смеси тетрахлорида кремния и озона. Под действием электрического разряда происходит реакция тетрахлорида крем-

ния с озоном. Тетрахлорид кремния и озон вводятся в рабочую камеру в паровой фазе. Процесс может проходить при комнатной температуре. Химическая реакция идет по формуле



Пластину кремния или германия помещают в реакционную камеру, через которую пропускают кислород и аргон в течение 15—30 мин для очистки камеры от воздуха и влаги. После этого через пластину пропускают аргон, насыщенный SiCl_4 , со скоростью $0,06 \text{ м}^3/\text{ч}$ и озон со скоростью $0,02 \text{ м}^3/\text{ч}$. К электродам в рабочей камере прикладывается напряжение порядка 30 кВ. Процесс проводится от 1 до 5 ч в зависимости от требуемой толщины пленки. Скорость нанесения защитной пленки равна $5 \text{ мкм}/\text{ч}$.

Химическое окисление

Определенное распространение получил процесс создания окисной пленки путем обработки поверхности сильными химическими окислителями. В качестве окислителей для германия и кремния используют смесь азотной и плавиковой кислот. Отличие от кислотных травителей состоит в том, что азотную кислоту берут в избытке и процесс окисления поверхности полупроводника преобладает над процессом растворения окисной пленки. Образующаяся пленка имеет темно-синий цвет, высокую плотность и значительную толщину. Однако ее стабилизирующие свойства не очень высоки и чувствительны к режиму окисления, малейшие отклонения от которого приводят к значительному возрастанию обратных токов p - n -переходов и их стабильности.

Анодное окисление (анодирование)

Метод анодного оксидирования позволяет предотвратить недостатки термического и химического окисления. Анодное окисление является одной из основных электродных реакций, управляющей процессом растворения полупроводника. Если в электролите отсутствует реагент, растворяющий окисную пленку, то ее толщина может быть получена достаточно большой.

Анодное оксидирование проводят в электролитах типа борной кислоты или бидистиллированной воды, а также в водноперекисных растворах с комплексообразующими добавками (лимонной кислотой, щавелевой кислотой, их титановыми или циркониевыми солями) и в растворах нитрата натрия, хлорной кислоты, бихромата аммония. В качестве примера можно привести водноперекисный электролит, состоящий из 96 мл H_2O , 4 мл H_2O_2 и 0,1 г CH_3COOH .

На рис. 9.4 показана схема устройства для анодного оксидирования в дистиллированной воде. Сосуд с электролитом разделен на две части перегородкой с отверстиями 4, в которые вставляются оксидируемые кристаллы 1, помещенные в крепящее приспособле-

ние 5. Анодный вывод 2 контактирует с кристаллом полупроводника таким образом, чтобы обрабатываемый p - n -переход (на рисунке — коллекторный) был смещен в прямом направлении. Тогда на катоде 3 осаждаются протоны и выделяется водород, а на кристалле полупроводника происходит окисление поверхности под действием приходящих сюда ионов гидроксила. Процесс роста пленки SiO_2 ускоряется при повышении тока, чему, очевидно, способствует уменьшение удельного сопротивления воды. Но уменьшение сопротивления обязано присутствию диссоциированных примесей, которые неблагоприятно сказываются на защитных свойствах пленки. Деионизованная вода (с $\rho=1\text{--}2\text{ мом}\cdot\text{см}$), хотя и способствует созданию высококачественного оксидного покрытия, но практиче-

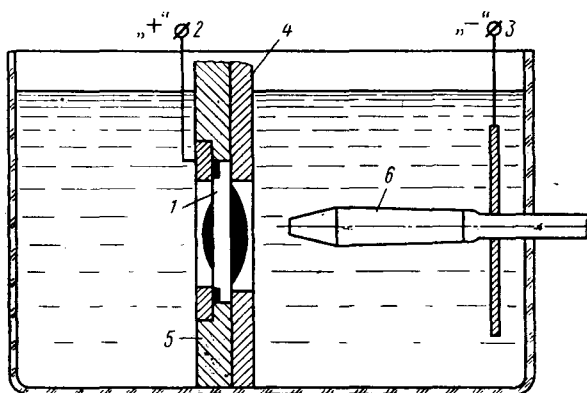


Рис. 9.4. Схема устройства для анодного оксидирования в дистиллированной воде

ски сводит до нуля скорость роста окисной пленки. Поэтому практически используют воду с удельным сопротивлением $200\text{--}500\text{ ком}\cdot\text{см}$.

Выделяющийся при образовании двуокиси газ адсорбируется в виде небольших пузырьков на поверхности кристалла, что затрудняет равномерный рост пленки. Для удаления газовых пузырьков служит сопло 6, через которое производится обдув кристалла азотом или аргоном. Таким же образом можно вводить в сопло и электролит (с помощью насоса).

Получение защитной пленки на поверхности полупроводникового кристалла методом анодирования можно проводить в электролите, состоящем из борной кислоты, гликоля и водного раствора аммиака. При прохождении через полупроводниковый кристалл постоянного тока величиной $1\text{--}50\text{ ма}$ в течение $1,5\text{ ч}$ на поверхности кристалла образуется изолирующий слой окиси. После анодной обработки кристаллы промывают в деионизованной воде и сушат в потоке горячего воздуха.

Анодное окисление в электролите, состоящем из насыщенного раствора нитрата калия в *N*-метильном ацетамиде, проводят при комнатной температуре и постоянном токе 5—8 *ма*.

§ 9.9. Защита пленками нитрида кремния

С расширением планарной технологии потребовалось повышение стабильности электрических параметров планарных приборов, особенно обратного тока *p-n*-перехода. Установлено, что нестабильность электрических параметров планарных структур вызвана дрейфом ионов щелочных металлов как внутри, так и на поверхности окисла, используемого в качестве маски при диффузии и для защиты.

Ионы щелочных металлов, особенно ионы натрия, обладают сравнительно большой подвижностью (для Na^+ при $T=200^\circ\text{C}$ $\mu=10^{-12} \text{ см}^2 \cdot \text{в}^{-1} \cdot \text{сек}^{-1}$) и при повышенных температурах дрейфуют в электрическом поле, изменяя поверхностный потенциал.

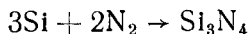
Одним из способов повышения стабильности планарных приборов является выращивание поверх слоя двуокиси кремния фосфорносиликатного стекла, описанного ранее. Фосфорносиликатное стекло, по-видимому, геттерирует и связывает ионы натрия, препятствуя их миграции.

Другим способом, позволяющим существенно улучшить стабильность планарных приборов, является применение в качестве маски при диффузии пассивации поверхности *p-n*-переходов и электрической изоляции пленки нитрида кремния Si_3N_4 вместо двуокиси кремния (или в дополнение к ней).

Пленка нитрида кремния более прочна и более непроницаема по отношению к используемым диффузантам, чем пленка SiO_2 . Поэтому Si_3N_4 получают в виде более тонких слоев. В процессе фотолитографии на более тонких пленках можно получить и меньшие размеры элементов изображений, вытравливаемые в пленке. Пленки нитрида кремния можно выращивать во много раз быстрее, чем пленки двуокиси кремния, и при более низких температурах. Толщина пленок Si_3N_4 может изменяться от нескольких десятков ангстрем до нескольких микрон. Электрическая прочность пленок нитрида кремния выше, чем двуокиси кремния; она близка к 10^7 в/см . Диэлектрическая проницаемость 6—9.

Известны различные методы получения защитных пленок нитрида кремния.

Реакция взаимодействия Si с N_2 . Для осуществления реакции нитрирования кремния необходима температура порядка 1100—1300° С. Реакция протекает по формуле



Обычно этой реакцией пользуются для получения нитрида кремния как тугоплавкого материала. В данной реакции чистый азот может быть заменен аммиаком, который диссоциирует при высокой

температуре и взаимодействует с кремнием легче, чем молекулярный азот. Режим получения пленок этим методом следующий: скорость пропуска азота по трубе установки $300 \text{ см}^3/\text{мин}$, температура $1100\text{—}1300^\circ \text{C}$. Для получения пленки толщиной $0,2 \text{ мкм}$ при этом необходимо 24 ч . Из-за высоких температур метод не находит применения.

Реакция взаимодействия SiN_4 с NH_3 . Для выращивания пленок нитрида кремния в газовой среде производят азотирование силана аммиаком в кварцевой трубе при температурах $700\text{—}1100^\circ \text{C}$. В трубу в потоке водорода с расходом 4 л/мин подаются пары силана и аммиак, соотношение которых выбирается равным $1:20$. Избыток водорода препятствует преждевременному разложению силана (температура его разложения 500°C). В результате взаимодействия силана и аммиака на кремневой подложке образуется пленка нитрида

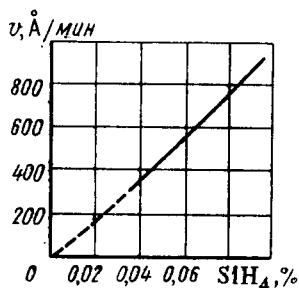
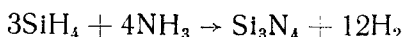


Рис. 9.5. Зависимость скорости роста пленки Si_3N_4 , полученной пиролизическим методом от концентрации силана в реагирующей смеси при $T=850^\circ \text{C}$ ($1\% \text{ NH}_3$)

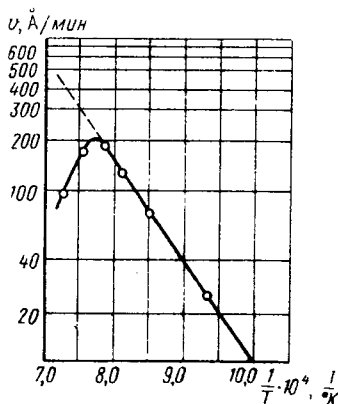


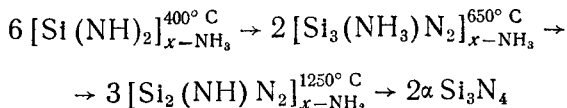
Рис. 9.6. Зависимость скорости роста пленки Si_3N_4 , полученной пиролизическим методом ($\text{SiH}_4 + \text{NH}_3 + \text{N}_2$), от температуры

На рис. 9.5 показана зависимость скорости роста пленки Si_3N_4 от концентрации силана в реагирующей смеси при температуре 850°C . На рис. 9.6 приведена зависимость скорости роста пленки от температуры. Уменьшение скорости роста с увеличением температуры свыше 1000°C обусловлено недостаточным количеством силана вблизи подложки вследствие его интенсивного разложения. Обычно пленки Si_3N_4 имеют аморфную структуру, однако в пленках, выращенных при 1100°C , наблюдаются отдельные кристаллические образования.

Реакция взаимодействия SiCl_4 с NH_3 . При выращивании пленок Si_3N_4 аммонолизом SiCl_4 протекают следующие реакции. На начальной стадии образуется диимид кремния:



При комнатной температуре эта реакция дальше не идет, но происходит полимеризация диимида. При нагреве подложки протекает реакция



В результате образуются кристаллиты нитрида кремния α -модификации. При температуре 1100—1200°С получается полностью аморфная пленка Si_3N_4 . В толстых пленках Si_3N_4 (свыше 1 мкм) возникают трещины, плотность которых растет с увеличением толщины и скорости выращивания. Наличие трещин не только результат различия в коэффициентах термического расширения (у Si_3N_4 $\text{КТР}=4,2 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$), но и следствие структурной неоднородности пленки и подложки.

Процесс получения защитных пленок Si_3N_4 этим методом проводят в горизонтальной кварцевой трубе, в которую вводят отдельно газовые смеси. Температуру внутри рабочей камеры поддерживают равной 1000°С, а всей остальной трубы — 375°С, чтобы исключить конденсацию на поверхности трубы хлорида аммония. Поток аммония подается в трубу со скоростью 10 л/мин, а тетрахлорид — со скоростью $(1-2) \cdot 10^{-3}$ моль/мин. Этот метод позволяет получать пленки нитрида кремния, обладающие хорошей адгезией к поверхности кремния. Скорость роста пленок Si_3N_4 зависит от соотношения между компонентами газовой смеси и от температуры.

На рис. 9.7 приведена зависимость скорости роста пленок Si_3N_4 от температуры для двух соотношений между SiCl_4 и NH_3 в реагирующей смеси.

Реакция взаимодействия SiH_4 с N_2H_4 . Вместо аммиака для получения пленок Si_3N_4 может быть использован гидразин N_2H_4 . Реакция этих веществ идет по следующей схеме:

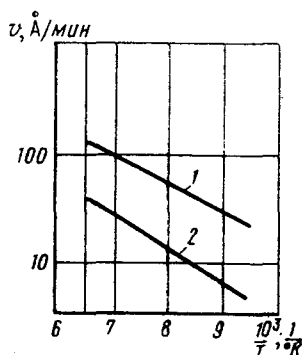
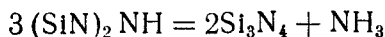
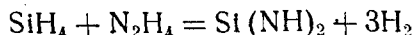


Рис. 9.7. Зависимость скорости роста пленки Si_3N_4 от температуры для двух соотношений между SiCl_4 и NH_3 в реагирующей смеси:

1— $\text{SiCl}_4=2 \cdot 10^{-4}$, $\text{NH}_3=4 \cdot 10^{-2}$;
2— $\text{SiCl}_4=10^{-5}$, $\text{NH}_3=2 \cdot 10^{-2}$

При использовании аммиака температура осаждения пленок Si_3N_4 не может быть ниже 750°C . Применение гидразина позволяет снизить температуру до 550°C , так как гидразин разлагается при более низких температурах, чем аммиак.

Нанесение пленок проводят в кварцевой трубе, через которую пропускают водород, насыщенный гидразином. В эту смесь добавляют SiH_4 . Концентрацию SiH_4 и N_2H_4 можно выбирать в пределах от 1 : 0,5 до 1 : 10. Скорость подачи газовой смеси в рабочую камеру равна 0,6 л/мин. Перед проведением процесса гидразин подвергают очистке при комнатной температуре.

На рис. 9.8 показана зависимость скорости роста пленок Si_3N_4 от температуры для двух различных концентраций гидразина. Скорость роста пленок Si_3N_4 , начиная с температуры 750°C , остается постоянной, а при больших концентрациях гидразина и температурах выше 1000°C скорость роста уменьшается.

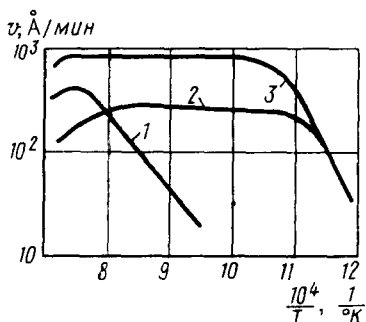


Рис. 9.8. Зависимость скорости роста пленки Si_3N_4 от температуры:

- 1— $\text{SiH}_4=0,05\%$, $\text{NH}_3=1,0\%$;
- 2— $\text{SiH}_4=0,05\%$, $\text{N}_2\text{H}_4=0,5\%$;
- 3— $\text{SiH}_4=0,1\%$, $\text{N}_2\text{H}_4=0,5\%$

Смеси устанавливают равной 100 мл/мин. В течение 1 ч на подложке осаждается пленка толщиной около 10 мкм.

На рис. 9.9 показана схема установки для проведения процессов



Реактивное катодное распыление. При этом методе реакция между кремнием и азотом происходит при низкой температуре окружающей среды за счет энергии газового разряда. Нанесение защитных пленок нитрида кремния проводят в установках катодного распыления при постоянном токе с холодным или горячим катодом. Качество пленок, получаемых этим методом, изменяется в зависимости от условий осаждения. Для проведения процесса используют катод из высокочистого кремния в виде плоской пластины большого диаметра. Этот катод подвергают распылению в смеси газов аргона и азота. Азот является реактивной добавкой, а аргон применяют для получения необходимой эффективности процесса распыления.

На рис. 9.10 представлена схема установки реактивного катодного распыления. Кремний взаимодействует с кислородом лучше, чем с азотом. Поэтому даже незначительное количество кислорода в рабочих газах (N_2 , Ar) приводит к образованию пленки SiO_2 на

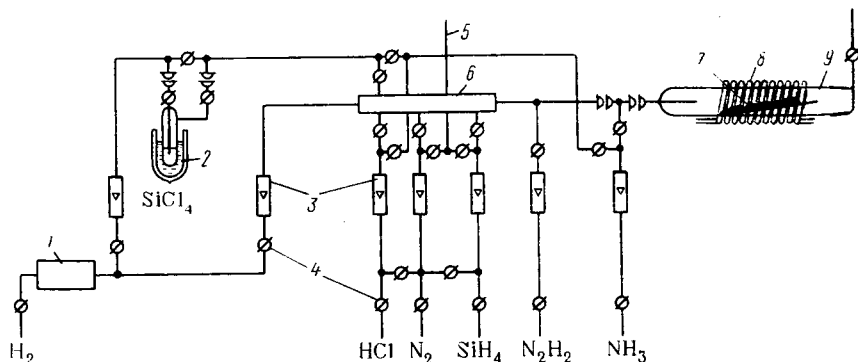


Рис. 9.9. Схема установки для проведения процессов $SiH_4 + NH_3$, $SiCl_4 + NH_3$, $SiH_4 + N_2H_2$:

1 — очистка водорода; 2 — источник $SiCl_4$; 3 — ротаметры; 4 — краны; 5 — патрубок для выпуска газов; 6 — смесительная камера; 7 — полупроводниковые пластины; 8 — нагреватель; 9 — рабочая камера

поверхности полупроводника. Поэтому рабочие газы предварительно очищают от кислорода.

Получают защитные пленки Si_3N_4 при давлениях в камере $50-2 \cdot 10^{-1}$ мм рт. ст. Напряжение распыления может быть выбрано от 600 до 2500 в, а катодный ток порядка $0,2-0,8$ ма/см². Скорость роста пленки при этих режимах близка к 100 А/мин.

Применение катода с большой поверхностью позволяет получать пленки одинаковой толщины с разбросом, не превышающим 5% одновременно на большом количестве пластин или кристаллов.

Высокочастотное реактивное распыление. Высокочастотное реактивное нанесение защитных пленок Si_3N_4 обладает рядом преимуществ: скорость осаждения по сравнению с катодным распылением выше, эффект бомбардировки отрицательными частицами меньше. Кроме того, пленки, полученные в высокочастотном разряде, менее чувствительны к наличию в ра-

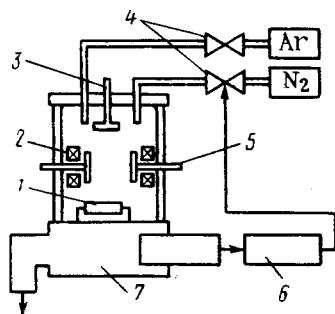


Рис. 9.10. Схема установки реактивного катодного распыления:

1 — нагреватель; 2 — магнит; 3 — анод; 4 — регуляторы; 5 — катод; 6 — автоматический регулятор; 7 — система откачки

бочей камере следов кислорода. Скорость осаждения пленок Si_3N_4 при этом методе пропорциональна мощности высокочастотного разряда и увеличивается с уменьшением расстояния между мишенью и полупроводниковым кристаллом. Суть метода заключается в создании плазмы внутри рабочей камеры с азотом (рис. 9.11). Ионы азота, ударяясь о кремниевую мишень, распыляют кремний. Атомы кремния, вылетевшие из мишени, вступают в реакцию с азотом.

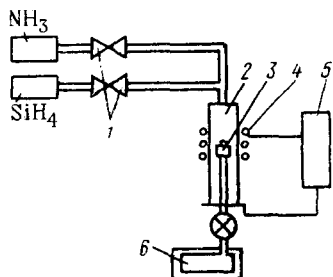


Рис. 9.11. Схема установки получения пленок в ВЧ-разряде:

1 — регуляторы; 2 — рабочая камера; 3 — подставка с полупроводниковой пластиной; 4 — нагреватель; 5 — блок ВЧ-мощности; 6 — система откачки

В результате этой реакции образуется нитрид кремния, который осаждается на полупроводниковом кристалле (подложке). Оптимальное давление азота в рабочей камере 10^{-2} — 10^{-3} мм рт. ст. Свойства защитных пленок Si_3N_4 зависят от плотности мощности, т. е. от количества энергии, приходящейся в единицу времени на единицу поверхности мишени.

На рис. 9.12 приведены графики зависимости скорости роста и травления пленок Si_3N_4 от плотности мощности. В качестве травителя для пленок Si_3N_4 используется состав из семи частей 4%-ного водного раствора NH_4F и одной части 49% HF . Скорость роста пленок Si_3N_4

возрастает с увеличением плотности мощности и приблизительно пропорциональна $\sqrt{P/S}$. Скорость травления, наоборот, умень-

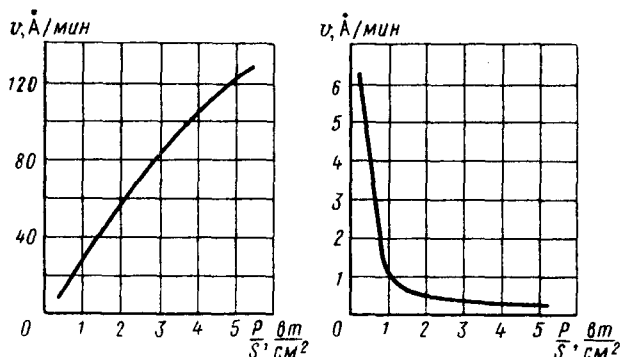


Рис. 9.12. Зависимость скорости роста и травления пленок Si_3N_4 от плотности мощности

шается с возрастанием плотности мощности; причем более резкое уменьшение скорости травления имеет место при значениях $P/S < 1$ Вт/см². С увеличением плотности мощности плотность пленок Si_3N_4 возрастает.

В качестве рабочего газа для этого метода может быть использована смесь силана и аммиака.

Свойства защитных пленок Si_3N_4 . При пассивации и защите поверхности *p-n*-переходов, а также при получении защитных масок для диффузионных процессов предпочтительно иметь пленки Si_3N_4 с аморфной структурой, поскольку на границе аморфной пленки Si_3N_4 с подложкой возникают меньшие напряжения, чем у кристаллических пленок.

В противоположность кислотостойкому кристаллическому нитриду кремния аморфная модификация медленно растворяется в концентрированной плавиковой кислоте. Скорость растворения зависит от пористости пленки, наличия в ней примесей и т. п. С уменьшением температуры подложки при выращивании пленки скорость растворения возрастает, что связано с уменьшением плотности и сплошности пленки. Длительный термический отжиг пленок Si_3N_4 приводит к повышению кислотостойкости.

Вследствие более высокой плотности и термостойкости по сравнению с пленками SiO_2 нитрид кремния обладает лучшей маскующей способностью по отношению к диффузантам. Пленка толщиной 0,18 мкм полностью экранирует кремний от диффузии Al, проводимой в запаянной ампуле из эвтектики Si—Al при $T=1150^\circ\text{C}$ в течение $t=44$ ч. Глубина диффузии в незащищенной части кремния составляет 29 мкм при $C_0=10^{16}\text{ см}^{-3}$. После $t=98$ ч в пленке Si_3N_4 возникают сквозные дефекты размерами 10—20 мкм, и она разрушается.

Пленка Si_3N_4 толщиной 500 Å выдерживает двухстадийную диффузию бора, проводимую из BBr_3 (загонка при $T=1100^\circ\text{C}$ на $x_j=3$ мкм и $C_0=10^{20}\text{ см}^{-3}$ и разгонка после удаления стекла в режиме $T=1200^\circ\text{C}$, $t=16$ ч). При более высоких температурах Si_3N_4 слабо реагирует с B_2O_3 .

Пленки Si_3N_4 толщиной 0,13 мкм полностью экранируют кремний при диффузии из POCl_3 (загонка при $T=1100^\circ\text{C}$; $x_j=3$ мкм, $C_0=10^{21}\text{ см}^{-3}$), а пленки толщиной 1000 Å почти полностью реагируют с диффузантом, образуя на поверхности стеклообразное соединение, легко растворимое в плавиковой кислоте. Основные свойства пленок Si_3N_4 приведены в табл. 9.4.

§ 9.10. Защита с помощью легкоплавких стекол

В поверхностных слоях кристаллов полупроводниковых приборов имеет место миграция ионов, которая вызывает нестабильность электрических параметров и изменение вольт-амперных характеристик. Слой стекла, нанесенный на поверхности активных элементов, связывает мигрирующие ионы, что способствует улучшению стабильности приборов и его надежности, герметизирует активный элемент (*p-n*-переход) от внешних воздействий.

Метод защиты стеклом успешно применяют на большинстве типов *p-n*-переходов: планарном, мезадиффузионном, сплавном.

Свойства нитрида кремния

Состав	Величина	Метод получения
Температура плавления, °C	2800	—
Диэлектрическая проницаемость	6—10	Реактивное катодное распыление и ВЧ реактивное распыление $\text{SiCl}_4 + \text{NH}_3$
Диэлектрическая прочность, в/см	$(1-6) \cdot 10^6$	ВЧ реактивное распыление $\text{SiH}_4 + \text{NH}_3$
Удельное сопротивление, ом·см	$10^{15} - 10^{16}$	$\text{SiH}_4 + \text{NH}_3$ Реактивное катодное распыление
Плотность, г/см ³	2,8—3,0 2,7—2,9 3,0—3,2	Реактивное катодное распыление $\text{SiH}_4 + \text{NH}_3$ $\text{SiCl}_4 + \text{NH}_3$
Коэффициент термического расширения, град ⁻¹	$2,5 - 4,2 \cdot 10^{-6}$	ВЧ реактивное распыление
Пик поглощения в ИК-области спектра, мкм	10—12 10—14 11—12	Реактивное катодное распыление ВЧ реактивное распыление $\text{SiCl}_4 + \text{NH}_3$
Скорость травления, Å/мин	130—210 150—600 5—200	$\text{SiH}_4 + \text{NH}_3$ $\text{SiCl}_4 + \text{NH}_3$ ВЧ реактивное распыление

В качестве герметизирующего материала широко используют также пластмассу. Но пластмасса не полностью защищает переход от проникновения влаги и миграции ионов, поэтому перед герметизацией пластмассой *p-n*-переходы защищают слоем стекла.

Слой защитного стекла можно наносить как на чистую полупроводниковую поверхность с *p-n*-переходом, так и на слой окисла или пассивированную поверхность. Кроме того, стекло может защищать часть металлических выводов, смежных с полупроводниковым материалом, для укрепления всей структуры прибора.

Действие легкоплавких стекол не ограничивается простой защитой от внешних воздействий. Проведенные эксперименты показали, что стекла, находясь в жидком состоянии, действуют как геттеры металлических ионов, оставшихся на поверхности кристалла.

Выбор состава стекла для определенного прибора зависит от материалов прибора и режимов его сборки. Для получения стекла с нужным коэффициентом температурного расширения и рабочей температурой состав стекла можно легко изменить.

В качестве примеров приведем составы применяемых легкоплавких стекол.

1. Халькогенидное стекло с составом: мышьяк — 24 %, сера — 67 %, йод — 9 %. Готовится это стекло в нейтральной атмосфере при 500—600° С. Процесс нанесения его на кристалл осуществляют при 250—300° С в течение 1 мин.

2. Стекло, состоящее из модификатора, кремнезема и солей борной кислоты. Модификатор содержит окись алюминия с концентрацией 5—24 % и цинк или кадмий. В модификатор может также входить окись бериллия. Общая концентрация модификатора в стекле не должна превышать 40 %.

3. Боросиликатное стекло, содержащее 80 % SiO_2 , 14 % B_2O_3 и 6 % вольфрама. Стекло наносят на кристалл путем испарения в вакууме при температуре 2000° С. Пленка стекла на поверхности полупроводникового материала обладает большой механической прочностью и высокой стойкостью к термоциклированию в диапазоне —196÷+100° С без появления микротрещин.

4. Стекланная пленка на поверхности полупроводникового кристалла, создаваемая нагреванием его в течение 1—3 ч при температуре 400—700° С в среде, содержащей кислород, пары окислов или галогенидов свинца, сурьмы и других металлов. Внедрение атомов свинца или сурьмы в решетку O—Si—O (или O—Ge—O) ослабляет межатомные связи и ускоряет процесс окисления поверхности кристалла с образованием пленки стекла.

5. Порошкообразное стекло для защиты кремниевых приборов, состоящее из 50 % окиси свинца, 40 % двуокиси кремния и 10 % окиси алюминия, для защиты германиевых приборов — из 60 % окиси свинца, 30 % двуокиси кремния и 10 % окиси алюминия. Стекло готовят в виде суспензии в дистиллированной воде, наносят на поверхность кристалла и сплавляют при температуре 1000° С. Нанесение стекла осуществляют методом центрифугирования или осаждением из паровой фазы.

6. Пленка стекла, получаемая нанесением на поверхность полупроводникового кристалла смеси микропорошка со спиртом или другим летучим наполнителем, следующего состава: 70% SiO_2 ; 20% B_2O_3 ; 7,8% Li_2O_3 , Na_2O или K_2O ; 5% Al_2O_3 или PbO . После термообработки в вакууме при температуре 300°C в течение 15 мин образуется стеклообразная пленка толщиной 1 мкм, на поверхности которой разложением этилокремниевой кислоты наращивается пленка SiO_2 и далее производится ее сплавление с нижним слоем стекла при температуре $700\text{—}900^\circ\text{C}$. После этого образуется стеклянная пленка, имеющая следующий состав: 80% SiO_2 ; 18% B_2O_3 ; 2% щелочных металлов и окислов Al_2O_3 или PbO .

7. Стеклянная пленка $\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$. На предварительно нанесенную на поверхность кремния окисную пленку осаждается соединение типа $\text{Al}(\text{OC}_n\text{H}_{2n+1})\text{Si}(\text{OC}_n\text{H}_{2n+1})_4$, где $n=1, 2, 3, 4$ определяет паровую фазой.

Таблица 9.5

Составы стекол, имеющих высокие механические, химические, электрические и термические свойства

Составные части, %	№ состава								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Оксид кремния	24	16	16	16	6	6	6	6	6
Борат	34	50	50	44	60	60	60	60	60
Оксид алюминия	12	12	20	12	12	6	6	6	6
Оксид цинка	30	22	14	28	22	28	22	22	10
Оксид бериллия	—	—	—	—	—	—	6	—	19
Оксид кадмия	—	—	—	—	—	—	—	6	—
Рабочая температура	800	670	680	670	650	640	650	625	670
Коэффициент температурного расширения $\times 10^7$ при $0\text{—}300^\circ\text{C}$, град^{-1}	38	41	40	41	44	45	44	47	44
Сопротивление при 600°C , $\text{ом}\cdot\text{см}$	больше 10^8								

При нанесении пленок стекла на окисные слои толщиной менее 0,2 мкм возможно проникновение ионов натрия из стекла через окисный слой к поверхности p - n -перехода, чувствительной к воздействию ионов. По мере проникновения ионов к поверхности p - n -перехода на этой поверхности могут возникать каналы, которые увеличивают нестабильность приборов. Поэтому силикатные или кварцевые стекла не очень эффективны в качестве защитных пленок для ионно-чувствительных поверхностей различных приборов.

Наиболее перспективным для таких приборов является боратное стекло, которое характеризуется низкой проводимостью и малыми диэлектрическими потерями, высокой механической прочностью, термической и климатической стойкостью. Оно имеет структуру, отличающуюся от силикатных стекол, способно выдерживать умеренные концентрации моновалентных катионов (натрий до 0,1%) без увеличения при этом проводимости.

Боратные стекла (табл. 9.5) отвечают требованиям герметизации приборов. Они свободны от щелочных металлов, уплотняются (спаиваются) при температурах до 800° С, относительно инертны и водонепроницаемы, имеют регулируемый коэффициент температурного расширения. Они представляют собой окисные стекла и подразделяются на три типа на основе боратов цинка, кальция и свинца.

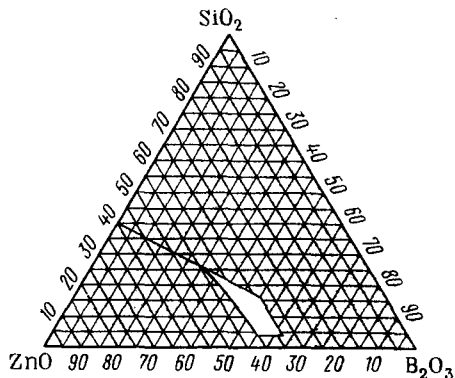


Рис. 9.13. Диаграмма состояния системы $ZnO - B_2O_3 - SiO_2$

Стекла первого типа состоят из бората цинка, окиси цинка, окиси кадмия, окиси алюминия и окиси кремния. Кроме этих составных частей в состав стекла могут входить окись бериллия и небольшие концентрации окиси титана, окиси циркония, окиси ниобия, окиси лантана, окиси церия, окиси скандия, окиси гафния, окиси галлия, окиси индия и их смеси. Эти составы стойки к расстекловыванию в широком диапазоне температур и обладают полной смешиваемостью составных частей.

В качестве примера такого стекла можно привести следующий состав: 22—25% окиси кремния, 32—38% бората цинка, 12—20% окиси алюминия, 15—30% окиси цинка. Этот состав стекла обладает коэффициентом температурного расширения, равным $38 \cdot 10^{-7} \text{ град}^{-1}$ в диапазоне температур 0—300° С, и рабочей температурой 770° С. Толщина пленки стекла от 1 до 20 мкм.

На рис. 9.13 изображена диаграмма состояния системы $ZnO - B_2O_3 - SiO_2$, иллюстрирующая область образования стекла нужного состава.

СБОРКА И ГЕРМЕТИЗАЦИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

§ 10.1. Сборка полупроводниковых приборов

Сборку полупроводникового прибора осуществляют путем различных операций: крепления кристалла полупроводника на кристаллодержателе или фланце, присоединения электрических выводов к активным областям и т. д.

Сборочная конструкция

Сборочная конструкция состоит из ряда элементов.

Баллон. Баллоны или колбы металлических диодных и транзисторных корпусов изготавливают из меди, стали или кобальта; причем у диодов они имеют проходной стеклянный изолятор. Баллон после сборочных операций плотно соединяют с фланцем.

Фланец. При сборке транзисторов кристалл полупроводника, содержащий активную структуру, крепят на кобальтовом или медном фланце. Через стеклянные изоляторы на фланце закрепляют электроды для эмиттерного, коллекторного и базового выводов. Чтобы уменьшить тепловое сопротивление, фланец делают из меди. При этом между стеклянным изолятором и фланцем ставят кобальтовую втулку, так как стекло не дает надежных спаев с медью.

Кристаллодержатель. В диодах и мощных транзисторах кристаллодержатель одновременно является фланцем, его изготавливают из меди, которую покрывают тонким слоем никеля. Для крепления кристалла у кристаллодержателя имеется возвышение. В стеклянной и металлокерамической конструкциях фланец отсутствует, а кристаллодержатель выполняют в виде цилиндрика, опрессовывающего электродный вывод. У маломощных транзисторов кристаллодержатель представляет собой никелевое кольцо или рамку, на которую напаивается омический контакт кристалла полупроводника прямоугольной или круглой формы.

Электроды. В конструкциях маломощных диодов и транзисторов электроды изготавливают в основном из никеля и кобальта; вводят их через стеклянный изолятор. Для транзисторов большой мощности эти материалы не используют вследствие плохой тепло- и электропроводности. В этом случае электроды выполняют из медной проволоки, покрытой тонким слоем никеля или серебра. Для сварки со стеклянными изоляторами на электрод надевают кобальтовую втулку. Электроды делают также из посеребренной медной

плетенки, пропускаемой в коваровую трубку, заделанную в изолятор. С целью герметизации на обоих концах трубка обжимается и плетенка сваривается с коваром.

Электрические выводы. У большинства типов диодов, стабилитронов и некоторых транзисторов нет специальных электрических выводов, соединяющих омические контакты кристалла с электродными вводами — их роль выполняют электроды. В двухэлектродных приборах средней и большой мощности «верхний вывод», т. е. электрод, противоположный кристаллодержателю или фланцу, непосредственно напаивают на кристалл полупроводника. Он может быть как гибким (из металлической плетенки), так и жестким (из медной полоски требуемой формы и размеров). В маломощных транзисторах для присоединения эмиттера и коллектора к соответствующим электродным вводам служат припаиваемые к ним электрические выводы из серебряной, золотой, никелевой или алюминиевой проволоки. В последнем случае на алюминиевую проволоку надевают никелевую втулку, которая опрессовывается или соединяется контактной сваркой, так как алюминий очень трудно поддается пайке.

Прижимной контакт. Наиболее надежными и механически прочными электрическими выводами являются прижимные пружинные контакты, применяемые в основном в маломощных двухэлектродных приборах. Прижимной электрический контакт изготавливают S-образной формы из металла с большой прочностью и упругостью — вольфрама, бронзы, стали, формируемых в виде ленты. При сборке один конец пружины касается поверхности полупроводника или находящейся на ней капли сплава, а другой соединяется с электродом. Для фиксации положения пружины необходима изоляторная трубка, поэтому прижимные контакты чаще используют в металlostеклянной конструкции. Так как при воздействии ударов, вибраций или при изменении температуры прижимной контакт может перемещаться, он не разрушает кристалл полупроводника, не приводит к обрывам и коротким замыканиям, хотя и не совсем надежен при сильной вибрации.

Термокомпенсационные прокладки. В приборах, рассчитанных на большие мощности, где кристалл полупроводника крепится на медном кристаллодержателе или контактирует на большой площади с верхним электрическим выводом, в результате различия температурного коэффициента линейного расширения (TKI) металла и полупроводника необходимо устранение или уменьшение термических напряжений. Эту проблему чаще всего решают с помощью термокомпенсаторов, у которых TKI близок к TKI полупроводника. В качестве компенсаторов используют толстые шайбы из вольфрама и молибдена. С целью облуживания шайбы подвергают специальной обработке. Иногда для устранения напряжений употребляют прокладки из мягкого металла: чистого свинца или свинца, покрытого индием. Однако при циклическом воздействии нагрузочной мощности на низких частотах свинец со временем может разрушаться.

Припой. Для соединения кристалла с электрическими выводами, электродами, прокладками, кристаллодержателем и фланцем используют припой. Различают два вида припоев: мягкие и твердые.

К мягким или низкотемпературным относятся сплавы олова с висмутом, добавляемым для предотвращения оловянной чумы (20—80% Bi, 80—20% Sn, 0,1—10% Sb); сплавы олова со свинцом (ПОС-40: Sn—40%, Pb—60%; ПОС-61: Sn—61%, Pb—38,2%, Sb—0,8%) и сплавы олова со свинцом и индием. Температура плавления их 140—210° С.

К твердым или высокотемпературным припоям относятся сплавы на основе серебра (ПСр-45: Ag—45%, Cu—30%, Zn—25%; ПСр-50: Ag—50%, Cu—50%), обладающие температурой плавления свыше 600° С.

Сборка

Соединение электрических выводов с омическими контактами кристалла осуществляют с помощью пайки, электроконтактной сварки и термокомпрессионной сварки.

