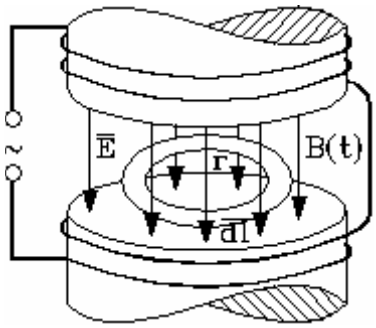
В.Л. Бурковский Ю.Н. Глотова
Д.А. Ефремов А.В. Романов

ФИЗИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ И ЭФФЕКТЫ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Учебное пособие



Воронеж 2007

ГОУВПО «Воронежский государственный
технический университет»

В.Л. Бурковский Ю.Н. Глотова
Д.А. Ефремов А.В. Романов

ФИЗИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ И ЭФФЕКТЫ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Утверждено Редакционно-издательским советом
университета в качестве учебного пособия

Воронеж 2007

УДК 62-83(075.8)

Физические явления и эффекты в технических системах: учеб. пособие / В.Л. Бурковский, Ю.Н. Глотова, Д.А. Ефремов, А.В. Романов. Воронеж: ГОУВПО «Воронежский государственный технический университет». 2007. 247 с.

В учебном пособии дан обзор физических законов, явлений и эффектов, используемых или перспективных для использования в сложных технических системах. Издание соответствует требованиям Государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования по направлениям 140600 "Электротехника, электромеханика и электротехнологии", 220200 «Автоматизация и управление», специальностям 140604 "Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов", 220201 «Управление и информатика в технических системах», дисциплинам «Физические основы электроники», «Технические средства автоматики»

Издание предназначено для студентов технических специальностей очной формы обучения, аспирантов и специалистов, занимающихся вопросами разработки сложных технических систем.

Ил. 23. Библиогр.: 6 назв.

Рецензенты: кафедра автоматизации технологических процессов Воронежского государственного архитектурно-строительного университета (зав. кафедрой д-р техн. наук, проф. В.Д. Волков);
д-р физ.-мат. наук, проф. А.А. Щетинин

© Бурковский В.Л., Глотова Ю.Н., Ефремов Д.А., Романов А.В., 2007

© Оформление. ГОУВПО «Воронежский государственный технический университет», 2007

ВВЕДЕНИЕ

Создавая свои первые технические системы (ТС), человек использовал в них *макрофизические* (в частности, макромеханические) свойства окружающего его мира. Это не случайно, так как научное познание природы началось исторически именно с механических процессов на уровне вещества. Вещество с его внешними формами и геометрическими параметрами является *объектом, непосредственно данным человеку в ощущениях*. Это тот уровень организации материи, на котором она предстает перед человеком как *явление*, как *форма*, как *количество*. Поэтому каждый технологический метод воздействия и контроля соответствовал (во многих современных технических системах и сейчас соответствует) простейшей форме движения материи – механической.

С развитием науки и техники методы совершенствуются, но в их соотношении можно проследить известные изменения. Механические методы в большинстве случаев заменяются более эффективными физическими и химическими методами. Например, вместо механического дробления руды и подъема ее на поверхность получают распространение методы выщелачивания рудного тела и получения раствора металла с последующим его выделением химическим путем.

Дальнейшее развитие приводит к использованию воздействий сильных электрических, магнитных, оптических полей, которые способны изменить *внутренние* свойства вещества. Другими словами происходит переход от *макротехнологии* к *микротехнологии*, которая основывается на совершенно иных принципах.

Микротехнология строится на основе применения к производству современных достижений химической физики, ядерной физики, квантовой механики. Это новая ступень взаимодействия человека и природы, и это взаимодействие происходит на языке законов природы. Здесь нет инструмента непосредственного воздействия, орудия труда или рабочей части

машины, как это имеет место при механических методах. Эти функции выполняют частицы веществ, участвующих в процессе – молекулы и атомы, причем на этом уровне процессы происходят бесшумно, безотходно и полностью автоматически.

Переход от макрофизических методов воздействия к микрофизическим позволяет значительно упростить любой технологический процесс, добиться при этом большего экономического эффекта, получить безотходные процессы. Надо только помнить, что безграничность возможностей научно-технического прогресса может успешно реализоваться лишь при соблюдении границ возможного в самой природе.

В основе методов воздействия или контроля в современных сложных технических системах всегда лежит какой-либо *первичный физический эффект* (термостойкость, электропроводность, фотоэлектрические явления и т.п.).

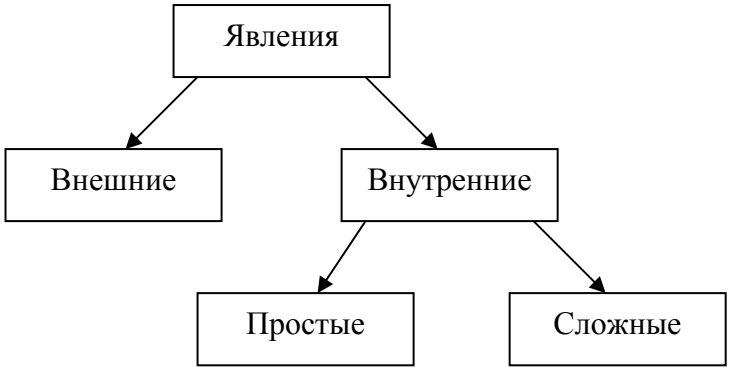
Существует множество физических явлений и эффектов, видов преобразования свойств вещества и энергии, которые можно использовать в технических системах.

В первую очередь эти явления используются в *сенсорах* (датчиках), являющихся источником информации о текущем состоянии технической системы. Датчики сами по себе могут иметь сложную структуру, используя несколько преобразований контролируемой физической величины. Выходные сигналы сенсоров, как правило, являются электрическими.

После переработки информации, поступившей от датчиков, в ТС вырабатывается управляющее воздействие, которое реализуется в *исполнительных механизмах* (ИМ) также с использованием физических свойств материи.

Знание физических законов, явлений и эффектов помогает лучше понять принципы работы технических систем, их фундаментальные физические возможности и ограничения.

Рассмотрим один из вариантов классификации физических законов, явлений и эффектов [1], показанный на рисунке.



Классификация физических явлений
и эффектов

Внешние эффекты и явления – это когда под воздействием воспринимаемой физической величины изменяется положение какой-либо части (органа) элемента, которое затем может посредствам дополнительных преобразований превратиться в перемещение индикатора или входного органа ИМ. Типичным примером является отклонение рамки с током в магнитном поле – принцип работы стрелочных индикаторов.

Внутренние эффекты позволяют получить непосредственную функциональную связь между изменением воздействия исходной физической величины и электрическими, магнитными и другими свойствами и параметрами вещества.

Внутренние эффекты в свою очередь подразделяются на *простые* и *сложные* внутренние эффекты.

Простые внутренние эффекты – эффекты, когда выходной сигнал появляется в результате только одного воздействия (механического, теплового или др.). Другие воздействия считаются несущественными, хотя реально всегда имеют место.

Сложные эффекты – когда естественный выходной сигнал определяется результатом действия не менее двух различных внешних воздействий на вещество.

Как воздействие, так и выходной сигнал могут быть *механическими*, *тепловыми*, *оптическими*, *электрическими*, *магнитными*, *физико-химическими* и др. Воздействия одного типа могут одновременно приводить к различным физическим эффектам. Например, механическое воздействие на вещество приводит к механическому эффекту в виде упругой деформации, к тепловому эффекту (нагреву), электрическому эффекту в форме изменения электрического сопротивления, к изменению оптической плотности и т.д. Любое из этих явлений может быть положено в основу создания соответствующего сенсора. Примером *двойных внутренних эффектов* являются фотопьезоэффект, термоэлектрический эффект, магнитотепловые эффекты и др.

Описанию первичных физических эффектов, используемых в науке и технике, посвящено данное учебное пособие, которое предназначено в первую очередь для специалистов, занимающихся вопросами изучения и разработки различных технических систем.

1. МЕХАНИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ И ДЕФОРМАЦИЯ

1.1. Силы инерции

Силы инерции возникают при движении тел с *ускорением*, т.е. в тех случаях, когда они изменяют свое *количество движения*. Если на тело действует сила, приложенная к его поверхности, то возникающая при этом сила инерции слагается из сил инерции его элементарных частиц как бы последовательно; более удаленные от места приложения действующей на тело силы частицы "давят" на более близкие. Во всем объеме тела возникают напряжения, приводящие к смещениям частиц тела. Этот эффект используется в различных инерционных выключателях, переключателях и акселерометрах. Силу инерции можно также использовать для создания дополнительного давления в различных технологических процессах.

Центробежная сила инерции возникает под действием *центростремительной силы* при вращении. Эта сила действует всегда только в одном направлении – от центра вращения, при этом энергия тела сохраняется. Примером использования может служить способ шлифования криволинейных поверхностей движущейся абразивной лентой. Фактически это есть сила взаимодействия между телом *вращающимся* и телом, *удерживающим его* на окружности. Их взаимодействие осуществляется посредством каких-либо связей – стержня, электрического или гравитационного поля и т.д. В случае разрыва связей, соединяющих взаимодействующие тела, оторвавшееся тело будет двигаться прямолинейно (*по инерции*). Чем больше масса вращающегося тела и чем дальше она отнесена от центра вращения, тем большим *моментом инерции* обладает тело.

Примером использования может служить способ регулирования энергии ударов в кузнечно-прессовых машинах ударного действия, заключающийся в изменении момента инерции маховых масс путем подачи или отвода жидкости в их внутренние полости.

Силы, возникающие в процессе вращательного движения, можно использовать для ускорения некоторых технологических процессов. Например, подвергая нагретую жидкость действию центробежного поля можно значительно увеличить производительность парогенераторов.

Другим примером является способ изготовления изделий с параболической поверхностью, основанный на использовании вращения резервуара с жидкостями разной плотности. На каждый элемент объема вращающейся вязкой жидкости действуют две силы: центробежная и сила тяжести. Обе силы пропорциональны плотности жидкостей, поэтому на форму параболического мениска плотность не влияет, т.е. любые жидкости будут иметь одинаковые формы. В данном случае в качестве формовочного элемента используют жидкость с большим удельным весом, на которую наносят жидкость с меньшим удельным весом, затвердевающую при вращении резервуара.

Еще одна особенность вращающегося тела в том, что оно обладает *гироскопическим эффектом* – способностью сохранять в пространстве неизменное направление оси вращения. Гироскопы широко применяются в технике. Они являются одним из основных элементов современных систем управления судами, самолетами, планетоходами, космическими кораблями. При силовом воздействии с целью изменить направление оси вращения возникает *прецессия гироскопических систем*, т.е. движение оси вращения гироскопа по круговой конической поверхности [3]. Одновременно ось вращения может совершать *нутационные* колебания. Прецессия без нутационных колебаний называется *регулярной*. Измеряя прецессию гироскопа можно определить величину воздействующих внешних сил.

Поскольку при вращательном движении само тело остается на одном месте, а только участки тела совершают круговые движения, то во вращающемся теле можно *аккумулировать кинетическую энергию*, которую затем можно преобразовывать в кинетическую энергию поступательного движения.

На этом принципе работают инерционные аккумуляторы, используемые, например, в *гиробусах*. Типичным примером использования запасенной кинетической энергии является применение в ТС больших маховых масс (маховиков).

1.2. Гравитация

Кроме того, что масса является мерой инертности тела, любая масса является источником *гравитационного поля*, посредством которого осуществляется взаимодействие масс. *Гравитационные силы* самые слабые из всех сил, известных науке, но, тем не менее, при наличии больших масс (например, Земля) эти силы во многом предопределяют поведение физических систем. Количественно гравитационные взаимодействия описываются законом всемирного тяготения Ньютона:

$$F = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}, \qquad (1.1)$$

где $G = 6{,}67 \cdot 10^{-11}$ Н·м^2/кг^2 – гравитационная постоянная;

m_1, m_2 – массы взаимодействующих тел;

r – расстояние между массами.

Пропорциональность сил тяготения массе приводит к тому, что ускорение, приобретаемое в данной точке гравитационного поля различными телами, для всех тел одинаково (конечно, если на эти тела не действуют никакие другие силы – сопротивление воздуха и т.д.). Если рассматривать движение тел под действием силы тяжести Земли, то это движение будет равноускоренным – ускорение будет постоянно по величине и по направлению. Все отклонения от постоянства ускорения имеют те или иные конкретные причины – вращение Земли, ее несферичность, сопротивление воздуха или иной среды, наличие электрических или магнитных полей и т.д. Постоянство

ускорения – это возможность определения массы посредством измерения веса, т.е. это часы, датчики времени и т.д.

1.3. Трение и износ

Трение представляет собой силу, возникающую при относительном перемещении двух соприкасающихся тел в плоскости их касания. Различают силы *трения качения*, *трения скольжения* и *трения покоя*. Ввиду зависимости сил трения от многих, порой очень трудно учитываемых факторов, предпочитают пользоваться *феноменологической теорией трения*, описывающей в основном факты, а не их объяснения.

Феноменологическая теория трения базируется на представлении о том, что касание твердых тел имеет место лишь в отдельных пятнах, на которых действуют силы диффузии, химической связи, адгезии и т.п. При скольжении каждое пятно касания (так называемая *фрикционная связь*) существует ограниченное время. Сумма всех сил, действующих на пятна касания, усредненная по времени и по поверхности носит название *силы трения*. Продолжительность существования фрикционной связи определяет такие важные величины, как износостойкость, температуру пограничного слоя, работу по преодолению сил трения. Характерно, что при трении наблюдаются значительные деформации пограничного слоя, сопровождающиеся структурными превращениями и избирательной диффузией. Учет всех этих процессов затруднен из-за сильной зависимости от температуры, которая на пятнах касания возрастает очень быстро и может достигать несколько сот градусов.

Обычно трение качения, при котором основная работа затрачивается на передеформирование материала, много меньше трения скольжения. Но как только скорость качения достигает скорости распространения деформаций, трение качения резко возрастает; поэтому при больших скоростях предпочтительнее наличие трения скольжения. Трение покоя (так называемое *«залипание»*) больше трения движения, и этот факт снижает чув-

ствительность точных приборов. Избавиться от этого недостатка можно, например [4], конструктивным выполнением втулки подшипника из пьезоэлектрического материала и покрытие ее электропроводящей фольгой, по которой пропускают переменный ток, заставляющий вибрировать пьезоэлектрик. Таким образом, трущиеся элементы конструкции совершают колебания, и трение покоя заменяется трением движения, увеличивая чувствительность прибора.

Установлено, что при достаточно сильном облучении одной из трущихся поверхностей ускоренными частицами (например, атомами гелия) коэффициент трения падает в десятки и даже сотни раз, достигая сотых и тысячных долей единицы. Для возникновения *эффекта сверхнизкого трения* необходимо, чтобы процесс трения осуществлялся в вакууме. Переход в состояние сверхнизкого трения может осуществляться далеко не всеми телами. Этой способностью обладают вещества со слоистой кристаллической структурой. Исследования показали, что очень тонкий поверхностный слой вещества при совместном действии трения и облучения испытывает сильную ориентацию, благодаря чему его структурные элементы располагаются параллельно плоскости контакта, за счет чего сильно уменьшается способность вещества образовывать сильные адгезионные связи. Роль облучения сводится к очень интенсивной очистке поверхности контакта от примесей и от молекул воды, препятствующих ориентации. Водная пленка к тому же сама является источником сильных адгезионных связей.

Износом называется изменение размеров, формы, массы технического объекта или состояния его поверхности вследствие остаточной деформации от постоянно действующих нагрузок либо из-за разрушения поверхностного слоя при трении.

Трение и износ обычно считаются неразрывно связанными явлениями. Однако конструктивное решения подшипника, предложенное Крагельским И.В. и Гаркуновым Д.Н. [4], позволяет разъединить это невыгодное содружество и говорить об *эффекте технической безизносности*.

Рассмотрим подшипник на основе пары «сталь – бронза» с глицериновой смазкой. Глицерин, протравливая поверхность бронзы, способствует покрытию ее рыхлым слоем чистой меди, атомы которой легко переносятся на стальную поверхность. При работе устанавливается динамическое равновесие – атомы меди летают туда и обратно, и износа практически нет, ибо медный порошок прочно удерживает глицерин, который в свою очередь, защищает медь от кислорода. Таким образом, практически ликвидируется самый опасный вид износа – *схватывание*. В авиации уже испытаны бронзовые амортизационные буксы в стальной стойке шасси самолета.

1.4. Деформация

В самом общем случае под *деформацией* понимается такое изменение положение точек тела, при котором меняется взаимные расстояния между ними. Причинами деформаций, сопровождающихся изменениями формы и размеров сплошного тела, могут служить механические силы, электрические, магнитные, гравитационные поля, изменения температуры, фазовые переходы и т.д.

В теории деформации твердых тел рассматриваются многие типы деформаций – *сдвига*, *кручения* и т.д. Формальное описание их можно отыскать, например, в [2].

Если деформация исчезает после снятия нагрузки, то она называется *упругой*, в противном случае имеет место *пластическая деформация*. Для упругих деформаций справедлив закон Гука, согласно которому деформация пропорциональна механическому напряжению. Например, если стержень длиной L с поперечным сечением S растянут продольной силой F,то его удлинение ΔL:

$$\Delta L = \frac{F \cdot L}{E \cdot S}, \qquad (1.2)$$

где E– модуль упругости (модуль Юнга).

Если рассматривать деформации на атомарном уровне, то упругая деформация характеризуется, прежде всего, практически одинаковым изменением расстояния между всеми атомами кристалла; при пластических деформациях возникают *дислокации* – линейные дефекты кристаллической решетки. Величина деформации любого вида определяется свойствами деформируемого тела и величиной внешнего воздействия; следовательно, имея данные о деформации, можно судить либо о свойствах тела, либо о воздействиях; в некоторых случаях и о том и о другом, а в некоторых – о степени изменения свойств деформируемого тела при том или ином внешнем воздействии.

В 1975 году зарегистрирована *зависимость пластической деформации металла от его проводимости* [4]. При переходе в сверхпроводящее состояние повышается пластичность металла. Обратный переход понижает пластичность. Дело в том, что макроскопическая пластическая деформация осуществляется перемещением большого количества дислокаций, способность же кристалла оказывать сопротивление пластической деформации определяется их подвижностью.

Эффект наблюдался на многих сверхпроводниках при различных способах механических испытаний. В экспериментах было обнаружено значительное повышение пластичности металла (*разупрочнение*) при переходе его в сверхпроводящее состояние. Величина эффекта в некоторых случаях достигла нескольких десятков процентов. Детальное изучение явления привело к выводу, что "виновником" его следует считать изменение при сверхпроводящем переходе тормозящего воздействия электронов проводимости на дислокации. Силы "трения" отдельной дислокации об электроны в несверхпроводящем металле резко уменьшаются при сверхпроводящем переходе, который помог выявить роль электронов и позволил оценить электронную силу торможения. Стала очевидна прямая связь механической характеристики металла (пластичности) с чисто электронной характеристикой (проводимостью). Главный вы-

вод проведенных исследований – электроны металлов тормозят дислокации *всегда*.

Но если электроны – главная причина торможения дислокаций, то изменение пластичности металла должно происходить не только в сверхпроводящем состоянии. Действительно, магнитное поле в сочетании с низкой температурой способны изменять буквально все свойства вещества: теплоемкость, теплопроводность, упругость, прочность и даже цвет. У материала появляются новые электрические свойства. Превращения происходят практически мгновенно – за $10^{-11}..10^{-12}$ с.

Открытие *электропластического эффекта* в металлах привело к более глубокому пониманию механизма пластической деформации. Появилась возможность управлять механическими свойствами металлов, в частности, процессом обработки металлов давлением. Например, деформировать вольфрам при температурах не превышающих 200 °С и получить из него прокат с высоким качеством поверхности. В экспериментах с импульсным током было найдено, что электрический ток увеличивает пластичность и уменьшает хрупкость металла. Если создать хорошие условия теплоотвода от деформируемых образцов и пропускать по ним ток высокой плотности 10^4 … 10^6 А/см^2, то величина эффекта будет порядка десятков процентов. Электрический ток вызывает также увеличение скорости релаксации напряжений в металле и оказывается удобным технологическим фактором для снятия внутренних напряжений. Электропластический эффект линейно зависит от плотности тока (вплоть до 10^5 А/см^2), более ярко выражен при импульсном токе, а при переменном токе отсутствует.

Явление разупрочнения металла при сверхпроводящем переходе связано с электропластическим эффектом. Однако если в первом случае в основе лежит уменьшение сопротивления движению и взаимодействию дислокаций при устранении из металла *газа свободных электронов*, во втором случае причиной облегчения деформации является участие самого элек-

тронного газа в пластической деформации металла. Электронный газ из пассивной и тормозящей среды превращается в среду, имеющую направленный дрейф и поэтому ускоряющую движение и взаимодействие дислокаций (или снижающую обычное электронное торможение дислокаций).

Фотопластический эффект. Естественно ожидать изменение пластических свойств и при других воздействиях на электронную структуру образца. Например, воздействие светового излучения на кристаллы полупроводника вызывает в них перераспределение электрических зарядов и, соответственно, изменение пластических свойств. Это явление зарегистрировали советские ученые Осиньян и Савченко [4]. Максимальное изменение сопротивления пластической деформации кристаллов полупроводников под действием света происходит при длинных волнах, соответствующих краю собственного поглощения кристаллов. В опытах образцы полупроводников сжимались и растягивались до наступления пластической деформации. Затем образец освещался светом. Вызванное перераспределение носителей заряда оказывало тормозящее действие на дислокации носителей пластической деформации, тотчас прочность образца увеличивалась почти вдвое. При выключении света прочность уменьшалась и достаточно быстро достигала своего первоначального значения. Дальнейшие исследования привели к наблюдению еще одного интересного явления – *инфракрасного гашения фотопластического эффекта*.

Эффект фотопластичности может быть использован для создания элементов автоматики, новой технологии полупроводников, для разработки качественно новых приемников видимого светового и инфракрасного излучения.

Эффект Пойнтинга. Английским физиком Д.Г. Пойнтингом было установлено, что при закручивании стальных и медных проволок они не только закручиваются, но также упруго удлиняются и увеличиваются в объеме. Удлинение проволоки пропорционально квадрату угла закручивания, а при

заданном значении угла удлинение пропорционально квадрату радиуса. Диаметр проволоки при закручивании уменьшается, величина радиального сжатия при этом пропорциональна квадрату угла закручивания. Пойнтингом было доказано, что удлинение при закручивании не связано с изменениями модуля Юнга – это позволяет предполагать, что свойства материала остаются без изменений. Эффект используется в машиностроении и в некоторых областях измерительной техники.

Эффект Александрова. Известно, что при упругом ударе коэффициент передачи энергии от ударяющего тела к ударяющему зависит от отношения их масс – чем больше это отношение, тем больше передаваемая энергия. Поэтому в машинах ударного действия всегда старались учесть это соотношение, по крайней мере, до 1954 года, когда Е.В. Александровым [4] было установлено, что с ростом соотношения масс коэффициент передачи растет лишь до *определенного критического значения*, определяемого свойствами и конфигурацией соударяющихся тел. При увеличении отношения масс соударяющихся тел сверх критического передача энергии определяется не реальным соотношением масс, а критическим значением коэффициента передачи энергии. Соответственно, коэффициент восстановления определяется формой и массой соударяющихся тел и степенью рассеяния энергии. Очевидно, что эффект обязательно должен учитываться при проектировании машин ударного действия.

На основе открытия Александрова создан так называемый *механический полупроводник*, в котором передача энергии практически осуществляется только в одном направлении, независимо от жесткости опоры. Так же на этой основе создан новый отбойный молоток, который обладает меньшим весом и обеспечивает большую производительность.

Сплавы с памятью. Некоторые сплавы металлов (титан-никель, золото-кадмий, медь-алюминий) обладают *эффектом памяти*. Если из такого сплава изготовить деталь сложной

формы, а затем ее деформировать, то после нагрева до определенной температуры деталь восстанавливает в точности свою первоначальную форму.

Наиболее уникальны по свойствам сплавы из титана и никеля (ТН или *нитинол*). ТН сплавы развивают большие усилия при восстановлении своей формы, легко обрабатываются, экономичны, коррозионностойки, хорошо гасят вибрации. Из нитинола, например, делают антенны для спутников. В момент запуска антенна свернута, занимает очень мало места. В космосе же нагретая солнечными лучами, она принимает сложнейшие формы, приданные ей еще на Земле.

Сплавы "с памятью" открывают новые возможности в деле непосредственного преобразования тепловой энергии в механическую. Перспективы их использования самые заманчивые – тепловая автоматика, быстродействующие датчики, термоупругие элементы, реле, приборы контроля, тепловые домкраты, напряженный железобетон и многое другое.

2. МОЛЕКУЛЯРНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

2.1. Тепловое расширение вещества

Все вещества (газы, жидкости, твердые тела) имеют *атомно-молекулярную структуру*. Атом, равно как и молекулы, во всем диапазоне температур находятся в *непрерывном хаотическом движении*. С увеличением температуры повышается скорость перемещения отдельных атомов и молекул (в газах и жидкостях) или их колебания – в кристаллических решетках твердых тел. Поэтому с ростом температуры увеличивается среднее расстояние между атомами и молекулами, в результате чего газы, жидкости и твердые тела *расширяются* при условии, что внешнее давление остается постоянным. Коэффициенты расширения различных газов близки между собой (около 0,0037 $°C^{-1}$); для жидкостей они могут различаться на порядок (ртуть – 0,00018 $°C^{-1}$, глицерин – 0,0005 $°C^{-1}$, ацетон – 0,0014 $°C^{-1}$, эфир – 0,007 $°C^{-1}$). Величина теплового расширения твердых тел определяется их строением. Структуры с плотной упаковкой (алмаз, платина, отдельные металлические сплавы) мало чувствительны к температуре, рыхлая, неплотная упаковка вещества способствует сильному расширению твердых тел (алюминий, полиэтилен).

При температурном расширении или сжатии твердых тел развиваются огромные силы, что можно использовать в соответствующих технологических процессах. Например, это свойство использовано в электрическом домкрате для растяжения арматуры при изготовлении напряженного железобетона. Принцип действия очень прост: к растягиваемой арматуре прикрепляют стержень из металла с подходящим коэффициентом термического расширения. Затем его нагревают током от сварочного трансформатора, после чего стержень жестко закрепляют и убирают нагрев. В результате охлаждения и сокращения линейных размеров стержня развивается тянущее усилие порядка сотен тонн, которое растягивает холодную ар-

матуру до необходимой величины. Так как в этом домкрате работают молекулярные силы, он практически не может сломаться. С помощью теплового расширения жидкости также можно создавать необходимые гидростатические давления.

Тепловое расширение помогает решать технические задачи, которые обычными средствами реализуются с большим трудом. Например, для прочного охвата вала ступицу перед запрессовкой нагревают, а после охлаждения надетой на вал ступицы силы термического сжатия делают этот узел практически монолитным. Но как после этого разобрать данное соединение? Механически – почти не возможно без риска испортить деталь. Но достаточно сделать вал или ввести в сопрягаемое пространство прокладку из металла с меньшим коэффициентом термического расширения, как техническое противоречие исчезает.

Общеизвестные *биметаллические пластинки* – соединенные каким-либо способом две металлические полоски с различным коэффициентом терморасширения. Это надежный преобразователь тепловой энергии в механическую.

Использование эффекта различного терморасширения у металлов позволило создать *тепловой диод*. Тепловое расширение, как процесс обратимый и легко управляемый, применяется при проведении прецизионных работ, таких, как микроперемещение объектов, например, в поле зрения микроскопа.

2.2. Фазовые переходы, агрегатные состояния веществ

При *фазовых переходах первого рода* скачком изменяются плотность веществ и энергия тела; очевидно, при фазовых переходах первого рода *всегда* выделяется или поглощается конечное количество тепловой энергии. При *фазовых переходах второго рода* плотность и энергия меняются непрерывно, а скачок испытывает такие величины, как теплоемкость, теплопроводность; фазовые переходы второго рода не сопровожда-

ются поглощением или выделением энергии. Примером фазового перехода второго рода может служить переход жидкого гелия в сверхтекучее состояние, переход ферромагнетика в парамагнетик при точке Кюри, переупорядочение кристаллов сплавов и др. Характерным примером фазового перехода первого рода может служить переход вещества из одного *агрегатного состояния* в другое.

В физике рассматривают четыре агрегатных состояния: *твердое*, *жидкое*, *газообразное* и *плазменное*. При переходах из одного агрегатного состояния в другое, как уже отмечено выше, обязательно выделяется или поглощается тепло. Переход от более упорядоченных структур к менее упорядоченным требует притока тепла извне, при обратных переходах выделяется такое же количество тепла, которое поглощается при прямом переходе. Отметим, что, как правило, переход из одного агрегатного состояния в другое обычно имеет место при постоянной температуре, таким образом, фазовый переход является *источником энергии* или *поглотителем тепла*, работающим практически при постоянной температуре.

Нередко изменения агрегатного состояния вещества позволяет очень просто решать до этого почти неразрешимые технические задачи. Например, как заполнить послойно емкость смешивающимися между собой жидкостями? Можно предложить такой способ – первую жидкость, налитую в емкость, замораживают, следующую жидкость наливают на верхний слой замороженной жидкости, а затем последнюю размораживают.

При изменениях агрегатного состояния резко изменяются электрические характеристики вещества. Так, если металл в твердом или жидком виде – проводник, то пары металла – типичный диэлектрик.

Как отмечалось выше, перекристаллизация металла является фазовым переходом второго рода. В момент перекристаллизации возникает *эффект сверхпластичности металла*. В

этот момент металл, ранее имевший прочную и сверхпрочную структуру, становится пластичным как глина. Но длится это явление считанные мгновения и протекает в очень узком, причем непостоянном интервале температур. Непосредственно зафиксировать момент, когда начинается фазовое превращение, невозможно, но известно, что при перестройки кристаллической решетки металл начинает переходить из парамагнитного состояния в ферромагнитное, что сопровождается резким изменением его магнитной проницаемости. Это явление также может быть использовано в технических системах.

У сталей существует еще один фазовый переход, идущий при очень низких температурах (ниже минус -60 °С), когда *аустенит* в стали (это структурная составляющая железоуглеродистых сплавов – твердый раствор углерода (до 2 %), названная по имени английского металлурга У. Робертса-Остена [1]) переходит в *мартенсит* (от имена немецкого металловеда А. Мартенса – структурная составляющая кристаллических твердых тел, возникающая в результате *мартенситного превращения*). И в этот момент наблюдается эффект сверхпластичности. Это значит, что вообще можно отказаться от горячей штамповки, совместив этот процесс в сверхпластичном состоянии с закалкой стали в жидком азоте.

Интересно, что мартенсит имеет меньшую плотность, чем аустенит. Если к изогнутой деформацией части детали приложить хотя бы кусок "сухого льда" (температура -67 °С), то обрабатываемый участок расширится, распрямив тем самым деталь. При этом, поскольку фазовый переход необратим, то самопроизвольного восстановления кривизны в дальнейшем не произойдет. Превращение 10 % аустенита в мартенсит вызывает увеличение 100 миллиметрового диаметра изделия на 130 мкм, а переход 40 % аустенита в мартенсит – 400 мкм. К плюсам метода надо добавить наличие эффекта вне зависимости от времени выдержки и тот факт, что обработку изогнутых деталей холодом, как и радиацией, можно вести в сборке.

Изменяется плотность при фазовых переходах и у других веществ (вода, олово), что позволяет использовать их для получения высоких давлений. При фазовых переходах второго рода также наблюдаются интересные изменения макроскопических свойств объектов (рассмотрены в п. 7.8). У хрома есть любопытная температурная точка 37 °С, в котором он претерпевает фазовый переход, при этом у него скачком изменяется модуль упругости. На этом свойстве основан ряд изобретений, например, изготовление первичного температурного сенсора из чистого хрома.

2.3. Поверхностное натяжение жидкостей

Любая жидкость ограничена *поверхностями раздела*, отделяющими ее от какой-либо другой среды – вакуума, газа, твердого тела, другой жидкости. Энергия поверхностных молекул жидкости отлична от энергии молекул внутри жидкости именно в силу того, что те и другие имеют различных соседей – у внутренних молекул все соседи одинаковы, у поверхностных – такие же молекулы расположены только с одной стороны. Поверхностные молекулы при заданной температуре имеют определенную энергию; перевод этих молекул внутрь жидкости приведет к тому, что их энергия изменится (без изменения общей энергии жидкости).

Разность этих энергий называется *поверхностной энергией*. Она пропорциональна числу поверхностных молекул (т.е. площади поверхности раздела) и зависит от параметров соприкасающихся сред. Эта зависимость обычно характеризуется *коэффициентом поверхностного натяжения*.

Наличие поверхностной энергии вызывает появление сил, стремящихся сократить поверхность раздела. Такое стремление есть следствие общего физического закона, согласно которому любая система стремится свести свою потенциальную энергию к минимуму. Жидкость, находящаяся в невесомости, будет принимать форму шара, поскольку поверхность шара

минимальна среди всех поверхностей, ограничивающих заданный объем.

Конечно, поверхностные силы существуют и в твердых телах, но их незначительная величина не позволяет изменить форму тела, хотя при определенных условиях поверхностные силы могут привести к сглаживанию ребер кристаллов.

При контакте жидкости с твердой поверхностью говорят о *смачивании*. В зависимости от числа фаз, участвующих в смачивании, различают *иммерсионное смачивание* (смачивание при полном погружении твердого тела в жидкость), в котором участвуют только две фазы, и *контактное смачивание*, в котором наряду с жидкостью с твердым телом контактирует третья фаза – газ или другая жидкость. Характер смачивания определяется, прежде всего, физико-химическими воздействиями на поверхности раздела фаз, которые участвуют в смачивании.

При контактном смачивании свободная поверхность жидкости около твердой поверхности (или около другой жидкости) искривлена и называется *мениском*. Линия, по которой мениск пересекается с твердым телом (или жидкостью), называется *периметром смачивания*. Явление контактного смачивания характеризуется краевым углом между смоченной поверхностью твердого тела (жидкости) и мениском в точках их пересечения (периметром смачивания) В зависимости от свойств соприкасающихся поверхностей происходит смачивание (вогнутый мениск) или несмачивание (выпуклый мениск) поверхности жидкостью. Примером практически несмачиваемого материала является фторопласт.

При смачивании (в том числе и при избирательном смачивании) выделяется *теплота смачивания*, которая является характеристикой иммерсионного смачивания, в том числе смачивания порошков. Теплоту смачивания используют для получения информации о свойствах тела (подложки).

При растекании жидкости по ее собственному монослою адсорбированному на высокоэнергетической поверхности на-

блюдается *эффект автофобности*. Эффект заключается в том, что при контакте жидкости, имеющей низкое поверхностное натяжение, с высокоэнергетическими материалами, происходит вначале полное смачивание, а затем, через некоторое время, условия полного смачивания перестают выполняться. В результате изменится направление движения периметра смачивания – жидкая пленка начинает собираться в каплю (или несколько капель) с конечным краевым углом. На ранее смоченных участках твердого тела остается прочно фиксированный монослой молекул жидкости. Эффект используется для нанесения монослойных покрытий на твердые материалы.

Эффект растекания жидкости под окисными пленками металлов. Обычно окисные пленки затрудняют смачивание твердых металлов из-за резкого различия химической природы окисла и металла. Тем не менее, во многих системах, несмотря на наличие окисной пленки, жидкие металлы смачивают поверхность твердого металла. Смачивание происходит вследствие проникновения расплава под окисный слой с последующим растеканием в своеобразном капиллярном "зазоре" между окисной пленкой и твердым металлом. Растекание может происходить не только под окисными пленками, но и под некоторыми твердыми покрытиями. Эффект зависит от напряжений, сжимающих тело или окисную пленку. Используется при пайке, сварке и склеивании.

2.4. Капиллярность

Трубки с очень узким каналом, систему сообщающихся пор (например, в горных породах, пенопластах и др.), мельчайшие сосуды диаметром от 2.5 до 3 мкм, пронизывающие органы и ткани у многих животных и человека, называют *капиллярами* [3].

Разность давлений в двух граничащих фазах (например, в жидкости и газе, находящихся в капилляре), обусловленная искривлением поверхности раздела фаз, называется *капилляр-*

ным давлением. Для выпуклой поверхности давление положительно, для вогнутой – отрицательно. Капиллярное давление определяет движение жидкостей в порах, влияет на кипение и конденсацию.

В 1806 году П. Лаплас установил закон, определяющий зависимость капиллярного давления P_σ от средней кривизны ε поверхности раздела граничащих фаз и поверхностного натяжения σ [3]:

$$P_\sigma = \varepsilon \cdot \sigma$$

Существует *капиллярная дефектоскопия*, основанная на проникновении некоторых жидких веществ в поверхностные макродефекты изделия под действием капиллярного давления, в результате чего повышается свето- и цветоконтрастность дефектного участка. Различают люминесцентный и цветовой методы капиллярной дефектоскопии.

Капиллярное испарение – увеличение испарения жидкости вследствие понижения давления насыщенного пара над выпуклой поверхностью жидкости в капилляре; используется для облегчения кипения путем изготовления шероховатых поверхностей.

Капиллярная конденсация – увеличение конденсации жидкости вследствие понижения давления насыщенного пара над вогнутой поверхностью жидкости в капилляре. Пар может конденсироваться при температуре выше точки кипения. Используется для осушки газов, в хроматографии.

Зависимость давления насыщенного пара над жидкостью или кристаллом от кривизны поверхности установлена в 1871 году У. Томсоном (Кельвином) и носит название *уравнения Кельвина*. Давление насыщенного пара над малыми капельками или кристаллами повышено (им свойственна повышенная растворимость), а в малых пузырьках или под вогнутым мениском давление понижено по сравнению с плоской поверхностью (поэтому возможна капиллярная конденсация).

С капиллярностью связаны различные эффекты.

Эффект капиллярного подъема (*опускания*) – возникает из-за различия давлений над и под поверхностью жидкости в капиллярном канале. Связь между характером смачивания и капиллярным давлением оказывает большое влияние на возможность проникновения жидкостей в поры и на их вытеснение из пор, что в свою очередь играет важную роль в процессах пропитки, фильтрации, сушки и т.д.

Ультразвуковой капиллярный эффект – увеличение скорости и высоты подъема жидкости в капиллярах при непосредственном воздействии ультразвука в десятки раз.

Термокапиллярный эффект – зависимость скорости растекания жидкости от неравномерности нагрева жидкого слоя. Эффект объясняется тем, что поверхностное натяжение жидкости уменьшается при повышении температуры. Поэтому при различии температур в разных участках жидкого слоя возникает движущая сила растекания, которая пропорциональна градиенту поверхностного натяжения жидкости. В результате возникает поток жидкости в смачивающей пленке. Влияние неравномерного нагрева различно для чистых жидкостей и растворов. У чистых жидкостей перетекание происходит от холодной зоны к горячей. При испарении, когда уменьшается поверхностное натяжение, жидкость начинает перетекать от горячей зоны к холодной. В общем случае движение жидкости определяется изменением поверхностного натяжения в зоне нагрева от температуры и испарением какого либо компонента.

Электрокапиллярный эффект – зависимость поверхностного натяжения на границе раздела твердых и жидких электродов с растворами электролитов или расплавами ионных соединений от электрического потенциала. Эта зависимость обусловлена образованием двойного электрического слоя на границе раздела фаз. Изменением потенциала можно осуществить инверсию смачивания – переход от несмачивания к смачиванию и наоборот.

2.5. Сорбция

Как уже отмечалось ранее, любая поверхность, вещества обладает *свободной энергией поверхности* (СЭП). Все поверхностные явления сводятся к взаимодействию атомов и молекул, которые происходят в двумерном пространстве при непосредственном участии СЭП. Любую твердую поверхность можно представить себе как "универсальный магнит", притягивающий любые частицы, оказавшиеся поблизости. Отсюда вывод: поверхность любого твердого тела обязательно "загрязнена" молекулами воздуха и воды. Опыт показывает, что чем выше степень дисперсности данного тела, тем больше количество частиц другого тела оно поможет поглотить своей поверхностью.

Процесс самопроизвольного "сгущения" растворенного или парообразного вещества (газа) на поверхности твердого тела или жидкости носит название *сорбции* (от латинского sorbeo – поглощаю). Поглощающее вещество называется *сорбентом*, а поглощаемое *сорбтивом* (*сорбатом*). В зависимости от того насколько глубоко проникают частицы различают *адсорбцию* (когда вещество поглощается на поверхности тела) и *абсорбцию* (когда вещество поглощается всем объемом тела). В зависимости от характера взаимодействия частиц сорбента и сорбтива, бывает *сорбция физическая*, где взаимодействие обусловлено силами *когезии* и *адгезии* т.е. силами межмолекулярного взаимодействия (*силами Ван-дер-Ваальса*) и химическая (*хемосорбция*).

Адгезией (от латинского adhaesio – прилипание) называется сцепление поверхностей разнородных тел. Благодаря адгезии возможны нанесение гальванический покрытий, склеивание, сварка и др., а также образование поверхностных пленок, например оксидных.

Когезия (от латинского cohaesus – связанный, сцепленный) – это сцепление (притяжение) молекул (атомов, ионов) в

физическом теле. Обусловлена силами Ван-дер-Ваальса, наиболее сильна в твердых телах и жидкостях.

Процесс, обратный сорбции называется *десорбцией*.

Особое положение занимает сорбционный процесс, называемый *капиллярной конденсацией*. Сущность этого процесса заключается не только в поглощении, но и в конденсации твердым пористым сорбентом, например, активизированным углем газов и паров.

Из всех перечисленных выше сорбционных явлений наибольшее практическое значение имеет адсорбция. Чем меньшей энергией обладают молекулы, тем легче они адсорбируются на твердой поверхности. С уменьшением температуры адсорбата (газа) адсорбция увеличивается, а с увеличением температуры – уменьшается.

При адсорбции молекулы газа, сталкиваясь с поверхностью, прекращают движение. Значит: они теряют энергию, а "лишняя" энергия должна выделяться. Вот почему при физической адсорбции выделяется тепло. Причем: последний процесс, если он идет в закрытом объеме, сопровождается понижением давления газа. При десорбции же давление газа – сорбтива увеличивается, при этом идет поглощение энергии. Это свойство используют в некоторых теплосиловых установках.

Очень интересные явления и эффекты происходят при адсорбции на поверхности полупроводников.

Фотоадсорбционный эффект. Это зависимость адсорбционной способности адсорбента-полупроводника от освещения. При этом эта способность может увеличиваться (положительный эффект) и уменьшаться (отрицательный фотоадсорбционный эффект). Эффект можно использовать, например, для регулирования давления в замкнутом объеме.

Электроадсорбционный эффект. Это зависимость адсорбционной способности от величины приложенного электрического поля. Оказывает влияние на фотоадсорбционный

эффект. Поле прилагают перпендикулярно поверхности полупроводника – адсорбента.

Адсорболюминесценция. Это люминесценция, возбуждаемая не светом, а самим актом адсорбции. Свечение длится до тех пор, пока идет процесс адсорбции, и погасает, когда адсорбция прекращается. Яркость свечения пропорциональна скорости адсорбции. Цвет свечения при адсорболюминесценции, как правило, тот же, что и при фотолюминесценции, т.е. определяется природой активатора, введенного в полупроводник, и не зависит от природы адсорбируемого газа. Адсорболюминесценция является одним из видов *хемолюминесценции*.

Радикало-рекомбинационная люминесценция (Р-РЛ). На поверхности полупроводника могут рекомбинировать приходящие из газовой фазы радикалы, например, атомы водорода. При этом происходит свечение полупроводника, которое длится до тех пор, пока на поверхности идет реакция рекомбинации. При Р-РЛ, как и при адсорболюминесценции, испускаются те же частоты, что и при фотолюминесценции. Они образуют полосу, которую называют обычно *основной полосой*. Следовательно, цвет люминесценции меняется при смене активатора, не зависит от природы активатора, но меняется при смене газа, участвующего в реакции (например, при замене водорода кислородом).

На примерах адсорболюминесценции и радикало-рекомбинационной люминесценции видно, что электронные процессы в полупроводнике связаны с химическими процессами, протекающими на его поверхности.

В результате адсорбции поверхность полупроводника заряжается. При адсорбции акцепторов она заряжается отрицательно, а при адсорбции доноров – положительно.

Адсорбционная эмиссия. Работа выхода электрона может изменяться под действием адсорбции. Это зависит от знака заряда поверхности при адсорбции, т.е. от природы адсорбируемого газа. В случае положительного заряда работа выхода

снижается, в случае отрицательного – возрастает. По ее изменению часто можно судить о составе газовой фазы. Давление газовой фазы также влияет на работу выхода.

Влияние адсорбции на электропроводность полупроводника. Электропроводность поверхности полупроводника монотонно изменяется по мере хода адсорбции, но не достигает некоторого постоянного значения. Адсорбция вызывает увеличение или уменьшение электропроводности полупроводника в зависимости от того, какой газ (акцепторный или донорный) адсорбируется и на каком полупроводнике (электронном или дырочном). Например, кристаллы двуокиси олова изменяют свою проводимость в присутствии водорода, окиси углерода, метана, бутана, пропана, паров бензина, ацетона, спирта. Нагревание кристалла изменяет величину этого эффекта. Это количественное различие может быть зафиксировано чувствительным прибором.

2.6. Диффузия

Если состав газовой смеси или жидкости не однороден, то тепловое движение молекул рано или поздно приводит к выравниванию концентрации каждой компоненты во всем объеме. Такой процесс называется *диффузия*. При протекании процесса диффузии всегда имеются так называемые *диффузионные потоки вещества*, величина и скорость которых определяется свойствами среды и градиентов концентрации. Скорость диффузии в газах увеличивается с понижением давления и ростом температуры. Увеличение температуры вызывает ускорение диффузионных потоков в жидкостях и твердых телах. Кроме градиента концентрации, к возникновению диффузионных потоков приводит наличие температурных градиентов в веществе (*термодиффузия*). Перепад температур в однородной по составу смеси вызывает появление разности концентрации между областями с различной температурой, при этом в газах более легкая компонента газовой смеси скапливается в области

с более низкой температурой. Таким образом, явление термодиффузии можно использовать для разделения газовых смесей, этот метод весьма ценен для разделения изотопов.

При диффузионном перемещении двух газов, находящихся при одинаковой температуре, наблюдается явление, обратное термодиффузии: в смеси возникает разность температур до нескольких градусов – *эффект Дюфора*. Явление диффузии молекул в струю пара лежит в основе работы диффузионных вакуумных насосов.

Диффузия в твердых сплавах со временем приводит к однородности сплава. Для ускорения диффузии применяется длительный нагрев сплава (*отжиг*). Уничтожение внутренних напряжений при отжиге металла также есть следствие процессов диффузии и их ускорения при повышении температуры.

Создание больших концентраций газа на границе с металлом при создании условий, обеспечивающих некоторое "разрыхление" поверхностного слоя металла, приводит к диффузии газа внутрь металла. Диффузия азота в металлы лежит в основе процесса *азотирования*. Диффузионное насыщение поверхностных слоев металла различными элементами позволяет получать самые различные свойства поверхностей, необходимые в практике. Фактически процессы *цементации*, *алитирования*, *фосфатирования* есть процессы диффузии углерода, алюминия, фосфора внутрь структуры металла. Скорость диффузии при этом легко регулируется с помощью различных режимов термообработки.

