

**Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное агентство по образованию**

**Санкт–Петербургский государственный университет
информационных технологий, механики и оптики**



ПОБЕДИТЕЛЬ КОНКУРСА ИННОВАЦИОННЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ ВУЗОВ

В.П.Вейко

**Опорный конспект лекций по курсу
«Физико–технические основы лазерных технологий»**

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ЛАЗЕРЫ И ЛАЗЕРНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ



Санкт–Петербург
2007

Вейко В.П. Опорный конспект лекций по курсу «Физико–технические основы лазерных технологий». Раздел: Технологические лазеры и лазерное излучение. Изд. 2–е, испр. и дополн.– СПб: СПбГУ ИТМО, 2007. – 52 с.

Учебное пособие содержит необходимые сведения о технологических лазерах и параметрах лазерного излучения. Приведены критерии выбора технологических лазеров для реализации теплового воздействия лазерного излучения. Указаны основные типы и параметры технологических лазеров.

Для студентов специальности «Лазерная техника и лазерные технологии», бакалавров и магистров направления «Техническая физика».



В 2007 году СПбГУ ИТМО стал победителем конкурса инновационных образовательных программ вузов России на 2007–2008 годы. Реализация инновационной образовательной программы «Инновационная система подготовки специалистов нового поколения в области информационных и оптических технологий» позволит выйти на качественно новый уровень подготовки выпускников и удовлетворить возрастающий спрос на специалистов в информационной, оптической и других высокотехнологичных отраслях экономики.

- © Санкт–Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, 2007
- © В.П. Вейко, 2007.

Оглавление

1. Лазерная обработка материалов: взаимосвязь между обработкой материалов и параметрами лазеров
 - 1.1. Физическая модель лазерной обработки — феноменологический подход, уравнения теплофизики, критерий применимости лазеров для обработки материалов
 - 1.2. Основные параметры излучения технологических лазеров: мощность, длина волны, длительность импульса, частота следования импульсов, пространственная структура пучка, расходимость излучения
 - 1.3. Характеристики «качества» излучения технологических лазеров: когерентность, монохроматичность, поляризация. Эксплуатационные характеристики
 - 1.4. Характерные параметры технологических лазеров
2. Устройство и принципы действия газового (CO_2), твердотельного (Nd-YAG) и полупроводникового лазеров
 - 2.1. CO_2 –лазер, схема энергетических уровней. Условия генерации. Способы накачки и устройство CO_2 –лазеров. Основные (непрерывный и импульсный) режимы генерации
 - 2.2. Nd-YAG лазер, схема энергетических уровней. Условия генерации. Способы накачки и устройство Nd-YAG лазеров. Основные (непрерывный и импульсный) режимы генерации
 - 2.3. Полупроводниковые лазеры, их особенности. Принципы создания инверсии населенностей. Конструкция простейшего инжекционного лазера, лазерные линейки и матрицы. Современные достижения и перспективы
 - 2.4. Волоконные лазеры

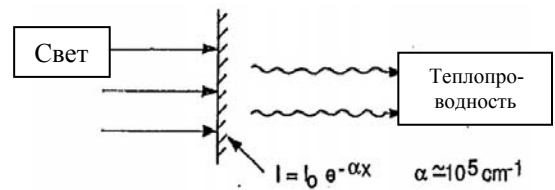
1. ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ: ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕЖДУ ОБРАБОТКОЙ МАТЕРИАЛОВ И ПАРАМЕТРАМИ ЛАЗЕРОВ

Что такое технологический лазер?

Т.к. большинство технологических применений лазеров основано на тепловом действии света, условимся к технологическим лазерам относить те лазеры, которые способны нагреть объект воздействия до температуры, когда в обрабатываемом материале происходят те или иные физические процессы, такие как: изменение фазового состояния и структуры, химические реакции, физические переходы — плавление, испарение и т.д.

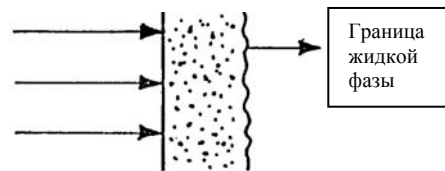
1.1 Физическая модель лазерной обработки

Поглощение лазерного излучения по закону $q(x) = q_0(1 - R)e^{-\alpha x}$ при глубине проникновения света $\delta = 1/\alpha \sim 10^{-5} - 10^{-6}$ см для металлов



Нагрев материала до точки плавления $T_{пл}$

Плавление после поглощения удельной теплоты плавления $L_{пл}$

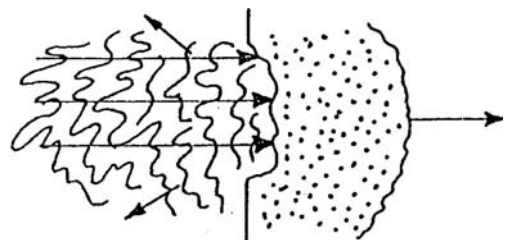


Нагрев до точки испарения (кипения)

$$T_v = T_b|_{P=P_{atm}}$$

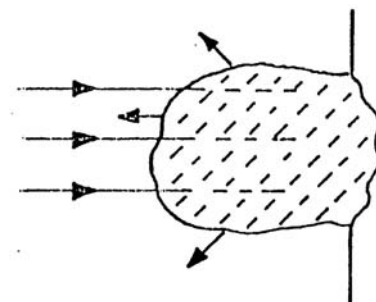
Испарение

после поглощения удельной теплоты парообразования $L_{исп}$



Движение испаряемой поверхности в глубь материала со скоростью V_0

Образование плазмы



Физические процессы, возникающие на поверхности твердых тел, при лазерном нагреве

Процессы эмиссии

- десорбция газа,
- термоэлектронная эмиссия,
- термоионная эмиссия,
- эмиссия нейтральных атомов,
- тепловое излучение (пироэлектрические измерения).

Структурные процессы

- рекристаллизация,
- структурные изменения в Fe–C сплавах (закалка стали),
- размягчение стекла и соответствующие структурные изменения,
- аморфизация стеклокерамики,
- аморфизация тонких металлических пленок,
- взаимная диффузия нагретых слоев (микрометаллургия),
- отжиг дефектов (в полупроводниках).

Поверхностные химические реакции

- локальное окисление,
- восстановление,
- термическое разложение металлоорганических соединений,
- полимеризация (разрушение) полимеров.
- воспламенение и горение.

Термомеханические эффекты (до плавления)

- тепловое расширение (в т.ч. в импульсном режиме),
- появление термонапряжений (в т.ч. управляемых),
- генерация ультразвуковых волн (дефектоскопия).