Пайка. Пайку электрических выводов применяют при сборке многих типов полупроводниковых приборов. К недостаткам соединения пайкой относятся: неоднородность контакта, вследствие наличия окисных пленок, необходимость применения флюсов, загрязняющих кристалл полупроводника и разогрев кристалла до высоких температур (200—300° С). Основными преимуществами пайки являются относительная ее простота и возможность соединения деталей сложной конфигурации, что невозможно при контактной сварке.

В тех случаях, когда это возможно, соединяемые участки подвергают предварительному облуживанию либо в расплаве припоя, либо с помощью ультразвукового паяльника, либо путем нанесения припоя гальваническим методом. Участки кремния или германия, подлежащие пайке, обычно покрывают никелем или золотом. Иногда после никелирования производят золочение.

Процесс пайки, например, при соединении кристаллодержателя с кристаллом и верхним выводом выполняют в специальных печах, в инертной или восстановительной атмосфере. Все детали при этом загружают в кассеты.

Пайку электрических выводов в виде тонких проволочек к электродам осуществляют на воздухе микропаяльником, наблюдая через микроскоп с небольшим увеличением. В данном случае применяют флюсы, которые подразделяются на две группы: защитные и активные. Защитные флюсы — канифоль и ее спиртовые растворы, стеарин — только предохраняют детали и припой от воздействия кислорода; активные флюсы — хлористый цинк, хлористый аммоний — восстанавливают окислы металлов от растворимых солей. После флюсовой пайки конструкцию промывают деионизованной водой и сушат.

Для получения электрических контактов малой площади выводы присоединяют с помощью металлической связки. Металлический электрод или электрический вывод покрывают слоем вязкой смеси из разлагающейся при нагреве органической связки (смеси нитроцеллюлозы с бутилацетатом) и металлического порошка (из олова, свинца и кадмия с добавлением алюминия, индия или сурьмы и фосфора). При нагреве металлический порошок плавится и плотно сцепляется с кристаллом.

Электроконтактная сварка служит основным видом соединения как электрических выводов с электродами, так и кристаллодержателя с фланцем в производстве транзисторов малой мощности, фотодиодов и фототранзисторов. Более подробно контактная сварка рассмотрена в § 10.2.

Термокомпрессионная сварка позволяет присоединять электрические выводы толщиной не более нескольких десятков микрон к омическим контактам кристаллов диаметром не более 20—50 мкм. Причем электрический вывод можно присоединить непосредственно к поверхности полупроводника без промежуточного металлического покрытия следующим образом. Тонкую золотую или алюминиевую проволоку прикладывают к кристаллу полупроводника и прижимают нагретым стержнем. После небольшой выдержки проволока оказывается плотно сцепленной с поверхностью кристалла. Сцепление происходит вследствие того, что даже при небольших удельных давлениях, действующих на кристалл полупроводника и не вызывающих его разрушения, локальное давление в микровыступах на поверхности может быть весьма большим. Это приводит к пластической деформации выступов, чему способствует подогрев до температуры ниже эвтектической для данного металла и полупроводника, что не вызывает каких-либо изменений в структуре кристалла. Происходящая деформация (затекание) микровыступов и микровпадин обуславливает прочную адгезию и надежный контакт вследствие ван-дер-ваальсовых сил сцепления, а с повышением температуры между соединяемыми материалами более вероятна химическая связь.

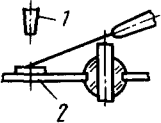
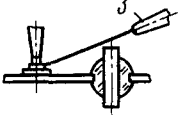
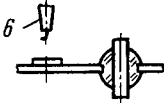
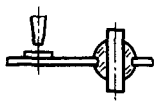
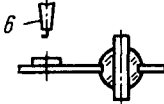
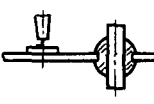
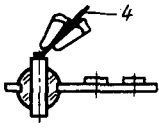
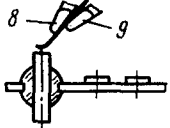
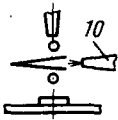
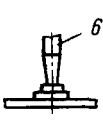
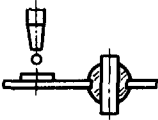
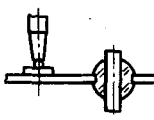
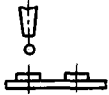
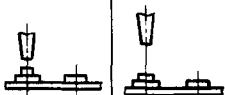
Однако давление и нагрев ограничены из-за возникновения дислокаций в полупроводнике и температуры эвтектики свариваемых материалов.

Термокомпрессионная сварка имеет следующие преимущества:

- а) соединение деталей происходит без расплавления свариваемых материалов;
- б) удельное давление, прикладываемое к кристаллу, не приводит к механическим повреждениям полупроводникового материала;
- в) соединения получают без загрязнений, так как не используют припой и флюсы.

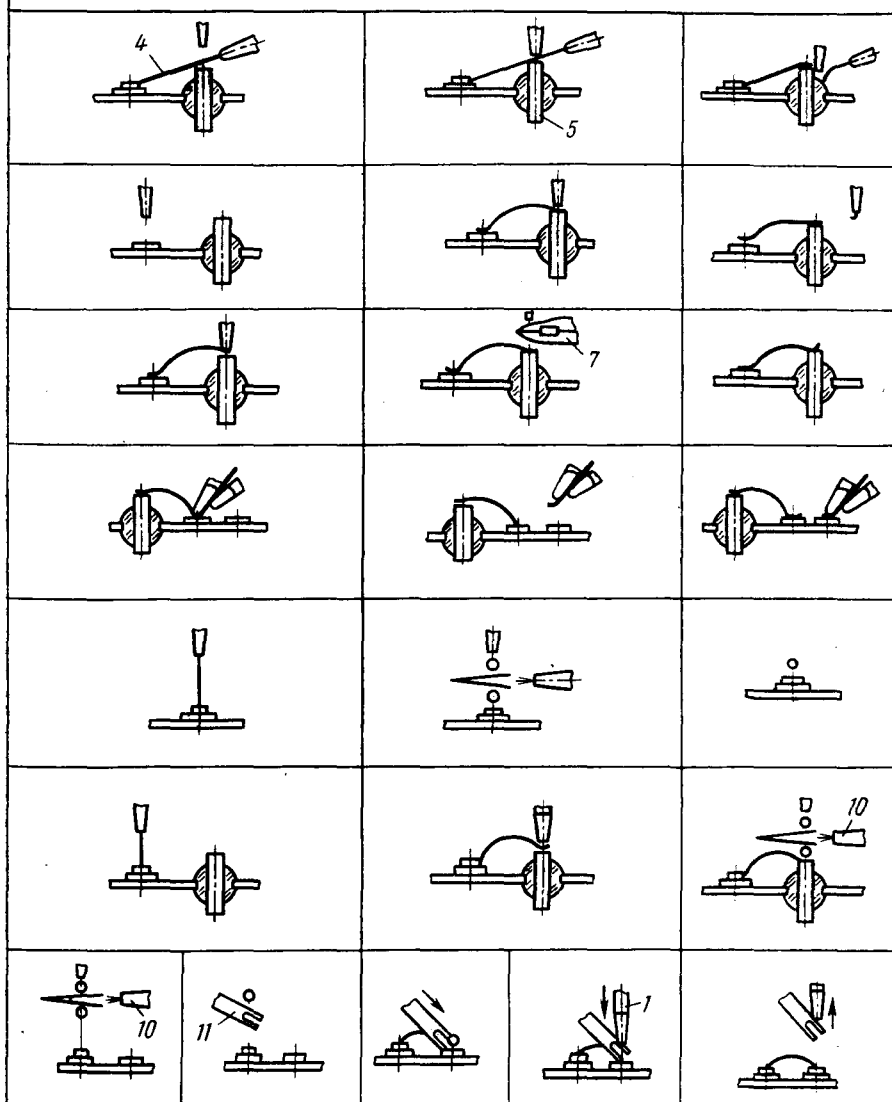
К недостаткам следует отнести малую производительность процесса.

Термокомпрессионную сварку можно осуществлять путем соединений внахлест и встык.

Способ соединения	Применяемый инструмент	Способ обрезки проволоки	Технологические	
Внахлест	Игла	Краям инструмента		
Внахлест	Капиллярный наконечник	Обрывом		
Внахлест	Капиллярный наконечник	Ножницами		
Внахлест	„Птичий клюв“	Обрывом		
Встык	Капиллярный наконечник	Пламенем горелки		
Внахлест, встык	Капиллярный наконечник	Пламенем горелки		
Внахлест, встык	Капиллярный наконечник	Пламенем горелки		

Принятые обозначения: 1 — игла; 2 — контактная площадка прибора; наконечник; 7 — ножницы; 8 — рабочая игла; 9 — поддерживающая игла; 10 — горелка;

приемы получения сварных соединений



3 — наконечник для подачи проволоки; 4 — проволока, 5 — траверза; 6 — капиллярный
11 — вилка.

При сварке внахлест электрический проволочный вывод, как уже отмечалось, накладывают на контактную площадку кристалла полупроводника и прижимают к нему специальным инструментом до возникновения деформации вывода. Ось проволочного вывода при сварке располагают параллельно плоскости контактной площадки.

При сварке встык проволочный вывод приваривают торцом к контактной площадке. Ось проволочного вывода в месте присоединения перпендикулярна плоскости контактной площадки.

Сварка внахлест обеспечивает прочное соединение кристалла полупроводника с проволочными выводами из золота, алюминия, серебра и других пластичных металлов, а сварка встык — только с выводами из золота. Толщина проволочных выводов может быть от 15 до 100 *мкм*.

Присоединять выводы можно как к чистым кристаллам полупроводника, так и к контактным площадкам, покрытым слоем напыленного золота или алюминия. При использовании чистых поверхностей кристалла увеличивается переходное сопротивление контакта и ухудшаются электрические параметры приборов.

Элементы, подлежащие термокомпрессионной сварке, проходят определенную технологическую обработку. Поверхность кристалла полупроводника, покрытую слоем золота или алюминия, обезжиривают в спирте при 25° С в течение 5 *мин*.

Золотую проволоку отжигают при 300—600° С в течение 5—20 *мин* в зависимости от способа соединения деталей. Алюминиевую проволоку протравливают в насыщенном растворе едкого натра при 80° С в течение 1—2 *мин*, промывают в дистиллированной воде и сушат. Серебряную проволоку обжигают при 700° С в течение 15 *мин* и обезжиривают. Кремний и германий травят в стандартных травителях.

Последовательность выполнения технологических операций различных видов термокомпрессионной сварки приведена в табл. 10.1. Основными параметрами режима термокомпрессионной сварки являются удельное давление, температура нагрева и время сварки (см. табл. 10.2).

Удельное давление выбирают в зависимости от допустимого напряжения сжатия кристалла полупроводника и допустимой деформации материала привариваемого вывода. Время сварки выбирают экспериментальным путем.

Относительную деформацию при термокомпрессионной сварке можно определить по формуле

$$\epsilon = \left(1 - 0,8 \frac{d}{b}\right) 100\%,$$

где d — диаметр проволоки, *мкм*;

b — ширина соединения, *мкм*.

Давление на инструмент определяют исходя из распределения напряжений на стадии завершения деформации по формуле

Режимы термокомпрессионной сварки для различных материалов

Материал вывода	Материал полупроводника или покрытия	Температура нагрева, °C	Удельное давление, 10^{-7} н/м ²	Деформация, %	Время сварки, сек
Au	Si	350	14—15	75	10
	Ge	350	10—15	75	5
	Al (напыленный)	250—350	10—15	30—50	5—10
	Au (напыленное)	300—350	9—11	30—50	5—20
	Au (гальваническое)	250—400	10—15	50—75	3—5
	Ag (вожженное)	400	13—14	90	10
Al	Si	440	5	90	30
	Ge	390	3	75	30
	Al (напыленный)	350—400	6—7	90	5
	Au (напыленное)	350	3	75	20
	Au (гальваническое)	350	3	75	20
	Ag (вожженное)	400	6—7	90	20
Ag	Al (напыленный)	400	18—19	70	20
	Au (напыленное)	350—400	14		20
	Au (гальваническое)	350—400	18—19	70	20

$$P = A \frac{1+f}{1-\epsilon} \sigma_T dD,$$

где A — коэффициент, характеризующий изменение напряжений в процессе деформации проволоки;

σ_T — предел текучести материала проволоки при температуре деформации;

d — диаметр проволоки;

D — диаметр прижимного инструмента, равный обычно (2—3) d ;

f — приведенный коэффициент трения, характеризующий трение между инструментом, проволокой и подложкой.

На рис. 10.1 приведены номограммы режимов термокомпрессионной сварки золотой (а) и алюминиевой (б) проволоки с алюминиевыми пленками. Эти номограммы дают возможность оптимального выбора соотношения между удельным давлением, температурой и временем.

Сборочные линейки. Полупроводниковые предприятия оснащены сборочными линейками, в которых процесс сборки осуществляют в контролируемой атмосфере (рис. 10.2).

Основным элементом сборочной линейки является скафандр, представляющий собой герметичную камеру из металла и плексигласа с эластичными вводами, оканчивающимися резиновыми перчатками для рук оператора. Сборочная линейка состоит из несколь-

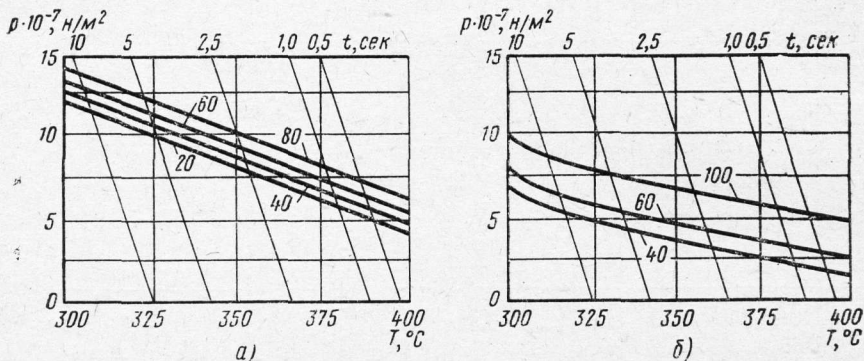


Рис. 10.1. Номограммы для выбора режимов термокомпрессионной сварки



Рис. 10.2. Общий вид сборочной линейки

ких соединенных друг с другом герметизирующими шлюзами скафандров, в которые через фильтры и осушительные устройства подается воздух определенной температуры и влажности или азот.

В скафандрах всегда поддерживается небольшое избыточное давление, затрудняющее доступ воздуха из окружающей атмосферы.

В скафандрах производят загрузку кассет, идущих на сборочную пайку или сплавление, разгружают и сушат кристаллы после химической обработки *p-n*-переходов и промывки, производят защиту поверхности *p-n*-переходов. Для этого к скафандрам через шлюзы подсоединяют необходимые приспособления и машины так, чтобы кристаллы после обработки не соприкасались с воздухом.

Обычно в сборочной линейке последовательно выполняют все операции, вплоть до герметизации корпуса. Это позволяет избежать попадания загрязнений из окружающей атмосферы на поверхность кристаллов и элементов конструкции.

§ 10.2. Герметизация с помощью стеклянных, металлостеклянных и металлокерамических корпусов

Для герметизации полупроводниковых приборов используют металлические баллоны, которые соединяют с фланцем или кристаллодержателем. В баллон двухэлектродных приборов, управляемых вентилей и некоторых видов транзисторов впаивают через стеклянный или керамический изолятор коваровую трубку, называемую штенгелем. Через штенгель от кристалла проходит электродный вывод, являясь, таким образом, электродом.

Соединения баллона с кристаллодержателем и герметизацию штенгеля производят холодной сваркой, электроконтактной сваркой и пайкой.

Холодная сварка

В том случае, если нагрев деталей недопустим и требуется высокая чистота герметизации, применяют холодную сварку — сварку под давлением. Кроме того, холодная сварка обеспечивает прочное герметичное соединение наиболее часто используемых цветных металлов — меди, алюминия и никеля, а также свинца, цинка, кадмия, серебра, титана, кобальта и др.

Большое значение для холодной сварки имеет наличие на поверхности соединяемых деталей пленки окисла. Если эта пленка пластичная и более мягкая, чем основной металл, то под давлением она растекается во все стороны и утоньшается, разделяя тем самым чистые металлические поверхности, в результате чего сварка не происходит. Если оксидная пленка более хрупкая и твердая, чем покрываемый ею металл, то под давлением она трескается. Причем растрескивание происходит одинаково на обеих соединяемых деталях. Загрязнения, имевшиеся на поверхности пленки, оказываются упакованными с обеих сторон в своеобразные пакеты, прочно зажатые по краям. Дальнейшее увеличение давления приводит к растеканию чистого металла к периферийным участкам. Наибольшее растекание происходит в срединной плоскости

образовавшегося шва, благодаря чему все пакеты с загрязнениями вытесняются наружу, а чистые поверхности металла, вступая в атомное взаимодействие, прочно сцепляются друг с другом. Происходит холодная сварка (рис. 10.3).

Следовательно, хрупкость и твердость — это основные качества окисной пленки, обеспечивающие герметичное соединение. Так как у большинства металлов толщина покрытия окисными пленками не превосходит 10^{-7} см, детали из таких материалов перед сваркой никелируют или хромируют.

Существуют два основных метода холодной сварки: встык и внахлест. Первый практически не используют в полупроводниковом производстве. Разновидность второго — сварку по периметру применяют для герметизации баллонов. Она состоит в следующем. Кристаллодержатель 1 помещают в нижний полый пуансон 2 на кольцевой вы-

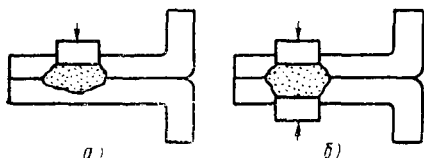


Рис. 10.3. Виды соединения деталей холодной сваркой:

a — при одностороннем давлении; *б* — при двустороннем давлении

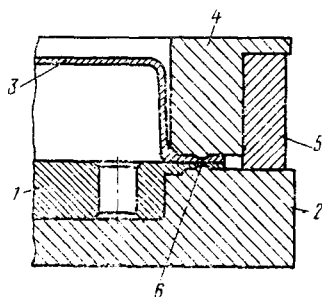


Рис. 10.4. Схема устройства для герметизации металлических корпусов холодной сваркой:

1 — кристаллодержатель; 2 — нижний пуансон; 3 — баллон; 4 — верхний пуансон; 5 — втулка; 6 — место сварки

ступ и накрывают баллоном 3, центрируемым с помощью верхнего пуансона 4 с кольцевым выступом такого же диаметра (рис. 10.4). Между нижним и верхним пуансонами помещается втулка 5.

Перед сваркой детали с целью очистки подвергают промывке в бензине и отжигают в водороде или форми-газе при $700\text{--}750^\circ\text{C}$ в течение 15—20 мин. После химической очистки и гальванического никелирования слоем 10—20 мкм детали промывают в этиловом или метиловом спирте.

Для образования качественного соединения двух деталей необходимо выбирать их таким образом, чтобы в области контакта не возникало больших упругих напряжений.

Возникновение упругих напряжений приводит к разрушению свариваемого соединения после снятия давления.

Необходимыми условиями при холодной сварке являются:

- а) точная сборка и чистота свариваемых деталей;
- б) обеспечение достаточной деформации;
- в) пластичность свариваемых материалов.

Прочность сварного соединения определяют по формуле

$$p = 0,4 D H \sigma,$$

где p — усиление разрыва, кг ;

D — диаметр отпечатка выступа пуансона;

H — толщина одной из деталей с наименьшим размером, мм ;

σ — предел прочности на растяжение с наименьшим значением.

Для деталей корпусов при холодной сварке рекомендуются следующие сочетания материалов: медь МБ — медь МБ; медь МБ — медь М1; медь МБ — сталь 10; сплав Н29К18 (ковар) — медь МБ; ковар — медь М1.

Критические давления, необходимые для пластической деформации и сварки, составляют, например, для сочетаний медь — медь $1,5 \cdot 10^9 \text{ н/м}^2$; для медь — ковар $2 \cdot 10^9 \text{ н/м}^2$.

Режим холодной сварки зависит от степени деформации, которая должна быть в пределах 75—85%. Степень деформации при сварке можно определить по формуле

$$K = \frac{2H - t}{2H} \cdot 100\%,$$

где $2H$ — суммарная толщина свариваемых деталей;

t — толщина сварного шва.

Электроконтактная сварка

Электроконтактную сварку используют для соединения электрических выводов с электродами, кристаллодержателей и баллонов с фланцами, а также для заварки штенгеля.

Перед сваркой с целью удаления жировых загрязнений, препятствующих однородному соединению, детали промывают в растворе; травлением в кислоте или щелочи удаляют плотные окисные пленки.

Свариваемые детали помещают между двумя электродами, к которым подводят напряжение. В данной цепи наибольшим сопротивлением обладает переходный контакт между деталями, где и происходит выделение большей части электрической мощности. В результате контактная область разогревается и плавится. Затем напряжение отключают и область расплава охлаждается — детали свариваются.

Чтобы сварка происходила по всей площади соприкосновения, сварочные станки снабжены системой сжатия электродов с несколькими последовательными операциями давления. Сами электроды должны быть строго выверены и подшлифованы так, чтобы между ними не оказалось зазора. Для уменьшения нагрева через внутренние области электродов пропускают воду. Размер контактной поверхности электродов должен быть меньше размера свариваемых деталей, иначе возможен пережог деталей и выплеск

капель металла внутрь корпуса прибора. Подобное явление наблюдается при штенгелевке и может привести к ухудшению параметров прибора и к внезапным замыканиям электродов в процессе эксплуатации. Для предотвращения выплесков штенгель пережимают на большой длине, а контактную сварку производят только на самом конце. Кроме того, если можно применить гибкий вделанный в штенгель электрический вывод, то вначале осуществляют штенгелевку, затем через оставшееся отверстие между баллоном и фланцем вычищают выплески металла и потом выполняют окончательную герметизацию корпуса холодной сваркой.

Пайка

Для герметизации мощных полупроводниковых приборов, например кремниевых вентилях, применяют пайку, так как электроконтактная и холодная сварки требуют довольно сложного оборудования.

Припой для герметизации должны иметь температуру плавления ниже температуры плавления соединяемых элементов и припоев для сборки, хорошую жидкотекучесть и высокую смачивающую способность для заполнения любых микроскопических зазоров, малую окисляемость; TKI припоя должен быть близок к TKI соединяемых деталей. Припой не должен разрушаться под воздействием окружающих атмосферных условий.

Пайка стекла с металлом. Стекло ни с одним из чистых металлов не сплавляется, так как чистая поверхность металла не смачивается или плохо смачивается жидким стеклом. Однако если поверхность металла покрыта слоем окисла, то смачивание улучшается, окисел частично растворяется в стекле и после охлаждения может произойти герметичное соединение. Основная трудность при изготовлении спаев металл — стекло состоит в подборе компонентов с достаточно близкими значениями TKI во всем диапазоне — от температуры плавления до минимальной рабочей температуры прибора. Даже небольшое различие в TKI приводит к возникновению механических напряжений и, как следствие, микротрещин, через которые в корпус могут попасть влага, растворы солей, кислород и т. п., что обуславливает нестабильность параметров или выход прибора из строя.

Известны следующие пути осуществления пайки металлов со стеклом, предотвращающие термические напряжения:

- 1) подбор компонентов с одинаковыми TKI ;
- 2) применение стеклянного припоя в виде суспензии с металлическим порошком, у которых достаточно близкий TKI ;
- 3) постепенный переход от металла к основному стеклу с помощью промежуточных стекол с различными TKI ;
- 4) спай стекла с мягким пластичным металлом, способным деформироваться при изменении температуры;
- 5) металлизация поверхности стекла, т. е. получение тонкой, способной деформироваться прослойки металла.

Наиболее приемлемым является первый путь. Лучшим сочетанием при этом считается стекло ЗС-5 с коваром, используемые во многих типах полупроводниковых приборов.

Практически применяют три метода сплавления стекла с металлом:

- 1) в пламени газовой горелки;
- 2) с помощью токов высокой частоты;
- 3) в муфельной или силитовой печах.

Во всех случаях процесс проводят на воздухе, так как наличие окисной пленки способствует сплавлению. Однако если при этом окисная пленка приобретает чрезмерную толщину, что сопровождается повышением пористости и отслаиванием ее от металла, то процесс осуществляют в два этапа: вначале в требуемых условиях производят окисление металлических элементов, а затем в инертной атмосфере — сплавление.

С платинитом (42% Fe+58% Ni+медная оболочка) хороший спай образуют свинцовые стекла, например, ЗС-4, с коваром (28% Fe, 18% Co, 54% Ni) — стекло С49-2, с вольфрамом — ВС-9, П-15, с молибденом — ЗС-5, ЗС-8. После сплавления для предотвращения термических напряжений рекомендуется отжиг.

Пайка керамики с металлом. В полупроводниковой технике, так же как в электровакуумной, большое внимание уделяется спаям металла с керамикой, которые обеспечивают более надежную герметизацию и менее подвержены воздействию термоциклирования, чем спай металла со стеклом. Рассмотрим некоторые способы создания спаев керамики с металлами.

1. Пайка керамики с металлом с помощью стеклообразной массы. Стеклообразную массу (стекло, глазурь, эмаль) наносят в виде порошка на соединяемые поверхности или разбрызгивают в составе водной суспензии. После просушки порошок оплавляется в печи с нейтральной атмосферой или на воздухе. Выбор соединяющего материала зависит от ТКЛ керамики, металла и стеклообразной массы. Поскольку прочность стеклообразных материалов и керамики на сжатие выше, чем на растяжение и изгиб, конструкция соединения должна быть такой, чтобы возникающие в нем усилия были сжимающими. Спаи керамики с металлом с помощью стеклообразных масс не выдерживают очень больших тепловых нагрузок, поэтому в полупроводниковой технике их применяют редко.

2. Пайка керамики с металлом с помощью металлических покрытий. Обычно применяемые припои не смачивают керамические поверхности, поэтому на керамике предварительно создают прочный и тонкий слой металла. Металлические покрытия, нанесенные химическим осаждением или напылением в вакууме, не обеспечивают надежной пайки вследствие слабого сцепления этих покрытий с керамической поверхностью. Хорошее сцепление с керамикой дает способ металлизации вжиганием. При вжигании паст температура печи должна возрастать постепенно. Кроме того, необходимо обеспечивать удаление продуктов сгорания растворителя. Толщина вожженного слоя металла составляет обычно несколько микрон.

Нанесение пасты и вжигание ее можно повторять по несколько раз, при этом толщина слоя увеличивается и качество покрытия улучшается. Полученную таким образом металлизированную керамику можно паять мягкими и твердыми припоями.

Распространенным способом нанесения металлических покрытий является спекание слоя чистого порошкового металла или смеси металлов с керамикой. Для этого применяют главным образом порошки молибдена, вольфрама, рения, тантала, железа, никеля, марганца, кобальта, хрома, серебра и меди с величиной зерен в несколько микрон. Порошок наносят на поверхность ровным слоем толщиной в несколько десятков микрон. Для этого готовят взвесь порошка в ацетоне, амилацетате, метиловом спирте, дистиллированной воде с добавкой связующего вещества типа нитроцеллюлозы, шеллака и т. п. После нанесения порошка на керамику производят сушку и отжиг в защитной атмосфере.

Наиболее прогрессивным способом пайки керамики с металлом является диффузионное соединение под давлением. Хорошее сцепление достигается в результате диффузии соединяемого металла или его окиси в керамику. Процесс диффузии более качественен, если детали хорошо соприкасаются друг с другом и их поверхности предварительно отшлифованы.

§ 10.3. Герметизация корпусов с помощью пластмасс

Дорогостоящие стеклянные, металлостеклянные и металлокерамические корпуса успешно заменяют пластмассовыми корпусами. В ряде случаев это повышает надежность приборов, так как устраняется контакт *p-n*-перехода с газовой средой, находящейся внутри корпуса, и уменьшается количество спаев в конструкции корпуса.

Герметизирующие материалы. Для герметизации полупроводниковых приборов используют различные пластические материалы; например, заливочные компаунды ЭКМ, ЭЦД и пресс-порошки ЭФП-60. Основные электрофизические свойства этих материалов приведены в табл. 10.3.

В качестве герметизирующего материала часто используют эпоксидные смолы ЭД-5, ЭД-6 с различными отвердителями (табл. 10.4).

Наряду с эпоксидными компаундами в качестве герметизирующих материалов широко распространены синтетические эластомеры (табл. 10.5), особенно полисульфидные (тиоколы) и кремнийорганические эластомеры.

Методы герметизации. Основными методами герметизации являются: заливка смолой металлических полых цилиндров, обволакивание смолкой кристалла с внешними выводами, опрессовка под давлением, литье под давлением (трансферное литье).

Рассмотрим примеры герметизации пластмассой.

1. Полый металлический цилиндр припаивают к медному основанию в виде диска или прямоугольника. Это основание может иметь один или несколько изолированных внешних выводов. Внутри

Электрофизические свойства герметизирующих материалов

Свойства	ЭКМ	ЭЦД	ЭФП-60
Коэффициент теплопроводности, $\text{кал}/(\text{см} \cdot \text{сек} \cdot \text{г})$	$9,7 \cdot 10^{-4}$	—	$2,5 \cdot 10^{-3}$
Предел прочности на разрыв, $\text{кг}/\text{см}^2$	745	730	450
Модуль упругости, $\text{кг}/\text{см}^2$	—	$42 \cdot 10^3$	$20 \cdot 10^3$
Температурный коэффициент линейного расширения, град^{-1}	$47,6 \cdot 10^{-6}$	—	$35 \cdot 10^{-6}$
Диэлектрическая проницаемость при 20°C и частоте 10^6 гц	4,5	2,55	4,5—6
Тангенс угла диэлектрических потерь при 20°C :			
при частоте 10^6 гц	$2,5 \cdot 10^{-2}$	—	$2 \cdot 10^{-2}$
при частоте 10^9 гц	—	$1,51 \cdot 10^{-2}$	—
Удельное объемное электрическое сопротивление при 20°C , $\text{ом} \cdot \text{см}$	10^{15}	10^{15}	10^{16}
Электрическая прочность, $\text{кв}/\text{мм}$	35	20	21
Диапазон рабочих температур, $^\circ\text{C}$	$-60 \div +120$	$-60 \div +150$	$-60 \div +125$
Величина усадки, %	0,9	0,7	0,6
Жизнеспособность при 20°C , ч	4	48	2000

цилиндра на нижнее основание напаивают полупроводниковый кристалл с *p-n*-переходами. К кристаллу крепят внешние электрические выводы термокомпрессионной сваркой. В цилиндр на половину объема заливают пластичный мягкий материал, например силиконовый каучук, который подвергают термической сушке. Оставшийся объем цилиндра заполняют эпоксидной смолой, которая затвердевает при высокой температуре. Чтобы увеличить механическую прочность всей конструкции, в верхней части цилиндра делают буртик для прочного закрепления пластмассового материала внутри корпуса.

2. Компаундом на основе эпоксидной смолы заливают полый керамический цилиндр, к нижнему концу которого припаян диск из кобальта, покрытого с обеих сторон золотом. К диску припаявают кристалл полупроводника с *p-n*-переходом.

Верхним электродом служит проволока из фосфористой бронзы диаметром 30 мкм, приваренная одним концом к кристаллу полу-

**Электрофизические свойства отвержденных эпоксидных смол
в зависимости от отвердителя**

Свойства	ЭД-6			ЭД-5	
	+30% мален- нового ангид- рида	+6,5% поли- этиленполи- амида	+7% гекса- метиленди- амина	+10% по- лиаминнов	+40% ма- леннового ангидрида
Предел прочности при изгибе, кг/см^2 . . .	1000	1000	700	—	—
Твердость по Бри- неллю, Н/мм^2	$17,2 \cdot 10^7$	$18,3 \cdot 10^7$	—	—	—
Теплостойкость по Мартенсону, $^{\circ}\text{C}$	100	—	—	—	—
Водопоглощение, % . . .	—	—	—	—	0,05
Усадка, %	—	—	—	0,5	до 1%
Диэлектрическая проницаемость	4,1	4,3	4,85	—	—
Тангенс угла диэлек- трических потерь при 10^6 Гц	0,014	0,021	0,023	0,008	0,005
Удельное объемное электрическое сопро- тивление, $\text{ом}\cdot\text{см}$	$1,5 \cdot 10^{14}$	$3,6 \cdot 10^{14}$	$3,0 \cdot 10^{15}$	$5 \cdot 10^{15}$	$1 \cdot 10^{15}$
Удельное поверхност- ное сопротивление, ом	$2,1 \cdot 10^{14}$	$1,1 \cdot 10^{14}$	$4,1 \cdot 10^{13}$	—	—
Пробивная напря- женность, кВ/мм	13,6	27,4	22	4,7	5

проводника, а другим к верхнему металлизированному торцу керамической втулки. Верхнюю часть поверхности герметика покрывают проводящим составом из 20% эпоксидной смолы и 80% серебра.

3. При герметизации мощных приборов, имеющих кристаллодержатель с винтом для крепления к теплоотводящему радиатору, вместо металлической применяют пластмассовую заливку верхней части прибора. Для механической прочности пластмассового корпуса и прочной его связи с основанием кристаллодержателя в последнем делают выступ в виде ласточкина хвоста, направленного внутрь основания.

4. Для герметизации приборов с аксиальными выводами корпусом служит стакан из полимеризованной эпоксидной смолы, имеющий отверстия для выводов. В стакан вставляют втулку из органического компаунда, через отверстия которой проходят металлические выводы к припаянному к ним кристаллу полупроводника с *p-n*-переходом. Герметизацию осуществляют в специальной трубчатой оправке.

Электрофизические свойства эластомеров

Свойства	ЭЗК-1	Викспит К-18	СКТН-1	ВПГ-3
Жизнеспособность:				
температура, °C,	80	20	20	20
время, ч	2	0,5	0,5	0,15
Режим полимеризации:				
температура, °C,	120	20	20	20
время, ч	10	18	24	15
Удельное объемное электрическое сопротивление, ом·см	10^{14}	10^{13}	10^{13}	10^{13}
Электрическая прочность, кв/мм	24	15	18	—
Тангенс угла диэлектрических потерь при 10^6 гц	0,013	0,01	0,005	0,015
Диэлектрическая проницаемость при 10^6 гц	3,9	3,0	3,5	1,67
Плотность, г/см ³	1,85	1,01	1,2	0,3
Линейная усадка, %	1,2	1,08	0,5	—
Коэффициент теплопроводности, кал/(м·ч·град)	0,65	0,3	0,3	—
Диапазон рабочих температур, °C	-60 ÷ +120	-60 ÷ +250	-60 ÷ +250	-60 ÷ +250

5. Два вывода, изготовленные из ленточного металла или проволоки, соединяют посредством стеклянной или керамической бусы. На один из выводов на небольшом расстоянии от бусы напаивают полупроводниковый кристалл с *p-n*-переходом. К этому кристаллу с помощью термокомпрессионной сварки присоединяют проволоку, приваренную предварительно ко второму выводу. Полученную таким образом конструкцию герметизируют путем заливки органическим составом и последующим обволакиванием всей поверхности кристалла, бусы и части выводов. Аналогичным образом герметизируют многовыводные приборы.

6. Полупроводниковый кристалл с *p-n*-переходом монтируют на металлических выводах, которые предварительно скреплены и изолированы друг от друга пластмассовым основанием. Затем всю собранную конструкцию помещают в форму и заливают пластмассой. После затвердевания материала прибор вынимают из литейной формы и удаляют пластмассовое основание.

Сборка и герметизация на ленте. Наиболее перспективным решением проблемы сборки и герметизации полупроводниковых приборов является переход от дискретных методов к сборке полупро-

водниковых кристаллов с p - n -переходами на металлической ленте с последующей герметизацией пластмассой.

Данная технология дает возможность механизации и автоматизации процессов сборки и герметизации приборов, изготавливаемых ранее по планарной технологии: транзисторов, импульсных диодов, варикапов, стабилитронов, выпрямительных диодов, тириستоров.

Основным элементом конструкции с пластмассовым корпусом является металлическая лента. На рис. 10.5 представлены профили металлических лент, используемых для сборки и герметизации диодов и транзисторов. Для расчета конструкции профиля металлической ленты необходимо исходить из размера планарной структуры

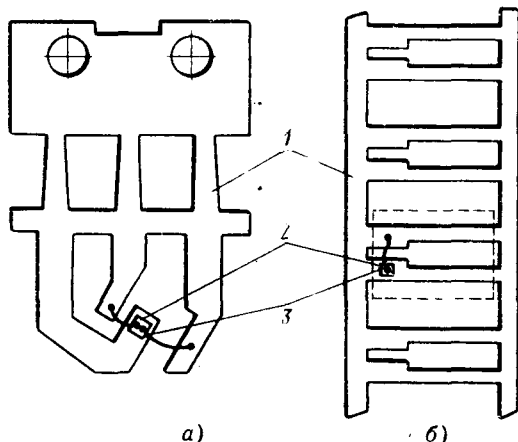


Рис. 10.5. Различные профили металлических лент для сборки приборов:

а — транзисторов; б — диодов; 1 — металлическая лента; 2 — полупроводниковый кристалл; 3 — золотая проволока

кристалла с p - n -переходами, тепловых характеристик прибора, возможности монтажа готового прибора на печатную плату электронной схемы, максимальной прочности на отрыв выводов от корпуса, простоты конструкции и экономии материала.

Технологическая схема изготовления прибора в пластмассовом корпусе (рис. 10.6) включает в себя все процессы стандартной планарной технологии, кроме сборки кристаллов с p - n -переходами и герметизации готовой конструкции.

Присоединение кристалла кремния с p - n -переходом к металлической ленте осуществляют с помощью сплава эвтектического состава (сплавления золота с кремнием). Поскольку процесс сплавления золота с кремнием является неравновесным, то количество кремния, растворившегося в золоте, зависит от времени процесса сплавления при заданной температуре, а количество жидкой фазы сплава золото — кремний от максимальной температуры процесса сплавления. Качество присоединения кристалла кремния к металлической ленте зависит от трех основных факторов: времени, температуры сплавления и величины усилия прижатия кристалла к ленте. Наличие большого количества жидкой фазы золото — кремний приводит к вытеканию ее из-под кристалла кремния к его периферии. Это обуславливает образование механических напряжений, трещин и раковин в структуре кристалла кремния при затвердевании жидкой фазы сплава золото — кремний, что снижает механическую прочность сплавной структуры и ухудшает электрические параметры прибора.

При минимальных значениях времени, температуры и силы прижатия кристалла к ленте сплавление золота с кремнием происходит лишь в отдельных точках поверхности, вследствие чего на собранной структуре может возрасти прямое падение напряжения.

Металлическую ленту изготавливают из латуни, меди, молибдена, стали, никеля. Наибольшее распространение получила лента из ковара, покрытая слоем никеля и имеющая полоску, плакированную золотом, шириной 1,5—2 мм.

В процессе присоединения кристаллов с *p-n*-переходами к ленте осуществляют перематку ленты с одного барабана на другой.