Осмосом обычно называют диффузию какого-либо вещества через полупроницаемую перегородку. Основное требование к полупроницаемым перегородкам – обеспечение невозможности *противодиффузий*. Так, если два раствора разной концентрации разделить перегородкой, задерживающей молекулы растворенного вещества, но пропускающего молекулы растворителя, то растворитель будет переходить в концентрированный раствор, разбавляя его и создавая там избыток дав-

ления, называемый обычно *осмотическим давлением*. Питание растений водой, явление *диализа*, явление *гиперфильтрации*, наконец, обычное набухание – все это типично осмотические эффекты. Величина осмотического давления клеток многих растений составляет 5..10 атм, а осмотическое давление крови человека доходит почти до 8 атм. Теория осмотических явлений описывается в курсах термодинамики и статистической физики. Огромна роль осмотических явлений в работе кровеносных систем человека и животных.

Осмос можно усилить (или ослабить) применяя электрические поля. Направленное движение раствора относительно поверхности твердого тела под действием электрического поля носит название *электроосмоса*, являющегося одной из разновидностей электрокинетических явлений.

Явление обратного осмоса применяется для получения питьевой воды из сильно загрязненной или соленой [4]. Непосредственно явление обратного осмоса происходит на границе «вода – синтетическое волокно»: внутрь волокна проходит только вода, оставляя за бортом соли и грязь. Сама установка состоит из многих миллионов волокон, собранных в жгут и помещенных в стальной цилиндр, в который подается "грязная" вода под давлением. Предусмотрен отдельный отбор чистой воды и насыщенного раствора.

2.7. Тепломассообмен

Известны три основных механизма теплообмена – *конвекция*, *излучение* и *теплопроводность*, в которой участвуют движущиеся или неподвижные молекулы вещества, совершающие тепловые колебания. Передача тепла в случае конвекции сопровождается перемещением массы. Этот процесс широко используется в промышленном производстве при сушке.

Наиболее эффективно процесс сушки идет в колонных аппаратах со встречными потоками: сверху свободно падает осушаемое вещество, а снизу встречным потоком поступает

нагретый газ. В донной части аппарата подсушенное вещество интенсивно досушивается в так называемом *кипящем слое*, который представляет собой *псевдожидкость* – взвесь твердых частиц, пляшущих в потоках газа, поступающего снизу.

Псевдожидкость обладает удивительными теплотехническими свойствами – твердые частицы в ней бурно перемешиваются и великолепно переносят тепло, во много раз лучше, чем такой известный проводник, как медь. Псевдожидкость, смачивающая какую-нибудь деталь со скромной скоростью 1 м/сек, осуществляет теплообмен столь же эффективно, как и чистый газ, движущийся со сверхзвуковой скоростью. Псевдосжижение с равным успехом можно использовать как для передачи тепла, так и для "передачи" холода.

Применение псевдожидкости в печах для высокотемпературного нагрева металла позволит резко уменьшить расход топлива. Существует традиционная система нагрева – через газообразные продукты сгорания к металлу. А газ скорее можно назвать изолятором, чем проводником тепла (коэффициент, характеризующий его способность передавать тепло, равен 200, в то время как у жидких металлов или расплавов солей этот коэффициент равен 20000). Намного эффективнее теплообмен осуществляется в кипящей псевдожидкости: сжигаемый газ первоначально отдает тепло песку, а тот, перемешиваясь потоками газа, отдает тепло металлу. Хотя сам песок получает тепло все от того же теплоизолятора газа, однако суммарная поверхность песчинок огромна, и в значительной мере благодаря этому они отбирают у пламени во много раз больше тепла, чем сумела бы отнять нагреваемая заготовка.

Среди новых теплообменных систем важное место занимают *тепловые трубы*. Один из простых вариантов тепловой трубы – это закрытый металлический цилиндр; его внутренние стенки выложены слоем пористо-капиллярного материала, пропитанного легковоспламеняющейся жидкостью. Именно с движением этой жидкости связана теплопроводность трубы: на

горячем конце жидкость испаряется и отбирает тепло; пары сами перемещаются к холодному концу – это нормальная конвекция; здесь пары конденсируются и отдают тепло; образовавшиеся жидкость по пористому материалу возвращается обратно к горячему концу трубы. Это замкнутый цикл, бесконечный круговорот тела и массы, никаких движущихся частей. Тепловые трубы – непревзойденные проводники тепла, их даже назвали сверхпроводниками. Действительно, через тепловую трубу диаметром в сантиметр можно прогнать тепловую мощность порядка 10 киловатт при разности температур на концах трубы (это аналог разности электрических потенциалов напряжения на участке цепи) всего в 5 °С. Чтобы пропустить эту мощность через медный стержень такого же диаметра на его концах нужен был бы перепад температуры почти 150000 °С [4].

Тепловые трубы сейчас получили широкое применение – в космической технике, в ядерных реакторах, криогенных хирургических инструментах, в системах охлаждения двигателей. В трубах может выполняться механическая работа за счет энергии движущегося теплоносителя. На их основе, например, создаются *МТД-генераторы* – теплоносителем в тепловой трубе может быть жидкий металл, и, если поместить трубу в магнитное поле, то в металле (на концах проводника) наводится электродвижущая сила. Тепловые трубы могут работать в очень широком диапазоне температур. Все зависит от давления внутри трубы и от применяемого теплоносителя.

2.8. Термофорез и фотофорез

Если нагретое тело поместить в объем, заполненный *аэрозолем* (т.е. мелкими частицами, взвешенными в воздухе, например дымом или туманом), то вокруг тела возникает так называемая *темная зона* (среда, свободная от аэрозоля), толщина которой зависит от разности температур тела и среды, давления газа, раз-

мера и формы тела и не зависит от его химического состава. Горячее тело как бы отталкивает от себя частицы аэрозоля.

Это явление называется *термофорез* и оно обусловлено *термофоретическими силами*, действующмими со стороны газообразной среды на находящееся в ней неравномерно нагретые тела (в частности, частицы аэрозоля). Термофоретические силы возникают вследствие того, что газовые молекулы у более нагретой стороны частицы сильнее бомбардируют ее, чем у менее нагретой стороны, и потому сообщает частице импульс в направлении убывания температуры. Величина термофоретических сил пропорциональна квадрату радиуса частицы, скорость же движения частицы под действием этих сил – скорость термофореза – не зависит от ее размера вследствие соответствующего возрастания силы сопротивления среды.

Если аэрозоль осветить интенсивным направленным пучком света, то аэрозольные частицы начинают совершать упорядоченные движения, причем некоторые из них в направлении распространения света (положительный *фотофорез*), а другие навстречу ему (отрицательный *фотофорез*). Наиболее сильно фотофорез проявляется на окрашенных частицах. Тип фотофореза зависит от цвета и от ее размера.

В основе явления лежит совместное действие на частицу светового давления и термофоретических сил. Преобладание одного из этих факторов определяет тип фотофореза. Так, для мелких частиц основным фактором является световое давление, оно и обуславливает в данном случае положительный фотофорез. В аэрозолях селеновой и железной пыли под влиянием светового потока аэрозольные частицы начинают двигаться в направлении *перпендикулярном* направлению распространения света.

2.9. Молекулярные цеолитовые сита

Цеолиты являются кристаллическими водными алюмосиликатами, они относятся к группе каркасных алюмосиликатов. Каркасы цеолитов содержат каналы и сообщающиеся между собой полости, в которых находятся катионы и молекулы воды. Ка-

тионы довольно подвижны и обычно могут в той или иной степени обмениваться на другие катионы.

Каркасы цеолитов похожи на пчелиные соты и образованы из цепочек анионитов кремния и алюминия. Из-за своего строения каркас имеет отрицательный заряд и этот заряд компенсируется катионами щелочных или щелочноземельных металлов, находящихся в полостях-сотах. Тип цеолита (диаметр его пор) определяется соотношением кремния и алюминия и типом катионов. Главным образом это вода. Она удаляется при нагревании до 600 .. 800 °С, сам каркас при этом не разрушается, он сохраняет первоначальную структуру. Именно поэтому цеолит способен вновь поглощать потерянную воду и другие вещества. Размером пор определяется и размер частиц, способных в них проникать; цеолиты могут, как бы просеивать молекулы, сортировать их по размерам. Кроме того, они используются как адсорбенты, они в 10-100 раз эффективнее, чем все другие осушители и работают при различных температурах. При 196 °С адсорбционная способность цеолитов резко повышается. Они поглощают даже воздух, создавая в сосуде разряжение. Цеолиты используют как ионообменники, не разрушающиеся под действием излучения. В качестве катализаторов устойчивы к действию высоких температур, каталитических ядов, позволяют гибко менять свойства.

Размер ячеек цеолита сохраняется практически постоянным в широком диапазоне температур, так как коэффициент расширения полностью гидратированного цеолита (6.91) близок к коэффициенту терморасширения кварца (5.21).

Чистые цеолиты бесцветны. Если катионы щелочных или щелочноземельных металлов, обычно присутствующие в синтетических цеолитах, обменять на ионы переходных металлов, цеолиты могут приобрести окраску. Если окраска индивидуального иона зависит от того, находится ли он в гидратизированном или безводном состоянии, окраска цеолита будет меняться со степенью гидратации. Способность цеолитов менять цвет в присутствии паров воды используется для ее определения. Цеолиты имеют так же очень интересные диэлектрические и электропроводные свойства.

3. ГИДРОСТАТИКА, ГИДРОАЭРОДИНАМИКА

В *гидростатике* или *гидроаэростатике* рассматриваются условия и закономерности равновесия жидкостей и газов под воздействием приложенных к ним сил, а также условия равновесия твердых тел, находящихся в жидкостях или газах.

Гидроаэродинамика изучает законы движения, а также взаимодействия жидкостей и газов с твердыми телами при их относительном движении.

Гидростатика и гидроаэродинамика основаны на двух фундаментальных физических законах.

Закон Архимеда: на тело, погруженное в жидкость, действует выталкивающая сила, равная по модулю силе тяжести жидкости, вытесненной телом. Выталкивающая сила возникает из-за того, что значения гидростатического давления на разных глубинах неодинаковы.

Закон Паскаля: давление, производимое внешними силами на поверхность жидкости или газа, передается по всем направлениям без изменений. Такая передача давления происходит вследствие возможности молекул жидкости или газа свободно перемещаться относительно друг друга.

Напомним, что это движение полностью хаотично и в отсутствии силы тяжести или в состоянии невесомости давление во всех точках жидкости согласно закону Паскаля будет одинаковым. Соответственно, поэтому и "не работает" закон Архимеда в этих условиях. На основе закона Паскаля работают гидравлические прессы и подъемники, некоторые вакуумметры различного рода гидро- и пневмо- усилители.

3.1. Течение жидкости и газа

Упорядоченное движение вязкой жидкости (или газа) без междуслойного перемешивания называется *ламинарным течением*. При увеличении скорости потока возникающие в жидкости (или газе) случайные возмущения приводят к образованию

хаотического *турбулентного движения*, при котором частицы жидкости (или газа) совершают неустановившиеся беспорядочные движения по сложным траекториям, в результате чего происходит интенсивное перемешивание жидкости (или газа). При ламинарном течении передача импульса от слоя к слою происходит за счет молекулярного механизма (*вязкость*), поэтому скорость потока в трубе плавно убывает от центра трубы к стенкам. При турбулентном потоке скорость почти постоянна по сечению трубы, резко убывая на самой границе жидкости (или газа) со стенкой трубы.

Для ламинарного режима справедливо *уравнение* или *закон Бернулли* (выведено Д. Бернулли в 1738 г.), которое выражает закон сохранения энергии движущейся жидкости и согласно которому полное давление в установившемся потоке жидкости остается постоянным вдоль этого потока и состоит из *весового*, *статического* и *динамического* давления. Отсюда следует, что при уменьшении сечения потока, из-за возрастания скорости, т.е. динамического давления, статическое давление падает. Закон Бернулли справедлив и для ламинарных потоков газа. Явление понижения давления при увеличении скорости потока лежит в основе работы различного рода расходомеров, водо- и пароструйных насосов.

Отметим, что уравнение Бернулли справедливо в чистом виде только для жидкостей, вязкость которых равна нулю, т.е. таких жидкостей, которые не прилипают к поверхности трубы. На самом деле экспериментально установлено, что скорость жидкости на поверхности твердого тела всегда в точности равна нулю. Именно поэтому на поверхностях, находящихся в потоке жидкости, всегда образуются наросты, осаждения, а на лопастях крутящегося вентилятора появляется слой пыли.

Вязкость – это свойство жидкости и газов, характеризующее сопротивление их течению под действием внешних сил. Вязкость объясняется движением и взаимодействием молекул. В газах расстояние между молекулами существенно

больше радиуса действия молекулярных сил, поэтому вязкость газа определяется главным образом молекулярным движением. Между движущимися относительно друг друга слоями газа происходит постоянный обмен молекулами, обусловленный их непрерывным хаотическим (тепловым) движением.

Переход молекул из одного слоя в соседний, движущийся с иной скоростью, приводит к переносу от слоя к слою определенного количества движения. В результате медленные слои ускоряются, а более быстрые замедляются.

В жидкостях, где расстояние между молекулами много меньше, чем в газах, вязкость обусловлена в первую очередь межмолекулярными взаимодействиями, ограничивающими подвижность молекул. В жидкости молекула может проникнуть в соседний слой лишь при образовании в нем подходящей полости. На образование полости расходуется *энергия активизации* вязкого течения, которая падает с ростом температуры и понижением давления. По вязкости во многих случаях судят о готовности или качестве продукта, поскольку вязкость тесно связана со структурой вещества и отражает физико-химические изменения материала, которые происходят во время технологических процессов.

Протекание полярной непроводящей жидкости между обкладками конденсатора сопровождается некоторым увеличением вязкости. При снятии электрического поля эффект мгновенно исчезает. Это явление в чистых жидкостях получило название *вязкоэлектрического эффекта*. Установлено, что эффект возникает только в поперечных полях и отсутствует в продольных. Вязкость полярных жидкостей возрастает с увеличением напряженности поля в начале пропорционально квадрату напряженности, а затем приближается к некоторому постоянному предельному значению (*вязкости насыщения*), зависящему от проводимости жидкости. Увеличение проводимости приводит к увеличению вязкости насыщения. На эффект оказывает влияние частота поля. В начале с повышением час-

тоты вязкоэлектрический эффект увеличивается до определенного предела, затем вырождается до нуля.

Увеличение вязкости под действием электрического поля происходит за счет того, что в жидкости могут находиться или возникать под действием поля свободные ионы. Они становятся центрами ориентации полярных молекул, т.е. источниками заряженных групп, для которых в электрическом поле возможно движение типа *электрофореза*. Количество движения, таким образом, переносится от слоя к слою поперек потока.

3.2. Явление сверхтекучести

Особыми вязкостными свойствами обладает жидкий гелий, который при понижении температуры испытывает фазовый переход второго рода, превращаясь в *сверхтекучую модификацию гелия* – He II. Причем в него превращается не весь гелий, а только часть, т.е. при температуре ниже перехода (T = 2.17 K) гелий можно представить себе состоящим из двух компонент – нормальный, свойства которого аналогичны свойствам гелия до перехода (He I) и сверхтекучей, вязкость которой чрезвычайно мала (меньше 0.1). Компоненты могут двигаться независимо друг от друга, причем движение сверхтекучей компоненты не связано с переносом тепла (ее энтропия равна нулю). Низкая вязкость гелия позволяет использовать его в качестве смазки, например в подшипниках.

Свойство сверхтекучей компоненты легко проникать в малейшую щель делает He II удобным для поиска течей: погружение в He II – самая строгая проверка герметичности. Малая *ширина перехода* позволяет использовать его как опорную точку при измерении температуры.

Благодаря встречному конвективному движению двух компонент теплопередача в He II происходит без переноса массы, в результате чего теплопроводность He II чрезвычайно высока. Проявляется это, например, в прекращении кипения после перехода (теплопроводность настолько высока, что пу-

зырьки газа образоваться не могут и испарение происходит с поверхности). Благодаря сверхвысокой теплопроводности He II используется как хладагент.

Термомеханический эффект. Если нагреть He II в одном из сосудов, сообщающихся между собой через тонкий капилляр или пористую перегородку, то в нем за счет перехода понизится концентрация сверхтекучей компоненты, которая, стремясь к установлению равновесия, будет по капилляру поступать из ненагретого сосуда, а нормальная компонента из нагретого выходить не будет. Соотвественно, уровень гелия в нагреваемом сосуде увеличится.

Появление в сверхтекучей жидкости разности давлений, обусловленной разностью температур, называется *термомеханическим эффектом* [1]. Он проявляется в разности уровней жидкости в двух сосудах, сообщающихся через узкую щель или капилляр и находящихся при разных температурах. Другой способ демонстрации заключается в нагреве излучением трубки, набитой мелким черным порошком и опущенной одним концом в сверхтекучий гелий. При освещении светом порошок быстро нагревается, и из-за возникающей разности давлений в сосуде и вне его жидкий гелий фонтаном выбрасывается из верхнего конца капилляра.

Эффект может быть использован для создания своеобразных насосов He II.

Обратный эффект – охлаждение сверхтекучего гелия при продавливании его через узкое щели или капилляры назыется *механокалорическим эффектом*.

То есть если повысить давление в одном из сосудов, рассматриваемых в предыдущем случае, то сквозь капилляр будет протекать только сверхтекучая компонента гелия.

Сверхтекучая компонента не уносит теплоту из сосуда, из которого вытекает, вследствие чего температура внутри этого сосуда повышается. Температура же сосуда, в который притекает сверхтекучая компонента, будет уменьшаться.

Поскольку тонкую пленку можно рассматривать как капилляр, то при переносе гелия на пленке имеет место *термохимический эффект*, который можно усилить, увеличив периметр тела, соединяющего два сосуда, например, вставив пучок проволок. Эффект нашел применение для разделения изотопов гелия He-3 и He-4. He-3 не сверхтекучий, и по пленке сосуда, содержащего смесь изотопов удаляется сам собой только изотоп He-4. Термохимический эффект можно остановить, если поместить пленку между обкладками конденсатора, на который подано напряжение с частотой 40-50 Гц.

Эффект Томса. Известно, что сопротивление, оказываемое трубопроводом потоку жидкости при ламинарном режиме течения меньше, чем при турбулентном. В 1948 году Б. Томс (Англия) установил, что при использовании полимерной добавки трение в воде между турбулентным потоком и трубопроводом значительно снижается.

Практическое применение эффекта Томса весьма разнообразно: по традиции "смазывают" различными присадками трубопроводы, "смазывают" полимерами морские и речные суда, напорные колонны глубоких скважин и т.д.

3.3. Скачок уплотнения

Что такое *лобовое сопротивление* при обтекании твердых тел потоком жидкости или газа – общеизвестно. Однако, кроме лобового сопротивления, при обтекании возникает так называемое *волновое сопротивление*, являющееся результатом затрат энергии на образование акустических или ударных волн. В газе, например, ударные волны возникают при образовании *скачка уплотнения* у лобовой поверхности тела при обтекании его сверхзвуковым потоком газа. При образовании скачка уплотнения резко увеличивается плотность, температура, давление и скорость вещества потока; в результате могут иметь место процессы *диссоциации* и *ионизации* молекул, сопровождающиеся мощным световым излучением.

Эффект Коанда. Румынский ученый Генри Коанд в 1932 году установил, что струя жидкости, вытекающая из сопла, стремится отклониться по направлению к стенке и при определенных условиях прилипает к ней. Это объясняется тем, что боковая стенка препятствует свободному поступлению воздуха с одной стороны струи, создавая вихрь в зоне и пониженного давления. Аналогично и поведение струи газа. На основе этого эффекта строится одна из ветвей *пневмоники* или струйной автоматики [4].

Эффект воронки. Если уровень жидкости в сосуде с открытой поверхностью понизить до определенного уровня при свободном сливе жидкости через отверстие в нижней части сосуда, то на поверхности образуется вихревое движение воды (водоворот), устойчивость которого трудно нарушить.

3.4. Дросселирование жидкостей и газов

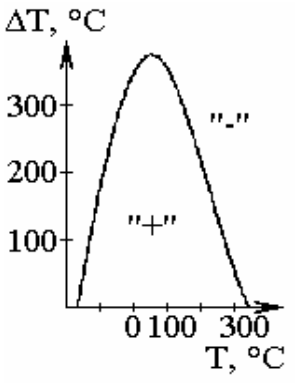
Дросселирование – это понижение давления и, следовательно, расширение движущегося газа, пара или жидкости при прохождении через *дроссель* (местное гидродинамическое сопротивление – сужение трубопровода, вентиль, кран, пористая перегородка и др.). Этот процесс широко применяется для измерения и регулирования расхода жидкостей и газов.

Адиобатическое (без теплообмена с окружающей средой) дросселирование обычно сопровождающиеся изменением температуры вещества. Этот эффект был обнаружен и исследован в 1852 – 62 годах и назван *эффектом Джоуля-Томсона*.

Эффект Джоуля-Томсона считается положительным, если вещество в процессе дросселирования охлаждается ($\Delta T<0$), отрицательным, если нагревается ($\Delta T>0$). Величина и знак эффекта определяется соотношением между работой вещества и работой сил внешнего давления, а также свойствами вещества.

В зависимости от условий дросселирования одно и то же вещество может как нагреваться, так и охлаждаться. Для каждого реального газа существует температура T_i, при которой

(для данного давления) разность ΔT, T, °C проходя через нулевое значение, меняет свой знак. Такая температура называется *температурой инверсии*. При малых перепадах давления наблюдается *дифференциальный эффект Джоуля-Томсона*, при котором изменение температуры также мало.



Кривая инверсии азота при дросселировании

Эффект Джоуля-Томсона – один из основных процессов, применяемых в технике снижения газов и получения сверхнизких температур.

Для воздуха и многих других газов точка инверсии лежит выше комнатной температуры и они в процессе адиабатического дросселирования охлаждаются. На рисунке 3.2 для примера приведена кривая инверсии азота. В пределах кривой эффект положительный, вне кривой – отрицательный, для точек на самой кривой эффект равен нулю [1].

3.5. Гидравлические удары

Быстрое перекрытие трубопровода вызывает резкое повышение давления, которое распространяет кинетическую энергию упругой волны сжатия по трубопроводу против течения жидкости. Подход волны к какому-нибудь препятствию

(изгибу трубопровода, задвижке и т.д.) вызывает явление *гидравлического удара*, т.е. резкое изменение давления жидкости, вызванное внезапным изменением скорости ее течения.

Ослабление гидравлического удара может быть достигнуто или увеличением времени перекрытия, или же включением каких-либо демпферов, поглощающих энергию волны. Для увеличения силы удара целесообразно применять жидкости без неоднородностей и мгновенные перекрытия.

Обычно вслед за гидравлическим ударом следует удар *кавитационный*, возникающий из-за понижения давления за фронтом ударной волны сжатия (явление кавитации рассмотрено далее). Волны сжатия в жидкости возникают также при различного рода взрывных явлениях в движущейся или покоящейся жидкости (глубинные бомбы).

Наличие явления гидравлического удара является вредным фактором для гидросистем, но возможно и позитивное использование этого явления, например для повышения динамической устойчивости энергосистемы при аварии на линии электропередач путем снижения мощности гидротурбины в результате уменьшения напора перед ней путем создания отрицательного гидравлического удара отводом части потока жидкости в резервуар.

Волну сжатия в жидкости можно вызвать также мощным импульсным электрическим разрядом между электродами, помещенными в жидкость (*электрогидравлический эффект Юткина*). Чем круче фронт электрического импульса, чем менее сжата жидкость, тем выше давление. Электрогидравлический удар применяется при холодной обработке металлов, для очистки электродов от налипшего на них металла при электролизе, для упрочения стальных колец турбогенераторов, при разрушении горных пород, интенсификации химических реакций и в других случаях.

3.6. Кавитация

Кавитацией называется образование в жидкости полостей (кавитационных пузырьков или каверн), заполненных газом, паром или их смесью. Кавитация возникает в результате местного понижения давления в жидкости, которое может происходить либо при увеличении ее скорости (*гидродинамическая кавитация*), либо при прохождении акустической волны большой интенсивности во время полупериода разряжения (*акустическая кавитация*) [3].

Гидродинамическая кавитация возникает в тех участках потока, где давление понижается до некоторого критического значения. Присутствующие в жидкости пузырьки газа или пара, двигаясь с потоком жидкости и попадая в область давления меньше критического, приобретает способность к неограниченному росту. После перехода в зону пониженного давления рост прекращается, и пузырьки начинают уменьшаться. Если пузырьки содержат достаточно много газа, то при достижении ими минимального радиуса, они восстанавливаются и совершают несколько циклов затухающих колебаний, а если мало, то пузырек схлопывается полностью в первом цикле. Таким образом, вблизи обтекаемого тела создается *кавитационная зона*, заполненная движущимися пузырьками. Сокращение кавитационного пузырька происходит с большой скоростью и сопровождается звуковым импульсом, тем более сильным, чем меньше газа содержит пузырек. Если степень развития кавитации такова, что возникает и захлопывается множество пузырьков, то явление сопровождается сильным шумом со сплошным спектром от несколько сотен герц до сотен килогерц. Спектр расширяется в область низких частот по мере увеличения максимального радиуса пузырьков.

Если бы жидкость была идеально однородной, а поверхность твердого тела, с которым она граничит, идеально смачиваемой, то разрыв происходил бы при давлении более низком,

чем давление насыщенного пара жидкости, при котором жидкость становится нестабильной. Теоретическая прочность воды на разрыв равна 1500 кг/см, реальные жидкости менее прочны. Максимальная прочность на разрыв тщательно очищенной воды, достигнутая при растяжении воды при 10 °С составляет 260 кг/см. Обычно же разрыв наступает при давлениях, насыщенного пара. Низкая прочность реальных жидкостей связана с наличием в них так называемых *кавитационных зародышей* – плохо смачиваемых участков твердого тела, твердых частиц, частиц, заполненных газом, ионных образований, возникающих под действием космических лучей.

Увеличение скорости потока после начала кавитации влечет за собой быстрое возрастание числа развивающихся пузырьков, вслед за чем происходит их объединение в общую *кавитациверну* и течение переходит в струйное.

Для плохо обтекаемых тел, обладающих острыми кромками, формирование струйного вида кавитации происходит очень быстро. Наличие кавитации неблагоприятно сказывается на работе гидравлических машин, турбин, насосов, судовых гребных винтов и заставляет принимать меры к избежанию кавитации. Если это оказывается невозможным, то в некоторых случаях полезно усилить развитие кавитации, создать так называемый режим *суперкавитации*, отличающийся струйным характером обтекания и, применив специальное профилирование лопастей, обеспечить благоприятные условия работы механизмов. Замыкание кавитационных пузырьков вблизи поверхности обтекаемого тела часто приводит к разрушению поверхности – так называемой *кавитационной эрозии*. Чтобы избежать захлопывание кавитационных пузырьков, надо подать в область пониженного давления какой-нибудь газ, например воздух.

Разрушения, происходящие при кавитации, очень часто используют для ускорения различных технологических процессов.

Акустическая кавитация – это образование и захлопывание полостей и жидкости под воздействием звука. Полости образуются в результате разрыва жидкости во время полупериодов сжатия. Полости заполнены в основном насыщенным паром данной жидкости, поэтому процесс иногда называется *паровой кавитацией* в отличие от *газовой кавитации* интенсивных нелинейных колебаний газовых (обычно воздушных) пузырьков в звуковом поле, существовавших в жидкости до включения звука. Если газовая кавитация может протекать с большей или меньшей интенсивностью при любых значениях амплитуды давления звуковой волны, то паровая лишь при достижении некоторого критического значения амплитуды давления, так называемого *кавитационного порога*. Величина этого порога – от давления насыщенного пара жидкости до нескольких десятков и даже сотен атмосфер (в зависимости от содержания в жидкости кавитационных зародышей). Экспериментально установлено, что величина порога зависит от многих факторов, в частности, порог повышается с ростом гидростатического давления, после обжатия жидкости высоким (порядка 1000 атм) статистическим давлением, при обезгаживании и охлаждении жидкости, с ростом частоты звука и с уменьшением продолжительности озвучивания. Порог выше для бегущей, чем для стоячей воды.

При захлопывании сферической полости давление в ней резко возрастает, как при взрыве, что приводит к излучению импульса сжатия. Давление при захлопывании особенно велико при кавитации на низких частотах в обезгаженной жидкости с малым давлением насыщенного пара. Если увеличить содержание газа в жидкости, то диффузия газа в полости усилится, захлопывание полостей станет неполным и подъем давления при захлопывании – небольшим. При содержании газа в жидкости выше 50% от насыщения возникает *кавитационное обезгаживание жидкости* – образование и всплывание газовых пузырьков и вырождение паровой кавитации в газовую. Если об-

разовавшиеся паровые пузырьки колеблются вблизи границы с твердым телом, около них возникают интенсивные микропотоки. Появление кавитации ограничивает дальнейшее повышение интенсивности звука, излучаемого в жидкости, что влечет за собой снижение нагрузки на излучатель.

Явление соннолюминесценции. В момент захлопывания кавитационного пузырька наблюдается его слабое свечение. Причиной этого явления является нагревание газа в пузырьке, обусловленное высокими давлениями при его схлопывании. Вспышка может длиться от 1/20 до 1/1000 сек. Интенсивность света зависит от количества газа в пузырьке – если газ в пузырьке отсутствует, то свечение не возникает. Световое излучение пузырька очень слабо и становится видимым только при усилении или в полной темноте.

4. КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

4.1. Механические колебания

Колебаниями называют процессы, точно или приблизительно повторяющиеся через одинаковые промежутки времени. По своему характеру колебания подразделяют на: *свободные* (или *собственные*) и *вынужденные*.

Свободные колебания – представляют собой колебания, совершаемые системами, представленными самим себе, около своего положения равновесия. Для возбуждения собственных колебаний требуется определенное количество энергии. Частота собственных колебаний определяется целиком свойствами самой системы.

Вынужденные колебания совершаются под действием внешней периодической силы, например, колебания мембраны микрофона, барабанной перепонки уха, ударного элемента отбойных молотков, пластины магнитострикционного преобразователя ультразвуковых агрегатов. Частота вынужденных колебаний равна частоте вынуждающей силы, а амплитуда колебаний зависит от свойств системы.

Вынужденные колебания, возбуждаемые в системе внешними силами, часто приводят к интенсификации многих, технологических процессов.

Если на сверло наложить в процессе сверления возвратно-поступательные колебания, направленные вдоль его оси, то процесс сверления намного упрощается, так как сверло многократно (с частотой колебания) как бы возвращается в исходное положение, поэтому его не уводит, трение уменьшается, повышается чистота поверхности сверления.

Особую роль в колебательных процессах играет явление *резонанса* – резкого возрастания амплитуды вынужденных колебаний, наступающего при приближении частот собственных и вынужденных колебаний системы. Явление резонанса используется для интенсификации различных технологических процессов.

Автоколебания – незатухающие колебания, которые осуществляются в неконсервативной системе при отсутствии переменного внешнего воздействия (за счет внутреннего источника энергии), причем амплитуда и период этих колебаний определяются свойствами самой системы. Классический пример автоколебательной системы – маятниковые часы. Как правило, автоколебательные системы склонны к самовозбуждению.

4.2. Акустика

Акустоэлектрический эффект – возникновение проводящего тока или ЭДС в проводящей среде (металл, полупроводник) под действием бегущей ультразвуковой волны. Появление тока связано с передачей импульса (и соответственно энергии) от ультразвуковой волны электроном проводимости. Это приводит к направленному движению носителей - электрическому току в направлении распространения звука.

В замкнутой цепи, состоящей из кристалла CdS с металлическими электродами, перпендикулярными направлению распространению звука, и измерительного прибора, будет протекать акустоэлектрический ток. Если же цепь разомкнута, то между электродами возникает акустоэлектрическая разность потенциалов.

Наряду с продольными можно наблюдать и поперечный эффект, то есть возникновение разности потенциалов на электродах кристалла, расположенных параллельно направлению распространения звука. Эффект имеет место и при упругих поверхностных волнах.

Применение: измерение интенсивности ультразвука в твердых телах, структуры звукового поля, для исследования электрических свойств полупроводников.

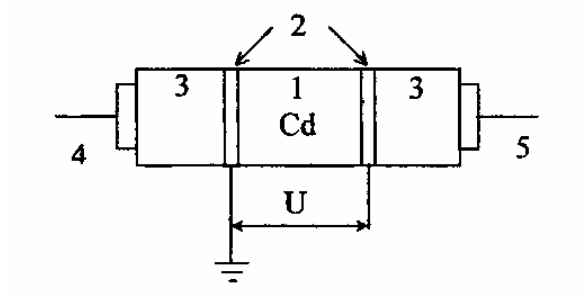


Рис. 4.1. Схема измерителя акустоэлектрической ЭДС:
1 – кристалл CdS; 2 – электроды; 3 – звукопроводы;
4 – излучатель; 5 – приемник

Одним из широко известных колебательных движений является *звук* – продольные колебания частичек среды, в которых распространяется звуковая волна.

Акустические (звуковые) колебания, как и механические колебания, часто используют для интенсификации различных технологических процессов.

Акустические колебания различной частоты по разному воздействуют на животных.

На основе этого в США разработаны устройство и способ, предназначенные для разгона животных. С этой целью мозг животных подвергается действию раздражающих колебаний со спектром, лежащим в звуковом диапазоне частот, представляющий собой совокупность многочисленных колебаний, успокаивающих мозг животных. Раздражающие колебания действуют на мозг животного одновременно с успокаивающими колебаниями при этом осуществляется модуляция раздражающих колебаний успокаивающими.

Характер звуковых колебаний зависит от свойства источника звука, поэтому, измеряя различные характеристики звуковых колебаний, можно установить характеристики источника звука. А зная характеристики звуковой волны, можно по ее

изменению при прохождении различных сред установить параметры среды.

В США разработан автоматический прибор, сортирующий при помощи звука яблоки, так как установлено, что зрелые, незрелые и перезрелые яблоки оказывают различное сопротивление проходящим сквозь них звуковым волнам разных частот.

Звук распространяется в воздухе с определенной скоростью. Если в какой-то определенной системе координат возникает звуковой импульс, то по времени прохождения его к осям координат, которое может быть зафиксировано приемниками звука, можно определить координаты источника звука. Такой путь и избрали в институте Кибернетики АН БССР.

При использовании ЭВМ в качестве автоматического проектировщика необходимо вводить в нее графическую информацию. С этой целью графическая информация предоставляется в виде набора различных кривых, координаты которых вводятся с помощью миниатюрной искры, возникающей при соприкосновении специального звукового карандаша (Электроакустического преобразователя) с любой из точек чертежа, звук который достигает системы координатных микрофонов, расположенных по краям чертежа. Одна система выдает координату по Х, другая по У.

При подходе к преграде акустические волны отражаются (эффект известен как *эхо*). Поэтому, если в закрытом помещении включить и сразу выключить источник звука, то возникает явление *реверберации* т.е. послезвучание, обусловленное приходом в определенную точку запоздавших отраженных или рассеянных звуковых волн.

Измеряя время реверберации (время в течении которого интенсивность звука уменьшается в 1000000 раз) можно определить объем свободного помещения.

Дифракция света на ультразвуке – явление при котором свет испытывает дифракцию, проходя через среду, в которой присутствует ультразвуковая волна.

Дифракция света была обнаружена американскими и французскими учеными в 1932 г.

Упругие деформации в звуковой волне приводят к периодическому изменению показателя преломления п среды, в результате чего в среде возникает структура, аналогичная дифракционной решетке, с периодом, равным длине звуковой волны Л. Если в такой среде распространяется луч света, то в среде, помимо основного (0-го порядка), возникают дифракционные пучки света, характеристики которых – направление в пространстве, поляризация и интенсивность зависят от параметров звукового поля (частоты и интенсивности ультразвука, толщины звукового пучка), а также от угла, под которым падает свет на звуковой пучок.

Наблюдается так называемая резонансная дифракция, для которой характерна зависимость эффективности от длины пути, пройденного в области ультразвука. Свет может дифрагировать на НЧ звуке (несколько десятков МГц) и на гиперзвуке (звук ВЧ).

Применение: для определения характеристик звуковых полей, модулей упругости 2-го и 3-го порядков.

Дифракция используется для модуляции и отклонения света, для приема сигналов в УЗ-линиях задержки и др. [3].

Ультразвук – продольные колебания в газах, жидкостях и твердых телах в диапазоне частота $20 \cdot 10^3$ Гц. Применение ультразвука связано в основном с двумя его характерными особенностями: лучевым распространением и большой плотностью энергии.

Из-за малой длины волны распространение ультразвуковых волн с сопровождающими эффектами: *отражением*

Большая частота ультразвука позволяет сравнительно легко создавать ультразвуковые пучки с большой плотностью энергии, распространение которых в жидких и твердых телах сопровождается рядом эффектов, часто приводящих к необратимым явлениям. Эти эффекты – радиационное давление (избыточное давление испытуемое препятствием вследствие воздействия на него ультразвуковой волны и определяемое импульсом, передаваемом волной в единицу времени единице поверхности препятствия), акустическая кавитация (см. раздел 4.8) и акустические потоки, носящие вихревой характер и возникающие в свободном неоднородном поле и вблизи препятствий, находящихся в ультразвуковом поле.

Пластическая деформация и упрочнение. Воздействие ультразвука на процесс пластической деформации обусловлено влиянием его на контактные условия, свойства и структуру деформируемого металла. В этом случае возможны два нелинейных эффекта: *акустическое разупрочнение* и *акустическое упрочнение*. Первый наблюдается в процессе воздействия интенсивным ультразвуком и заключается в уменьшении статического напряжения, необходимого для осуществления пластической деформации. Акустическое упрочение металлов достигается после воздействия ультразвуковых волн достаточно высокой интенсивности. Акустическое разупрочнение является результатом активации дислокаций, происходящей в результате поглощения акустической энергии в местах дефектов кристаллической решетки и других структурных несовершенств. Благодаря этому за малое время происходит локальный нагрев вокруг этих источников поглощения, снятие напряжений, разблокировка дислокаций, увеличение их подвижности, что обеспечивает более интенсивный ход пластической деформации.

Если валики прокатного стана колебать в направлении параллельном осям их вращения, с ультразвуковой частотой, то усилие деформации снижается в 1,5-2 раза, а степень де-

формации увеличивается на 20-50 %, причем контактное трение резко снижается.

При достижении определенного уровня акустической энергии, зависящего от свойства облучаемого металла, последний может пластически деформироваться при комнатной температуре без приложения внешней нагрузки.

Под действием ультразвука изменяются основные физико-химические свойства расплавов: вязкость, поверхностное натяжение на границе "расплав – форма" или "расплав – твердая фаза", температура и диффузия.

После ультразвуковой обработки расплава вязкость уменьшается на 10-50 %, причем характер изменения вязкости не позволяет считать, что уменьшение вязкости вызывается только тепловым воздействием ультразвука, поскольку на ряду с тепловым воздействием наблюдаются и другие эффекты, например, изменение трения между твердыми нерастворимыми примесями, находящихся в расплаве.

Воздействие ультразвука на расплав в процессе кристаллизации уменьшает поверхностное натяжение между расплавом и кристаллом при двухфазном состоянии, за счет чего уменьшается переохлаждение расплавов и увеличивается количество кристаллических зародышей, а структура расплава получается более мелкозернистой.

Ультразвуковая обработка металлов в жидком состоянии и во время кристаллизации приводит к изменению характера температурного поля. Возникновение акустических потоков в расплаве под действием ультразвука связано с потерей энергии в расплаве. Эти потери зависят от интенсивности ультразвука и акустических свойств среды. Акустические потоки вызывают интенсивное перемешивание расплава, выравнивание температуры и интенсификацию конвективной диффузии. При выравнивании температуры расплава увеличивается теплообмен со стенками и окружающей средой, в результате чего увеличивается скорость охлаждения, физическая сущность влияния

ультразвука на теплообмен при естественной или вынужденной конвекции заключается в проникновении акустических потоков в пограничный и ламинарный подслой, что приводит к деформации этих слоев, их турбулизации и перемешиванию. В результате этого в несколько раз увеличивается коэффициент теплопередачи и скорость теплообмена.

Ультразвук ускоряет диффузионные процессы в металлических расплавах и на границе с твердой фазой. В этом случае под действием ультразвука происходит более легкое перемещение атомов из одного устойчивого состояния в другое благодаря образованию кавитационных пузырьков. При этом необходимо учитывать влияние вторичных эффектов акустических потоков, повышение температуры, акустического давления, вызывающих турбулентное перемещение и разрушение пограничного слоя между жидкой и твердой фазой при ускорении диффузии на границе жидкость твердое тело.

Дегазационный эффект. Под действием ультразвука растворенный газ сначала выделяется в виде пузырьков в зонах разряжения ультразвуковых волн, после этого пузырьки соединяются и при достижении достаточно большого размера всплывают на поверхность. Эффект можно объяснить следующим образом, при воздействии ультразвука в расплаве возникает кавитация: в образованные кавитационные пустоты проникает растворенный газ. При захлопывании кавитационных пузырей этот газ не успевает снова растворяться в металле и образует газовые пузырьки. Зародыши газовых пузырьков образуются и в полупериод разряжения при распространении упругих ультразвуковых колебаний в расплаве, т.к. при уменьшении давления растворимость газов уменьшается. После этого газовые пузырьки под влиянием колебательных движений коанулируют и, достигая определенных размеров, всплывают. Ускорение диффузии под действием ультразвука тоже может способствовать нарастанию газовых пузырьков.

Ультразвуковой капиллярный эффект. Явление капиллярности заключается в том, что при помещении в жидкость капилляра, смачиваемого жидкостью, в нем под действием сил поверхностного натяжения происходит подъем жидкости на некоторую высоту. Если жидкость в капилляре совершает колебания под влиянием источника ультразвука, то капиллярный эффект резко возрастает, высота столба жидкости увеличивается в несколько десятков раз, значительно возрастает и скорость подъема.

Экспериментально доказано, что в этом случае жидкость толкает вверх не радиационное давление и капиллярные силы, а стоячие ультразвуковые волны. Ультразвук снова и снова как бы сжимает столб жидкости и поднимает его вверх. Открытый эффект уже очень хорошо используется в промышленности, например, при пропитке изоляционными составами обмоток электродвигателей, окраске тканей, в тепловых трубах и т.п.

Трудно перечислить все эффекты, возникающие в результате воздействия ультразвука на вещество, поэтому кратко перечислим основные области применения ультразвука и приведем в заключение несколько интересных изобретений, показывающих широкие возможности использования ультразвука в изобретательстве.

Твердые вещества:

– размерная обработка сверхтвердых и хрупких материалов (сверление отверстий сложной формы, шлифование, полирование, наклеп, волочение проволоки, прокатка фольги и т.д.);

– лужение и паяние металлов, керамики, стекла и т.п.;

– сварка металлов и полимеров;

– диспергирование твердых порошкообразных материалов в жидкостях, эмульгирование несмешивающихся жидкостей;

– получение аэрозолей;

– полимеризация или деструкция высокомолекулярных соединений, ускорение массообразных и химических процессов;

– разрушение биологических объектов (микроорганизмов).

Действие ультразвука на жидкость базируется на использовании вторичных эффектов кавитации – высоких локальных давлений и температуры, образующихся при схлопывании кавитационных пузырьков.

Газы:

– сушка сыпучих, пористых и других материалов;

– очистка газов от твердых частиц и аэрозолей.

Акустомагнетоэлектрический эффект. Звук способен сортировать не только яблоки, но и электроны. Если поперек направления распространения звука в проводящей среде наложить магнитное поле, то электроны, которые увлекаются звуком, будут отклоняться в этом поле, что приведет к возникновению поперечного тока или, если образец "разомкнуть" в поперечном направлении, электродвижущей силы (ЭДС). Но магнитное поле в соответствии с законом Лоренца отклоняет электроны разных скоростей по разному, поэтому величина и даже знак ЭДС показывают, какие электроны увлекаются звуком, то есть каковы свойства электронного газа в данной среде. В каждом веществе звук увлекает за собой группу электронов характерных именно для данного вещества. Если звук проходит через границу двух веществ, то одни электроны должны смениться другими, например, более "холодные", более "горячими". При этом от границы будет тепло, а сама граница охлаждаться. Данный эффект похож на известный эффект Пельтье (см. раздел 8.2).

Однако принципиальное отличие этого эффекта от эффекта Пельтье состоит в том, что он не исчезает, даже при очень низких температурах и охлаждение может продолжаться до температур, близких к абсолютному нулю. Это открытие

зарегистрировано под номером 133 в следующей формулировке:"Установлено неизвестное ранее явление возникновение в телах, проводящих ток, перемещенных в магнитном поле, при прохождении через них звука, электродвижущей силы поперек направления распространения звука, обусловленной взаимодействием со звуковой волной носителей заряда, находящихся в различных энергетических состояниях". На основе открытия уже сделано ряд изобретений.

4.4. Волновое движение

Волна – это возмущение, распространяющееся с конечной скоростью в пространстве и несущее с собой энергию. Суть волнового движения состоит в переносе энергии без переноса вещества. Любое возмущение связано с каким-то направлением (вектор электрического поля в электромагнитной волне, направление колебаний частиц при звуковых волнах, градиент концентрации, градиент потенциала и т.д.). По взаимоположению вектора возмущения и вектора скорости волны, волны подразделяются на *продольные* (направление вектора возмущения совпадает с направлением вектора скорости) и *поперечные* (вектор возмущения перпендикулярен вектору скорости). В жидкостях и газах возможны только продольные волны, в твердых телах – и продольные и поперечные.

Волна несет с собой и потенциальную и кинетическую энергию. Скорость волны, т.е. скорость распространения возмущения, зависит как от вида волны, так и от характеристик среды, например, от прочности бетона при затвердевании. Измеряя скорость распространения ультразвука можно определить, какую прочность набрал бетон в процессе выпаривания.

В Японии предложено пропускать ультразвук через стальные изделия перпендикулярно тем поверхностям, расстояние между которыми нужно измерить. Стальные изделия помещались в остную ванну, которая просвечивалась ультразвуковыми импульсами. Измерив время, необходимое для про-

хождения импульса от каждого вибратора, определяли внешние размеры изделия.

При наличии дисперсии волн (см. ниже) понятие скорости волны становится не однозначным; приходится различать фазовую скорость (скорость распространения определенной фазы волны) и групповую скорость, являющуюся скорость переноса энергии, что усложняет различные измерительные работы с помощью различного вида колебаний. В случае же когерентного колебания фазовая скорость может нести информацию о свойствах среды.

Стоячие волны. При наличии каких-либо неоднородностей в среде имеют место явления *преломления* и *отражения* волн. Если возбуждаемые в среде волны отражаются от каких-то границ (препятствий), то при определенном сдвиге фаз в результате наложения прямой и отраженной волны может возникнуть стоячая волна с характерным расположением максимумов возмущения (*узлов* и *пучностей*). При наличии стоячей волны переноса энергии через углы нет, и в каждом участке между двумя узлами наблюдается лишь взаимопревращение кинетической и потенциальной энергии.