Физические переходы

- плавление,
- испарение,
- детонация активных и взрыв пассивных сред,
- оптический пробой в прозрачных диэлектриках,
- генерация ударных волн в твердых телах, жидкостях и газах.

Феноменологический (теплофизический) подход к лазерному воздействию на материалы

Как найти критерий применимости лазеров для обработки материалов в рамках принятого определения технологических лазеров, как тех, которые способны нагреть поверхность до заданной температуры T ?

Температура поверхности T зависит от мощности P , поглощенной единицей площади S : $q = P/S$, где q так называемая плотность мощности, $P = W/\tau$ (W — энергия в импульсе, τ — длительность воздействия).

Соотношение между T и плотностью мощности q может быть определено из уравнений теплопроводности типа:

$$\frac{\partial T}{\partial t} - a\Delta T = \frac{Q(x, y, z, t)}{\rho c} \quad (1)$$

где Δ — оператор Лапласа $= \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$, Q — объемная плотность поглощенного светового потока, a — температуропроводность, ρ — плотность, c — теплоемкость.

Чтобы решить уравнение (1) необходимо задать одно начальное условие, 6 граничных и определить $Q(x, y, z, t)$.

$$T_{x,y,z,0} = T_H, \quad T_{x=\infty,t} = T_{y=\infty,t} = T_{z=\infty,t} = T_H, \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x_{0,t}} = \frac{\partial T}{\partial y_{0,t}} = \frac{\partial T}{\partial z_{0,t}} = 0, \quad Q = q_0(1-R)\alpha e^{-\alpha x}$$

После решения системы этих уравнений связь между T и q выражается в виде:

$$T = f \left[\begin{array}{l} q(1-R) - \text{поглощенная мощность} \\ \rho, c, a, R, \alpha - \text{теплофизические и оптические параметры} \\ x, y, z, t - \text{аргументы} \end{array} \right]$$

Так например, для металлов решение уравнения (1) при условиях (2) для круглого источника тепла — лазерного пятна с радиусом r_0 , будет:

$$T = \frac{2q_0(1-R)\sqrt{a\tau}}{k} \left(\frac{1}{\sqrt{\pi}} - \text{ierfc} \frac{r_0}{2\sqrt{a\tau}} \right) + T_{\text{н}} \quad (3)$$

при $r_0 \gg \sqrt{a\tau}$ (импульсный нагрев)

$$T = \frac{2q_0(1-R)\sqrt{a\tau}}{k\sqrt{\pi}} + T_{\text{н}} \quad (4)$$

при $r_0 \ll \sqrt{a\tau}$ (непрерывный нагрев)

$$T = \frac{q_0(1-R)r_0}{k} + T_{\text{н}} \quad (5)$$

Формулы (4) и (5) позволяют посчитать так называемую **пороговую (критическую) плотность мощности** $q^{\text{пор}}$, необходимую для нагревания поверхности до заданной температуры T :

$$q_{\text{имп}}^{\text{пор}} = \frac{(T - T_{\text{н}})k\sqrt{\pi}}{2(1-R)\sqrt{a\tau}} \quad (6)$$

$$q_{\text{непр}}^{\text{пор}} = \frac{(T - T_{\text{н}})k}{(1-R)r_0} \quad (7)$$

Приведем значения $q^{\text{пор}}$ испарения некоторых металлов импульсным излучением, вычисленные по формуле (6). В таблице 1 указаны их основные теплофизические и оптические параметры.

Таблица 1

Материал	$T_{\text{исп}}, \text{ К}$	$k, \text{ Вт/м} \cdot \text{ К}$	$A=1-R$ (для $\lambda=1.06$)	$a \cdot 10^{-3}, \text{ м}^2/\text{с}$
Al	2793	237	0.07	0.103
Cu	2816	401	0.09	0.12
W	5953	174	0.32	0.068
Fe	3145	80	0.37	0.024

Пороги испарения для импульсного воздействия (Вт/м^2) представлены в таблице 2.

Таблица 2

Длительность импульса	Al	Cu	W	Fe
	$q_{\text{и}}$	$q_{\text{и}}$	$q_{\text{и}}$	$q_{\text{и}}$
$\tau_1 = 10^{-3} \text{ с}$	$2.4 \cdot 10^{10}$	$2.9 \cdot 10^{10}$	$1.0 \cdot 10^{10}$	$3.6 \cdot 10^9$
$\tau_2 = 10^{-7} \text{ с}$	$2.4 \cdot 10^{12}$	$2.9 \cdot 10^{12}$	$1.0 \cdot 10^{12}$	$3.6 \cdot 10^{11}$

Пороги испарения (Вт/м^2) для непрерывных лазеров (источник неподвижный) сосчитанные по формуле (7) при радиусе лазерного пятна $r_0 = 15 \text{ мкм}$, представлены в таблице 3

Таблица 3

Пятно $r_0 = 15 \text{ мкм}$	Al	Cu	W	Fe
$q_{\text{и}}$	$6.1 \cdot 10^{11}$	$7.3 \cdot 10^{11}$	$1.5 \cdot 10^{11}$	$4.9 \cdot 10^{10}$

Максимальная плотность мощности необходима для испарения Cu при $\tau = 10^{-7} \text{ с}$ $q_{\text{имп}}^{\text{пор}} = 2.9 \cdot 10^{12} \text{ Вт/м}^2$ и для непрерывного воздействия $q_{\text{непр}}^{\text{пор}} = 7.3 \cdot 10^{11} \text{ Вт/м}^2$.

Теперь легко можно задать критерий для мощности лазеров.

$$\text{Из} \quad P = qS \quad (8),$$

при $2r_0 = 30 \text{ мкм}$ ($S \approx 10^{-9} \text{ м}^2$) $P_{\text{имп}}^{\text{пор}} = 2.9 \cdot 10^3 \text{ Вт}$, $P_{\text{непр}}^{\text{пор}} = 7.3 \cdot 10^2 \text{ Вт}$.

Таким образом, при различных операциях с большинством материалов достаточная мощность (как в импульсном так и непрерывном режиме) $P \approx 10^3 \text{ Вт}$

Эту величину можно рассматривать как критерий «технологических» лазеров (конечно, все еще зависит от материала, типа операции и степени локализации излучения).

Из этих выражений следует, что время воздействия влияет только на тип операции, а не на величину мощности лазера.

Формулы (5, 6, 7, 8) полезны для оценки не только всех необходимых плотностей мощности в различных процессах — структурных, химических и т.д., включая теплофизические процессы в биотканях, подобные термокоагуляции белка и т.д., но и чтобы оценить необхо-

димое время воздействия, влияние степени фокусировки, теплофизических и оптических параметров материала и т.д.