Путем термокомпрессионной сварки выводы из золотой проволоки диаметром 30—50 мкм присоединяют к позолоченным поверхностям кремния и коваровой ленты.

Режим термокомпрессионного процесса можно выбрать следующим: температура верхнего нагревателя 600—700°С; нижнего нагревателя не выше 250°С; время процесса 2,5 сек, сила прижатия деталей друг к другу $4 \cdot 10^7$ н/м². Оптимальный режим термокомпрессионной сварки обычно выбирают с учетом максимальной механической прочности соединения вывода с кристаллом и металлической лентой и сохранения электрических параметров прибора.

Герметизацию собранных на ленте кристаллов с *p-n*-переходами можно осуществлять двумя методами: заливкой в силиконовые формы и литьем под давлением (трансферным литьем).

Герметизацию методом заливки различных компаундов в силиконовые формы широко применяют в производстве транзисторов и диодов. Планарные структуры, размещенные на металлической ленте, опускают в специальные формы из силиконовой резины, заполненные компаундом. Металлическую ленту разрезают на части, каждая из которых содержит 20 планарных элементов. Эту часть ленты крепят с помощью пружин в специальное приспособление, которое соединяется с заливочной формой направляющими штифтами. После затвер-

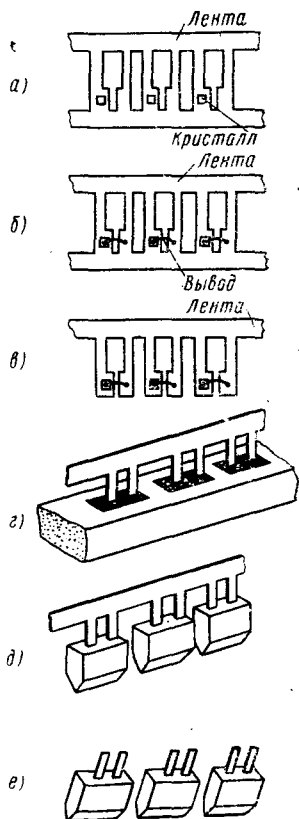


Рис. 10.6. Технологическая схема сборки приборов в пластмассовых корпусах:

а — присоединение кристалла к ленте; б — присоединение золотой проволоки к кристаллу и ленте; в — обрезка ленты со стороны кристаллов; г — герметизация *p-n*-переходов пластмассой; д — готовые пластмассовые корпуса на ленте; е — обрезка ленты и отделение приборов друг от друга

девания пластмассы готовые приборы извлекают из формы и подвергают термической обработке. Основные технологические операции данного процесса герметизации приведены на рис. 10.6. Заливку компаунда в силиконовые формы производят с помощью шприца.

При герметизации путем трансферного литья герметизируемую ленту с кристаллами укладывают в пресс-форму, имеющую систему каналов (литников) и загрузочную камеру для пресс-материала. Пресс-форму помещают между двумя плитами-нагревателями двухходового гидравлического пресса. При работе гидравлического пресса происходит смыкание двух половин пресс-формы и выдавливание пресс-материала, перешедшего под действием температуры и давления в вязкотягучее состояние, через матричные отверстия пресс-формы в рабочую зону. Пресс-материал заполняет рабочую зону и тем самым полностью обволакивает герметизируемую ленту с кристаллами. После снятия давления и охлаждения пресс-формы пресс-материал затвердевает и принимает форму матричного рабочего объема. В одной пресс-форме может содержаться до нескольких сот приборов.

Этот метод обладает высокой производительностью и позволяет опрессовывать изделия при низких удельных давлениях от $5 \cdot 10^5$ до $5 \cdot 10^6$ н/м².

КОНСТРУКТИВНОЕ ОФОРМЛЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

§ 11.1. Назначение корпусов и теплоотвод в них

Назначение корпуса

Как уже отмечалось, кристалл полупроводника с выпрямляющими и омическими контактами, покрытый лаком, эмалью или каким-либо иным защитным покрытием, помещают в жесткий корпус. Корпус полупроводникового прибора, являясь надежной защитной оболочкой, предохраняет кристалл от механических воздействий и от влияния окружающей среды. Он препятствует конденсации на поверхности кристалла влаги, предотвращает попадание микро- и макрозагрязнений и доступ световых лучей, служит экраном от электромагнитных помех, обеспечивает отвод тепла, выделяемого в кристалле.

К корпусу полупроводникового прибора предъявляют высокие требования по обеспечению механической стойкости и герметичности при ударах, вибрациях, ускорениях, циклическом воздействии повышенных и пониженных температур, а также в условиях тропической влажности, холода и космической радиации.

Теплоотвод в корпусах

Прохождение тока через полупроводниковый прибор сопровождается его нагревом. В общем случае все тепло выделяется в p - n -переходе.

Предельной мощностью рассеяния полупроводникового прибора называют такое значение подводимой к нему мощности, которое не приводит к выходу прибора из строя и не ухудшает его параметров в течение всего срока службы.

При изготовлении полупроводниковых приборов важно обеспечить наилучший отвод тепла, чтобы температура p - n -перехода как можно меньше отличалась от температуры окружающей среды.

Известны три механизма теплоотвода: теплопроводность, излучение, конвекция. Весьма существенным является площадь поверхности, через которую проходит тепловой поток. С увеличением этой площади рассеяние тепла увеличивается. Поэтому для повышения мощности прибора увеличивают размеры кристаллодержателя и корпуса. Кроме того, применяют теплоотводящие радиаторы

в виде алюминиевой или медной платы определенной толщины и площади, на которую крепится прибор.

Основная роль в отводе тепла от p - n -перехода принадлежит теплопроводности, так как конвекция под корпусом прибора весьма мала, а поверхность радиации перехода — это очень узкая область.

Подводимая к прибору мощность P приводит к перегреву p - n -переходов относительно окружающей среды на температуру

$$\Delta T = T_n - T_{\text{окр}},$$

где T_n — температура p - n -перехода; $T_{\text{окр}}$ — температура окружающей среды.

Эти две величины связаны между собой коэффициентом пропорциональности, называемым тепловым сопротивлением:

$$R_T, \text{ град/вт} = \Delta T/P.$$

Тепловое сопротивление складывается из сопротивлений теплового потоку отдельных теплоотводящих элементов конструкции — выводов, кристаллодержателя, радиатора и т. д. Поэтому при проектировании прибора можно определить его предельную мощность рассеяния.

Тепловое сопротивление обратно пропорционально теплопроводности материала и сечению выводов и прямо пропорционально длине участка теплоотвода. При последовательном соединении элементов конструкции

$$R_T = \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{S_i \lambda_i},$$

где l_i — длина участка теплоотвода; S_i — площадь теплоотводящего участка; λ_i — теплопроводность.

В табл. 11.1 даны значения теплопроводности некоторых металлов, используемых при изготовлении полупроводниковых приборов.

Важным параметром является также тепловая постоянная времени τ , характеризующая скорость установления теплового равновесия. Эта же постоянная определяет скорость охлаждения при снятии мощности.

Изменение температуры при нагреве

$$T = T_0 \left[1 - \exp \left(- \frac{t}{\tau} \right) \right];$$

при охлаждении

$$T = T_0 \exp \left(- \frac{t}{\tau} \right),$$

где T_0 — начальная температура прибора; t — время.

Теплопроводность основных металлов и ТКЛ

Материал	$\lambda, \text{кал}/(\text{см} \times \text{сек} \cdot \text{град})$	$\text{TKЛ} \cdot 10^6, \text{град}^{-1}$
Серебро	1,0	19,3
Медь	0,92	16,5
Золото	0,74	14,3
Вольфрам	0,4	4,4
Молибден	0,35	5,5
Кремний	0,2	4,15
Германий	0,14	6,65
Олово	0,15	1,7
Железо	0,14	0,4
Никель	0,14	1,3
Свинец	0,08	2,93
Цинк	0,06	0,8

При описании установления теплового равновесия используют не менее двух постоянных времени: τ_n — для характеристик процесса установления равновесия между p - n -переходом и корпусом; $\tau_{\text{окр}}$ — установления равновесия между корпусом и окружающей средой. Если τ_n имеет порядок не более миллисекунды, то $\tau_{\text{окр}}$ может достигать нескольких минут.

Тепловые потери за счет излучения определяются разницей температур между излучающим и поглощающим телами и излучательной способностью обоих тел.

Мощность теплового потока в этом случае

$$P_n = \eta P_0 [(T_{\text{ит}}/100)^4 - (T_{\text{пт}}/100)^4],$$

где $P_0 = 5,7 \cdot 10^{-4} \text{ вт}/(\text{град} \cdot \text{см})$ — постоянная излучения абсолютно черного тела;

η — излучательная способность ($0 \leq \eta \leq 1$);

$T_{\text{ит}}$ — температура излучающего тела;

$T_{\text{пт}}$ — температура поглощающего тела.

Излучательная способность зависит от свойств поверхности излучателя и для матовой, черной поверхности $\eta \approx 1$.

Излучательная способность основных материалов

Полированный алюминий	0,04
Прокатанная медь	0,06
Полированная медь	0,03

Медь, окисленная до черноты	0,78
Полированное железо	0,28
Ровное покрытие черным лаком	0,97
Масляная окраска черного цвета	0,92—0,96
Покрытие тонким слоем сажи	0,95
Вода	0,95

Тепловые потери, обусловленные конвекцией воздуха, зависят от температуры поверхности радиатора, его длины по вертикали, положения в пространстве, плотности воздуха, обдува.

При чисто конвекционном теплообмене мощность отводимого теплового потока

$$P_{\text{п}} = \alpha_{\text{к}} (T_{\text{р}} - T_{\text{окр}}),$$

где $\alpha_{\text{к}}$ — постоянная теплообмена, зависящая от положения радиаторной пластины и разности температур пластины и окружающей среды;

$T_{\text{р}}$ — температура радиатора.

Для горизонтальной пластины в случае теплоотдачи вверх

$$\alpha_{\text{к}} = 2,5 \cdot 10^{-4} (T_{\text{р}} - T_{\text{окр}})^{0,25};$$

в случае теплоотдачи вниз

$$\alpha_{\text{к}} = 1,3 \cdot 10^{-4} (T_{\text{р}} - T_{\text{окр}})^{0,25}.$$

Для вертикальной пластины, если ее высота h не превышает 30 см

$$\alpha_{\text{к}} = \frac{4,2 \cdot 10^{-4}}{h} (T_{\text{р}} - T_{\text{окр}})^{0,25}.$$

При работе на больших высотах, когда давление воздуха меньше атмосферного, конвекционный тепловой поток уменьшается. На очень больших высотах почти весь тепловой поток рассеивается излучением.

Для приборов повышенной мощности применяют принудительное охлаждение либо путем усиленного воздушного обдува, либо используя корпуса и радиаторы с каналами для циркуляции воды.

Иногда приборы помещают в перемешиваемое масло, что улучшает условия теплоотвода в 5—6 раз.

Для расчетов тепловых режимов полупроводниковых приборов часто применяют эквивалентные тепловые схемы (рис. 11.1).

При стационарных условиях мощность теплового потока $P_{\text{п}}$, генерируемого в p - n -переходе, проходит через внутреннее тепловое сопротивление прибора $R_{\text{тп}}$ и через внешнее тепловое сопротивление $R_{\text{ткр}}$. Емкости $C_{\text{п}}$ и $C_{\text{к}}$ соответствуют теплоемкостям p - n -перехода и корпуса.

Внутреннее тепловое сопротивление $R_{Tп}$ от p - n -перехода до основания кристаллодержателя может быть принято постоянным. Внешнее тепловое сопротивление $R_{Tокр}$ от кристаллодержателя до окружающей среды изменяется и может быть представлено в виде параллельной цепи из постоянного теплового сопротивления вдоль прибора $R'_{Tп}$ и теплового сопротивления теплоотводящего радиатора R_{Tp} :

$$R_{Tокр}^* = \frac{R'_{Tп} R_{Tp}}{R'_{Tп} + R_{Tp}}.$$

Тепловые постоянные p - n -перехода и корпуса вычисляют аналогично постоянным времени заряда емкостей:

$$\tau_{Tп} = C_{п} R_{Tп};$$

$$\tau_{Tк} = C_{к} R_{Tокр}.$$

Мощность теплового потока

$$P = \frac{T_{п} - T_{окр}}{R_{Tп} + R_{Tокр}}.$$

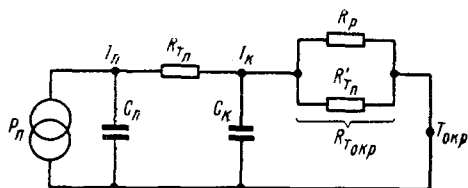


Рис. 11.1. Эквивалентная тепловая схема полупроводникового прибора

Если прибор работает без радиатора, то R_{Tp} и $R_{Tокр}$ увеличиваются, что ведет при той же величине рассеиваемой мощности к увеличению перегрева p - n -перехода.

§ 11.2. Корпусы диодов общего назначения

Под диодами общего назначения понимают выпрямительные и импульсные диоды, варикапы, стабилитроны и ряд специальных типов диодов (генераторы шума, диоды с накоплением заряда и др.). Несмотря на большое различие в электрических характеристиках и в сфере применения этих приборов, при их производстве можно использовать типовые конструкции корпусов.

Для данного класса приборов используют несколько десятков различных конструкций корпусов, различных по методам получения спая и способам монтажа приборов в аппаратуре. Рассмотрим конструктивные особенности и электрические характеристики основных видов этих корпусов.

Конструкция стеклянного корпуса

Существует три типовых стеклянных корпуса.

На рис. 11.2,а показана конструкция стеклянного корпуса 1—1а, которая состоит из кристаллодержателя с трубкой (стеклом) и держателя с контактной пружиной. Кристаллодержатель выполнен на основе спая трубки 1 из стекла С88-1 с платинитовой

проволокой 2. Для обеспечения точной геометрической формы спая и уменьшения возможности перегрева при получении спая трубки с выводом на платинитовый вывод предварительно наплавляют бусу 3 из стекла С88-1. На выступающий внутрь баллона платинитовый вывод с помощью низкотемпературного припоя 4 (250—300°С) наплавляют кристалл проводника 5. Для окончательной герметизации корпуса прибора используют второй вывод с бусой, на который предварительно приварена игла 6 из сплава МВ 50 или контактная пружина.

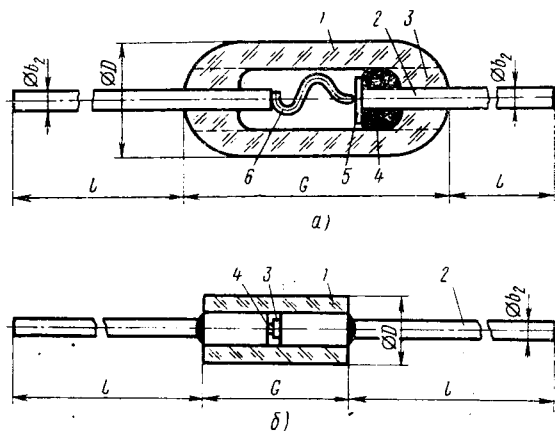


Рис. 11.2. Конструкция стеклянного корпуса

Конструкция 1—1б отличается от конструкции 1—1а несколькими большими габаритными размерами (см. табл. 11.2).

Таблица 11.2

Тип корпуса	Размеры, мм				Электрические параметры		
	D	G	l	b_2	C , пф	L , нгн	$\frac{R_T}{\text{град}}$ вт
1—1а	1,2—0,2	2,8—0,8	20 ± 2	$0,3 \pm 0,05$	0,1	1	900
1—1б	3—0,6	7,5—1	25 ± 3	$0,5 \pm 0,1$	0,25	0,5	500
1—1в	1,8—0,2	3,8—0,8	25 ± 3	$0,5 \pm 0,1$	0,24	28	150

Для изготовления корпуса 1—1в (рис. 11.2,б) используют трубку из стекла С93-1 или С87-1 и платинитовую проволоку.

Типовой технологический процесс изготовления стеклянных корпусов следующий: получение исходных деталей с необходимыми геометрическими размерами; промывка и химическая обработка стеклянных деталей; окисление платинита перед спаиванием со

стеклом; получение спаев вывод—буса и вывод—трубка (держатель с бусой и кристаллодержатель с трубкой); напайка кристалла на вывод (кристаллодержатель с трубкой); приварка проволоки к выводу с бусой (держатель с бусой) и формовка контактной пружины; окончательная заварка прибора с одновременным обеспечением необходимых электрических характеристик *p-n*-перехода.

В стеклянной конструкции корпусов 1—1а, 1—1б, 1—1в основным является спай платинитовых выводов со стеклом, что обеспечивает герметичность всей конструкции прибора.

Платинитовая проволока представляет собой ферроникелевый сердечник, покрытый медной рубашкой, поверхность которой окислена до закиси меди. Общее содержание меди в рубашке для получения надежного спая со стеклом без трещин и механических напряжений должно быть в пределах 24—28% веса. Поскольку состояние закиси меди является определяющим при спаивании платинитового вывода со стеклом, то платинитовая проволока не должна иметь механических повреждений по всей поверхности спая.

В процессе подготовки к спаиванию платинитовую проволоку на специальном полуавтомате нарезают на части необходимой длины с одновременной рихтовкой. Перед спаиванием ее окисляют в муфельной печи при температуре 800°C в течение 15 мин. Стеклянные трубки и бусы получают путем разрезания стеклозаготовок на отрезки необходимой длины на станке проволоочной резки или алмазным диском. После резки стеклянные детали промывают в ацетоне и травят в плавиковой кислоте. Промывку стеклянных деталей после травления проводят в ультразвуковой ванне горячей водой. Если на стеклянных деталях имеются металлические частицы, то их удаляют травлением в азотной кислоте. Спаивание платинитовой проволоки с бусой осуществляют в муфельной печи или на многопозиционном карусельном станке с радиационным нагревом. Спай вывода с трубкой получают также на карусельном станке с радиационным нагревом. Для спая платинита со стеклом можно использовать станки с газовыми горелками. Окончательную герметизацию прибора производят с помощью пайки стеклянной бусы и стеклянного баллона.

Рассмотренные стеклянные конструкции являются малогабаритными, простыми в изготовлении и дешевыми. К недостаткам этих конструкций относятся: значительные остаточные напряжения в стекле, появляющиеся во время окончательной герметизации при охлаждении корпуса со стороны кристалла, и невозможность проведения отжига с целью снятия этих напряжений (температура отжига 350—380°C); недостаточная механическая прочность спая и возможность его повреждения при гибке выводов в процессе монтажа. Имеются другие типы стеклянных корпусов, отличающиеся размерами деталей.

В стеклянных корпусах выпускают импульсные диоды МД-3, ГД507А, КД503А-Б и др.

Конструкция металлостеклянного корпуса

Для приборов с мощностью рассеяния более 100—200 мвт конструкцию стеклянного корпуса использовать нельзя из-за ее высокого теплового сопротивления. В этом случае применяют конструкции металлостеклянных корпусов.

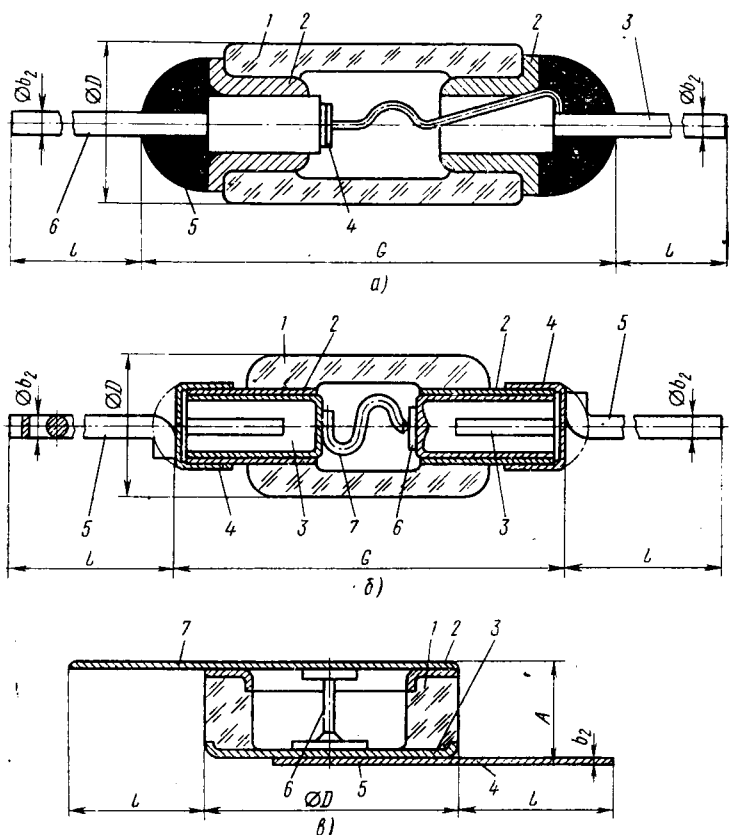


Рис. 11.3. Конструкция металлостеклянного корпуса

На рис. 11.3,а показана конструкция металлостеклянного корпуса 1—2а, состоящая из баллона и двух держателей: кристаллодержателя и верхнего вывода. Баллон представляет собой соединение на основе металлостеклянных спаев трубки 1 из стекла С49-2 и двух втулок 2 из сплава 29НК, которые служат для центровки и крепления держателей при окончательной сборке и герметизации приборов в корпусе. Втулки 2 согласованы со стеклотрубкой по ТКЛ для получения прочного ненапряженного соединения. Кристаллодержатель 6 состоит из отрезков проволоки разного диа-

метра, соединенных ударно конденсаторной стыковой сваркой и является базой для припайки полупроводникового кристалла с *p-n*-переходом 4. Второй держатель 3 аналогичен по конструкции первому, но в зависимости от типа прибора может либо служить основанием для приварки контактной пружины, либо иметь скос для пропускания верхнего вывода от полупроводникового кристалла. Окончательную герметизацию приборов производят пайкой с применением флюса на воздухе или пайкой в конвейерной печи в атмосфере водорода. В качестве припоя для герметичного соединения коваровых втулок с держателями используют припой ПОС-61 или сплав свинец-олово-висмут в виде штампованных колец 5. Кристаллодержатель этого корпуса может быть изготовлен из ковара, никеля или меди, что позволяет значительно повысить рабочую мощность приборов по сравнению с приборами со стеклянными корпусами. Герметизация приборов пайкой с применением флюса является недостатком этой конструкции, однако переход на пайку в конвейерной печи в инертной атмосфере позволяет избежать применение флюса и значительно повысить производительность на операции сборки и герметизации.

Достаточно распространенной в серийном производстве полупроводниковых приборов является конструкция 1—2б (рис. 11.3, б), состоящая из баллона, двух разрезных стаканов, служащих для припайки кристалла, контактной пружины и двух колпачков с проволочными или ленточными выводами. Баллон корпуса выполняют на основе металлостеклянного спая трубки 1 из стекла С49-2 и двух трубок 2 из сплава 29НК (ковара). Функции держателей в этой конструкции выполняют разрезные стаканы 3 из листового никеля, получаемые методом глубокой вытяжки. При сборке приборов никелевые стаканы (один с напаянным кристаллом 6, другой с приваренной контактной пружинной 7) вставляют в коваровые втулки и приваривают к ним. Окончательную герметизацию прибора осуществляют пайкой низкотемпературным припоем ПОС-61 никелевых колпачков 4, насаженных на коваровые трубки баллона. Для монтажа приборов в аппаратуре к колпачкам приваривают проволочные или ленточные выводы 5. Из-за наличия четырех тонкостенных сопрягаемых токоведущих элементов (стакана 3, трубки 2, колпачка 4 и вывода 5) данная конструкция корпуса имеет высокое тепловое сопротивление. Кроме того, габариты данного корпуса по сравнению с корпусом 1—2а значительно больше.

К конструкции этого типа относится также корпус 1—2в (рис. 11.3, в). Корпус состоит из стеклянной трубки 1, которая спаяна с чашечкой 3 и втулкой 2 из сплава Н47ХБ. К внешней стороне чашечки 3 припаявают вывод 4 в виде полоски никеля. На внутреннюю часть чашечки напаяют кристалл 5 с *p-n*-переходом и верхним выводом 6. Окончательную герметизацию корпуса осуществляют припайкой к втулке 2 верхнего вывода 7, имеющего форму ракетки. Данный тип корпуса применяют в основном в микромодульных конструкциях.

Основные параметры корпусов этого типа приведены в табл. 11.3.

Таблица 11.3

Тип корпуса	Размеры, мм					Электрические параметры		
	A	D	G	l	b ₂	C, пф	L, нгн	R _T , град/вт
1—2а	—	4—0,8	0,5±0,1	12—3	25±3	0,3	0,6	230
1—2б	—	5,3	0,6	16	30±3	0,4	1,0	600
1—2в	1,35—03	3,3—0,1	0,15	—	2—0,5	0,15	0,3	850

Подготовку стеклянных деталей для изготовления металлостеклянных корпусов проводят так же, как и для цельностеклянного корпуса. Коваровые втулки конструкции 1—2а получают штамповкой из ленты толщиной 0,5 мм на восьмипозиционном штампе. Колпачки и стаканы конструкции 1—2б, а также чашечки и втулки конструкции 1—2в штампуют на аналогичном оборудовании. Металлические детали корпуса перед спаиванием со стеклом обезжиривают в кипящем четыреххлористом углероде, отжигают во влажном водороде (точка росы — 20±2°C) при температуре 1050—1100°C в течение 20—30 мин и снова обезжиривают. После обезжиривания детали травят в кислотном травителе (HCl+H₂SO₄+H₂O=1:1:1) в течение 5—10 мин при 70—75°C, тщательно промывают в спирте и сушат в термостате при 120°C. Далее детали окисляют в муфельной печи при температуре 670°C в течение 5—10 мин в воздушной среде. Металлостеклянные спай корпусов этой группы изготавливают на полуавтоматах с высокочастотным нагревом. После заварки баллоны отжигают в муфельных печах при температуре 380—450°C для уменьшения механических напряжений.

Рассмотренные металлостеклянные корпуса широко распространены при серийном производстве диодов: Д2, Д11—Д14, Д18, Д20, Д104—Д106, Д219, Д220, Д223, Д310—Д312 и др.

Конструкция металлического корпуса с проходным изолятором

Для герметизации приборов с мощностью рассеяния свыше 1 вт используют металлические корпуса с проходным изолятором, которые позволяют отводить от р-п-перехода тепловой поток до 25 вт. Такие конструкции корпусов используют при изготовлении выпрямительных диодов, стабилитронов и варикапов различной мощности. Особенностью этих корпусов является наличие у них массивного кристаллодержателя.

На рис. 11.4, *а* показана конструкция металлического корпуса со стеклянным изолятором 1—3а для герметизации выпрямительных диодов. Конструкция состоит из кристаллодержателя 1, изготовленного холодной штамповкой из малоуглеродистой стали или сплава 29НЖ. В центральной части кристаллодержатель имеет углубление для напайки кристалла с *p-n*-переходом 2, а по периферии — кольцевой рельеф, который обеспечивает получение надежного соединения с баллоном при герметизации электроконтактной сваркой. К внешней части кристаллодержателя приваривают вывод 7 из никеля для монтажа прибора в аппаратуре. Баллон корпуса 3 изготавливают холодной штамповкой из ленты сплава 29НЖ или 47НД.

Рис. 11.4. Конструкция металлического корпуса с проходным изолятором

Таблица 11.4

Тип корпуса	Размеры, мм														Электрические параметры					
	A	D	D ₁	D ₂	J	G ₁	N	N ₁	Q ₁	Q ₂	E	W	b _a	T	t	t ₁	M	Электрические параметры		
																		C, пф	L, нгн	R _т , град, ом
1—3а	8,7	11,2	6,8	—	—	18	—	—	52	30±1	—	—	0,9±0,2	—	—	—	—	0,3	0,7	65
1—3б	9	7	5	—	—	15	—	—	35	20	—	—	0,9±0,2	—	—	—	—	0,5	0,5	41/165
1—3в	9	10	6,8	—	—	18	—	—	52	30±1	—	—	0,9±0,2	—	—	—	—	0,5	0,5	38
1—4а	15	13	7,2	—	26	—	11	2	—	—	8 M5	—	—	—	1,5	1	3,5	1	0,3	6,5
1—4б	15,3	21,5	15,2	—	31,8	—	13,5	2	—	—	14 M6	—	—	—	3	2,2	5,5	1	0,3	3
1—4в	10,2	—	8,6	12,8	20	—	11,5	2	—	—	11 M5	—	—	1,6	—	—	4,5	0,5	0,3	3,28

Трубку 5 выполняют из сплава ЭИ-693. Если применяют стекло 16-Ш, изолятор получают из цельнотянутой трубки путем ее разрезания на заготовки; если стекла С48-2 и С72-4, то изолятор имеет вид стеклотаблетки. После электроконтактной сварки баллона с держателем проводят окончательную герметизацию прибора обжимом и проваркой верхнего конца трубки с пропущенным через нее выводом от кристалла 2. К обжатой части трубки 5 приваривают никелевый вывод 6 с той же целью, что и вывод 7.

На рис. 11.4,б показана конструкция корпуса 1—3б, которую наиболее часто используют для герметизации прецезионных стабилитронов Д818, КС156, КС168, КС196. В данной конструкции кристаллодержатель 1 изготавливают токарным способом или методом объемной штамповки из бескислородной меди. В случае токарного изготовления кристаллодержателя к нему с помощью припоя ПСР-72 припаивают медный вывод 7. При объемной штамповке вывод получают одновременно. Недостатком этого метода является невозможность получения вывода длиной более 20 мм (а нужная длина — 30±2 мм). Кристаллодержатель имеет выступ для напайки полупроводникового кристалла 6 с p-n-переходом и разгрузочную кольцевую канавку для предотвращения деформации кристалла при окончательной герметизации. Баллон изготавливают из тех же материалов и по той же технологии, что

и для конструкции 1—3а. Баллон 2, стеклоизолятор 3, трубка 4 и верхний вывод 5 образуют герметичное металлостеклянное соединение. Герметизацию готового прибора осуществляют методом холодной сварки.

С целью защиты контактирующих поверхностей соединяемых узлов от окисления их предварительно покрывают слоем никеля толщиной до 20 мкм. Никель, обладая значительно большей твердостью, чем соединяемые материалы, при давлении лопается и выходит из зоны сварки, оставляя неокисленные поверхности основных материалов. Это дает возможность получать высококачественные сварные узлы.

Конструкция 1—3в отличается от конструкции 1—3а геометрическими размерами и электрическими параметрами (см. табл. 11.4); герметизацию прибора выполняют как и 1—3б холодной сваркой.

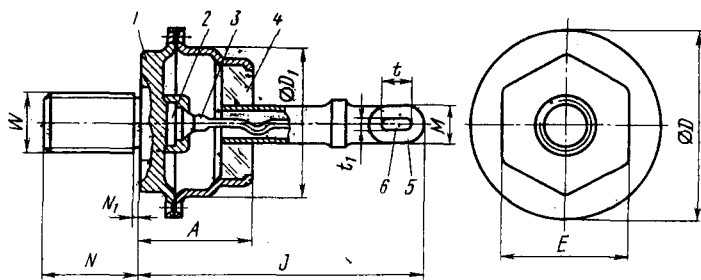


Рис. 11.5. Конструкция металлического корпуса с винтами для монтажа на радиаторе

Рассмотренные конструкции корпусов рассчитаны на подвесной монтаж в аппаратуре с помощью гибких выводов. При таком методе монтажа отвод тепла происходит в основном через выводы. Поэтому рабочая мощность приборов с такими корпусами не может быть выше 1,5—2 Вт, если нет специального охлаждения.

Для приборов с рабочей мощностью свыше 2 Вт применяют конструкции корпусов 1—4а, 1—4б и 1—4в с винтом и шестигранником для монтажа их на специальных теплоотводящих платах и радиаторах; конструкции 1—4а и 1—4в используют для мощных стабилизаторов.

Конструкция корпуса 1—4б с винтом для монтажа на теплоотводящем радиаторе, приведенная на рис. 11.5, предназначена в основном для мощных выпрямительных диодов. В конструкцию 1—4б входит медный кристаллодержатель 1 в виде шестигранника с винтом. Его изготавливают штамповкой на эксцентриковых прессах с усилием $(25—40) \cdot 10^4$ Н с пооперационным отжигом полуфабрикатов в муфельных печах для перекристаллизации и перевода меди в пластичное состояние после деформации. Изготовление

резьбы производят на токарном станке или накаткой с применением резбонакатного устройства. На кристаллодержателе помещают кристалл с *p-n*-переходом 2 и верхним выводом 3. Баллон 4 аналогичен по конструкции и материалам баллону корпусов 1—3а и 1—3б, только баллон корпуса 1—4б больше по габаритам и имеет дополнительную перетяжку для уменьшения диаметра стеклоизолятора и защиты от деформации спаия при окончательной герметизации. Окончательную герметизацию приборов в этих конструкциях корпусов осуществляют холодной сваркой. После герметизации производят обжим и проварку штенгеля 5, просечку монтажного отверстия 6 и облуживание поверхности полученного соединения.

Существенным недостатком корпусов этого типа является наличие сварочного фланца над шестигранником, который не позволяет вести монтаж приборов в аппаратуре с помощью торцевого ключа и поэтому приводит к увеличению габаритов соответствующих устройств.

Конструкция корпуса 1—4в не имеет подобного недостатка. Кристаллодержатель этой конструкции выполняют из цилиндрической или листовой заготовки (за один удар) объемной штамповкой с применением усиленной толстостенной матрицы. В качестве материала держателя используют бескислородную медь МБ. Поскольку окончательную герметизацию приборов в этом корпусе производят электроконтактной сваркой, на медный держатель припоем ПСр-72 напаяно никелевое кольцо с рельефом под сварку. Корпус представляет собой металлокерамический спай баллона, полученного штамповкой из никелевой ленты толщиной 0,3 мм, керамической втулки из массы М7, 22ХС или КВФ-IV и трубки из ковара или сплава ЭИ-693. В качестве припоя используют ПСр-72.

В этой конструкции можно использовать и обычный металло-стеклянный вариант баллона, однако керамический вариант позволяет уменьшить габариты корпуса по высоте и сохранить внутренний объем. Кроме того, использование керамики исключает брак по трещинам в стекле при обжиге штенгеля, который возможен в корпусах 1—4а и 1—4б. Керамика обеспечивает также нормальную работу приборов с повышенным рабочим напряжением.

Технологический процесс изготовления баллона рассмотренных конструкций корпусов унифицирован, его можно изменять в зависимости от сочетания применяемых материалов. При использовании стекла 16-Ш баллоны производят на многопозиционном полуавтомате огневой заварки с формовкой стеклоизолятора в процессе изготовления спаия. Для снятия напряжений баллоны отжигают. При огневой заварке баллона предварительное окисление металлических деталей является обязательным. При использовании стекол С48-2, С49-2, С72-4 баллоны выполняют в конвейерной печи в атмосфере азота в специальных графитовых кассетах. Окончательную герметизацию приборов проводят электроконтактной сваркой.

Металлокерамические спаи деталей изготавливают в конвейерных печах с температурой в зоне пайки 780—20°C, причем металлические детали предварительно отжигают в атмосфере водорода.

Основные параметры корпусов данного типа приведены в табл. 11.4.

§ 11.3. Корпусы диодов СВЧ

Конструкции корпусов диодов СВЧ достаточно специфичны и разнообразны, что объясняется применением этих диодов в СВЧ волноводных схемах, в которых требуется специальный их монтаж.

На рис. 11.6 приведена одна из конструкций диодов СВЧ — волноводный корпус видеодетектора 2—1. Корпус представляет собой участок волновода и состоит из латунного баллона 1, в который с помощью керамического изолятора 8 вмонтирован латунный иглодержатель 9 с пружинным контактом в виде вольфрамовой заостренной проволоки 3. Иглодержатель с резьбовым соединением закреплен в керамическом изоляторе эпоксидной смолой. Керамический изолятор зафиксирован в кор-

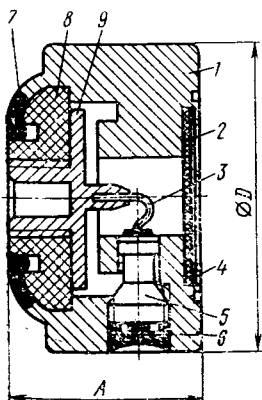


Рис. 11.6. Конструкция волноводного корпуса

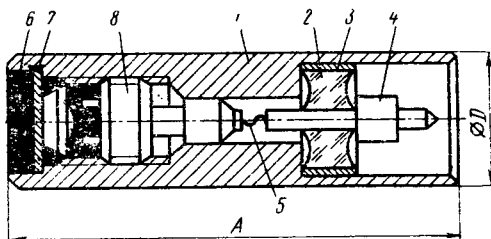


Рис. 11.7. Конструкция корпуса для коаксиальной линии

пусе путем завальцовки. Герметизацию соединения осуществляют эпоксидной смолой 7. Волноводное окно в корпусе защищено слюдяной прокладкой 2, завальцованной в корпусе через промежуточную пайку из свинца 4. Свинцовая шайба обеспечивает герметичность соединения. Окончательную настройку прибора в корпусе проводят с помощью кристаллодержателя 5 с резьбой. На кристаллодержатель напаян полупроводниковый кристалл. Кристаллодержатель после настройки закрепляют в корпусе и герметизируют эпоксидным компаундом 6.

Основным недостатком этой конструкции, герметизируемой эпоксидными смолами, является плохая влагостойкость (не более 4—10 суток) при 98% влажности и температуре окружающей среды 40°C.

Конструкция корпуса 2—2 для коаксиальной линии СВЧ показана на рис. 11.7. Баллон корпуса 1 делают из латуни. Угол изоля-

тора выполняют на основе спая иглодержателя 4 из сплава 29НЖ с кольцом 3 из такого же материала с пеностеклянным изолятором 2. Пеностекло изготовлено из стеклопорошка С49-2 с газообразующими добавками, благодаря которым получают изолятор с большим количеством внутренних закрытых пор. Наличие значительного количества закрытых пор позволяет получать переходные узлы с диэлектрической проницаемостью изолятора $\epsilon=3$. Это обеспечивает достаточно низкие паразитные характеристики конструкции корпуса в диапазоне СВЧ. Узел изолятора после приварки и формовки иглы впаивается в баллон 1. Для сборки и настройки прибора в баллон ввинчивают резьбовой кристаллодержатель 8 с полупроводниковым кристаллом 5. Закрепление кристаллодержателя производят с помощью низкотемпературного припоя 6. Для увеличения устойчивости конструкции к длительному воздействию влаги в баллон 1 вставляют крышку 7, которую припаивают к бал-

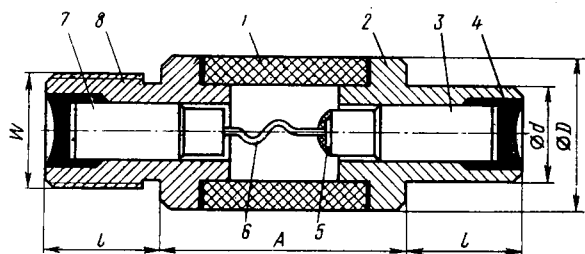


Рис. 11.8. Конструкция корпуса для маломощных параметрических диодов

лону. Такая конструкция обеспечивает длительную влагостойкость.