Эффект Доплера-Физо. Если регистрировать колебания в точке, расположенной на каком-либо расстоянии от источника колебаний и неподвижной относительно него, то частота регистрируемых колебаний будет равна частоте колебаний источника. Если же источник и приемник приближаются друг к другу, то частота регистрируемых колебаний будет выше частоты колебаний источника. При взаимном удалении приемника и источника приемник будет регистрировать понижение частоты колебаний. При этом изменение частоты зависит от скорости взаимного движения источника и приемника. Этот эффект был впервые открыт Доплером в акустике, позже его независимо открыл Физо и рассмотрел его в случае световых колебаний.

На основе этого эффекта создан прибор для измерения скорости супертанкеров при швартовых операциях, длина вол-

ны использована малая (микроволновый сигнал). Очевидно, подобный прибор может быть использован и в других областях техники.

Эффект Доплера – явление, заключающееся в изменении частоты колебаний ш или длины волны X, воспринимаемой наблюдателем, при движении источника колебаний и наблюдателя относительно друг друга. Названный эффект обнаружил австриец К. Доплер в 1842 г. При удалении источника от наблюдателя принимаемая частота уменьшается, при сближении с наблюдателем - увеличивается.

Может наблюдаться продольный эффект Доплера, когда источник движется прямо от наблюдателя или от него, и изменение частоты максимально. Возможен также поперечный эффект, связанный с замедлением времени и скоростей.

Эффект Доплера обладает свойством асимметрии, то есть величина эффекта связана от величины и направления скорости как источника, так и приемника относительно среды, в которой распространяются волны (исключение - электромагнитные волны в вакууме, когда D = c).

Разновидностью эффекта является двойной эффект Доплера -смещение частоты волн при отражении их от движущихся тел, так как отражающий объект рассматривается сначала как приемник, затем как переизлучатель волн.

Применение: прибор для измерения скорости движущихся целей [3].

Поляризация волн – нарушение осевой симметрии поперечной волны относительно направления распространения этой волны. В неполяризованной волне колебания (векторов смешения и скорости частиц среды в случае упругих волн или векторов напряженностей электрического и магнитного полей в случае электромагнитных волн) в каждой точке пространства по всевозможным направлениям в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны, быстро и беспорядочно сменяют друг друга так, что ни одно из этих направле-

ний колебаний не является преимущественным. Поперечную волну называют поляризованной, если в каждой точке пространства направление колебаний сохраняется неизменным (*линейнополяризованным*) или изменяется с течением времени по определенному закону – (*циркулярно* или *элептическиполяризованной*).

Поляризация может возникнуть вследствие отсутствия осевой симметрии в возбуждающем волну излучателе (например, в лазерах), при отражении и преломлении волн на границе двух сред (наибольше степень поляризации имеет место при отражении под углом Брюстера тангенс угла равен коэффициенту преломления отражающей среды) при распространении волны в анизотропной среде.

В общем случае *дифракция* – это отклонения волновых движений от законов геометрической (прямолучевой) оптики. Если на пути распространения волны имеется препятствие, то на краях препятствия наблюдается огибание волной края. Если размеры препятствия велики по сравнению с длиной волны, то распространение волны почти не отклоняется от прямолинейного, т.е. дифракционные явления не значительны. Если же размеры препятствия сравнимы с длиной волны, то наблюдается сильное отклонение от прямолинейного распространения волнового фронта. При совсем малых размерах препятствия волна полностью его огибает – она "не замечает" препятствия. Очевидно, величина отклонения (количественная характеристика дифракции) при заданном препятствии будет зависеть от длины волны; волны с большей длиной будут сильнее огибать препятствие.

Такое разделение волны используется в дифракционных спектроскопах, где белый свет (совокупность волн различной длины) располагается в спектр с помощью дифракционной решетки системы частых полос.

Изменение дифракционной картины при изменении размеров препятствий используется для градировки магнитного

поля, под действием которого изменяются параметры ферромагнитной пленки с полосовой доменной структурой.

Существует способ градировки магнитного поля с помощью эталона, отличающийся тем, что с целью повышения точности и упрощения процесса градуировки эталон, в качестве которого использована тонкая ферромагнитная пленка с полосовой доменной структурой, на которую нанесен магнитный коллоид, намагничивают под определенным углом к направлению силовых линий градуируемого поля, освещают его светом и наблюдают диффрагировавший на эталоне луч света, затем увеличивают градуируемое поле по величине, при которой исчезает наблюдаемый луч, сопоставляют эту величину с известным значением поля переключения эталона.

Интерференция волны – это явление, возникающее при наложении двух или нескольких волн и состоящее в устойчивом во времени их взаимном усилении в одних точках пространства и ослаблении в других в зависимости от соотношения между фазами этих волн. Интерференционная картина может наблюдаться только в случае *когерентных* волн, т.е. волн, разность фаз которых не зависит от времени. При интерференции поперечных волн помимо когерентности волн необходимо, чтобы им соответствовали колебания, совершающиеся вдоль одного и того же или близких направлений: поэтому две когерентные волны, поляризованные во взаимно перпендикулярных направлениях интерферировать не будут. Существует много различных методов получения когерентных волн: наиболее широко распространенными являются способы, основанные на использовании прямой и отраженной волны; если отраженная волна направлена точно назад, т.е. на 180 градусов, то могут возникнуть стоячие волны.

Явления интерференции и дифракции волн лежат в основе принципиально нового метода получения объемных изображений предметов – *голографии*.

Теоретические предпосылки голографии существовали давно (Д. Габор, 1948г.), однако практическое ее осуществление связано с появлением лазеров – источников света высокой интенсивности, когерентности и монохроматичности.

Суть голографии состоит в следующем. Объект освещают когерентным светом и фотографируют интерференционную картину взаимодействия света, рассеянного объектом, с когерентным излучением источника, освещающего объект. Эта интерференционная картина – чередование темных и светлых областей сложной конфигурации, зарегистрированная фотопластинкой и есть голограмма. Она не имеет никакого сходства с объектом, однако несет в себе полную визуальную информацию о нем, так как фиксирует распределение амплитуд и фаз волнового поля – результата наложения опорной когерентной волны и волн, дифрагированных на объекте. Для восстановления изображения голограмму освещают опорным пучком света, который, дифрагируя на неоднородностях почернения фотоэмульсии, дает объемное изображение, обладающей полной иллюзией реального объекта.

Голограммы обладают рядом интересных особенностей. Например, если голограмму расколоть на несколько кусков, то каждый из них при просвечивании дает полное изображение предмета, как и целая голограмма. Изменяются лишь четкость изображения и степень объемности. Если же с голограммой контактным способом снять обращенную копию (негатив), то изображение полученное от этой копии все равно останется позитивным.

Одно из фундаментальных открытий в области голографии принадлежит Ю.Н.Денисюку, осуществившему голографию в стоячих волнах. Открытие зарегистрировано под N'88 со следующей формулой:

"Установлено ранее неизвестное явление возникновения пространственного неискаженного цветного изображения объекта при отражении излучения от трехмерного элемента про-

зрачной материальной среды, в которой распределение плотности вещества соответствует распределению интенсивности поля стоячих волн, образующихся вокруг объекта при рассеянии на нем излучения".

Такие трехмерные голограммы на стадии восстановления необязательно освещать когерентным излучением – можно пользоваться обычным источником света.

Возможности использования голографических методов неисчерпаемы. Например, если процессы регистрации и восстановления производить при разных длинах волн, то изображение объекта во столько раз, во сколько длина волны восстановления больше длины волны регистрации (голографический микроскоп). С помощью голографии можно получать интерференционные картины от объектов, диффузно рассеивающих свет. Совмещая голографическое изображение с самим объектом, и изучая интерференционную картину, можно зафиксировать самые незначительные деформации объекта.

Голография дает возможность создать оптическую память чрезвычайно большой емкости. С ее помощью успешно решается проблема машинного распознавания образов. Можно сделать так, что проекция на голограмму одних образцов будет вызывать появление других, определенным образом связанным с первым (ассоциативная память).

Существенно, что голографическое изображение можно получать не только с помощью электромагнитных, но и акустических волн. Когерентные ультразвуковые волны дают возможность освещать большие объекты. Следовательно, можно получить трехмерное изображение внутренних частей объекта, например, человеческого тела, недр Земли, толщи океана.

Возможности оптической и акустической голографии изучены сейчас еще не полностью, голографические методы проникают во все области науки и техники, позволяя изящно и надежно решать неразрешимые задачи.

Дисперсия волн – зависимость фазовой скорости гармонических волн в веществе от их частоты. Область частот в которой скорость убывает с увеличением частоты, называется областью *нормальной дисперсии*, а область частот, в которой при увеличении частоты скорость также увеличивается, называется *областью аномальной дисперсии*. Дисперсия волн наблюдается, например, при распространении радиоволн в ионосфере, волноводах.

При распространении световых волн в веществе также имеет место *дисперсия света* (зависимость абсолютного показателя преломления от частоты света). Если вещество прозрачно для некоторой области частоты волн, то наблюдается нормальная дисперсия, а если интенсивно поглощает свет, то в этой области имеет место аномальная дисперсия. В результате дисперсии узкий параллельный пучок белого света, проходя через призму из стекла или другого прозрачного вещества, уширяется и образует на экране, установленном за призмой радужную полоску, называемую дисперсионным спектром. Для световых волн единственной недиспергирующей средой является вакуум.

Эффект Ганн – генерация ВЧ-колебаний электрического тока в полупроводнике с N-образной вольтамперной характеристикой. Обнаружен американцем Дж. Ганном в 1963 г. в кристалле GaAs с электронной проводимостью. Генерация возникает, если постоянное напряжение U, приложенное к образцу длиной £, таково, что среднее электрическое поле E в образце составляет U/£, что соответствует подающему участку В АХ E\-E_2.

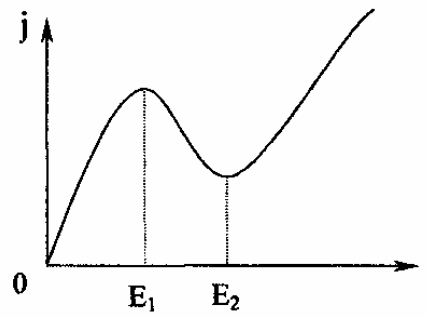


Рис. 4.2. N-образная ВАХ:
E – электрическое поле, создаваемое приложенной разностью потенциалов; j - плотность тока

Колебания тока имеют вид периодической последовательности импульсов (рис. 4.3), частота их повторения обратно пропорциональна напряженности электрического поля E.

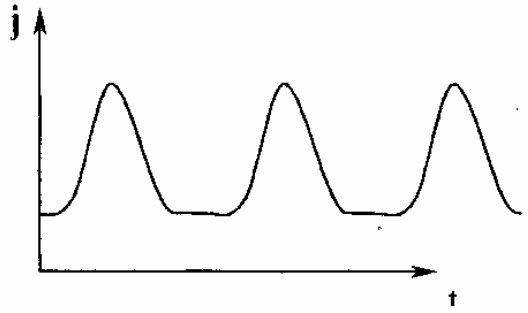


Рис. 4.3. Форма колебаний тока при эффекте Ганна

Кроме GaAs эффект наблюдается у InP, CdTe, ZnSJnAs и пр. Применение: в генераторах и усилителях СВЧ [3].

5. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

5.1. Взаимодействие тел

В основе всех физических явлений лежит взаимодействие между телами или частицами. Согласно представления современной физике всякое взаимодействие передается через некоторое поле. Электрические заряды взаимодействуют через *электрическое поле*, которое они создают, магниты и электрические токи – через *магнитное поле*. Механическое взаимодействие осуществляется через *электромагнитные поля*, создаваемые электронами вещества.

Взаимодействие заряженных тел или частиц в самом простейшем случае описывается *законом Кулона*.

Известно, что разноименные заряды притягиваются, а одноименные – отталкиваются.

Изменяя форму поверхности заряженных тел можно изменить конфигурацию образующихся полей. А это, в свою очередь, открывает возможность управлять силами, действующими на заряженные частицы (тела), помещенные в такое поле.

При внесении незаряженного проводника в электрическое поле носители заряда приходят в движение. В результате у концов проводника возникают заряды противоположенного знака, называемые *индуцированными зарядами*.

Это же явление используется для защиты различных объектов от воздействия электрических полей путем электрического экранирования и для получения сверхвысоких постоянных напряжений (генератор Ван-де Граафа). При частичном введении диэлектрика между обкладками конденсатора наблюдается втягивание диэлектрика между обкладками.

5.2. Закон Джоуля-Ленца

Под действием электрического поля в проводнике при создании на его концах разности потенциалов заряды движутся – в проводнике возникает электрический ток. Любые нарушения кристаллической решетки проводника – дефекты, примеси, тепловые

колебания – являются причиной рассеяния электронных волн, т.е. уменьшения упорядочности движения электронов. При этом в проводнике выделяется тепло (закон Джоуля - Ленца).

5.3. Проводимость металлов

Высокая проводимость металлов связана с особенностью их электронного спектра, в котором непосредственно над заполненными уровнями находятся свободные уровни. У большинства металлов сопротивление увеличивается линейно с ростом температуры, в то же время ряд сплавов имеет отрицательных температурный коэффициент сопротивления. Меняется сопротивление и у неметаллов.

Сопротивление металлов при плавлении возрастает, если его плотность возрастает (в полтора-два раза, для свинца – в 3-4 раза) и, наоборот, падает, если плотность металла при плавлении уменьшается (висмут, сурьма, галлий).

При приложении внешнего гидравлического давления сопротивление металлов уменьшается. Это уменьшение максимально у щелочных металлов, имеющих максимальную сжимаемость. У ряда элементов на кривых зависимости сопротивления от давления имеются скачки, используемые в физике высоких давлений в качестве реперных точек.

Кроме того, на сопротивление металлов очень сильно влияет наличие примесей (или состав сплава), что используется для идентификации сплавов. Так, например, при изменении количества примесей в стали от 0,1 до 1,1% ее удельное сопротивление изменяется от $(10 \text{ до } 30)\cdot 10^{-8}$ Ом·см.

Широко используются изобретателями и обычные изменения сопротивления объектов за счет изменения размеров или состава объекта.

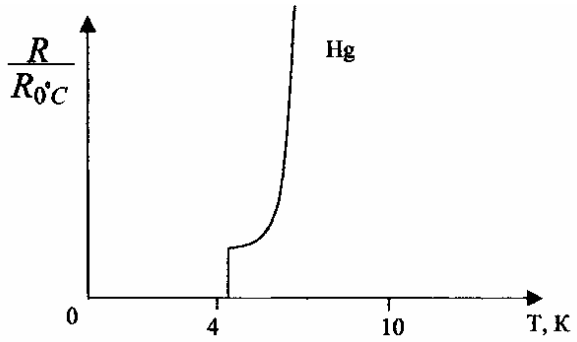
При низких температурах поведение сопротивления металлов весьма сложно. У некоторых металлов и сплавов обнаруживается явление *сверхпроводимости*. Сверхпроводящее состояние устойчиво, если температура, магнитное поле и плотность тока не превышает некоторых критических пределов. В 1976 г. достигну-

ты следующие максимальные значения этих параметров: критическая температура 23,4 К, критическое поле 600 кЗ, плотность тока $11 \cdot 10^{11}$ А/см^2.

Если один из параметров поддерживать вблизи критического значения, то сверхпроводящая система может быть использована для очень точного определения небольших изменений измеряемой величины, например, вблизи критической температуры – 10 см/ºС.

Сверхпроводимость – свойство многих проводников, состоящее в том, что их электрическое сопротивление скачком падает до нуля* при охлаждении ниже определенной критической температуры $T_к$, характерной для данного материала. Это явление обнаружено у более, чем 25 металлов, большого числа сплавов, полупроводников, полимеров.

Опыты установили, что сопротивление металлов в сверхпроводящем состоянии меньше, чем 10^{-20} Ом-м. Кроме того, в состоянии сверхпроводимости выталкивается магнитное поле из сверхпроводника



(идеальный диэлектрик)

Рис. 5.1. Зависимость сопротивления от температуры для ртути

Ртуть при 4,1 5К переходит в сверхпроводящее состояние. Важное свойство: выше критического магнитного поля $H_к$

сверхпроводимость исчезает. С ростом температуры $H_к$ монотонно падает.

Применение: сверхпроводящий магнит, резонатор, сверхчувствительный W-метр [3].

Эффект Купера – объединение электронов в металле в пары, приводящее к появлению сверхпроводимости; предсказан в 1956 г. американским физиком Л. Купером. Без учета эффект Купера в основном состоянии металла (при температуре T –> 0 K) электроны заполняют в пространстве импульсов объем, ограниченный Ферми поверхностью. Распределение по импульсам такого, что в металле имеются электроны с равными и противоположно направленными импульсами. Согласно Куперу, электроны, находящиеся вблизи поверхности Ферми и имеющие противоположно направленные импульсы и спины, могут объединяться в пары благодаря взаимодействию через решетку, которая возникает в результате обмена виртуальными фононами и имеет характер притяжения. Куперовские пары имеют целочисленный (нулевой) спин, поэтому система куперовских пар обладает сверхтекучестью.

Малая величина энергии связи электронов куперовской пары обусловливает существование низкотемпературной сверхпроводимости металлов, их соединений и сплавов (~ до 10К).

5.4. Электромагнитное поле

Электрическое и магнитные поля тесно связаны между собой. В природе существует *электромагнитное поле* – чисто электрические и чисто магнитные поля являются лишь его частными случаями. Изменяющиеся электрические и магнитные поля индуктируют друг друга.(под изменением поля надо понимать не только изменение его интенсивности, но и движение поля как целого).

Взаимное индуктирование электрического и магнитного полей происходит в пространстве с огромной скоростью (со

скоростью света) и представляет собой распространение электромагнитных волн. Такими электромагнитными волнами являются радиоволны, свет – инфракрасный, видимый, ультрафиолетовый, а также рентгеновские и гамма-лучи. Поэтому многие эффекты, описанные в этом разделе, имеют аналоги и в оптике, и, наоборот, "оптические" эффекты широко применяются в радиотехнике, особенно в диапазоне СВЧ (например, эффект Фарадея).

Магнитное поле может быть создано постоянными магнитными, переменными электрическим полем и движущимися электрическими зарядами, в частности теми, которые движутся в проводнике, создавая электрический ток.

Основной характеристикой электрического поля является *напряженность*, определяемая через силу, действующую на заряд. Основной характеристикой магнитного поля является *вектор магнитной индукции*, также определяемый через силу, действующую на заряд в магнитном поле.

$$B = \frac{F_л}{q * v} \tag{5.1}$$

На неподвижные заряды магнитное поле вообще не действует. Движущийся заряд магнит не притягивает и не отталкивает, а действует на него в направлении, перпендикулярном к полю и к скорости заряда. Сила, действующая на заряд в этом случае, называется *силой Лоренца*.

$$F_л = q * [\overline{B} \times \overline{V}] \tag{5.2}$$

При движении зарядов в магнитном поле не вдоль линии этого поля из-за силы Лоренца траектория их движения будет представлять собой спираль. Чем сильнее поле, тем меньше радиус этой спирали. Период обращения заряда не зависит от

скорости движения, а только от отношения величины заряда к массе заряженной частицы.

В случае перпендикулярности силовых линий магнитного поля плоскости движения заряженной частицы она начинает двигаться по кругу, причем радиус этого круга зависит от напряженности магнитного поля.

5.5. Проводник с током в магнитном поле

Когда по проводнику, помещенному в магнитное поле, идет электрический ток, электроны движутся относительно положительных ионов, составляющих кристаллическую решетку. Поэтому и в системе отсчета, связанной с решеткой (т.е. в системе отсчета, в которой проводник неподвижен, сила Лоренца действует только на электроны). Через взаимодействие электронов с ионами эта сила передается решетке.

Возможен и обратный эффект: колебания решетки передаются электронам, а их движение в магнитном поле приводит к возникновению тока.

Взаимодействие двух проводников, по которым текут электрические токи, осуществляется через магнитное поле. Каждый ток создает магнитное поле, которое действует на другой проводник. Таким образом, взаимодействуют отнюдь не поля между собой, а поле и ток.

Аналогичным образом взаимодействуют и движущиеся электрические заряды. Причем для магнитных взаимодействий третий закон Ньютона не выполняется (сила, действующая на один заряд со стороны другого, не равна силе действующей на второй заряд со стороны первого).

5.6. Электромагнитная индукция

При движении (изменении) магнитного поля в замкнутом проводнике возникает *ЭДС индукции*. В соответствии с правилом Ленца направление индукционного тока таково, что его

собственное поле препятствует изменению магнитного потока, вызывающего индукцию. Внешние силы, двигающие магнит, встречают сопротивление со стороны проводящего контура. Собственное поле контура таково, что при приближении магнита рамка и магнит отталкиваются, а при удалении притягиваются. Во всех случаях внешние силы должны будут выполнять работу, которая превратится в конечном счете в работу тока.

Это явление наблюдается и в том случае, когда перемещения проводника не происходит, а магнитное поле меняется во времени. Если контур, проводящий ЭДС индукции вызывает в нем индукционный ток, если непроводящий (например, условно проведенный в воздухе), то возникает лишь ЭДС.

Рассмотрим два контура, расположенные рядом. Переменный ток, протекающий в одном из них, создает переменное магнитное поле, которое вызывает появление ЭДС индукции в другом контуре. Такое явление называется *взаимной индукцией*.

Переменный магнитный поток может вызываться переменным током самого контура. В этом случае в контуре также появляется ЭДС – она называется *ЭДС самоиндукции*.

Если в изменяющемся магнитном поле перпендикулярно к его силовым линиям поместить металлическую (не ферромагнитную) пластинку, в ней начнут протекать *круговые индукционные токи*.

Ток в пластинке может достигать больших величин, даже при небольшой напряженности поля, так как сопротивление массивного проводника мало. Индукционные токи в массивных проводниках называют *токами Фуко* или *вихревыми точками*.

Вихревые токи в пластинке создают магнитное поле. Это поле действует в соответствии с правилом Лоренца навстречу полю возбуждения. Это значит, что пластинка будет выталкиваться из поля.

Колеблющаяся между полюсами электромагнита тяжелая металлическая пластинка "увязает", если включить постоянный ток, питающий электромагнит, и останавливается. Вся ее энергия превращается в тепло, выделяемое токами Фуко. В неподвижной

пластине токи, разумеется, отсутствуют. Тормоз, основной на этом эффекте не имеет трения покоя.

Чем лучше проводник пропускает ток, тем ближе по величине к первоначальному встречное магнитное поле. В идеальный проводник (сверхпроводник) электромагнитная волна вообще не проникает, вихревые токи текут в бесконечно малой по величине "кожице" металла.

Выталкивание магнитного поля из сверхпроводника называется *эффектом Мейснера*.

Этот эффект используется для создания магнитных экранов, позволяющих получить магнитный вакуум до 10^{-8} эрстед. Им объясняется интересное явление – парение постоянного магнита над чашей из сверхпроводящего материала.

В стационарном электростатическом или магнитном поле подвеска тела не может быть стабильной, если относительная диэлектрическая проницаемость или магнитная проницаемость тела больше или равна единице. Диэлектрическая проницаемость всех тел больше. Но магнитная проницаемость диамагнитных материалов и сверхпроводников меньше единицы. Это дает возможность осуществлять с этими веществами стабильную подвеску. Любое перемещение подвешенного тела приводит к появлению вихревых токов, энергии которых достаточно, чтобы удержать подвешенное тело.

Триумф индукционных токов – беличья клетка ротора асинхронного двигателя работают индукционные насосы для перекачивания жидких металлов в металлургии и ядерной энергетике.

На величину вихревого тока влияют удельная электрическая проводимость и магнитная проницаемость материала, толщина образца и частота тока.

При прохождении по проводнику тока высокой частоты наблюдается *поверхностный эффект* (*скин-эффект*) – ток идет только по поверхностному слою проводника. При частоте 10^{-7} Гц для хорошего неферромагнитного проводника толщина слоя приблизительно 0,01 см. На этом основан метод поверхностной закалки.

Существование скин-эффекта означает, что электромагнитная волна, попадающая на поверхность проводника (металла, электролита или плазмы) быстро затухает в глубине проводника, проникая лишь на глубину скин-слоя.

5.7. Электромагнитные волны

Электрический заряд, движущийся в пустоте равномерно относительно инерционной системы отсчета, не излучает. Иная картина возникает в том случае, когда заряд под действием внешних сил движется с ускорением. Поле, обладающее энергией, а значит массой или инертностью, образно говоря, отрывается от заряда и излучается в пространстве со скоростью света. Излучение происходит до тех пор, пока на заряд действует сила, сообщающая ему ускорение.

Эффект Вавилова-Черенкова. Если заряженная частица являющаяся источником электрического поля, движется в среде со скоростью, большей, чем скорость света в этой среде, то частица будет опережать собственное электрическое поле. Такое опережение вызывает появление направленного электромагнитного излучения, причем излучение будет распространяться лишь в определенном телесном угле, определенном скоростью частиц и показателем преломления среды. Чем больше плотность среды, тем более низкая энергия (скорость) заряженных частиц требуется для генерации излучения. Техника обнаружения этого свечения разработана до предела – аппаратура позволяет обнаруживать отдельные частицы (поштучный счет с помощью счетчиков Черенкова). Кроме этого Черенковские счетчики используются для быстрого счета и непосредственного определения скорости заряженных частиц, селекции скоростей и направления частиц, определения заряда и т.п. На использовании эффекта Вавилова-Черенкова возможно создание миллиметровых и более коротких радиоволн; черенковское излучение позволяет создать стандартный источник света, необходимый при биологических и астрономических исследованиях.

Эффект Черенкова-Вавилова – излучение света электрически заряженной частицей, возникающей при ее движении в среде с постоянной . скоростью, превышающей фазовую скорость света в этой среде. Обнаружено в 1934 г. П. А. Черенковым при исследование γ-люминесценции растворов как слабое голубое свечение жидкостей под действием γ-излучения:

1) свечение наблюдается у всех чистых прозрачных жидкостей, причем его яркость мало зависит от их химического состава;

2) в отличие от люминесценции, не наблюдается ни температурного, ни приместного изменения;

3) излучение поляризовано;

4) свечение направлено под острым углом к скорости частицы.

Излучение Черенкова-Вавилова может наблюдаться только в идеальных случаях, когда заряженная частица движется с постоянной скоростью радиаторе неограниченной длины.

Примечание: регистраторы частиц высокой энергии, измерители их скорости – черенковские счетчики.

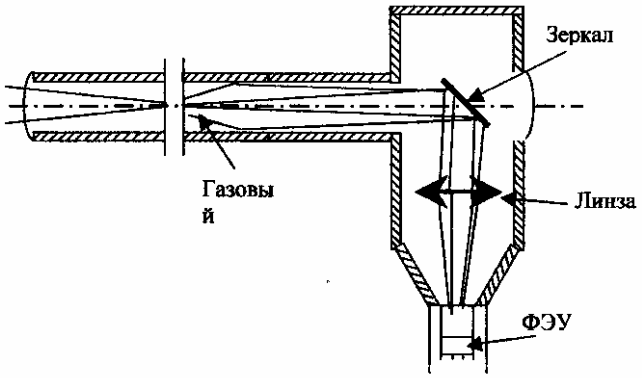


Рис. 5.2. Схема газового порогового черепковского счетчика

Черепковское излучение собираются на катоде ФЭУ с помощью оптической системы.

Другой пример – так называемое *бетатронное* (или *синхронное*) излучение. В этих приборах заряженные частицы движутся по круговым орбитам. При энергиях порядка десятков МэВ электроны излучают видимый свет, при еще больших энергиях рентгеновский луч.

Наиболее важным для приложения является излучение заряда, совершающего гармоническое движение. На этом эффекте основана работа всевозможных излучателей и антенн.

Обработка магнитными электрическими полями. Омагничивание воды. Это словосочетание прочно вошло в изобретательскую практику. И неважно, что до сих пор нет четкого объяснения изменения свойств воды после наложения на нее магнитного поля (1-3). Важно, что применение этого эффекта позволяет интенсифицировать многие процессы.

Некоторые изобретатели предпочитают использовать вращающее магнитное поле.

Начали обрабатывать магнитным полем и др. вещества.

В некоторых случаях в изображениях одинаково хорошо работает и магнитное, и электрическое поле.

Эффект Шотки - уменьшение работы выхода электрона из твердых тел под действием внешнего ускоряющего их электрического поля. Эффект Шотки проявляется в росте тока термоэлектронной эмиссии поверхностной ионизации и в сдвиге порога фотоэлектронной эмиссии в сторону больших длин волн. Эффект Шотки в электрических помех Е, достаточно больших для рассасывания пространственного заряда у поверхности эмиттера (Е ~ 10 -^ 100 В/см), и существует до полей Е - 10^6 В/см, после чего начинает преобладать термоэлектронная эмиссия.

Может иметь место так называемый аномальный эффект Шотки, заключающийся в существовании неоднородной эмитирующей поверхностью, когда имеется "метка" с различной работой выхода. Вследствие этого эмиссионный ток из неоднородного эмиттера растет при увеличение Е быстрее, чем в случае однородного эмиттера.

Изотопический эффект – зависимость критической температуры $T_к$ сверхпроводящего металла от его изотопного состава; $T_к$ возрастает при уменьшении средней атомной массы М вещества.

Впервые изотопический эффект наблюдался в 1950 г. Исследования показали, что одновременно с $T_к$ изменяется критическое магнитное поле $H_{к,с}$ (при $T \rightarrow 0$ °К), но отношение $H_{к,с}/T_к$ для разных изотопов данного сверхпроводящего металла остается постоянным [3].

Тензорезистивный эффект – изменение электрического сопротивления твердого проводника (металла, полупроводника) в результате его деформации. Особенно велик этот эффект в полупроводниках, где он связан с изменением энергетического спектра носителей заряда при деформации: с изменением ширины запрещенной зоны и энергии ионизации примесных

уровней, с изменением эффективных масс носителей заряда и др.

Все это приводит к изменению концентрации носителей и их эффективной подвижности. Кроме того, деформация влияет на процесс рассеяния носителей через появление новых дефектов.

Деформация полупроводников ведет к изменению ВАХ последних.

Применение: в чувствительных датчиках механических напряжений и ускорений [3].

Эффект Джозефсона – протекание сверхпроводящего тока через тонкий слой диэлектрика, разделяющий два сверхпроводника (то есть *контакт Джозефсона*); предсказан на основе теории сверхпроводимости английским физиком Б- Джозефсоном в 1963 г. Электроны проводимости проходят через диэлектрик (обычно пленку окиси металла толщиной ~10А) благодаря туннельному эффекту. Если ток через контакт Джозефсона не превышает определенного значения, называемого критическим током контакта, то падение напряжения на контакте отсутствует (стационарный эффект Джозефсона). Если же через контакт пропускать ток, больший критического, то на контакте возникает падение напряжения, и контакт излучает электромагнитные волны (нестационарный эффект).

Аналогичный эффект наблюдается, когда сверхпроводники соединены тонкой перемычкой, а также, если между ними находится тонкий слой металла или полупроводника. Такие системы называют слабосвязанными сверхпроводниками [3].

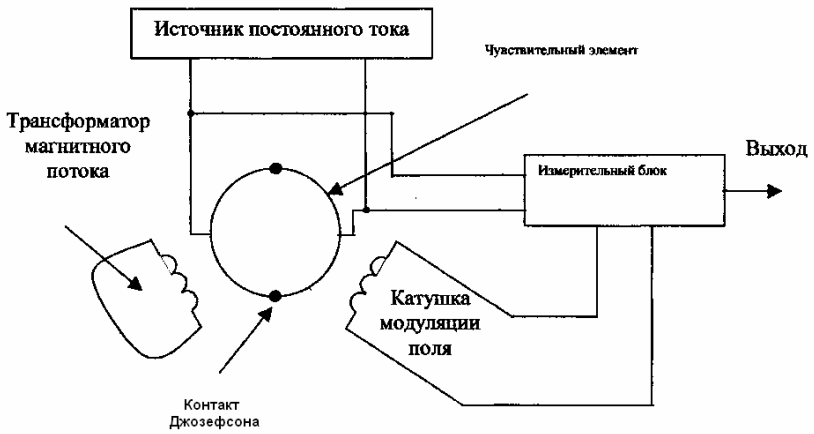


Рис. 6.1. Прибор для измерения сверхслабых магнитных полей – сверхпроводящий магнитометр

6.1. Проводники, изоляторы и полупроводники

Диэлектриками являются неионизованные газы, а также жидкости и твердые тела, характеризующиеся полностью заполненной электронами валентной зоной и полностью электронной на уровне зоны проводимости не происходит, то такие вещества ведут себя как *изоляторы*. При наличии такого возбуждения (в случае малой энергетической щели между зонами) вещества являются полупроводниками. Диэлектрики и полупроводники экспоненциально уменьшают свое электрическое сопротивление при повышении температуры.

Если материал претерпевает те или иные превращения, его сопротивление электрическому току меняется.

Расплавы некоторых диэлектриков - проводники, в частности, хорошо пропускает ток расплавленное стекло.

В диэлектрике, помещенном в переменное электромагнитное поле, часть энергии поля переходит в тепловую. Эта доля пропорциональна тангенсу угла диэлектрических потерь.

Все виды нагрева диэлектриков в электрических полях основаны именно на этом эффекте.

6.2. Диэлектрическая проницаемость

Диэлектрическая проницаемость диэлектриков зависит от многих факторов. По ее изменению можно контролировать ход различных процессов в диэлектриках.

Диэлектрические свойства вещества *зависят от частоты*. Один и тот же материал при воздействии на него поля низкой частоты – диэлектрик, поля высокой частоты – проводник.

6.3. Пробой диэлектриков

Пробой диэлектриков носит либо *тепловой*, либо электрический *лавинный* характер. Механизм теплового пробоя – постепенный разогрев участка диэлектрика, падение его сопротивления и термическое разрушение материала.

6.4. Электромеханические эффекты в диэлектриках

Общим электромеханическим эффектом для всех диэлектриков является *электрострикция*. Она появляется в упругом (обратимом) превращении энергии тела в электрическое поле и для свободного тела сопровождается увеличением его размеров.

Пьезоэлектрический эффект (*пьезоэффект*) – это также электромеханический эффект, однако он наблюдается не во всех диэлектриках, а только в нецентросимметричных кристаллах. Причем, в отличии от электрострикции, пьезоэффект обратим. Он может быть прямым и обратным.

Прямой пьезоэффект проявляется в образовании зарядов на поверхности твердого тела под воздействием механических напряжений.

Лампу-вспышку зажигает удар. Польский изобретатель Тадеуш Косецкий предложил использовать пьезокристалл в качестве источника энергии для лампы-вспышки. Под действием быстрого сильного удара по кристаллу на нем возникает электрическое напряжение. По расчетам изобретателя, его вполне должно хватить для зажигания лампы. Никаких батарей для такого "блица" вообще не понадобится: всю необходимую для лампы энергию даст механический удар по кристаллу.

Электрострикция – деформация диэлектриков, пропорциональная квадрату напряженности электрического поля E^2.

Электрострикция обусловлена поляризацией диэлектриков в электрическом поле и есть у всех диэлектриков - твердых, жидких и газообразных.

Электрострикцию следует отличать от линейного по полю E обратного пьезоэлектрика.

В изотропных средах, в том числе в газах и жидкостях, Электрострикция наблюдается как изменение плотности под действием электрического поля; относительная объемная деформация AV/V также пропорциональна квадрату напряженности электрического поля E.

Если приложить переменное электрическое поле частоты ю к диэлектрику, то в результате электрострикции диэлектрик будет колебаться с частотой 2.

Применение: для преобразования электрических колебаний в звуковые [3].

Обратный пьезоэффект - аналогичен эффекту электрострикции однако, если при электрострикции деформации тела не зависит от знака электрического поля, для пьезоэффекта такая зависимость имеет место. Практически можно считать, что пьезоэффект отличен, а электрострикция является квадратичным эффектом.

В некоторых случаях используются одновременно и прямой и обратный пьезоэффект, например, в пьезоэлектрических трансформаторах.

Пьезоэффект – эффект, при котором в некоторых кристаллических веществах, то есть пьезоэлектриках (кварц, сегнетова соль, титанат бария и др.) при сжатии или растяжении в определенных направлениях возникает электрическая поляризация даже в отсутствии электрического поля (прямой пьезоэффект). Следствием прямого пьезоэффекта является обратный пьезоэффект – появление механических деформаций под действием электрического поля.

Пьезоэффекты наблюдаются только у кристаллов, не имеющих центра симметрии. Некоторые прироэлектрики способны создавать пьезоэффект, где он проявляется в частности, в изменении величины спонтанной поляризации при механической деформации. Пьезоэлектрические свойства возможно создавать в некоторых некристаллических диэлектриках (пьезокерамика, древесина и др.).

Применение: выше описанный эффект используется в пьезоэлектрических преобразователях (УЗ-технология, дефектоскопия, радиовещание, микрофоны, резонаторы и т.д.).

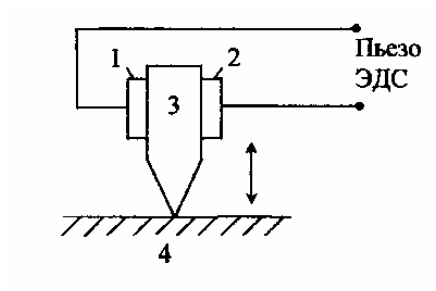


Рис. 6.2. Пьезоэлектрический преобразователь:
1,2 – электроды; 3 – пьезоэлемент; 4 – поверхности

6.5. Пироэлектрики и сегнетоэлектрики

В некоторых кристаллах суммарный дипольный момент отличен от нуля даже в отсутствие внешнего электрического поля. Такого рода кристаллы называют *самопроизвольно* или

спонтанно поляризованными кристаллами. Другое название этих кристаллов *пироэлектрики*. Это название появилось потому, что пироэлектрики обнаруживают по возникновению заряда на их поверхности при нагревании или охлаждении. С помощью пироэлектриков можно измерять изменение температуры на 10^{-6} °С.

Пироэлектрический эффект обычно усложняется тем, что каждый пироэлектрический кристалл является одновременно и пьезоэлектриком. Поэтому неоднократное изменение температуры кристалла вызывает деформацию, а последняя породит "вторичную" поляризацию пьезоэлектрического происхождения, налагающуюся на "первичную" пироэлектрическую поляризацию.

В пироэлектрических кристаллах может наблюдаться *электрокалорический эффект* – изменение температуры пироэлектрика, вызванное изменением величины электрического поля (например, при внесении пироэлектрика в электрическое поле).

Электрокалорический эффект – изменение температуры диэлектрика под влиянием электрического поля. В пироэлектриках изменение температуры пропорционально изменению напряженности поля Е, в других веществах наблюдается лишь меньший по величине *квадратичный электрокалорический эффект* [3].

Пироэлектрический эффект – появление электрических зарядов на поверхности некоторых кристаллов (пироэлектриков) при .их нагревание или охлаждение. Пироэлектрики - кристаллические диэлектрики, обладающие поляризацией в отсутствии электрического поля и других внешних воздействий. Типичный пироэлектрик – турмалин; в нем при изменение температуры на 1°С возникает электрическое поле Е - 400 В / см. Один конец пироэлектрика при нагревании заряжается положительно, а при охлаждение отрицательно, другой - наоборот.

Интенсивность электризации максимальна, если скорость изменения температуры выше скорости релаксации заряда.

Появление электрических зарядов на поверхности пироэлектрика связано с изменением существующей в нем поляризации при изменение в нем температуры [3].

Пироэлектрики используются в технике в качестве индикаторов и приемников излучений.

Сегнетоэлектрики – частный случай пироэлектриков.

В сегнетоэлектриках также самопроизвольно возникает поляризация, но только в некотором интервале температур. Температура, при которой происходит исчезновение спонтанной поляризации, называется *сегнетоэлектрической температурой Кюри*. При температуре Кюри в сегнетоэлектриках наблюдается максимум диэлектрической проницаемости, а ее изменение вблизи этой температуры происходит скачками. Выше температуры Кюри сегнетоэлектрик переходит в пароэлектрическое состояние.

Сегнетоэлектрики – это электрические аналоги ферромагнетиков, которые, как известно, самопроизвольно намагничиваются и имеют точку Кюри. Поэтому сегнетоэлектрики иногда называют *ферроэлектриками*. Они отличаются большой диэлектрической проницаемостью, высоким пьезоэффектом, наличием петли диэлектрического гистерезиса, интересными электрооптическими свойствами.

Кроме сегнетоэлектриков, которые можно рассматривать как совокупность параллельно ориентированных диполей, есть вещества с антипараллельным расположением диполей. Их называют *антисегнетоэлектриками*.

При наложении достаточно сильного электрического поля антисегнетоэлектрики могут перейти в сегнетоэлектрическое состояние При таком вынужденном фазовом переходе в сильном переменном поле наблюдаются двойные петли гистерезиса. Критическое поле, при котором в антисегнетоэлектриках возникает сегнетоэлектрическая фаза, уменьшается при

увеличении температуры. В некоторых случаях с ростом температуры наблюдаются переходы из сегнетоэлектрического состояния в антисегнетоэлектрическое, а затем в пароэлектрическое.

Сегнетоферромагнетики – это сегнетоэлектрики, в которых наблюдается упорядочение магнитных моментов. В них могут существовать различные виды электрического и магнитного упорядочения: сегнетоэлектричество или антисегнетоэлектричество с ферромагнитизмом, антиферромагнетизмом или ферромагнетизмом.

Сегнетоэлектрические и ферромагнитные точки Кюри у таких веществ не совпадают. Но в сегнетоэлектрической точке Кюри наблюдается аномалия магнитных свойств, а в магнитной аномалия диэлектрических. Кроме того, при наложении магнитного (электрического) поля наблюдается изменение электрической (магнитной) проницаемости – *магнитоэлектрический эффект*.

Магнитоэлектрический эффект – возникновение в кристаллах намагниченности J при помещении их в электрическое поле E. Эффект возможен только в магнитоупорядоченных кристаллах (антиферро-, ферри-, ферромагнетиках). Экспериментально был открыт в 1960 г. Астровым в кристалле Cr_2O_3 Величина магнетоэлектрического эффекта мала. Существует и обратный эффект -возникновение электрической поляризации P при помещении кристалла в магнитное поле H [3].

Влияние электрического поля и механических напряжений на сегнетоэлектрический эффект.

Наложение электрического поля вдоль полярной оси увеличивает устойчивость сегнетоэлектрического состояния, расширяет область температур, в которой существует спонтанная поляризация. В антисенгетоэлектриках в сильных электрических полях температура Кюри понижается.

Некоторые сигнетоэлектрики выше точки Кюри обладают пьезоэффектом. Приложение к таким веществам в пара-

электрической фазе механического напряжения по эффекту эквивалентно приложенного напряжения.

В водородосодержащих сегнетоэлектриках наложение гидростатического давления повышает температуру Кюри.

Если в сегнетоэлектрике наблюдаются низкотемпературные переходы, на кривых температурных зависимостей диэлектрических свойств обычно наблюдаются аномалии, соответствующие этим переходам. Антисегнетоэлектрический фазовый переход сопровождается аномалией теплоемкости ирконата свинца – 400 ккал/моль); может наблюдаться аномальное изменение объема и коэффициента теплового расширения.

При нагреве сегнетоэлектрического кристалла происходит уменьшение спонтанной поляризации, что эквивалентно появлению пироэлектрического заряда на поверхности кристалла.

Новый тип сегнетоэлектрического полинейного элемента тактандел-температурно автостабилизированный диэлектрический нелинейный элемент сам стабилизирует свою температуру вблизи точки Кюри.

На возрастание электросопротивления в области температуры Кюри основаны сегнетоэлектрические термосопротивления с продолжительным температурным коэффициентом (ТКС- +60%/градус) - позисторы.

6.6. Электреты

Электреты – электрические аналоги поэтапных магнитов. Они длительно сохраняют наэлектризованное состояние и создают вокруг себя электрическое поле. Электреты получаются либо охлаждением нагретого диэлектрика (воска, церезина, нейлона и т.д.) в сильном электрическом поле, либо освещением (или радиоактивным облучением) фотопроводящих диэлектриков, также в сильном поле. Применение электретов связано в основном с наличием у них постоянного электрического поля.

Эффект Энтинхаузена – возникновение градиента температуры ∇T в твердом проводнике с током плотностью j под действием магнитного поля H $\perp$ j в направлении, перпендикулярном H и j [3].

Эффект Нернста-Эттингсхаузена – возникновение в твердом проводнике при наличии градиента температуры ∇T и перпендикулярного к нему магнитного поля H электрического поля E_N (поля Нернста). Открыт в 1886 г. немецким физиком Нернстом и голландским А. Эттингхаузеном. Различают продольный эффект, когда поле E_N возникает в направлении, параллельном градиенту температуры и поперечный, когда поле E_N появляется в направлении, перпендикулярном H и ∇T. Количественная характеристика величины NX, пропорциональна H в случае слабых полей и H''^{1} в случае сильных полей [3].

Эффект Баркгаузена – скачкообразное изменение намагниченности ферромагнетиков при непрерывном изменении внешних условий, например, магнитного поля. Впервые наблюдался в 1919 г. немецким физиком Баркгаузеном: при медленном намагничивании ферромагнитного образца в измерительной катушке, надетой на образец, он обнаружил в цепи катушки импульсы тока, обусловленные скачкообразным изменением намагниченности J образца. Особенно ясно эффект проявляется в магнитомягких материалах на кривых участках кривой намагничивания и петли гистерезиса, где доменная структура изменяется в результате процессов смещения границ ферромагнитных доменов.

Кривая намагниченности ферромагнетика имеет ступенчатый характер. Скачкообразное изменение намагниченности может быть вызвано не толь полем, но и другими внешними воздействиями (плавным изменением упругих напряжений или температуры), при которых происходит изменение доменной структуры образца [3].

Эффект Эйнштейна-Де Хааза – при намагничивание тела вдоль некоторой оси, тело получает относительно этой оси механический момент, пропорциональный приобретенной намагниченности [3].

Эффект Шубникова-Де Хааза – осциллирующая зависимость электрического сопротивления р монокристаллического проводника от обратного магнитного поля Н, наблюдается при низких температурах. Открыт Шубниковым и немецким физиком В. Де Хаазом в 1930 г. в монокристалле BL Период осцилляции А зависит от ориентации поля Н относительно кристаллографических осей. С ростом температуры амплитуда осцилляции экспоненциально убывает [3].

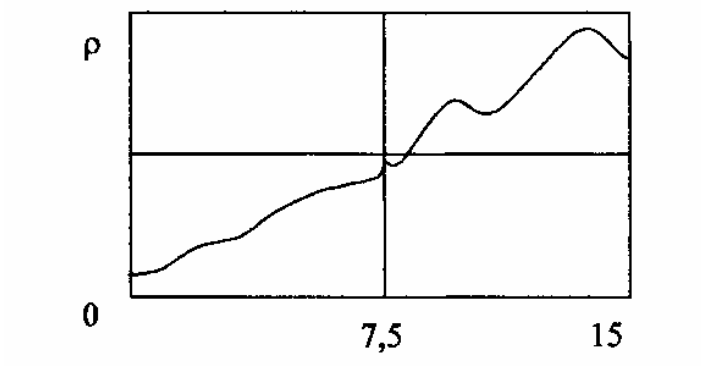


Рис. 7.1. Осциллирующая зависимость электрического сопротивления р монокристаллического проводника от обратного магнитного поля Н

Эффект Маджи-Риги-Ледюка – изменение теплопроводности проводника под действием магнитного поля. Открыт итальянскими и французскими учеными в 1887 г. Эффект обусловлен искривлением траекторий носителей тока в магнитном поле под действием силы Лоренца, что соответствует уменьшению эффективной длины свободного пробега носителей заряда и приводит к изменению электронной части теплопровод-

ности. В полупроводниках величина эффекта значительно больше, чем в металлах [3].