1.2. Основные параметры технологических лазеров

1. Мощность излучения

Наиболее важный параметр теплового воздействия — плотность мощности, $q = P/S = W/\tau S$ (только для импульсного излучения).

Необходимая **плотность мощности** обеспечивается **мощностью непрерывного** $P_{\text{непр}}$ **или импульсного** $P_{\text{имп}}$ **излучения**, последняя связана со средней мощностью $\bar{P}$ как:

$$P_{\text{имп}} = \bar{P} / f \tau \quad (9)$$

Таким образом, даже при малой $\bar{P}$ можно обеспечить необходимое воздействие при коротких τ ($P_{\text{имп}} \tau = W$ — энергия импульса) — пример — фемтосекундные лазеры.

2. Длина волны излучения

должна лежать в области большой поглощательной способности материала (в видимой для металлов и других конструкционных материалов, в ИК-области для стекла, и в ультрафиолетовой — для пластмасс и полимеров). Поглощательная способность зависит, в первую очередь, от оптических характеристик материала: коэффициента отражения R , коэффициента поглощения $A = 1 - R$ и показателя поглощения α (глубина проникновения света $\delta = 1/\alpha$).

3. Длительность воздействия τ

– это длительность импульса у импульсных лазеров или время эффективного воздействия у непрерывных лазеров*.

Длительность воздействия определяет следующие характеристики процесса:

– пороговую энергию импульса $W_{\text{имп}} = \frac{kT_{\text{и}}}{2A} \sqrt{\frac{\pi}{a}} \sqrt{\tau} \quad (10),$

– глубину прогреваемого слоя $x_{\text{пр}} \sim \sqrt{a\tau}$ (11)

и количество образующейся жидкой фазы,

– величину давления отдачи паров $P_{\text{и}} \sim W_{\text{и}}/\tau$ (12),

– величину термомеханических напряжений $F_{\text{тм}} \sim \sqrt{\tau}$,

– экранирующее действие паров на падающее излучение,

– стабильность размера облученной зоны (нестабильность $\sim \sqrt{\tau}$),

– стабильность пороговой плотности мощности (зависит также от размера облученной зоны).

*Комментарии:

- эффективное время воздействия у лазеров с непрерывным излучением равно: $\tau = d_0/V_{\text{ск}}$ (13),

где d_0 — диаметр пятна в фокусе, $V_{\text{ск}}$ — скорость сканирования.

- В любом случае, чтобы использовать (13) надо, чтобы соблюдалось условие (10).

Надо также понимать, что $h_{\text{исп}} \sim V_{\text{и}}\tau$, и чем меньше τ , тем меньше толщина слоя, испаренного при воздействии одного импульса.

Возможности регулировки длительности импульса:

– **ТТ лазеры — модуляция добротности (внутрирезонаторная)**

- Nd-YAG — акусто-оптическая,
- стекло:Nd — электро-оптическая,
- рубиновый и другие — пассивная — светофильтры, примеси в газах,
- полупроводниковые лазеры — электрическая модуляция,
- другие лазеры — внерезонаторная электромеханическая модуляция

– **СО₂—мощные лазеры** — электромеханическая модуляция (прерыватель — обтюратор, невыгодно по мощности)

- пассивная — светофильтры, примеси в смеси газов

– **СО₂—волноводные лазеры** — по питанию (накачка радиочастотным разрядом)

– **ТТ лазеры — импульсная накачка** $\tau \sim 10^{-3}$ с

- импульсная накачка с модуляцией добротности, $\tau \sim 10^{-7}$ с,

- самосинхронизация мод, $\tau \sim 10^{-12}$ с
- фемтосекундные, $\tau \sim 10^{-15}$ с и аттосекундные, $\tau \sim 10^{-18}$ с импульсы,
- **N₂, Cu, эксимерный лазер и тому подобные**
 - спектрально–люминисцентные свойства среды (самоограниченные верхние переходы — малое время жизни на верхнем уровне), $\tau \sim 10^{-8}$ с
- **CO₂, Ar — непрерывного действия — сканирование пучка или движение (вращение) объекта со скоростью $V_{\text{ск}}$.**

Различные длительности импульса лазеров и варианты их реализации

Таблица 4

Длительность воздействия, с	Варианты реализации (тип лазера, режим модуляции)
Миллисекунды, 10^{-3}	Nd–YAG–лазер — режим свободной генерации, импульсный CO ₂ –лазер, сканирующий CO ₂ –лазер, сканирующий Nd–YAG–лазер, сканирующий Ar–ion–лазер
Микросекунды, 10^{-6}	Nd–YAG–лазер: акусто–оптическая модуляция, электрооптическая модуляция, диодная накачка. Импульсный CO ₂ –лазер
Наносекунды, 10^{-9}	Азотный лазер, лазер на парах меди, эксимерные лазеры
Пикосекунды, 10^{-12}	Nd–YAG–лазер: режим самосинхронизации импульсов, эксимерные лазеры
Фемтосекунды, 10^{-15}	Ti–сапфир–лазер: режим самосинхронизации импульсов, эксимерные лазеры
Аттосекунды, 10^{-18}	Ti–сапфир–лазер

4. Пространственные характеристики лазерного пучка. Модовая структура излучения (TEM_{mn})

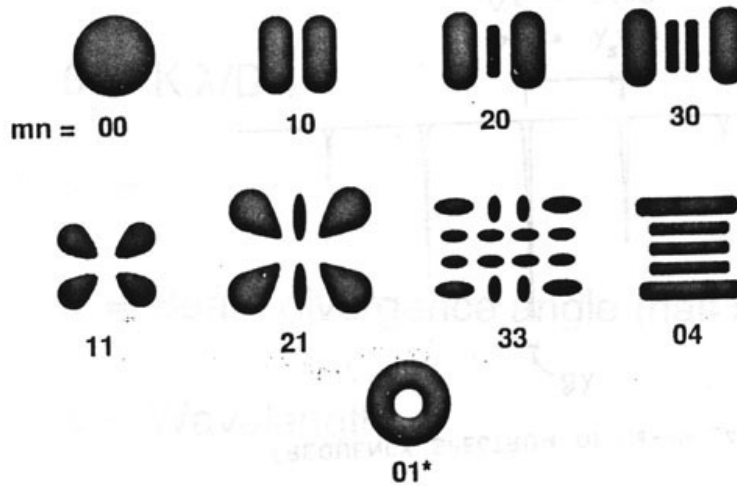


Рис.1. Модовая структура пучков некоторых низших порядков.