Конструкция 2—3а, показанная на рис. 11.8, предназначена для маломощных параметрических диодов СВЧ с точечным контактом и выполнена на основе металлокерамического спая. Керамическая втулка 1 из высокоглиноземистой массы М7 или 22ХС образует герметичное соединение с двумя металлическими втулками 2 и 8 пайкой с помощью припоя ПСр-72. Втулки могут быть резьбовые и безрезьбовые в зависимости от методов крепления приборов в аппаратуре. В отверстия втулок запрессовывают кристаллодержатель 3 с кристаллом 5 и держатель 7 с контактной пружиной 6 до образования контакта. Окончательную герметизацию осуществляют пайкой с использованием низкотемпературных припоев 4. Держатели изготавливают из сплава 29НЖ.

На рис. 11.9 приведена конструкция корпуса 2—4, которую называют конструкцией патронного типа. Основными узлами этой конструкции являются керамическая втулка с резьбой 3 из керамики СНЦ или циркониевого стеатита и соединяемые с ней резьбовая втулка 1 и иглодержатель 6. В качестве герметизирующего вещества используют компаунды на основе эпоксидных смол с раз-

личными отвердителями. Втулку 1, иглодержатель 6 и кристаллодержатель 2 изготавливают из латуни. В иглодержатель предварительно вплавляют вольфрамовую проволоку 5 диаметром 0,1—0,15 мм с помощью припоя ПСр-2,5 или ПСр-3, после чего производят формовку и заострение иглы в электролитической ванне. Кристалл 4 наплавляют на кристаллодержатель 2. Окончательную настройку приборов в корпусе осуществляют при ввинчивании кристаллодержателя 2 во втулку 1 и закреплении корпуса

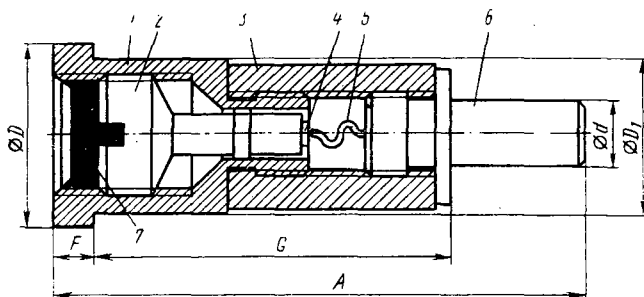


Рис. 11.9. Конструкция корпуса патронного типа

в волноводной камере. После настройки кристаллодержатель 2 закрепляют компаундом на основе эпоксидных смол 7, который полимеризуется при выдержке приборов в термостате при 120°C в течение 48 ч. Для создания хорошей коммутации приборов в волноводе металлические детали корпуса покрывают серебром.

На рис. 11.10 представлена конструкция корпуса 2—5а. Отличительной чертой таких конструкций является многоцелевое назначение и унификация деталей. Корпусы предназначены для параметрических, смесительных, переключательных, ограничительных, умножительных диодов СВЧ. Все эти конструкции выполнены в металлокерамическом исполнении. Корпусы этой серии состоят из кристаллодержателя 1, керамической втулки 2 и кольца 3, образующих при пайке припоем ПСр-72 герметичную механически прочную конструкцию. Использование припоя ПСр-72 позволяет получать скомпенсированный спай керамики с медью без применения промежуточных прокладок. Баллоны имеют золотое покрытие для обеспечения напайки кристалла 6 в баллоне и травление его в процессе изготовления приборов. Верхний вывод от кристалла

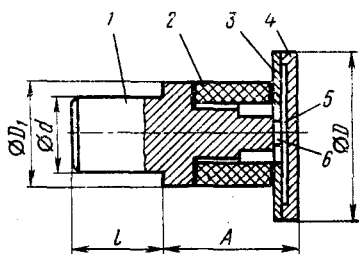


Рис. 11.10. Унифицированная конструкция для диодов СВЧ

обеспечивается с помощью золоченой плюшки или сетки 5, которые присоединяют к кристаллу методом термокомпрессионной сварки и приваривают к кольцу баллона 3 электроконтактной сваркой. Окончательную герметизацию приборов осуществляют путем присоединения к баллону крышки 4 электроконтактной сваркой. Кристаллодержатель 1 изготавливают из бескислородной меди. Керамическую втулку 7 выполняют из высокоглиноземистой керамики М7 или 22ХС. Крышка 4 может быть плоской или иметь цилиндрическую часть для крепления в цанге в зависимости от типа волноводной линии. Крышку изготавливают из сплава 29НЖ или никеля для обеспечения герметизации электроконтактной сваркой.

На рис. 11.11 показана конструкция корпуса 2—6 для мощных умножительных диодов. Для кристаллодержателя 1 используют бескислородную медь. Керамическую втулку 3 изготавливают из высокоглиноземистой массы М7 или 22ХС. Верхний фланец 4 для согласования с керамикой по ТКЛ выполняют из сплава 29НЖ.

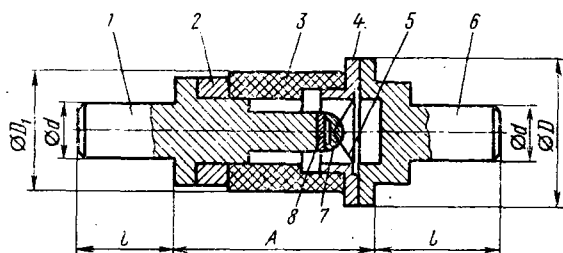


Рис. 11.11. Конструкция корпуса для мощных умножительных диодов

В связи с большими размерами кристаллодержателя осуществить его спай с керамической втулкой без компенсатора невозможно. Поэтому в качестве компенсирующего элемента 2 используют коваровое кольцо толщиной 1,2 мм. Для согласования кристалла с медным выводом по ТКЛ введен компенсирующий диск 8 из сплава 29НЖ или молибдена. Баллон имеет золотое покрытие. Кристалл 7 напаяют на кристаллодержатель в баллоне 1. Ленточный вывод 5 приваривают к кристаллу методом термокомпрессионной сварки, а к фланцу 4 электроконтактной сваркой. Окончательную герметизацию корпуса проводят конденсаторной электроконтактной сваркой, используя крышку 6. Крышку изготавливают из сплава 29НЖ токарным способом, она имеет золотое покрытие.

На рис. 11.12 представлена конструкция корпуса 2—7 для мощных переключательных диодов СВЧ с рабочей мощностью рассеяния 12—15 Вт. Кристаллодержатель 1 изготавливают из прутка бескислородной меди токарной обработкой, керамическую втулку 2 — из высокоглиноземистой керамики М7 или 22ХС. Кристаллодержатель 1, керамическая втулка 2 и кольцо 3 (из сплава

29НК) образуют герметичный металлокерамический баллон. Спай выполняют с использованием припоя ПСр-72. Для температурной компенсации разности TKI керамики и меди между кристаллодержателем 1 и керамической втулкой помещают компенсирующее кольцо 8 из сплава 29НК. Пайку всех деталей корпуса производят одновременно в конвейерной печи. Кристалл 6 с $p-n$ -переходом напаяют на кристаллодержатель 1 через компенсирующую прокладку 7 из тонколистового молибдена. Электрическое соединение верхнего контакта кристалла 6 осуществляют термокомпрессионной сваркой с помощью золоченой никелевой плющеньки 5, которую приваривают к кольцу 3 баллона электроконтактной сваркой. Для обеспечения напайки кристалла с помощью эвтектики золото — кремний и химического травления структуры в корпусе в период сборки и изготовления

прибора все металлические детали баллона имеют золотое гальваническое покрытие. Окончательную герметизацию корпуса осуществляют электроконтактной сваркой с использованием золоченой никелевой крышки 4, получаемой методом холодной штамповки.

Кроме рассмотренных конструкций диодов СВЧ, получили распространение конструкции, состоящие из нескольких единичных

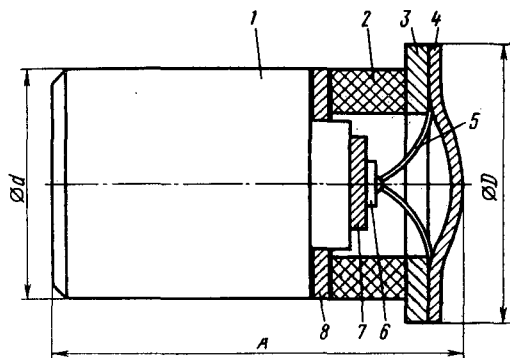


Рис. 11.12. Конструкция корпуса для мощных переключающих диодов СВЧ

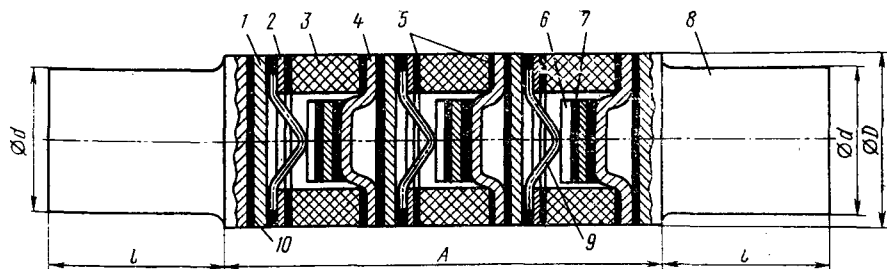


Рис. 11.13. Конструкция корпуса для трех последовательно соединенных варакторов

диодов, собранных в одном блоке. На рис. 11.13 показана конструкция 2—8 для трех последовательно соединенных варакторов, позволяющая увеличить рабочую мощность в режиме умножения частоты. Корпус одиночного варактора представляет собой баллон с крышкой 1. Баллон состоит из кольца 2 из сплава 29НК,

керамической втулки 3 из массы М7 или 22ХС и кристаллодержателя 4 из сплава 29НЖ или никеля, герметично соединенных припоем 5 (ПСр-72). Кристалл 6 напаивают на кристаллодержатель 4 припоем с температурой плавления 350—400°C через компенсирующую прокладку 7 из молибдена или вольфрама. Верхний контакт прибора — это никелевая золоченая плющенко 9, присоединенная к кристаллу термокомпрессионной сваркой, а к кольцу 2 баллона электроконтактной сваркой. Окончательную герметизацию приборов осуществляют пайкой с помощью припоя с температурой плавления 250—300°C. После окончательной герметизации приборы собирают в блок с держателями 8 из латуни с помощью низкотемпературного припоя 10. Держателя 8 предварительно никелируют.

Все рассмотренные конструкции имеют значительное количество деталей сложной конфигурации, изготавливаемых точением. Основное требование к этим деталям — это изготовление посадочных мест по 4-му классу точности для точного монтажа в аппаратуре. Кроме того, поскольку для сборки приборов СВЧ в корпусах кристаллодержатели имеют прессовые или переходные посадки 2-го класса точности, требуется предварительная калибровка посадочных мест на этих деталях и в корпусах с целью обеспечения необходимых размеров. Таким образом, изготовление деталей для приборов СВЧ является достаточно трудоемкой операцией. При использовании меди трудоемкость изготовления деталей сокращается, например кристаллодержателя, в 2—2,5 раза. Керамические втулки выполняют по обычной технологии. В качестве металлизации

Таблица 11.5

Тип корпуса	Размеры, мм								Электрические параметры		
	A	D	d	W	l	D ₁	F	G	C, пф	L, мкн	R _T , град/вт
2—1	9,3	16	—	—	—	—	—	—	1,5	1	40
2—2	16	4,5	—	—	—	—	—	—	1	1	30
2—3а	6,5	3,6	2,4	МЗ	3	—	—	—	0,2	2	58
2—3б	6	4	2,4	—	3	—	—	—	0,4	0,2	20
2—3в	9,3	4,7	2,4	—	3	3,8	2,2	—	0,6	0,2	25
2—4	20,8	7,5	2,4	—	—	6,2	1,3	14,7	0,8	1,6	45
2—5а	2,9	3,7	1,6	—	2	2,3	—	—	0,3	0,5	10
2—5б	2,8	3,7	1,6	—	2	2,3	—	—	0,3	0,5	6
2—5в	2	3,7	1,6	—	2	2,3	—	—	0,42	0,5	10
2—6	11	7,7	2,4	—	4,8	6	—	—	0,5	0,2	4,8
2—7	10	7,7	6	—	—	—	—	—	0,8	0,1	1,5
2—8	7,5	3	2,4	—	3	—	—	—	1,0	1,5	125

рующей пасты применяют молибдено-марганцевую пасту с добавкой гидрированного порошка титана, которая обеспечивает наиболее высокую и стабильную механическую прочность паяного соединения. В качестве припоя используют ПСр-72 с температурой пайки 780°C , который пластичен, механически прочен и обладает постоянной температурой расплавления (эвтектический состав). Коваровые кольца и плоские крышки изготавливают штамповкой на эксцентриковых прессах.

Перед пайкой детали обезжиривают и отжигают в атмосфере водорода (медь — 650°C , сплав 29НК — 950°C). Пайку баллонов проводят в кассете из нержавеющей стали или стали Х-25. Окон-

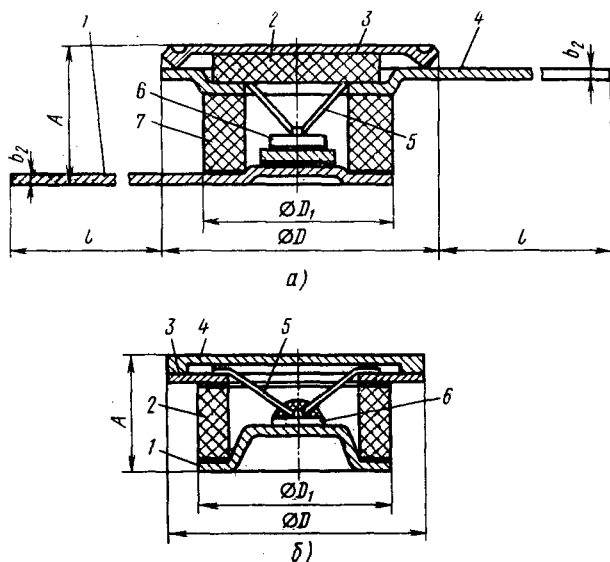


Рис. 11.14. Конструкция корпусов для туннельных диодов

чательную герметизацию корпусов осуществляют точечной конденсаторной сваркой. Основные параметры корпусов для диодов СВЧ приведены в табл. 11.5.

§ 11.4. Корпусы туннельных диодов

Особую группу приборов составляют туннельные диоды, конструкции которых в значительной степени отличаются от приборов других типов.

На рис. 11.14,а показана конструкция корпуса 3—1а для арсенидогаллиевых туннельных диодов. Эта конструкция корпуса состоит из кристаллодержателя 1, верхнего фланца 4 и керамической втулки 7, образующих герметичное металлокерамическое соединение.

Кристаллодержатель 1 и верхний фланец 4 имеют гибкие выводы для использования в подвесном монтаже электронной аппаратуры. В качестве керамического материала применяют стеатитовую керамику СК-1, металлизированную молибдено-железной пастой. В качестве припоя для соединения керамических деталей с металлическими используют сплав из 40% серебра, 5% олова и 55% свинца. Чтобы увеличить механическую прочность, корпуса выполняют из высокоглиноземистой керамической массы с металлизацией молибдено-марганцевой пастой. Кристаллодержатель 1 и верхний фланец 4 изготавливают из сплава 29НЖ для получения согласованного по ТКЛ с керамической втулкой спая. На кристаллодержатель напаивают кристалл 6 с использованием компенсатора или без него. Верхний вывод 5 от кристалла осуществляют никелевой золоченой плюшкой.

Все конструкции корпусов туннельных диодов с гибкими выводами обладают значительным термосопротивлением, что однако не является лимитирующим фактором из-за малых рабочих мощностей диодов. Окончательную герметизацию корпуса осуществляют путем электроконтактной сварки крышки 3 из никеля или кобальта с фланцем 4 корпуса. Крышку изготавливают штамповкой с рельефом под электроконтактную сварку. Для уменьшения опасности попадания выплесков металла при сварке между крышкой и верхним выводом помещают прокладку 2 из поролона.

Для увеличения механической прочности прибора контактную поверхность плюшки отделяют от верхнего вывода.

На рис. 11.14, б представлена конструкция корпуса 3—16 для туннельных диодов, используемых в полосковых линиях. В этой конструкции отсутствуют гибкие внешние выводы. Корпус выполняют в виде плоской таблетки на основе спая металлических деталей (кристаллодержателя 1 и фланца 3) с керамической втулкой 2. На кристаллодержатель напаивают полупроводниковый кристалл 6, верхний вывод 5 которого присоединяют к фланцу 3. При окончательной герметизации крышку 4 приваривают к основанию фланца 3.

Основные параметры конструкций корпусов для туннельных диодов приведены в табл. 11.6.

Таблица 11.6

Тип корпуса	Размеры, мм					Электрические параметры		
	A	D	D ₁	l	b	C, пф	L, нгн	R _Т , град вт
3—1а	2,3	4,2	3	7	0,3	0,4	0,5	1800
3—1б	2	4,7	2,8	6,5	0,2	0,5	0,5	1880
3—1в	1,9	3,8	—	6,5	0,1	0,5	0,6	1950
3—1г	1,6	3,7	2,4	—	—	0,4	0,4	59
3—1д	1,3	2,4	1,3	—	—	0,3	0,15	105

§ 11.5. Корпусы транзисторов и тиристоров

Значительную часть корпусов полупроводниковых приборов как по объему производства, так и по количеству типономиналов составляют конструкции для транзисторов, которые как правило состоят из двух основных частей: ножки и баллона. Кристалл с *p-n*-переходами монтируют на внутренней части ножки. Ножку и баллон герметично соединяют электроконтактной сваркой, холодной сваркой и пайкой. Электроконтактная сварка начинает занимать преобладающее место при окончательной герметизации корпусов полупроводниковых приборов.

По сравнению с холодной сваркой электроконтактная сварка имеет следующие преимущества:

- 1) более высокую надежность благодаря совершенному металлостеклянному спаю и отсутствию значительных нагрузок на спай при герметизации;

- 2) меньшие габариты и вес конструкции;

- 3) точные геометрические формы корпуса, который деформируется при герметизации, что облегчает использование специальных теплоотводящих устройств;

- 4) высокой производительностью процесса сварки.

Ножка конструкции корпуса состоит из фланца (основания ножки), одного или нескольких изоляторов и выводов. Баллон служит только для окончательной герметизации и представляет собой металлическую деталь в виде чашечки с буртиком. Для мощных транзисторов используют конструкции корпусов с выводами вверх по типу корпусов мощных диодов. В этом случае металлостеклянный или металлокерамический спай переходит в баллон, а ножка является обычным кристаллодержателем.

На рис. 11.15 представлена конструкция металлостеклянного корпуса 4—1а, которая предназначена в основном для микромодульных маломощных (50—150 мвт) транзисторов. Выводы корпуса имеют двухзвенную конструкцию, что позволяет при монтаже на микромодульные платы без повреждения спаев ножки изгибать выводы в непосредственной близости от места металлостеклянного спаи. Ножка корпуса представляет собой металлостеклянные спаи фланца 1, выводов 2 и стеклобус 7. Для обеспечения согласованного металлостеклянного спаи фланец и выводы изготавливают из сплава 29НК, а стеклобусы — из стекла С49-2. Фланец выполняют штамповкой из листового ковара с разгрузочной канавкой для ограничения деформации при окончательной герметизации корпуса холодной сваркой. Район деформации ограничивается зоной, непосредственно примыкающей к месту сварки, чтобы защитить от разрушения металлостеклянные спаи ножки, а также не допустить деформации кристалла полупроводника. Базовый вывод корпуса 6 приваривают к фланцу 1 ударной конденсаторной сваркой перед сборкой ножки с изолированными выводами. Базовый вывод может быть выполнен из сплава 29НК или из никеля. Баллон корпуса 5 изготавливают из стали 10 или из никеля. Кристалл 4

с *p-n*-переходами и токоведущими контактами 3 напаивают на кристаллодержатель. Токоведущие контакты присоединяют к внешним выводам 2 электроконтактной сваркой. Для подготовки к холодной сварке ножку и баллон никелируют.

Типовой технологический процесс создания подобной конструкции состоит из следующих операций: изготовление металлических деталей и стеклобус, подготовка их к получению металлостеклянных спаев, нанесение гальванического покрытия и окончательная герметизация корпусов холодной сваркой. Никелевые и коваровые выводы делают из проволоки диаметром 0,3—0,5 мм, а иногда (для мощных приборов) большего диаметра. Фланец и баллон штампу-

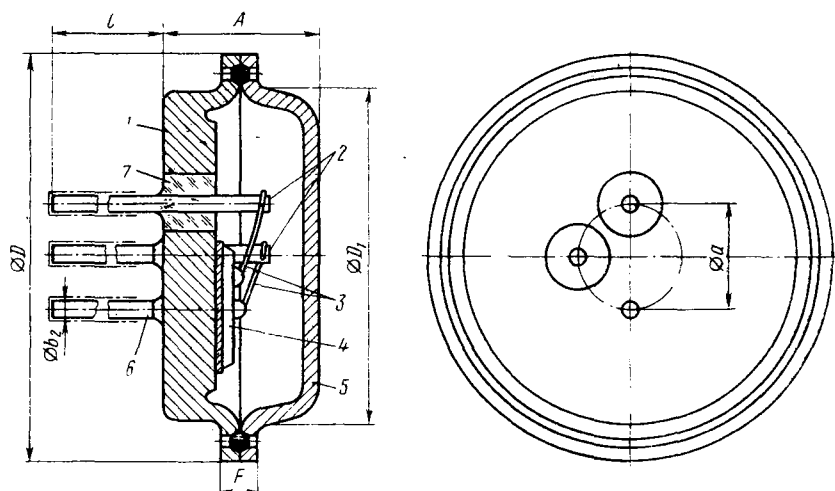


Рис. 11.15. Конструкция корпуса для малогабаритного транзистора с мощностью рассеяния 50—150 мвт

ют из ленты методом холодной штамповки на последовательных штампах с автоматической подачей; причем готовую деталь получают после выхода на режим за один ход пресса. Стеклобусу изготавливают из стеклянного капилляра С49-2 групповой резкой наклеенных на планшайбу глифталевой замазкой заготовок на станках алмазной или проволоочной резки. Выполнение спаев проводят в металлографитовых кассетах в конвейерной печи.

Окончательную герметизацию приборов проводят на полуавтомате холодной сварки. В зависимости от условий эксплуатации в данной конструкции могут быть использованы однозвенные выводы.

В этой конструкции выпускают микромодульные транзисторы ТМ2—ТМ11 и транзисторы ГТ108, ГТ309.

На рис. 11.16 показана конструкция корпуса 4—16 для маломощных (до 300 мвт без специального теплоотвода) транзисторов,

герметизируемых электроконтактной сваркой. Ножку корпуса выполняют на основе спая стеклотаблетки 2 из стекла С48-2 с отверстиями для выводов и фланца 1 из тонкостенного листового ковара чашечной конструкции.

В зависимости от условий применения у ножки может быть от двух до четырех выводов 7. При этом один из выводов может быть базовым 6. В некоторых случаях все четыре вывода могут быть изолированными. Благодаря удачной конструкции металлостеклянного узла, имеющего большую протяженность спая и большой объем стекломассы, ножка обладает хорошей механической прочностью и большой надежностью. Конструкцию с двумя выводами используют для стабилитронов, генераторов шума и варикапов с мощностью рассеяния до 300—500 мвт; с четырьмя выводами — для вы-

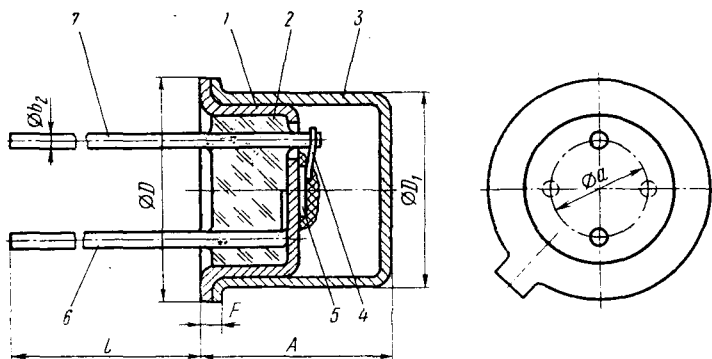


Рис. 11.16. Конструкция корпуса для малогабаритных транзисторов с мощностью рассеяния до 300 мвт

сокочастотных транзисторов и оптоэлектронных приборов; с тремя выводами — для транзисторов и тиристоров. Изменение количества выводов не требует никакой специальной оснастки. Фланец ножки при штамповке за счет сменных пуансонов может иметь любое число отверстий для выхода изолированных выводов. Стеклотаблетку изготавливают с четырьмя отверстиями для выводов по порошковой технологии или литьем с последующим выжиганием связки и спеканием. Для изготовления ножек с разным числом выводов необходим всего один комплект оснастки.

Металлические детали корпуса в зависимости от типа прибора имеют никелевое или золотое покрытие. Наружные концы выводов для удобства монтажа в аппаратуре облуживают. Ножка корпуса удобна для монтажа кристаллов 5 с различными типами *p-n*-переходов; причем выводы 4 от кристалла могут быть присоединены к выводам ножки электроконтактной сваркой, пайкой или термокомпрессионной сваркой. Для уменьшения емкости коллектор — база ножка корпуса может иметь выборку во фланце 1, заполненную стеклоизолятором. При этом кристалл прибора напаивают на

один из изолированных выводов ножки, конец которого расплюснен и находится на стекле изолятора в месте выборки. В случае необходимости кристалл может быть электрически изолирован от фланца с сохранением хорошего теплового контакта. Для этого между кристаллом и фланцем помещают прокладку из бериллиевой керамики «Брокерит-9», являющейся хорошим проводником тепла.

Баллон 3 представляет собой полый цилиндр из стали Ст. 10 или никеля. Ножка и баллон плотно сопрягаются по цилиндрической поверхности, что защищает *p-n*-переход от выплесков при электроконтактной сварке и улучшает теплоотвод от фланца ножки к баллону. Наличие строгой цилиндрической формы баллона позволяет в необходимых случаях увеличивать теплоотвод за счет помещения прибора цилиндрической частью баллона в специальный радиатор.

Корпус данной конструкции предназначен для большинства маломощных транзисторов: ГТ322, ГТ109, ГТ310, ГТ309, ГТ108, ГТ111, КТ306, КТ312, П47, П418 и др. При наличии специального теплоотвода мощность приборов в таких корпусах можно повысить до 1 *вт*. Предельная частота приборов достигает 1,5 *Ггц*.

По конструкции, применяемым материалам и технологии изготовления корпуса 4—1в и 4—1г аналогичны корпусу 4—1б (рис. 11.16), но имеют большие габариты (размер кристалла возможен до 4 *мм*).

Эти корпуса предназначены для тиристоров, оптоэлектронных приборов и транзисторов с рабочей частотой до 1 *Ггц*. В таких корпусах выпускаются транзисторы и тиристоры ГТ308, ГТ311, ГТ315, П401—П403, П416, КУ101, КУ103, П309 и др.

На рис. 11.17 представлена конструкция корпуса 4—1д для транзисторов средней мощности, герметизируемых холодной сваркой. Фланец ножки 1 имеет массивную часть для металlostеклянного спая с выводами. Буртик фланца для снятия напряжений при герметизации холодной сваркой выступает над основанием и соединен с ним участком значительно меньшей толщины, чем основание. Вместе с тем увеличенная толщина основания фланца позволяет увеличить протяженность спая стеклобус 2 с гибкими выводами 3 ножки. Два вывода 3 ножки являются изолированными, а один — базовым 4. Баллон 5 изготавливают из ленты стали 10 или никеля методом холодной штамповки.

Для создания согласованного спая выводов с фланцем ножки используют стеклобусу из стекла С49-2, а фланец и выводы — из сплава 29НК. Базовый вывод может быть изготовлен из никеля.

На рис. 11.18 дана конструкция корпуса 4—2, предназначенная для приборов с мощностью рассеяния 10—15 *вт*, с герметизацией холодной сваркой и с монтажом на теплоотводящий радиатор. Необходимый механический контакт обеспечивается за счет стального фланца, у которого имеются три отверстия для крепления к теплоотводящему радиатору винтами и который надевают на корпус со стороны баллона 11.

Чтобы создать нормальный тепловой режим работы приборов, фланец 1 ножки корпуса изготавливают из рафинированной или

На рис. 11.18 показана конструкция ножки с присоединением втулки 2 к нижнему фланцу 1 электроконтактной сваркой через промежуточное кольцо 6 из никеля для облегчения сварки. В этом случае используют тонкостенную штампованную втулку из листового кобальта, которую помещают с зазором в соответствующее отверстие фланца ножки. Для обеспечения жесткости и механической прочности соединения выводов с фланцем зазор между узлом вывода и фланцем заполняют эпоксидным компаундом 5. Базовый вывод 12 изготавливают из никеля и припаивают к ножке одновременно с никелевыми кольцами 6 припоем ПСр-72 в конвейерной печи. Нижнюю часть выводов для удобства присоединения выполняют в виде медного плетеного жгута 15, соединенного с жесткими выводами ножки через никелевую трубку стыковой сваркой.

329

в медный фланец 1 производят в конвейерной печи одновременно с базовым выводом 12.

Соединение контакта кристалла с выводом осуществляют также с помощью медной плетенки 8, используя никелевую или коваровую сплюснутую трубку 9 в качестве промежуточного элемента. Перед герметизацией холодной сваркой кристалл с *p-n*-переходом 10 покрывают лаком или компаундом 7. Для изоляции токоведущих выводов ножки от резистора или теплоотводящей платы на них надевают трубку 14 из полихлорвинила.

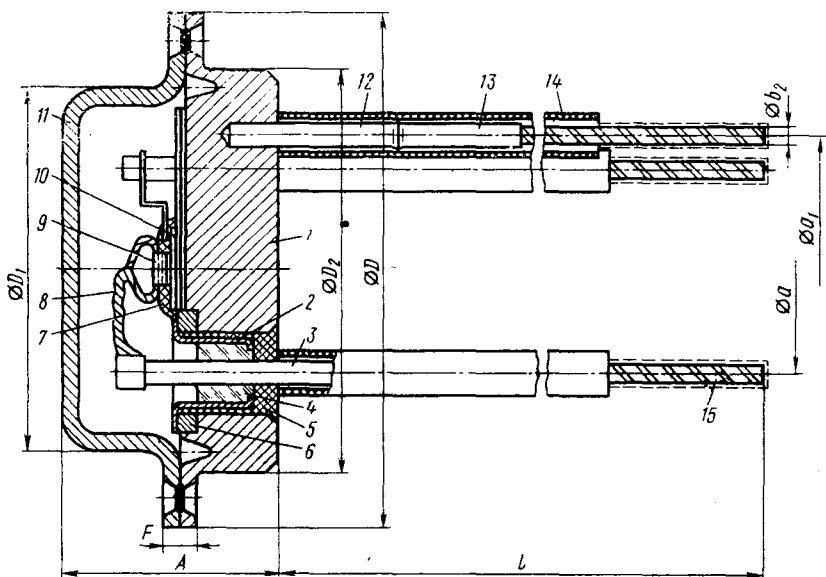


Рис. 11.18. Конструкция корпуса для транзисторов с мощностью рассеяния 10—15 *вт*

Для высоковольтных приборов применяют конструкции с винтом и выводами кверху. Корпус такой конструкции кроме гибких выводов может иметь прямые жесткие выводы типа «крючок» или лепестковые наконечники. Для удобства электрического монтажа в аппаратуре концы выводов облуживают припоем олово-висмут или ПОС-61. Такие конструкции используют для производства полупроводниковых приборов П210, П213, П215, П217, ГТ701, Д238 и др.

На рис. 11.19 представлена конструкция корпуса 4—3а для ВЧ и СВЧ транзисторов и тиристоров с тремя изолированными выводами кверху. Корпус герметизируют электроконтактной сваркой, он предназначен для приборов с мощностью рассеяния до 50 *вт* и частотой до 400 *Мгц*. Корпус состоит из медного кристаллодержателя с резьбовым хвостовиком и шестигранником 1, к верхнему тор-

цу которого припаивают никелевое кольцо 2 с рельефом под электроконтактную сварку и прокладку 3 из бериллиевой керамики, и баллона. Прокладка 3 служит для монтажа кристалла 4 с *p-n*-переходами и жестких никелевых выводов 5 в виде «гвоздиков». На верхней поверхности керамической прокладки 3 имеется молибдено-марганцевая металлизация в виде трех изолированных друг от друга участков определенного рисунка, которые служат основанием для контактов эмиттера, коллектора и базы. На каждом из этих участков серебром припаивают никелевые выводы 5 шляпками вниз. Нижняя поверхность керамической прокладки имеет сплошную металлизацию для припайки на медный кристаллодержатель 1.

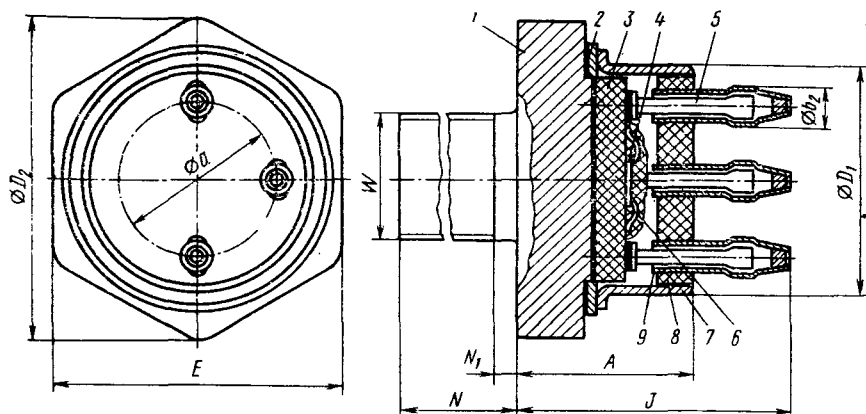


Рис. 11.19. Конструкция корпуса для ВЧ и СВЧ транзисторов и тириستоров

При сборке корпуса на один из участков металлизации напаивают кристалл с *p-n*-переходами со стороны базы. Соединение коллекторного и эмиттерного контактов с двумя другими участками металлизации производят с помощью золотой проволоки 6 термокомпрессионной сваркой. Для напайки кристалла эвтектикой золото-кремний и для термокомпрессионной сварки выводов 6 с металлизированными участками все металлические и металлизированные поверхности кристаллодержателя в сборе гальванически покрывают слоем золота с подслоем никеля. Прокладка из бериллиевой керамики 3 изолирует кристалл от кристаллодержателя электрически и обеспечивает хороший тепловой контакт.

Корпус данной конструкции выполняют на основе охватывающего цилиндрического металло-керамического спая; он представляет собой никелевый баллон 7 с втулкой 8 из керамики 22ХС или КВФ-IV и с тремя никелевыми трубками 9. Баллон 7 изготавливают штамповкой никелевой ленты. Для форстеритовой керамики КВФ-IV разработана солевая металлизация с последующей сошлифовкой металлизировующего покрытия с торцевых поверхностей керамической втулки. При использовании солевой металлизации проще и дешевле металлизация отверстий, особенно малого диаметра

• (как в данной конструкции). Наружный конец тонкостенных никелевых трубок перед сборкой и пайкой корпуса завальцовывают. Во время пайки корпуса завальцованные концы никелевых трубок одновременно герметизируют припоем ПСр-72. При сборке кристаллодержателя с баллоном никелевые выводы, припаянные к керамической прокладке кристаллодержателя, входят в отверстия никелевых трубок баллона. После окончательной герметизации корпуса никелевые трубки с выводами держателя пережимаются для обеспечения надежного электрического контакта.

При использовании корпуса данной конструкции для низкочастотных транзисторов электрической изоляции кристалла от корпуса не требуется. В этом случае кристалл может быть припаян к кристаллодержателю непосредственно или через компенсирующую прокладку из молибдена. Для изоляции выводов эмиттера и коллектора от корпуса используют прокладки из высокоглиноземистой или форстеритовой керамики, которые значительно дешевле бериллиевой. При использовании баллона 7 из ковара и коваровых трубок 9 в качестве изолятора может быть применено стекло, что упрощает и удешевляет производство. Корпусы такой конструкции удобны для монтажа на теплоотводящие шасси и платы с помощью торцевого ключа. В этом корпусе выпускают приборы КТ904 и др.

Корпус 4—36 используют для мощных низкочастотных и высокочастотных транзисторов с рабочей мощностью до 200 вт (см. табл. 11.7).

На рис. 11.20 представлена конструкция корпуса 4—4а, предназначенная для тиристоров средней мощности, герметизируемая холодной сваркой. Корпус состоит из медного кристаллодержателя 1 с шестигранником размером 14 мм под ключ и резьбовым хвостовиком и баллона. Для герметизации холодной сваркой кристаллодержатель имеет фланец, выступающий над шестигранником. Кристалл с *p-n*-переходами 2 напаивают на кристаллодержатель непосредственно или через компенсирующую прокладку из молибдена 3; при этом молибденовую прокладку припаивают к кристаллодержателю припоем ПСр-72.

Корпус выполняют в виде металлостеклянного спая баллона 4, стеклотаблетки 5 и коваровых трубок 6 и 7. Баллон 4 изготавливают холодной штамповкой из листового ковара толщиной 0,4 мм. Стеклотаблетку из стекла С49-2 производят методом прессования или горячего литья под давлением с последующим спеканием по известной порошковой технологии. Для улучшения смачивания металла стеклом при изготовлении баллона в стеклотаблетку можно добавлять окислы кобальта, марганца, хрома и некоторых других металлов. Трубки из ковара 6 и 7 с наружными диаметрами 1,5 и 2 мм обеспечивают электрическое соединение с внешними выводами различных областей полупроводникового кристалла. Кристаллодержатель изготавливают из медного прутка последовательной объемной штамповкой. Поскольку при штамповке происходят значительные объемные деформации материала с потерей пластичности,

Таблица 11.7

Тип корпуса	Размеры, мм																	Электрические параметры		
	A	D	D ₁	D ₂	a/a ₁	b ₂	l	F	J	N	N ₁	E	W	t	t ₁	T ₁	T ₂	C, пф	L, нгн	R _T , град вт
4—1а	2,6	7,6	5,9	—	2,6±0,2	0,3	16±2	0,4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,8	0,4	600
4—1б	5,3	5,8	4,7	—	2,5±0,2	0,4	30±2	0,7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,5	0,4	350
4—1в	4,3	7,6	5,8	5,7	2,5±0,2	0,4	30±2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,6	0,4	400
4—1г	6,6	9,4	8,3	—	5±0,3	0,4	30±2	0,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,8	0,4	190
4—1д	8	11,7	9	—	4±0,4	0,5	32±2	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,9	0,3	120
4—2	14,6	32	22,6	25,6	$\frac{12\pm1,2}{16\pm0,6}$	3	80±2	2,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,5	0,2	3
4—3а	7,5	—	8,6	12,7	5±0,3	1	—	—	11,5	11,5	2	11	M5	—	—	—	—	2	0,6	4
4—3б	13	—	19,9	25	13±0,3	—	—	—	24,5	13	2	22	M8	3	1,5	—	—	1	0,25	2,5
4—4а	13	21,5	14,5	16,5	—	—	—	—	29	11	2	14	M6	3	1,5	—	—	1	0,5	3
4—4б	14	—	14,5	22	—	—	—	—	29	11	2	19	M6	3	1,5	—	—	1	0,5	2,5
4—4в	11,5	—	8,6	12,7	—	—	—	—	24	11,5	2	11	M5	—	—	1,6	1,2	0,7	0,5	4

после каждой операции штамповки производят отжиг заготовок на воздухе в муфельных печах. При использовании бескислородной меди отжиг заготовок можно проводить в водородных печах, при этом снятие окисной пленки не требуется. Точные размеры фланца обеспечиваются благодаря операции вырубки. Лишний металл хвостовика удаляют при токарной обработке, которую можно совместить с нарезанием резьбы.