Эффект Барнетта – намагничивание ферромагнетиков при их вращении в отсутствии магнитного поля; открыт в 1909 г. американским физиком С. Барнеттом. Эффект объясняется тем, что при вращении магнетика создается гироскопический момент, стремящийся повернуть спиновые или орбитальные механические моменты атомов по направлению оси вращения магнетика. С механическим моментом атомов связан их магнитный момент, поэтому при вращении появляется составляющая магнитного момента вдоль оси вращения [3].

Эффект Мейснера – полное вытеснение магнитного поля из металлического проводника, когда последний становится сверхпроводящим (при понижении температуры и напряженности магнитного поля ниже критического значения). Впервые наблюдался В. Мейснером и Р. Оксенорельдом в 1933 г. Согласно эффекту Мейснера, идеальный сверхпроводник ведет себя как идеальный диамагнетик. При этом эффекте внешнее магнитное поле оказывается заэкранированным диамагнитными токами, возникающими в тонком поверхностном слое сверхпроводника. В недостаточно чистых металлах и сплавах наблюдается частичное «замораживание» магнитного поля в объеме сверхпроводника, то есть неполнота эффекта Мейснера [3].

7.1. Магнетики

Всякое вещество является *магнетиком*, т.е. способно под действием магнитного поля приобретать магнитный момент (намагничиваться). По величине и направлению этого момента, а также по причинам, его породившим, все вещества делятся на группы. Основные из них – *диа*- и *парамагнетики*.

Молекулы *диамагнетика* собственного магнитного момента не имеют. Он возникает у них только под действием внешнего магнитного поля и направлен против него. Таким

образом, результирующее магнитное поле в диамагнетике меньше, чем внешнее поле, правда, на очень малую величину. Это приводит к тому, что при перемещении диамагнетика в неоднородное магнитное поле он стремится сместиться в ту область, где напряжение магнитного поля меньше.

Благодаря этому разработали гироскопическую систему, практически свободную от трения, содержащую цилиндрический ротор, концы которого окружены парой кольцевых постоянных магнитов. На каждом конце ротора установлена вставка из диамагнитного материала, взаимодействующая с соответствующим постоянным магнитом так, что создаются отталкивающие магнитные силы, которые удерживают ротор в состоянии, характеризующимся отсутствием физического контакта ротора с магнитом: ротор "всплывает" в магнитном поле практически без трения.

Молекулы (или атомы) *парамагнетика* имеют собственные магнитные моменты, которые под действием внешних полей ориентируются по полю и тем самым создают результирующее поле, превышающее внешнее. Парамагнетики втягиваются в магнитное поле.

Так, например, жидкий кислород – парамагнетик, он притягивается к магниту.

Магнитная проницаемость конкретного вещества зависит от многих факторов: напряженности магнитного поля, формы рассматриваемого поля (так как конечные размеры любого магнетика приводят к появлению встречного поля, уменьшающего первоначальное), температуры, частоты изменения магнитного поля, наличия дефектов структуры и т.д.

Учитывая эти факторы был разработан способ структуроскопии ферромагнитных изделий, заключающийся в том, что контролируемое изделие подвергают взаимодействию с электроиндуктивным преобразователем магнитной проницаемости в электрические сигналы, по которым судят о результатах контроля, отличающийся тем, что с целью повышения достовер-

ности определения усталостных изменений в структуре материала изделия, поверхность последнего сканируют преобразователем по заданной функции относительно места концентрации механических напряжений, регистрируют экстремумы относительного значения магнитной проницаемости и по их распределению судят об усталостных изменениях в структуре материала.

Так же существует способ неразрушающего контроля физико-химических процессов в структурированных упруговязкопластичных системах, основанный на изменении магнитной восприимчивости, отличающийся тем, что с целью повышения точности определения нормальной густоты водных растворов вяжущих веществ, изменяют во времени изменения удельной магнитной восприимчивости и по максимальному значению ее судят о готовности продукта.

Существует ряд веществ, в которых квантовые эффекты межатомных взаимодействий приводят к появлению специфических магнитных свойств.

Наиболее интересное свойство – *ферромагнетизм*. Оно характерно для группы веществ в твердом кристаллическом состоянии (ферромагнетиков), характеризующихся параллельной ориентацией магнитных моментов атомных носителей магнетизма.

Параллельная ориентация магнитных моментов существует в довольно больших участках вещества – *доменах*. Суммарные магнитные моменты отдельных доменов имеют очень большую величину, однако сами домены обычно ориентированы в веществе хаотично. При наложении магнитного поля происходит ориентация доменов, что приводит к возникновению суммарного магнитного момента у всего объема ферромагнетика, и, как следствие, к его намагничиванию.

Постоянный магнит, содержащий одноименные частицы, отличающийся тем, что с целью повышения коэрицитивной силы, в качестве доменов использованы отрезки литого микро-

провода в стеклянной изоляции, каждый из которых содержит один микрокристал.

Естественно, что ферромагнетики, как и парамагнетики, перемещаются в ту точку поля, где напряженность максимальная (втягиваются в магнитное поле). Из-за большой величины магнитной проницаемости сила, действующая на них, гораздо больше.

Способы склеивания ферромагнитных:

- способ склеивания ферромагнитных материалов, включающий операцию нанесения клея на склеиваемые поверхности, соединение поверхностей, полного отвердения клея, отличающийся тем, что с целью уничтожения прочности склеивания, в период открытой выдержки раздельно проводят обработку каждой из двух склеиваемых поверхностей с нанесенным на них слоя клея постоянными магнитными полями противоположной полярности с напряженностью от 500 до 700 эрстед;

- способ по п.1, отличающийся тем, что в период отверждения на клеевой шов воздействуют магнитным полем, совпадающим по направлению с полем остаточного магнетизма.

Для обработки внутренних поверхностей труб применяют способ, включающий операции по введению внутрь трубы абразива в виде мелкозернистого или порошкообразного вещества высокой твердости, перемещения этого абразива относительно внутренней поверхности трубы при их взаимном контакте и последующего извлечения из трубы полученного порошкообразного продукта, отличающийся тем, что с целью улучшения качества обработки трубы и для ее нагрева, ферромагнитный абразив после его введения внутрь трубы подвергается воздействию вращающегося электромагнитного поля, созданного вокруг трубы.

Здесь используется эффект втягивания ферромагнетика в то место поля, где магнитные силовые линии "гуще"; так как поле вращается, то вращаются и частицы.

Существование доменов в ферромагнетиках возможны только ниже определенной температуры (*точка Кюри*). Выше точки Кюри тепловое движение нарушает упорядоченную структуру доменов и ферромагнетик становится обычным парамагнетиком.

Данное свойство используется в термолюминесцентном дозиметре, содержащим дозиметрический элемент, заключенный в герметизированную прозрачную камеру и снабженный носителем люминесцентного материала, нагреваемый индукционным путем, отличающийся тем, что носитель содержит ферромагнитный материал, точка Кюри которого, характеризующие фазовый переход второго рода, соответствуют определенной максимальной температуре.

Диапазон температур Кюри для ферромагнетиков очень широк: у радолиния температура Кюри 20 С, для чистого железа - 1043 К. Практически всегда можно подобрать вещество с нужной температурой Кюри.

А так же в магнитной муфте скольжения, содержащая корпус и многополюсный ротор с постоянными магнитами, отличающаяся тем, что с целью автоматического включения муфты при заданной температуре, она снабжена шунтами, установленными между полюсами ротора и выполненного из термореактивного материала, имеющего характеристику магнитной проницаемости с точкой Кюри, соответствующей заданной температуре, а корпус и ротор изготовлены из материала сточкой Кюри, соответствующей температуре выше заданной.

При понижении температуры все парамагнетики, кроме тех у которых парамагнетизм обусловлен электронами проводимости, переходят либо в ферромагнитное, либо в антиферромагнитное состояние.

У некоторых веществ (хром, марганец) собственные магнитные моменты электронов ориентированы антипараллельно (навстречу) друг другу. Такая ориентация охватывает соседние

атомы и их магнитные моменты компенсируют друг друга. В результате антиферромагнетики обладают крайне малой магнитной восприимчивостью и ведут себя как очень слабые парамагнетики.

Для антиферромагнетиков также существует температура, при которой антипараллельная ориентация спинов исчезает. Эта температура называется *антиферромагнитной точкой Кюри* или *точкой Нееля*.

У некоторых ферромагнетиков (эрбин, диоброзин, сплавов марганца и меди) таких температур две (верхняя и нижняя точка Нееля), причем антиферромагнитные свойства наблюдаются только при промежуточных температурах. Выше верхней точки вещество ведет себя как парамагнетик, а при температурах меньших нижней точки Нееля, становится ферромагнетиком.

Необратимое изменение намагниченности ферромагнитного образца, находящегося в слабом постоянном магнитном поле, при циклическом изменении температуры называется *температурным магнитным гистерезисом*. Наблюдается два вида гистерезиса, вызванных изменением доменов и кристаллической структуры. Во втором случае точка Кюри при нагреве лежит выше, чем при охлаждении.

Существует способ записи оптических изображений на ферромагнитную пленку, заключающийся в ее экспонировании, отличающийся тем, что с целью упрощения процесса записи путем исключения операции по намагничиванию пленки, экспонирование пленки осуществляют в интервале от температуры Кюри при нагреве до температуры Кюри при охлаждении.

А так же способ сборки ферритовых постоянных магнитов в систему с предварительным намагничиванием каждого магнита, отличающийся тем, что с целью исключения потери намагниченности при сборке, перед операцией намагничивания каждый постоянный магнит нагревают до температуры,

при которой кривые возврата совпадают с кривой размагничивания.

Ферримагнетизм – (или антиферромагнетизм нескомпенсированный) совокупность магнитных свойств веществ (ферромагнетиков) в твердом состоянии, обусловленных наличием внутри тела межэлектродного обменного взаимодействия, стремящегося создать антипараллельную ориентацию соседних атомных магнитных моментов. В отличии от антиферромагнетиков, соседние противоположно направленные магнитные моменты в силу каких-либо причин не полностью компенсируют друг друга. Поведение ферромагнетика во внешнем поле во многом аналогично ферромагнетику, но температурная зависимость свойств имеет иной вид: иногда существует точка компенсации суммарного магнитного момента при температуре ниже точки Нееля. По электрическим свойствам ферромагнетики диэлектрики или полупроводники.

Суперпарамагнетизм – квазипарамагнитное поведение систем состоящих совокупности экстремально малых ферро или феримагнитных частиц. Частицы этих веществ при определенно малых размерах переходят в однодоменное состояние с однородной самопроизвольной намагниченностью по всему объему частицы. Совокупность таких веществ ведет себя по отношению к воздействию внешнего магнитного поля и температуры подобно парамагнитному газу (сплавы меди с кобальтом, тонкие порошки никеля и т.д.).

Очень малые частицы антиферрмагнетиков также обладают особыми свойствами, похожими на суперпарамагнетизм, поскольку в них происходит нарушение полной компенсации магнитных моментов. Аналогичными свойствами обладают и тонкие ферромагнитные пленки.

Супермагнетизм применяется в тонких структурных исследованиях, в методах неразрушающего определения размеров, форм, количества и состава магнитной фазы и т.п.

Пьезомагнетики – вещества, у которых при наложении упругих напряжений возникает спонтанный магнитный эффект, пропорциональный первой степени величины напряжений. Этот эффект весьма мал и легче всего его обнаружить в антиферромагнетиках.

Магнитоэлектрики – вещества, у которых при помещении их в электрическое поле возникает магнитный момент, пропорциональный значению поля.

7.2. Магнитокалорический эффект

Магнитокалорический эффект – изменение температуры магнетика при его намагничивании. Для парамагнетика увеличение поля приводит к увеличению температуры, что используется для получения сверхнизких температур методом адиабатического размагничивания парамагнитных солей.

Магниторезистивный эффект – эффект изменения электрического сопротивления твердого проводника под действием внешнего магнитного поля H. Различают поперечный магниторезистивный эффект, при котором электрический ток I течет перпендикулярно магнитному полю, и продольный. Причина магниторезистивного эффекта - искривление траекторий носителей тока в магнитном поле.

Понижение температуры и увеличение H приводит к увеличению отношения (Др/р)_ь В сильных полях для большого количества металлов при температуре жидкого азота (Ар/р)j_ линейно зависит от H. В слабых полях (Ар/р)л пропорционально H^2. Сопротивление обычно растет при увеличении магнитного поля; исключения составляют ферромагнетики [3].

Применение: в приборах для измерения магнитных полей (магнитометрах).

7.3. Магнитострикция

Пьезомагнитный эффект – возникновение в веществе намагниченности под действием внешнего давления. Пьезомагнетизм может существовать только в антиферромагнетиках и принципиально не возможен в пара- и диамагнетиках.

Пьезомагнетизм возникает, когда под действием приложенного давления симметрия магнитной структуры антиферромагнитного кристалла изменяется таким образом, что в нем появляется слабый ферромагнетизм.

Пьезомагнитный эффект был экспериментально обнаружен пока лишь в 3-х антиферромагнитных кристаллах: MnF_2, CoF_2 и -Fe_2O_3. величина намагниченности пропорциональна приложенному упругому напряжению. Пьезомагнитный эффект невелик. Существует обратный эффект -магнитострикция антиферромагнетиков [3].

Механострикция – деформация, возникающая в ферро-, ферри- и антиферромагнитных образцах при наложении механических напряжений, изменяющих магнитное состояние (намагниченность) образцов. Механострикция является следствием магнитострикции.

В отсутствии внешнего магнитного поля механические напряжения вызывают в образце процессы смещения границ магнитных доменов и вращения векторов их самопроизвольной намагниченности, что приводит к дополнительному, по сравнению с упругим, изменению размеров образца. При наличии механострикции деформация образца оказывается непропорциональна напряжению [3].

Изменение размеров тела, вызванное изменениями его намагниченности, называют *магнитострикцией* (*объемной* или *линейной*). Величина эффекта для объемной магнитострикции - $3 \cdot 10^{-5}$, для линейной – 10^{-4}. Этот эффект сильно зависит от соотношения в сплаве и от температуры.

Необычное применение эффекта для нагрева:

- установка для индукционного нагрева текучих сред содержащая массивный сердечник с продольными каналами для прохождения среды и обхватывающее его коаксиально установленные изоляционную трубку и индуктор, подключенный к источнику переменного тока, отличающаяся тем, что с целью интенсификации нагрева путем информации кристаллической решетки материала сердечника, а индуктор дополнительно подключен к источнику постоянного тока.

Термострикция – магнитострикционная деформация ферро и антиферромагнитных тел при нагревании их в отсутствии магнитного тела. Эта деформация сопутствует изменению самопроизвольной намагниченности с нагревом. Она особенно велика в близи точек Кюри и Нееля, т.к. здесь особенно сильно изменяется намагниченность.

Наложение термострикции на обычное тепловое расширение приводит к аномалии в ходе теплового расширения. В некоторых феромагнитах и антиферромагнитах эти аномалии очень велики.

Магнитострикция – эффект изменения формы и размеров тела при его намагничивании; открыт английским ученым Дж. Джоулем (1842 г.). В ферро- и ферримагнетиках (Fe,Ni,Co,Cd,Tb и др.) и в некоторых сплавах магнитострикция достигает значительной величины. В антиферро-, пара- и диамагнетиках магнитострикция значительно меньше.

Магнитострикция относится к четным магнитным эффектам, так как она не зависит от знака магнитного поля. Обычно измеряется относительное удлинение образца в направлении поля (продольная магнитострикция) или перпендикулярно направлению поля (поперечная магнитострикция).

Величина, знак и графический ход зависимости магнитострикции от напряженности поля и намагниченности зависят от структурных особенностей образца (получение примесей, термической и холодной обработки). Магнитострикция ре-

кордно высока у некоторых редкоземельных сплавов: $DyFe_2$, $TbFe_2$ ($\Delta\ell/\ell \approx 10^{-3} ... 10^{-2}$).

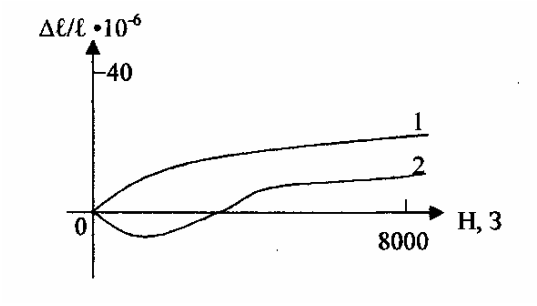


Рис. 7.2. Продольная (1) и поперечная (2) магнитострикция сплава NiFe

Применение: в магнитострикционных преобразователях (излучатели и приемники энергии), трансформаторах, фильтрах, резонаторах, где используются ферромагнетики [3].

Магнитоупругий эффект – влияние механической деформации (растяжение, кручение, изгиба и т.д.) на намагниченность ферромагнетика. Открыт в 1865 г. итальянцем Э. Виллари.

При постоянном упругом напряжении, положенном на ферромагнитный образец, изменение (прирост) намагниченности образца с ростом магнитного поля сначала увеличивается, затем проходит через максимум (точка Виллари) и в пределе убывает до нуля.

Магнитоупругий эффект - обратен эффекту магнитострикции. Ферромагнетики (например, Ni), которые при намагничивании сокращаются в размерах (обладают отрицательной магнитострикцией), при растяжении уменьшают свою намагниченность (отрицательный эффект Виллари). Наоборот растяжение ферромагнетиков с положительной магнитострикцией, приводит к увеличению их намагниченности (положительный эффект Виллари). При сжатии знак меняется на обратный [3].

Эффект Видемана – возникновение деформации кручения у ферромагнитного стержня, по которому течет электрический ток, при помещении стержня в продольное магнитное поле. Открыт в 1858 г. немцем Г. Видеманом. Эффект Видемана – одно из проявлений магнитострикции в поле, образованном сложением продольного магнитного поля и кругового магнитного поля, создаваемого электрическим током. Если электрический ток (или магнитное поле) является переменным, то в стержне возбуждаются крутильные колебания [3].

7.4. Магнитоэлектрический эффект

Магнитоэлектрический эффект – явление намагничивания ряда веществ в антиферромагнитном состоянии электрическим полем и их электрически поляризация магнитным полем. Этот эффект обусловлен специфической симметрией расположения магнитных моментов в кристаллической решетке вещества. Эффект позволяет получать сведения о магнитной структуре веществ без сложных нейтронографических последствий и применяется в волноводных устройствах СВЧ.

7.5. Гиромагнитные явления

В основе *гиромагнитных* или *магнитомеханических* явлений лежит вращение электрона вокруг ядра. Суть этих явлений заключается в том, что намагничивание магнетика приводят к его вращению и наоборот вращение магнетика вызывает его намагничивание.

Для компенсации влияния гиромагнитного эффекта при угловом перемещении магнитометров результирующего поля, находящегося на самолете, и прибор для его осуществления обеспечивает компенсацию влияния гиромагнитного эффекта на магнитометр результирующего поля который имеет отсчитывающую обмотку. Гиромагнитный эффект возникает в результате углового перемещения относительно данного направления, совершаемого самолетом, на котором находится магнитометр. Вырабатывается

электрический сигнал, величина которого пропорциональна угловой скорости самолета относительно данного направления. В отсчеты магнитометра вводится пропорциональная этому сигналу коррекция, которая учитывает также угол между указанным выше направлением силовых линий измеряемого поля.

7.6. Магнитоакустический эффект

Магнитоакустические эффекты – (магнитоупругие взаимодействия) возникают в результате взаимодействия между спинами магнитных ионов и упругими колебаниями решетки, т.е. в результате тех же взаимодействий, что и магнитострикционные эффекты.

Волоконный звукопровод, состоящий из волокон звукопроводящего материала, собранных по концам в жгут, отличающийся тем, что с целью увеличения стабильности эксплуатационных характеристик волокна выполнены из ферромагнитного материала и намагничены на требуемом участке звукопровода по всему его сечению в одном направлении.

Измерение частоты механических колебаний объекта основанно на совпадении составляющей вибрации с частотой собственных колебаний одного из несколько упругих элементов, жестко связанный с объектом, отличающийся тем, что с целью повышения точности измерения, жесткость упругого элемента изменяют магнитным полем с симметричной магнитодвижущей силой напряженность которого изменяется пилообразным током, и по величине тока в момент резонанса определяют частоту механических колебаний объекта.

7.7. Ферромагнитный резонанс

Ферромагнитный резонанс – электронный магнитный резонанс в ферромагнетиках – это совокупность явлений, связанных с избирательным поглощением ферромагнитиками энергии электромагнитного поля при частотах совпадающих с собственными частотами процессии магнитных моментов электронной системы

во внутреннем эффективном магнитном поле. (Поглощение на несколько порядков больше, чем в ВПР).

Измерения мгновенного значения тока путем сравнивания с постоянным током. С целью увеличения быстродействия и точности измерения, ферритовый элемент выводят из режима ферромагнитного резонанса помещая его в магнитное поле измеряемого постоянным током, возвращают его в режим феррорезонанса, изменяя постоянный ток, и по величине постоянного тока судят о мгновенном значении измеряемого параметра.

7.8. Аномалии свойств при фазовых переходах

Вблизи точек Кюри и Нееля у магнетиков наблюдается сильные аномалии в изменении различных свойств при изменении температуры. Для ферромагнитиков это – *эффекты Гопкинса* (возрастание магнитной восприимчивости вблизи точки Кюри и Баркгаузена) ступенчатый ход кривой намагниченности образца вблизи температуры Кюри при изменении температуры, упругих напряжений или внешнего магнитного поля.

Измерение максимальной дифференциальной магнитной проницаемости в ферромагнитных материалах, основанный на подсчете числа скачков Баркгаузена на восходящей ветви петли гистерезиса, с целью повышения точности и упрощения процесса измерения, уменьшают напряженность магнитного поля до величины, при которой число скачков Баркгаузена на нисходящей ветви петли гистерезиса станет равным половине общего числа скачков, при этом значении уменьшают напряженность магнитного поля на заданную величину и измеряют приращение индукции, по величине которой определяют максимальную дифференциальную магнитную проницаемость.

Кроме того, вблизи точки Кюри наблюдается ферромагнитная аномалия теплоемкости. Это дает возможность определять температуру Кюри и отсутствии магнитного поля.

Близкие эффекты наблюдаются и в антиферомагнитиках.

8. КОНТАКТНЫЕ, ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ЭМИССИОННЫЕ ЯВЛЕНИЯ

8.1. Контактная разность потенциалов

При контакте двух разных металлов один из них заряжается положительно, другой – отрицательно и между ними возникает разность потенциалов, называемая *контактной*. Она не очень мала – от десятых долей вольта до нескольких вольт и зависит только от химического состава и температуры контактирующих тел.

Это используется в способе контроля качества спекания агломерационной шихты путем изменения электрических характеристик спекаемого материала, отличающийся тем, что с целью повышения быстродействия непрерывности контроля качества, исключения влияния влажности исходной шихты, измеряют абсолютное значение электрического напряжения (ЭДС) между корпусом спекаемого агрегата и спеченным материалом и сравнивают эту величину с абсолютной величиной электрического напряжения (ЭДС), полученной при спекании материала с эталонными характеристиками.

А так же в способе определения усталостной прочности металла заключающийся в том, что образец из исследуемого металла нагружает его до разрушения и по числу циклов нагружения до разрушения судят об усталостной прочности металла, отличающееся с целью определения накопления усталостных повреждений в металле также в процессе его нагружения; измеряют величину работы выхода электрона с его поверхности например, методом контактной разности потенциалов, по которой судят о накоплении усталостных повреждений в металле.

Контактная разность потенциалов возникает не только между двумя металлами, но и между двумя полупроводниками полупроводником и металлом, двумя диэлектриками и т.д.,

причем соприкасающиеся тела могут не только твердыми, но и жидкими.

В основе *трибоэлектричества* (электризации тел при трении) также лежат контактные явления. Причем знаки зарядов, возникающих при трении двух тел, определяются их составом, плотностью, диэлектрической проницаемостью, состоянием поверхности и т.д. Трибоэлектричество возникает при просеивании порошков, разбрызгивании жидкостей, трении газов о поверхности тел и в других подобных случаях.

Применяется, например, в способе испытания органических жидкостей на электролизацию например нефтепродуктов, путем создания в них трением электростатического потенциала, отличающийся тем, что с целью одновременного определения скорости образования и скорости утечки возникающих зарядов, образование зарядов происходит путем вращения твердого тела, помещенного в исследуемую жидкость.

Другой интересный пример – электростатический коатулятор. Он предназначен для очистки воздуха в штреках. Вентилятор гонит по трубе запыленный воздух. Труба разделяется на два рукова один из фторопласта, другой - из оргстекла. Пылинки антрацита, трущиеся о стенки, заряжаются поразному: на фторопласте положительно, на оргстекле отрицательно. Потом рукава сходятся в общую камеру, где размноженные частицы антрацита притягива, сливаются и па.

При контакте металла с проводником наблюдается *вентильный эффект*. Контактный слой на границе металла и полупроводника обладает односторонней проводимостью, что используется, например, для выпрямления переменного тока в точечных диодах. При контакте проводников разных типов проводимости образуется *p-n переход*, также обладающий вентильными свойствами. Это явление используется во многих типах полупроводниковых приборов.

8.2. Термоэлектрические явления

В металлах полупроводниках процессы переноса зарядов (электрический ток) и энергии взаимосвязаны, так как осуществляются посредством перемещения подвижных носителей тока электронов проводимости и дырок. Эта взаимосвязь обуславливает ряд явлений (Зеебека, Пельтье, и Томсона), которые называют *термоэлектрическими явлениями*.

Эффект Зеебека состоит в том, что в замкнутой электрической цепи из разнородных металлов возникает термо-ЭДС, если места контактов поддерживаются при разных температурах. Эта ЭДС зависит только от температуры и от природы материалов, составляющих термоэлемент. Термо-ЭДС для пар металлов может достигать 50 мкВ/градус; в случае полупроводниковых материалов величина термо-ЭДС выше (10 во 2-ой + 10 в 3-ей мкВ/градус).

Эффект Зеебека применяется:

- в электротермическом способе дефектоскопии заключающимся в том, что контролируемую зону нагревают пропуская через нее в течение определенного времени постоянный по величине электрический ток, измеряют при помощи термопары-датчика температуры ее нагрева и судят о наличии дефекта по отклонению этой температуры от температуры нагрева бездефектной зоны сварного соединения, отличающийся тем , что с целью контроля зоны сварного соединения двух разных металлов, например, контактных узлов радиодеталей, в качестве термопары-датчика используют термопару, образованную соединенными металлами.

Для проверки качества сварного шва снимают распределение термоэлектрического потенциала поперек шва. Пики и впадины на кривых распределения говорят о неоднородности шва, а их величина - о степени неоднородности. Быстро и наглядно.

Если в разрыв одной из ветвей термоэлемента включить последовательно любое число проводников любого состава, все спаи (контакты) которых поддерживаются при одной и той же температуре, то термо-ЭДС в такой системе будет равна термо-ЭДС исходного элемента.

Термопара, содержащая защитный чехол, термоэлектроды с электрической изоляцией, рабочие концы которых снабжены токопроводящей перемычкой, образующей измерительный спай, отличающийся тем, что с целью увеличения срока службы термопары в условиях повышенной вибрации и больших скоростей нагрева, измерительный спай термопары выполнен в виде слоя порошкообразного металла, расположенного на дне защитного чехла.

При измерении физического состояния веществ, участвующих в контакте изменяется и величина термо-ЭДС

Это свойство применяется в способе распознавания систем с ограниченной и неограниченной взаимной растворимостью компонентов по температурной зависимости термо-ЭДС, отличающейся тем, что с целью повышения надежности распознавания измеряют термо-ЭДС контакта двух исследуемых образцов.

Между металлом, сжатым всестороннем давлением, и тем же металлом, находящемся при нормальном давлении тоже возникает термо-ЭДС

Например, для железа при температуре 100 °С и давлении 12 кбар, термо-ЭДС равна 12,8 мкВ .При насыщении металла или сплава в магнитном поле относитель тогоже вещества без магнитного поля возникает термо-ЭДС порядка 09мкВ/градус.

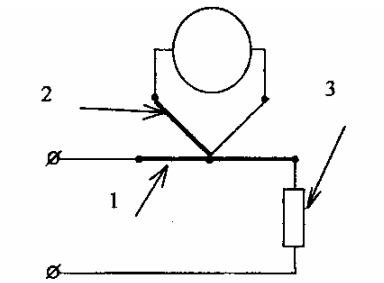
Эффект Зеебека – возникновение ЭДС в цепи, состоящей из последовательно соединенных разнородных проводников, контакты между которыми имеют разную температуру. Открыт в 1821г. Если электрическая цепь состоит из 2-х различных проводников, она называется термоэлементом (термопарой). Величина термо-ЭДС зависит только от температуры

горячего T_1 и холодного T_2 контактов и от материала проводников.

Термо-ЭДС может возникнуть в цепи, состоящей и из одного материала, если его разные участки подвергать различным технологическим операциям. Она не меняется при последовательном включение в цепь любого количества других материалов, если появляющиеся при этом дополнительные места контактов поддерживаются при одной и той же температуре.

Термо-ЭДС металлов очень мала, сравнительно больше термо-ЭДС в полупроводниках и их сплавах (Pd + Ag). Причина подобных явлений – нарушение силового равновесия в потоке носителей тока.

Использование: в термоэлектрических измерительных приборах (термоэлектрических термометрах), представляющих сочетание термоэлектрического преобразователя с электроизмерительным механизмом. Применяется для измерения I и U при несинусоидальных токах и на повышенных частотах.



Термоэлектрический омметр:
1 - нагреватель; 2 - термопара; 3 - нагрузка;
М - измерительный механизм

Эффект Пельтье обратен эффекту Зеебека. При прохождении тока через спай различных металлов кроме джоулева тепла дополнительно выделяется или поглощается, в зависимости от направления тока, некоторое количество тепловых

(спай сурьма-висмут при 20 °С – 10,7 мкал/Кулон). При этом количество теплоты пропорционально первой степени тока.

Несколько примеров применения Эффекта Платье:

- для увеличения отношение сигнал шум ФЭУ предлагается способ охлаждения фотокатодов термоэлектрическими элементами, расположенными внутри вакуумной оболочки ФЭУ;

- холодильник, устройства для отбора газа, в котором отвод конденсата составляет одно целое с холодильником. На внутренней стороне полого конуса закреплены холодные спаи элементов Пельтье и от него ответвляется трубопровод для отбора измерительного газа. Холодильник, отличается тем, что в качестве генератора тока, потребляемыми элементами Пельтье, предусмотрена батарея термоэлементов, горячие спаи которых находятся в канале дымовых газов, а холодные спаи – во внешнем пространстве.

Эффект Пельтье – выделение или поглощение теплоты при прохождение электрического тока I через контакты двух различных проводников. Выделение теплоты сменяется поглощением при изменение направления тока. Открыт французским физиком Ж. Пельтье в 1834 г. Объяснение эффекта: средняя энергия носителей зависит тока от их энергетического спектра, концентрации и механизма их рассеяния и по этому в различных проводниках различна. При переходе из одного проводника в другой электроны либо передают избыточную энергию атомам, либо пополняют недостаток энергии за их счет.

В первом случае вблизи контакта выделяется, а во втором поглощается теплота Пельтье. При переходе электронов из полупроводника в металле электроны отдают свою избыточную энергию. На контакте двух полупроводников (двух металлов) также выделяется (поглощается) теплота, т. к. средняя энергия носителей зарядов по обе стороны контакта различна.

Применение: эффект используется для охлаждения в холодильных установках, в некоторых электрических приборах [3].

Явлением Томсона называют выделение или поглощение теплоты, избыточной над джоулевой, при прохождении тока по неравномерно нагретому однородному проводнику или полупроводнику.

Эффект Томсона – выделение или поглощение теплоты в проводнике с током, вдоль которого имеется градиент температуры, происходящее помимо выделения джоулевой теплоты. Теплота Томсона пропорциональна силе тока, времени и перепаду температуры.

Если вдоль проводника, по которому протекает ток, существует градиент температуры, причем направление тока соответствует направлению движения электронов от горячего конца к холодному, то при переходе от более нагретого участка в более холодный электроны тормозятся и передают избыточную энергию окружающим атомам (выделение теплоты); при обратном направление тока электроны, ускоряются полем термоэдс и пополняют свою энергию за счет энергии окружающих атомов (поглощение теплоты) [3].

8.3. Электронная эмиссия

Ноттингема эффект – выделение теплоты на катоде при автоэлектронной эмиссии и поглощение теплоты при термоавтоэлектронной эмиссии, обусловленной разностью между средней энергией электронов, подходящих к поверхности катода и покидающих его. При низкой температуре (при автоэлектронной эмиссии) распределение электронов по энергиям практически не отличается от распределения Ферми при абсолютном нуле. Поэтому сквозь потенциальный барьер в вакуум уходят электроны, энергия которых несколько ниже уровня Ферми. При этом происходит нагревание эмиттера за счет энергии электронов, приходящих из электрической цепи на ос-

вобождающиеся уровни. В случае термоавтоэлектронной эмиссии (при высокой температуре) электроны уходят с уровней, лежащих выше уровня Ферми. Заполнение этих уровней электронами, приходящими из цепи, приводит к охлаждению эмиттера. Открыт У. Б. Ноттингемом в 1941 г. [3].

Эффект Малтера – эмиссия электронов в вакуум из тонкого диэлектрического слоя на проводящей подложке при наличии сильного электрического поля в слое. Открыт американским радиоинженером Л. Малтером в 1936 г. в слое $A1_2O_3$ + Cs_2O на A1. эмиссионный ток быстро растет с ростом анодного напряжения. Эффект Малтера обусловлен наличием сильного электрического поля в слое, что приводит к автоэлектронной эмиссии из подложки в слой [3].

При контакте тел с вакуумом или газами наблюдается электронная эмиссия – выпускание электронов телами под влиянием внешних воздействий: нагревания (*теплоэлектронная эмиссия*) потока фотонов (*фотоэмиссия*), потока электронов (*вторичная эмиссия*), потока ионов, сильного электрического поля (*автоэлектронная* или *холодная эмиссия*), механических или других "портящих структуру" воздействий (*автоэлектронная эмиссия*).

Во всех видах эмиссий, кроме автоэлектронной, роль внешних воздействий сводится к увеличению энергии части электронов или отдельных электронов тела до значения, позволяющего им преодолеть потенциальный порог на границе тела с последующим выходом и вакуум или другую среду.

Эффект Малтера применяется:

- способ контроля глубины нарушенного поверхностного слоя полупроводниковых пластин, отличающихся тем, что с целью обеспечения возможности автоматизации и упрощения процесса контроля, пластину нагревают до температуры ,соответствующей максимуму *экзоэлектронной эмиссии*, которую контролируют одним из известных способов, а по положению пика эмиссии определяют глубину нарушенного слоя;

- электронная турбина, содержащая помещенные в вакуумный баллон катод и анод и размещенный между ними ротор с лопастями, отличающийся тем, что с целью увеличения крутящего-

ся момента на валу турбины ее ротор выполнен в виде набора соосных цилиндров с лопастями, между цилиндрами роторов установлены неподвижные направляющие лопатки имеют покрытие, обеспечивающее вторичную электронную эмиссию, например, сурьмяно-цезиевое. В случае автоэлектронной эмиссии внешнее электрическое поле превращают потенциальный порог на границе тела в барьер конечной ширины и уменьшает его высоту относительно высоты первоначального порога, вследствие чего становиться возможным *квантовомеханическое тунелирование* электронов сквозь барьер. При этом эмиссия происходит без затраты энергии электрическим полем;

- способ измерения объемной концентрации углеводородов в вакуумных системах путем термического разложения углеводородов на нагретом острийном автокатоде и регистрации времени накопления пиролетического углерода до одной из эталонных концентраций, отличающихся тем, что с целью повышения точности измерения время накопления углерода регистрируют по изменению значения автоэлектронного тока. Наличие на поверхности металла тонких диэлектрических пленок в сильных полях не мешает походу электронов через потенциальный барьер. Это явление называется *эффектом Молтера*;

- электронно-лучевая запоминающая трубка с экранными сетками, отличающаяся тем, что с целью хранения записи неограниченно долгое время одна из экранных сеток, служащая потенциалоносителем, изготовлена из металлов, излучающих вторично-электронную эмиссию, покрытых пленкой диаэлектрика и обладающих эффектом.

Туннелирование электронов по потенциальным барьерам широко используется в специальных полупроводниковых приборах – *туннельных диодах*. На высоту туннельного барьера можно влиять не только электрическим полем, но и другими воздействиями.

Так же это используется в устройстве позволяющем обнаруживать магнитные домены с внутренним диаметром не более 1 мк, основано на определении изменения уровня Ферми исследуемого электрода по изменению высоты туннельного барьера и

по его воздействию на величину сопротивления, туннельного перехода. Устройство применимо в магнитных долговременных и оперативных запоминающих устройствах.

А так же в устройстве для измерения контактного давления ленты на магнитную головку, содержащее упругие элементы и датчики, отличающиеся тем, что с целью осуществления одновременно интегрального и дискретного измерения указанного давления, устройство измерения выполнено в виде полуцилиндра, состоящего из упругих элементов, образующих на корпусе магнитной головки, при этом другой край полуцилиндра выполнен свободным, а под каждой полосой гребенки установлен датчик, например, с туннельным эффектом.

Туннельный эффект – преодоление микрочастицей потенциального барьера в случае, когда ее полная энергия меньше высоты барьера. Вероятность прохождения сквозь барьер – главных фактор, определяющий физические характеристики туннельного эффекта. Эта вероятность тем больше, чем меньше масса частицы, чем уже потенциальный барьер и чем меньше энергии недостает частице, чтобы достичь высоты барьера. В случае одномерного потенциального барьера характеристикой служит коэффициент прозрачности барьера, равный отношению потока прошедших сквозь него частиц к подающему на барьер потоку. Аналог туннельного эффекта в волновой оптике: проникновение световой волны внутрь отражающего покрытия в условиях, когда с точки зрения геометрической оптики происходит полное внутреннее отражение [3].

Применение: в радиоэлементах, основанных на туннельном эффекте – туннельных диодах.

Термоэлектронная Эммисия – испускание электронов нагретыми телами в вакууме или других средах. Выйти из тела могут только те электроны, энергия которые больше энергии, покоящегося электрона вне тела. Число таких электронов при Т-300 К очень мало и экспоненциально возрастает с температурой. Поэтому ток термоэлектронной эмиссии заметен только для нагретых тел. При отсутствии "отсасывающего" электрического поля вылетевшие электроны образуют вблизи поверхности эмиттера

отрицательный пространственный заряд, ограничивающий ток термоэлектронной эмиссии.

Термоэлектронная эмиссия лежит в основе работы термоэлектрических катодов, применяющихся во многих электровакуумных и газоразрядных приборах.

Термоэлектронный преобразователь энергии – устройство преобразования тепловой энергии в электрическую на основе вышеописанного явления. Его действие основано на следующем процессе: с катода (поверхность горячего металла с большой работай выхода) "испаряются" электроны, которые пролетев межэлектродный промежуток, "конденсируются" на аноде (холодный метал); во внешней цепи течет ток КПД его превышает 20 % [3].

Ионно-электронная эмиссия – испускание электронов поверхностью твердого тела в вакуум при бомбардировке поверхности ионами; Коэффициент ионно-электронной эмиссии у равен отношению числа эмитированных электронов n_i к числу падающих на поверхность ионов n_j. Для медленных ионов у практически не зависит от энергии и массы mj, но зависит от их заряда (для однозарядных ионов у ≈ 0,2, для многозарядных у может превышать единицу).

Ионно-электронная эмиссия зависит также от энергии ионизации и возбуждения ионов от работы выхода вещества мишени. Когда скорость ионов достигает 6-7-10^6 см/с, характер ее резко изменяется.

Вначале у растет пропорционально EJ, затем как $(si)'^2$, при $Vj = 10^8 - 10^9$ см/с достигается максимум, затем идет спад.

Если к поверхности твердого тела подходит медленный ион, то электрон твердого тела может перейти к иону и нейтрализовать его. Такой переход сопровождается выделением энергии и часть электронов, получивших ее, может покинуть тело. При бомбардировке быстрыми ионами происходит интенсивный электрообмен, при котором электрон вылетает в вакуум [3].

9. ГАЛЬВАНО- И ТЕРМОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

9.1. Гальваномагнитные явления

Гальваномагнитные явления – это совокупность явлений, возникающих под действием магнитного поля в проводниках, по которым протекает электрический ток. При этом в направлении перпендикулярном направлениям магнитного поля и направлению тока, возникает электрическое поле (*эффект Холла*).

Коэффициент Холла может быть положительным и отрицательным и даже менять знак с изменением температуры. Для большинства металлов наблюдается почти полная независимость коэффициента Холла от температуры. Резко аномальным эффектом Холла обладает висмут, мышьяк и сурьма. В ферромагнетиках наблюдается особый, *ферромагнитный эффект Холла*. Коэффициент Холла достигает максимума в точке Кюри, а затем снижается.

Это применяется в Способе измерения магнитной индукции в образце из магнитотвердого материала путем помещения испытуемого образца во внешнее магнитное поле, отличающийся тем, что с целью повышения точности и сокращении времени измерения через поперечное сечение образца пропускают электрический ток и измеряют ЭДС. Холла на его основных гранях, по которой судят об искомой величине.

В направлении перпендикулярном к направлению магнитного поля и направлению тока возникает температурный градиент (разность температур) *эффект Эттингсгаузена*.

Изменяется сопротивление проводника, что эквивалентно возникновению добавочной разности потенциалов вдоль направления электрического тока. Для обычных металлов это изменение мало – порядка 0,1 % в поле 20 кВ, однако для висмута и полупроводников величина изменения может достигать 200 % (в полях 80 кВ.).

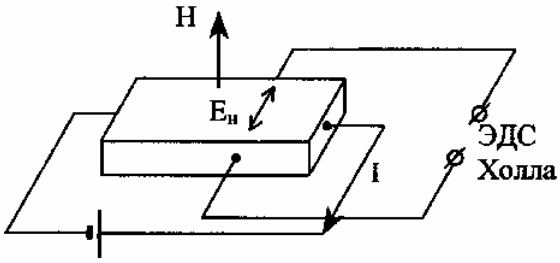
На основе этого разработали универсальный гальваномагнитный датчик, содержащий плоские токовые и холловские электроды точечность контакта которых обеспечивает перемычки в теле датчика, отличающийся тем, что с целью уменьшения эф-

фекта закорачивания холловского напряжения токовыми электродами использования одного и того же единого гальваномагнитного датчика как датчика ЭДС Холла или как датчика магнитосопротивления, или как гиратора, токовые электроды расположены вдоль эквипотенциальных линий поля Холла или под острым углом к ним, например, по ребрам плоского датчика, а для перехода из одного используемого эффекта к другому применено коммутирующее устройство и регулируемый источник питания.

Эффект Холла – возникновение в твердом проводнике с током плотностью j, помещенном в магнитное поле H, электрического поля в направлении перпендикулярном H и j.

Открыт американским физиком Э.Г. Холлом в 1879 г. в тонких пластинах золота.

Эффект Холла объясняется взаимодействием носителей заряда с магнитным полем. В магнитном поле на электроны действует сила Лоренца, под действием которой частицы отклоняются в направлении, перпендикулярном j и H. В результате на боковой грани пластины происходит накопление зарядов и возникает поле Холла, которое в свою очередь, действуя на заряды, уравновешивает силу Лоренца.



Эффект Холла

Использование: для умножения постоянных токов в АВМ, измерительной технике, датчики Холла [3].

9.2. Термомагнитные явления

Термомагнитные явления – совокупность явлений, возникающих под действием магнитного поля в проводниках, внутри которых имеется тепловой поток.

При поперечном намагничивании проводника возникает следующие термомагнитные явления:

В направлении перпендикулярном градиенту температур и направлению магнитного поля возникает градиент температур (*эффект Риге-Ледюка*).

При продольном намагничивании образца изменяется сопротивление, термо - ЭДС, теплопроводность (появляется тепловой поток).

Термомагнитный эффект – состоит в том, что в проводнике с перепадом температуры, помещенном в постоянное магнитное поле H, перпендикулярное тепловому потоку, возникает вторичная разность температур в направлении, перпендикулярном тепловому потоку и полю H.

Открыт итальянцем А. Риги и французом С. Ледюком в 1887 г. Количественной характеристикой термомагнитного эффекта является коэффициент A_{RL} , зависящий от типа носителей: для электронов $A_{RL} < 0$ для дырок $A_{RL} > 0$.

$$A_{RL} = \frac{\partial T}{\partial y} \Big/ \left(H \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right)$$

где $\frac{\partial T}{\partial y}$ – градиент, возникающий при приложении поля H;

$\frac{\partial T}{\partial x}$ – начальный градиент температуры.

Используется в устройстве для измерения ЭДС поперечного эффекта Кернота-Эттингсгаузена в полупроводниковых материалах, содержащее нагреватель, холодильник и термопары-зонды, отличающиеся тем, что с целью исключения неизотермической части ЭДС Нернота-Эттингсгаузена, уменьшения тепловых потерь и исключения циркуляционных токов на контакте полупроводникизмерительные зонды, термопары-зонды подведены к поверхности исследуемого образца через массивные металлические блоки холодильника и нагревателя, находящиеся в хорошем тепловом контакте с образцом, электрически изолированные от последнего.

В этом авторском свидетельстве физический эффект не применен для решения задач. Оно просто демонстрирует, что использование эффектов требует как их знания, так и решения сложных электрических задач.

Электронный фототермомагнитный эффект – появление ЭДС в однородном проводнике (полупроводнике или металле), помещенном в магнитном поле, обусловленное поглощением электромагнитного получения свободными носителями заряда. Магнитное поле должно быть перпендикулярно потоку излучения. Этот эффект применяется в высокочувствительных 10^{-13} Вт, сек 1/2 приемниках длинноволнового инфракрасного излучения. Постоянная времени эффекта – 10^{-7} сек.

Эффект Пеннинга – снижение потенциала зажигания разряда в газе, обусловленное присутствием примеси другого газа, потенциал ионизации которого ниже энергии возбуждения метастабильного уровня основного газа. Эффект объяснил Ф. Пеннинг в 1928 г. В отсутствии примеси электроны, ускоренные в электрическом поле, отдают свою энергию атомам, переводя их в метастабильное состояние. Поэтому ионизация электронным ударом мала и напряжение зажигания оказывается высоким. При наличии примеси происходят столкновения возбужденных атомов основного газа, с атомами примеси, в результате чего последние ионизируются за счет энергии, освобождающейся при переходе метастабильных атомов в основное состояние. Появление такой дополнительной ионизации приводит к снижению потенциала ионизации среды и, значит, к снижению напряжения зажигания разряда [3].