Угловая расходимость пучка

$$\alpha = A_d \frac{\lambda}{b_d} \quad (14)$$

где α — полный угол расходимости луча, λ — длина волны, b_d — характерный размер выходного окна лазера, ответственного за дифракцию, A_d — коэффициент, отвечающий за распределение интенсивности в поперечном сечении луча.

Величины b_d и A_d , и α для разных лазерных лучей приведены в таблице 5.

Таблица 5

Тип лазерного луча	b_d	A_d	Полный угол	Комментарии
Одномодовый (Гауссово распределение)	$2w_0$	$4/\pi = 1.26$	$1.26 \frac{\lambda}{D}$	$D \approx 2w_0$, w_0 — радиус перетяжки
Многомодовый	$D/\sqrt{N_b}$	1.26	$1.26 \frac{\lambda}{D} \sqrt{N_b}$	N_b — число отдельных лучей в поперечном сечении
Дифракционно-ограниченный	D	2.44	$2.44 \frac{\lambda}{D}$	D — диаметр нулевого максимума

M^2 — концепция качества лазерного пучка

Качество лазерного пучка часто характеризует отношением его действительной (экспериментальной) расходимости α к расходимости того же лазера, если бы он излучал одномодовый Гауссовский пучок, α_Γ :

$$M^2 = \alpha / \alpha_\Gamma \quad (15)$$

Как известно,

$$\alpha_\Gamma = \lambda / \pi w_0 = 4\lambda / \pi d_{\min} \quad (16)$$

где w_0 — диаметр пучка в перетяжке.

Покажем, как найти диаметр пучка в фокусе линзы через M^2 . Считая, что угол конусности пучка после линзы (угловая апертура) равен:

$$\alpha_\lambda = D_\lambda / 2f \quad (17)$$

получим минимальный размер пучка в фокусе линзы $d_{\min}$ как:

$$d_{\min} = 8M^2 f \lambda / \pi D_\lambda \quad (18)$$

Через M^2 можно определить все основные пространственные параметры лазерного пучка: диаметр пучка в любом сечении z по пути его распространения, радиус волнового фронта R_z при любом z , Рэлеевский радиус пучка R , глубина фокуса и размер сфокусированного пучка.

Можно показать, что фактор M^2 позволяет рассматривать реальный многомодовый пучок как одномодовый с модифицированной длиной волны $\lambda_m = M^2 \lambda$.

Инвариант Лагранжа–Гельмгольца.

Другой способ характеристики пространственно–геометрических характеристик оптических пучков основан на использовании инварианта Лагранжа–Гельмгольца J (рис. 2).

$$D\alpha = D'\alpha' = J = \text{const} \quad (19)$$

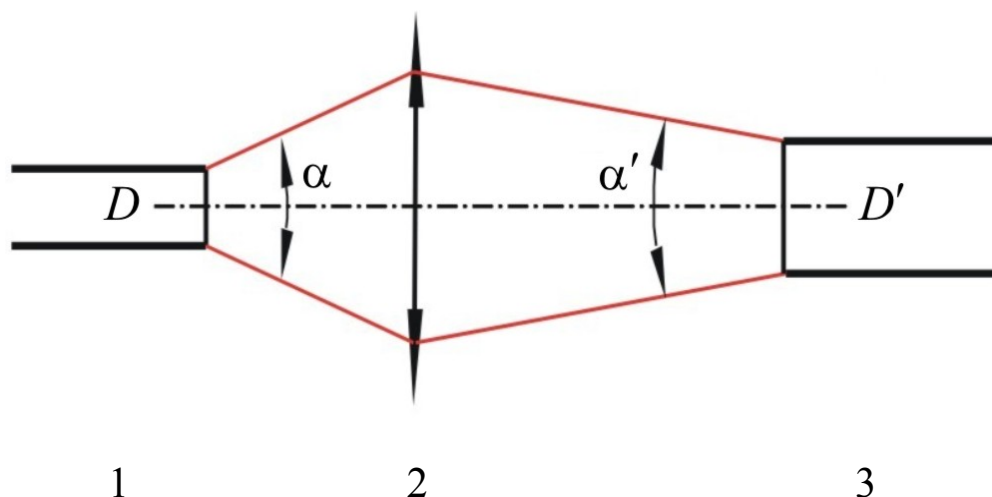


Рис.2. Схема оптической системы, состоящей из функциональных (1, 3) и согласующих (2) компонентов.

Чем меньше значение J , тем выше качество пучка.

Значения инварианта J для некоторых типов лазеров приведены в таблице 6.

Таблица 6

Тип лазера	Световой диаметр D , мкм	Полный угол расходимости α , rad	Инвариант Лагранжа–Гельмгольца J	Замечания для $\lambda \sim 1$ мкм
Одномодовый волоконный лазер	10	0.1	1	$J \sim \lambda$, равен дифр. пределу
Многомодовый волоконный лазер	200 400	0.2 0.2	40 80	$J \gg \lambda$, далеко от дифр. предела
Полупроводниковый лазер	10/100	1.04/0.12	10.4/12	$J \gg \lambda$, далеко от дифр. предела

1.3. Характеристики «качества» излучения технологических лазеров

5. Когерентность лазерного излучения

Когерентность характеризуется тем, что колебания электромагнитного поля лазерного излучения имеют постоянный во времени сдвиг фазы для двух произвольных точек пучка, что означает также неизменность формы волнового фронта (во времени). Выделяют временную и пространственную когерентность. Временная — для излучения из одной и той же точки при наличии разности длин оптического хода, пространственная — при рассмотрении фазовых свойств излучения из разных точек поперечного сечения пучка. Временная когерентность определяет монохроматичность, пространственная — направленность излучения.

В реальных условиях фаза и частота колебаний не остаются строго постоянными, т.е. степень когерентности $k \neq 1$. Экспериментально ее можно характеризовать контрастностью интерференционной картины Φ в результате расщепления лазерного пучка на две части и последующего их сложения после прохождения оптических путей различной длины:

$$\Phi = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (20)$$

В случае хаотического изменения сдвига фаз $I_{\max} = I_{\min}$, интерференционная картина отсутствует и $\Phi_{\text{ни}} = 0$. При полной когерентности излучения $I_{\min} = 0$ и $\Phi_{\text{к}} = 1$.