С такой конструкцией выпускают тиристоры средней мощности КУ201А—КУ201Л, Д235А—Д235Г, КУ203, КУ202 и др.

Конструкции корпусов 4—4б, 4—2в аналогичны конструкции 4—4а и отличаются только геометрическими размерами и электрическими параметрами (см. табл. 11.7).

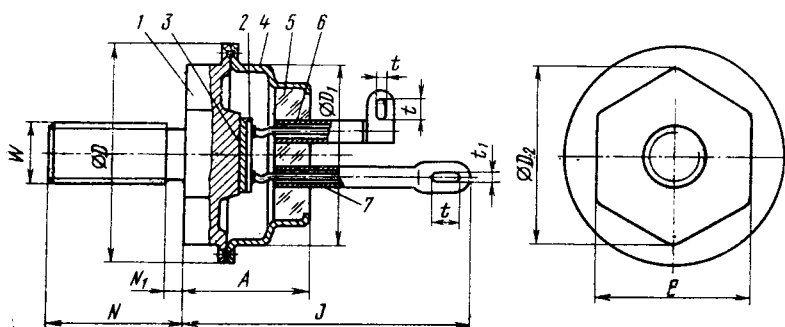


Рис. 11.20. Конструкция корпуса для тиристора средней мощности

Основные параметры рассмотренных корпусов приведены в табл. 11.7.

§ 11.6. Корпусы фотоприемников и источников света

Полупроводниковые источники света — класс приборов, который получает все более широкое распространение в устройствах оптической связи, точечной и цифровой индикации, в счетно-решающих устройствах. Приборы, работающие в ИК-области, используют для передачи и записи информации на фоточувствительные пленки. В зависимости от конструкции прибора и условий применения различают единичные и многоэлементные источники излучения для видимой и ИК-области спектра.

Основная особенность корпусов фотоэлектрических приборов — наличие приемного (или выходного) окна.

На рис. 11.21, а и б представлена конструкция корпуса 5—1а полупроводникового источника излучения в ИК-области спектра. Основой конструкции и теплоотводом является кристаллодержатель 1 из медной проволоки, на который напаивают кристалл 2 с *p-n*-переходом и верхним выводом 3 из никелевой или серебряной плющенко. Кристалл выполняют в виде усеченного конуса, боко-

вая поверхность которого является излучающей. Окончательную герметизацию приборов осуществляют пластмассой 4, прозрачной в ИК-диапазоне.

На рис. 11.22 дана конструкция корпуса 5—16 полупроводникового источника излучения в видимой части спектра, предназначен-

ная для световой индикации. Она состоит из кристалла 2 с двумя гибкими выводами 1 и 4, припаянными к омическим контактам кристалла 2. Гибкие выводы 1 и 4 изготавливают из серебряной плющеньки. Кристалл с припаянными выводами покрывают (герметизируют) прозрачной пластмассой 5. Со стороны излучающей поверхности кристалла для фокусировки излучения имеется линза 3 из стекла, которая приклеена в оптическом контакте с герметизирующей пластмассой и излучающей поверхностью кристалла.

На рис. 11.23 показана конструкция корпуса 5—2 фотоприемника и источника излучения. Корпус состоит из двухвыводной ножки и баллона с оптическим окном. Ножка корпуса 1 изготовлена штамповкой из листового сплава 29НК. К ножке 1 конденсаторной сваркой приварен базовый вывод 9 из никелевой проволоки. В ножку 1 через стекловывод 7 из стекла С49-2 впаян второй вывод 6 из сплава 29НК. Ножка имеет гальваническое никелевое покрытие для защиты от коррозии и для улучшения смачивания припоем при напайке полупроводникового кристалла. На ножку 1 напаяют полупроводниковый кристалл 4 из арсенида галлия или карбида кремния без компенсирующей прокладки или через компенсирующую прокладку 8 из молибдена или вольфрама.

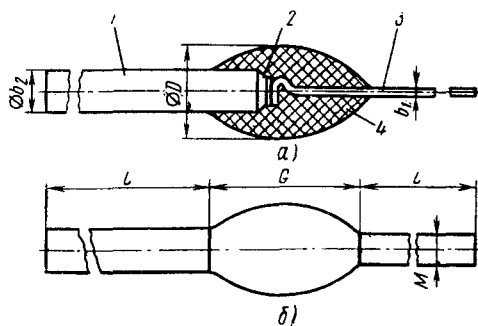


Рис. 11.21. Конструкция корпуса полупроводникового источника излучения в ИК-области спектра

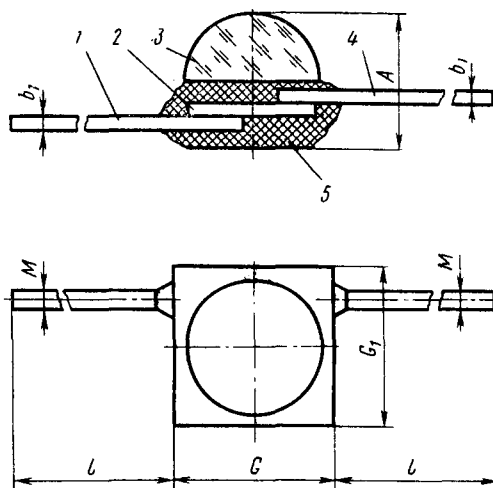


Рис. 11.22. Конструкция корпуса полупроводникового источника излучения в видимой части спектра

Верхний вывод кристалла с помощью никелевой плюшки 5 соединяют с изолированным выводом 6 ножки. Никелевая плюшка может иметь золотое покрытие. Окончательную герметизацию корпуса осуществляют конденсаторной электроконтактной сваркой. Для улучшения процесса и повышения надежности сварного шва ножка 1 имеет рельеф в виде зуба, представляющего в сечении

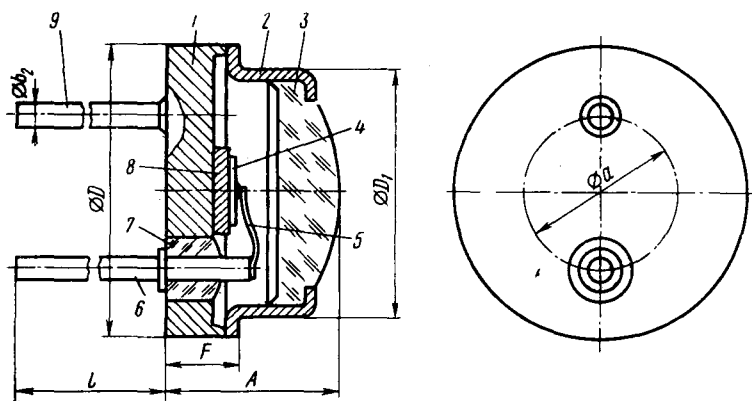


Рис. 11.23. Конструкция корпуса для фотоприемников и источников излучения

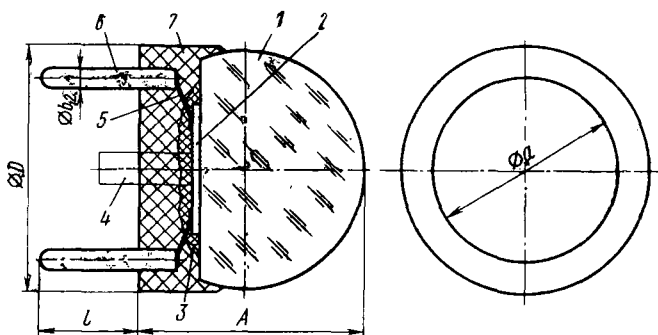


Рис. 11.24. Конструкция корпуса многоэлементного источника излучения

трапецию. Для окончательной герметизации используют баллон с окном для вывода излучения в виде линзы. Линзу 3 изготавливают из стекла С49-2, она образует герметичный металлостеклянный спай с баллоном 2 из сплава 29НК. Конструкция, показанная на рис. 11.23, разработана для индикаторов света с большим (свыше 70°) углом обзора.

Наряду с единичными широко распространены многоэлементные источники излучения с числом элементов от семи (многоэле-

ментный диод типа восьмерки) до сорока и больше. Многоэлементные приборы могут иметь линзу для фокусировки излучения и увеличения изображения или выполняться в виде платы с плоским выводом излучения. Плоские конструкции особенно удобны при передаче информации для записи на фотопленку или при использовании излучателя с непосредственным контактом с приемником излучения.

На рис. 11.24 приведена конструкция корпуса 5—3 многоэлементного источника излучения с полусферической линзой. Конструкция разработана для девятиштырьковой ламповой панели, герметизируется пластмассой. В процессе сборки корпуса линза 1 из стекла C49-2 служит основанием для монтажа полупроводникового кристалла 2 с излучающими элементами. Кристалл приклеивают к линзе специальным оптическим клеем, создавая надежный оптический контакт. Затем кристалл покрывают специальным эластичным компаундом 3 с целью защиты кристалла от деформации и разрушения в процессе заливки твердым герметиком при окончательной герметизации. Для облегчения герметизации корпуса кристалл с линзой крепят на кристаллодержателе из пластмассы 4. В конструкции имеются восемь штырьковых выводов 6 из никеля диаметром 1 мм, один из которых является базовым. Электрический контакт кристалла с выводами осуществляют проволочными выводами 5 из меди или никеля, которые термокомпрессионной сваркой приваривают к кристаллу и припаивают к выводам. Окончательную герметизацию приборов производят в единичных или многоместных формах из силиконовой резины. При этом кристалл с линзой и с кристаллодержателем вставляют в основание из силиконовой резины. Выводы из никеля также вставляют в отверстия основания. После этого кристалл соединяют с выводами пайкой. Затем основание с собранной конструкцией помещают в обойму заливочной формы из силиконовой резины с отверстием для

Таблица 11.8

Тип корпуса	Размеры, мм										Электрические параметры			
	D	Q	l	b ₃	A	b ₁	M	G ₁	a	F	D ₁	C, пф	L, нгн	$R_T \frac{град}{вт}$
5-1a	1,5	2,5	18±4	0,7	—	0,11	0,5	—	—	—	—	3	1	130
5-16	—	2,1	20±2,5	—	2,2	0,11	0,5	2,1	—	—	—	4	5	1600
5-2	5,2	—	15±1	0,4±0,1	3,5	—	—	—	2,5±0,2	1,5	4,2	0,9	1,5	450
5-3	18	—	7	1	15	—	—	—	12±0,2	—	—	3	8	1500

заливки. Заливку корпуса производят пластмассой 7 путем шприцевания. После заливки формы с приборами помещают в термостат для полимеризации компаунда.

Конструкция корпуса плоских многоэлементных приборов подобна рассмотренной и имеет аналогичную схему герметизации. Размеры полупроводниковых источников излучения приведены в табл. 11.8.

Корпусы фотоэлектрических приборов и особенно светодиодов не достигли еще такой степени отработанности, как корпуса диодов и транзисторов.

§ 11.7. Корпусы диодных матриц, интегральных и гибридных схем

На рис. 11.25 представлена конструкция плоского корпуса 6—1 для приборов малой мощности и небольших габаритов. Основание корпуса представляет собой металлостеклянный спай 2 из порошкового стекла С48-2, штампованного фланца 1 из коваровой ленты толщиной 0,15 мм и ленточных коваровых выводов 3. Выводы предварительно вырубает в виде общего блока. Соединение фланца и выводов со стеклоизолятором производят методом горячего литья под давлением на машинах для литья керамических изделий. Полученную отливку предварительно отжигают для выжигания связки, а затем нагревают до образования металлостеклянного спаивания. После этого на основание наносят гальваническое покрытие никеля или золота в зависимости от метода сборки и герметизации прибора. Четыре вывода корпуса, расположенные перпендикулярно четырнадцатью основным, соединены соответственно с выводами I, VII, VIII, XIV и являются вспомогательными. Они, как правило, срезаны и используются только при специальной коммутации в устройствах. Полупроводниковый кристалл 4 с *p-n*-переходами наклеивают на стеклянное дно основания и соединяют с выводами корпуса, используя тонкую золотую проволоку 5, термокомпрессионной сваркой. Окончательную герметизацию корпуса производят пайкой с помощью низкотемпературных припоев с предварительным облучиванием места пайки. Для окончательной герметизации применяют штампованную крышку 6 из коварового или никелевого листа толщиной 0,15 мм.

Кроме рассмотренной конструкции, для диодных матриц имеются сходные конструкции с количеством выводов от четырех до шестнадцати—двадцати со сборкой и герметизацией на ленте методом трансферного литья под давлением. Эти конструкции можно использовать при монтаже на печатных платах. Получили распространение гребешковые диодные матрицы с односторонним расположением выводов для печатного монтажа.

Основные параметры конструкций корпусов данного типа приведены в табл. 11.9.

На рис. 11.26 показана наиболее распространенная в серийном производстве конструкция корпуса 6—2 для интегральных схем.

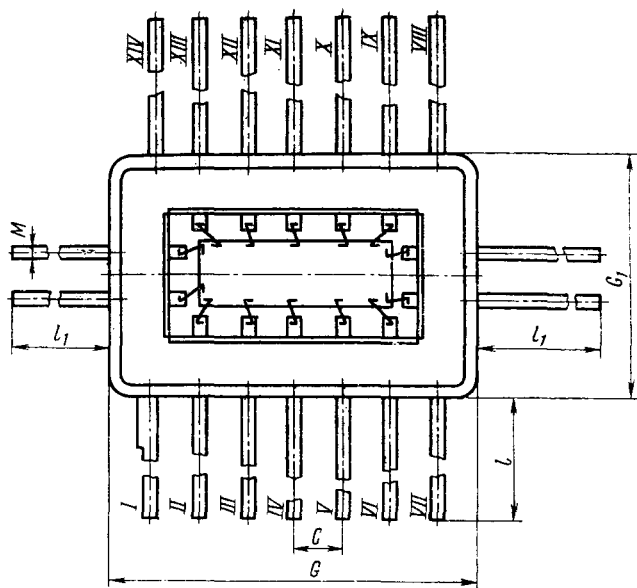
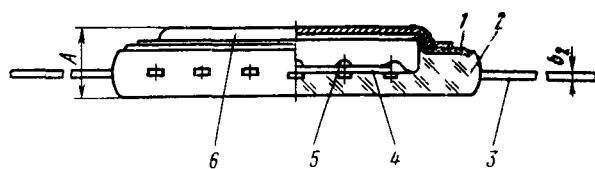


Рис. 11.25. Конструкция плоского корпуса для приборов малой мощности и небольших габаритов

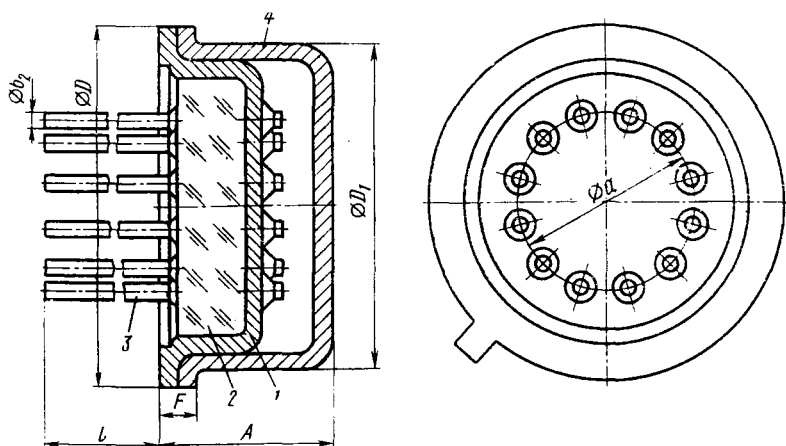


Рис. 11.26. Конструкция корпуса для интегральных схем

Таблица 11.9

Тип корпуса	Размеры, мм										Электрические параметры				
	M	l_1	G_1	A	D	D_1	l	F	b_3	a	G	C	$C_{пф}$	$L_{нзн}$	$R_{т, \frac{град}{вт}}$
6-1	0,43	4,1	6,5	2	—	—	4,3	—	0,4	—	9,8	1,25	4,5	6,5	1650
6-2	—	—	—	4,6	9,4	8,3	20 ± 1	0,8	0,5	$5 \pm 0,2$	—	—	1,5	4	200
6-3a	—	—	—	3,7	—	—	$8,5 \pm 1$	0,6	0,4	9	11,6	—	3	4	180
6-3б	—	—	14,5	3,3	—	—	10	0,7	0,3	10,2	19,7	2,5	7	4	130
6-4	—	—	8	3,8	—	—	5	—	0,25	—	18,6	$2,5 \pm 0,1$	8	5	950

Эта конструкция имеет восемь или двенадцать выводов. Один из выводов может быть базовым, но имеются конструкции, у которых все выводы изолированы от корпуса. Технологический процесс изготовления корпуса типовой и одинаков с технологией изготовления корпуса транзисторов и тиристоров малой и средней мощности. Для качественной напайки кристалла на ножку, термокомпрессионной сварки выводов кристалла к выводам ножки и окончательной герметизации электроконтактной сваркой ножку и баллон покрывают золотом. Фланец ножки 1, стеклотаблетка 2 и выводы 3 образуют герметичный метал-лостеклянный спай. Окончательную герметизацию производят, применяя баллон 4. Фланец изготавливают из тонколистового ковара, а выводы — из коваровой проволоки. Стеклотаблетку выполняют из стекла С48-2 литьем под давлением или прессованием. На ножку напаивают кристалл с помощью эвтектики золото-кремний, а соединение кристалла с выводами производят термокомпрессионной сваркой, используя золотую проволоку на стандартном оборудовании. Конструкция обладает значительным термосопротивлением при отсутствии специального теплоотвода.

Для монтажа прямоугольных полупроводниковых кристаллов $6,5 \times 6,5$ и 6×14 мм² применяют конструкцию 6-3а и 6-3б (см. табл. 11.9).

Наряду с корпусной герметизацией диодных матриц, интегральных и гибридных схем применяют и бескорпусную герметизацию пластмассой. Внедрение технологии изготовления приборов на ленте с групповой герметизацией методов трансферного литья под давлением позволяет сократить затраты на изготов-

ление приборов, упростить конструкцию оснастки и увеличить производительность. На рис. 11.27 приведена конструкция микросхемы или диодной сборки 6—4 с герметизацией пластмассой на ленте. Ленту 1 из никеля, сплава 29НК или трехслойных композиций ковар-медь-ковар, никель-ковар-никель штампуют в виде непрерывной полосы и разрезают на отрезки оптимальной длины из расчета 20—25 приборов на каждом отрезке ленты. Число приборов определяют согласно оптимальным размерам пресс-формы для транс-

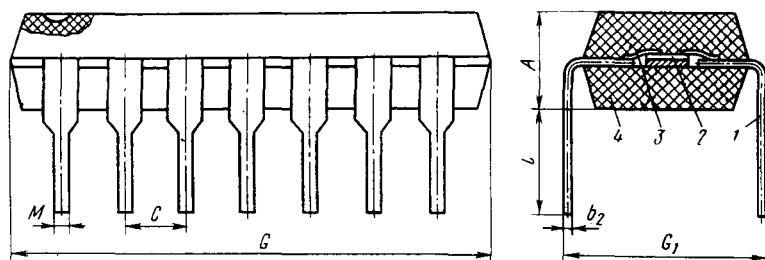


Рис. 11.27. Конструкция микросхемы или диодной сборки с герметизацией пластмассой на ленте

ферного литья. Лента при этом имеет технологические перемычки, так что измерение параметров прибора в процессе производства невозможно. Лента 1 имеет на поверхности золотую полосу для напайки кристалла 2 эвтектикой золото-кремний и термокомпрессионной сварки выводов с помощью золотой проволоки 3. Для увеличения устойчивости сборки к воздействию жесткой пластмассы при полимеризации после заливки структуру с проволочными выводами предварительно покрывают эластичным компаундом. Окончательную герметизацию приборов, как уже отмечалось, производят компаундом 4 на основе эпоксидной смолы трансферным литьем. Число выводов в зависимости от типа приборов может меняться от трех до четырнадцати. Конструкция рассчитана на печатный монтаж приборов на плате.

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ И ИСПЫТАНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

§ 12.1. Категории испытаний

Испытания подразделяют на технологические испытания в процессе изготовления приборов и проверку соответствия параметров готовых приборов требованиям технических условий (ГОСТ 11630—70). Испытания позволяют отбраковывать ненадежные приборы и способствуют отработке технологических процессов.

Технологическим испытаниям в процессе изготовления подвергают как заготовки полупроводниковых кристаллов с *p-n*-переходами, так и сборочные конструкции после соответствующих технологических операций.

Проведение испытаний определяется методикой и требованиями, оговоренными в технических условиях (ГОСТ 11630—70).

Существуют два вида технических условий: общие (ОТУ), содержащие требования для всех полупроводниковых приборов, и частные (ЧТУ), содержащие нормы на электрические параметры и специфические требования, относящиеся к конкретному типу прибора.

Общие технические условия (ОТУ) и дополнительные документы (нормали) устанавливают:

- а) электрические, механические и климатические требования, а также требования к конструкции и к производству приборов;
- б) методы проведения испытаний на надежность;
- в) требования к конструкторской и технологической документации, используемой в производстве приборов;
- г) требования к применяемым материалам;
- д) методы контроля технологических процессов и меры, применяемые в случае увеличения производственного брака;
- е) правила приемки и контроля качества полупроводниковых приборов;
- ж) требования к испытательному оборудованию;
- з) требования к маркировке и упаковке;
- и) гарантии завода-изготовителя приборов.

Частные технические условия (ЧТУ) устанавливают:

- а) основное назначение прибора;
- б) нормы на значения параметров при нормальной и предельных температурах окружающей среды;
- в) режимы различных видов испытаний;
- г) нормы на параметры-критерии годности;

д) предельно допустимые значения электрических режимов и их зависимость от температуры.

В ЧТУ содержатся указания и рекомендации по применению и эксплуатации приборов, а также справочные данные в виде типовых зависимостей важнейших параметров от рабочего режима и температуры.

Совокупность и последовательность испытаний, которым подвергают приборы, выпускаемые заводами-изготовителями, осуществляя по трем категориям:

- 1) **приемо-сдаточные испытания;**
- 2) **периодические испытания;**
- 3) **испытания на гарантийную наработку (надежность).**

Приемо-сдаточные испытания включают два параллельных этапа: проверку габаритных размеров и внешнего вида (состояние защитных покрытий, расположение выводов относительно корпуса прибора, качество маркировки и др.) и проверку основных электрических параметров приборов.

Приемо-сдаточные испытания проводит Отдел технического контроля завода-изготовителя не менее чем через трое суток после получения готовых приборов.

На приемку предъявляют партии, скомплектованные из приборов одного типа и изготовленные в течение последних трех месяцев в количестве до 22 000 шт.

Приемо-сдаточные испытания осуществляют путем двукратной выборки или методом сплошного контроля, если партия не превышает 300 приборов.

Для проведения испытаний из большой партии приборов N составляют выборку с количеством приборов, равным N_1 шт., и подвергают ее испытаниям. При этом устанавливают приемочное число — c_1 шт. и браковочное число — r_1 шт. Если после испытаний окажется, что количество дефектных (отказавших) приборов n_1 меньше или равно приемочному числу c_1 ($n_1 \leq c_1$), то партия считается выдержавшей испытания и принимается заказчиком. Если же количество дефектных приборов n_1 будет больше или равно браковочному числу r_1 ($n_1 \geq r_1$), то партию не принимают и полностью бракуют. Когда количество дефектных приборов n_1 больше приемочного числа c_1 , но меньше браковочного r_1 ($c_1 < n_1 < r_1$), из той же партии приборов N берут вторую выборку приборов, равную N_2 , и подвергают аналогичному испытанию в тех же режимах. При этом устанавливают приемочное число c_2 и браковочное число — r_2 .

Если после проведения повторных испытаний суммарное количество дефектных приборов ($n_1 + n_2$) будет меньше или равно приемочному числу c_2

$$(n_1 + n_2) \leq c_2,$$

то партия считается выдержавшей испытания и принимается.

Если же суммарное количество дефектных приборов будет больше или равно браковочному числу r_2 ,

$$(n_1 + n_2) \geq r_2,$$

то партию считают не выдержавшей испытания и бракуют.

В табл. 12.1 приведены объемы выборок приборов и значения параметров качества. Выборку приборов комплектуют методом случайного отбора из окончательно составленных партий. Приемлемый уровень качества установлен стандартами на каждый тип прибора и не превышает 2,5 %.

Таблица 12.1

Количество приборов в партии, шт.	Выборка	N	Приемочные и браковочные числа приборов, шт., для данного приемлемого уровня качества, %							
			0,65		1,00		1,50		2,50	
			c	r	c	r	c	r	c	r
от 1 до 300			Сплошной (100%-ный) контроль							
от 301	1	35	0	3	0	3	1	3	1	5
до 500	2	70	2	3	2	3	2	3	4	5
от 501	1	50	0	3	1	4	1	6	2	7
до 800	2	100	2	3	3	4	5	6	6	7
от 801	1	75	1	3	1	6	2	8	4	9
до 1300	2	150	2	3	5	6	7	8	8	9
от 1301	1	100	1	6	2	6	3	8	5	12
до 3200	2	200	5	6	5	6	7	8	11	12
от 3201	1	150	2	7	3	8	5	14	7	19
до 8000	2	300	6	7	7	8	13	14	18	19
от 8001	1	200	3	8	4	10	6	17	9	25
до 22 000	2	400	7	8	9	10	16	17	24	25

Партию приборов, не выдержавшую приемо-сдаточные испытания, после браковки возвращают цеху-изготовителю для 100%-ной перепроверки и удаления всех негодных приборов. Годные приборы из забракованной партии могут быть включены в новые партии и вновь представлены на приемо-сдаточные испытания.

Если приборы, выдержавшие приемо-сдаточные испытания, находятся на складе завода-изготовителя более шести месяцев, то каждая партия этих приборов должна быть выборочно перепроверена по нормам и правилам приемо-сдаточных испытаний. В паспорте партии приборов отмечают дату перепроверки.

Периодические испытания состоят из трех параллельных этапов: 1) проверка смачиваемости выводов припоем и испытание механической прочности выводов; 2) последовательное проведение комплекса операций — измерение электрических параметров приборов; проверка отсутствия коротких замыканий и обрывов; испытание на теплоустойчивость, холодоустойчивость, устойчивость к циклическим изменениям температуры, ударную прочность, вибропрочность, устойчивость к постоянным ускорениям, влагоустойчивость и герметичность; 3) испытания на стабильность работы приборов.

Периодические испытания проводят один раз в три месяца, а также в случае изменений конструкции приборов, технологии их изготовления, применяемых материалов и других изменений, которые могут повлиять на качество и параметры приборов.

Для периодических испытаний отбирают 20 приборов любого типа, выпускаемых по одному стандарту в течение периода, за который проводят периодические испытания, и прошедших приемо-сдаточные испытания. При высокой стоимости количество проверяемых приборов может быть меньше. По каждому виду испытаний допускается не более одного прибора, не удовлетворяющего требованиям стандартов.

В случае неудовлетворительных результатов периодических испытаний повторяют на удвоенном количестве приборов те испытания, по которым были получены неудовлетворительные результаты.

Испытания на гарантийную наработку (надежность) представляют собой длительные электрические и тепловые испытания приборов в условиях, близких к эксплуатационным.

Этим испытаниям один раз в год подвергают 100 приборов любого типа, выпускаемых по одному стандарту и прошедших приемо-сдаточные испытания. Мощные и дорогостоящие приборы можно испытывать в меньшем количестве.

Гарантийная наработка приборов в режимах и условиях, установленных на каждый тип прибора, не должна быть менее 10 000 ч, а интенсивность отказов приборов — не более $1 \cdot 10^{-5}$ ч⁻¹. (Более подробно об этом виде испытаний см. § 12.4.)

Параметры-критерии годности-различных классов приборов при испытаниях

Маломощные транзисторы	$\beta, I_{к60}, I_{э60}$
Низкошумящие транзисторы	$\beta, I_{к60}, F_{ш}$
Мощные транзисторы	$B, I_{к60}$
Выпрямительные и импульсные диоды	$U_{пр}, I_{обр}$
Стабилитроны	$U_{стаб}, R_{дин}$
Туннельные диоды	$I_1, I_1/I_2$
Тиристоры	$U_{пуск}, I_{ут}$

§ 12.2 Измерение электрических параметров

Параметры диода

Вольт-амперная характеристика. Для измерения прямого падения напряжения на диоде D используют схему, изображенную на рис. 12.1. Генератор тока $ГТ$ обеспечивает постоянство прямого тока диода при различных значениях падения напряжения на диоде. Постоянное напряжение на диоде измеряется вольтметром или другим измерителем напряжения $ИН$. Блок защиты $БЗ$ предотвращает перегрузку вольтметра $ИН$ при отключении измеряемого диода. Постоянный прямой ток измеряется миллиамперметром $ИТ$ (измерителем тока).

В качестве генератора тока $ГТ$ можно использовать батареи или стабилизатор напряжения с последовательно включенными дополнительными сопротивлениями.

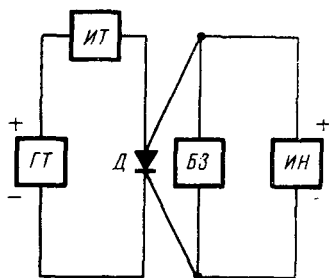


Рис. 12.1. Схема для измерения прямого падения напряжения на диоде

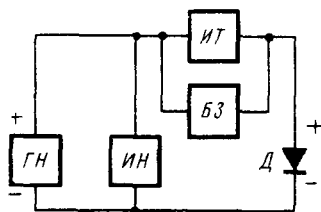


Рис. 12.2. Схема измерения обратного тока диода

Для измерения обратного тока диода применяют схему, показанную на рис. 12.2. От генератора постоянного напряжения $ГН$ на испытуемый диод подается обратное напряжение, величина которого контролируется вольтметром $ИН$. Обратный ток диода измеряется микроамперметром $ИТ$. Выходное сопротивление генератора постоянного напряжения $ГН$ должно быть достаточно малым. Вольтметр $ИН$ включают до микроамперметра $ИТ$, и его блока защиты $БЗ$.

При измерении обратного тока особое внимание следует уделять выбору материала изолятора, на котором монтируется испытуемый диод D . Если изоляционные свойства материала недостаточны, то ток утечки через него может оказаться соизмеримым с обратным током диода, особенно при больших обратных напряжениях. В качестве изолятора рекомендуется использовать фторопласт.

На рис. 12.3 приведена схема для измерения постоянного обратного напряжения на диоде при заданной величине обратного тока. Испытуемый диод D через микроамперметр $ИТ$ подключают к генератору постоянного тока $ГТ$. Падение напряжения на диоде измеряется высокоомным вольтметром $ИН$.

Частотные свойства диода определяют, включая его в схему однополупериодного выпрямителя с активно-емкостной нагрузкой (рис. 12.4). На вход схемы от генератора стандартных сигналов ГСС подается синусоидальное напряжение, которое контролируется амплитудным вольтметром ИВ. Сопротивление R_2 служит для согласования генератора ГСС с нагрузкой.

Частоту, при которой выпрямленный ток уменьшается на 30 % относительно своего первоначального значения, измеренного на низкой частоте, называют предельной частотой диода.

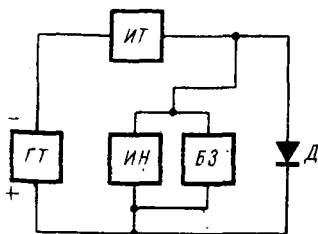


Рис. 12.3. Схема для измерения постоянного обратного напряжения на диоде

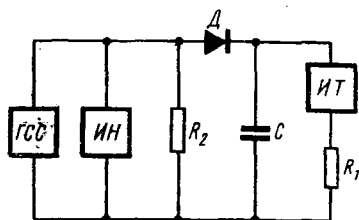


Рис. 12.4. Схема для измерения частотных свойств диода

При измерениях диодов на частотах выше 100 кГц необходимо принимать меры для уменьшения погрешности, вносимой паразитными индуктивностями схемы.

Величины емкости C и сопротивлений R_2 и R_1 выбирают в зависимости от применяемых генераторов стандартных сигналов.

Вольт-фарадная характеристика варикапа

Емкость p - n -перехода зависит от приложенного к нему внешнего напряжения. Вольт-фарадная характеристика нелинейна, поэтому точность измерения емкости определяется точностью задания рабочей точки, в которой измеряется емкость, и точностью измерения переменного напряжения, с помощью которого производят это измерение.

При измерении емкости варикапов и параметрических диодов наибольшее распространение получил метод емкостно-омического делителя (рис. 12.5). Если частота измерения f выбрана таким образом, что ток в цепи определяется реактивным сопротивлением емкости $1/2\pi f C_d$, то напряжение на сопротивлении нагрузки будет пропорционально величине емкости C_d .

Установив вместо измеряемого варикапа эталонный конденсатор C_s , можно отградуировать вольтметр, измеряющий напряжение на сопротивлении нагрузки R_n в единицах емкости. Емкость варикапа при этом методе измерения определяют из выражения

$$C_d = C_{\varepsilon} \frac{U_d}{U_{\varepsilon}},$$

где C_{ε} — емкость эталонного конденсатора;

U_{ε} — напряжение на сопротивлении R_n при включении эталонного конденсатора;

U_d — напряжение на сопротивлении R_n при включении варикапа.

Параметры стабилитрона

Измерение напряжения стабилизации стабилитрона производят по схеме, изображенной на рис. 12.6.

Напряжение стабилизации соответствует области пробоя p - n -перехода стабилитрона. От регулируемого генератора постоянного тока $ГТ$ через измеряемый стабилитрон $Д$ пропускают ток, соот-

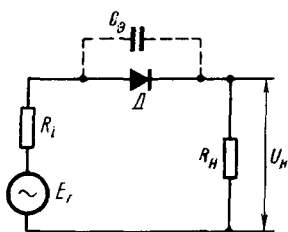


Рис. 12.5. Схема для измерения емкости варикапов

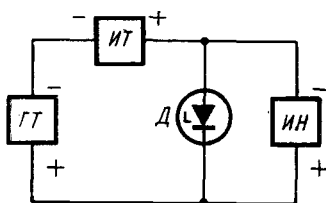


Рис. 12.6. Схема для измерения напряжения стабилизации стабилитрона

ветствующий напряжению пробоя (обычно равный 10 ma). Напряжение пробоя фиксируется вольтметром $ИН$. Выходное сопротивление генератора тока должно удовлетворять условию

$$R_{\text{вых}} \approx \frac{10U_{\text{ст}}}{I_{\text{ст}}}.$$

Для уменьшения ошибки измерения необходимо брать амперметр $ИТ$ с малым внутренним сопротивлением.

При измерении динамического сопротивления стабилитрона через него пропускают постоянный ток, равный номинальному току стабилизации, и малый переменный сигнал (рис. 12.7). Испытуемый стабилитрон через амперметр $ИТ$ подключают к генератору постоянного тока $ГТ_1$ и через конденсатор $С$ — к генератору переменного тока $ГТ_2$. В качестве генератора переменного тока можно использовать звуковой генератор. Переменная составляющая тока через стабилитрон должна быть равна 0,02 от постоянного тока смещения. Переменное напряжение на стабилитроне

и калибровочном сопротивлении R_k измеряют вольтметром $ИН$. Шкалу вольтметра градуируют в единицах сопротивления.

Параметры тиристоров

Если тиристор применяют с шунтирующим сопротивлением между управляющим электродом и катодом, то все параметры следует измерять при включенном шунте.

Для измерения остаточного напряжения и тока выключения используют схему, показанную на рис. 12.8. Тиристор включают с помощью тока управляющего электрода путем нажатия кнопки K . Затем с помощью переменного сопротивления R устанавливают средний ток и определяют падение напряжения на тиристоре — остаточное напряжение. После этого анодный ток уменьшают до такого предельного значения, меньше которого происходит выключение тиристора. Это значение принимают за ток выключения.

Для измерения тока включения и напряжения выключения управляющего электрода применяют схему, приведенную на рис. 12.9. На анод тиристора T через сопротивление R_H подается

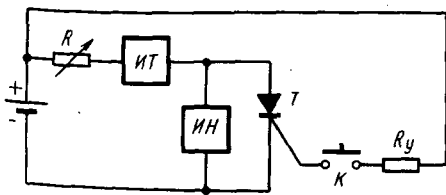


Рис. 12.8. Схема для измерения остаточного напряжения и тока выключения тиристора

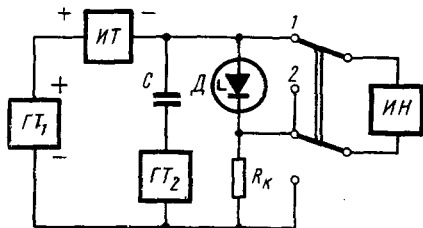


Рис. 12.7. Схема для измерения динамического сопротивления стабилизатора

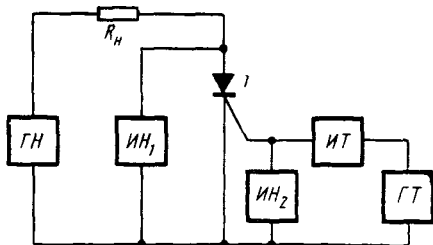


Рис. 12.9. Схема для измерения тока включения и напряжения выключения тиристора

постоянное напряжение. С помощью регулируемого источника тока $ИТ$ плавно увеличивают ток в цепи управляющего электрода до тех пор, пока напряжение на аноде тиристора резко не упадет.

При этом измеряют ток и напряжение на управляющем электроде, которые принимают соответственно за ток включения и напряжение выключения управляющего электрода.

Измерение времени выключения тиристора производят по схеме рис. 12.10. На управляющий электрод тиристора подается

положительный импульс тока с амплитудой, не меньшей тока включения управляющего электрода, и длительностью, равной времени включения. При этом анодный ток тиристора $I = E/R_H$.

Через время, значительно большее времени включения, на анод тиристора подается отрицательный импульс с длительностью не меньше времени выключения.