10.1. Факторы, влияющие на газовый разряд

В обычных условиях любой газ, будь то воздух или пары серебра, является изолятором. Для того, чтобы под действием электрического поля возник ток, требуется каким-то способом ионизовать молекулы газа. Внешние проявления и характеристики разрядов в газе чрезвычайно разнообразны, что объясняется широким диапазоном параметров и элементарных процессов, определяющих прохождения тока через газ. К первым относятся состав и давление газа, геометрическая конфигурация разрядного пространства, частота внешнего электрического поля, сила тока и т.п., ко вторым – ионизация и возбуждение атомов и молекул газа, рекомендация удары второго рода, упругое рассеяние носителей заряда, различные виды эмиссии электронов. Такое многообразие управляемых факторов создает предпосылки для весьма широкого применения газовых разрядов.

Потенциалом ионизации называется энергия, необходимая для отрыва электрона от атома или иона. Для нейтронных невозбужденных атомов величина этой энергии изменяется от 4 до 24 (He) электрон-вольт. В случае молекул и радикалов энергия разрывов связей лежит в пределах 0,06+ 11,1 э.в.

Фотоионизация атомов. Атомы могут ионизироваться при поглощении квантов света, энергия которых равна потенциалу ионизации атома или превосходит ее.

Поверхностная ионизация. Адсорбированный атом может покинуть нагретую поверхность, как в атомном, так и в ионизованном состоянии. Для ионизации необходимо, чтобы работа выхода поверхности была больше энергии ионизации уровня валентного электрона адсорбированного атома (щелочные металлы на вольфраме и платине).

Процессы ионизации используются не только для возбуждения различных видов газовых разрядов, но и для интенсификации различных химических реакций и для управления потоками газов с помощью электрических магнитных полей.

Примеры применения процессов ионизации:

- способ электродуговой сварки с непрерывной и импульсной моделей энергии, отличающийся тем, что с целью повышения точности выполнения сварного шва и облегчения зажигания дуги, ионизирующие дуговой промежуток;

- способ нагрева стали в окислительной атмосфере, отличающийся тем, что с целью снижения обезуглеродивания, в процессе нагрева осуществляют ионизированные атмосферы;

- способ измерения малых потоков газа, выпускаемых в вакуумный объем, отличающийся тем, что с целью повышения точности измерения, газ перед запуском ионизируют и формируют в однородный полный пучок, а затем вводят ионный пучок в вакуумный объем, где его нейтрализуют на металлической мишени, и по току ионного пучка судят о величине газового потока.

10.2. Высокочастотный тороидальный разряд

Обычно газовый разряд происходит между проводящими электродами, создающими граничную конфигурацию электрического поля и играющими значительную роль в качестве источников и стоков заряженных частиц. Однако наличие электродов необязательно (*высокочастотный тороидальный заряд*).

10.3. Роль среды и электродов

При достаточно больших давлениях и длинах разрядного промежутка основную роль в возникновении и протекании разряда играет газовая среда. Поддержание разрядного тока определяется поддерживанием равновесной ионизации газа, происходящий при малых токах за счет гауноендовских процессов каскадной ионизации, а при больших токах за счет термической ионизации.

При уменьшении давления газа и длины разрядного промежутка все большую роль играют процессы на электродах; при Р 0,02+0,4 мм.рт.ст/см процессы на электродах становятся определяющими.

10.4. Тлеющий разряд

При малых разрядных токах между холодными электродами и достаточно однородном поле основным типом разряда является *тлеющий разряд*, характеризующийся значительным (50 .. 400 В) катодным падением потенциала. Катод в этом типе разряда испускает электроны под действием заряженных частиц и световых квантов, а тепловые явления не играют роли в поддерживании разряда.

Тлеющий разряд нашёл применение в устройстве, предназначенном для считывания информации с перфорированного носителя, используются лампы тлеющего разряда, имеющие

невысокую стоимость, и, кроме того, обладающие высокой надежностью. Освещение ламп через перфорации носителя информации источником пульсирующего света вызывает зажигание некоторых из них, продолжающиеся и после исчезновения светового импульса. Таким образом, лампы тлеющего разряда обеспечивают хранение информации и не требуют дополнительного запоминающего устройства.

10.5. Коронный разряд

Примесь молекулярных газов в разрядном промежутке при *коронном разряде* приведет к образованию *страт*, т.е. расположенных поперек градиента электрического поля темных и светлых полос.

Тлеющий разряд в сильно неоднородном электрическом поле и значительном (Р 100 мм.рт.ст.) давлении называют коронным. Ток коронного разряда имеет характер импульсов, вызываемых электронными лавинами. Частота появления импульсов 10-100 кГц.

10.6. Дуговой разряд

Дуговой разряд наблюдается при силе тока не менее нескольких ампер. Для этого типа разряда характерно малое (до 10 В) катодное падение потенциала и высокая плотность тока. Для дугового разряда существенна высокая электронная эмиссия катода и термическая ионизация в плазменном столбе. Спектр дуги обычно содержит линии материала катода.

Способ выпрямления переменного тока с помощью газоразрядного промежутка с полым катодом при низком давлении газа, соответствующим области левой ветви кривой Пашена, отличающийся тем, что с целью повышения выпрямленного тока и уменьшения падения напряжения в течении проводящей части периода, при положительном потенциале на аноде систему "анод-полый катод" переводить в режим дугового разряда.

10.7. Искровой разряд

Искровой разряд начинается с образования стример самораспространяющихся электронных лавин, образующих проводящий канал между электродами. Вторая стадия искрового разряда главный разряд – происходит вдоль канала, образованного стримером, а по своим характеристикам близка к дуговому разряду, ограниченному во времени емкостью электродов и недостаточностью питания. При давлении 1 атм., материал и состояние электродов не оказывает влияния на пробивное напряжение в этом виде разряда.

Расстояние между сферическими электродами, соответствующее возникновению искрового пробоя весьма часто служит для измерения высокого напряжения.

Способ определения размера макрочастиц с подачей их на заряженную поверхность, отличающийся тем, что с целью повышения точности измерения, определяют интенсивность световой вспышки, сопровождающей электрический пробой между заряженной поверхностью и приближающейся к ней частицей и по интенсивности судят о размере частицы.

10.8. Факельный разряд

Факельный разряд – особый вид высокочастотного одноэлектродного разряда. При давлениях, близких к атмосферному или выше его, факельный разряд имеет форму пламени свечи. Этот вид разряда может существовать при частотах 10 МГц, при достаточной мощности источника.

10.9. "Стекание" зарядов с острия

При изучении заряженного острия наблюдается интересный эффект – так называемое *стекание зарядов с острия*. В действительности никакого стекания нет. Механизм этого явления следующий: имеющиеся в воздухе в небольшом количестве свободные заряды в близи острия разгоняются и, ударяясь об атомы га-

за, ионизируют их. Создается область пространственного заряда, откуда ионы того же знака, что и острие, выталкиваются полем, увлекая за собой атомы газа. Поток атомов и ионов создает впечатление стекания зарядов. При этом острие разряжается, и одновременно получает импульс, направленный против острия.

Несколько примеров на применение коронного разряда:

- устройство для кондиционирования воздуха, содержащее корпус с поддоном и патрубками для подвода и отвода воздуха и размещенный в корпусе воздуховоздушный теплообменник с каналами орошаемыми со стороны одного из потоков, отличающийся тем, что с целью повышения степени охлаждения воздуха путем интенсификации испарения коронирующие воды, по оси орошаемых каналов теплообменника установлены электроды, прикрепленные к имеющему заземление корпусу с помощью изоляторов и подключенные к отрицательному полюсу источника напряжения;

- измерение диаметра проволоки тоньше пятидесяти микрон с помощью коронного разряда. Как известно, коронный разряд в виде светящегося кольца возникает вокруг проводника, если к проводнику приложить высокое напряжение. При определении сечения проводника коронный разряд будет иметь вполне определенные характеристики. Стоить изменить сечение, тотчас изменяется и характеристика коронного разряда.

11. ЭЛЕКТРОКИНЕТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

Эффекты, связанные с относительным движением двух фаз под действием электрического поля, а также возникновение разности потенциалов при относительном смещении двух фаз, на границе между которыми существует двойной электрический слой, называется *электрокинетическими явлениями*.

Электроосмос (электроэндоосмос) – движение жидкостей или газов через капилляры, твердые пористые диафрагмы и мембраны, а также через слои очень мелких частиц под действием внешнего электрического поля. Электроосмос применяется при очистке коллоидных растворов от примесей, для очистки глицерина, сахарных сиропов, желатина, воды, при дублении кож, а также при окраске некоторых материалов.

Эффект обратный электроосмосу – возникновение разности потенциалов между концами капилляра, а также между противоположными поверхностными диафрагмами мембраны для другой пористой среды при продавлении через них жидкости (потенциал течения).

Электрофорез (*катофорез*) – движение под действием внешнего электрического поля твердых частиц, пузырьков газа, капель жидкости, а также коллоидных частиц, находящихся во взвешенном состоянии в жидкой или газообразной среде. Электрофорез применяют при определении взвешенных в жидкости мелких частиц, не поддающихся фильтрованию или сжиманию, для обезвоживания торфа, очистки глины или каолина, обезвоживания красок, осаждение каучука из латекса, разделения масляных эмульсий, осаждения дымов и туманов. Эффект обратный электрофорезу – возникновение разности потенциалов и жидкости в результате движения частиц, вызванного силами не электрического характера, например, при оседании частиц в поле тяжести, при движении в ультразвуковом или центробежном поле (седментационный потенциал или потенциал оседания). *Электрокапиллярные явления* – явления связанные с зависимостью величины поверхностного натяжения на границе раздела электрод-раствор от потенциала электрода.

Эффект Садовского – возникновение механического вращающего момента у тела, облучаемого эллиптически поляризованным светом. Когда на кристаллическую пластинку в V4 длины волны падает свет, поляризованный по кругу, появляется вращающий момент, стремящийся повернуть пластинку в сторону вращения электромагнитного вектора волны. Величина вращательного момента, возникающего под действием света, прямо пропорциональна длине волны излучения и плотности электромагнитной энергии в падающем пучке. Эффект очень мал, но наблюдается как для видимого света, так и для сантиметровых волн [3].

Эффект Шпольского – возникновение квазилинейчатых спектров сложных органических соединений в специально подобранных растворах при низких температурах. Впервые явление наблюдали Э. В. Шпольский и его сотрудники в 1952 г. Растворитель должен быть химически нейтральным по отношению к внедренным молекулам, быть оптически прозрачным в область поглощения и испускания внедренных молекул (жидкий парафин). Исследуемое вещество растворяют в нем в малых концентрациях, затем раствор охлаждают ниже точки кристаллизации растворителя. Спектры испускания и поглощения этого состава состоит из серии узких спектральных линий, напоминают атомные спектры.

Применение: спектральный анализ смесей, изучение процессов фотохимии органических соединений и др. [3].

Эффект Бурштейна-Мосса – сдвиг края области собственного поглощения света полупроводником в сторону высоких частот при увеличении концентрации электронов проводимости. Ток в кристалле InSb с собственной проводимостью край поглощения соответствует (при T=300 K) длине волны $\lambda_{кр}$ = 7,2 мкм; после легирования образца донорами до концен-

трации $5 \cdot 10^{-18}$ см, $\lambda_{кр}$ = 3,2 мкм. Эффект установлен американцем Э. Бурштейном и англичанином Т. Моссом в 1954 г. [3].

Электрогирация – возникновение или изменение оптической активности в кристаллах под действием электрического поля. Например, в центросимметричном кристалле РЬМоС>4 при напряженности поля 10 кВ возникает оптическая активность, дающая удельное вращение плоскости поляризации света ~5° на длине волны Аг=400нм. В кристаллах кварца обнаружена квадратичная зависимость электрогирации от напряженности поля. В некоторых сегнетоэлектриках (например, $5PbO3GeO_2$) от напряженности поля зависит знак оптической активностью в области температур фазового перехода электрогирация в сегнетоэлектриках обычно выше, чем в диэлектриках [3].

Эффект Франца – сдвиг границы (края) собственного поглощения света в полупроводнике в сторону меньших частот в присутствии внешнего электрического поля. Экспериментально был открыт в 1960 г. в отсутствии электрического поля краю соответствует частота света $\omega = \varepsilon_g / \hbar$, где ε_g – ширина запрещенной зоны. В электрическом поле край поглощения размывается и становится возможным поглощение света с частотой $\omega < \varepsilon_g / \hbar$. Одновременно с коэффициентом поглощения меняется и показатель преломления.

Применение: модуляция оптического излучения [3].

Эффект Штарка – расщепление спектральных линий атомов, молекул и др. квантовых систем в электрическом поле. Открыт в 1913 г. немецким физиком И. Штарком, является результатом сдвига и расщепления на подуровни уровней энергии под действием электрического поля Е. Различают линейный эффект Штарка; при нем получается симметричная относительно первичной линии картина расщепления. Линейный эффект характерен для атомов в не слишком сильных полях и

составляет тысячи доли эВ. Линейный эффект наблюдается также для водородоподобных атомов.

Для многоэлектронных атомов типичен квадратичный эффект Штарка. Данный эффект наблюдается и в переменном электрическом поле.

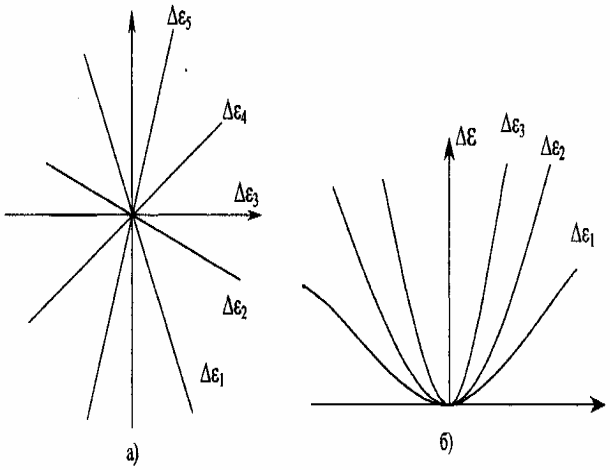


Рис. 12.1. Зависимость расщепления электрических уровней энергии Ав от напряженности электрического поля Е при линейном (а) и квадратичном (б) эффект Штарка

Применение: с устройствах микроволновой спектроскопии, в частотных модуляторах лазерного излучения [3].

Эффект Хапле – один из эффектов магнитооптики, состоящий в изменении диаграммы направленности и в уменьшении степени поляризации света резонансной частоты, рассеянного атомами, находящимися в слабом внешнем магнитном поле. Характер поляризации рассеянного света существенным образом зависит от величины и направления поля и направления наблюдения. В сильных магнитных полях эта зависимость исчезает. Эффект открыл немецкий физик В. Хапле в 1924 г.

Применение: используют в спектроскопии как метод измерения характеристик атомных уровней, например среднее время жизни уровня. Нашел для измерения сверхслабых магнитных полей [3].

Плеохроизм – изменение окраски вещества в проходящем свете от направления распространения и поляризации этого света. Чаще всего плеохроизм наблюдается в кристаллах. У одноосных кристаллов различают 2 «главные» окраски - при наблюдении вдоль оптической оси и перпендикулярно к ней; у двуосных кристаллов - 3 основные окраски - при наблюдении по 3-м направлениям, которые обычно совпадают с главными направлениями кристалла. По другим направления кристалл виден окрашенным в иные, промежуточные цвета.

Сильным плеохроизмом отличаются, например, турмалин и ацетат меди.

Применение: использование поляроидов (поляризационных светофильтров), частично или полностью поляризующие свет [3].

12.1. Свет, ультрафиолетовое и инфракрасное излучение

Свет это совокупность электромагнитных волн различной длины. Диапазон длин волн видимого света – от 0,4 до 0,75 мкм. К нему примыкают области невидимого света – *ультрафиолетовая* или *УФ-излучение* (от 0,4 до 0,1 мкм) и *инфракрасная* или *ИК-излучение* (от 0,75 до 750 мкм).

Видимый свет доносит до нас большую часть информации из внешнего мира. Помимо зрительного восприятия, свет можно обнаружить по его тепловому эффекту, по его электрическому действию или по вызываемой им химической реакции. Восприятие света сетчаткой глаза является одним из примеров его фотохимического действия. В зрительном восприятии определенной длине волны света сопутствует определенный цвет. Так излучение с длиной волны 0,48-0,5 мкм будет голу-

бым; 0,56-0,59 - желтым; 0,62-0,75 красным. Естественный белый свет, есть совокупность волн различной длины, распространяющихся одновременно. Его можно *разложить на составляющие* и выцедить их с помощью спектральных приборов (*призм*, *дифракционных решеток*, *светофильтров*).

Как и всякая волна, свет несет с собой энергию, которая зависит от длины волны (или частоты) излучения.

Ультрафиолетовое излучение, как более коротковолновое, характеризуется большей энергией и более сильным взаимодействием с веществом, чем объясняется широкое его использование в практике. Например, излучение ультрафиолетом может инициировать или усиливать многие химические реакции. Существенно влияние ультрафиолета на биологические объекты, например, его бактерицидное действие.

Следует помнить, что ультрафиолетовое излучение очень сильно поглощается большинством веществ, что не позволяет применить при работе с ним обычную стеклянную оптику. До 0,18 мкм используют кварц, фтористый литий, до 0,12 мкм – флюорит; для еще более коротких волн приходится применять отражательную оптику.

Еще более широко в технике используют длинноволновую часть спектра – инфракрасное излучение. Отметить здесь приборы ночного видения, ИК-спектроскопию, тепловую обработку материалов, лазерную технику, измерение на расстоянии температуры предметов.

Тепловое излучение – электромагнитное излучение, испускаемое веществом и возникающее за счет его внутренней энергии. Тепловое излучение имеет сплошной спектр, положение максимума которого зависит от температуры вещества. С ее повышением возрастает общая энергия испускаемого теплового излучения, а максимум перемещается в область малых длин волн.

Применение: системы тепловидения. Тепловидение – это получение видимого изображения тел по их тепловому (ин-

фракрасному) излучению, собственному или отраженному; используется для определения формы и местоположения объектов, находящихся в темноте или в оптически непрозрачных средах. Эти системы применяются для диагностики в медицине, в навигации, геологической разведке, дефектоскопии и т. д. Приемники оптического излучения – устройства, в которых инфракрасное излучение от объекта преобразуется в видимое излучение, например фотоэлементы, ФЭУ, фоторезисторы и т. д. [3].

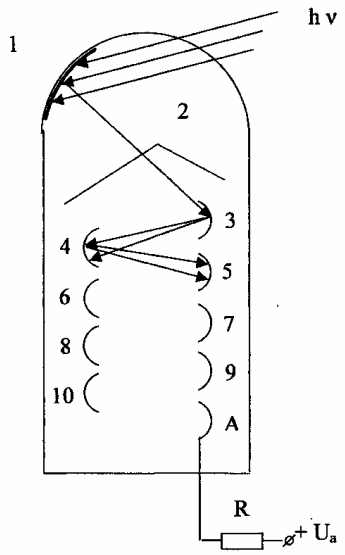


Рис. 12.2. Фотоэлектронный умножитель:
1 – фото катод; 2 – экран; 3-10 – катоды; А – анод;
R – нагрузка

Интересное свойство ИК-лучей обнаружил недавно польские ученые: прямое облучение стальных изделий светом инфракрасных ламп сдерживает процессы коррозии не только в условиях обычного хранения, но и при повышении влажности и содержания сернистых газов.

Существует так же способ определения экспозиции засветки фоторезисторов на основе диасоединений и азидов в процессе фотолитографии. С целью улучшения воспроизводимости и увеличения выхода годных приборов, полупроводниковый эпитаксиальный материал с нанесеным на него фоторезистом облучают ультрафиолетовым или видимым светом, причем экспозицию определяют по времени исчезновения полосы поглощения пленки фоторезиста в области 2000-2500 см. в минус первой степени. Здесь облучают коротковолновым светом, а изменение свойств регистрируют по поглощению в инфракрасной области - 2000 см. в минус первой степени соответствуют длине волны 3,07 мкм.

Световое излучение может передавать свою энергию телу не только нагревая его или возбуждая его атомы, но и в виде механического давления. *Световое давление* проявляется в том, что на освещаемую поверхность тела в направлении распространения света действует распределенная сила, пропорциональная плотности световой энергии и зависящая от оптических свойств поверхности. Световое давление на полностью отражающую зеркальную поверхность вдвое больше, чем на полностью поглощающую при прочих равных условиях.

Объяснить это явление можно как с волновой, так и с корпускулярной точек зрения на природу света. В первом случае это результат взаимодействия электрического тока, наведенного в теле электрическим полем световой волны, с ее магнитным полем по закону Ампера. Во втором – результат передачи импульса фотонов поглощающей или отражающей стенке.

Величина светового давления мала. Так, яркий солнечный свет давит на 1 кв.м. черной поверхности с силой всего лишь 0,4 мГ. Однако простота управления световым потоком, "оксеонтактность" воздействия и "избирательность" светового давления в отношении тел с различными поглощающими и от-

ражающими свойствами позволяют с успехом использовать это явление в изобретательстве (например, фотонная ракета).

Так же световое давление используется в микроскопах для уравновешивания малых изменений массы или силы. Измерительное фотоэлектрическое устройство определяет, какая величина светового потока, а, следовательно, и светового давления, потребовалась для компенсации изменения массы образца и восстановления равновесия системы.

Применение светового давления:

- способ перекачки газов или паров из сосуда в сосуд путем создания перепада давления на разделяющей оба сосуда перегородке, имеющей отверстие, с целью повышения эффективности откачки, на отверстие в перегородке фокусируют световой пучок, излучаемый, например, лазером;

- способ по п.1 отличающийся тем, что с целью осуществления избирательной откачки газов или паров и, в частности, с целью разделения изотопных смесей газов или паров, ширину спектра излучения избирают меньше частотного разноса центров линий поглощения соседних с них компонентов, при этом частоту излучателя настраивают на центр линии поглощения откачиваемого компонента.

12.2. Отражение и преломление света

При падении параллельного пучка света на гладкую поверхность раздела двух прозрачных изотропных сред часть света *отражается обратно*, а другая часть проходит во вторую среду, при этом направление пучка света меняется; происходит *преломление света*.

Угол отражения равен углу падения, а угол преломления связан с углом падения соотношением: где п1 и п2 – показатели преломления сред, и – углы падения и преломления.

Показатели преломления обычных газов (при нормальных условиях) близки к 1, для стекла эта величина порядка от 1,4 до 1,7.

Эффекты отражения и преломления лежат в основе работы всех оптических систем, которые позволяют передавать световую энергию и изображения, фокусировать свет в мощные пучки, разлагать его в спектр.

Отраженный свет может нести значительную информацию о форме предмета (а также о структуре его поверхности) как в случае зеркального, так и диффузного отражения.

Несколько примеров применения отражения и преломления света:

- способ определения пайки выводов радиодеталей, например, резисторов, при котором производят погружение вывода в каплю расплавленного припоя и регистрируют интервал времени между соприкосновением вывода с каплей и замыканием капли над ним, с целью повышения точности измерения времени пайки, на поверхность капли припоя направляют луч света в форме узкой полосы и фиксируют интервал времени между началом отклонения отраженного от поверхности капли луча до его возвращения в исходное положение, используя фотоэлемент, соединенный со счетчиком времени;

- способ определения частоты обработки поверхности, заключающийся в том, что направляют световой поток на контролируемую поверхность и регистрируют световой поток, отраженный от нее, отличающийся тем, что с целью повышения точности измерения, поворачивают контролируемую поверхность вокруг оси, перпендикулярной плоскости падения светового потока, регистрируют угол наклона, при котором отраженный от него световой поток будет составлять заданную часть, например, половину от максимального, и по алгебраической разности определяют чистоту обработки поверхности. Процессы отражения и преломления связаны с внутренней структурой вещества; измерение показателя преломления - один из важнейших методов структурных исследований;

- способ исследования тепловых напряжений на прозрачных моделях путем просвечивания образца монохроматиче-

ским светом, отличающийся тем, что с целью определения полного теплового напряжения, вызываемого неоднородным нагревом, предварительно определяют градиент температур в исследуемом образце, измеряют соответствующий ему угол отклонения светового луча в данной точке, и по полученным данным судят о величине теплового напряжения;

- способ регулировки температуры размягчения донного продукта отпарного аппарата в зависимости от изменения режимного параметра в зоне питания аппарата, отличающийся тем, что с целью повышения качества регулировки, режимный параметр корректируют в зависимости от коэффициента преломления дистиллярного продукта, выводимого из аппарата. В общем случае, лучи отраженный и преломленный – это лучи поляризованного света. Степень поляризации зависит от угла падения. При определенном значении этого угла (*угол Брюстера*) отраженный свет полностью линейно поляризован перпендикулярно плоскости падения. При падении же под углом Брюстера света, уже поляризованного в плоскости падения, отражения вообще не происходит, не смотря на скачок показателя преломления;

- акустооптический дефлектор, содержащий акустооптический эффект и пьезопреобразователь, отличающийся тем, что с целью увеличения его разрешающей способности с одновременным уменьшением потерь света на отражение, входная поверхность акустооптического элемента выполнена по отношению к поверхности, на которой расположен пьезопреобразователь, под углом, равным сумме угла Брюстера и угла дифракции Брегга для данного материала, а выходная поверхность - под углом, равным разности между углом Брюстера и углом дифракции Брегга. При определенных условиях может наблюдаться полное внутреннее отражение света, при котором вся энергия световой волны, падающей на границу двух прозрачных сред со стороны среды, оптически более плотной, полностью отражается в эту среду. В частности это явление

используется в призмах биноклей и перископов, но диапазон его применения в изобретательстве гораздо шире (1);

- устройство для измерения температуры, содержащее измерительный элемент, установленный в контролируемой среде, и источник белого света с диафрагмой, отличающийся тем, что с целью повышения точности измерения температуры и увеличения светосилы устройства, измерительный элемент выполнен в виде двух прозрачных прямоугольных призм, сложенных наклонными гранями, между которыми расположен слой прозрачного вещества с показателем преломления, зависящим от длины волны и температуры, причем источник света расположен относительно измерительного элемента так, что ось светового потока наклонена к плоскости входной грани призмы под предельным углом полного внутреннего отражения;

- устройство для активного контроля распыления жидкости, выполненное из источника света, воздействующего через собирательную линзу через фоторезистор, к которому подключен усилитель, отличающийся тем, что с целью увеличения надежности контроля, на пути света за линзой последователены оптический многогранник полного внутреннего отражения и охватывающая его изогнутая шторка, образующая с одной из граней клинообразное входное пространство;

- переменный цифровой элемент состоит из прямоугольной призмы, над гипотенузой грани которой располагаются несколько отражающих слоев. Луч света проходит через одну из катетных граней призмы и падает на ее гипотенузную грань под углом, который равен критическому углу или больше его. Обычно луч света будет испытывать полное внутреннее отражение в призме и выходить через другую ее катетную грань. Однако, если отражающий слой, расположенный над гипотенузой грани, имеет с ней оптический контакт, полное внутреннее отражение нарушается и луч проникает в этот отражающий слой. На гипотенузой грани могут располагаться несколько от-

ражающих слоев. Явление полного внутреннего отражения, а также нарушение его, используется для определения количества отражающих слоев, пройденных лучом света прежде, чем испытать полное внутреннее отражение, пройти обратный путь через отражающие слои, призму и выйти через вторую ее катетную грань. Отражающие слои изготавливаются из стекла, либо представляют собой полости, заполненные жидкостью. Изгиб того или иного слоя и, следовательно, нарушение оптического контакта этого слоя со смежной поврхностью, может быть осуществлен с помощью пьезоэлектрического кристалла.

На основе явления полного внутреннего отражения созданы световоды, которые гораздо эффективнее обычных линзовых систем. Широкие одиночные светопроводы передают излучение; применение волоконной оптики – пучков очень тонких светопроводов – позволяет передавать также изображение в том числе и по непрямым путям, т.к. пучок тонких волокон может быть сильно изогнут без разрушения и потери прозрачности.

12.3. Поглощение и рассеяние

В предыдущем разделе явления рассматривались как предположение что среды оптически однородны и абсолютно прозрачны для света. В действительности дело обстоит иначе. Процесс прохождения света через вещество - это процесс поглощения атомами и молекулами энергии электромагнитной волны, которая идет на возбуждение колебания электронов и последующего переизлучения этой энергии. При этом, не вся энергия переизлучается, часть ее переходит в другие виды энергии например тепловую. Это приводит к поглощению света, которое зависит от длины волны света и имеет максимумы на частотах, соответствующих частотам собственных колебаний электронов в атомах, самих атомов и молекул. Естественно, поглощение зависит от толщины слоя поглощающего вещества.

Примеры применения поглощения и рассеяния света:

- толщину полимерной пленки измеряют, сравнивая потоки ИК-излучения: отражающего от поверхности и прошедшего сквозь пленку, ослабленного за счет поглощения в слое полимера;

- для определения влагосодержания предмета его облучают светом с длиной волны, лежащей в области поглощения воды, и измеряют сигнал ослабленного излучения;

- контролируют процесс сушки по ИК-поглощению паров растворителя;

- ослабление светового излучения при прохождении через среду объясняется также и рассеянием света. В случае наличия в среде оптических неоднородностей переизлучение энергии электромагнитной волны происходит не только в направлении проходящей волны (пропускание), но и в стороны. Эта часть излучения, наряду с дифрагированной, преломленной и отраженной на неоднородностях составляющими, и образует *рассеянный свет*. Рассеяние обладает дисперсией. В атмосфере, например, рассеиваются преимущественно голубые лучи; этим объясняется голубой цвет неба, в то время как свет, проходящий через атмосферу, обогащен красными составляющими – красный цвет зорь. При монохроматическом освещении даже в физически сильно неоднородной среде рассеяние не происходит при совпадении коэффициентов преломления компонентов среды. Выбрав компоненты с различными температурными коэффициентами пре, можно создать оптический термометр;

- устройство для измерения температуры, содержащее измерительный элемент, устанавливаемый на исследуемый материал, и источник белого света, отличающийся тем, что с целью расширения интервала измеряемых температур, измерительный элемент выполнен в виде прозрачной кюветы, заполненной смесью, оптически неоднородных веществ, соответствующих заданному интервалу температур, показатели, преломления которых зависят от длины волны и температурные коэффициенты показателей преломления отличаются знаком либо величиной. (Показатели преломления компонентов смеси совпадают для различных длин волн в зависимости от температуры. При этом кювета становится оптически однородной для света с данной длиной

волны, который пройдя через кювету, сообщает ей определенный цвет, соответствующей определенной температуре. Другие же составляющие белого цвета рассеиваются на неоднородностях системы и через кювету не походят). Распределение интенсивности света, рассеянного средой по различным направлениям (*индекатрисса рассеяния*), может дать значительную информацию о микрофизических параметрах среды. Такого рода измерения находят применение в биологии, коллоидной и аналитической химии, а также в аэрозольной технике;

- определяют параметры капель жидкости, измеряя характеристики светового излучения, рассеянного на каплях.

Рассеяние наблюдается в чистых веществах. Оно объясняется возникновением оптической неоднородности, связанный с флуктуациями плотности, например, тепловыми. Рассеянный свет по некоторым направлениям частично поляризован.

В случае комбинационного рассеяния света (*эффект Мандельштама-Ландсберга-Рамана*) в спектре рассеянного излучения кроме линий, характеризующих падающий свет, имеются дополнительные линии (*сателлиты*), излучение которых является комбинацией частот падающего излучения и частот собственных тепловых колебаний молекул рассеивающей среды.

Эффект Мандельштама-Ландсберга-Рамана применяется для:

- контроля содержания загрязнений в большом объеме воздуха производится на основе анализа характеристического романовского излучения (сателлитов комбинационного рассеяния), возникающего при рассеянии лазерного излучения на атомах и молекулах загрязнений.

Эффект Рамана – комбинационное рассеяние света, рассеяние света веществом, сопровождающееся заметным изменением частоты рассеиваемого света. Открыт в 1828 г. индийским физиком Раманом на жидкостях и Лондсбергом, Ман-

дельштамом на кристаллах. Если источник испускает линейчатый спектр, то при комбинационном рассеянии света в спектре рассеянного излучения обнаруживаются дополнительные линии, число и расположение которых тесно связано с молекулярным строением вещества.

Согласно квантовой теории, процесс комбинационного рассеяния света состоит из 2-х связанных между собой актов - поглощения первичного фотона с энергией hv и испускания фотона с энергией hv, происходящих в результате взаимодействия электронов молекулы с полем падающей световой волны. Молекула, находящаяся в невозбужденном состоянии, под действием кванта с энергией hv, испуская квант, переходит в состояние с колебательной энергией hvj Таким образом, процесс приводит к появлению линий с частотами v+Vj и v-Vj.

Интенсивность линий комбинационного рассеяния света мала и зависит от частоты возбуждающегося света.

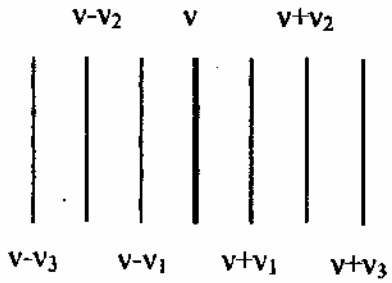


Рис. 12.3. Схема образования стоксовых (V-V^H оптистоксовых (v+Vn)) линий при К.Р.С.

12.4. Испускание и поглощение света

Пламя излучает свет. Стекло поглощает ультрафиолетовые лучи. Обычные фразы, привычные понятия. Однако здесь термины "излучает", "поглощает" описывают только внешне,

легко наблюдя, физика этих процессов непосредственно связана со строением атомов и молекул вещества.

Атом – квантовая система, его внутренняя энергия – это, в основном, энергия взаимодействия электронов с ядром; эта энергия согласно квантовым законам, может иметь только вполне определенные для кванта и состояния атомов значения. Таким образом, энергия атома не может меняться непрерывно, а только скачками – порциями, равными разности каких-либо двух разрешенных значений энергии.

Квантовая система (атом, молекула), получая из вне порцию энергии возбуждается, т.е. переходит с одного энергетического уровня на другой более высокий. В возбужденном состоянии система не может находится сколь угодно долго; в какой-то момент происходит самопроизвольный (спонтанный) обратный переход с выделением той же энергии. Квантовые переходы могут быть *излучательные* и *безизлучательные*. В первом случае энергия поглощается или испускается в виде порции электромагнитного излучения, частота которого строго определена разностью энергий тех уровней, между которыми происходит переход. В случае безызлучательных переходов система получает или отдает энергию при взаимодействиями с другими системами (атомами, молекулами, электронами) Наличие этих двух типов переходов объясняется *оптикоакустический эффект Бейнгерова*.

При облучении газа, находящегося в замкнутом объеме, замодулированном потоком инфракрасного излучения в газе возникают пульсации давления (о*птико-акустический эффект*). Его механизм довольно прост; поглощение инфракрасного излучения происходит с возбуждением молекул газа, обратный же переход происходит безызлучательно, т.е. энергия возбуждения молекул переходит в их кинетическую энергию, что обуславливает изменение давления.

Количественные характеристики эффекта весьма чувствительные к составу газовой смеси. Применение оптико-

акустического эффекта для анализа характеризуется простотой и надежностью, высокой избирательностью и широким диапазоном концентрацией компонентов.

Оптико-акустический индикатор представляет собой неселективный приемник лучистой энергии, предназначенный для анализа газов. Промодулированный лучистый поток через флюоритовое окно попадает в камеру с исследуемым газом. Под действием потока меняется давление газа на мембрану микрофона, в результате чего в цепи микрофона возникают электрические сигналы, зависящие от состава газа.

Оптико-акустический эффект используется при измерении времен жизни возбуждения молекул, в ряде работ по определению влажности и потоков излучения. Отметим, что оптико-акустический эффект возможен также в жидкостях и твердых телах.

Атомы каждого вещества имеют свою, только им присущую структуру энергетических уровней, а следовательно, и структуру импульсных переходов, которые можно зарегистрировать оптическими методами (например, фотографически). Это обстоятельство лежит в основе спектрального анализа. Так как молекулы – тоже сугубо квантовые системы, то каждое вещество (совокупность атомов или молекул) испускает и поглощает только кванты определенных энергии или электромагнитное излучение определенных длин волн). Интенсивность тех или иных спектральных линий пропорциональна числу атомов (молекул), излучающих (или поглощающих) свет. Это соотношение составляет основу количественного спектрального анализа.

Пример применения спектрального анализа:

- концентрацию известных газов в смеси измеряют по пропусканию излучения лазерного источника с определенной длиной волны. Предварительно облучают монохроматическими излучениями с различными длинами волн каждый из содержащихся в смеси газов, концентрация которых известна, и

определяют коэффициент поглощения каждого газа для каждой длины волны. Затем при этих длинах волн изменяют поглощение испытуемой смеси и, используя полученные величины коэффициента поглощения, определяют концентрацию каждого газа в смеси. При измерениях с излучением, содержанием большее число длин волн, чем находится компонентов в газовой смеси, можно обнаружить наличие неизвестных газов.

Для атомов и молекул спектры излучения будут линейчатыми и полосатыми соответственно, то же и для спектров поглощения. Чтобы получить сплошной спектр, необходимо наличие плазмы, т.е. ионизированного состояния вещества. При ионизации электроны находятся вне атома или молекулы, и, следовательно могут иметь любые, непрерывно меняющиеся, энергии. При рекомендации этих электронов и ионов получается сплошной спектр, в котором присутствуют все длины волн.

Возбуждение (повышение внутренней энергии) или ионизация атомов происходят под действием различных причин; в частности, энергия для этих процессов может быть получена при нагревании тел. Чем больше температура, тем больше энергия возбуждения и тем все более короткие волны (кванты с большей энергией) излучает нагретое тело. Поэтому при постепенном нагреве сначала появляется инфракрасное излучение (длинные волны), затем красное, к которому с ростом температуры добавляется оранжевое, желтое и т.д.; в конце концов получает свет Дальнейший нагрев приводит к появлению ультрафиолетовой компоненты.

Примеры применения:

- устройство для непрерывного измерения температуры ванны жидкого металла содержит стержень из светопроницаемого материала обладающего высокой температурой и коррозионной стойкостью. Стержень проходит сквозь стенку резервуара и внутри последнего заделывается в массу свободного от щелочей окисла с высокой температурой плавления, например

окиси циркония. Конец стержня, находящийся в резервуаре, служит цветовым пирометром.

Излучательные и безызлучательныепереходы в инфракр. области часто используются для процессов и охлаждения:

- стеклоформирующий инструмент, включающий металлический корпус с покрытием, отличающийся тем, что с целью поьности и улучшения качества изделий, покрытие выполнено двухслойным, причем промежуточный слой выполнен из материала, поглощающего ближнюю инфракрасную область, например из графита, а наружный слой – из материала пропускающего в эже области спектра, например на основе прозрачной поликристаллической окиси алюминия;

- способ измерений коэффициента теплопроводности твердых тел, включающий изотермическую выдержку его охлаждение при постоянной температуре окружающей среды и регистрацию изменения температуры, отличающийся тем, что с целью измеренидности частично прозрачных материалов, образец на стадии поглощения помещают в вакуумное пространство и измеряют энергию, излучаемую поверхностью образца в спектральной области сильного поглощения.

Излучательные квантовые переходы могут происходить не только спонтанно, но, и вынуждено под действием внешнего излучения, частота которого согласована с энергией данного перехода. Излучение квантов света атомами и молекулами вещества под действием внешнего электромагнитного поля (излучения) называют *вынужденным* или *индуцированным излучением*.

Существенным отличием вынужденного излучения является то, что оно есть точная копия вынуждающего излучения. Совпадают все характеристики – частота, поляризация, направление распространения и фаза. Благодаря этому вынужденное излучение при некоторых обстоятельствах может привести к усилению внешнего излучения, прошедшего через вещество, вместо его поглощения. Поэтому иначе вынужденное излучение называют *отрицательным поглощением*.

Для возникновения вынужденного излучения необходимо наличие в веществе возбужденных атомов, т.е. атомов, находящихся на уровнях с большей энергией. Обычно доля таких атомов мала. Для того чтобы усилить проходящее через него излучение, нужно , чтобы доля возбужденных атомов была велика, чтобы уровни с большей энергией были "заселены" частицами гуще, чем нижние уровни. Такое состояние вещества называют *состоянием с инверсией населенностей*.

Открытие советскими физиками Фабрикантом, Вудынским и Бутаевой *явления усиления электромагнитных волн* при прохождении через среду с инверсией населенностей явилось основополагающим в деле развития *оптических квантовых генераторов* (*лазеров*) крупнейшего изобретения века.

Стержень из вещества с искусственно создаваемой инверсией населенностей, помещенный между двумя зеркалами, одно из которых полупрозрачно – вот принципиальная схема простейшего лазера.

Оптический резонатор из двух зеркал необходим для создания обратной связи: часть излучения возвращается в рабочее тело, индуцируя новую лавину фотонов. Излучение лазера монохроматично и когерентно в силу свойств индуцированного излучения.

Области применения лазеров обусловлены, основными характеристиками их излучения, такими как когерентность, монохромантичность, высокая концентрация энергии в луче и малая его расходимость. Помимо ставших уже традиционными областей применения лазеров, таких как обработка сверхтвердых и тугоплавких материалов, лазерная связь и лоя медицина и получение высокотемпературной плазмы – стали определяться новые интересные сферы их использования.

Чрезвычайно перспективны разработанные в последнее время лазеры на красителях, в отличии от обычных позволяющие плавно изменят частоту излучения в широком диапазоне от инфракрасной до ультрафиолетовой области спектра. Так, например, предполагается лазерным лучом разрывать или наоборот, создавать строго определенные связи.

Ведутся работы по разделению изотопов с помощью перестраиваемых лазеров. Меняя частоту лазеров, настраивают его в резонанс с определенным квантовым переходов одного из изотопов и тем самым переводят изотоп в возбужденное состояние, в котором его можно ионизировать и, с помощью электрических реакций, отделить от других изотопов.

А вот чисто изобретательское применение лазера в качестве датчика давления:

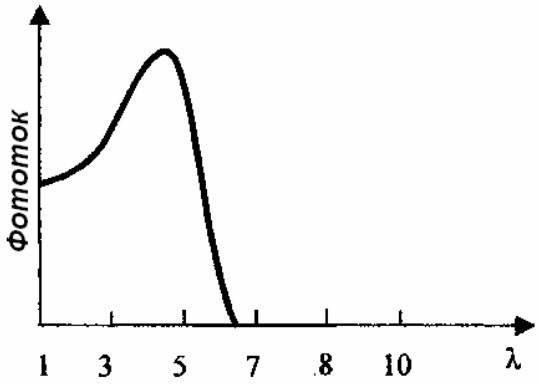
- устройство для измерения давления с частотным выходом, содержащее упругий чувствительный элемент, заполненный газом и соединенный через разделитель с измеряемой средой, и частотомер, отличающееся тем, что с целью повышения точности измерений, в нем в качестве упругого чувствительного элемента использована резонаторная ячейка газового квантового генератора.

В заключении следует отметить, что лазеры являются основным инструментом исследований в новой области физики – *нелинейной оптике*, которая самим своим возникновением полностью обязана мощным лазерам

13. ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ФОТОХИМЕЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

13.1. Фотоэлектрические явления

Эффект фотопроводимости – фоторезистивный эффект, увеличение электропроводимости полупроводника под действием электромагнитного излучения. Впервые выше названный эффект наблюдался у Se У. Смитом в 1873 г. Она (фотопроводимость) обусловлена увеличением концентрации подвижных носителей заряда под действием света и возникает в результате нескольких процессов: фотоны «вырывают» электроны из валентной зоны и забрасывают их в зону проводимости, при этом одновременно возрастает число электронов проводимости и дырок (собственная проводимость). Наблюдается также дырочная примесная и электронная примесная проводимость. Фотопроводимостью обладают все неметаллические твердые тела. Наиболее широко применяются в технике: Ge, Si, Se, CdS, CdSe, GaAs, PbS и др.



Зависимость проводимости от длины волны излучения определяется спектром поглощения полупроводника

Применение: фоторезистор, фотодиод (приемник ПК-излучения) [3].

Явление внешнего *фотоэффекта* состоит в испускании (эмиссии) электронов с поверхности тела под действием света; для этого явления экспериментально установленные зависимости объединяются квантовой теорией света. Свет есть поток квантов; кванты света, попадая в вещество, поглощаются им; избыточная энергия передается электронами, которые получают возможность покинуть это вещество – конечно, если энергия кванта больше, чем работы выхода электрона. Заметим, что квантовый характер света, проявляющийся в явлении фотоэффекта, не следует понимать как отрицание волновых свойств света; свет есть и поток квантов, и электромагнитная волна просто в зависимости от конкретного явления проявляются или квантовые, или волновые свойства. На основе внешнего фотоэффекта создан ряд фотоэлектронных приборов (фотоэлементы различного назначения, фотокатоды, фотоумножители и т.д.). Внешний фотоэффект играет большую роль в развитии электрических зарядов; фотоэффект в газах определяет распространение электрического заряда в газах при больших давлениях, обуславливая высокую скорость распространения стримерной формы разряда (искры, молнии).

Кроме внешнего фотоэффекта, существует *внутренний фотоэффект*. Квант света, проникая внутрь вещества, выбивает электрон, переводя его из связанного состояния (в атоме) в свободное – таким образом, при облучении полупроводников и диэлектриков из-за фотоэффекта внутри кристаллов появляются свободные носители тока, что существенно изменяет электропроводность вещества. На основе внутреннего фотоэффекта созданы различного рода *фоторезисторы* – элементы, сильно изменяющие свое сопротивление под действием света.

Примеры применения:

- устройство для управления световым лучом, выполненное в виде конденсатора между электродами которого заклю-

чен слой вещества изменяющего прозрачность под действием электрического поля, отличающееся тем, что с целью уменьшения габаритов, один из электродов конденсатора связанный с источником управляющей электродвижущей силы выполнен из материала, обладающего эффектом возникновения фотоэлектродвижущей силы;

- пьезоэлектрический преобразователь с оптическим управлением, содержащий фоторезисторный слой, светопровод и металлический электрод, отличающееся тем, что с целью расширения частотного диапазона в область низких мегагерцовых и высоких килогерцовых частот, он выполнен в виде пьезокерамической платины, на одну сторону которой нанесен металлический электрод, а на противоположную – фоторезисторный слой и прозрачный электрод, являющийся одновременно светопроводом.

Разновидностью внутреннего фотоэффекта является *вентильный фотоэффект* – появление ЭДС в месте контакта двух полупроводников (или полупроводника и металла). Основное применение вентильных фотоэлементов – индикация электромагнитного излучения.

На основе вентильного фотоэффекта работают также солнечные батареи. Одним из приборов работающих на вентильном фотоэффекте, является *фотодиод*, обладающий многими преимуществами по сравнению с обычными фотоэлементами.

Пример применения:

- устройство для регулирования напряжения электромагнитных генераторов содержащее датчик тока, в виде шунта в цепи его нагрузки и импульсный транзисторный усилитель, ко входу которого подключены последовательно стабилизаторон с ограничивающим резистором и формирователь пилообразного напряжения, к выходу обмотка возбуждения генератора, отличающееся тем, что с целью повышения надежности и точности регулирования параллельно упомянутому шунту включен

светодиод одноэлектронной пары, фотодиод который через цепь подпитки подключен параллельно ограничивающему резистору.