Строго говоря, в конечном счете, время и область существования когерентности лазерного излучения ограничены конечной спектральной шириной линии генерации (усиления) $\Delta\nu_{\text{л}}$, когда в течение времени τ могут излучаться разные ν в пределах $\Delta\nu_{\text{люм}}$. Действительно, если электромагнитные колебания представить в виде $E(\vec{r}t) = E_g(\vec{r})\cos(2\pi\nu t + \varphi(\vec{r}, t))$, то максимальное изменение относительной фазы $\varphi(\vec{r}, t)$ синхронных в момент времени $t = 0$ колебаний (с частотами, отличающимися на $\Delta\nu_{\text{л}}$) будет возрастать со временем до $\Delta\varphi \approx 2\pi\Delta\nu_{\text{л}}t$, и станет равным максимуму 2π через время

$$t = \tau_{\text{ког}} = \frac{1}{\Delta\nu_{\text{л}}}, \quad \boxed{\tau_{\text{ког}} = \frac{1}{\Delta\nu_{\text{л}}}} \quad (21)$$

Это характерное время, в течение которого возможный сдвиг фазы колебаний, лежащих в пределах ширины линии излучения, достигает максимальной величины, называется временем когерентности. Расстояние, на которое за это время распространяется излучение, называют длиной когерентности $L_{\text{ког}}$:

$$L_{\text{ког}} = c\tau_{\text{ког}} = \frac{c}{\Delta\nu_{\text{л}}} \quad (22)$$

В течение этого времени $\tau_{\text{ког}}$ и в пределах этого расстояния $L_{\text{ког}}$ излучение «помнит» о синхронности колебаний на выходе из резонатора. Значения $\tau_{\text{ког}}$ и $L_{\text{ког}}$ меняются в широком диапазоне для разных типов лазеров. В газовых лазерах, где мала $\Delta\nu_{\text{л}} = 10^3 - 10^6$ Гц, $\tau_{\text{ког}} = 10^{-3} - 10^{-6}$ с и $L_{\text{ког}} = 10^4 - 10^7$ см соответственно. В твердотельных лазерах, где излучается большое число продольных мод, $\Delta\nu_{\text{л}} \sim 10^{12}$ Гц и $\tau_{\text{ког}} = 10^{-12}$ с, $L_{\text{ког}} = 3 \cdot 10^{-2}$ м.

На высокой степени (временной) когерентности основано использование лазерного излучения в измерительной технике — длин, углов, скоростей, малых перемещений, для передачи информации на оптических частотах и т.п.

Роль когерентности в лазерной обработке материалов

1. Взаимодействие когерентного излучения с поверхностью твердого тела может сопровождаться (в среде с комплексным показателем преломления — т.е. с поглощением) возникновением поверхностной электромагнитной волны (ПЭВ), интерферирующей с падающей, что приводит к изменению энергетики процесса и к образованию периодических поверхностных структур (ППС).

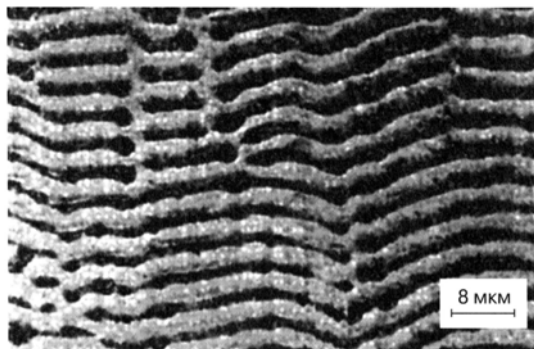


Рис.3. Периодическая структура, образовавшаяся на поверхности кремния, под действием одиночного импульса излучения Nd:YAG лазера длительностью $\tau = 1$ мс, $q = 0.7 \cdot 10^6$ Вт/см²

2. В последнее время все чаще применяются многолучевые или многоканальные системы, представляющие из себя набор 10–100 пространственно разнесенных лазеров, параллельные пучки которых собираются в одно пятно с помощью фокусирующих систем. Это характерно для полупроводниковых линеек и матриц, для многолучевых CO_2 –лазеров и т.д. При сложении двух гармонических колебаний с одинаковой частотой (световой) и произвольными амплитудами напряженности электромагнитного поля E_1 и E_2 и фазами φ_1, φ_2 образуются гармонические колебания той же частоты с амплитудой и фазой $E^2 = E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2)$.

Поэтому, если сдвиг фаз $(\varphi_1 - \varphi_2)$ случайный (хаотически изменяющийся), суммарная интенсивность в пятне ($I \sim E^2$) определяется с учетом $\cos \Delta\varphi$ и будет равна сумме интенсивностей всех источников (т.к. $\cos(\varphi_1 - \varphi_2)$ в среднем за период равен 0) $I_\Sigma = \sum_i I_i$ или, считая $I_i = \bar{I}$ $I_\Sigma = N_\text{л} \bar{I}$, где $N_\text{л}$ — количество отдельных лазеров (каналов) в системе (для двух пучков $I_\Sigma = E_1^2 + E_2^2 = I_1 + I_2 = 2I$).

Если же излучение на выходе каждого лазера когерентно, а относительный сдвиг фаз $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = 0$, то, как видно из уравнения $\cos 0 = 1$, $E_\Sigma = (E_1 + E_2)^2$, и напряженности полей складываются арифметически, а не геометрически, т.е. складываются амплитуды полей, т.е. $E_\Sigma = \sum_i E_i = N_\text{л} \bar{E}$, $I_\Sigma = N_\text{л}^2 E^2 = N_\text{л}^2 I$ — выигрыш в N раз (для двух пучков $E_\Sigma = E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 = 4E^2 = 2I$), т.е. когерентность излучения непосредственно влияет на его интенсивность.

3. При передаче изображения роль когерентности неоднозначна: различная частотно–контрастная характеристика (ЧКХ) для когерентного и некогерентного света, большая зернистость изображения и резко выраженные дифракционные явления, которые приводят к образованию спеклов. В целом ее необходимо учитывать (может быть и вредна) при передаче изображения.

6. Монохроматичность излучения

Монохроматичность особенно важна для процессов лазерных измерений, локации, связи, навигации, а также лазерной химии, разделения изотопов, медицины, биологии и т.п., кроме того, для создания

оптических систем. Она характеризуется способностью лазеров излучать в узком диапазоне длин волн и определяется соотношением

$$M_{\text{хр}} = \frac{\Delta\nu}{\nu_0} \quad (23)$$

где $\Delta\nu$ — спектральная ширина контура излучения лазера, ν_0 — центральная частота контура.

Практические значения $M_{\text{хр}}$ составляют от 10^{-2} (эксимерный лазер) до 10^{-7} (He–Ne–лазер), при этом в лабораториях достигнуты значения $M_{\text{хр}} \sim 10^{-14}$. Т.о., $M_{\text{хр}}$ лазеров значительно превышает $M_{\text{хр}}$ других спектральных источников.