Время включения тиристора измеряют по схеме рис. 12.11. Конденсатор C заряжается через сопротивления R , R_H и индуктивность L до напряжения E . Постоянная времени заряда $\tau_3 = C(R + R_H)$. После подачи положительного импульса на управ-

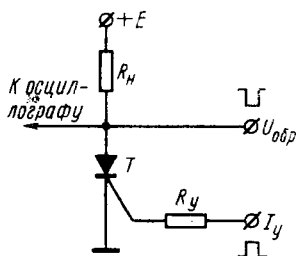


Рис. 12.10. Схема для измерения времени выключения тиристора

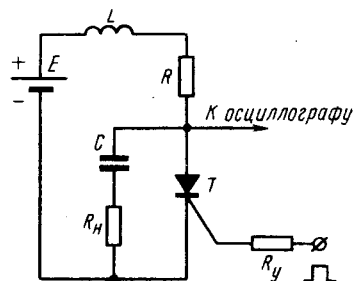


Рис. 12.11. Схема для измерения времени включения тиристора

ляющий электрод тиристор включается и конденсатор C разряжается через сопротивление R_H и тиристор с постоянной времени разряда $\tau_p = CR_H$.

Параметры транзисторов

Вольт-амперные характеристики транзисторов снимают по точкам на постоянном токе. Для этого необходимо иметь два регулируемых источника питания, два вольтметра и два миллиамперметра. Схема для снятия входных и выходных вольт-амперных характеристик транзистора показана на рис. 12.12.

При снятии выходных вольт-амперных характеристик измеряют ток базы, ток коллектора и напряжение коллектор — эмиттер. В цепь эмиттера включают генератор тока. Во избежание электрического пробоя транзистора в измерительную цепь коллектора включают ограничивающее сопротивление $R_{огр}$.

При снятии входных вольт-амперных характеристик необходимо контролировать мощность рассеяния на коллекторном $p-n$ -переходе.

К недостаткам этого метода следует отнести разогрев транзистора постоянным током. Для уменьшения разогрева рекомендуется снимать вольт-амперные характеристики на переменном токе.

Обычно вольт-амперные характеристики снимают осциллографическим методом: в качестве независимого переменного сигнала берется сигнал от источника с изменяющейся по времени амплитудой. Осциллографический метод дает возможность наблюдать на экране осциллографа семейство характеристик в нужном диапазоне изменения тока и напряжения. Температура $p-n$ -перехода при таком методе измерения соответствует средней мощности рассеяния.

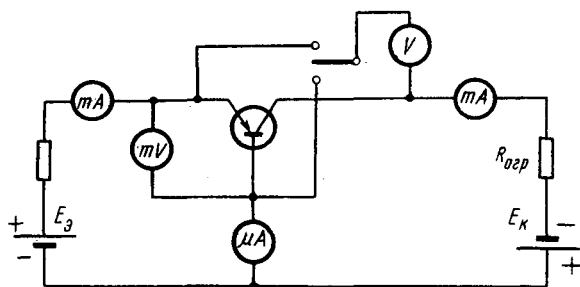


Рис. 12.12. Схема для снятия входных и выходных вольт-амперных характеристик транзисторов

Измерение h -параметров транзисторов производят на одной из частот в диапазоне 50—1000 гц .

Измерение входного сопротивления транзистора (h_{11}) осуществляют следующим образом. Транзистор включают в измерительную схему рис. 12.13 и задают режим по постоянному току

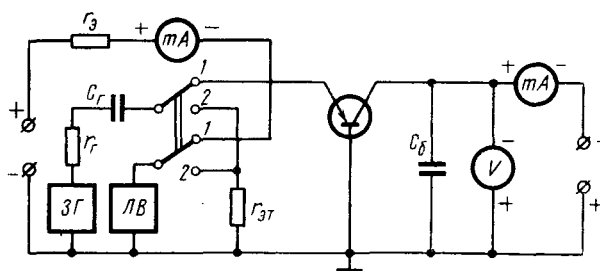


Рис. 12.13. Схема для измерения входного сопротивления транзистора

($I_з$, $I_к$), регулируя ток эмиттера и напряжение коллектора. Переключатель Π устанавливают в положение 2 и с помощью вольтметра измеряют падение напряжения $U_{э\tau}$ на сопротивлении $r_{э\tau}$. После этого переключатель Π переводят в положение 1 и измеряют напряжение на входе транзистора $U_{зб}$.

Расчет входного сопротивления транзистора (h_{11}) производят по формуле

$$h_{11} = \frac{U_{эб} r_{эт}}{U_{эт}}.$$

Для измерения параметра h_{12} транзистор включают в измерительную схему рис. 12.14 и задают режим по постоянному току

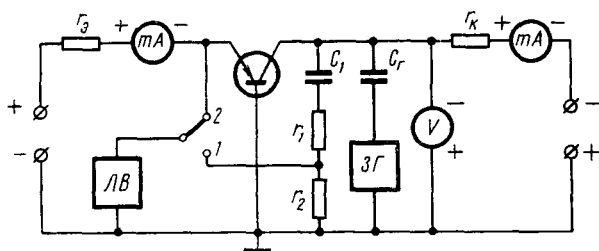


Рис. 12.14. Схема для измерения коэффициента обратной связи по напряжению транзистора

($I_э$, $U_к$). Переключатель Π устанавливают в положение 1. От звукового генератора $ЗГ$ через конденсатор $C_г$ в цепь коллектора подается сигнал переменного напряжения $U_{кб}$. Это напряжение

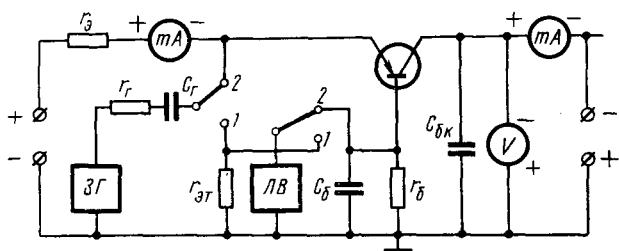


Рис. 12.15. Схема для измерения коэффициента прямой передачи тока транзистора

контролируется вольтметром V . Затем переключатель Π переводят в положение 2 и измеряют падение напряжения на эмиттере $U_{эб}$. Коэффициент обратной связи по напряжению вычисляют по формуле

$$h_{12} = \frac{U_{эб} r_2}{U_2 (r_1 + r_2)}.$$

При измерении параметра h_{21} транзистор включают в измерительную схему рис. 12.15 в режиме по постоянному току ($I_э$, $I_к$).

Если в цепь базы транзистора подать переменный ток i_1 , то ток на выходе транзистора

$$i_2 = \frac{\alpha}{1 - \alpha} i_1 = \beta i_1.$$

Сопротивления R_3 и R_4 представляют собой делитель напряжения, предназначенный для получения опорного напряжения при проверке уровня входного сигнала. Сопротивление R_1 служит ограничителем входного тока. Благодаря сопротивлению R_1 транзистор находится в необходимом статическом режиме. Сопротивление R_2

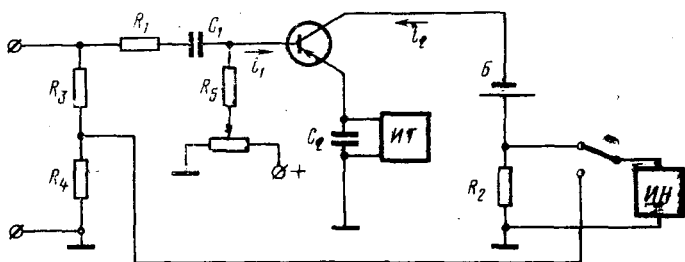


Рис. 12.17. Схема для измерения коэффициента передачи тока базы транзистора

подбирают таким, чтобы значение выходного напряжения было достаточным для измерения. Конденсатор C_1 служит для отделения постоянной составляющей тока.

Данный метод позволяет проводить измерения коэффициента передачи тока при сравнительно низкой частоте, обычно до 1 кГц.

Для измерения граничной частоты f_a транзистора определяют коэффициент передачи тока транзистора α в зависимости от частоты.

Граничной считают такую частоту, при которой коэффициент передачи тока равен 0,7 своей величины при измерении на низкой частоте, т. е. уменьшается в $\sqrt{2}$ раза или на 3 дБ. Наиболее простой метод измерения f_a основан на подаче

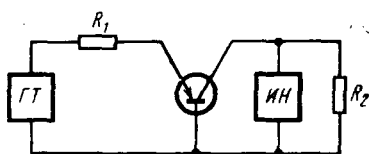


Рис. 12.18. Схема для измерения граничной частоты транзистора

в цепь эмиттера питания от высокочастотного генератора тока.

На рис. 12.18 показана схема для измерения граничной частоты транзистора. В этой схеме сопротивление R_1 должно быть немного больше, чем входное сопротивление транзистора и больше сопротивления генератора. Сопротивление R_2 должно быть намного меньше выходного сопротивления транзистора, чтобы выходную цепь можно было рассматривать как короткозамкнутую.

При соблюдении этих условий справедливо соотношение

$$U = I_K R_2 = \alpha I_0 R_2 = \alpha \frac{R_2}{R_1} E.$$

Таким образом, при постоянных R_1 , R_2 и E отсчетный прибор может быть проградуирован непосредственно в значениях α .

§ 12.3. Виды испытаний

Испытания на отсутствие коротких замыканий и обрывов

Короткие замыкания между изолированными электродами прибора в зависимости от сопротивления шунтирующей перемычки приводят к частичной или полной потере его работоспособности. К обрывам, кроме потери электрического контакта, условно относят и увеличение переходного сопротивления в цепях электродов прибора. Временные короткие замыкания характеризуются величиной шунтирующего сопротивления и длительностью шунтирования, а временные обрывы — величиной переходного сопротивления и длительностью разрыва.

Испытания на отсутствие обрывов производят по одной из следующих методик:

1) приборы подвергают 40 ударам (по 20 ударов в каждом из двух положений) с частотой не менее 15 ударов в 1 мин и с ускорением $75 \pm 20 g$ под электрической нагрузкой. С помощью индикатора контролируется отсутствие обрывов;

2) приборы подвергают 400 ударам (по 200 ударов в каждом из двух положений) с частотой не менее 15 ударов в 1 мин и с ускорением $75 \pm 20 g$; после этого приборы включают в электрическую схему и подвергают 20 ударам (по 10 ударов в каждом из двух положений) с тем же ускорением при одновременном контроле отсутствия обрывов с помощью индикатора.

Испытания на отсутствие коротких замыканий осуществляют после испытаний на отсутствие обрывов.

Испытания на отсутствие коротких замыканий производят, подвергая приборы вибрации с частотой $50 \pm 10 g$ и ускорением $10 \pm 3 g$ в течение 20 мин (по 10 мин в каждом из двух положений) под электрической нагрузкой. Одновременно с помощью индикатора контролируется отсутствие коротких замыканий.

Испытания на отсутствие коротких замыканий проводят при воздействии на прибор ударной нагрузки, на отсутствие обрывов — при воздействии вибрационной нагрузки.

При испытаниях приборы закрепляют в кассете и устанавливают на платформе стенда установки ЖК 7602 с контрольно-измерительным блоком. Ось симметрии приборов должна совпадать

с направлением механического воздействия. На все испытываемые приборы для фиксации коротких замыканий и обрывов подается соответствующий электрический режим. Виброударная установка обеспечивает ударное ускорение $150g$ длительностью $0,5—2$ мсек и частотой 20 ударов в 1 мин, а также обеспечивает вибрационное ускорение $15g$ на частоте 50 гц. Продолжительность испытаний — 3—5 мин.

Испытания на стабильность работы

Испытания на стабильность работы проводят в течение 100 ч под электрической нагрузкой для каждого типа прибора. Электрические параметры приборов контролируют до и после испытаний. Приборы считаются выдержавшими испытания, если их электрические параметры соответствуют нормам, указанным в стандартах.

Испытания на стабильность электрических параметров во времени

Приборы при максимально допустимом электрическом режиме выдерживают в течение нескольких десятков секунд или нескольких минут. При этом наблюдают за дрейфом (изменением во времени) основных электрических параметров с помощью установок, предназначенных для измерения электрических параметров приборов. Если дрейф какого-либо параметра лежит в допустимых пределах для данного типа приборов, то приборы считают выдержавшими испытания; если же наблюдается значительный дрейф электрических параметров, приборы бракуют.

Испытание на прочность выводов и их крепления

Гибкие выводы проверяют путем многократных перегибов и натяжения. Каждый вывод прибора подвергают пятикратному перегибу на угол 90° от исходного положения с радиусом закругления $1,5—2$ мм. Изгиб вывода производят на расстоянии 3 мм от корпуса прибора. При испытании на прочность крепления к выводу прикладывают статическую нагрузку в пределах $0,2—2$ кг в зависимости от конструкции прибора в течение 2 мин.

Испытания на теплоустойчивость

Приборы помещают в камеру тепла с равномерным распределением температуры (в пределах $\pm 1^\circ\text{C}$); их крепят на плате, к которой подводятся электрические контакты. Время воздействия температуры устанавливают таким, чтобы приборы успели прогреться

по всему объему — от 30 мин до 2 ч. Испытания на теплоустойчивость существуют двух видов.

При первом виде испытаний приборы в течение определенного времени выдерживают в камере тепла при максимально допустимой температуре окружающей среды и контролируют основные электрические параметры до и после испытаний. После извлечения из камеры тепла приборы выдерживают не менее 2 ч в нормальных условиях. Сопоставляя результаты до и после испытаний, судят о теплоустойчивости приборов.

Второй вид испытаний заключается в периодическом контроле основных параметров приборов во время нахождения их в камере тепла. Заключение о теплоустойчивости приборов в этом случае может быть дано в процессе испытаний.

Испытания на теплоустойчивость различных типов диодов и транзисторов проводят в камере тепла, предназначенной для испытаний в диапазоне температур 25—155°C.

Испытания на холодоустойчивость

Испытания на холодоустойчивость осуществляют в криостатах, пониженную температуру в которых создают с помощью сухого льда или жидкого азота. Температуру в период испытаний обычно выбирают равной —60°C. Время нахождения приборов в камере 30 мин — 2 ч в зависимости от типа прибора. Цикл испытаний на холодоустойчивость подобен циклу на теплоустойчивость.

Для испытаний на холодоустойчивость применяют азотно-холодильные камеры, с помощью которых проверяют полупроводниковые приборы в диапазоне температур +25 ÷ —150°C. Точность поддержания температуры и неравномерность по объему камеры не превышают ±1,5°C. Полезный объем камеры равен ~ 25 л. Расход жидкого азота в режиме —60°C составляет в смену около 10 кг. Время установления режима —60°C не превышает 20 мин.

Испытания на устойчивость к термоциклам

Испытания на устойчивость к термоциклам проводят с целью проверки качества (прочности и надежности) внутренних и внешних соединений приборов: пайки кристалла к кристаллодержателю, присоединения выводов к эмиттеру и базе транзистора, соединения металла со стеклом и керамикой. При плохом качестве соединений циклическое изменение температуры приводит к их разрушению.

Вначале приборы выдерживают в течение 30 мин в камере тепла при максимально допустимой температуре для каждого типа прибора. После этого приборы переносят в камеру холода с температурой —60°C. Время переноса приборов из камеры тепла в камеру холода не превышает 1 мин. В камере холода приборы выдерживают в течение 30 мин. Этот цикл испытаний повторяют трижды.

Для оценки устойчивости приборов к термоциклам параметры измеряют до и после испытаний или в процессе испытаний в камерах тепла или холода. Испытания на устойчивость к термоциклам проводят не только на готовых приборах, но и на отдельных их элементах, что позволяет выбирать правильные технологические режимы.

Испытания на вибропрочность

Испытания на вибропрочность дают возможность выяснить, способны ли приборы противостоять разрушающему действию вибрации, а также проверить прочность отдельных узлов и элементов приборов.

Различают два вида испытаний на вибропрочность. Первый предусматривает испытание приборов при фиксированной частоте, а второй — при плавном изменении частоты вибрационных колебаний стенда. Режимы испытаний приборов по двум видам должны соответствовать техническим условиям. Длительность испытаний равна 96 ч. Перед испытаниями приборы подвергают электрическим измерениям. Затем их жестко крепят к платформе вибростенда, который включают в соответствующий режим работы, необходимый для данного типа прибора. Испытания проводят в диапазоне частот 10—600 гц при плавном изменении частоты в следующих поддиапазонах: 10—20, 20—30, 30—50, 50—70, 70—100, 100—150, 150—200, 200—300, 300—400 и 400—600 гц.

Амплитуда колебаний в поддиапазонах 10—20 и 20—30 гц не менее 1,5 мм. Ускорение вибрации остальных частот $10 \pm 1,0 g$. Время прохождения поддиапазона 1 мин. На высшей частоте каждого поддиапазона прибор выдерживают 2 мин; один раз в год на высшей частоте приборы выдерживают 1 ч.

После испытаний вторично измеряют электрические параметры приборов.

В процессе испытаний приборы находятся в электрическом режиме, позволяющем обнаруживать дефектные образцы приборов.

Испытания на ударопрочность

Различают два вида испытаний на ударопрочность: 1) воздействие многократных ударов с ускорением $75 \pm 20 g$; 2) воздействие одиночных ударов большой интенсивности с ускорением 500 g и более.

В первом случае частота 20—80 ударов в 1 мин, а общее их число составляет 750.

Во втором случае приборы испытывают в двух положениях — вдоль и поперек оси прибора. Число ударов в каждом из положений равно 5; длительность удара — 5—15 мксек.

При испытаниях на ударопрочность электрические параметры приборов контролируют до испытаний и после них.

Испытания на устойчивость к постоянному ускорению

По сравнению с вибрацией и ударами воздействия постоянного ускорения на полупроводниковые приборы обычно менее опасны. Это объясняется тем, что при вибрации и ударе сила, приложенная к прибору, является знакопеременной по направлению и, следовательно, более опасной для конструкции прибора.

Испытания на устойчивость к постоянному ускорению проводят на центрифуге, которая позволяет получать линейные ускорения 250 g. Время испытаний обычно не превышает 30 мин.

Испытания на влагостойкость

При испытаниях на влагостойкость определяют герметичность и коррозионную стойкость конструкции корпуса прибора.

Существуют два вида испытаний: длительные, которые предусматривают испытания приборов во влажной атмосфере в течение 30 (и более) суток, и кратковременные — в течение четырех суток.

Кратковременные испытания на влагостойкость осуществляют в конце периодических испытаний, а также в процессе производства приборов при температуре 40°C и относительной влажности 98%.

Длительные испытания на влагостойкость, проводимые один раз в год, считают конструктивными. Приборы испытывают при температуре 40°C и относительной влажности 98%.

Оба вида испытаний на влагостойкость проводят в камере тепла и влаги, диапазон температур которой равен 20—100°C.

Электрические параметры приборов измеряют до и после испытаний.

Испытания на устойчивость к пониженному давлению

Эти испытания позволяют установить работоспособность приборов в условиях пониженного атмосферного давления, когда ухудшается теплоотдача и возможны перегревы приборов.

Испытания приборов проводят в барокамерах, в которых создается давление 5 мм рт. ст. Приборы выдерживают в течение 15 мин. На приборы подается половина номинального режима мощности; после выдержки и снятия режима измеряют электрические параметры.

Испытания на устойчивость к повышенному давлению

Эти испытания проводят в камере повышенным давлением при нормальной температуре. Электрическая нагрузка на приборы не подается. Давление в камере устанавливают равным 3 ат. Время

испытаний в зависимости от типа приборов от 15 мин до 2 ч. Электрические параметры измеряют до и после испытания.

Испытания на устойчивость к морскому туману.

Благодаря этим испытаниям определяют антикоррозионную стойкость приборов, предназначенных для применения в тропических условиях.

Испытуемые приборы помещают в камеру, температура в которой $27 \pm 2^\circ\text{C}$. В камеру впрыскивают путем пульверизации или центрифугирования в течение 15 мин каждого часа испытаний раствор солей, имитирующий среду с морским туманом. Раствор солей приготавливают на основе дистиллированной воды из следующих составных частей: хлористый натрий — 27 г/л, хлористый магний — 6 г/л, хлористый кальций (безводный) — 1 г/л, хлористый калий — 1 г/л.

Туман в камере должен обладать дисперсностью 1—5 мкм (90% капель) и водностью 2—3 г/м³. После каждого цикла работы распылителя включают подогрев, температура в камере за 5—10 мин повышается на 3—5°C, затем подогрев выключают.

После испытаний приборы контролируют по внешнему виду и электрическим параметрам. Внешний осмотр позволяет выявить коррозию на поверхности приборов.

Испытания на грибоустойчивость

Испытания на грибоустойчивость проводят с целью определения способности приборов, материалов и покрытий противостоять развитию грибковой плесени в среде, зараженной плесневыми грибами.

Приборы помещают в камеру и после установления в ней температуры 60°C выдерживают в течение 4 ч, затем извлекают из камеры и, выдержав их в течение 1—6 ч, подвергают осмотру и измерениям. Потом приборы устанавливают в камеру с контрольными сосудами с питательной средой. Приборы и контрольные сосуды опрыскивают из пульверизатора водной суспензией спор грибов из расчета 50 мл суспензии грибов на 1 см³ полезного объема камеры. Приборы выдерживают в камере в течение 48 ч.

По окончании испытаний и контроля внешнего вида приборы подвергают дезинфекции или уничтожению.

Испытания на герметичность.

Контроль герметичности производят в процессе изготовления полупроводниковых приборов различными методами.

Масс-спектрометрический метод основан на индикации атомов гелия, просачивающихся через микроотверстия в корпусе прибо-

ра. Этот метод применяют также для контроля отдельных узлов конструкции корпуса с использованием специальных приспособлений и устройств.

Герметичность проверяют масс-спектрометрическим методом на автомате с применением теческатель. Для этого в прибор при заварке или опрессовке вводят гелий. Давление газа в камере, где производят герметизацию приборов, поддерживается равным 3 ат. Загерметизированные в атмосфере гелия приборы подвергают контролю на гелиевом теческатель. Длительность измерения загерметизированной партии приборов не должна превышать 1 ч. Негерметичность приборов определяют по отклонению стрелки теческатель.

Радиоактивный метод основан на индикации гамма-излучения радиоактивного газа, проникающего через щели внутрь корпуса прибора. Неокрашенные, промытые в ацетоне приборы помещают в камеру с радиоактивным газом — ксеноном-133. Удельная радиоактивность газа в камере не должна превышать 0,1 мкюри/см³. Приборы выдерживают в этих условиях в течение нескольких часов.

Измерения радиоактивности приборов проводят на классификаторе, который предварительно настраивают на определенную степень негерметичности.

Вакуумно-жидкостный метод. Для проверки герметичности этим методом приборы помещают в камеру (сосуд), наполненную уайт-спиритом, трансформаторным или вакуумным маслом, т. е. вакуумированной жидкостью, нагретой до температуры 70—120°C, и выдерживают в ней при давлении 0,1 мм рт. ст. в течение нескольких минут. Негерметичность устанавливают по наличию пузырьков воздуха, выходящих через отверстия из корпуса прибора в жидкость, над которой создается разрежение.

Бомбовый метод основан на опрессовке готовых приборов в жидкой среде, которая может проникнуть внутрь негерметичного баллона корпуса.

Для проверки на герметичность этим методом используют установку, состоящую из двух камер: в одну камеру загружают испытуемые приборы, создавая в ней разрежение порядка 10 мм рт. ст., другую заполняют водой. После выдержки приборов при пониженном давлении в течение 2 ч их заполняют водой под давлением 2,5 ат и выдерживают в течение 2 ч; затем, выдержав приборы в течение 2 ч в нормальных условиях, измеряют электрические параметры. Негерметичность определяют по изменению электрических параметров полупроводникового прибора.

Ацетоновый метод. Для проверки герметичности готовые приборы помещают в сосуд с ацетоном таким образом, чтобы ацетон покрывал все испытуемые приборы, и выдерживают в этих условиях в течение 2 ч. После выдержки в ацетоне приборы сушат в течение 15—20 мин и затем измеряют электрические параметры. Негерметичность определяют по ухудшению электрических параметров приборов.

§ 12.4. Надежность приборов

Испытания на гарантийную наработку

Полупроводниковые приборы, как уже отмечалось, подвергают испытаниям на гарантийную наработку в течение 10, 20 тыс. ч в электрическом и тепловом режимах. На основе этих испытаний производят оценку и расчет надежности приборов.

Под надежностью понимают способность приборов выполнять заданные функции и сохранять свои параметры в установленных пределах при работе в определенных условиях в течение заданного времени t .

Для проведения испытаний на надежность из большой партии готовых приборов выбирают методом случайного отбора определенное количество приборов (N).

Если задаться допустимым числом отказавших приборов $C=0 \div 10$ и достоверностью оценки $P^*=0,9$, то для различных значений вероятности безотказной работы ($P=0,8 \div 0,99$) по табл. 12.2 можно определить минимальное количество приборов, которое необходимо поставить на испытания — размер выборки.

Таблица 12.2
Размер выборки N в зависимости от P и C ($P^*=0,9$)

C	Размер выборки N при минимальном (контролируемом) уровне P											
	0,8	0,85	0,9	0,91	0,92	0,93	0,94	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99
0	10	14	22	24	28	32	37	45	56	76	114	229
1	18	24	37	42	47	54	63	76	96	128	193	387
2	25	34	52	57	67	74	87	105	131	176	264	530
3	32	43	65	72	82	94	109	132	165	221	332	666
4	38	51	78	87	98	112	131	158	198	265	398	798
5	44	60	91	101	114	130	153	183	230	307	462	962
6	50	68	103	115	129	148	173	209	264	349	525	1052
7	57	76	115	128	145	166	194	233	292	390	587	1176
8	62	84	128	142	160	183	214	258	322	431	648	1298
9	68	92	139	155	175	200	234	281	352	471	707	1417
10	71	100	151	168	190	217	274	309	382	511	767	1537

Если число отказавших приборов n будет меньше выбранной величины C , то партия, из которой были взяты на испытания приборы, считается годной и принимается. Если $n > C$, то партия бракуется.

Для серийно выпускаемых приборов желательно сокращать время испытаний за счет увеличения размера выборки, а для до-

рогостоящих приборов необходимо уменьшать размер выборки за счет увеличения продолжительности испытаний.

При неудовлетворительных результатах испытаний первой выборки N_1 осуществляют вторую (дополнительную выборку) N_2 (вдвое больше первой). Окончательную оценку испытаний производят только по результатам испытаний второй выборки. При этом несмотря на то, что количество приборов выборки в два раза больше ($N_2=2N_1$), величину C_2 выбирают равной первоначальной величине C_1 .

Обычно испытания проводят при нормальной и верхней предельной температурах окружающей среды и соответствующих им максимально допустимых значениях мощности рассеяния и напряжения.

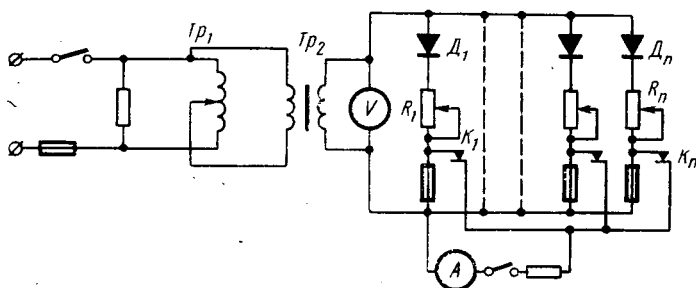


Рис. 12.19. Схема стенда для испытания диодов на надежность

Результаты испытаний на надежность оценивают по нормам на параметры-критерии годности.

Для проведения испытаний на надежность (длительную наработку) используют электрические стенды. Некоторые из этих стендов могут обеспечивать наряду с электрическими и тепловые режимы. Полупроводниковые приборы крепят на специальных клеммах. Коммутационные устройства дают возможность регулировать режим испытаний, контролировать параметры испытуемых приборов и предохранять эти приборы от возможных перегрузок.

На рис. 12.19 приведена рабочая схема стенда для испытания диодов на надежность. В этой схеме сопротивления $R_1, \dots, R_n$ служат для установления режима работы диодов.

На рис. 12.20 показана схема стенда для испытания транзисторов на надежность. В этой схеме сопротивления R_1 и R_2 являются измерительными. По падению напряжения на них судят о значениях токов эмиттера и коллектора. Сопротивление R_3 обеспечивает точный режим испытаний каждого транзистора. Сопротивление R_4 обеспечивает режим генератора тока в цепи эмиттера. Сопротивление R_5 ограничивает величину коллекторного тока. Клеммы a и b служат для подсоединения измерительных приборов.

После испытаний производят обработку результатов для получения числовых значений показателей надежности приборов. В период испытаний регистрируют электрические параметры приборов и фиксируют моменты их отказов. Кроме того, подсчитывают общее количество отказавших приборов за определенный промежуток времени.

Надежность оценивают по двум основным показателям: интенсивности отказов $\lambda(t)$ и вероятности безотказной работы $P(t)$.

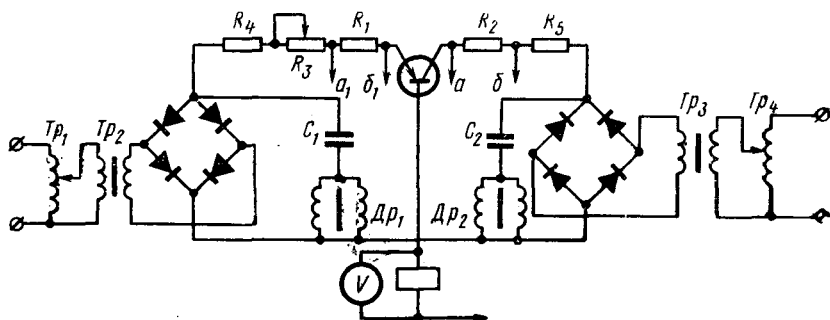


Рис. 12.20. Схема стенда для испытания транзисторов на надежность

Интенсивность отказов полупроводниковых приборов в интервале времени от t до $t + \Delta t$ можно вычислить по формуле

$$\lambda(t) = \frac{\Delta n}{(N - n) \Delta t},$$

где N — количество приборов, поставленных на испытания, шт.;
 n — число приборов, отказавших к началу рассматриваемого периода, шт.;

Δn — число отказавших приборов в интервале времени, шт.;
 Δt — период испытаний, ч.

Вероятность безотказной работы определяют по формуле

$$P(t) = \frac{N - \Delta n}{N}.$$

Среднюю величину интенсивности отказов за время $t = t_0$ для случая $n/N < 0,1$ рассчитывают по упрощенной формуле:

$$\lambda \approx \frac{n}{\left(N - \frac{n}{2}\right) t_0}.$$

Для случая $0,2 < n/N < 0,8$ среднюю величину интенсивности отказов за время t_0 можно получить из выражения

$$\lambda \approx \frac{1}{t_0} \ln \frac{N}{N - n}.$$

Далее строят графики интегрального распределения параметров испытанных приборов. По оси ординат откладывают, например, значения статического коэффициента усиления транзистора, а по оси абсцисс — долю приборов (в %), имеющих значение параметра не выше, чем заданное.

По полученным точкам, координаты которых находят указанным способом, строят кривую интегрального распределения. При соответствующем выборе масштаба график интегрального распределения можно представить в виде прямой линии, как на рис. 12.21.

Аналогичным образом строят графики интегрального распределения по другим параметрам приборов.

Результаты испытаний часто анализируют путем построения графиков корреляционных полей точек (рис. 12.22). Корреляцион-

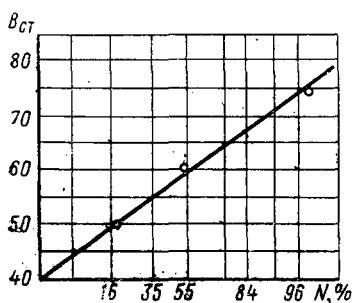


Рис. 12.21. График интегрального распределения статического коэффициента усиления

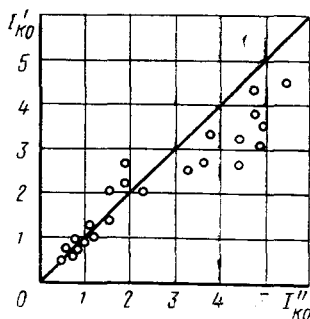


Рис. 12.22. График корреляционного поля точек

ные поля представляют собой координатные плоскости, у которых ордината каждой точки соответствует начальному значению какого-либо параметра (например, обратного тока), а абсцисса каждой точки соответствует значению этого же параметра после проведения испытаний. Если масштабы по обеим осям одинаковы, то приборы, не изменившие свои параметры в процессе испытаний, будут соответствовать точкам, расположенным на прямой, проходящей через начало координат под углом 45° к координатным осям. Эту прямую линию называют линией стабильности. Если точки на координатной плоскости отклоняются от линии стабильности, это означает, что параметры приборов при испытании изменились. Причем точки, лежащие выше линии стабильности, свидетельствуют об увеличении параметра после испытания, а точки, лежащие ниже этой линии, — о его уменьшении. Корреляционные поля точек обычно строят на определенный промежуток времени, в течение которого проводят испытания. Построив несколько графиков корреляционных полей точек для различных промежутков

времени (например, на 100, 200, 500, 1000, 10 000 ч) на прозрачной бумаге и наложив их один на другой, получают наглядное представление дрейфа параметров приборов в процессе испытаний.

§ 12.5. Методы неразрушающего контроля качества приборов

Методы неразрушающего контроля качества приборов дают возможность обнаруживать скрытые дефекты, которые могут не оказывать существенного влияния на основные электрические параметры при обычных испытаниях, но являются потенциально опасными при длительной эксплуатации приборов. Кроме того, эти методы позволяют проводить контроль готовой продукции и оценивать всю совокупность предыдущих технологических операций.

Рентгеноскопический метод используют для контроля качества различных внутрикорпусных соединений и правильного расположе-

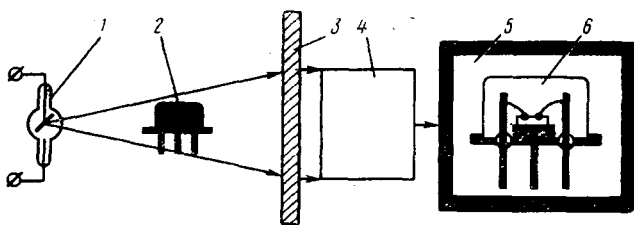


Рис. 12.23. Схема рентгеноскопического метода контроля качества приборов

ния отдельных элементов прибора в непрозрачном корпусе. Метод заключается в просвечивании приборов рентгеновскими лучами и получении изображения на фотопленке или телевизионном экране. Простейшая схема этого метода приведена на рис. 12.23. Поток рентгеновских лучей от трубки 1 проходит через просвечиваемый объект 2 и попадает на фотопленку 3 или на передающую телевизионную трубку 4. На экране 5 воспроизводится объект 6, который является увеличенным изображением объекта 2. Разрешающая способность данного метода не превышает 30 линий на миллиметр. Для выявления дефектов объект просвечивают в трех взаимно перпендикулярных плоскостях; установку исследуемого прибора в нужное положение переводят с помощью дистанционного устройства.

Термографический метод применяют для измерения температуры отдельных участков полупроводниковых приборов как до сборки, так и после сборки. В качестве термочувствительного материала используют суспензию порошкообразного люминофора, которую наносят на поверхность исследуемого образца. Люминофор под действием ультрафиолетового света при изменении тем-

пературы меняет интенсивность свечения. При нагревании люминофоры снижают яркость свечения, так, например, с изменением температуры на 10°C яркость свечения снижается на 5—20%. Наиболее часто применяют термогасящие люминофоры К9, ФК101, ФКП-03К и др.

С помощью этих люминофоров можно регистрировать температурные поля в полупроводниковых приборах в пределах $20\text{—}250^{\circ}\text{C}$. Для визуального определения температуры пользуются методом сравнения яркостей исследуемой и эталонной поверхностей с известным распределением температуры.

Термолюминофоры позволяют определять величину и место перегрева различных типов полупроводниковых приборов, а также проводить анализ локализации мощности.

Измерение распределения температуры по всей поверхности прибора можно проводить путем регистрации теплового излучения, так как любое нагретое тело является источником электромагнитных волн. Спектральный состав этого излучения и его мощность зависят от температуры нагретого тела. Длина волны, при которой наблюдается максимум излучения, обратно пропорциональна абсолютной температуре. Так как излучаемая мощность зависит только от температуры, то приемником, регистрирующим излучения, можно измерять температуру в любой точке поверхности полупроводникового прибора. Для регистрации и измерения теплового излучения применяют радиометры. Чувствительность радиометров составляет $0,1^{\circ}\text{C}$ в диапазоне температур $25\text{—}150^{\circ}\text{C}$. Разрешающая способность микрорадиометров достигает $20\text{—}30\text{ мкм}$.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

§ 13.1. Классификация

Интегральные схемы — это микроминиатюрные функциональные узлы электронной аппаратуры, элементы которых (активные, пассивные и соединительные) имеют общую герметичную оболочку.

В микроэлектронике определились различные направления микроминиатюризации: уплотненный монтаж, сварные модули, микро-модули, интегральные схемы различных типов. Основными критериями оценки каждого из этих направлений являются уменьшение габаритов, увеличение надежности, снижение трудоемкости технологических операций изготовления.

Все элементы и готовые схемы обычно получают наименования на основе методов их изготовления, физических принципов работы и способов коммутации отдельных элементов.

В интегральной электронике наибольшее распространение получили тонкопленочные, гибридные, полупроводниковые и совмещенные схемы.

Тонкопленочные схемы изготавливают путем нанесения тонких металлических, диэлектрических и полупроводниковых пленок в соответствующей последовательности на изоляционную подложку для создания активных и пассивных элементов. Основным методом изготовления таких схем является метод конденсации материалов в вакууме, который позволяет получать сложные многослойные структуры в одном технологическом процессе. К преимуществам тонкопленочной технологии относится возможность ее полной автоматизации, а к недостаткам — нестабильность пленочных активных элементов схемы.

Гибридные схемы представляют собой тонкопленочные схемы, состоящие из пассивных элементов, с присоединенными к ним активными элементами различного назначения (транзисторы, диоды, варикапы, стабилитроны и пр.). Особенности гибридных схем состоят в том, что можно успешно сочетать преимущества пленочной технологии изготовления пассивных элементов с высокими электрическими свойствами дискретных полупроводниковых структур.

Полупроводниковые схемы отличаются тем, что пассивные и активные элементы изготавливают в едином объеме монокристалла полупроводника.

Соединения между отдельными активными элементами осуществляют как внутри объема полупроводникового кристалла, так и на его поверхности. Основное преимущество этих схем — создание сложного комплекса высококачественных активных компонентов. К недостаткам следует отнести наличие внутри объема между активными элементами большого числа паразитных связей, которые снижают электрические характеристики схем.

Однако полупроводниковые схемы наиболее перспективны, так как обладают высокой надежностью.