Эффект Дембера (*фотодиффузный эффект*). Вне собственных полупроводниках коэффициенты диффузий носителей тока (электронов и дырок) различные. Таким образом, если какой-то части проводника фотоактивное освещение создает одинаковое число электронов и дырок, то диффузия этих носителей будет происходить с разной скоростью, в результате чего в кристалле возникает ЭДС

Эффект Дембера – возникновение электрического поля и ЭДС в однородном полупроводнике при его неравномерном освещении. В частности, ЭДС возникает между освещенной и не освещенной поверхностями полупроводника при сильном поглощении света в нем. Открыт немецким физиком Дембером в 1931 г. Фотоэдс его очень мала [3].

Фотопьезоэлектрический эффект. Обеспечить различие подвижности фотоэлектронов и фотодырок в полупроводнике можно каким-либо внешним воздействием. Так, при одностороннем сжатии освещенного полупроводника на грани кристалла, перпендикулярно направлению сжатия, возникает ЭДС, знак которой зависит от направления сжатия и направления светового потока, а величина пропорциональна давлению и интенсивности света. Эффект возникает из-за того, что подвижности разноименных носителей тока, обусловленных внутренним фотоэффектом, при упругой деформации кристалла становятся не одинаковыми по отношению к различным направлениям.

Эффект Кикоина-Носкова (*фотомагнитный эффект*).

Суть эффекта состоит в возникновении электрического поля в полупроводнике при перемещении его в магнитное поле и одновременном освещении светом, в составе которого имеются спектральные линии, сильно поглощаемые полупроводником. При этом возникшее электрическое поле перпендику-

лярно магнитному полю и направлению светового потока. Величина света магнитной ЭДС пропорциональна магнитной индукции и интенсивности светового потока. Эта пропорциональность нарушается при больших освещенностях, когда происходят "насыщения". Механизм эффекта таков: В результате внутреннего фотоэффекта вблизи освещенной поверхности полупроводника в избытке образуются электроны и дырки, которые диффундируют вглубь кристалла. Продольный диффузионный ток под действием поперечного магнитного поля отклоняется и расщепляется, что приводит к возникновению поперечной ЭДС

13.2. Фотохимические явления

Виды воздействия светового излучения на вещество весьма разнообразны. В частности, под действием света могут происходить реакции химических превращений веществ (фотохимическая реакция). Одни из этих реакций приводя к образованию сложных молекул из простых (например, образование хлористого водорода при освещении смеси водорода и хлора), другие – к разложению молекул на составные части (например, фотохимическое разложение бромистого серебра с выделением металлического серебра и брома), в результате третьих молекула не изменяет своего состава, изменяется лишь ее пространственная конфигурация, приводящая к изменению ее свойств (возникают тереоизомеры).

Фотохимические процессы вызываются только поглощаемым светом, действующим на движение валентных электронов в атомах и молекулах. В основе таких процессов лежит явление фотоэффекта.

Многие фотохимические превращения идут в два этапа. Первичный процесс характеризуется изменением молекулы под действием поглощенного ею кванта света – это собственно фотохимическая реакция. Во всех вторичных процессах мы имеем дело с сугубо химическими реакциями продуктов пер-

вичных реакций. Так при образовании хлористого водорода первичным является лишь расщепление молекулы хлора, поглотившей квант света, на атомарный хлор, который далее через день вторичных химических реакций приводит к образованию конечного продукта. Для первичных процессов справедлив закон эквивалентности. Каждому поглощенному кванту света соответствует превращение одной поглотившей свет молекулы. В общем случае количество химически прореагировавшего вещества пропорционально поглощенному световому потоку и времени его воздействия. Величина коэффициента пропорциональности определяется природой вторичных процессов.

Фотохимическую реакцию может вызвать лишь излучение, энергия кванта которого больше энергии активации молекулы. Этим объясняется повышение фотохимической активности ультрафиолетового излучения.

Следует отметить, что фотохимическими процессами объясняются многие природные явления, такие как синтез углеводов в листьях растений или чувствительность глаза к световому излучению.

Фотохимическая реакция разложения бромистого серебра (и других его коллоидных солей) использована для получения фотографических изображений. Изображение представляет собой локальные почернения фотоматериала из-за выделившихся под действием отраженного от объекта света частичек серебра.

К фотохимическим явлениям относится и так называемый *фотохромный эффект*, который состоит в следующем.

Некоторые химические вещества обычно со сложным строением молекулы, изменяют свою окраску под действием видимого или ультрафиолетового излучения. В отличие от обычного выцветания красок этот эффект обратим. Первоначальная окраска или отсутствие таковой восстанавливается через некоторое время в темноте, под действием излучения другой частоты или при нагревании. Но наведенную окраску мож-

но и сохранить сколь угодно долго, если охладить фотохромное вещество или обработать его некоторыми газами, фотохромизм восстанавливается при соответствующей вторичной обработке.

Скорость окрашивания и интенсивность окраски зависят не только от структуры молекул самого фотохромного соединения, но и от среды в которую оно может быть введено (стекло, керамика, жидкость, пластмасса, ткань и др.).

Многие фотохромные вещества при облучении интенсивным светом могут темнеть, причем их "быстродействие" достигает несколько микросекунд. Это позволяет использовать фотохромные тела как сверхзатворы для защиты глаз или светочувствительных приборов от неожиданной вспышки мощного излучения. Есть возможность использовать их как регуляторы светопропускания в зависимости от интенсивности света.

Фирма "Корнинг Гласс" выпустила светозащитные очки с фотохромными стеклами, изменяющими степень светопропускания в зависимости от интенсивности потока ультрафиолетовых лучей.

Также фотохромный материал применяется в:

- устройстве для представления информации в трехмерной форме, отличающееся тем, что с целью улучшения стереоскопического восприятия трехмерных изображений и упрощения устройства оно содержит три параллельных ряда плоских панелей, на противоположных концах которых нанесены изготовленные из фотохромного материала активные зоны одна из которых служит для просмотра изображения, а другая - для обработки информации, причем все панели установлены на разной высоте на трех осях вращения, сдвинутых относительно друг друга на 120 градусов;

- устройстве по пункту 1, отличающемся тем, что над каждой из фотохромных информационных панелей в зоне, противоположной зоне просмотра, установлена матричная излучающая панель;

- устройстве по пункту 1, отличающееся тем, что к каждой из панелей подведена линейка волоконных световодов связанных с источником импульсов излучения активизирующего фотохромный материал;

- устойчивом фотохромном воспроизводящем устройство, предназначенном для работы с пленкой, покрытой фотохромным материалом, содержащим сахарин, имеется центральная камера, в которой находится электроннолучевая трубка. На нормальной прозрачной пленке образуются непрозрачные участки обратимого изображения соответствующего изображению на экране электронно-лучевой трубки. При обработки пленки двуокисью серы, находящейся в газообразном состоянии, проэкспонированные участки фотохромного материала остаются непрозрачными. После этого газ откачивается и камеру подается тепловое излучение, обращающее те обработанные газообразной двуокисью серы участки, которые были прозрачными во время экспонирования. Участки пленки, временно сделавшиеся не прозрачными под воздействием изображения, проявляющегося на экране электронно-лучевой трубки, постоянно фиксируются. В состав конструкции устройства входит камера для ввода пленки и камера для вывода пленки, связанные с вакуумной откачивающей системой. Выходящая из центральной камеры двуокись серы в газообразном состоянии засасывается вакуумной откачной системой и не попадает в атмосферу.

В основе фотохимических процессов лежит взаимодействие излучения с электронами вещества. Это предполагает наличие возможности управлять ходом фотохимической реакции воздействие электрического поля. Возможно, что природа недавно открытого фотоэлектрического эффекта объясняется *стимуляцией фотохромного эффекта электрическим полем*. Эффект состоит в следующем: На тонкую прозрачную пластину керамики с включением железа, свинца лантана, циркония и титана, помещенную в постоянное электрическое поле, пер-

пендикулярное ее поверхности, проектируют негативное изображение видимых и ультрафиолетовых лучах. При этом в пластине появляется видимое позитивное изображение здесь наблюдается интересная особенность: При изменении направления поля на обратное, изображение из позитивного становится негативным. Изображение устойчиво и стирается лишь при равномерном облучении ультрафиолетовыми лучами с одновременной переполюсовкой поля.

Американские специалисты, открывшие этот эффект, предполагают его использовать в устройствах для хранения визуальной информации.

Фотогальванический эффект – фото-ЭДС, возникающая в полупроводнике при поглощение в нем электромагнитного излучения. Фото-ЭДС обусловлена пространственным разделением генерируемых излучением носителей заряда. При неравномерном освещение кристалла концентрация носителей заряда велика вблизи облучаемой грани и мала в затемненных участках. Носители диффундируют от облучаемой грани и между освещенными и затемненными участками возникает диффузионная фото-ЭДС, которая в полупроводниках мала и практического применения не имеет.

Вентильная фото-ЭДС возникает в неоднородных полупроводниках, а также у контакта полупроводник – металл. В области неоднородности существует внутреннее электрическое поле, которое ускоряет генерируемое излучение не основные неравновесные носители. В результате фото носители разных знаков пространственно разделяются.

При поглощение излучения свободными носителями заряда в полупроводнике вместе с энергией фотонов поглощается их импульс. В результате появляется фото-ЭДС светового давления, но она очень мала. Фото-ЭДС светового давления используется в быстродействующих приемниках излучений, предназначенных для измерения мощности и формы импульсов излучения лазеров [3].

Электрохимолюминесценция – люминесценция специальных жидких люминофоров в электрическом поле.

Применение: в индикаторных устройствах, можно создать светящиеся буквы, цифры [3].

Люминесценцией называется излучение, избыточное над тепловым излучением тела, и имеющее длительность, прерывающую период световых колебаний. Люминесценция возникает при возбуждении вещества за счет притока энергии, и в отличие от других видов "холодного" свечения продолжается в течении некоторого времени после прекращения возбуждения.

О продолжительности после свечения выделяют *флуоресценцию* (менее 10 сек.) и *фосборесценцию*; последнее продолжается в заметный промежуток времени после снятия возбуждения (от 10 сек. до нескольких часов).

Способность люминесцировать обладает большая группа, газообразных, жидких и твердых веществ, как органических, так и неорганических (*люминофоров*). Характер процесса люминесценции существенным образом зависит от агрегатного состояния вещества и типа возбуждения.

Люминофоры являются своеобразными преобразователями энергии из одного вида в другой; на входе это может быть энергия электромагнитного излучения, энергия ускоренного оттока частиц, энергия химических реакций или механическая энергия, – любой вид энергии, кроме тепловой, – на выходе – световое излучение. Отдельные атомы и молекулы люминофора, поглощая один из этих видов энергии, возбуждаются, т.е. переходя на более высокие энергетические уровни по сравнению с равновесным состоянием, и затем самопроизвольно совершают обратный переход излучая избыток энергии в виде света. Способ возбуждения лежит в основе классификации различных видов люминесценции.

14.1. Люминесценция, возбуждаемая электромагнитным излучением

Фотолюминесценция – свечение возникающее при поглощении люминофором ИК, видимого или УФ-излучения. Спектр поглощения и излучения люминофоров связаны *правилом Стокса-Люмиаля*, согласно которому максимум спектра излучения смещен по отношению к максимуму спектра поглощения в сторону длинных волн (например, при облучении ультрафиолетом люминофор излучает видимый свет).

Пример применения фотолюминесценции:

- способ контроля геометричности сварных изделий с помощью люминофора, при котором изделие направляют ультрафиолетовые лучи и судят о герметичности по свечению люминофора, отличающийся тем, что с целью повышения производительности путем осуществления контроля непосредственно в процессе сварки, люминоформную суспензию наносят на внутреннюю поверхность свариваемых деталей перед сваркой, а в качестве источника УФ-лучей используют сварочную дугу;

- способ количественного определения горечи (кукурбитационов) в огурцах, включиющий взятие образцов экстрогирование спиртом и определение кукурбитационов, отличающееся тем, что с целью ускорения процесса, экстракт облучают ультрафиоетовым светом измеряют интенсивность вторичного свечения и количество кукурбитационов, определяют по показаниям прибора и калибровочному графику.

Фотолюминесценция – люминесценция, возбуждаемая оптическим излучением. В отличии от рассеяния света и горячей люминесценции, фотолюминесценция испускается после того, как в возбужденном светом веществе закончились процессы релаксации и установилось квазиравновесие. В обычных лучах квазиравновесие устанавливается в течение времени ~ 10^{-12} … 10^{-10} с.

Спектр фотолюминесценции подчиняется правилу Стокса. В отсутствии тушения люминесценции квантовый выход (отношение числа испускаемых квантов к числу поглощаемых) равен единице. Зависимость квантового выхода фотолюминесценции от длины волны возбуждающего света определяется законом Вавилова. Более сложные закономерности наблюдаются при фотолюминесценции кристаллофосфоров, для которой характерна нелинейная зависимость фотолюмин от интенсивности возбуждения.

Применение: люминесцентная дефектоскопия, люминесцентный анализ [3].

Наиболее широко фотолюминесценция применяется в лампах дневного света. В них свечение люминофора происходит под действием ультрафиолета, которым богато излучение газоразрядной части лампы (в связи с наличием паров ртути).

Однако есть исключение из правила Стокса-Люмеля – это так называемые *антистоксовские люминофоры*, которые при возбуждении в ИК-области спектра излучают в видимой области.

Применение этих люминофоров связано с преобразованием ИК-излучения в видимое, например, для визуализации излучения ИК-лазеров, для создания лазеров видимого диапазона с ИК-накачкой, а светодиодов.

Рентгенолюминесценция. Специфика возбуждения рентгеновскими лучами, по сравнению с фотовозбуждением, состоит в том, что на люминофор воздействуют фотоны со значительно большей энергией. При этом свечение люминофора вызывается не непосредственным действием самих рентгеновских лучей, в воздействием электронов, вырываемых из основы люминофора рентгеновскими лучами. Вследствие этого ретгенолюминесценция имеет многие общие черты с катодолюминесценцией. Основное применение – в экранах для рентгеноскопии и рентгенографии.

14.2. Люминесценция, возбуждаемая корпускулярным излучением

Катодолюминесценция – возбуждается воздействием на люминофор потока электронов. Основное применение – визуализация электронного изображения на экранах телескопов телевизоров, осциллографов и других подобных приборов, а также электронооптических преобразователей [3].

Ионолюминесценция – свечение, возникающее при бомбардировке люминофора пучком ионов.

При ионолюминесценции, также как при катодолюминесценци, энергия возбуждения поглощается в тонком приповерхностном слое люминофора, поэтому здесь оказывает состояние поверхности, в частности, хемосорбция различных газов.

Радиолюминесценция. Для создания самосветящихся красок постоянного действия, не нуждающихся в источниках внешнего возбуждения, в люминофор вводят радиоактивные изотопы продукты распада которых (например, альфа и бета частиц) возбуждают в нем свечение. Время, в течении которого люминофор излучает свет, определяется периодом полураспада изотопа (десятки лет). Радиолюминесценция все более широко применяется в дозиметрии радиоактивных излучений [3].

Катодолюминесценция – люминесценция при возбуждении люминофора электронным пучком (катодными лучами); один из видов радиолюминесценции.

Способностью к катодолюминесценции обладают газы, молекулярные кристаллы, органические люминофоры, кристаллофосфоры, однако только последние стойки к действию электронов и дают достаточную яркость свечения.

Для возбуждения катодолюминесценции обычно применяют пучки электронов с энергией 100 эВ. Спектр катодолюминесценции аналогичен спектру фотолюминесценции, ее

КПД обычно составляет 1-10 % от энергии электронного пучка, основная часть которой переходит в теплоту [3].

Применение: в спектроскопии, телевидении и др.

Электронно-оптический преобразователь - прибор для преобразования невидимого глазом изображения в видимое или для усиления яркости видимого.

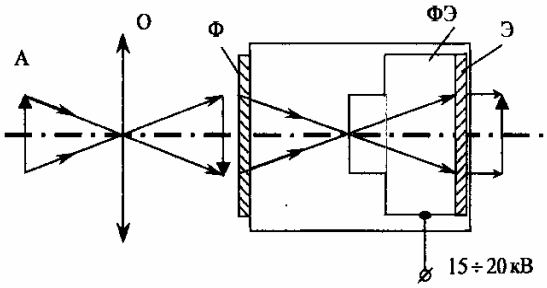


Рис. 14.1. Схема электронно-оптического преобразователя:
А - объект; О - объектив; Ф - фотокатод;
ФЭ - фокусирующий элемент; Э - экран

14.3. Люминесценция, возбуждаемая электрическим полем

Электролюминесценция (*эффект Дестрио*). Многие кристаллические порошкообразные люминофоры, помещенные в конденсатор, питаемый переменным напряжением 100-220 В с частотой 400-3000 Гц начинают интенсивно люминесцировать. Спектральный состав и интенсивность излучения существенно зависят от частоты возбуждения. Некоторые люминофоры излучают и при возбуждении постоянным электрическим полем.

Пример применения электролюминесценции:

- система для измерения распределения давления на поверхности модели летательного аппарата, содержащая чувствительный элемент, оптическое сканирующее устройство и

фотоэлектрический регистратор, отличающийся тем, что с целью обеспечения возможности непрерывного измерения профиля давления на исследуемой поверхности вдоль заданной линии, в ней чувствительный элемент выполнен в виде электролюминесцентного конденсатора, одна обкладка которого образована поверхностью металлической модели, а другая - прозрачным электропроводящим слоем, между которыми нанесен электролюминесциновый слой и слой диэлектрика, диэлектрическая проницаемость которого зависит от давления, например, слой эпоксидной смолы.

Основная область применения электролюминесценсии – индикаторные устройства, подсветка шкал, преобразователи изображения. Применение электролюминофоров считают перспективным для создания телевизионных экранов.

Инжекционная электролюминесценция (*эффект Лосева*). Свечение возникает под действием зарядов, инжектируемых в полупроводниковые кристаллы. При пропускании тока через полупроводниковый диод в области перехода инжектируются избыточные носители тока (электроны и дырки), рекомендация которых сопровождается оптическим излучением.

Широкое применение основанных на этом эффекте светодиодов обусловлено следующими их особенностями: высокая надежность (срок службы 10^6 часов), малое энергопотребление (1,5-30 В, 10 мА), малая инерционность (10^{-9} сек), высокая яркость свечения в зеленой, красной и инфракрасной областях спектра.

Пример применения инжекционной электролюминесценции:

- устройство для регистрации электрических сигналов на фотопленку, содержащее источник электрических сигналов, измерительный механизм и механизм протягивания пленки, отличающийся тем, что с целью повышения надежности и упрощения конструкции, в нем измерительный механизм выполнен в виде полупроводникового электролюминесцентного преобразователя, состоящего из кристалла полупроводника с широкой запрещенной зоной, содержащего p-n-переход и контакты с выводами,

служащими для пропускания тока электролюминесценции и тока управления площадью свечения.

14.4. Хемилюминесценция

Люминесценция возбуждаемая за счет энергии химических реакций, называется *хемилюминесценцией* (4). Этим видом люминесценции объясняется свечение гнилушек, светлячков, многих глубоководных рыб.

Хемилюминесценция использована фирмой "Ремингтон Армс" для создания лампы, в которой свечение возникает при воздействии кислорода воздуха на некоторые химически активные вещества.

Частным случаем хемилюминесценции является *радиокалолюминесценция* – излучение вещества-катализатора при адсорбции и рекомендации на его поверхность свободных атомов или радикалов в молекулы.

Пример применения:

- способ анализа загрязнения атмосферы окисями азота и серы основанный люминесценции между люминофором и перикисью водорода. В качестве люминофора используется 5-амино-2,3 дигидро-4-фтолозин-диол.

Если источником радикала служит пламя, то свечение называют *кандолюминесценцией*. Для ее возникновения необходим контакт пламени с люминофором, при этом он не должен сильно нагреваться.

14.5. Триболюминесценция

Источником возбуждения люминесценции может служить и механическая энергия. Такой процесс называют механо- или *триболюминесценцией*. Чаще всего возникает при трении или ударе двух тел, сопровождающихся их разрушением (так сахар при раскалывании иногда светится).

Пример применения:

- способ излучения структурных превращений полимерных материалов по интенсивности и характеру люминесценции, отличающийся тем, что с целью упрощения и повышения точности, оценивают интенсивность и характер механолюминесценции, возбуждаемой при механической деформации и разрушении полимерных материалов.

14.6. Радиотермолюминесценция

Оказалось, что если сильно охлажденный образец вещества предварительно облученный гамма-лучами, альфа-частицами или электронами, постепенно нагревать, то он начинает интенсивно светиться. Практически все вещества могут таким образом "накапливать" в себе свет и долго сохранять его. И лишь при нагреве свет как бы "оттаивает", начинается рекомбинация "замороженных" электронов, сопровождаемая световым излучением. Цвет свечения постепенно меняется, изменяется также и его интенсивность. При этом пики интенсивности соответствуют температурам структурных переходов, что особенно заметно у различных полимеров. Даже незначительные изменения структуры вещества: повышение степени кристалличности, изменение взаимного расположения макромолекул, существенно влияют на характер свечения. *Радиотермолюминесценция* (РТЛ) весьма чувствительна к механическим напряжениям в полимере.

Все это позволило создать на основе РТЛ простые и точные методики анализа структуры, излучения степени однородности смесей, исследования деформационных свойств и других характеристик полимеров, причем для анализа достаточно образца весов в сотые доли миллиграмма.

Термолюминесценция – люминесценция, возникающая при нагревании вещества, предварительно возбужденного светом или жестким излучением. Наблюдается у многих кристаллофосфоров, минералов, некоторых стекол и органических люминофоров.

Применяется при исследованиях энергетического спектра электронных ловушек в твердых телах, в минералогии, определения возраста пород и условий их образования [3].

Электроннолюминесценция - люминесценция, возбуждаемая электрическим полем. Наблюдается в газах и твердых телах. При электронолюминесценции атомы (молекулы) вещества переходят в возбужденное состояние в результате возникновения в нем какой-либо формы электронного разряда.

Из различных видов электронолюминесценции твердых тел наиболее важны инжекционная и предпробойная.

Инжекционная люминесценция характерна для p-n - переходов в некоторых полупроводниках (SiP, GaP) в постоянном электрическом поле, включенном в пропускном направлении. Свечение возникает при рекомбинации электронов и дырок в p-n - слое.

Предпробойная электронолюминесценция наблюдается, например в ZnS, активированном Си, А1, и др. и помещенном в диэлектрик между обкладками конденсатора, на который подается переменное напряжение звуковой частоты.

При максимальном напряжении на обкладках конденсатора в люминофоре происходят процессы, близкие к электрическому пробою: на краях частичек люминофора концентрируется сильное электрическое поле, ускоряющее свободные электроны, которые ионизуют атомы, вызывая свечение.

Применение: электронолюминесценция газов, (свечение газового разряда) - используется в газоразрядных трубах-индикаторах наличия электромагнитного поля. Электронолюминесценция твердых тел используется в индикаторных устройствах (знаковые индикаторы, преобразователи изображений и пр.) [3].

14.7. Стимуляция и тушение люминесценции

Интересной особенностью люминесценции, возбуждаемой каким-либо источником энергии, является *усиление свече-*

ния при воздействии другого источника энергии. Происходит так называемая *стимуляция люминесценции*. Стимулирующие воздействия могут оказывать изменения температуры, видимое, ИК и УФ-излучение, электрическое поле, присутствие некоторых газов и т.д. Стимуляция люминесценции электрическим полем называется *эффектом Гуддена-Поля*.

Пример применения:

- способ получения изображения, состоящий в том, что люминесцентный экран равномерно облучают ультрафиолетовым светом, проектируют на экран изображение в инфракрасном свете, фиксируют свечение экрана на светочувствительном материале, отличающийся тем, что с целью расширения области чувствительности, одновременно с облучением ультрафиолетовым светом прикладывают к экрану электрическое поле, и после проектирования изображения подают переменное напряжение на экран, причем люминофор, из которого изготовлен экран, должен обладать эффектом Гуддена-Поля.

Факторы, стимулирующие люминесценцию, при определенных условиях могут дать обратный эффект, т.е. уменьшить интенсивность свечения или совсем прекратить его. Это явление называют *уменьшением люминесценции*. Повышение температуры, изменение влажности, ИК-облучение, электрическое поле, изменение внешнего давления, наличие некоторых газов – все эти факторы могут привести к *тушению люминесценции*. Так, например, присутствие кислорода или йода уменьшает интенсивность фотолюминесценции, в тоже время как присутствие молекул воды увеличивает ее; наличие электрического поля, перпендикулярного поверхности люминофора, тушит радикалолюминесценцию, изменение же направления поля на обратное усиливает свечение.

Примеры применения:

- способ выделения жизнеспособных семян растений, включающий отбор семян по люминесценции, с целью сохранения целостности семян, их обрабатывают ослабляющими

люминесценцию веществами, выбранными из группы, включающей и с последующим отбором семян, имеющих пониженную интенсивность свечения;

- прибор для непрерывного определения концентрации кислорода или кислородосодержащих соединений в потоке газа. Определение основано на способности указанных веществ гасить фотолюминесценцию.

14.8. Эффект поляризации

Излучение люминесценции при некоторых условиях может быть *поляризованным* (обычно это линейная поляризация, очень редко – циркулярная). Для поляризации люминесценции необходимо, чтобы люминофор обладал либо собственной, либо наведенной анизотропией. Поляризованные люминофоры получаются при механических растяжениях полимерных пленок, "пропитанных" анизотропными люминосцензирующими молекулами. Искусственную ориентацию таких молекул можно вызвать также с помощью сильных электрических и магнитных полей или же в потоке жидкости. В случае фотолюминесценции ее поляризация обнаруживается при возбуждении поляризованным светом.

15. АНИЗОТРОПИЯ И СВЕТ

Превращение естественного света в поляризованный и изменение типа поляризации при различных оптических явлениях почти всегда связаны с *оптической анизотропией вещества*, т.е. с различием оптических свойств по различным направлениям. Оптическая анизотропия является следствием анизотропии структуры и вещества. Создавать или менять анизотропию структуры и вещества можно воздействием самых различных факторов (деформация, электрическое поле и т.д.). Этим и объясняется разнообразие эффектов, так или иначе влияющих на поляризацию светового излучения.

В ряде таких эффектов поляризация света происходит без дополнительного воздействия на вещество. Так, например, естественный свет, отраженный под углом Брюстера, полностью линейно поляризованный, а правоциркулярно-поляризованный свет при перпендикулярном отражении от стеклянной пластинки превращается в левоциркулярно-поляризованный.

15.1. Двойное лучепреломление

На границе анизотропных прозрачных тел (в первую очередь кристаллов) свет испытывает двойное лучепреломление т.е. расцепляется на два взаимно-перпендикулярно поляризованных луча, имеющие различные скорости распространения в среде обыкновенный и необыкновенный. Первый из них поляризован перпендикулярно оптической оси кристалла и распространяется в нем как в изотропной среде. Второй луч поляризован в главной плоскости кристалла и испытывает на себе все "превратности анизотропии". Так его коэффициент преломления изменяется с направлением, он преломляется даже при нормальном падении на кристалл.

Так происходит *двойное лучепреломление* в одноосных кристаллах. В случае двуосных кристаллов картина расщепления несколько сложнее.

Эффект двойного преломления положен Николем в основу изобретенной им *поляризационной призмы*. Он использовал различие показателей преломления обыкновенного и необыкновенного лучей, создав для одного из них условия полного внутреннего отражения, после которого этот луч, изменив свое направление, поглощается зачерненной боковой гранью призмы. Другой луч полного внутреннего отражения не испытывает и проходит сквозь призму, а так как это полностью поляризованный луч, то на выходе призмы получается полностью линейно-поляризованный свет.

15.2. Механооптические явления

Здесь рассматривается ряд эффектов, приводящих к возникновению оптической анизотропии под действием механических сил.

Фотоупругость – так называется возникновение в изотропных прозрачных твердых телах оптической анизотропии и связанного с ней двойного лучепреломления под действием механических нагрузок, создающих в твердых телах деформации.

При пропускании луча света через такое тело, возникает два луча и различной поляризации, интерференция между которыми приводит к образованию интерференционной картины, вид которой позволяет судить о величинах и распределении напряжений в теле или же об изменениях структуры вещества. Поскольку оптическая анизотропия обусловлена именно нарушениями первоначальной изотропной структуры вещества, то эффект фотоупругости позволяет визуализировать как упругие деформации, так и остаточные, а это значит, что о деформациях и нагрузках можно судить и после снятия этих нагрузок.

Фотоупругость наблюдается и в кристаллах, т.е. в веществах, уже обладающие анизотропией свойства. При этом изменяется характер анизотропии: например, в одноосном кри-

сталле может возникнуть двойное преломление в направлении его оптической оси, вдоль которой он первоначально изотропен.

Эффект фотоупругости – один из самых тонких методов изучения структуры и внутренних напряжений в твердых телах.

Фотоупругость – пьезоэлектрический эффект, возникновение оптической анизотропии в первоначально изотропных твердых телах (в том числе полимерах) под действием механических напряжений. Эффект открыт Зеебеком и Брюстером. Фотоупругость – следствие зависимости диэлектрической проницаемости вещества от деформации и проявляется в виде двойного лучепреломления и дихроизма, возникающих под действием механических напряжений. При одноосном растяжении или сжатии изотропное тело приобретает свойства оптически одноосного кристалла с оптической осью, параллельной оси растяжения или сжатия. При более сложных деформациях, например при двухстороннем растяжении, образец становится оптически двухосным.

Для малых одноосных растяжений или сжатий величина двойного лучепреломления An пропорциональна напряжению.

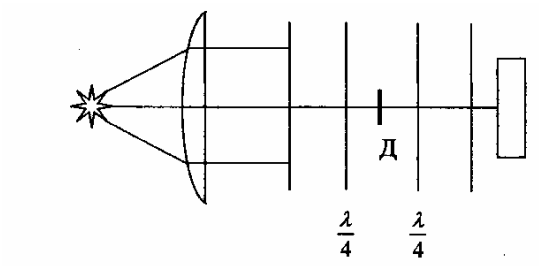


Рис. 15.1. Схема кругового полярископа

Применение: датчик механических напряжений [3].

Эффект Максвелла. Так называют возникновение оптической анизотропии (двойного лучепреломления) в потоке

жидкости. Этот эффект обусловлен двумя причинами: преимущественно ориентации частиц жидкости или растворенного в ней вещества (полной ориентации мешает броуновское движение) и их деформацией, которые возникают под действием гидродинамических сил при относительном смещении прилежащих слоев жидкости, т.е. при наличии градиента скорости по сечению потока. В основном возникновение градиента скоростей в потоке определяется тормозящим воздействием стенок (например, трубы). Относительная роль ориентации и деформации частиц различна в различных жидкостях и зависит от свойств и структуры молекул: в случае длинных анизотропных частиц и молекул основную роль играет ориентация, для глобулярных изотропных - больший вклад дает информация, т.к. ориентация таких частиц в потоке незначительна. По сути дела, эффект Максвелла – это вариант эффекта фотоупругости для жидкостей. Отсутствие в жидкости напряжений упругой деформации компенсируется ее "динамизацией", приведением ее в движение, что создает деформацию отдельных молекул.

Величина эффекта Максвелла зависит, в частности от формы и размеров частиц, что позволяет использовать его для измерения этих величин. Практическое применение эффекта в основном лежит, в области тонких исследований биологических объектов, таких, как определение размеров ряда вирусов, изучение структуры многих белковых молекул и др.

15.3. Электрооптические явления

Так называют явления связанные прохождением света через среды, помещенные в электрическом поле.

Электрооптический эффект Керра. Многие изотропные вещества, помещенные в электрическое поле, приобретают свойства одноосных кристаллов, т.е. обнаруживают оптическую анизотропию, приводящую к двойному лучепреломлению света, проходящего через вещество перпендикулярно направлению поля. При этом величина двойного лучепреломле-

ния пропорциональна квадрату напряженности поля и ее знак не меняется при изменении направления поля на обратное. (другие названия эффекта: *квадратичный электрооптический эффект*, *поперечный электрооптический эффект*).

Величина эффекта зависит от вещества, его температуры и длины волны света. В газах эффект Керра мал, а в жидкостях его величина гораздо больше. Аномально сильно он проявляется в нитробензоле и подобных ему жидкостях.

Наиболее часто указанный эффект реализуется в т.н. *электрооптических затворах Керра*. Прозрачную кювету с электродами для создания поля, заполненную нитробензолом, помещают между скрещенными поляризатором и анализатором таким образом, что направление поля составляет угол 45° с их главными плоскостями поляризации. Если поле отсутствует, такое устройство не прозрачно для света. При наложении поля, линейно поляризованный свет при прохождении через кювету расцепляется на два перпендикулярно поляризованных луча, имеющих в пределах кюветы различные скорости распространения. При этом между ними возникает разность фаз, что приводит к эллиптической поляризации света, вышедшего из кюветы. При этом часть его проходит через анализатор. Затвор открыт. Высокая скорость срабатывания такого затвора (10^{-11} сек) обусловило его применением в исследованиях быстропротекающих процессов и для высокочастотной (до 10^9 Гц) модуляция оптических сигналов. Применение эффекта дает хорошие результаты и в том случае, когда требуется безинерционное пространственная модуляция света (отклонение луча, его расщепление и т.п.). Взаимосвязь через эффект Керра двух полей – электрического и оптического – позволяет применять его для дистанционного измерения электрических величин оптическими методами.

Еще два примера применения эффекта Керра:

- оптическая система с управляемым фокусным расстоянием, отличающийся тем, что с целью безинерционного изме-

нения фокусного расстояния она выполнена в виде цилиндрического рабочего тела из вещества, обладающего электрооптическим эффектом, помещенного внутрь, например, шестипольного конденсатора, электрическое поле которого создает такое распределение показателя преломления в веществе рабочего тела, что падающий на его торец параллельный пучок света собирается в фокусе, положение которого на оси системы зависит от приложенного конденсатору напряжения;

- устройство для измерения температуры содержащее источник света, пластины из матированного прозрачного материала, пространстве между которыми заполнено жидкостью с близким пластинам показателем преломления и различным по знаку или величине температурным коэффициентом показателя преломления, отличающееся тем, что с целью расширения диапазона измерений, в него введены, прозрачные электроды, выполненные, например, на основе пленок окиси олова, нанесенные снаружи на пластины, подключенные к источнику питания, а в качестве жидкости заполняющей пространство между пластинами использован нитробензол.

Значительным квадратичным электрооптическим эффектом обладают и некоторые кристаллы (КТ Ват).

Эффект Керра, вызванный электрическим полем световой волны называется высокочастотным. Он проявляется в том, что для мощного излучения показатель преломления жидкости зависит от интенсивности света, т.е. среда становится нелинейной, что для интенсивных лазерных пучков приводит к самофокусировке.

Эффект Керра – квадратичный электрооптический эффект, возникновение двойного лучепреломления в оптически изотропных веществах (жидкостях, стеклах, кристаллах с центром симметрии) под воздействием однородного электрического поля. Открыт шотландским физиком Дж. Керром в 1875 г. величина двойного лучепреломления пропорциональна квадрату напряженности электрического поля.

Магнитооптический эффект Керра состоит в том, что плоско поляризованный свет, отражаясь от намагниченного ферромагнетика, становится электрически поляризованным, при этом большая ось эллипса поляризации поворачивается на некоторый угол по отношению к плоскости поляризации падающего света. Наблюдается также оптический эффект Керра, состоящий в том, что возникает двулучепреломление под действием поля мощного оптического излучения.

Примечание: в ячейке Керра - электрооптическом устройстве, основанном на этом эффекте, применяемой в роли оптического затвора

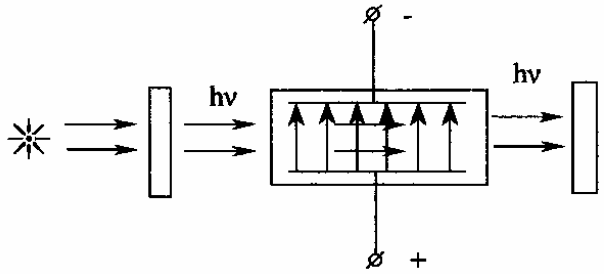


Рис. 15.2. Модулятора света

Ячейка Керра состоит из сосуда с прозрачными окнами, заполненного пропускающим свет веществом, в которые погружены два электрода. Между электродами проходит линейно поляризованный световой луч, который в отсутствии поля не пропускается анализатором А. При включении поля

возникает двойное лучепреломление и анализатор А частично пропускает свет (анализатор А и поляризатор П-в скрещенном положении) [3].

Эффект Поккельса. Возникновение двойного лучепреломления в кристалле при наложении электрического поля в направлении распространения света называется *эффектом Поккальса*. При этом величина разности фаз расщепленных

лучей пропорциональна первой степени напряженности поля (линейный электрооптический эффект, а также продольный электрооптический эффект). Наиболее ярко эффект реализуется в кристалле дигидрофосфата калия (КДР).

Эффект Поккельса по сравнению с эффектом Керра имеет меньшую зависимость от температуры. Применение этих эффектов аналогичны (затворы вращатели плоскости поляризации, индикаторы электрического поля, модуляторы света).

Примеры применения:

- оптико-электронное устройство для измерения мощности, содержащее монохротический источник излучения, магнитооптическую ячейку Фарадея с поляризатором и анализатором, фотоприемник и усилитель с нагрузкой в выходной цепи, отличающийся тем, что с целью повышения точности измерения, оно снабжено последовательной цепочкой элементов состоящей из четвертьволновой пластины, электрооптической ячейки Поккельса и дополниельного анализатора, установленной между анализатором ячейки Фарадея и фотоприемником;

- модулятор света, включающий в полупроводниковую структуру генерирующую в домены сильного поля, боковая поверхность или часть боковой поверхности, которая покрыта диэлектриком, отличающийся тем, что с целью расширения частотного диапазона модулируемого излучения, уменьшение потерь и увеличение коэффициента модуляции, диэлектрическое покрытие выполнено из материала с константой электрооптического эффекта большей, чем у материала полупроводниковой структуры.

Эффект Поккельса – линейный электрооптических эффект, изменение показателя преломления света в кристаллах, помещенных в электрическое поле, пропорциональное напряженности приложенного поля. Как следствие этого эффекта в кристаллах появляется двойное лучепреломление или меняется его величина. Эффект Поккельса наблюдается только у пьезоэлектриков. Был открыт в 1894 г. немцем Ф. Поккельсом.

Главная причина - электрические напряжения большой величины (десятки - сотни кВ) для получения заметного эффекта. В последнее время найдены кристаллы, требующие малых управляющих напряжений (порядка десятков или сотен вольт).

Примечание: системы углового отклонения светового луча; устройства для создания двумерного оптического изображения.

Модуляторы света - основаны почти все на эффекте Поккельса. Возможно осуществить модуляцию до частот ~10^{13} Гц, модуляция добротности лазеров [3].

15.4. Магнитооптические явления

К ним относят группу явлений, связанных с прохождением электромагнитного излучения через вещества, помещенные в магнитном поле.

Эффект Фарадея. Если линейно-поляризованный свет проходит через вещество, помещенное в магнитное поле, вектор напряженности которого совпадает с напряжением распространения света, то плоскость поляризации света поворачивается на некоторый угол. Этот угол пропорционален длине пути света в веществе и напряженности поля, и обратно пропорционален квадрату длины волны. Зависит он от свойств вещества. Так, он сильно изменяется вблизи линий поглощения данного вещества. Особенно сильный эффект наблюдается в тонких прозрачных пленках железа, никеля и кобальта. При прохождении света в прямом и обратном направлении углы поворота вследствие эффекта Фарадея не компенсируются, а суммируются, в отличии от естественного вращения поляризации в некоторых веществах. Диамагнетики в магнитном поле всегда обнаруживают положительное вращения (т.е. вращение по часовой стрелке, если смотреть по направлению поля), пара и ферромагнетики – отрицательные.

Пример применения:

- позиционно-чувствительный датчик с магнитооптической модуляцией, содержащий поляризатор, анализатор и ячейку Фарадея, отличающийся тем, что с целью повышения чувствительности, магнитооптический активный элемент ячейки Фарадея выполнен из составных двух частей, например, призм с противоположным по знаку постоянными Верде, расположенных в симметрично относительно оптической оси системы.

Природа эффекта объясняется различным влиянием магнитного поля на скорость распространения в веществе правоциркулярно и левоциркулярно поляризованных световых волн, в результате чего между ними накапливается разность фаз, приводящая при их сложении к возникновению волн с повернутой плоскостью поляризации.

Как обычно, возможные применения вытекают из физической сущности эффекта; управление поворотом плоскости поляризации с помощью магнитного поля или же измерение магнитных полей по углу поворота плоскости поляризации:

- оптический квантовый генератор, содержащий задающий генератор, оптический квантовый усилитель и установленные между ними согласующее устройство, отличающееся тем, что с целью улучшения однородности пучка без уменьшения его мощности, согласующее устройство выполнено в виде расположенного между двумя поляризаторами элемента, обладающего измеряющейся по радиусу вращательной способностью;

- устройство по п.1, отличающееся тем, что в качестве названного элемента использован вращатель Фарадея, выполненный в виде цилиндра из свинцового стекла установленного в соленоиде;

- устройство магнитооптического воспроизведения информации с магнитного носителя, содержащее источник плоскополяризованного света, анализатор, фотоприемник и магнитную головку, отличающееся тем, что с целью повышения

чувствительности, его магнитная головка снабжена магнитооптическим кристаллом установленным на участке заднего зазора, расположенным на одной линии между источником плоскополяризованного света и анализатором пучка этого света.

Часто эффект Фарадея используют для создания невзаимных элементов т.е. устройств, пропускающих излучение только в определенном направлении.

Оптический вентиль состоит из двух поляризаторов, скрещенных под углом 45° и элемента Фарадея, помещенного между ними. Элемент рассчитан так, что, вращая плоскость поляризации света на 45°, и свет проходит через второй поляризатор. Луч, идущий в обратном направлении, вращается в ту же сторону, что и прямой луч и оказывается повернутым на 90° относительно первого поляризатора, и значит не пропускается им. В частности такие вентили используют в лазерах бегущей волны и в оптических усилителях.

В СВЧ-технике для создания вентилей, фазовращателей и циркуляторов широко используют эффект Фарадея на ферритах, которые практически прозрачны для электромагнитных волн этого диапазона (дици-, санти- и миллиметровые радиоволны).

Существует и так называемый *обратный эффект Фарадея* – возникновение в среде магнитного поля под действием мощного циркулярнополяризованного света, вызывающего циркулярное движение электронов (1).

Эффект Фарадея – один из эффектов магнитооптики. Заключается во вращении плоскости поляризации линейно поляризованного света, распространяющегося в веществе вдоль постоянного магнитного поля, в котором находится это вещество. Открыт М. Фарадеем в 1845 г.

Под действием магнитного поля показатели преломления (n_+ и n_-) для циркулярно право- и левополяризованного света становятся различными. Вследствие этого при прохождении через среду линейно поляризованного излучения его лево- и

правополяризованные составляющие распространяются с различными фазовыми скоростями, приобретая разность хода, линейно зависящую от оптической длины пути.

В результате плоскость линейно поляризованного монохроматического света поворачивается на некоторый угол, зависящий от длины пути, длины волны и показателей преломления n_+ и n_-. Эффект Фарадея тесно связан с эффектом Зеемана и является следствием его [3].

Частным случаем эффекта Фарадея является магнитооптический эффект Керра – при отражении под любым углом, в том числе и по нормали к поверхности, линейнополяризованного света от намагниченного ферромагнетика возникает элептически поляризованный свет. Фактически, магнитооптический эффект Керра это вращение плоскости поляризации части излучения в тонком поверхностном слое ферромагнетика в магнитном поле.

Магнитооптическая установка для автоматической записи магнитных характеристик ферромагнетика, в которой использование магнитооптического эффекта Керра позволяет снимать кривые намагничивания и гистерезиса на участках поверхности размером 1 мк^2.

При распространении света в веществе перпендикулярно магнитному полю возникает двойное лучепреломление, величина которого пропорциональна квадрату напряженности магнитного поля (*эффект Коттона-Муттона*).

Эффект Коттона-Мутона – двойное лучепреломление света в изотропном веществе, помещенном в магнитное поле (перпендикулярно световому лучу). Впервые обнаружено в коллоидных растворах англичанином Керром в 1901 г., исследовано французами Коттоном и Мутоном в 1907 г.

Суть эффекта состоит в том, что образец прозрачного вещества помещают между полюсами мощного электромагнита и пропускают через него луч монохроматического света, линейно поляризованного в плоскости, составляющей с на-

правление магнитного поля угол в 45°. Проходящий через вещество луч света из линейно-поляризованного превращается в эллиптически поляризованный, так как он разделяется в веществе, ставшим анизотропным, на два луча - обыкновенный и необыкновенный, имеющие разные показатели преломления. Эти лучи распространяются под очень малым углом друг к другу. Поэтому для обнаружения эффекта необходимы достаточно сильные поля. Величина угла расхождения лучей пропорциональна квадрату напряженности магнитного поля и длине волны света [3].

Наложение сильного магнитного поля ориентирует хаотически расположенные молекулы (если последние имеют постоянный магнитный момент), что и приводит к оптической анизотропии. Этот эффект много слабее, чем электрооптических эффект Керра, а в технике применяется редко.

Механизм всех магнитооптических явлений тесно связан с механизмом прямого и обращенного *эффекта Зеемана*.

Прямой (обращенный) эффект Зеемана состоит в расщеплении спектральных линий испускаемого (поглощаемого) излучения под действием магнитного поля на излучающее (поглощающее)вещество. При этом неполяризованное излучение с частотой направления поля расщепляется на два компонента (линии) с частотами и, первая из которых поляризована по левому кругу, а вторая по правому. В направлении же перпендикулярном поля расщепление имеет такой характер: имеется при линейном-поляризованные компоненты с частотами.

Крайние компоненты поляризованы перпендикулярно магнитному полю, средние же с неизменной частотой поляризована вдоль поля и по интенсивности вдвое превосходит соседние. Величина смещения частоты пропорциональна индукции магнитного поля. Эффект Зеемана обусловлен расщеплением в магнитном поле энергетических уровней атомов или молекул на подуровни, между которыми возможны квантовые переходы.

Примеры применения:

- кольцевой лазер для определения скорости вращения имеет трубу и отражательные зеркала, которые создают замкнутый оптический контур, включающий ось лазера, а также средства с помощью которых световые лучи обособляются и накладываются, циркулируя в оптическом контуре в противоположных направлениях. Лазер отличается тем, что предусмотрено устройство служащее для воздействия на трубу лазера осевого магнитного поля таким образом, что в соответствие с эффектом Зеемана, создается два луча с противоположной круговой поляризацией. Предусмотрено устройство, которое обеспечивает поступательное движение только одного такого луча в каждом направлении вдоль оптического контура;

- аппарат предназначен для реализации способа определения концентрации парамагнитного материала в газовой смеси. Образец смеси подвергают воздействию магнитного поля средней напряженности и освещают лазерным излучением постоянной частоты. Магнитное поле энергетическими уровнями в парамагнитном материале до величины, соответствующей условию резонансас лазерным излучением. Для количественной корреляции вариации интенсивности лазерного излучения, проходящего через смесь, как функция напряженности магнитного поля используют стандартные процедуры детектирования. В случае окиси азота способ достаточно чувствителен, чтобы обнаруживать концентрации, значительно меньше, чем одна часть на миллион.

В заключении отметим, что механизм эффекта Фарадея, по сути дела, обусловлен обращенным эффектом Зеемана. Им же объясняется избирательное поглощение радиоволн парамагнитными телами, помещенными в магнитное поле.