На понятии монохроматичности основаны определения спектральной яркости лазеров:

$$\Phi_{\text{с}} = \frac{Q}{\Delta\nu\Delta\Omega} \quad (24)$$

где $Q/\Delta\nu$ — спектральная плотность энергии, Q — плотность энергии лазера, $\Delta\Omega$ — величина телесного угла расходимости излучения. Очевидно, что спектральная яркость лазеров значительно превышает спектральную яркость всех других источников (включая Солнце) и т.п.

7. Поляризация излучения

Поляризацией в общем случае называется нарушение симметрии векторов напряженности электрического и магнитного полей в поперечной световой волне. Поляризация, в частности, характеризует ориентацию вектора электрического поля в электромагнитной волне. Если вектор $\vec{E}$ колеблется вдоль одной линии в плоскости, перпендикулярной $\vec{C}$ — линейная (плоская) поляризация. Если сложить два линейно поляризованных пучка света при постоянном сдвиге фаз — эллиптическая поляризация, если амплитуды их равны, а сдвиг фаз $n\pi/2$ — круговая.

Не поляризованный свет (не лазерный) может хаотически принимать любую ориентацию вектора $\vec{E}$ в плоскости, перпендикулярной $\vec{C}$.

Индукированное излучение всегда имеет то же состояние поляризации, что и стимулирующее. Так что для полностью когерентного света была бы и полностью определена поляризация. Однако даже

теоретически время когерентности $\sim 10^{-12}$ с, а реально еще меньше, так что только сверхкороткие импульсы поляризованы также, как вынуждающий квант (т.е. все одинаково). Во всех остальных случаях собственно поляризация вынужденного излучения определяется природой активной среды и селективными свойствами резонатора по отношению к поляризации. Первая причина важнее всего в анизотропных веществах, к которым относятся лазерные кристаллы (рубин, ИАГ и др.).

При наклонном падении коэффициент отражения существенно различается для света разной поляризации, что может повлиять на эффективность технологических процессов, в которых наклонное отражение излучения играет важную роль:

– лазерная резка толстых металлических материалов и сверление глубоких отверстий, когда имеют место многократные отражения от стенок (т.к. угол Брюстера металлов $\varphi \sim \pi/2$, то излучение с S-поляризацией меньше поглощается при отражении и достигнет большей глубины),

– резка тонких пленок и слоев в зависимости от направления перемещения пучка при его различной поляризации.

Поляризация может также сказаться на явлениях, связанных с возбуждением ПЭВ — эффективности энерговложения при наклонных падениях пучка и образовании ППС.

Дополнительные требования

- Высокая однородность и стабильность параметров излучения
- Высокий КПД (эффективность) η
- Приемлемые эксплуатационные характеристики:
 - достаточный ресурс и надежность,
 - простота конструкции и обслуживания,
 - минимальный вес и размеры
- Экономическая эффективность

ХАРАКТЕРНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЛАЗЕРОВ

Таблица 7

Тип лазера	Длина волны λ , мкм	Энергия в им- пульсе W , Дж	Длительность им пульса τ , с	Частота повтор. импульсов f , Гц	Мощность (непр.) P , Вт	Угловая рас- ходимость α , мрад	Эффек- тивность (кпд) η , %	Приме-чания
Nd-YAG, импульсный режим								
Nd-YAG, свободная генерация	1.06	1	10^{-3}	10^2		1–10	1–3	
Nd-YAG, акусто- оптическая Q- модуляция	1.06	10^{-3}	10^{-7}	10^4		1	≤ 1	
Nd-YAG, электро оптическая Q- модуляция	1.06	$1 (10^{-3} - 10^{-4})$	$10^{-3} (10^{-8})$	$10^2 (10^5)$		1	≤ 1	
Nd-YAG, диодная накачка	1.06	10^{-2} 10^{-5}	10^{-8} 10^{-8}	10^2 10^4		1–10 1–10	1–5 1–5	
Nd-YAG, волоконного типа	1.06	$0.5 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^4$		< 1	> 1	
Nd-YAG, непрерывное излучение								
Nd-YAG, ламповая накачка	1.06				10–2000	1–10	3	Доступ на большая мощность
Nd-YAG, диодная накачка	1.06				20–100	1–10	10	До 10 кВт в исследованиях
Nd-YAG, волоконный — диодная накачка	1.06				50–10000	1	10	До 10 кВт в исследованиях

Тип лазера	Длина волны λ , мкм	Энергия в импульсе W, Дж	Длительность импульса τ , с	Частота повтор. импульсов f, Гц	Мощность (непр.) P, Вт	Угловая расходимость α , мрад	Эффективность (кпд) η , %	Примечания
СО₂, импульсный режим								
СО ₂ с радиочастотной накачкой	10.6	$5 \cdot 10^{-2}$	10^{-4}	100–2500		4	≤10	
СО ₂ –ТЕА	10.6	10^{-1} 20	10^{-5} 10^{-6}	10^2 200		2.5 10	≤10 ≤10	Некоммерческий
СО₂, непрерывный режим								
СО ₂ , с медленной продольной прокачкой	10.6				100–1000	1	10	
СО ₂ , высокой мощности	10.6				200			
С медленной продольной прокачкой, диффузное охлаждение, многолучевой	До 3 кВт/м							Обычно не используется для точного формообразования
С быстрой продольной прокачкой, конвективное охлаждение	До 5 кВт/м							
С поперечной прокачкой, конвективное охлаждение	До 100 кВт/м							
Газодинамический, конвективное охлаждение	Более 100 кВт/м							

ХАРАКТЕРНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЛАЗЕРОВ

Таблица 7 (продолжение 2)

Тип лазера	Длина волны λ , км	Энергия в им-пульсе W , Дж	Длительность им-пульса τ , с	Частота повтор. импульсов f , Гц	Мощность (непр.) P , Вт	Угловая расходимость α , мрад	Эффективность (кпд) η , %	Примечания
Другие твердотельные лазеры								
Рубиновый	0.69	0.1–1.0	10^{-3} – 10^{-7}	10		1–10	≥ 1	Применяются в офтольмологии и спектроскопии
Ti–сапфир	0.6–1.1	10^{-8}	10^{-13} – 10^{-14}	10^8		0.5	< 1	Технологии будущего (выс. качество)
Основные полупроводниковые лазеры								
GaAs	0.635–0.95	10 мВт–20 Вт (P_n до 100 Вт) (stacks 5 кВт)		10^3	0.04	250x150	> 10	Информационные технологии
InP	0.95–1.55	10–100 Вт						— •• —
Тройные полупроводники типа InGaAs	0.75–0.98	Средняя мощность 100 Вт и более				250x150	> 10	Технологии будущего (низкая цена)

ХАРАКТЕРНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЛАЗЕРОВ

Таблица 7 (окончание)

Тип лазера	Длина волны λ , мкм	Энергия в импульсе W , Дж	Длительность импульса τ , с	Частота следования импульсов f , Гц	Мощность (непр.) P , Вт	Угловая расходимость α , мрад	Эффективность (кпд) η , %	Примечания
Газовые лазеры								
На парах меди	0.51–0.57	10^{-3}	10^{-8}	10^4		1	1	
Эксимерные								
XeCl	0.308	0.1–100	10^{-8}	10–500		1x3	1	Размер пучка 10x30 мм. Средняя мощность 150 Вт
KrF	0.249							
ArF	0.193							
На ионах Ar	0.50				20	0.5–1	<1	Стереолитография
N ₂	0.34	10^{-3} – 10^{-4}	10^{-8}	10^4	0.1	~1	<1	Обработка пленок
He–Cd	0.44				0.1	0.5	~1	Стереолитография
He–Ne	0.63	10^{-6} – 10^{-3}	~ 10^{-7}	10^3		0.2–1	<1	

Перспективы развития технологических лазеров

Новые спектральные диапазоны	Высокая мощность	Короткие импульсы
Эксимерные лазеры глубокого УФ	волоконные лазеры (с полупроводниковой накачкой) — до 50 кВт	Лазеры Ti–сапфир (до 10^{-18})
Рентгеновские лазеры (с ядерной накачкой)	YAG–Nd (с диодной накачкой) до 1 МВт	Эксимерные лазеры (до 10^{-15} , высокая мощность)

Лазеры на красителях	CO ₂ –лазеры	На стекле Nd (до 10 ⁻¹² , максимальная мощность)
Лазеры на свободных электронах		
Высокая стабильность, компьютерное управление, низкая цена		

ОСНОВНЫЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

CO₂–лазеры: обработка материалов, медицина, научные исследования

Твердотельные (YAG:Nd): обработка материалов, датчики, спектроскопия, научные исследования

Ионные лазеры (Ar): печать, датчики, развлечения, обработка материалов, научные исследования

Полупроводниковые: оптическая связь, хранение информации, печать, сканеры, юстировка, датчики, научные исследования, медицина

Волоконные: оптическая связь, медицина, промышленность

Эксимерные: микроэлектроника, медицина, научные исследования

На парах металлов (Cu): научные исследования, обработка материалов

He–Ne: сканирование, измерения, датчики, юстировка, голография, научные исследования

На красителях: спектроскопия, научные исследования

2. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИПЫ ДЕЙСТВИЯ ГАЗОВОГО (CO₂), ТВЕРДОТЕЛЬНОГО (ND-YAG) И ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ЛАЗЕРОВ

2.1. Газовые лазеры

Преимущества

- 1) **Высокая оптическая однородность** активных газовых сред, что приводит к
- 2) **малой угловой расходимости** – порядка дифракционной.
- 3) **Малая плотность** газовых активных сред, что приводит к сужению контура усиления и **высокой монохроматичности**.
- 4) **Высокая мощность**, непрерывный и импульсный режимы
- 5) **Высокий КПД**
- 6) Вследствие 1), 2), 3) и 4)
высокая яркость и высокая плотность мощности, что наиболее важно в лазерных технологиях обработки материалов.

Газовые лазеры

Лазеры на нейтральных атомах (He-Ne)
0.63 мкм

Ионные лазеры (Ar⁺ ионы нейтральных атомов) 0.49 мкм

Молекулярные лазеры (CO₂, CO, N₂)
0.6, 5.0, 0.34 мкм

Лазеры на парах металлов (Cu, Au, Pb)
0.51 мкм,
0.62 мкм

Ионные лазеры ионы металлов (He-Cd)
0.325 мкм

Эксимерные лазеры (ArF, KrF, XeCl) 0.193, 0.248, 0.348 мкм

Основные типы газовых лазеров

СО₂–лазер

Работа СО₂–лазера практически всегда происходит на смеси газов СО₂–N₂–He (1:1:3) (рис. 4).

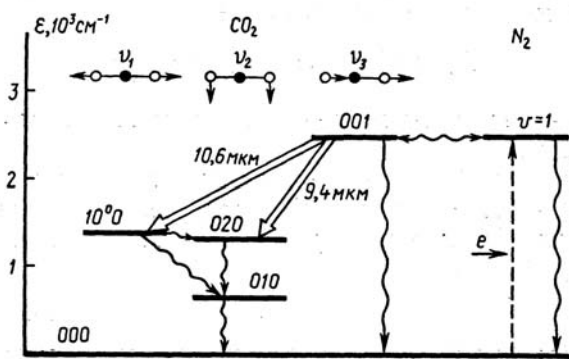


Рис.4. Схема энергетических уровней

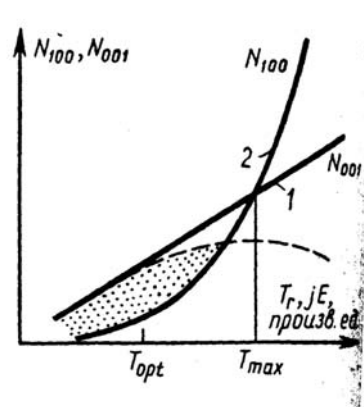


Рис.5. Оптимальная T для СО₂–лазеров

Замечания: Высокая степень инверсии населенностей в СО₂–лазерах определяется тремя положениями:

1. Вероятность возбуждения уровня 001 СО₂–молекул из-за резонансного характера возбуждения этого уровня и уровня $v = 1$ молекул N₂ при стандартных параметрах газового разряда может достигать 90% (вибрационная эффективность).

2. Молекулы N₂ обеспечивают эффективную накачку верхнего лазерного уровня СО₂–молекул благодаря столкновениям, т.к. $E_{001}^{CO_2} \approx E_{v=1}^{N_2}$ и большому времени жизни в состоянии $v = 1$.

3. Молекулы He обеспечивают убывание населенности на нижних уровнях СО₂–молекул 100, 020 и хороший теплоотвод.