Совмещенные схемы выполняют путем комбинирования двух технологических процессов: изготовления полупроводниковых схем и пленочных пассивных элементов. В совмещенных схемах пассивные элементы создают методом конденсации в вакууме на поверхности изоляционного слоя, покрывающего монокристаллическую структуру с активными элементами. Этот метод позволяет изготавливать схемы с более широким диапазоном электрических параметров и выдерживать более строгие допуски на них.

Интегральные схемы по функциональным признакам можно объединить в семь основных групп:

- 1) схемы с непосредственными связями;
- 2) схемы с резисторно-емкостными связями;
- 3) резисторно-транзисторные схемы;
- 4) диодно-транзисторные схемы;
- 5) транзисторно-транзисторные схемы;
- 6) схемы с объединенными эмиттерами; токовые переключатели;
- 7) диодные матрицы.

Схемы с непосредственными связями (рис. 13.1, а) отличаются простотой и состоят из однотипных активных элементов. Иногда для уменьшения влияния разброса входных характеристик транзисторов в цепь базы каждого транзистора включают сопротивление величиной в несколько сотен ом. Схемы с непосредственной связью между активными элементами используют при изготовлении различных логических схем, однако широкого распространения они не нашли.

Схемы с резисторно-емкостными связями (рис. 13.1, б) — это схемы с RC -связями между отдельными каскадами интегральной схемы. Схема этой группы представляет собой базовый полупроводниковый кристалл с резисторами, диодами и транзисторами, соединенными между собой различными видами металлизации. Обычно эти схемы используют в системах с тактовой частотой, не превышающей 300 кГц. Они потребляют сравнительно малую мощность — порядка 2—4 мВт. Особенностью этой группы является минимальное количество используемых резисторов и конденсаторов с небольшими номиналами, что позволяет уменьшить требования жесткости допусков на параметры активных элементов схемы, особенно к транзисторам. Однако применение RC -связей между каскадами существенно ограничивает быстродействие этих схем. На основе схем с RC -связями изготавливают триггеры,

мультивибраторы, многовходные схемы НЕ—ИЛИ, сдвоенные трех-
входные схемы НЕ—ИЛИ, схемы, «исключающие ИЛИ», строен-
ные двухвходные схемы НЕ—ИЛИ, схемы усилителей синхрониза-
ции и др.

Резисторно-транзисторные схемы (рис. 13.1, в) довольно прос-
ты и обычно состоят из нескольких однотипных элементов. Отли-

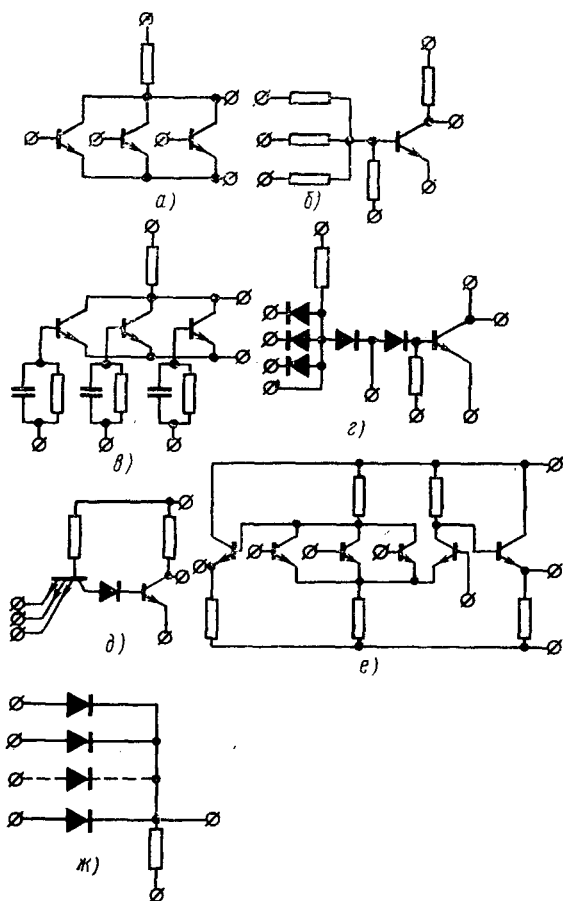


Рис. 13.1. Разновидности интегральных схем

чаются эти схемы малой потребляемой мощностью и средним бы-
стродействием. Основное назначение их — работа в ключевом ре-
жиме. Подобные схемы используют в виде различных ключевых
схем (сдвоенных двухвходных, четырехвходных), регистров, сум-
маторов, буферных усилителей и др.

Диодно-транзисторные схемы (рис. 13.1, г) достаточно сложны
и состоят из большого количества различных элементов (несколь-

ко десятков на одном кристалле), что позволяет создавать многофункциональные схемы. Схемы этой группы можно использовать в различных сочетаниях, например триггер в качестве счетчика или элемента регистра сдвига. Диодно-транзисторные схемы обладают средним быстродействием и средней мощностью рассеяния. Модифицированные диодно-транзисторные схемы могут работать в системах с тактовой частотой 1—2 Мгц. На основе этих схем изготавливают однофазные триггеры, двоянные однофазные триггеры, пятиходовные схемы НЕ—И или НЕ—ИЛИ, пятиходовные схемы И или ИЛИ, двоянные и строенные трехходовые схемы НЕ—И или НЕ—ИЛИ, буферные усилители моностабильных мультивибраторов и др.

Транзисторно-транзисторные схемы (рис. 13.1, д) — самые быстродействующие. Элементами схем являются в основном обычные транзисторы, многоэмиттерные транзисторы и диффузионные резисторы. Использование многоэмиттерных и обычных транзисторов значительно улучшает и стабилизирует температурные характеристики схем. Схемы обеспечивают большую нагрузочную способность при сохранении высокого уровня быстродействия. Схемы этой группы применяют при изготовлении счетверенных двухходовых, строенных трехходовых, двоянных четырехходовых расширителей, однофазных триггеров и др.

Схемы с объединенными эмиттерами (рис. 13.1, е) используют для переключателей большой мощности в бортовой аппаратуре.

Диодные матрицы (рис. 13.1, ж) представляют собой набор быстродействующих диодов, соединенных по определенному принципу. Количество диодов в матрице в зависимости от типа схемы может быть различным (от 4 до 64). Схемы этой группы используют в качестве быстродействующих логических элементов.

§ 13.2. Изготовление полупроводниковых интегральных схем

Основным полупроводниковым материалом при изготовлении интегральных схем является кремний. Это обусловлено следующими причинами. Во-первых, при использовании кремния возможен значительно шире интервал рабочих температур (до 150°C), так как ширина запрещенной зоны у кремния больше, чем, например, у германия. Во-вторых, на поверхности кремния можно получить стойкую окисную пленку, которая служит защитным покрытием при проведении ряда технологических операций, а также предохраняет готовую схему от внешних воздействий.

Наибольшее распространение в технологии изготовления интегральных схем получил планарный метод, позволяющий одновременно в течение одного технологического процесса получать большое количество элементов интегральной схемы.

При изготовлении различных типов полупроводниковых интегральных схем используют технологические операции диффузии и эпитаксии, что позволяет создавать активные и пассивные элементы интегральной схемы. Важнейшими технологическими

процессами являются изоляция отдельных элементов и функциональных групп и соединение их между собой.

Удельное сопротивление и толщину эпитаксиального слоя выбирают такими, чтобы обеспечить высокое пробивное напряжение и малую емкость перехода коллектор—база.

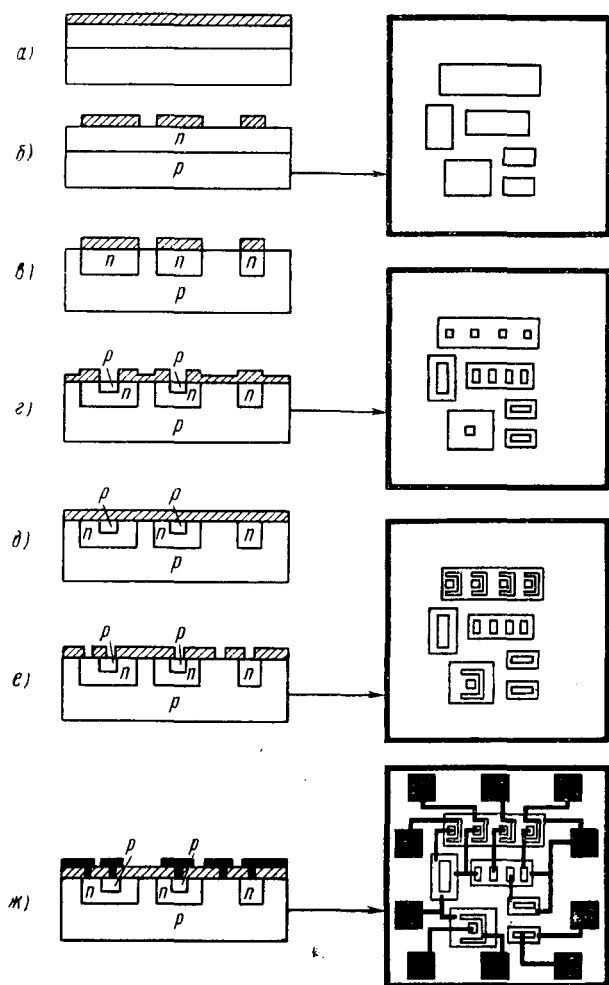


Рис. 13.2. Технологический процесс изготовления интегральных схем

Эпитаксиальный слой (рис. 13.2, а) является основной областью для формирования транзисторов, диодов, диффузионных резисторов и конденсаторов. Эпитаксиальные пленки можно получать различными способами (см. гл. VI).

На поверхности эпитаксиального слоя путем термического окисления выращивают пленку двуокиси кремния (SiO_2) толщиной 0,05—1,5 мкм (рис. 13.2, а), которая служит защитным пассивирующим слоем для *p-n*-переходов.

Для выделения локальных областей применяют метод фотолитографии.

Через образованные с помощью фотолитографии «окна» (рис. 13.2, б) в пленке SiO_2 проводят локальную диффузию примесей (в данном случае бора) в кремний с целью формирования изоляционных областей. Так как бор диффундирует в кремний быстрее, чем в SiO_2 , то проникновение его в эпитаксиальную пленку будет проходить только на участках поверхности, не защищенных пленкой двуокиси кремния. Для процесса диффузии бора выбирают такой температурный и временной режим, который обеспечивает проникновение его на глубину, превышающую толщину эпитаксиального слоя. Таким образом получают изолированные участки кремния *n*-типа (рис. 13.2, в), окруженные кремнием *p*-типа и защищенные окисной пленкой. Изоляция обуславливается наличием *p-n*-перехода, возникающего вокруг каждой области *n*-типа. Между каждыми двумя областями *n*-типа эти переходы образуют диоды, включенные последовательно анодами навстречу друг другу. Поэтому, независимо от того, какой полярности появится напряжение между двумя участками *n*-типа, между ними всегда будет существовать обратно смещенный *p-n*-переход.

В процессе диффузии бора на всей поверхности пластины вырастает новый слой двуокиси кремния, а существовавший ранее слой двуокиси кремния на поверхности областей *n*-типа становится толще.

Для формирования баз транзисторов, резисторов и конденсаторов методом фотолитографии получают другой рисунок в окисной пленке (рис. 13.2, г). Примесь *p*-типа, например бор, вторично диффундирует через окна в окисном слое, но на меньшую глубину.

В процессе вторичной диффузии всю поверхность пластины вновь покрывают слоем двуокиси кремния (рис. 13.2, д). Этот слой еще раз подвергают выборочному травлению для получения в базовых областях «окон» и проведения в них диффузии фосфора (рис. 13.2, е). Диффузия фосфора дает возможность получать эмиттерные области транзисторов, катодные области диодов и конденсаторов, а также омические контакты к области *n*-типа.

Для обеспечения соединений между отдельными компонентами интегральной схемы в слое двуокиси кремния в тех местах, в которых предполагается делать контакты, к каждому компоненту схемы вскрывают «окна». После этого на поверхность пластины методом конденсации в вакууме или гальваническим осаждением наносят тонкое равномерное металлическое покрытие (рис. 13.2, ж) по заранее вытравленному с помощью фотолитографии рисунку. Таким образом, на поверхности пластины образуются токоведущие дорожки и соединительные металлические контакты между

транзисторами, резисторами, диодами, конденсаторами и другими элементами интегральной схемы.

Пластины с интегральными схемами разрезают на отдельные кристаллы, содержащие по одной готовой интегральной схеме. Эти кристаллы пайкой прикрепляют к кристаллодержателю корпуса,

а электрические контакты к интегральной схеме выполняют с помощью проволочных перемычек. Герметизацию интегральных схем осуществляют в металлических или пластмассовых корпусах.

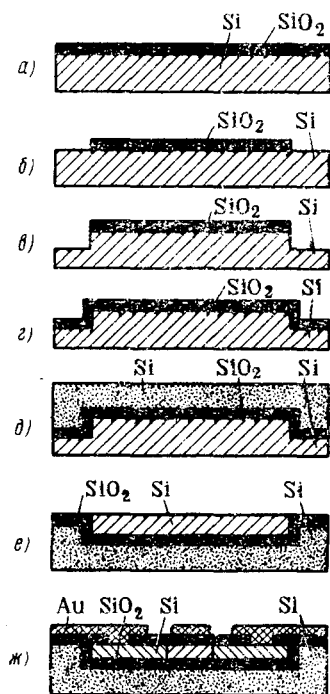


Рис. 13.3. Изоляция элементов интегральных схем с помощью окисла:

а — нанесение слоя SiO_2 ; б — получение рисунка в окисле; в — вытравливание локальных областей; г — повторное нанесение слоя SiO_2 ; д — наращивание слоя поликристаллического кремния; е — удаление лишнего материала монокристаллического (исходного) кремния; ж — получение в слое монокристаллического кремния активных и пассивных элементов

§ 13.3. Методы изоляции

Изоляцию компонентов монолитного блока осуществляют с целью создания монокристаллической схемы, элементы которой должны вести себя так, будто они полностью электрически изолированы друг от друга. Существуют различные методы изоляции. Например, чтобы не допустить токов утечки между элементами, применяют метод изолирующих p - n -переходов. При этом создают структуры, в которых изоляционная подложка с небольшим содержанием примеси имеет углубления для создания коллекторных областей. Все изолирующие p - n -переходы такой структуры должны находиться в состоянии обратного смещения, что достигается путем присоединения подложки p -типа к интегральной схеме в точке с самым низким отрицательным потенциалом.

В других способах изоляции в качестве диэлектрика используют различные окислы, нитриды, стекла, керамику и воздух.

Изоляция окислом на поликристаллической подложке путем термо-

обработки является самым распространенным методом изоляции элементов интегральных схем. Механическую прочность схемы обеспечивает поликристаллическая подложка, осажденная поверх участков, в которых сформированы приборы. На слое исходного кремния n -типа (рис. 13.3) термически наращивают слой окисла, на котором после травления получают рисунок (маску). Путем травления создают локальные области в кремнии, стенки

которых затем снова подвергают окислению. На кристалл поверх слоя окисла наращивают поликристаллический кремний. Затем пластину переворачивают и лишний материал n -типа удаляют травлением или шлифовкой, получая изолированные участки n -типа. После наращивания окисла проводят диффузию акцепторных примесей и наносят металлические электроды, формируя МОП-транзисторы, биполярные транзисторы, резисторы. Данный метод довольно сложен, причем трудно получить пластинку с плоской поверхностью. Существует несколько вариантов этого метода.

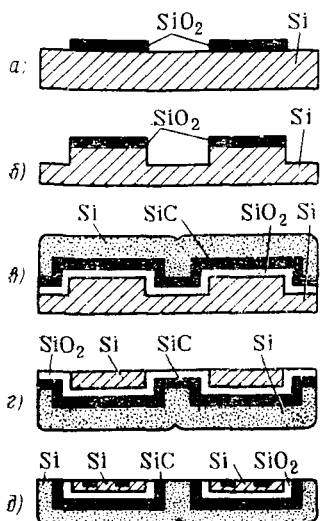


Рис. 13.4. Изоляция элементов интегральных схем с помощью карбида кремния:

a — создание рисунка (маски) на поверхности кремния; *б* — вытравливание выступов; *в* — нанесение слоев окиси кремния, карбида кремния и поликристаллического кремния; *г* — удаление лишнего монокристаллического (исходного) кремния; *д* — формирование активных областей

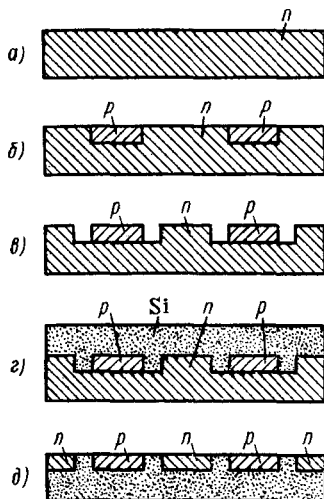


Рис. 13.5. Изоляция элементов интегральных схем с противоположными типами электропроводности:

a — исходная пластина кремния n -типа; *б* — образование локальных областей p -типа; *в* — локальное травление; *г* — наращивание слоя поликристаллического кремния; *д* — удаление лишнего монокристаллического кремния

В одном из вариантов предусматривается использование тонкого слоя карбида кремния (рис. 13.4). Сначала формируют слой окиси кремния и карбида кремния. Затем наращивают поликристаллический кремний. Карбид кремния облегчает удаление лишнего кремния n -типа. Грубую шлифовку прекращают, когда достигают прослойки карбида кремния. Ее удаляют непродолжительной тонкой шлифовкой. Этот метод имеет те же недостатки, что и метод изолирования поликристаллическим кремнием, и требует

дополнительных операций для формирования и удаления карбида кремния.

Второй вариант используют для изолирования участков интегральных схем с противоположными типами электропроводности (рис. 13.5). Метод состоит в следующем. В одном кристалле создают транзисторы типа n - p - n или p - n - p . В исходную пластинку

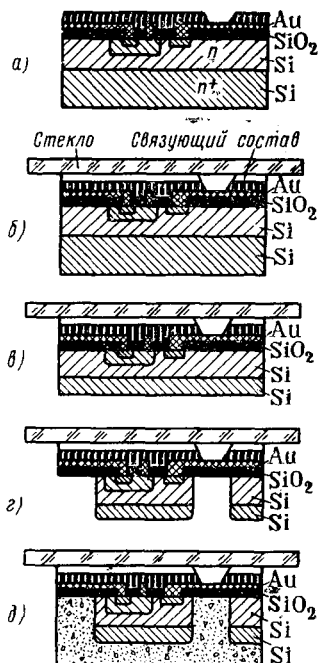


Рис. 13.6. Изоляция элементов интегральных схем с помощью керамики:

а — формирование активных элементов в пластине кремния; *б* — прикрепление активного элемента на стеклянную подложку; *в* — избирательное травление n^+ -типа слоя; *г* — вытравливание локальных областей в активной структуре; *д* — заполнение вытравленных участков керамической массой

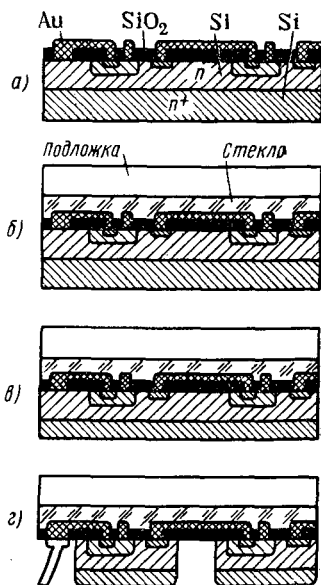


Рис. 13.7. Изоляция элементов интегральных схем путем создания мезаструктур:

а — формирование активных и пассивных элементов; *б* — прикрепление пластины с активными и пассивными элементами на керамическую подложку; *в* — удаление лишнего слоя n^+ -типа; *г* — вытравливание мезаструктур

кремния p -типа осуществляют диффузию донорной примеси. Затем вытравливают локальные области и наращивают поликристаллический слой кремния. Пластинку переворачивают и лишний материал p -типа сошлифовывают, формируя изолированные участки материала n -типа и p -типа, в которых можно создавать транзисто-

ры типа $n-p-n$ и $p-n-p$. Для получения транзисторов типа $p-n-p$ используют обычные методы диффузии с защитной окисной пленкой.

Третий вариант изоляции элементов интегральных схем состоит в заполнении промежутков между ними, полученных селективным травлением, изоляционным материалом. В качестве диэлектрика используют керамические композиции (рис. 13.6). При этом на стеклянную пластинку (подложку) прикрепляют активные элементы. Путем избирательного травления уменьшают толщину слоя n -типа, затем создают изолированные участки с элементами. Промежутки между элементами заполняют керамической массой. После этого стеклянную пластинку удаляют.

Существует еще метод изолирования кремниевых элементов (приборов), расположенных на сапфировой подложке. На поверхности сапфировой пластинки выращивают эпитаксиальную пленку кремния, которую подвергают избирательному травлению для создания изолированных участков. Основное преимущество этого метода состоит в возможности создания интегральных схем СВЧ, так как сапфир может быть использован в качестве отличного диэлектрика в полосковых линиях, соединяющих приборы.

Изоляция путем создания мезаструктур (рис. 13.7). Сначала обычным путем формируют активные и пассивные элементы и межсоединения. Затем пластины с этими элементами прикрепляют к керамической подложке с помощью слоя стекла. Лишний слой n -типа удаляют и изолируют элементы путем избирательного травления. Активные элементы можно создать с помощью обычных методов. Процесс изолирования не вызывает неровностей на поверхности пластины, при изолировании удается избежать высокотемпературных операций, можно не делать дополнительной герметизации. Данный метод отличается некоторой сложностью, для удаления лишнего кремния n -типа иногда требуются шлифовка и травление.

Использование воздушной прослойки в качестве диэлектрика (рис. 13.8). Если в технологии, основанной на формировании мезаструктур, опустить операцию заполнения диэлектриком, то элементы будут изолированы друг от друга воздухом. Для этого в поликристаллической структуре создают области n -типа и наносят эпитаксиальную пленку n -типа. Затем формируют активные и пассивные структуры и наносят слой молибдена и золота. Путем локального травления золотого слоя создают омические контакты и межсоединения. Затем осуществляют травление молибдена и избирательное травление кремния. Травление идет вплоть до окисного слоя. В результате получают участки кремния с элементами, изолированные друг от друга воздухом. Подложка обеспечивает хорошее рассеяние тепла, однако нанесение металла и травление отличаются сложностью.

Изоляция приборов с балочными выводами (рис. 13.9). Сначала в пластине формируют активные элементы, затем создают слой защитного окисла, получают контакты из силицида платины, напыляют слой титана и золота, путем электроосаждения золота

создают балочные выводы. После этого металлические слои подвергают травлению с целью создания изолированных электродов, для изолирования элементов удаляют лишний кремний. Выводы шириной 25 и толщиной 12,5 мкм обеспечивают как электрическую, так и механическую связь между различными элементами схемы. Близкое расположение электродов обеспечивает возможность работы на ВЧ. Данная конструкция не нуждается в герметизации. Рассмотренная технология отличается сложностью, получающийся прибор мал и хрупок, однако благодаря относительно массивным балочным выводам его нетрудно прикрепить к держателю или подложке гибридной

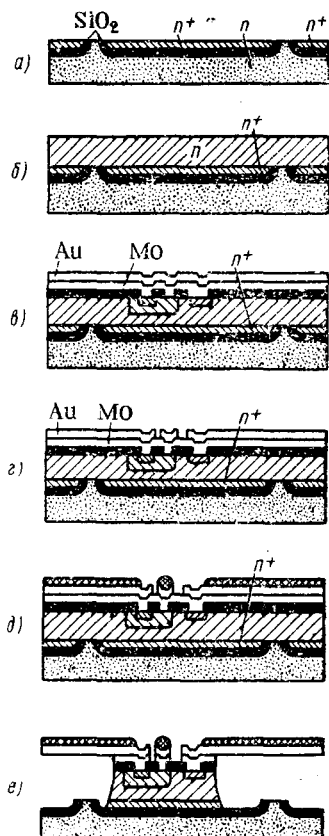


Рис. 13.8. Изоляция элементов интегральных схем с помощью воздушной прокладки:

а — создание n^+ -областей в изолированной структуре; б — нанесение эпитаксиальной пленки n -типа; в — формирование активных и пассивных структур; г — локальное травление омических контактов и межсоединений; д — создание балочных выводов; е — вытравливание отдельных элементов схемы

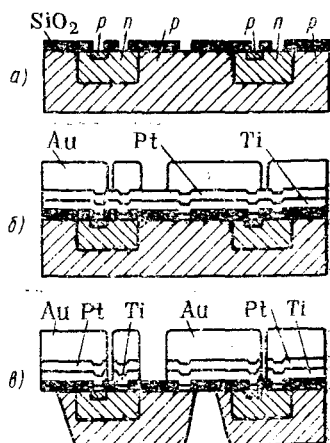


Рис. 13.9. Изоляция элементов интегральных схем с балочными выводами:

а — формирование активных элементов; б — создание балочных выводов; в — вытравливание отдельных элементов схемы

схемы. Этот метод обеспечивает полную изоляцию элементов схемы, в результате чего возрастает быстродействие. Преимуществом является также улучшенный отвод тепла через золотые балочные выводы.

§ 13.4. Компоненты схем

Интегральные схемы обычно представляют собой кристалл, состоящий из отдельных областей, каждая из которых выполняет определенную электрическую функцию полупроводникового прибора: резистора, конденсатора, транзистора, диода и др.

Резисторы

Резистор — это прибор с двумя активными выводами, на которых напряжение и ток находятся практически в фазе. Вольт-амперные характеристики резисторов могут быть линейными и нелинейными. Лучшими вариантами резисторов в интегральных схемах являются диффузионные кремниевые или тонкопленочные нихромовые. Выбор типа резистора зависит от необходимых величин сопротивления, рабочих напряжений, мощности, ТКС, допустимой площади, точности изготовления, методов изоляции и вольт-амперной характеристики. Обычные кремниевые диффузионные резисторы получают в диффузионных слоях с помощью планарного метода. Существуют и другие методы изготовления резисторов. Рассмотрим некоторые из них.

Объемные резисторы (рис. 13.10, а) изготавливают путем создания омических контактов в двух точках однородного, равномерно легированного кристалла кремния. Точность их получения зависит от того, насколько хорошо задается геометрия резистора полировкой, травлением или скрайбированием. Высокоомный кремний имеет большой ТКС; при изменении температуры на 50°C возможно изменение сопротивления в 10 раз и больше. При низких удельных сопротивлениях ТКС в допустимых пределах, а значения сопротивлений малы. Основной проблемой при создании объемных резисторов является необходимость дополнительных операций по изоляции их от других элементов, размещенных на кристалле кремния. Когда не требуются изолирующие p - n -переходы, уменьшается распределенная емкостная связь, что ценно для высокочастотных устройств.

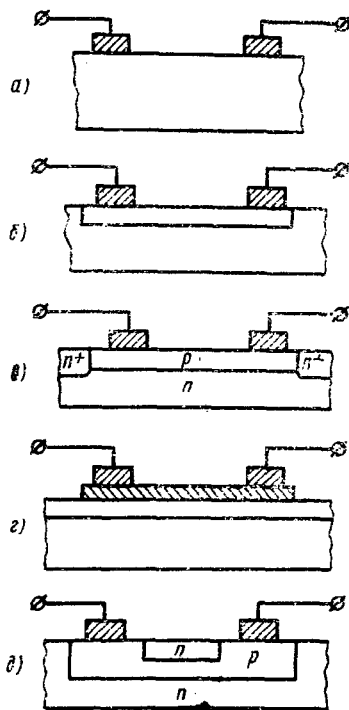


Рис. 13.10. Различные типы резисторов в интегральных схемах

Диффузионные резисторы (рис. 13.10, б) выполняют, используя соответствующий рисунок на фотомаске, ограничивающей диффузионные области. Диффузионный резистор можно изготавливать одновременно с базовым или эмиттерным p - n -переходом транзистора путем диффузии. Эквивалентная схема диффузионного резистора должна состоять из емкости и элементов, имитирующих выпрямляющие свойства p - n -перехода. Переход на границе диффузионной области обеспечивает изоляцию при постоянном токе между сопротивлением и подложкой до тех пор, пока за счет полярности приложенного к подложке напряжения переход смещен в обратном направлении. Малая толщина данного резистора позволяет получить необходимый ТКС и одновременно практически допустимые значения поверхностного сопротивления. Введение дополнительных примесей обоих типов электропроводности может уменьшить ТКС, но при этом сохранится нужное значение поверхностного сопротивления. Такой элемент называют *резистором с компенсированной примесью*.

В резисторах с *эпитаксиальным слоем* (эпитаксиальных резисторах) (рис. 13.10, в) для ограничения требуемого участка эпитаксиального слоя осуществляют диффузию через p - n -переход. В поверхность эпитаксиальной области вплавляют контакты. Величина сопротивления определяется его геометрическими размерами. Эпитаксиальные резисторы отличаются от диффузионных в основном тем, что распределение примесей по слою у них почти однородно.

Кремниевые резисторы, изготовленные осаждением из паровой фазы, практически ничем не отличаются от тонкопленочных, за исключением используемого материала — поликристаллического кремния. Процесс осаждения похож на выращивание монокристаллических эпитаксиальных слоев. Резисторы могут быть изолированы, так как они создаются на слое двуокиси кремния, пассивирующем базовый кремниевый кристалл. ТКС подобных слоев несколько меньше, чем ТКС диффузионных резисторов, легированных до той же величины поверхностного сопротивления.

Полевые резисторы (рис. 13.10 г) имеют нелинейную вольт-амперную характеристику. В качестве полевого резистора используют область канала в полевой структуре с p - n -переходом или в поверхностной полевой структуре. В тех случаях, когда можно применять линейные резисторы, полевые резисторы могут оказаться более удобными, так как у них значительно меньше габариты. Однако полевые резисторы нельзя изготовить во время диффузионных процессов, при получении диодов и биполярных транзисторов. Это является основным препятствием к значительному использованию полевых резисторов в схемах с биполярными транзисторами.

Резисторы рис. 13.10, д имеют нелинейные вольт-амперные характеристики. Трудности получения воспроизводимых параметров резисторов с p - n -переходом осложняют использование их в интегральных схемах.

При создании конденсаторов для кремниевых интегральных схем необходимо учитывать емкость на единицу поверхности, сопротивление, изоляцию, поляризацию, динамический диапазон, коэффициент потерь и температурный коэффициент. Имеющиеся методы позволяют изготавливать конденсаторы с необходимыми параметрами; основной трудностью является получение высоких значений емкостей на единицу поверхности кристалла (общий недостаток для всех методов). В монокристаллических схемах можно получить только малые значения емкостей, максимальная практически достижимая величина $100\text{--}200\text{ пф}$ с допуском $\pm 20\%$.

Для интегральных схем выполняют три типа конденсаторов: кремниевый с *p-n*-переходом, типа металл-окисел-полупроводник (МОП) и тонкопленочный.

Конденсаторы с p-n-переходами, т. е. такие, в которых используется емкость, существующая на границе между двумя типами кремниевого кристалла (например, в *p-n*-переходе), — наиболее распространенный тип. Это обусловлено, как и для диффузионных резисторов, возможностью создания таких элементов одновременно с диффузионными *p-n*-переходами активных элементов. Коэффициент потерь в конденсаторах с *p-n*-переходом зависит от сопротивления электродов, от тока утечки *p-n*-перехода и от потерь на переменном токе в кремнии. Чтобы избежать некоторые трудности при изготовлении конденсаторов с *p-n*-переходами, можно изменить варианты конструкций. Например, выполнить конденсатор, который будет работать при любой полярности, так как в нем используется транзистороподобная структура с *p-n*-переходами и разомкнутой базой.

Конденсатор типа МОП. Структура конденсатора состоит из нижней обкладки, представляющей диффузионный слой в кремнии, из диэлектрика (двуокиси кремния) и верхней обкладки (металлического проводника). При использовании в качестве диэлектрика окисной пленки толщиной $500\text{ \AA}$ можно изготовить конденсатор с емкостью 50 пф/см^2 . При толщине пленки SiO_2 $1000\text{ \AA}$ диапазон емкости конденсаторов $10\text{--}30\text{ пф/см}^2$. Коэффициент потерь в конденсаторе типа МОП зависит от последовательного сопротивления электродов интегральной схемы.

Тонкопленочный конденсатор состоит из слоя диэлектрика, расположенного между двумя металлическими электродами. В качестве диэлектрика наиболее часто используют моноокись кремния и окись тантала. Емкость тонкопленочного конденсатора имеет значение $10\text{ пф} \text{—} 1\text{ мкф}$ на 1 см^2 . Применяя многослойные структуры, можно значительно увеличить емкость при заданной площади структуры.

Индуктивности

Обычно интегральные схемы проектируют так, чтобы исключить индуктивные элементы (например, схемы для ЭВМ), но в ряде

случаев это сделать невозможно. Функции, эквивалентные индуктивностям, могут выполнять различные полупроводниковые элементы. Среди полупроводниковых приборов, обладающих индуктивными свойствами, наиболее простым является плоскостной диод, смещенный в прямом направлении, с помощью которого можно получать индуктивности величиной до нескольких миллигенри. Известно, что инжекция носителей в базовую область из высокоомного кремния приводит к увеличению проводимости. Это в свою очередь вызывает увеличение тока, протекающего через диод в прямом направлении в течение времени, необходимого носителям для прохождения базы до рекомбинации. Так как ток имеет тенденцию отставать от входного напряжения, то в результате создается индуктивный сдвиг по фазе. Чем длиннее область базы с высоким сопротивлением, тем дольше протекает ток. Для повышения добротности индуктивного элемента на основе полупроводникового диода в нем создают отрицательное сопротивление. С этой целью базу элемента легируют примесью, создающей глубокие уровни. Толщину базы выбирают такой, что при приложении обратного напряжения происходит полное перекрытие ее объемным зарядом. В интервале частот 400—20 000 гц индуктивность может достигать нескольких миллигенри, добротность — нескольких единиц.

Анализ индуктивных эффектов в транзисторных схемах с общим эмиттером показал, что имеются возможности создания новых элементов с более сильным индуктивным эффектом. Эти транзисторы работают при напряжениях выше того, которое соответствует коэффициенту передачи тока $\alpha = 1$ (например, транзистор, работающий в режиме регулируемого пробоя, и др.).

В качестве индуктивности в интегральном микроузле могут быть использованы приборы с переменным пробивным напряжением. Такой прибор можно применять в различных электронных схемах: усилителях, генераторе, частотном модуляторе, измерителе частоты и др. Кроме того, в качестве индуктивных элементов можно использовать канальные тетроды, которые изготавливают обычно по эпитаксиальной технологии с индуктивностью 300 мкн, добротностью 40 на частоте 1 Мгц при нагрузочной емкости 100 пф. В качестве элементов индуктивности в схемах микроволнового диапазона применяют полосковые линии, осаждаемые непосредственно на монокристаллические интегральные схемы.

Широко применяют конструкцию тонкопленочного интегрального фильтра, который может быть использован в частотноизбирательных контурах. В качестве катушек индуктивности может применяться спиральная линия, полученная методом осаждения металла на подложку. Добротность катушек индуктивности, осажденных на кремнии, ниже добротностей катушек, осажденных на стекле или керамике, и еще ниже, если кремний обладает низким удельным сопротивлением. Индуктивность таких тонкопленочных спиралей лежит в пределах 40—1 мкн, добротность равна 100 на частоте 100 Мгц. Разрабатываются катушки индуктивности по раз-

мерам не больше транзисторного кристалла. Диаметр катушки индуктивности с добротностью 50 и индуктивностью 100 *мгн* равен 1,78 *мм*, а ее длина 3,94 *мм*. Катушки герметизируют в оболочке из эпоксидных смол и покрывают лаком. Они могут работать до 80° С. Температурный коэффициент их от $\pm 15 \cdot 10^{-4}$ до $\pm 300 \cdot 10^{-4}$.