Эффект Зеемана – расщепление уровней энергии и спектральных линий атома и других атомных систем в магнитном поле. Открыт в 1896 г. голландским физиком П. Зееманом при исследовании свечения паров натрия в магнитном поле. Под

действием магнитного поля уровни энергии расщепляются на зеемановские подуровни; при переходе между подуровнями уровней EI и $E_к$ вместо одной спектральной линии появляется несколько поляризованных компонент.

Может наблюдаться простой (нормальный) зеемановский эффект для одиночной спектральной линии. Величина расщепления пропорциональна напряженности магнитного поля H.

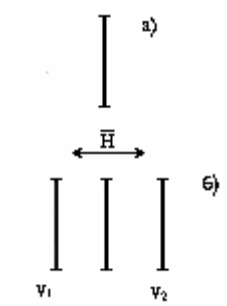


Рис. 15.3. Простой эффект Зеемана:

а) - без поля (VQ - частота, соответствующая исследуемой спектралиной линии); б) – при наличии магнитного поля

Примечание: созданы устройства для прецизионного измерения любых магнитных полей (квантовые магнетометры) [3].

15.5. Фотодихроизм

Существует ряд явлений, при которых оптическая анизотропия в среде вызывается воздействием из нее энергии светового излучения. К ним относится эффект *фотодихроизма*, а также *поляризация люминесценции*.

Дихроизм – это зависимость величины поглощения телами света от его поляризации. Это свойство, в той или иной мере присуще всем поглощающим свет веществам, обладающим анизотропной структурой. Классический пример такого веще-

ства – кристалл турмалина. Он обладает двойным лучепреломлением и, кроме того, очень сильно поглощает обыкновенный луч. Поэтому даже из тонкой пластины турмалина естественный свет выходит линейно-поляризованным. Дихроизм обнаруживает не только кристаллы но и многочисленные некристаллические тела, обладающие естественной или искусственно созданной анизотропией (молекулярные кристаллы, растянутые полимерные пленки, жидкости, ориентированные в потоке и т.д.).

Эффект фотодихроизма состоит в возникновении дихроизма в изотропной среде под действием на эту среду поляризованного света. Свет вызывает фотохимические превращения молекул вещества, изменяя коэффициент их поглощения. Поляризованный свет преимущественно взаимодействует с молекулами определенной ориентации, что и приводит к появлению анизотропии поглощения.

Естественная оптическая активность. Кроме сред с линейным дихроизмом (т.е. с различным поглощением света, обладающего различной линейной поляризацией) существуют среды, обладающие циркулярным дихроизмом, по разному поглощающие правоциркулярно- и левоциркулярно-поляризованный свет. Циркулярным дихроизмом, как правило, обладают вещества с *естественной оптической активностью*. Естественной оптической активностью называют способность вещества поворачивать плоскость поляризации прошедшего через него света. Величина угла поворота зависит от длины волны света, т.е. имеет место вращательная дисперсия. Кроме того, этот угол пропорционален толщине слоя вещества, а для растворов и концентрации.

Явление естественной оптической активности используется при определении концентраций различных растворов сахарометрии.

Естественная оптическая активность объясняется явлением двойного цирулирного лучепреломления, т.е. расщеплением

света на две циркулярно-поляризованные компоненты – левую и правую (следует отметить, что эффект Фарадея объясняется возникновением циркулярного преломления в магнитном поле). Направление вращения плоскости поляризации при естественной оптич. (левостороннее или правостороннее) зависят от природы вещества. Это связано с существованием веществ в двух зеркальных формах-левой и правой (свойство ассиметрии).

15.6. Поляризация при рассеивании света

Рассеянный на неоднородных средах естественный свет в некоторых направлениях является линейно-поляризованным и, наоборот, линейно-поляризованный свет в некоторых направлениях не рассеивается). В основе этого явления (как и при поляризации света, отраженного под углом Брюстера) лежит природа самой электромагнитной поперечной световой волны, а вовсе не анизотропия и ориентация молекул, что лишь препятствует полной поляризации рассеивания света.

Поляризация при рассеивании – единственный метод поляризации рентгеновского излучения.

16. ЭФФЕКТЫ НЕЛИНЕЙНОЙ ОПТИКИ

До сих пор мы рассматривали оптические явления в предположении, что интенсивность световой волны никак не влияет на физику явления. Так оно и было до тех пор, пока в оптике оперировали со световыми волнами, напряженность электрического поля которых была пренебрежительно мала по сравнению с внутренним электрическим полем (10^9 В/см), определяющим силы связи оптического электрона с ядром атома. Однако, с появлением лазеров, опыта со световыми пучками, интенсивность которых достигает электрическое поле световой волны соизмерно с внутриатомным показали, что существует сильная зависимость характера оптических эффектов при достижении некоторых пороговых знаний интенсивности.

Оптические эффекты, характер которых зависит от интенсивности излучения называют нелинейными. Далее мы приведем некоторые из них.

Вынужденное рассеяние света. Случайные изменения плотности среды, обусловленные тепловыми движениями молекул (тепловые акустические волны), рассеивают световую волну и модулируют ее по частоте, при этом возникают сателлиты с частотами, равными сумме и разности частот световой волны и тепловых акустических колебаний (*спонтанное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна*). Однако отношение интенсивности сателлитов интенсивности падающего излучения составляет лишь 10^{-6}.

При увеличении интенсивности падающего излучения выше порогового значения происходит следующее. Под действием электрического тока из-за явления электрострикции возникают импульсы избыточного давления, достигающие в поле лазерного луча дес. тыс. атмосфер. Возникает акустическая волна давления (гипарзвук, 10^{10} Гц), изменяющая показатель преломления по закону бегущей волны. Эти изменения показателя преломления образуют в среде как бы дифракционную

решетку, на которой и происходит рассеяние световой волны. При этом интенсивность сателлитов становится сравнимой с интенсивностью падающей волны, а количество их возрастает. Описанный эффект называется *вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна*.

При достаточно больших интенсивностях падающего излучения нелинейная среда стать может генератором звука со световой накачкой. С помощью лазеров удается возбуждать мощные (до 10 квт) гиперзвуковые колебания во многих жидкостях и твердых телах.

Рассеяние Мандельштама-Бриллюэна – рассеяние оптического излучения конденсированными средами (твердыми телами и жидкостями) в результате его взаимодействия с собственными упругими колебаниями этих сред. Рассеяние сопровождается изменением частот (длин волн), характеризующих излучение. Например, рассеяние монохроматического света в кристаллах приводит к появлению шести частотных компонент, в жидкостях - трех (одна из них - неизменной частоты). Сравнительно сильное взаимодействие между частицами конденсированных сред приводит к распространению по всевозможным направлениям в среде упругих волн различных частот. Наложение таких волн друг на друга появление флюктуации плотности сред, на которых и рассеивается свет. При указанном рассеянии световые волны взаимодействуют не только с флюктуациями плотности, но и непосредственно с упругими волнами (стоячими волнами).

После создания лазеров появилась возможность наблюдать вынужденно Мандельштама-Бриллюэна рассеяние, сопровождающееся появлением иного сильного гиперзвука.

Применение: в генераторах мощных гиперзвуковых волн в кристаллах [3].

Свой нелинейный аналог и комбинационное рассеяние. При вынужденном комбинационном рассеянии мощное световое излучение возбуждает в среде когерентные колебания мо-

лекул, на которых и происходит его рассеяние с образованием суммарных и разностных сателлитов. Частота наиболее мощного из них меньше частоты падающего света на частоту молекулярных колебаний.

Так, при рассеянии красного излучения лазеров в камере со сжатым водородом, когда интенсивность достигает пороговой величины около 10^8 Вт/см^2, число компонентов рассеянном излучении настолько возрастает и их интенсивность настолько высока, что, луч, выходящий из газа, из красного становится белым. Аналогичен опыт по ВКР в жидкостях, например, в нитробензоле. Особенность здесь в том, что рассеянные компоненты с различной длиной волны пространственно разделены и образуют на экране цветные кольца.

Вынужденное рассеяние (ВКР и ВРМБ) применяется, в основном, для исследования структуры и свойств вещества, для изучения нелинейных процессов в средах. Используется также для накачки полупроводниковых ОКР, для управления параметрами твердотельных ОКГ. Может использоваться для создания преобразователей частоты мощного когерентного света в ультрафиолетовой, видимой и особенно инфракрасной областях спектра.

Генерация оптических гармоник. При рассеянии интенсивного лазерного излучения в жидкостях и кристаллах, помимо описанных выше боковых спектральных компонент, обнаруживаются компоненты с частотами, в точности кратными частоте падающего излучения (двукратными, трехкратными и т.д.), называемые *оптическими гармониками*. В некоторых кристаллах эти гармоники могут составлять до 50% рассеянного излучения. Таким образом, если направить красное излучение рубинового лазера (0,69 мкм) на кристалл дигидросфата калия, то на выходе можно получить невидимое ультрафиолетовое излучение (0,345 мкм).

Параметрическая генерация света. Поместим нелинейный кристалл в оптический резонатор и направим на него

мощное световое излучение накачки. Одновременно подадим на кристалл два слабых излучения с частотами, сумма которых равна частоте излучения накачки. При этом в кристалле возникает генерация двух мощных когерентных световых волн, частота которых равна частотам этих двух слабых излучений. В действительности же, кроме волны накачки, нет необходимости ни в каких дополнительных излучениях, т.к. в кристалле всегда найдутся два спонтанно излучающих фотона с соответствующими частотами. Существенным является то, что при повороте кристалла в резонаторе, частоты генерируемых волн могут плавно перестраиваться, в сумме оставаясь равными частоте волны накачки. Это позволяет создавать оптические преобразователи, квантовые усилители и генераторы, плавно перекрывающие широкий диапазон излучений от видимого до далекого инфракрасного при фиксированной частоте накачки.

Эффект насыщения. Так называют эффект уменьшения интенсивности спектральной линии поглощения (или вынужденного излучения) при увеличении мощности падающего на вещество внешнего электромагнитного излучения. Причиной эффекта насыщения является выравнивание населенности двух уровней энергии, между которыми под действием излучения происходят вынужденные квантовые переходы "вверх" (поглощение) и "вниз" (вынужденное излучение). В случае поглощения при этом уменьшается доля мощности излучения, поглощенного веществом. Абсолютная величина поглощаемой мощности при этом, однако не падает, а увеличивается, стремясь к некоторому пределу. В случае активного вещества с инверсией населенностей эффект насыщения приводит к уменьшению мощности вынужденного излучения, что ставит предел величине усиления в квантовых усилителях.

Однако эффекту нашли широкое применение в лазерной технике, где он используется для модуляции добротности оптических резонаторов с помощью просветляющихся под действием мощного излучения светофильтров. Кроме того, эффект

насыщения используется для создания инверсии населенностей в трехуровневых квантовых системах.

Многофотонное поглощение. Если эффект насыщения делает среду, непрозрачную для слабого светового поля, прозрачной для сильного, то для оптически прозрачных сред может иметь место обратная ситуация. Здесь интенсивное излучение может поглощаться гораздо сильнее, чем слабое. Некая аналогия фотохромному эффекту, однако механизм совершенно иной. Он состоит в том, что при больших плотностях излучения и элементарном акте взаимодействия света с веществом могут одновременно поглощаться два или несколько фотонов, сумма энергий которых равна энергии перехода.

Эффект многофотонного поглощения используется, в основном, в так называемой многофотонной спектроскопии, дающей дополнительную информацию о строении вещества, недоступную для обычной спектроскопии.

Многофотонный фотоэффект. Эффект состоит в том, что при высокой интенсивности светового поля ионизация атомов может производить под воздействием излучения, для которого энергия кванта меньше энергии ионизации. Это объясняется тем, что происходит одновременное поглощение нескольких фотонов, сумма энергий которых больше энергии ионизации атомов. Здесь просматривается некая аналогия с антистоксовской люминесценцией. Следует отметить, что, например, для двухфотонного фотоэффекта величина тока в фотоэлементе пропорциональна квадрату мощности лазерного излучения.

Эффект самофокусировки. Известно, что первоначально параллельный пучок света по мере распространения в среде (включая и вакуум) расплывается за счет дифракционных явлений. Это справедливо при малых интенсивностях света, пока еще среда остается линейной. с увеличением мощности светового пучка его расходимость начинает уменьшаться. При некоторой критической мощности пучок может распространяться,

вообще не испытывая расходимости (режим самоканализации), а при мощности, превышающей критическую, пучок скачком сжимается к оси и сходится в точку на некотором расстоянии от места входа в среду, ставшую теперь нелинейной. Происходит процесс *самофокусировки*. Это расстояние, называемое эффективной длиной самофокусировки, обратно пропорционально квадратному корню из интенсивности пучка. Оно также зависит от его диаметра и оптических свойств среды. Открытие эффекта самофокусировки принадлежит Г.А. Аскорьяну.

Физические причины этого эффекта заключаются в изменении показателя преломления среды в сильном световом поле. В это изменение вносит свой вклад также эффекты, как электрострикция, высокочастотный эффект Керра и изменение преломления среды за счет ее нагрева в световом пучке. Вследствие этих эффектов, среда в зоне пучка становится оптически неоднородной; показатель преломления среды определяется теперь распределением интенсивности световой волны. Это приводит к явлению нелинейной рефракции, т.е. периферийные лучи пучка отклоняются к его оси, в зону с большей оптической плотностью. Таким образом, нелинейная рефракция начинает конкурировать с дифракционной расходимостью. При взаимной компенсации этих процессов и наступает самоканализация, переходящая в самофокусировку при превышении критической мощности пучка. Процесс самофокусировки выделяется среди прочих нелинейных эффектов тем, что он обладает "лавинным" характером. Действительно, даже малое увеличение интенсивности в некотором участке светового пучка приводит к концентрации лучей в этой области, а следовательно и к дополнительному возрастанию интенсивности, что усиливает нелинейную рефракцию и т.д.

Отметим, что критические мощности самофокусировки относительно не велики (для нитробензола – 25 квт, для некоторых сортов оптического стекла – 1 вт), что создает реальные предпосылки использования описанного эффекта для передачи энергии на значительные расстояния.

Интересно, что при самофокусировке излучение импульсных лазеров в органических жидкостях пучок после "охлопывания" распространяется не в виде одного пучка, а распадается на множество короткоживущих (10^{-10} сек.) узких (мкм) областей очень сильного светового поля (около 10^7 в/см) – световых нитей. Это явление объясняют тем, что при самофокусировке лазерных импульсов нелинейная среда работает как линза с изменяющимися во времени фокусными расстояниями, и быстрое движение фокусов (скорости порядка 10^6 м/сек.) в сочетании с аберрациями "нелинейной линзы" может создать длинные и тонкие световые каналы.

В нелинейной оптике уже обнаружено множество интереснейших эффектов. Кроме описанных выше, к ним относятся такие эффекты как *оптическое детектирование*, *гетеродинирование света*, пробой газов мощным излучением с образованием т.н. "лазерной искры", *светогидравлический удар*, нелинейное отражение света и другие. Некоторые из эффектов уже нашли применение не только в научных исследованиях, но и в промышленности. Так например, светогидравлический удар применяется при штамповке, упрочнения материалов, для ударной сварки и т.д., что наиболее себя оправдывает в производстве микроэлектроники, в условиях особо чистых поверхностей.

Светогидравлический удар. Эффект заключается в том, что при пропускании мощного лазерного излучения через жидкость в ней возникают акустические волны с высоким давлением, достигающим миллиона атмосфер, сопровождающиеся вспышкой белого света и выбросом жидкости на значительные расстояния, при этом тела, помещенные вблизи удара, подвергались сильным деформациям и разрушению. Точной теории эффекта еще нет, однако уже ясно, что это целый комплекс явлений. Здесь и самофокусировка, увеличивающая интенсивность световой волны в малом объеме, и первоначальное ее поглощение, связанное с ВРМБ (см. 16) и усиленное поглощение света образующейся плазмой, что приводит к возникновению ударной волны и затем к авитации в жидкости. Предварительная фокусировка лазерного

пучка и введение в жидкость поглощающих добавок значительно усиливают проявления эффекта.

Нелинейная оптика – новая и постоянно развивающаяся наука. Многообразие ее эффектов далеко не исчерпано известными ныне. Так, совсем недавно были предсказания теоретически гистерезисные скачки отражения и преломления на границе нелинейной среды – целый класс новых эффектов нелинейной оптики. (Данных об экспериментальном подтверждении их существования пока нет.)

Суть эффектов заключается в следующем. Если под небольшим углом скольжения на границу раздела двух сред с близкими значениями диэлектрической проницаемости, одна из которых нелинейна, падает пучок мощного светового излучения, то при изменении интенсивности излучения (угол падения фиксирования), когда она достигает определенного значения, может произойти скачок от прохождения к полному внутреннему отражению, при обратном изменении интенсивности скачок от ПВО к прохождению произойдет уже при другом ее значении. Такие же скачки могут наблюдаться и при изменении угла падения, когда фиксировано значение интенсивности.

Если существование этих эффектов подтвердится, то они могут быть широко использованы для исследования нелинейных свойств вещества и в лазерной технике. Так, например, гистерезисная оптическая ячейка может служить идеальным затвором в лазере при генерации гигантских импульсов, т.к. в режиме ПВО практически не поглощает энергии; с помощью гистерезисных эффектов можно будет с большой точностью измерять интенсивность излучения, фиксируя скачки и т.д.

Эффект Просветления – уменьшение скорости резонансного поглощения при увеличении интенсивности подающего на среду электромагнитного излучения. Величина поглощения определяется в этом случае скоростью процессов релаксации, то есть скоростью с которой возбужденный атом может передавать энергию возбуждения окружающей среде. Так как скорость релаксации определяется свойствами среды, то с увеличением интенсивности излучения доля поглощаемой в среде энергии уменьшается.

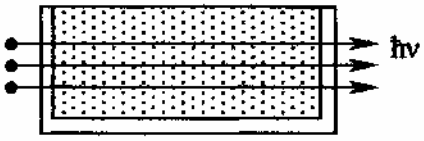


Рис. 17.1. Просветляющий фильтр

Применение: в квантовой электронике, где используется для модуляции добротности лазеров

17.1. Радиоактивность

Под *радиоактивностью* обычно понимают самопроизвольное превращение неустойчивых изотопов одного вещества в изотопы другого; при этом происходит испускание элементарных частиц и жесткого электромагнитного излучения. Различают *естественную* и *искусственную* радиоактивность. Процессы, происходящие при естественной радиоактивности позволяют судить о структуре и свойствах радиоактивных веществ. В настоящее время все большее значение получают процессы, связанные с искусственной радиоактивностью. Практически все вещества имеют радиоактивные изотопы, по-

этому, не изменяя химического строения вещества можно его пометить, сделав часть ядер радиоактивными. Это позволяет с большей точностью следить за перемещением этого вещества или изучать его внутреннюю структуру.

Пример применения:

- способ ускоренного определения годности защитно-моющих и лекарственных веществ наружного применения, при котором на кожу наносят слой исследуемого вещества, отличающийся тем, что с целью определения времени проникновения вещества сквозь кожу и времени выполнения им барьерных функций, в исследуемое вещество предварительно вводят радиоизотопы, например, йода, фосфора или серы, и проводят радиометрические измерения исследуемого объекта.

17.2. Рентгеновское и гамма-излучения

Рентгеновское излучение, открыто в 1895 году физиком Рентгеном, имеет ту же электромагнитную природу, что *гамма излучение* испускаемые ядрами атомов радиоактивных элементов, поэтому оба вида изучения подчиняются одинаковым закономерностям при взаимодействии с веществом. Принципиальная разница между двумя этими видами излучения заключения в механизме их возникновения. Рентгеновское излучение – внеядерного происхождения, гамма излучение – продукт распада ядер.

Рентгеновское излучение возникает либо при торможении заряженных частиц (электронов) высокой энергии в веществе (*сплошной спектр*) (см. 17.3. "Тормозное излучение"), либо при высоко-энергетических переходах внутри атома (*линейчатый спектр*). Недавно установлено, что рентгеновское излучение может также возникать в результате явления адгезолюминесценции, которая наблюдается при очень быстром отрыве от гладкой поверхности липкой ленты. Такой быстрый отрыв может происходить, например, при быстром качении по металлической поверхности цилиндра, покрытого липкой лентой. В

этом случае пленка и металлическая поверхность образуют как бы обкладки микроскопического конденсатора, напряженность поля в котором может достигать сотни тысяч электрон вольт. Электроны, разогнанные в подобном миниконденсаторе, тормозятся, испуская при этом рентгеновское излучение.

Рентгеновские лучи применяют для просвещения различных веществ с целью выявления скрытых эффектов. При деформации неподвижного микрокристалла, на рентгенограммах наблюдается размытие в определенных направлениях интерференционных пятен (явление *астеризма*). Появление астеризма объясняется тем, что монокристалл в процессе деформации разбивается на отдельные участки (фрагменты) размером 1 .. 0,1 мкм. С увеличением деформации монокристалла интерференционные пятна удлиняются. По направлению и степени растяжения пятна можно судить о количестве размере и форме фрагмента и исследовать характер протекания деформации.

Из других областей применения рентгеновских лучей можно назвать:

- *рентгеновскую дефектоскопию*; занимающуюся просвечиванием твердых тел с целью установления размера и места нахождения дефекта внутри материала;

- *рентгеновскую спектроскопию*, *рентгеноспектральный анализ*. Основная цель – исследование электронного строения веществ по их рентгеновским спектрам. Области применения - исследования химического строения веществ, технологические процессы горнорудной и металлургической промышленности – рентгеновскую микроскопию широко применяют для исследования объектов непрозрачных для видимого света и электронов (биология, медицина, минералогия, химия, металлургия).

Пример применения:

- способ измерения моментов инерции неоднородных, несвободных тел, заключающийся в поступательном перемещении исследуемого тела относительно пространственной оси,

отличающийся тем, что с целью устранения влияния напряжения мускулатуры исследуемого, поперек оси перемещения исследуемого передвигают источник гамма излучения с детектором, регистрирующим интенсивность прошедшего через равные участки тела гамма излучения.

Взаимодействие рентгеновского и гамма излучения с веществом происходят посредством трех основных процессов: *фотоэлектрического поглощения* (*фотоэффекта*), *рассеяния* и *эффекта образования пар*.

Фотоэффект. При фотоэффекте рентгеновский или гамма-квант передает всю энергию электрону атома. При этом, если электрон получает энергию, большую, чем энергия связи его в атоме, то он вылетает из атома. Этот электрон называется *фотоэлектроном*. При потере атомами фотоэлектронов освободившиеся места в электронных оболочках в дальнейшем заполняются электронами с внешних оболочек. Переход электронов на более близкую к ядру оболочку сопровождается испусканием кванта характеристического излучения, которое можно зарегистрировать, например, фотоэмульсией.

При малых энергиях квантов (Е 0,5 МэВ) фотоэлектроны вылетают преимущественно в направлениях, перпендикулярных направлению распространения излучения. Чем выше энергия квантов, тем ближе к их первоначальному направлению движение выбрасываемых фотоэлектронов. Процесс образования фотоэлектронов приводит к ионизации облучаемого вещества, что находит большее применение для интенсификации различных технологических процессов.

Рассеяние рентгеновского и гамма излучения. Различают два основных процесса рассеяния: *комптоновское* или *некогерентное* (*эффект Комптона*) и *когерентное* рассеяние.

При эффекте Комптона происходит упругое соударение первичного кванта со свободным электроном вещества. Комптоновское рассеяние представляет собой взаимодействие кванта с электроном, при котором, в отличии от фотоэффекта,

квант передает электрону не всю энергию, а только ее часть, отклоняясь при этом от своего первоначального направления в некоторый угол а электрон, получивший некоторое количество энергии, начинает двигаться под углом к направлению движения рентгеновского или гамма-кванта. В результате появляется рассеянный квант большей длиной волны, изменившей первоначальное направление, и электрон отдачи (*комптоновский электрон*), получивший часть энергии кванта. Комптоновские электроны характеризуются непрерывным спектром от ничтожно малых значений до максимальной величины (если они выбрасываются в направлении движения кванта).

В случае, если энергия кванта сравнима с энергией связи электрона в атоме, происходит когерентное рассеяние квантов. При этом, когда электромагнитная волна встречается с электроном, последний начинает колебаться с частотой этой волны и излучает: энергию в виде рассеянной волны. Энергия кванта при этом не изменяется. Движение электронов в атоме взаимосвязано, поэтому излучение, рассеянное одним электроном, будет интерферировать с излучением, рассеянным другими электронами этого же атома. Рассеянные гамма кванты несут информацию о структуре облучаемого вещества, поэтому рассеянное излучение можно использовать для различных измерительных целей.

Пример применения:

- способ определения угла смачивания и поверхностного или межфазового натяжения непрозрачных систем при высоких температурах фотографирование контура, которое осуществляется в пучках мягких гамма лучей полученных от радиоактивных изотопов, например иридия-192, тулия-170 или европия-154 или европия-156.

Эффект Комптона – упругое рассеивание электромагнитного излучения на свободных (или слабо связанных) электронах, сопровождается увеличением длины волны; наблюдается при рассеянии излучения малых длин волн - рентгенов-

ского и γ – излучений. Электрон поглощает (в точке 1, рис. 17.2) падающий на него фотон γ и переходит из начального в промежуточное состояние e*, после чего виртуальный электрон испускает (в точке 2) новый, конечный фотон γ' а сам переходит в конечное состояние e'.

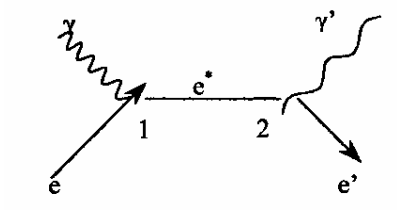


Рис. 17.2. Эффект Комптона

Интенсивность комптоновского рассеивания зависит как от угла рассеяния, так и от длины волны падающего излучения. В угловом распределении рассеянных фотонов есть асимметрия: большая часть электронов рассеиваются по направлению вперед, причем эта асимметрия увеличивается с ростом δ_γ. Полная интенсивность комптоновского рассеивания падает с ростом E_γ.

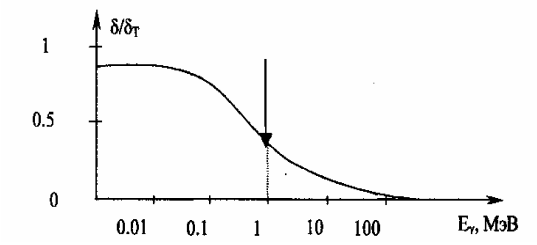


Рис. 17.3. График зависимости полного сечения эффекта комптона (полной интенсивности) от энергии фотона E_γ; стрелка указывает энергию, при которой начинается рождение электрон-позитронных пар

Применение: в гамма-спектрометрах и др. [3].

Эффект образования пар. При взаимодействии с атомами ядра кванты рентгеновского и гамма излучения достаточно высокой энергии (не менее 1,02 МэВ) вызывают одновременное появление электронов и позитронов. Процесс образования электронно-позитронных пар происходит в поле атомного ядра или поле электрона. Позитрон существует лишь очень короткий промежуток времени; вслед за образованием пары наблюдается явление *аннигиляции* – исчезновение позитрона и какого либо электрона среды, сопровождаемое излучением двух квантов с энергией 0,51 МэВ.

17.3. Взаимодействие частиц с веществом

Взаимодействие электронов с веществом. Различают следующие виды взаимодействия: *упругое* и *неупругое* рассеяние электронов на атомных ядрах и электронных оболочек и торможение электронов в кулоновском поле атомных ядер.

Упругое рассеяние имеет место при таких столкновениях, при которых происходят лишь изменения направления движения сталкивающихся частиц, тогда как их общая энергия остается неизменной. Основную роль в рассеянии электронов играет упругое рассеяние на атомных ядрах, хотя электроны рассеиваются и на электронах атомных оболочек. Вследствие малой массы электронов они отклоняются на углы от 0° до 180°, причем на малые углы электроны отклоняются с большей вероятностью. При отклонении на большие углы электроны несут информацию о строении вещества рассеивателя, что может быть использовано в различных измерительных приборах.

Пример применения:

- портативное устройство для измерения обратно рассеянного бета-излучения предназначено для эффективных измерений толщины покрытия обрабатываемой детали. Устройство содержит зажим для монтажа постоянного зондирующего эле-

мента. Этот зажим является составной частью устройств, регулирующих положение зондирующего элемента относительно обрабатываемой детали с тем, чтобы они контактировали друг с другом. В другом варианте выполнения изобретения, устройство содержит укосину, которая фиксирована относительно обрабатывающей детали. Зажим у укосина предназначен для удержания зондирующего элемента в плотном контакте с поверхностью обрабатываемой детали, т.е. в положении измерения толщины покрытия нанесенного на поверхность обрабатываемой детали.

Неупругое рассеяние электронов происходит в основном в результате их сталкивания с орбитальными электронами. При столкновении электронов с электронами атомных оболочек часть энергии электронов передается связанному электрону атома. В зависимости от количества переданной энергии происходит возбуждение или ионизация атомов вещества. В этом и другом случае воздействующий электрон теряет свою энергию. Большая часть вторичных электронов обладает незначительно кинетической энергией. Процесс возбуждения сопровождается испусканием характеристического излучения. Процесс неупругого рассеяния, поскольку он сопровождается ионизацией может использоваться для интенсификации различных технологических процессов:

Пример применения:

- устройство для измерения концентрации кислорода в выхлопных газах двигателей внутреннего сгорания, содержит источник бетта-электронов, обладающих низким уровнем энергии для ионизации молекул кислорода. Указанный источник расположен во вторичном контуре выхлопной трубы. В этот контур выхлопной газ подается с определенной скоростью при помощи насоса постоянной производительности. На выходе источника бетта-электронов в ниспадающей части потока газов установлена коллекторная пластина. При этом между источником бетта-электронов и коллекторной пластинкой под-

держивается определенная разность потенциалов, под действием которой ионизированные молекулы кислорода отделяются от молекул других газов и ударяются о коллекторную пластину. Концентрация кислорода выхлопных газов определяется путем измерения заряда, накапливающегося на коллекторной пластинке.

Тормозное излучение. Помимо потерь на ионизацию и возбуждение атомов вещества, электроны могут терять свою энергию на образование тормозного излучения. Проходя вблизи атомного ядра, под действием его электрического поля электроны испытывают торможение. Поэтому в соответствии с законом сохранения энергии они будут испускать электромагнитное (тормозное) излучение. В тормозное излучение может преобразоваться любая часть кинетической энергии электрона вплоть до ее максимального значения. Поэтому энергетический спектр тормозного излучения непрерывный. Примером тормозного излучения является рентгеновское излучение возникающее при торможении электронов на аноде рентгеновской трубки. Это используется в рентгеновских аппаратах.

Совместные действия облучения электронами и светом. Особенность эффекта состоит в том, что вещество не поглощает свет до облучения электронами, но в процессе облучения или после него свет поглощается короткоживущими частицами: радикалами, возбужденными молекулами, возбуждение или диссоциация которых приводит к химическим превращениям. Например, вещества: твердые растворы бензола и нафталина в метилцинклогекоане и этаноле.

Взаимодействие нейтронов с веществом. Нейтрон представляет собой электрически нейтральную частицу с массой покоя, равной приблизительно массе покоя протона, вместе с которым они образуют ядра всех элементов. Поскольку нейтрон электрически нейтрален, он может вызывать различные ядерные реакции, в частности цепные реакции деления тяжелых ядер (теория, урана, плутония), осуществляемые в ядер-

ных реакторах. По кинетической энергии нейтроны делятся на *быстрые*, *промежуточные* и *тепловые*. В зависимости от этой энергии нейтроны по разному взаимодействуют с веществом. Тепловые нейтроны взаимодействуют практически со всеми ядрами элементов, а в тяжелых вызывают реакцию деления. Промежуточные также поглощаются ядрами, но при некоторых значениях энергии нейтроны хуже поглощаются ядрами, а гораздо лучше неупруго рассеиваются (замедляются), теряя при этом кинетическую энергию. Особенно интенсивно быстрые нейтроны рассеиваются на водосодержащих веществах (замедлителях), что используется для замедления быстрых нейтронов до тепловых энергий в тепловых реакторах.

Примеры применения:

- контрольно измерительный прибор для определения весового содержания влаги в насыпном материале, содержит источник излучения, облучающий влажный насыпной материал быстрыми нейтронами и гамма-лучами; прошедшее излучение регистрируют двумя детекторами, причем первый регистрирует гамма-излучение, а второй тепловые нейтроны, возникающие при замедлении быстрых нейтронов на ядрах водорода, содержащихся во влаге насыпного материала; оба сигнала от детектора поступают на электрическую схему, с целью получения сигнала, скоррелированного с весовым процентным содержанием влаги в материале;

- способ нейтронного каротажа скважин для измерения количества нефти в зоне скважин, пробуренной в земной породе, с использованием радиоактивного излучения, согласно которому измеряется поперечное сечение захвата тепловых нейтронов в буровом растворе. Величина этого сечения определяется содержанием воды в этой геологической формации, а количество нефти, содержащееся в зоне скважин, измеряется как функция макроскопического поперечного захвата тепловых нейтронов в породе;

- способ определения содержания остаточных масел в формации после подачи воды или заводнения нейтеносоного пласта состоит в измерении распада тепловых нейтронов сначала при наличии воды, содержащейся в данной формации, а затем после замены этой воды водой, которая имеет существенно отличающееся сечение захвата и которая берется из зоны, содержащей по крайней мере, в радиусе действия регистрирующего инструмента.

При очень интенсивном облучении быстрыми нейтронами различных веществ наблюдается так называемые явления *нейтронного распухания* – увеличение объема вещества, что может быть использовано, например, для правки массивных металлических деталей или в устройствах для измерения деформации ядерного. *Взаимодействие альфа-частиц с веществом*. Альфа-частицы (ядра гелия-4) состоят из двух протонов и двух нейтронов. Поскольку альфа-частицы заряжены, то их очень просто ускорять и облучать этим потоком различные вещества, которые при этом сильно ионизируются. Ионизированные атомы через какой-то промежуток времени захватывают свободные электроны и превращаются в нейтральные, излучая при этом характеристическое излучение, по которому можно судить о составе исследуемого вещества.

Эффект увеличения коррозийной стойкости металлов. Если металлическую пластину облучать в течении нескольких минут альфа-частицами, то в силу короткого пробега частицу в веществе основная масса частиц останется в тонком поверхностном слое отдав при этом ему всю кинетическую энергию. Экспериментально установлено, что если после такого облучения пластину выдержать в атмосфере паров концентрированной соляной и серной кислот, то поверхность металла сохраняет первоначальную структуру и блеск. Этот эффект можно объяснить так же, как и в случае *сверхнизкого трения* (см. раздел 1.3) перестройкой структуры поверхностного слоя и удалением паров воды.

Радиотермолюминесценция. Если какое-либо твердое вещество при низкой температуре подвергнуть воздействию электронов рентгеновских или гамма-лучей, то при нагреве, даже самом незначительном, вещество начинает светиться. Причем, при плавном нагревании твердых органических веществ температура, при которой наблюдается наибольшая термолюминесцеция, совпадает с температурой структурных переходов (плавления, размягчения и т.д.). Это явление позволило создать новый эффективный метод исследования вещества.

В общих чертах метод радиотермолюминесценции или сокращенно РТД, заключается в следующем: образец исследуемого органического вещества облучают при низкой температуре (77-100 °К) в полной темноте. Пригодны любые источники ионизирующего излучения: нейтронные, гамма, бетта-источники, ускорители заряженных частиц рентгеновские установки. Мощность дозы не играет существенной роли. Важно только, чтобы полная так называемая экспозиционная доза достигала 0,1-2 Мрад. Такие дозы, как правило, не изменяют температуры структурного перехода. Затем образец плавно нагревают 10-20 °С в минуту. Свечение образца регистрируют с одновременной регистрацией температуры. Получают зависимость интенсивности РТЛ от температуры – кривую высвечивания. Пики, изломы кривой, их высота и ширина несут информацию об исследуемом веществе и прежде всего, позволяют оценить температуру структурных переходов. Абсолютная точность определения достигает около 1 градуса.

Эффект Мессбауэра. Суть эффекта состоит в упругом испускании или поглощении гамма-квантов атомными ядрами связанными в твердом теле. Причина "упругости" процесса (при упругом процессе внутренняя энергия тела не изменяется, т.е. атом остается в том же состоянии), в том, что если атом поглотитель (или излучатель входит в состав кристаллической решетки, то перестает выполняться однозначное соответствие

между импульсом гамма-кванта и энергии отдачи атома. При Мессбауэровском процессе отдача атома вообще не имеет место (не происходит возбуждение фонона), и импульс гамма-кванта воспринимается всей решеткой, т.е. всем кристаллом. Благодаря этому ширина Мессбауэровских линий поглощение и испускания очень мала (весьма острая резонансная кривая); соответственно сдвиг линий очень чувствителен к параметрам, как самого излучения, так и твердого тела. В настоящее время на основе этого эффекта проведена масса очень тонких физических экспериментов, весьма важных, в частности, для физики и химии твердого тела. Малая ширина линий поглощения и следовательно, почти фантастическая точность измерений с помощью эффекта Мессбаэура позволило разработать ряд методов для технического экспресс анализа веществ, содержащих Мессбауэровские ядра.

Примеры применения:

- способ фазового анализа руд, содержащих Мессбауэровские элементы спектр которых частично перекрываются, основанные на резонансном гамма-поглощении, отличающийся тем, что с целью повышения эффективности измерений при анализе, последовательно определяют величину эффекта Мессбауэра на исследуемой руде с разными источниками, число которых равно числу соединений в ряде и мессбауэроские спектры которых совпадают со спектрами соединений в руде, сопоставляют с результатами калибровки и по совокупности величин эффекта Мессбауэра определяют содержание исследуемых соединений в руде;

- способ фазового анализа вещества, включающий измерение эффекта Мессбауэра по линии спектра, соответствующей исследуемой фазе и последующее определение содержания фазы с помощью градировочной зависимости, отличающийся тем, что с целью повышения точности и чувствительности анализа, измеряют эффект Мессбауэра на исследуемой линии в присутствии фильтра полного резонансного поглощения

со спектром, не перекрывающимся с линией определяемой фазы, и эффект Мессбауэра на линии спектра упомянутого фильтра в присутствии исследуемого образца и по отношению измеренных эффектов определяют содержание исследуемой фазы.

Применение эффекта Мессбауэра для контроля железной руды при ее магнитном обогащении и использованием в качестве источника гамма-излучения кобальта-57 позволяет быстро и надежно определять содержание железа в рудном порошке, что способствует повышению качества железного концентрата.

Эффект Мессбауэра – испускание или поглощение γ-квантов атомными ядрами, связанными в твердом теле, не сопровождающее изменением внутренней энергии тела, то есть испусканием или поглощением фононов. Открыт немецким физиком Р. Мессбауэтом в 1958 г. Обычно для наблюдения эффект Мессбауэра необходимо охлаждать источник и поглотить γ - квантов до температуры жидкого азота или гелия. Вероятность эффекта возрастает при понижении температуры.

Применение: мессбауэрская спектроскопия, исследование электронных состояний примесных атомов в металлах и полупроводниках. Эффект применяется в биологии (исследование электронной структуры гемоглобина), геологии (разведка и анализ руд), в целях химического анализа, для измерения скоростей и вибраций.

17.4. Электронный парамагнитный резонанс

Установлено неизвестное ранее явление квантовых переходов между электронными энергетическими линиями парамагнитных тел под влиянием переменного магнитного поля резонансной частоты (явление электронного парамагнитного резонанса - ЭПР). Суть явления: постоянно в магнитном поле электронные уровни энергии парамагнитных атомов расцепляются на несколько подуровней; энергетическая разность по-

дуровней определяется величиной поля и свойствами вещества; соответствующие квантовые переходы между этими подуровнями инициируются в переменном (высокочастотном) магнитном поле.

Открытие ЭПР послужило толчком для развития резонансных методов изучения вещества, в частности акустического парамагнитного резонанса ферро и антиферромагнитного резонанса магнитного резонанса.

При явлении *акустического парамагнитного резонанса* переходы между подуровнями инициируются наложением высокочастотных звуковых колебаний; в результате возникает резонансное поглощение звука.

При *ферромагнитном резонансе* происходит избирательное поглощение энергии электромагнитного поля: Эта энергия расходуется на возбуждение коллективных колебаний магнитоупорядоченной структуре ферромагнетика (или антиферромагнетика).

Применение метода ЭПР дало ценные данные о строении стекол, кристаллов растворов; в химии этот метод позволил установить строение большого числа соединений изучить цепные реакции и выяснить роль свободных радикалов (молекул), обладающих свободной валентностью в протекании химических реакций. Тщательное изучение радикалов привело к решению ряда вопросов молекулярной и клеточной биологии.

Метод ЭПР – очень мощный, он практически не заменим при изучении радиационных изменений в структурах, в том числе и в биологических. Чувствительность метода очень высока и составляет 10^{10} … 10^{11} парамагнитных молекул. На применении ЭПР основан поиск и проверка новых веществ для квантовых генераторов; явление ЭПР используется для генерации сверхмощных субмиллиметровых волн.

Примеры применения:

- способ текущего контроля условной вязкости гудронов и жидких битумов, отличающийся тем, что с целью непрерыв-

ности определения пропускают контролируемую струю по трубопроводу через резонатор спектрометра ЭПР и регистрируют условную вязкость по амплитуде линии спектра парамагнитного поглощения;

- способ определения поля у огурцов путем исследования семян, отличающийся тем, что с целью повышения производительности труда в селекционном процессе, измеряют активный сигнал электронного парамагнитного резонанса и определяют характер люминесценции семян по величине сигнала и интенсивности свечения судят о степени выраженности и принадлежности к полу: при величине активного сигнала электронного парамагнитного резонанса 0,66-0,68 относительных единиц и слабым свечением растения будут преимущественно мужского типа, а при сигнале 0,48-0,56 относительных единиц и интенсивном свечении - женского типа;

- способ оценки стабильности пластичных смазок путем сравнения свойств исходной и проработавшей в узле трения смазки, отличающийся тем, что с целью сокращения времени проведения испытаний микроколичеств смазки, в исходную и проработавшую смазки вводят стабильный радикал, снимают спектр ЭПР, определяют частоты вращательной диффузии радикала и по их отношению оценивают стабильность смазки.

17.5. Ядерный магнитный резонанс

Ядерный магнитный резонанс (ЯМР). Парамагнетизм вещества может быть обусловлен не только строением электронных оболочек атомов, но и магнетизмом ядер. Магнетизм ядер, также, как и магнетизм оболочек, может вызвать резонансное поглощение энергии в твердом, жидком или газообразном состоянии. Резонансные частоты метода ЯМР лежат в области 1-100 МГц, чувствительность метода составляет от 10^{17} … 10^{21} ядер. На применении ЯМР основан принцип работы приборов для стабилизации и точнейших измерений маг-

нитных полей, а также для анализа смесей по их изотопному составу. Сильный сигнал ЯМР наблюдается в присутствии ядер изотопа углерод-13, что предопределило применение ЯМР и его разновидности – *ядерного квадрупольного резонанса* в химии углеродов, особенно природных (нефть).

Примеры применения:

- способ измерения расхода жидкостей, основанный на явлении ЯМР, отличающийся тем, что с целью измерения расхода жидкости, обладающих сильным сигналом магнитного резонанса используют свободную процессию ядер в магнитном поле земли;

- способ измерения расхода жидкости по А.с. 179511, отличающийся тем, что с целью упрощения устройства измеряют скорость затухания сигнала ЯМР при движении жидкости в неоднородном магнитном поле и по ней судят о расходе;

- способ измерения проницаемости пористых материалов, основанный на явлении ограниченной самодиффузии молекул жидкости, включающий ядерно-магнитные резонансные измерения с импульсным градиентом магнитного поля, причем интервал времени между импульсами градиента устанавливают больше, чем время, необходимое для диффузии молекул на расстояние, равное размеру пор в образце, измеряют сигнал эха образца, отличающийся тем, что с целью получения достоверного значения проницаемости увеличивают интервал времени между импульсами градиента при фиксированной их амплитуде, повторяют измерение амплитуды сигнала эха и по зависимости амплитуды эха от интервала между импульсами градиента судят о проницаемости.

Эффект Оверхаузера-Абрагама. В том случае, если в атоме имеет место и ядерный, и электронный парамагнетизм, то их взаимодействие приводит к изменению интенсивности сигнала ЯМР. При возрастании насыщения электронного парамагнитного резонанса и образце с парамагнитными ядрами наблюдается значительное увеличение интенсивности ЯМР.

Этот эффект был использован для разработки метода динамической поляризации ядер; вещество с поляризованными ядрами очень чувствительно как к величине магнитного поля, так и ее изменению. Это свойство и лежит в основе практически: применений эффекта.

Пример применения:

- магнитный градиометр, служащий для измерения разницы между магнитными полями в двух зонах, содержит два ядерных фильтра - по одному в каждой зоне. Каждый из ядерных фильтров является фильтром такого типа, в котором используется эффект Обрхаузера-Абрагама, и выдает выходной сигнал, который усиливается и подводится к одному из входов операционного усилителя. Выходной сигнал усилителя расщепляется и подводится к входной катушке двух фильтров. Фазометр измеряет разность фаз входных сигналов операционного усилителя, который может быть суммирующего или дифференциального типа, что определяется фильтром ядерного фильтра (с перекрещивающимися или параллельными катушками). Разность фаз находится в прямой зависимости от разности между полями.

Эффект Оверхаузера – резкое возрастание интенсивности ядерного магнитного резонанса (ЯМР) при насыщении уровней электронного парамагнитного резонанса в том же веществе.

Экспериментально наблюдался в 1953 г. вначале в металлах, затем в полупроводниках, свободных радикалах и жидкостях с парамагнитными примесями [3].

18. ДРУГИЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ

18.1. Стробоскопический эффект

Если быстро вращающееся тело освещать импульсами света, частота следования которых совпадает с круговой частотой вращения, то наблюдатель будет видеть тело как бы неподвижным. Это позволяет рассматривать особенности его поверхности или какие-либо ее изменения, не останавливая вращения тела.

Пример применения:

- способ определения окружных люфтов трансмиссий с ведомым и ведущими валами, заключающийся в том, что на ведомом валу наносят базовую метку и вращают его с определенной и постоянной угловой скоростью, отличающийся тем, что с целью повышения точности определения люфтов, освещают базовую метку стробоскопическими импульсами с частотой, при которой метка, кажется неподвижно изменяют синхронно скорость вращения ведущего вала и частоту импульсов и определяют угол отклонения метки от первоначального ее положения, по которому судят о люфтах трансмиссий.

Если частоты световых импульсов и вращения тела несколько отличаются, то будет наблюдаться кажущееся вращение тела, скорость которого гораздо меньше действительной скорости вращения. Сказанное справедливо и для поступательного (колебательного) движения тел.

Стробоскопический эффект лежит в основе кино. Отдельные изображения последовательных стадий движения, быстро сменяя друг друга, создают иллюзию непрерывного движения. При этом важную роль играет особенность нашего светового восприятия инерционность, глаз как бы "видит" изображение предыдущего кадра некоторое время после того, как экран погас.

Движение в кинофильме может быть ускоренным или замедленным в зависимости от соотношения частот съемки и

воспроизведения, что используется для визуализации быстро или медленно протекающих процессов.