Основные физические свойства полупроводниковых материалов

Свойства	Si	Ge	GaAs	GaP	SiC
Атомный вес, а. е. м.	28,08	72,59	144,63	100,7	40,1
Постоянная решетки, Å	5,431	5,647	5,63	5,45	4,2
Плотность, г/см ³	2,328	5,32	5,40	4,14	3,2
Твердость по Моосу	6,5	6,25	4,5	5	9,5—9,75
Температура плавления, °С . . .	1415	958,5	1238	1500	2200 (сублимация)
Теплоемкость, кал/(г·град) . .	0,181	0,073	0,09	—	0,15—0,18
Теплопроводность, кал/(см·сек·град)	0,2	0,14	0,16	—	0,02
Линейный коэффициент тепло- вого расширения $\times 10^6$, град ⁻¹ .	4,2	6,1	5,7	5,3	4—7
Поверхностное натяжение при температуре плавления, н/м . .	0,72	0,6	—	—	—
Показатель преломления	3,5	3,9—4,1	3,2	3,37	—
Ширина запрещенной зоны, эв:					
при 0° К	1,21	0,785	1,53	2,4	2,8—3,1
при 300° С	1,12	0,72	1,5	2,2	2,8
Диэлектрическая проницаемость	12	16	—	—	6,5—7,5
Подвижность электронов, см ² /(в·сек)	1500	3900	8500	110	100
Подвижность дырок, см ² /(в·сек)	500	1900	400	10	10

Электрофизические свойства германия и кремния

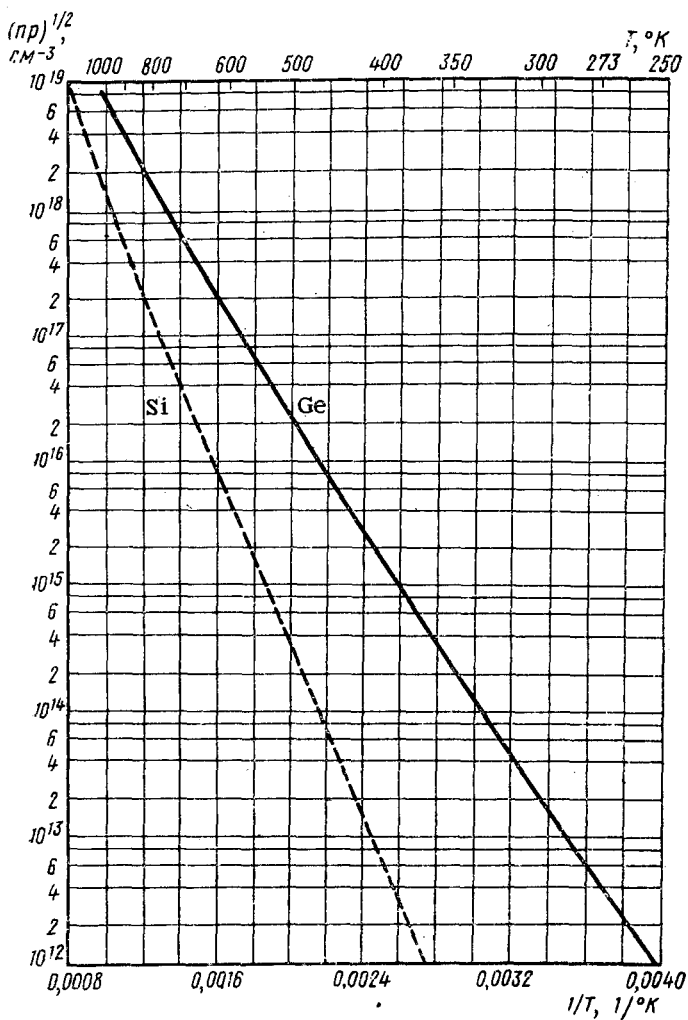


Рис. П.1. Температурная зависимость концентрации собственных носителей заряда в германии и кремнии

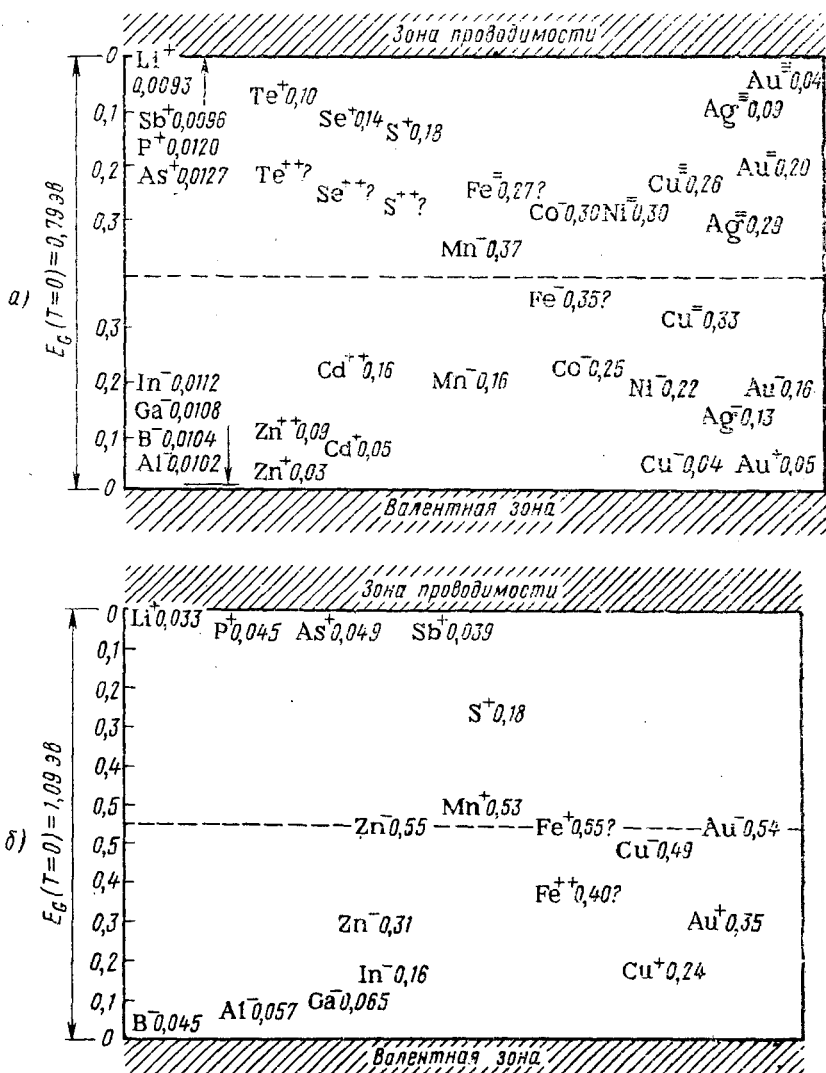


Рис. П.2. Энергетические уровни доноров и акцепторов в германии (а) и кремнии (б)

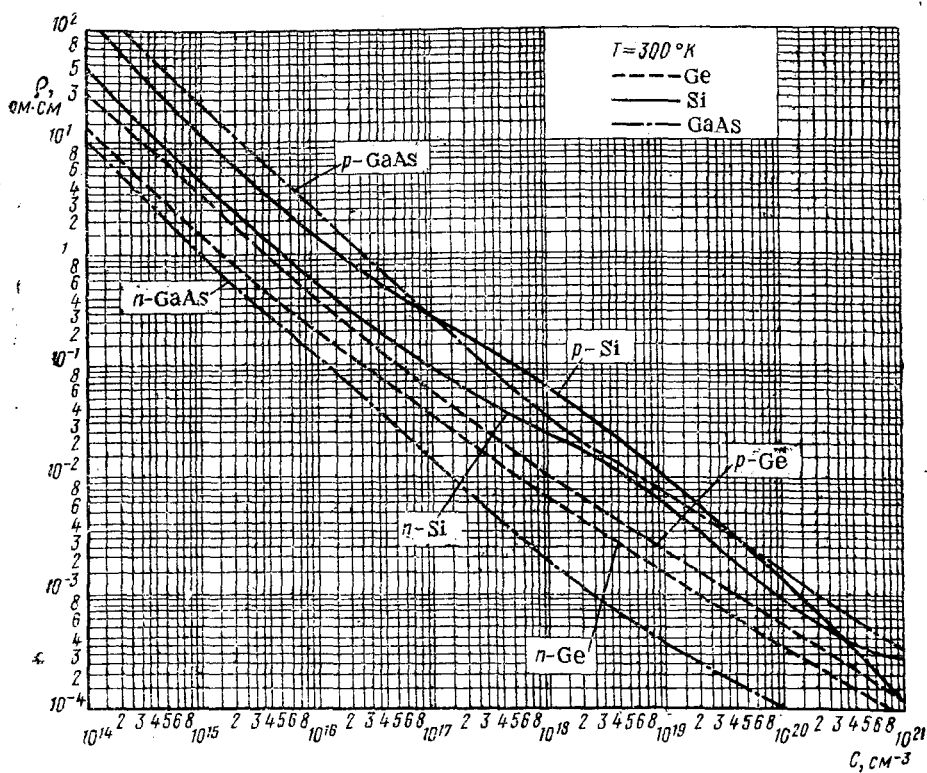


Рис. П.3. Зависимость удельного сопротивления от концентрации примеси для Ge, Si и GaAs

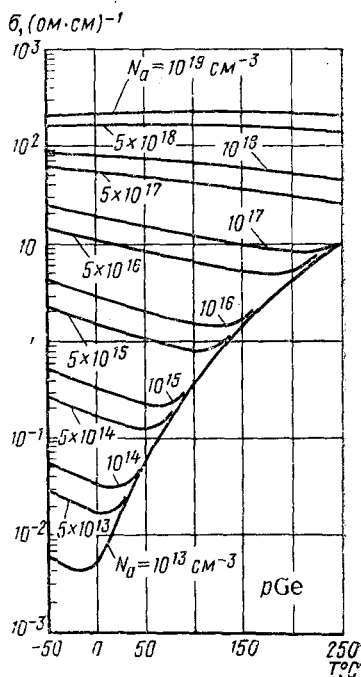
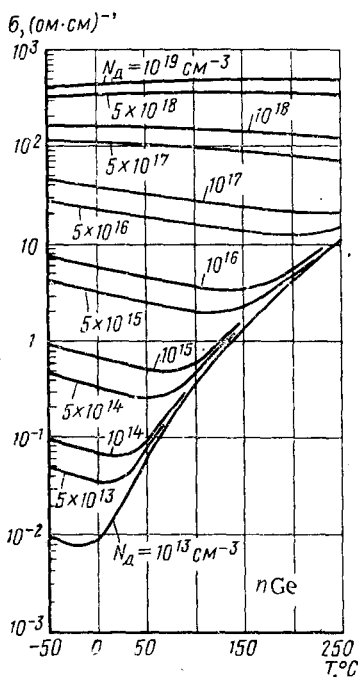


Рис. П.4. Температурная зависимость проводимости германия с различным содержанием примеси

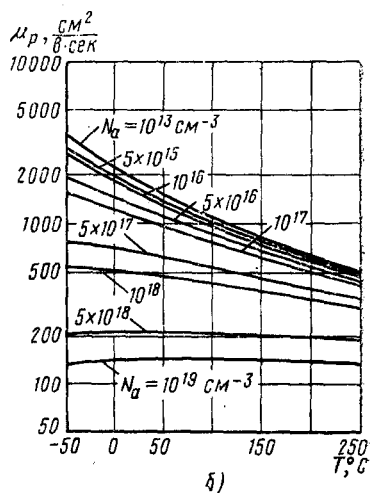
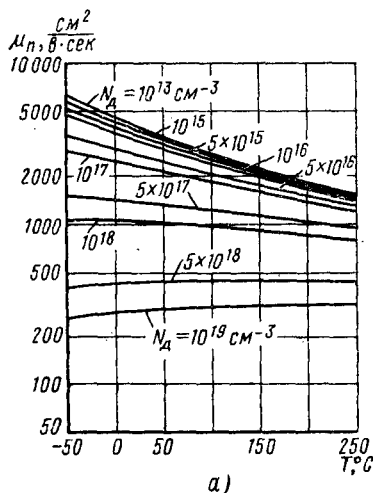


Рис. П.5. Зависимость дрейфовой подвижности электронов (а) и дырок (б) в германии от температуры и степени легирования

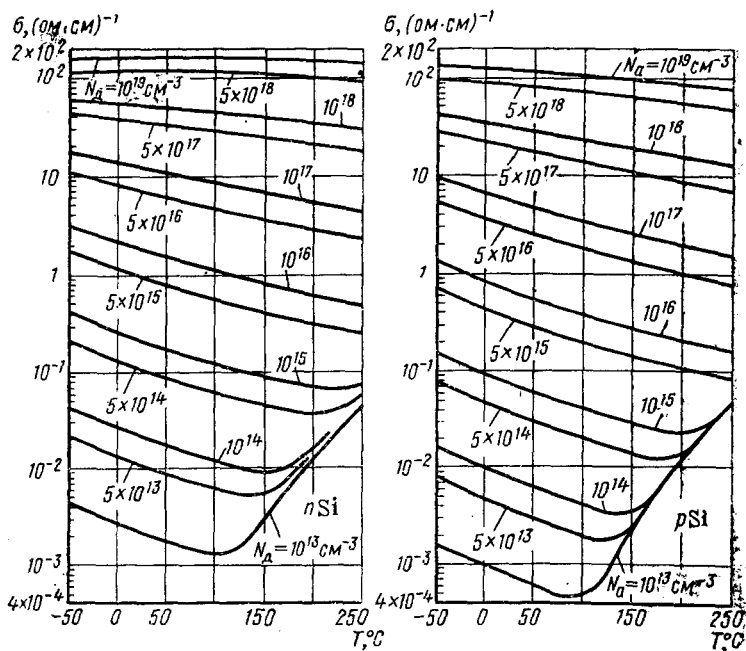


Рис. П.6. Температурная зависимость проводимости кремния с различным содержанием примеси

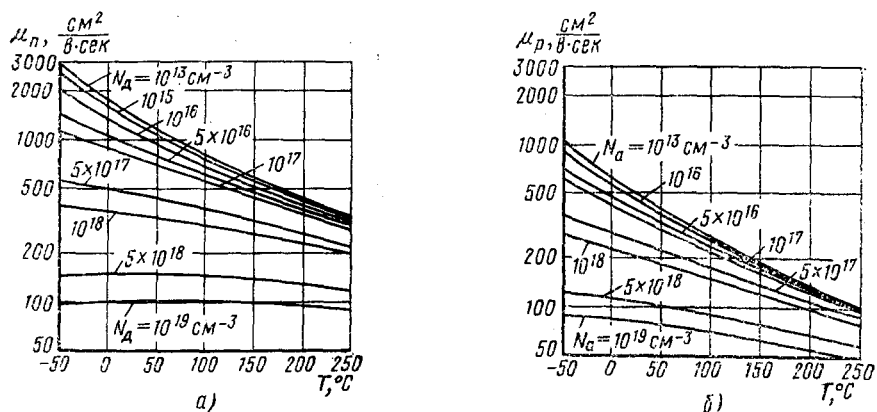


Рис. П.7. Зависимость дрейфовой подвижности электронов (а) и дырок (б) в кремнии от температуры и степени легирования

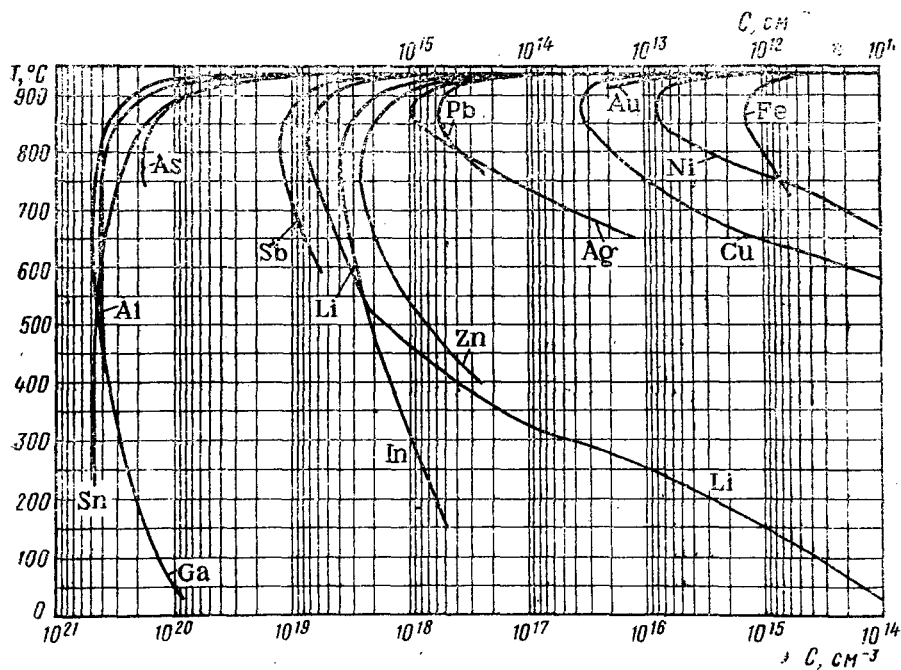


Рис. П.8. Зависимость предельной растворимости примесных элементов в германии от температуры

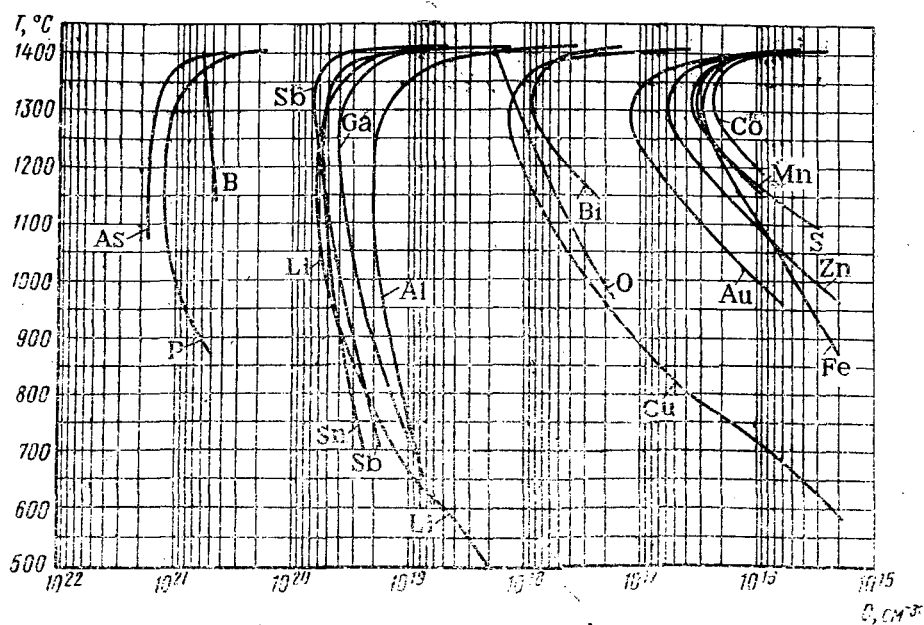


Рис. П.9. Зависимость предельной растворимости примесных элементов в кремнии от температуры

Графики для определения поверхностной концентрации примеси в диффузионных слоях на кремнии и германии

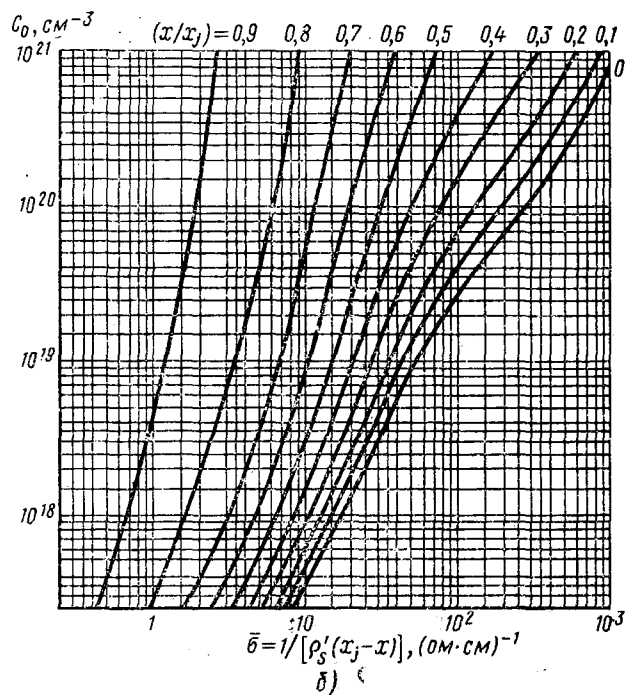
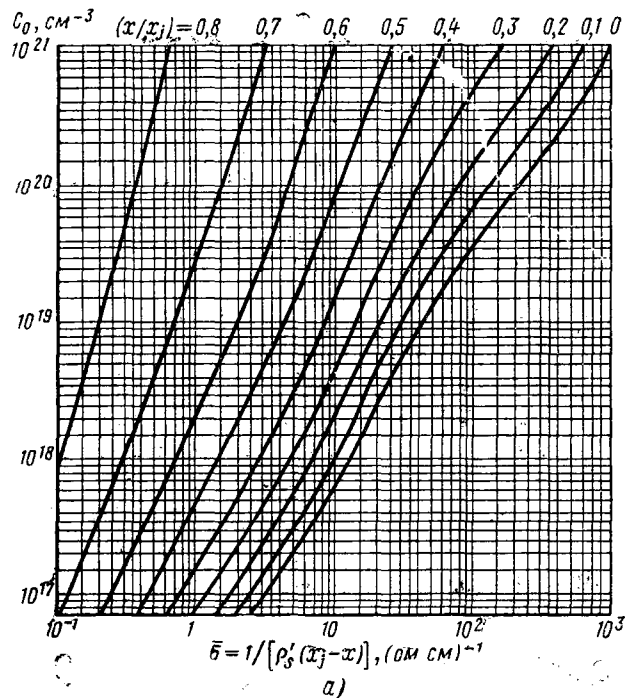


Рис. П.10. Зависимость $C_0(1/\rho_s x_j)$ для слоев n Si с erfc-распределением примеси:

$a - C_B = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$; $b - C_B = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$

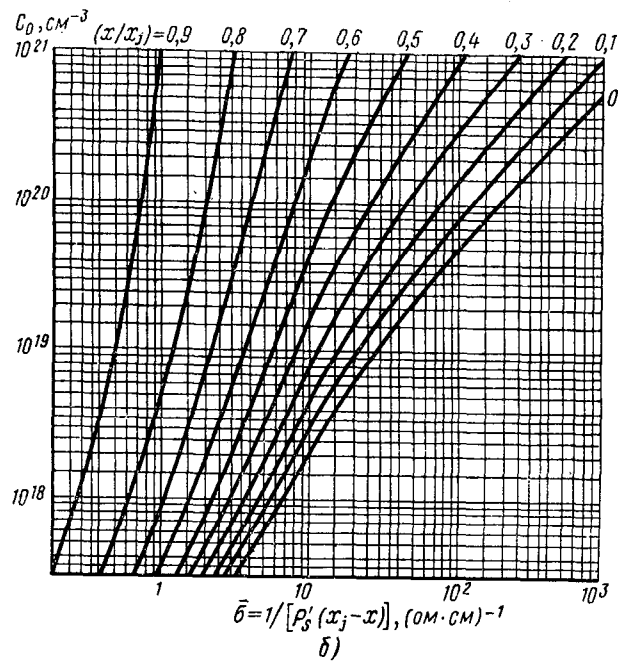
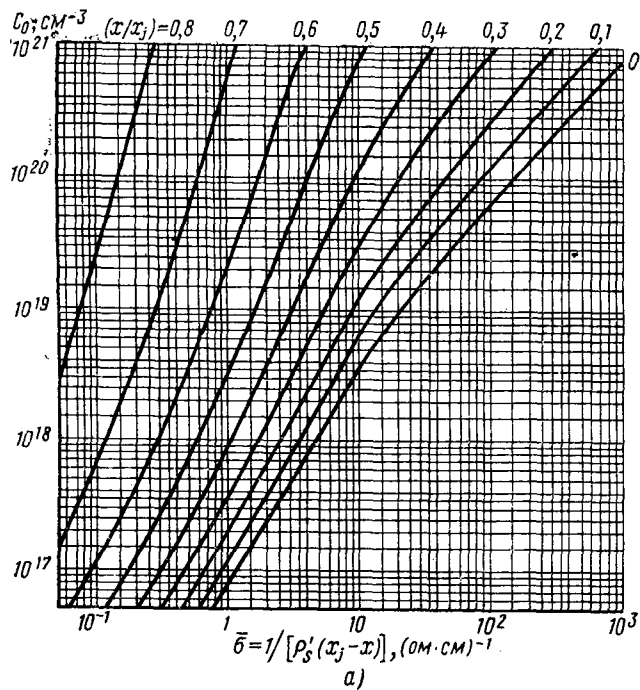


Рис. П.11. Зависимость $C_0(1/\rho'_s x_j)$ для слоев p -Si с erfc -распределением примеси:

$$a - C_B = 10^{14} \text{ см}^{-3}; \quad b - C_B = 10^{16} \text{ см}^{-3}$$

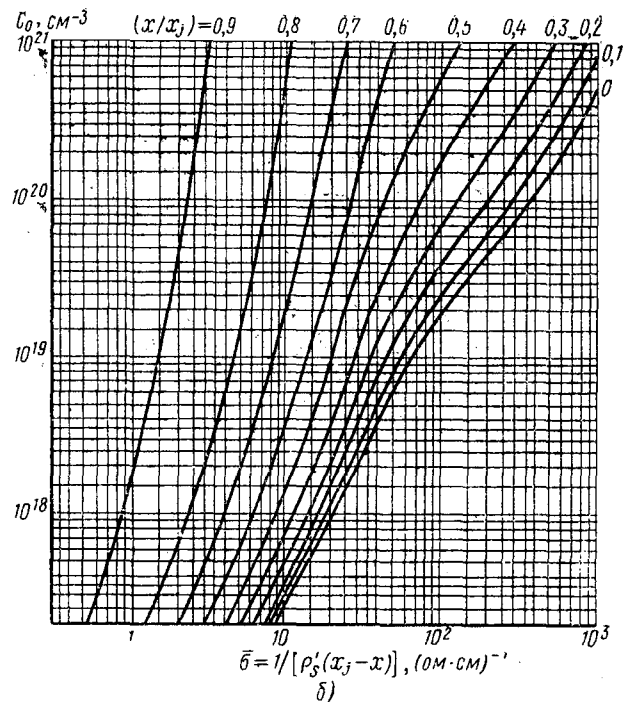
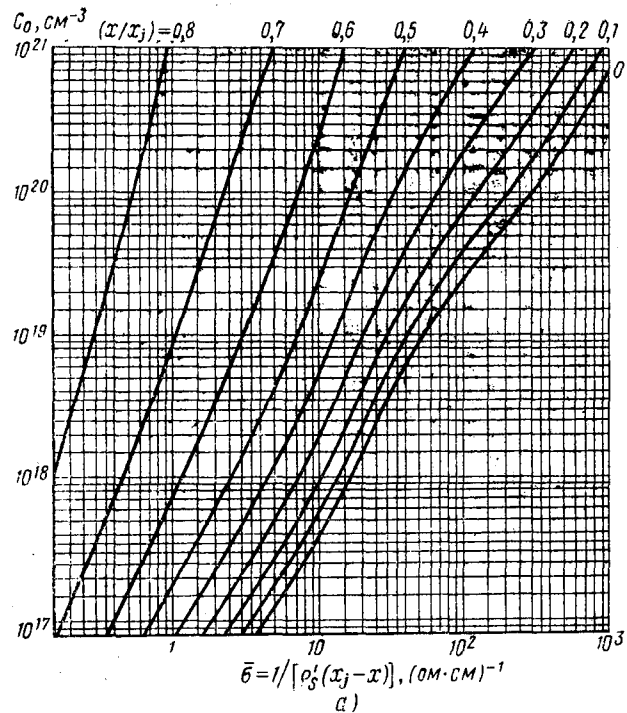


Рис. II.12. Зависимость $C_0(1/\rho'_S x_j)$ для n -Si с гауссовым распределением примеси:

$$a - C_B = 10^{14} \text{ см}^{-3}; \quad b - C_B = 10^{16} \text{ см}^{-3}$$

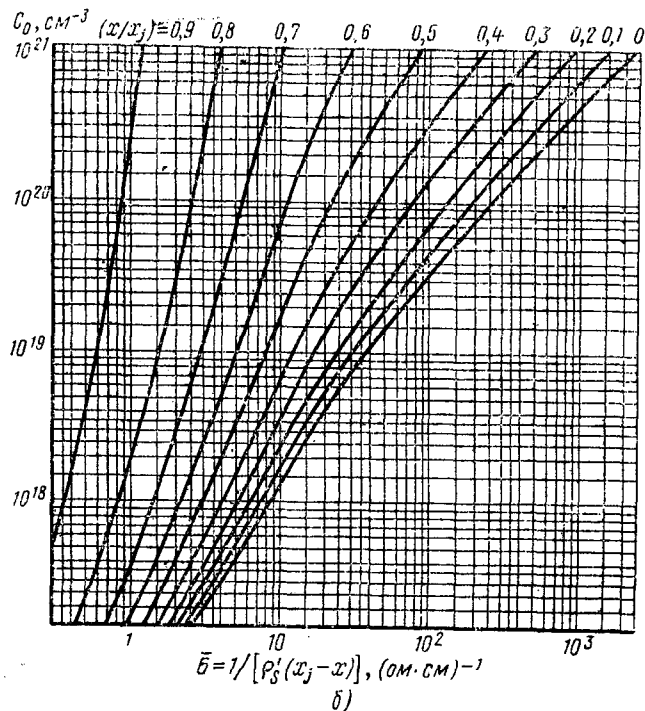
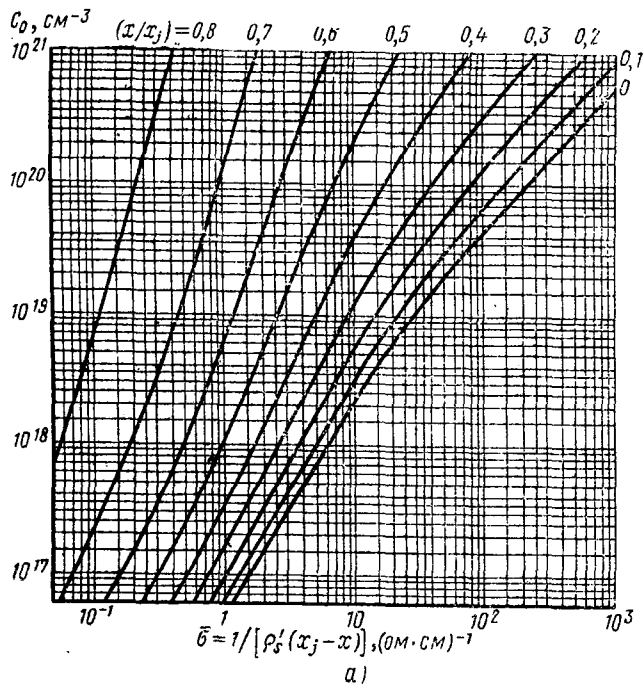


Рис. П.13. Зависимость $C_0(1/\rho'_s x_j)$ для p -Si с гауссовым распределением примеси:

$$a - C_B = 10^{14} \text{ cm}^{-3}; \quad b - C_B = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$$

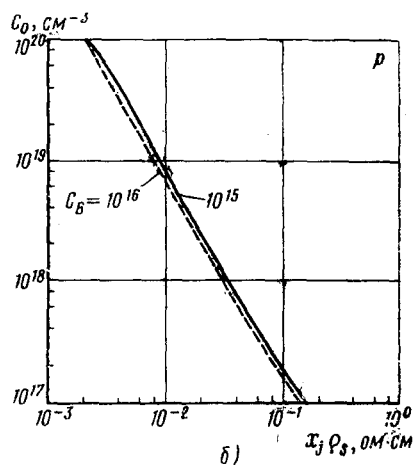
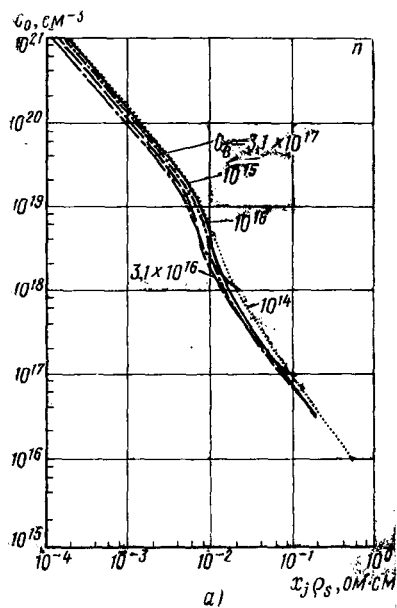


Рис. П.14. Зависимость $C_0(x_j \rho_s)$ для слоев на германии с erfc -распределением примеси:
 a — $n\text{Ge}$; b — $p\text{Ge}$

ЛИТЕРАТУРА

1. Болтакс Б. И. Диффузия в полупроводниках. Физматгиз, 1960.
2. Вол Л. Е. Строение и свойства двойных металлических систем. Физматгиз, 1959.
3. Ефимов Е. А., Ерусалимчик И. Г. Электрохимия германия и кремния. Госхимиздат, 1963.
4. Зеликман Г. А., Мазель Е. З., Пресс Ф. П., Фронк С. В. Полупроводниковые кремниевые диоды и триоды. Изд-во «Энергия», 1964.
5. Иванов-Есипович Н. И. Физико-химические основы производства радиоэлектронной аппаратуры. Изд-во «Высшая школа», 1965.
6. Колосов А. А., Горбунов Ю. И., Наумов Ю. Е. Полупроводниковые твердые схемы. Изд-во «Советское радио», 1965.
7. Маслов А. А. Технология и конструкции полупроводниковых приборов. Изд-во «Энергия», 1970.
8. Медведев С. А. Введение в технологию полупроводниковых материалов. Изд-во «Высшая школа», 1970.
9. Основы технологии кремниевых интегральных схем. Окисление, диффузия, эпитаксия. Под ред. Р. Бургера и Р. Донована. Пер. с англ. Изд-во «Мир», 1969.
10. Палатник Л. С., Папилов И. И. Эпитаксиальные пленки. Изд-во «Наука», 1971.
11. Пресс Ф. П. Фотолитография в производстве полупроводниковых приборов. Изд-во «Энергия», 1968.
12. Слуцкая В. В. Тонкие пленки в технике СВЧ. Изд-во «Советское радио», 1967.
13. Тихонов Ю. Н. Технология изготовления германиевых и кремниевых диодов и триодов. Изд-во «Энергия», 1964.
14. Травление полупроводников. Пер. с англ. под ред. С. П. Горина. Изд-во «Мир», 1965.
15. Трутко А. Ф. Методы расчета транзисторов. Изд-во «Энергия», 1971.
16. Файнштейн С. М. Обработка и защита поверхности полупроводниковых приборов. Изд-во «Энергия», 1970.
17. Курносов А. И., Воронков Э. Н. Полупроводниковая микроэлектроника. Воениздат, 1973.

	Стр.
Предисловие	3
Введение	4
§ В.1. Основные этапы в технологии производства полупроводниковых приборов	4
§ В.2. Разновидности активных структур	6
§ В.3. Технологические схемы получения некоторых транзисторов	9
<i>Глава первая. Механическая обработка полупроводниковых материалов</i>	12
§ 1.1. Структура кристаллического твердого тела	12
§ 1.2. Абразивные материалы	15
§ 1.3. Кристаллографическая ориентация полупроводниковых слитков	18
§ 1.4. Крепление слитков и пластин	21
§ 1.5. Виды резки полупроводниковых материалов	22
§ 1.6. Шлифовка полупроводниковых материалов	35
§ 1.7. Полировка полупроводниковых материалов	39
§ 1.8. Качество приповерхностного слоя полупроводника после механической обработки	42
<i>Глава вторая. Химическая и электрохимическая обработка полупроводников</i>	46
§ 2.1. Механизм процесса травления	46
§ 2.2. Способы травления и промывки	51
§ 2.3. Электрохимическая обработка поверхности полупроводников	54
§ 2.4. Осаждение гальванических покрытий	56
§ 2.5. Химический участок	60
§ 2.6. Получение деионизованной воды	63
<i>Глава третья. Фотолитография</i>	67
§ 3.1. Основные сведения о фотолитографии	67
§ 3.2. Фоторезисты	67
§ 3.3. Фотошаблоны и способы их получения	70
§ 3.4. Процесс фотолитографии	75
§ 3.5. Проекционная оптическая фотолитография	79
§ 3.6. Бесшаблонная линзоворастровая фотолитография	82
§ 3.7. Изготовление металлических масок	83
§ 3.8. Дефекты при проведении процесса фотолитографии	84
§ 3.9. Технологическое оборудование для фотолитографии	87
<i>Глава четвертая. Метод сплавления</i>	92
§ 4.1. Физико-металлургические основы образования сплавного <i>p-n</i> -перехода	92
§ 4.2. Технология получения сплавных структур	102
§ 4.3. Расчеты при сплавлении	109
§ 4.4. Дефекты, возникающие в <i>p-n</i> -переходах при сплавлении	120
§ 4.5. Контроль качества сплавных <i>p-n</i> -переходов	123
<i>Глава пятая. Метод диффузии</i>	128
§ 5.1. Физические основы процесса диффузии	128
§ 5.2. Законы диффузии	132
§ 5.3. Распределение примеси при диффузии	136
§ 5.4. Диффузия в планарной технологии	147
§ 5.5. Техника проведения процессов диффузии	152
§ 5.6. Основные диффузаны	157

§ 5.7. Аномалии распределения примесей и дефекты в диффузионных слоях	163
§ 5.8. Контроль основных параметров диффузионных структур	170
Глава шестая. Метод эпитаксии	174
§ 6.1. Основные сведения об эпитаксии	174
§ 6.2. Эпитаксия кремния	176
§ 6.3. Эпитаксия германия	180
§ 6.4. Эпитаксия арсенида галлия	182
§ 6.5. Легирование в процессе эпитаксии	185
§ 6.6. Дефекты эпитаксиальных пленок	187
§ 6.7. Методы исследования и контроля эпитаксиальных пленок	189
Глава седьмая. Эллионика	193
§ 7.1 Основы электронно-лучевой обработки	193
§ 7.2. Применение электронно-лучевых процессов	196
§ 7.3. Взаимодействие ускоренных ионов с твердым телом	198
§ 7.4. Применение ионного легирования	206
§ 7.5. Методы контроля эллионных структур	210
§ 7.6. Использование оптических квантовых генераторов	212
Глава восьмая. Метод конденсации в вакууме	214
§ 8.1. Основные положения кинетической теории газов	214
§ 8.2. Термическое испарение	218
§ 8.3. Катодное распыление	227
§ 8.4. Создание омических контактов	233
§ 8.5. Создание тонкопленочных пассивных элементов	238
§ 8.6. Контроль качества тонких пленок	245
Глава девятая. Методы защиты поверхности <i>p-n</i>-переходов	252
§ 9.1. Физика поверхности <i>p-n</i> -перехода	252
§ 9.2. Влияние поверхности на электрические характеристики <i>p-n</i> -переходов	255
§ 9.3. Защита лаками и эмалями	256
§ 9.4. Защита вазелинами	258
§ 9.5. Защита силированием	258
§ 9.6. Защита пленками окислов металлов	261
§ 9.7. Защита гидрофобными пленками	263
§ 9.8. Защита окислением	264
§ 9.9. Защита пленками нитрида кремния	271
§ 9.10. Защита с помощью легкоплавких стекол	277
Глава десятая. Сборка и герметизация полупроводниковых приборов	282
§ 10.1. Сборка полупроводниковых приборов	282
§ 10.2. Герметизация с помощью стеклянных, металлостеклянных и металлокерамических корпусов	291
§ 10.3. Герметизация корпусов с помощью пластмасс	296
Глава одиннадцатая. Конструктивное оформление полупроводниковых приборов	303
§ 11.1. Назначение корпусов и теплоотвод в них	303
§ 11.2. Корпусы диодов общего назначения	307
§ 11.3. Корпусы диодов СВЧ	317
§ 11.4. Корпусы туннельных диодов	323
§ 11.5. Корпусы транзисторов и тиристоров	325
§ 11.6. Корпусы фотоприемников и источников света	334
§ 11.7. Корпусы диодных матриц, интегральных и гибридных схем	338

Глава двенадцатая. Методы измерения и испытания полупроводниковых приборов	342
§ 12.1. Категории испытаний	342
§ 12.2. Измерение электрических параметров	346
§ 12.3. Виды испытаний	355
§ 12.4. Надежность приборов	362
§ 12.5. Методы неразрушающего контроля качества приборов	366
Глава тринадцатая. Технологические особенности изготовления интегральных схем	368
§ 13.1. Классификация	368
§ 13.2. Изготовление полупроводниковых интегральных схем	371
§ 13.3. Методы изоляции	374
§ 13.4. Компоненты схем	379
Приложения	384
Литература	397

Анатолий Иванович Курносов,
Владимир Васильевич Юдин

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

Научный редактор Ю. Р. Носов
Редактор издательства Л. А. Романова
Обложка художника В. У. Интойо
Художественный редактор Н. Е. Ильенко
Технический редактор Е. И. Герасимова
Корректор М. М. Малиновская

Т—03586. Сдано в набор 31/VIII 1973 г. Подп. в печ. 2/IV 1974 г.
Формат 60×90¹/₁₆. Бум. тип. № 3. Объем 25 п. л. Уч.-изд. л. 25,32.
Изд. № ЭР—148. Тираж 25.000 экз. Зак. № 3897. Цена 1 руб. 02 к.

План выпуска литературы для вузов и техникумов
издательства «Высшая школа» на 1974 г. Позиция № 135.
Москва, К-51, Неглинная ул., д. 29/14,
Издательство «Высшая школа»

Типография им. Анохина Управления по делам издательства,
полиграфии и книжной торговли Совета Министров Карельской АССР

1 р. 02 к.

24
28947
a

ИЗДАТЕЛЬСТВО МОСКВА
1974 ГОД
ВЫСШАЯ ШКОЛА