Несмотря на свою простоту, стробоскопический метод может являться основой многих тонких исследований.

Пример применения:

- фазовый способ измерения длины волны ультразвука, основанный на использовании стробоскопического эффекта при помощи бегущих ультразвуковых волн, отличающийся тем, что с целью повышения точности, модулируют одну из бегущих ультразвуковых волн, освещаемых пучком света, по фазе, наводят последовательно ось фотоэлектрического микроскопа на максимум освещенности видимого изображения и по расстоянию между соседними максимумами судят о длине ультразвуковой волны.

В заключении отметим, что стробоскопический эффект является ярким проявлением закона согласования ритмики частей системы.

Стробоскопический эффект – зрительная иллюзия, возникающая в случаях, когда наблюдение какого-либо предмета осуществляется не непрерывно, а в течение отдельных малых, периодически следующих один за другим интервалов времени, например при периодических вспышках света в темном помещении. Стробоскопический эффект обусловлен инерцией зрения, то есть сохранение в сознании наблюдателя зрительного образ а на некоторое (малое) время после того, как вызвавшая образ картина исчезнет. Если время, разделяющее дискретные акты наблюдения, меньше времени «гашения» зрительного образа, то образы, вызванные отдельными актами, сливаются, и наблюдение субъективно ощущается как непрерывное.

Применение: в стробоскопических приборах – контрольно-измерительных устройствах для наблюдения быстрых периодических движений объектов. Они позволяют измерять частоты колебаний механических и электронных систем, резо-

нанса, числа оборотов механизма, применяют, например, как индикатор угловой скорости [3].

18.2. Муаровый эффект

При наложении двух систем контрастных полос возникает узор, образованный их сгущениями в местах, где полосы одной системы попадают в промежутки между полосами другой системы. Возникновения таких узоров называют *муаровым эффектом*.

Простейший муаровый узор возникает при пересечении под небольшим углом двух систем равноудаленных параллельных полос (линий). Небольшое изменение угла поворота одной из систем ведет к значительным изменениям расстояния между элементами муарового узора.

Муаровый узор образуется также при наложении двух непересекающихся систем равноудаленных параллельных линий, когда величина шага одной из систем слегка отлична от другой. При этом, чем меньше разница в шаге, тем больше расстояние между муаровыми полосами. Это позволяет получить колоссальное увеличение (в миллионы раз) разницы в ширине промежутков между линиями. Иначе говоря муаровый эффект дает возможность визуально без применения оптических систем, обнаруживать ничтожные отклонения в почти одинаковых периодических структурах. В настоящее время метод муара широко применяют при контроле точности делительных устройств для изготовления дифракционных решеток.

Муар возникает на электронной микрофотографии двух кристаллов, наложенных таким образом, что их атомные решетки почти совпадают. Любой дефект, нарушающий регулярность структуры кристалла, четко проявляется в муаровом узоре. Увеличение при этом таково, что позволяет видеть смещения атомов, величины которых меньше диаметра самого атома.

Если две решетки из равноудаленных параллельных прямых, несколько отличных по величине шага, двигать одну относительно другой в направлении, перпендикулярном линиям, то полосы муарового узора будут двигаться со скоростью гораздо большей, чем относительная скорость движения самих решеток. При этом направление их движения совпадает с направлением относительного смещения решетки с меньшим шагом. Таким образом, малое перемещение одной из решеток приводит к значительному перемещению полос муара, которое легко обнаружить и измерить.

Пример применения:

- способ определения деформаций по картине муаровых полос, отличающийся тем, что с целью повышения точности измерения деформаций, определяют отношение скоростей взаимного перемещения деформированной и эталонной сеток и скорости перемещения муаровой полосы и по величине этого отношения судят о величине деформаций.

Описанное проявление муарового эффекта издавна используется во всех измерительных приборах, обладающих нондусом, таких, как микрометр или штангенциркуль.

С помощью эффекта муара можно визуализировать ничтожные изменения показателя преломления прозрачных сред, помещая их между решетками. Так, например, можно визуально изучить динамику растворения двух веществ.

Этот же принцип позволяет производить экспресс-анализ качества оптических деталей. Линзы помещают между решетками, наличие выпуклой линзы увеличивает элементы муарового узора, вогнутой – уменьшают. При этом обе линзы поворачивают узор в противоположных направлениях на угол, пропорциональный фокусному расстоянию. В местах неоднородностей структуры или формы линз линии узора искажаются.

Еще пример контроля оптики:

- интерференционный способ измерения клиновидности оптических прозрачных пластин, заключающийся в том, что

пучок света от лазера фокусирует с помощью объектива в плоскость отверстия в экране, за которым устанавливают контролируемую пластину, отличающийся тем, что с целью повышения точности и производительности измерений, от контролируемой пластины при ее фиксированном положении получают прозрачную копию интерференционных колец, поворачивают пластину в ее плоскости на 180, накладывают интерференционную картину на копию и по ширине муаровых полос, образовавшихся от наложения, измеряют клиновидность платины.

Множество муаровых узоров можно получить, совмещая решетки, образованные самыми различными линиями, например концентрическими окружностями, спиралевидными волнообразными или радиально исходящими из точки линиями и даже семействами равномерно расположенных точек. Таким образом можно моделировать многие сложные физические явления, такие, как взаимодействие электростатических полей, интерференция волн и другие. Подобными методами решаются некоторые задачи архитектурной акустики.

В Японии предложено использовать муаровый эффект для составления топографических карт предметов. Объект фотографируют через решетку из тонких нитей, сбрасывающую на него четкую тень. Тень деформируется в соответствии с рельефом объекта и при взаимодействии ее с реальной решеткой возникает муаровый узор, наложенный на изображение объекта. На фотографии расстояние между линиями муара соответствует глубине рельефа. Такой метод очень эффективен, например, при изучении деформации быстровращающихся деталей, при анализе обтекания тел поверхностным слоем жидкости в медицинских исследованиях анатомического характера.

Универсальность метода муара, простота преобразования с его помощью различных величин, близка к ИКР, высокая разрешающая способность - все это говорит о том, изобретате-

ли еще не раз обратятся в своей практике к муаровому эффекту.

18.3. Высокодисперсные структуры

Одной из тенденций развития технических систем является увеличение степени дисперсности входящих в них веществ. При этом наблюдаются качественные изменения свойств дисперсной структуры по сравнению со свойствами монолитного нераздробленного вещества.

Высокодисперсные структуры подразделяются на *сыпучие*, *консолидированные* и *коллоидные*. Из сыпучих порошков особый интерес представляют ферромагнитные порошки, так как ими легко управлять магнитным полем (1), и их можно вводить в виде индикаторных добавок в немагнитные вещества с целью выяснения условий действующих внутри исследуемого вещества (температуры, давления и т.п.).

Пример применения:

- способ определения степени затвердевания полимерного состава. В полимер в небольшом количестве вводят ферромагнитный порошок. Полимер, затвердевая, сдавливает частицы порошка, который при этом меняет свои магнитные свойства, что легко обнаружить.

Консолидированные тела – это тела, полученные путем прессования или спекания мелкого порошка (размеры частиц от 10 .. 100 мкм). Консолидированные тела обнаруживают много интересных свойств (2), отличающих их от сплошного тела, состоящего из того же вещества. Например, при консолидировании порошка путем прессования можно получить анизотропные тела, несмотря на то, что вещество, составляющее частицы вещества, изотропно. Параметры такого консолидированного тела (электропроводность, теплопроводность, распространение звука, модуль упругости и т.п.) в направлении прессования выше, чем в сплошном теле из того же вещества, при-

чем все свойства изменяются практически на один и тот же масштабный коэффициент пропорциональности. Зная, в каком масштабе искажена одна из условных характеристик пористого образца (например, электропроводность), можно легко определить масштабы искажения и других характеристик этого образца (теплопроводности, скорости звука, модуля сжатия, коэффициента Пуассона и т.д.), а значить легко можно определить и сами характеристики данного образца. Контролируя какую-нибудь из легкоизмеряемых характеристик пористого тела в процессе его консолидации можно однозначно определить изменения интересующих нас других его характеристик.

18.4. Жидкие кристаллы

Представим себе жидкость, молекулы которой имеют удлиненную палочкообразную форму. Силы взаимодействия "выстраивают" их параллельно друг другу и ведут они себя как обычные молекулы жидкости, но с учетом единственного ограничения при всех перемещениях должно сохраняться (в целом) некоторое выделенное направление длинных осей. У такой жидкости будут различные оптические и другие характеристики (например, теплопроводность) в различных направлениях, т.е. они будут анизотропной. А ведь анизотропия всегда считалась отличительной чертой кристаллического состояния!

Жидкость, описанного выше типа, принадлежит обширному классу веществ, называемых *нематическими жидкими кристаллами*. Слово "немос" по-гречески "нить", и, действительно, молекулы таких жидких кристаллов напоминают бусинки, укрепленные на нити.

Возможны и другие типы молекулярной архитектуры, создающие анизотропию. Укладка молекул слоями и пачками приводит к еще одному классу жидких кристаллов – *сметическим*. Такая упаковка молекул создает анизотропию не только оптических, но и механических свойств, поскольку слоя легко

смещаются относительно друг друга. Название этой группы связано с греческим словом "смектос" (мыло). Такое расположение молекул характерно для мыльных растворов, эмульсий и т.д.

Третьим распространенным типом жидких кристаллов являются *холестерические*, в которых молекулы укладываются в плоскостях подобно описанным выше нематическим кристаллам, но сами плоскости повернуты друг относительно друга. Вектор, связанный с длинной осью, так называемой "директор", описывает в пространстве спираль. Названием этот класс жидких кристаллов обязан печально известному холестирину, у которого впервые были обнаружены подобные свойства.

Прежде всего было найдено, что воздействие электрического поля на жидкие кристаллы приводит к электрооптическим эффектам, не имеющих аналогов среди прочих оптических сред. Электрооптическая ячейка состоит из двух стекол, между которыми находится тонкий слой жидкого кристалла. Окрашенные поверхности стекол обработаны таким образом, что они, оставаясь прозрачными, пропускают электрический ток. Таким образом, получают как бы прозрачный конденсатор, диэлектриком внутри которого служит слой жидкого кристалла.

Первым из открытых и, пожалуй наиболее впечатляющих эффектов стало *динамическое рассеяние*. При определенном значении приложенного поля жидкость между электродами как бы становится мутной. Свет, до сих пор беспрепятственно приходивший через жидкий кристалл, рассеивается, и участки с повышенной напряженностью поля становятся видны.

Этот простой эффект имеет большую практическую ценность. Электропроводящие участки поверхности стекла могут быть выполнены в виде букв или любых геометричеких фигур. Подавая на них соответствующие напряжения, можно формировать различным образом прозрачные и непрозрачные участки, то есть с ничтожными затратами энергии создавать под-

вижные и неподвижные картины. Использование динамического рассеяния на слое жидкого кристалла толщиной в несколько микрометров позволяет получить изображение, затрачивая мощность порядка микроваттов. При этом из-за тонкости слоя жидкого кристалла необходимое напряжение на ячейке составит всего несколько вольт.

Удивительные превращения происходят с лучом света при взаимодействии с холестерическим жидким кристаллом, т.е. периодической спиралью. Освещенный белым светом, он кажется окрашенным и при поворотах (при изменении угла наблюдения) начинает переливаться всеми цветами радуги. Этот эффект возникает потому, что в различных направлениях чешуйки кристалла, отражающие свет, расположены на различных расстояниях и отражают из белого цвета лишь волны с определенной длинной.

Такой простой и красивый эффект дает ошеломляющую возможность. Например, пусть какой-то участок поверхности нагрет на сотые доли градуса выше окружающих. Приложим к этой поверхности пленку с нанесенным слоем холестерического жидкого кристалла. В "горячей" точке шаг спирали чуть-чуть увеличится и на пленке появится точка иного цвета. Покрыв готовое изделие (это может быть интегральная схема или деталь двигателя) слоем холестерического вещества, можно получить цветную картину тепловых направлений, на который контрастными пятнами поступают любые дефекты, и неоднородности, даже скрытые далеко в структуре, благодаря неодинаковой их теплопроводности.

Цвет окраски жидкого кристалла однозначен с температурой нагретой поверхности. Этот эффект лежит в основе разработанного преобразователя инфракрасного изображения в видимое.

Основным элементом этого устройства является пленка холестерического жидкого кристалла, повешенная на тонкую черную мембрану. Мембрана поглощает сфокусированное на

ней инфракрасное излучение и передает тепло слою жидкого кристалла. Цвет жидкокристаллической пленки (в отраженном свете) зависит от температуры, поэтому при освещении пленки белым светом получается видимое изображение инфракрасного излучения. Напомним, что для преобразования инфракрасного излучения в видимое обычно используют преобразователи на основе фотоэмиссионных или фосфороресцирующих устройств с весьма сложной и дорогостоящей электроникой. Предельная простота и малая стоимость делает жидкокристаллические преобразователи несравненно более выгодными.

Из смеси холестерических веществ можно изготавливать температурные индикаторы в интервале температур от 20 до 250 °С. Индикаторы представляют собой тонкую гибкую пленку жидкого кристалла, заключенную между двумя полимерными пленками. Такую пленку можно накладывать на поверхности деталей для регистрации температурных градиентов в различных направлениях.

Жидкие кристаллы холестерического типа (или их смеси) весьма чувствительны к присутствию паров различных химических веществ. Присутствие крайне малого количества пара может изменить структуру жидкого кристалла. С помощью жидкого кристалла удается установить присутствие в воздухе пара при его концентрации – несколько частей на миллион. Этот способ имеет большую практическую ценность.

18.5. Лента Мебиуса

Если взять бумажную ленту, сблизить ее противоположные концы так, чтобы получилось кольцо, а затем развернуть один из концов на 180° и склеить ее друг с другом, то мы получим т.н. кольцо Мебиуса, тело, обладающее очень интересным свойством. Можно ли одновременно находится и снаружи и внутри кольца? Явное физическое противоречие. Однако, оно легко преодолевается, если это кольцо – кольцо Мебиуса,

это тело имеет лишь одну неверность, и потому, например, муравей, ползущий по внутренней поверхности нашего бумажного кольца, не переползая через край полоски, может оказаться на "наружной" поверхности кольца. Кольцо Мебиуса не одинаково среди подобных тел, так, например, существует и "одноповерхностная" бутылка.

Пример применения:

- устройство для формирования детали из полимерных материалов, например, мембран из провинилта, содержащее замкнутую ленту с формирующими элементами, натянутую на барабан, ведущий из которых снабжен нагревателем и направляющее ролики, отличающееся тем, что, с целью повышения долговечности ленты, они выполнены в виде ленты Мебиуса с формирующими элементами на двух ее сторонах.

18.6. Реология

Реология (от греческого rheos – течение, поток) – изучает процессы, связанные с необратимыми остаточными деформациями и течением различных вязких и пластичных материалов (ньютоновских жидкостей, дисперсных систем и др.).

Электрореологическим эффектом называется быстрое обратимое повышение эффективной вязкости неводных дисперсных систем в сильных электрических полях.

Электрореологические суспензии состоят из неполярной дисперсной среды и твердой дисперсной фазы с достаточно высокой диэлектрической проницаемостью. Дисперсными средами могут служить неполярные или слабополярные органические жидкости с достаточно высоким электрическим сопротивлением, например, светлые масла (вазелиновое, трансформаторное), растительные мала (касторовое), диэфиры (дибутилсебацинат), нефтановые углеводороды (циклогексан), керосин, загущенный малыми добавками полиизобутилена. В каче-

стве дисперсной фазы широко применяется кремнезем в различных модификациях. Размеры частиц не более 1 мкм.

Электрореологический эффект не проявляется заметно вплоть до некоторой пороговой напряженности электрического поля $E_{кр}$. Величина ее зависит от состава суспензии и температуры. После достижения значения $E_{кр}$ эффективная вязкость растет приблизительно квадратично, но не до бесконечности, а до ее насыщения. Эффект наблюдается при постоянном и переменном поле. При увеличении частоты кажущаяся вязкость вначале остается неизменной, затем падает. Вид зависимости эффекта от частоты зависит от состава дисперсной системы.

Электрореологические суспензии весьма чувствительны к изменениям температуры. Нагрев снижает абсолютную величину эффективной вязкости системы. С ростом температуры влияние электрического поля постепенно нивелируется.

Под действием сдвига в так называемых *электрочувствительных дисперсных системах* происходят изменения диэлектрической проницаемости, электропроводности и тангенса угла диэлектрических потерь. Такие изменения диэлектрических параметров предложено называть *реоэлектрическим эффектом*. Важное значение реоэлектрического эффекта для практики связано с возможностью получения на его основе электрически анизотропных материалов, в частности электронов. Если частицы дисперсной фазы несут заряд преимущественно одного знака, в концентрированных системах при наложении электрического поля наблюдается *электросинерезис* – сжатие структурного каркаса в целом у одного электрода и выделение дисперсной среды у другого.

В суспензиях, если частички несут положительный или отрицательный заряд, под влиянием электрического поля протекает *электрофорез* и соответственно на катоде или на аноде осаждается слой дисперсной фазы. Это свойство используется для создания информационных табло и экранов отображения плоских устройств для показа картин с помощью дисперсных

систем, прозрачность которых изменяется под влиянием электрического поля.

Области возможного практического применения электрореологического эффекта чрезвычайно разнообразны и широки:

1) регулирование движения жидкости, прокачиваемой через узкий канал;

2) конструкции муфт сцепления, тормозов и других фрикционных устройств;

3) зажимные и фиксирующие устройства (если пленку электровязкой жидкости нанести на тонкую пластину диэлектрика, с другой стороны которого располагаются электроды, соединенные с источником одно или трехфазного тока, то электропроводный эффект, установленный на пластине, будет жестко зафиксирован "затвердевший" пленкой при наложении достаточно интенсивного электрического поля);

4) жидкие электрогенераторы, преобразователи тока;

5) электрокинетические весы и др.

Реология полимерных растворов – реологически сложные среды, обладающие нелинейными вязкоупругими, вязкопластичными и вязко-сыпучими свойствами, которым присущ неравновесный режим течения в трубах. Реологические особенности таких систем обуславливают проявление разнообразных свойств и эффектов, на основе которых можно разработать новые системы измерения вязкости. Известно, что при сдвиговом течении в вязкоупругих системах действуют не только касательные, как у воды или у любой другой ньютоновской жидкости, но и нормальные напряжения, которые характеризуются модулем сдвиговой упругости – *реологическим параметром* системы и скоростью сдвига. Действие нормальных напряжений определяют характерные реологические эффекты при движении вязкоупругих систем.

Подбор примеров, которые будут рассмотрены, ни в коем случае не является обзором существующих эксперименталь-

ных данных относительно реологических свойств вязкоупругих систем любой природы.

Основная цель приводимого описания различных эффектов заключается в демонстрации многообразия встречающихся реологических свойств и, что самое главное, их несводимости к явлению вязкости. Наоборот, каждый из описанных ниже экспериментов показывает, что определяющие факторы поведения исследуемой системы в тех или иных условиях – время релаксации жидкости или модуль сдвиговой упругости.

Необходимо отметить, что все рассматриваемые свойства присущи не только одному типу жидкостей, но и в той или иной степени всему многообразию систем, применяемых в нефтяной промышленности.

Эффект Вайсенберга. Пусть вязкоупругая жидкость находится в кольцевом зазоре между двумя вертикально расположенными концентрическими цилиндрами, внутренний цилиндр вращается с некоторой угловой скоростью. В случае ньютоновской жидкости вследствие действия центробежных сил, обусловленных вращением жидкости, около внутреннего цилиндра уровень жидкости понижается, а вблизи внешнего – повышается. В случае вязкоупругой жидкости, когда действуют нормальные напряжения, наблюдается обратная картина – вблизи внутреннего цилиндра уровень жидкости повышается (внутренний цилиндр выталкивается). Этот же эффект происходит и при вращении жидкости между двумя горизонтальными пластинами, когда распределение давления по радиусу неравномерное, с максимумом в центре.

Разбухание струи (*Барус-эффект*). При вытекании ньютоновской жидкости из трубки диаметр струи вследствие закона сохранения количества движения вниз по потоку сужается по сравнению с диаметром отверстия. При истечении из трубы вязкоупругой жидкости наблюдается *расширение* диаметра струи до размеров, значительно больше диаметра трубки, иногда превосходящих размер отверстия в три-четыре раза. Изме-

нение формы жидкости после выхода из трубы было впервые замечено американским биологом Д. Барусом, который для опытов использовал очень вязкий материал, называемый корабельной клеевой краской.

Эффект может быть обусловлен сочетанием упругости жидкости и сходящимся характером линий тока на входе в трубу. Если жидкость течет по трубе таким образом, что ее частицы перемещаются параллельно оси трубы, а на входе, в области сходящегося течения, имеют составляющую скорости по направлению к оси, то жидкие цилиндры, коаксиальные с трубой, должны увеличивать свою длину и уменьшаться в диаметре течении внутри трубы. Если жидкость при истечении из трубы еще помнит предысторию своего движения на ее входе, то естественно ожидать, что, покидая трубу, жидкость должна изменять форму в некотором смысле противоположно тому, как это ей пришлось сделать раньше, т.е. жидкий цилиндр будет уменьшаться в длине и возрастать в диаметре. В таком случае эффект должен был бы снижаться при увеличении длины трубы, что и происходит на самом деле. Однако эффект не исчезает полностью при возрастании длины трубы.

Такое "остаточное" увеличение диаметра подтверждает результат эксперимента, при котором жидкость в трубе находилась в покое в течение времени, значительно превышающем время релаксации и затем вытеснялась из трубы. Это объясняется тем, что при движении жидкости в трубе в ней возникают нормальные напряжения, стремящиеся прижать жидкость к стенкам. При вытекании в открытое пространство ограничивающих стенок нет и под действием релаксирующих нормальных напряжений струя разбухает.

Эластичная турбулентность. При движении полимерного раствора по трубе с малыми скоростями вытекающая струя жидкости будет гладкой и ровной, в то время как при больших скоростях поток становится неравномерным и неупорядоченным. В последнем случае для ньютоновской жидкости *число*

Рейнольдса обычно меньше критического значения, при котором течение становится турбулентным. Следовательно, упругие свойства раствора приводят к нестабильности течения.

При больших скоростях полимерные струи могут даже распадаться на отдельные капли, а в некоторых случаях при очень больших скоростях деформаций струя снова становится гладкой. Объясняется это тем, что при превышении некоторого критического напряжения сдвига возможно проскальзывание жидкости у твердых стенок. При этом скоростная характеристика трения скольжения имеет падающий участок, что определяет возможность неустойчивого режима течения и возникновения релаксационных автоколебаний при течении жидкости.

Неустойчивый режим может быть также обусловлен специфической упругой гидродинамической неустойчивостью при движении вязкоупругих жидкостей.

Можно также предположить, что наличие аномальных вязкостных свойств, в частности, резкая зависимость вязкости от градиента скорости и температуры, связанная с происходящими в процессе течения структурными перестройками, может служить причиной возникновения описанного явления.

Эффект Кэя. Экспериментируя с 6 %-ным раствором полиизобутилена в динамике, Кэй обнаружил, что струйка раствора, выливающаяся из колбы в широкий и плоский сосуд, через каждые несколько секунд поднимается вверх и спускается дугой, снова достигая поверхности жидкости в сосуде на расстоянии порядка нескольких сантиметров от первоначальной точки падения.

Устойчивость жидких струй. Полимерные растворы способны образовывать сравнительно долгоживущие нити. Это наблюдается, например, на заключительной стадии распада тонкой капиллярной струи раствора полимера. Вместо того, чтобы под действием капиллярных сил распасться на отдельные капли, струя на значительном протяжении сохраняет "че-

точную структуру", т.е. имеет вид системы капель, соединенных тонкими нитями. Нити под действием поверхностного натяжения, создающего боковое обжатие жидкости, постепенно утончаются во времени и, что эквивалентно, по мере удаления от насадка.

Если струю вязкоупругой жидкости, например, раствора полимера или высокосмолистой нефти, вытекающую вертикально вниз из капилляра, направить в стакан, а затем медленно отодвигать его в сторону, то струя отклонится от вертикали и последует за стаканом. Если стакан отодвинут недалеко, то движение жидкости в искривленной струе происходит устойчиво и стационарно. Наличие такой формы равновесия связано с проявлением нормальных напряжений при одноосном растяжении элемента вязкоупругой жидкости. Стационарная струя в поле силы тяжести принимает искривленную форму, напоминающую цепную линию. Это означает, что в струе происходит заметное продольное натяжение, обусловленное действием нормальных напряжений.

Можно сделать некоторые качественные выводы о роли упругих эффектов в явлении "прядимости", т.е. способности жидкости к образованию длинных прядей нитей. Вопрос состоит не в том, какие силы обеспечивают равновесие нити (например, для достаточно тонких нитей это могут быть силы поверхностного натяжения), а почему нить устойчива, т.е. почему в не развиваются случайно возникающие местные утончения. Место утончение в длинной нити не будет прогрессировать, если уменьшение диаметра нити приводит к увеличению действующей в ней продольной силы. Можно показать, что если радиус нити меньше некоторого критического значения, определяемого упругими напряжениями и коэффициентом поверхностного натяжения, то ее растяжение происходит устойчиво. Отметим также, что время распада растянутой нити не может быть существенно меньше времени релаксации упругого напряжения.

Упругое последействие. Для исследования упругого восстановления, проявляющегося в заметном изменении формы при неизменном объеме, были поставлены следующие опыты. При внезапном прекращении вращения сосуда вокруг вертикальной оси, в котором находится. 5 %-ный раствор полиметилметакрилата в диметилфталате, наблюдается возвратное движение взвешенных в нем пузырьков газа.

Характерен следующий опыт. Если внезапно прекратить течение выливающейся из бутылки жидкости, разрезав поток на некотором расстоянии ниже горлышка на две части, то верхняя часть быстро вернется в бутылку. Схожий опыт можно проделать и в несколько других условиях. Опустим в сосуд с вязкоупругой жидкостью, например тяжелой нефтью, палочку и затем поднимем ее вверх. За концом палочки потянется нить жидкости, которая обладает сравнительно большой устойчивостью. Если обрезать нить жидкости, то верхняя часть нити начинает совершать колебания в вертикальной плоскости.

Взаимодействие струи жидкости с поверхностью. В добыче нефти хорошо известен способ гидропескоструйной перфорации, заключающийся в образовании отверстий в металле обсадной колонны под действием струи воды, в которую для усиления абразивного действия добавляют песок.

Были проведены эксперименты по изучению эффективности действия различного рода добавок к воде на пробивную способность струи, Сравнивали добавки песка, металлической (стальной) крошки и высокомолекулярного полимера. Результаты опытов показали, что наибольшей пробивной способностью обладает струя воды с полимерными добавками, а металлическая крошка занимает промежуточное место между добавками полимера и песком. Это связано с наличием у полимера релаксационных свойств. В процессе взаимодействия струи с поверхностью, находящиеся в воде частички той или иной добавки при ударе о металл деформируются, при этом часть кинетической энергии тратится на деформирование (упругое или

пластическое) этой частички. Поскольку взаимодействие частички и поверхности длится конечное время, то поведение полимера будет определяться соотношением времен релаксации и взаимодействия. При больших скоростях истечения время взаимодействия значительно меньше времени релаксации и частичка полимера не успевает деформироваться, т.е. полимер в данных условиях ведет себя как жесткое недеформируемое тело. Это способствует усилению разрушительной способности струи воды.

Всплывание пузырей газа в вязкоупругой жидкости. Скорости всплывания пузырей газа в неподвижной вязкоупругой жидкости с высотой возрастают. В условиях описываемых опытов размеры пузырей по мере подъема практически не изменялись, поэтому причиной ускорения движения поднимающихся пузырей нельзя считать рост архимедовой силы. По данным экспериментов этот эффект более четкое выражен у удлиненных пузырей. Непосредственные измерения давления по высоте столба жидкости показали, что оно меняется неравномерно. Датчик, установленный на стенке трубы, регистрирует повышение давления с момента прохождения крайней верхней точки контура пузыря через уровень расположения датчика. По мере поднятия пузыря показание датчика увеличивается, достигая максимального значения в нижней части пузыря. После прохождения пузыря показание датчика быстро восстанавливается до значения, соответствующего гидростатическому давлению. Наблюдаемый эффект можно объяснить кинетикой развития нормальных напряжений в вязкоупругой жидкости при внезапном наложении сдвигового течения. При прохождении головы пузыря через уровень расположения датчика начинается движение жидкости в зазоре между стенкой трубы и поверхностью пузыря. По мере подъема пузыря время движения жидкости в данном сечении увеличивается, соответственно возрастают нормальные напряжения. Это приводит к повышению давления по высоте пузыря от головной части к

нижней, и, следовательно, к появлению дополнительной силы, приложенной к пузырю снизу вверх. Вследствие этого скорость подъема пузыря возрастает. Если высота пузыря небольшая, то за время его прохождения через выбранное поперечное сечение трубы нормальные напряжения не успевают достичь максимального значения и выталкивающая сила будет невелика. Таким образом, существует оптимальная высота пузыря, поднимающегося в заданной жидкости, при которой время его подъема будет наименьшим.

Движение в капилляре с переменным сечением. Рассмотрим результаты опытов по изучению движения вязкоупругой жидкости в двух прямолинейных капиллярах, один из которых имеет постоянный диаметр, а другой – периодически изменяющийся по длине, причем средний диаметр второго равен диаметру первого капилляра. Течение во всем диапазоне исследования происходит с очень малой скоростью, поэтому число Рейнольдса во всех случаях не превосходит нескольких единиц. Если для первого капилляра зависимость Q - p имеет вид прямой линии, проходящей через начало координат, то для капилляра с переменным сечением эта зависимость отклоняется к оси давлений. В силу малости числа Рейнольдса появление дополнительных сопротивлений объясняется релаксационными свойствами жидкости, но не связано с возникновением инерционных сил из-за переменности (скорости в капилляре). При движении через систему сужающихся и расширяющихся каналов с малой скоростью напряжения, вызванные деформацией жидкости, успевают релаксировать, и по сравнению с вязким сопротивлением ими можно пренебречь. С увеличением скорости движения упругие напряжения не успевают релаксировать, поэтому общее сопротивление возрастает. Таким образом, помимо числа Re течение дополнительно характеризуется новым параметром, равным отношению времени релаксации жидкости к характерному времени процесса.

Жидкий канат. Если тяжелую нефть, густое масло или мед лить на тарелку с достаточно большой высоты, то на некотором

расстоянии от тарелки струйка жидкости начинает закручиваться колечками. Это связано с тем, что падая струйка сжимается и выгибается. Вследствие действия упругих напряжений струйка не может разорваться. Поэтому, если количество падающей жидкости больше, чем может сразу поглотить жидкость, находящаяся в тарелке, то струйка начинает завиваться. Витки некоторое время находятся на поверхности, постепенно поглощаясь слоем жидкости.

Эффект "зонтика". При введении в состав полимерной системы некоторых видов наполнителей, например песка, она приобретает вязко-сыпучие свойства. Реологические свойства вязко-сыпучей среды помимо вязкости характеризуются углом внутреннего трения, что легко представить по аналогии с кучей песка, у которой угол откоса имеет постоянное для данной системы значение. При изменении этого угла песок начинает сыпаться.

На движение вязко-сыпучей системы существенно влияет сила тяжести. Если поместить пробку из вязко-сыпучего материала в вертикальную трубу, то наблюдается следующее интересное явление – страгивающее усилие сверху вниз превосходит усилие, которое нужно приложить, что заставить пробку двигаться вверх.

Далее приведены в кратком виде некоторые эффекты в полимерных жидкостях.

Рассмотрим течение жидкости по наклонному желобу полукруглого сечения. В обоих случаях поток ламинарный. Поверхность ньютоновской жидкости плоская, за исключением участков у границ, в то время как поверхность полимерной жидкости слегка выпуклая.

Эффект, происходящий при медленном течении жидкости из широкой трубы в узкую. В полимерной жидкости образуются вихри, направленные вверх против течения, в результате чего часть жидкости захватывается этими вихрями и не проникает в узкую трубу.

Эффект, в котором наблюдается течение около цилиндра, колеблющегося в поперечном направлении, называется *акустическим потоком*. Высокочастотные колебания создают вторичное течение в окружающей жидкости. При этом направление течения

в полимерной жидкости противоположно тому, которое имеет место в ньютоновской жидкости.

Что происходит, когда в трубку, наполненную жидкостью, бросают один за другим два шарика? В ньютоновской жидкости второй шарик всегда будет догонять первый и, в конце концов, столкнется с ним. В полимерной жидкости то же самое произойдет, если второй шарик бросить почти сразу за первым. Но если шарик опустить через определенный критический интервал времени, то при падении второй шарик будет отталкиваться от первого.

Рассмотрим случай, когда вращающийся диск на дне сосуда приводит к течению, при котором в ньютоновской жидкости поверхность в центре опускается (образуется воронка), а в полимерной жидкости поднимается.

Пусть вращающийся диск помещен на поверхность каждой из рассматриваемых жидкостей. Возникающий первичный поток, направлен по касательной к диску, вызывает затем вторичный поток. При этом ньютоновская жидкость отбрасывается вращающимся диском так, что у стенок сосуда она движется вниз, а затем вблизи оси сосуда вновь поднимается вверх. В полимерной жидкости также имеется вторичное течение, но движение происходит в противоположном направлении.

В ньютоновской жидкости *сифонный эффект* действует лишь тогда, когда его засасывающий конец расположен ниже поверхности жидкости. Однако полимерную жидкость можно выкачать из сосуда, даже если имеется некоторое расстояние между поверхностью жидкости и концом сифона.

Эффект увлечения.

Эффект увлечения появляется в результате:

1) возникновения потока электронов в металле или полупроводнике в условиях, когда фононы не находятся в тепловом равновесии, а образуют направленный поток, направленный при наличии градиента температуры. В образце, на концах которого создана разность температур, возникает поток фононов, пропорциональный градиенту температуры. В результате

столкновения электронов с фононами, возникает электронный поток, а в замкнутой цепи появляется ток. Если образец электрически разомкнут, то в нем возникает ЭДС. В отличии от акустоэлектрического эффекта электроны увлекаются потоком некогерентных фононов.

2) появления электронного потока в результате передачи импульса от фононов электронам в твердом проводнике. Эффект наблюдается в оптических и СВЧ областях в полупроводниках, в полуметаллах (Bi) и некоторых металлах. Эффект увлечения обнаруживается в виде тока и ЭДС. В полупроводниках наблюдается наряду с продольным и ток называемый поперечный эффект (появление тока, направленного перпендикулярно импульсу фонона).

Применение: в устройствах регистрации ИК-излучения, для измерения временных характеристик излучения импульсных лазеров [3].

Радиометрический эффект – возникновение силы отталкивания между двумя близко расположенными пластинами в разреженном газе, находящимися при разных температурах ($T_1 > T_2$). Холодная пластина со стороны, обращенной к горячей, бомбардируются молекулами газа, имеющими в среднем более высокую энергию, чем молекулы, бомбардирующие эту пластину с противоположной стороны. В результате между пластинами возникает сила отталкивания. При достаточно низких давлениях газа P, когда средняя длина свободного пробега молекул больше расстояния между пластинами, сила отталкивания.

$$F = \frac{1}{2} \cdot p \cdot \left(\sqrt{\frac{\pi}{T_2}} - 1 \right)$$

Применение: в радиометрических манометрах.

Пинч-эффект – эффект самосжатия разряда, свойство электрического токового канала в проводящей среде уменьшать свое

сечения под действием собственного, порождаемого самим током, магнитного поля. Пинч-эффект сопровождается развитием различных плазменных неустойчивостей, ток то местное пережатие пинча, его изгибы и винтовые возмущения. Нарастание этих возмущений приходит чрезвычайно быстро и ведет к разрушению пинча.

Для мощных импульсных пинчей в разреженном действии характерно, что при некоторых условиях они становятся источниками нейтронного и рентгеновского излучений.

Применение: используется в системах управляемого термоядерного синтеза (УТС) [3].

Фотомагнитоэлектрический эффект – возникновение электрического поля в освещенном полупроводнике, помещенном в магнитное поле.

Электрическое поле перпендикулярно магнитному полю и потоку носителей тока (электронов проводимости), диффундирующих в полупроводнике в направлении от освещенной стороны полупроводника, где поглощенные фотоны образуют электронно-дырочные пары, к неосвещенной. Эффект наблюдается прирезкой неоднородной концентрации неосновных носителей тока, где достигается при сильном поглощении света. Открыт в 1933 г. советским физиком М. М. Носковым [3].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Всякая техническая система, цель которой сбор информации, поступающей из внешней среды, а также обработка этой информации, кроме датчиков и микро-ЭВМ содержит другие составляющие, а именно входной терминал, выходной терминал и исполнительное устройство, на вход которого поступают уже обработанные ЭВМ-сигналы. Такая техническая система сходна по функциям отдельных элементов и по схеме поведения с человеком, где датчики соответствуют органам чувств, микропроцессор и память системы похожи на мозг человека, исполнительные устройства - это руки, ноги и тело.

Роль "Указателя" заключается в том, что он поможет вам увидеть и ощутить одну из важнейших тенденций развития технических систем -переход от исследования природы и практического воздействия на нее на макроуровне к исследованию к исследованию ее на микроуровне и связанный с этим переход от макротехнологии к микротехнологии.

Основное назначение данного учебного пособия – сформировать у студентов базовые знания по электроприводу для последующего углубленного изучения специальных дисциплин.

Предложенная методика изложения учебного материала по разделам учебного курса, дополненная практическими и лабораторными занятиями, а также вопросами для самоконтроля, дает студенту целостное представление о содержании и концепции изучаемого курса.

Помимо этого, студент имеет возможность самостоятельно освоить разделы учебной дисциплины. Изучая курс «Электрический привод» при таком комплексном подходе, студент, обучающийся по специальности «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов», впервые может осознанно определиться, насколько правильно была выбрана им специальность.

Имея на руках подобный материал по всем разделам учебной дисциплины, студент тщательнее готовится к практическим и лабораторным занятиям. Предварительно ознакомившись с теоретическим материалом по конспекту лекций, он будет значительно лучше воспринимать содержание лекции, а также заранее подготовит вопросы по интересующим его темам. Все это в конечном счете будет способствовать повышению качества обучения.

АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ ФИЗИЧЕСКИХ ЗАКОНОВ, ЯВЛЕНИЙ И ЭФФЕКТОВ

А

Александрова, эффект 16
Агрегатное состояние вещества 20
Автофобность, эффект 23
Адгезия 27
Адсорболюминесценция 29
Адсорбционная эмиссия 29
Адсорбция, влияние на электропроводность полупроводника 30
Архимеда, закон 37

Б

Безизносность, эффект 11
Бернулли, уравнение 37

В

Вязкость 37
Вязкоэлектрический эффект 39

Г

Гироскопический эффект 8
Гравитация, гравитационные силы 9
Гидравлический удар 44

Д

Деформация 12
Диффузия, термодиффузия 30
Дюфора, эффект 31
Дросселирование 43
Джоуля-Томсона, эффект 43

И

Инерция, силы инерции 7
Износ 11

К

Капилляры, капиллярность 24
Капиллярный подъем (опускание), эффект 26
Когезия 27
Коанда, эффект 43
Кавитация 46

Л

Ламинарность, ламинарный поток 37

М

Модуль упругости (модуль Юнга) 12
Механокалорический эффект 41

О

Осмос 31

П

Прецессия гироскопических систем 8
Пойнтинга, эффект 15
Поверхностное натяжение 22
Паскаля, закон 37

Р

Радикало-рекомбинационная люминесценция 29
Реоэлектрический эффект 223

С

Сверхпластичность металлов, эффект 20
Смачивание 23
Сорбция 27

Сверхтекучесть, сверхтеплопроводность He II 40
Скачок уплотнения 42
Соннолюминесценция 49

Т

Тепловое расширение 18
Тепловые трубы 33
Теплообмен, тепломассообмен 32
Термокапиллярный эффект 26
Термомеханический эффект 41
Термофорез 35
Термохимический эффект 42
Трение сверхнизкое, эффект 11
Трение, силы трения 10
Турбулентность, турбулентный поток 37
Томса, эффект 42

У

Ультразвуковой капиллярный эффект 26

Ф

Фотопластический эффект в металлах, инфракрасное гашение эффекта 15
Фазовые переходы 19
Фотоадсорбционный эффект 28
Фотофорез 35

Ц

Центробежные силы инерции 7
Цеолиты, молекулярные цеолитовые сита 35

Э

Электроадсорбционный эффект 28
Электрокапиллярный эффект 26

Электроосмос 32
Электропластический эффект в металлах 14
Эффект зависимости пластической деформации металла от его проводимости 13
Эффект памяти в сплавах 16
Эффект растекания жидкости под окисными пленками металлов 24
Эффект воронки 43
Электрореологический эффект 222

Ю

Юнга модуль 12
Юткин, электрогидравлический эффект 45

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Справочник по средствам автоматики / под. ред. В.Э. Низэ и И.В. Антика. М., 1983.

2. Биргер И.А. Расчет на прочность деталей машин: справочник / И.А. Биргер, Б.Ф. Шорр, Г.Б. Иосилевич. 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение. 1979. 702 с.

3. Советский энциклопедический словарь / под. ред. А.М. Прохорова. изд. 4-е. М.: Сов. энциклопедия. 1987. 1600 с.

4. Электронный справочник по изобретениям. – электронный ресурс / http://www.altshuller.ru

5. Физический энциклопедический словарь / под. ред. А.М. Прохорова. М., 1983.

6. Контрольно-измерительные приборы и анализаторы. Каталог КИП FI 01. Siemens. 2006.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 3
1. МЕХАНИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ И ДЕФОРМАЦИЯ 7
1.1. Силы инерции 7
1.2. Гравитация 9
1.3. Трение и износ 10
1.4. Деформация 12
2. МОЛЕКУЛЯРНЫЕ ЯВЛЕНИЯ 18
2.1. Тепловое расширение вещества 18
2.2. Фазовые переходы, агрегатные состояния веществ 19
2.3. Поверхностное натяжение жидкостей 22
2.4. Капиллярность 24
2.5. Сорбция 27
2.6. Диффузия 30
2.7. Тепломассообмен 32
2.8. Термофорез и фотофорез 34
2.9. Молекулярные цеолитовые сита 35
3. ГИДРОСТАТИКА, ГИДРОАЭРОДИНАМИКА 37
3.1. Течение жидкости и газа 37
3.2. Явление сверхтекучести 40
3.3. Скачок уплотнения 42
3.4. Дросселирование жидкостей и газов 43
3.5. Гидравлические удары 44
3.6. Кавитация 46
4. КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ 50
4.1. Механические колебания 50
4.2. Акустика 51
4.3. Ультразвук 54
4.4. Волновое движение 60
5. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ 69
5.1. Взаимодействие тел 69
5.2. Закон Джоуля-Ленца 69
5.3. Проводимость металлов 70
5.4. Электромагнитное поле 72

5.5. Проводник с током в магнитном поле 74
5.6. Электромагнитная индукция 74
5.7. Электромагнитные волны 77
6. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВА,
ДИЭЛЕКТРИКИ 80
6.1. Проводники, изоляторы и полупроводники..... 82
6.2. Диэлектрическая проницаемость 83
6.3. Пробой диэлектриков 83
6.4. Электромеханические эффекты в диэлектриках..... 83
6.5. Пироэлектрики и сегнетоэлектрики..... 85
6.6. Электреты 89
7. МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВА..... 90
7.1. Магнетики..... 92
7.2. Магнитокалорический эффект..... 99
7.4. Магнитоэлектрический эффект 103
7.5. Гиромагнитные явления..... 103
7.6. Магнитоакустический эффект 104
7.7. Ферромагнитный резонанс..... 104
7.8. Аномалии свойств при фазовых переходах 105
8. КОНТАКТНЫЕ, ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И
ЭМИССИОННЫЕ ЯВЛЕНИЯ..... 106
8.1. Контактная разность потенциалов 106
8.2. Термоэлектрические явления..... 108
8.3. Электронная эмиссия..... 112
9. ГАЛЬВАНО- И ТЕРМОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ..... 117
9.1. Гальваномагнитные явления..... 117
9.2. Термомагнитные явления..... 119
10. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ РАЗРЯДЫ В ГАЗАХ 121
10.1. Факторы, влияющие на газовый разряд..... 121
10.2. Высокочастотный тороидальный разряд..... 123
10.3. Роль среды и электродов 123
10.4. Тлеющий разряд..... 123
10.5. Коронный разряд..... 124
10.6. Дуговой разряд 124

10.7. Искровой разряд 125
10.8. Факельный разряд 125
10.9. "Стекание" зарядов с острия 125
11. ЭЛЕКТРОКИНЕТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ 127
12. СВЕТ И ВЕЩЕСТВО 128
12.1. Свет, ультрафиолетовое и инфракрасное излучение..... 131
12.2. Отражение и преломление света 135
12.3. Поглощение и рассеяние 139
12.4. Испускание и поглощение света 142
13. ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ФОТОХИМЕЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ 149
13.1. Фотоэлектрические явления 149
13.2. Фотохимические явления 153
14. ЛЮМИНИСЦЕНЦИЯ 158
14.1. Люминесценция, возбуждаемая электромагнитным излучением 159
14.2. Люминесценция, возбуждаемая корпускулярным излучением 161
14.3. Люминесценция, возбуждаемая электрическим полем 162
14.4. Хемилюминесценция 164
14.5. Триболюминесценция 164
14.6. Радиотермолюминесценция 165
14.7. Стимуляция и тушение люминесценции 166
14.8. Эффект поляризации 168
15. АНИЗОТРОПИЯ И СВЕТ 169
15.1. Двойное лучепреломление 169
15.2. Механооптические явления 170
15.3. Электрооптические явления 172
15.4. Магнитооптические явления 177
15.5. Фотодихроизм 183
15.6. Поляризация при рассеивании света 185
16. ЭФФЕКТЫ НЕЛИНЕЙНОЙ ОПТИКИ 186
17. ЯВЛЕНИЯ МИКРОМИРА 194

17.1. Радиоактивность 194
17.2. Рентгеновское и гамма-излучения 195
17.3. Взаимодействие частиц с веществом 200
17.4. Электронный парамагнитный резонанс 207
17.5. Ядерный магнитный резонанс 209
18. ДРУГИЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ 212
18.1. Стробоскопический эффект 212
18.2. Муаровый эффект 214
18.3. Высокодисперсные структуры 217
18.4. Жидкие кристаллы 218
18.5. Лента Мебиуса 221
18.6. Реология 222
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 236
АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ ФИЗИЧЕСКИХ ЗАКОНОВ, ЯВЛЕНИЙ И ЭФФЕКТОВ 238
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК 242

Учебное издание

Бурковский Виктор Леонидович
Глотова Юлия Николаевна
Ефремов Дмитрий Александрович
Романов Андрей Владимирович

ФИЗИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ И ЭФФЕКТЫ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

В авторской редакции

Выпускающий редактор И.В. Медведева

Компьютерный набор А.В. Романова

Подписано в печать 23.10.2007.
Формат 60x84/16. Бумага для множительных аппаратов.
Усл. печ. л. 15,3 Уч.-изд. л. 12,0 Тираж 250 экз.
Зак. №

ГОУВПО «Воронежский государственный технический университет»
394026 Воронеж, Московский просп., 14