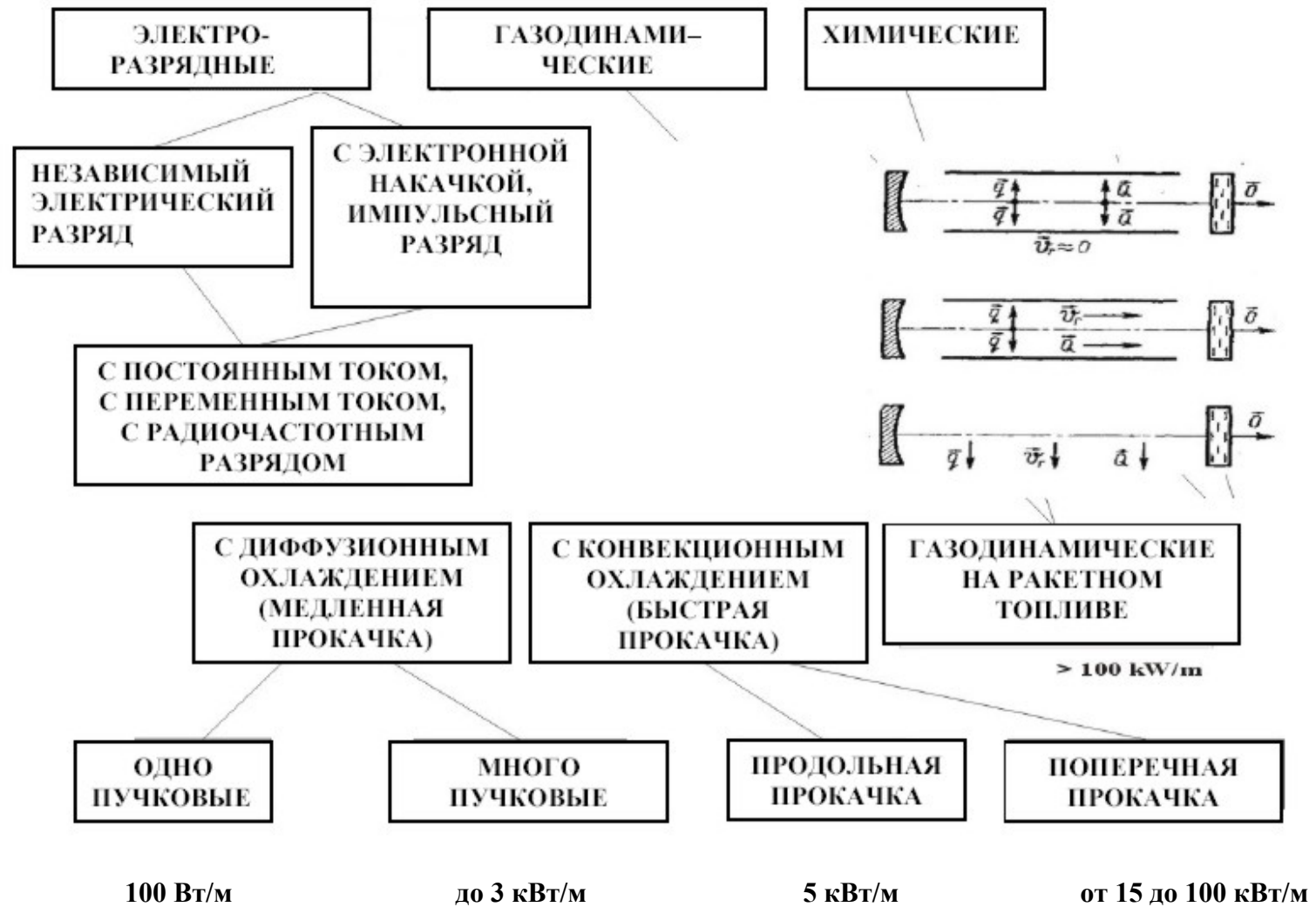
Температурные условия в СО₂ – лазерах играют важную роль (Рис.5).

Классификация CO₂-лазеров

По способу создания инверсии населенностей

По типу электрического разряда

По способу охлаждения



СО₂-лазер с диффузным охлаждением (ДО) (ДО СО₂-лазер)

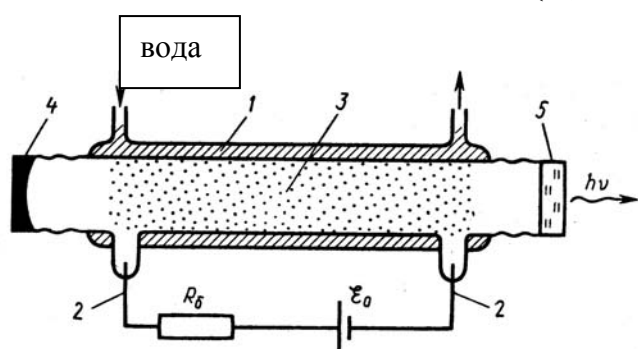


Рис.6. Схема ДО СО₂-лазера:
1 — трубка водяного охлаждения
2 — вводимый ток;
3 — газовый разряд;
4 — отражающее зеркало 100%;
5 — выходное зеркало

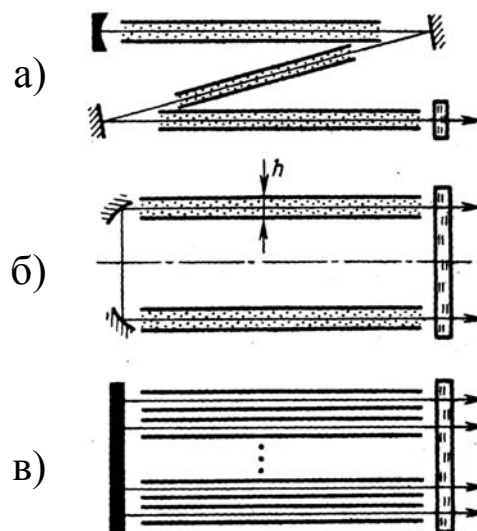


Рис.7. Пути повышения мощности и уменьшения длины ДО СО₂-лазера:
а) Z-образная трубка;
б) разорванное полукольцо;
в) многоканальная трубка

Параметры некоторых ДО СО₂-лазеров

Таблица 8

Фирма, страна	Модель	Мощность излучения		Диаметр пучка, мм	Угловая расходимость, мрад
		одномодового TEM ₀₀ , Вт	многомодового TEM ₀₀ , Вт		
Ferranti PCd, Великобритания	MF-400	400	—	6	—
Foton Sourcis, США	MF-400	400	—	—	—
	T1000	1000	—	10	1.55
	V-1200	1100	—	—	—
Лазерная техника, Франция	LT-450	500	600	10	1...3
	KELT51	600	—	12	2
Coherent ad C2, США	725	725	875	—	—
ИПЛИТ РАН, Россия	МТЛ-2	—	2500	45	8.4
Исток, Россия	ИЛГН-701	120	—	4	5

Устройство СО₂-лазера

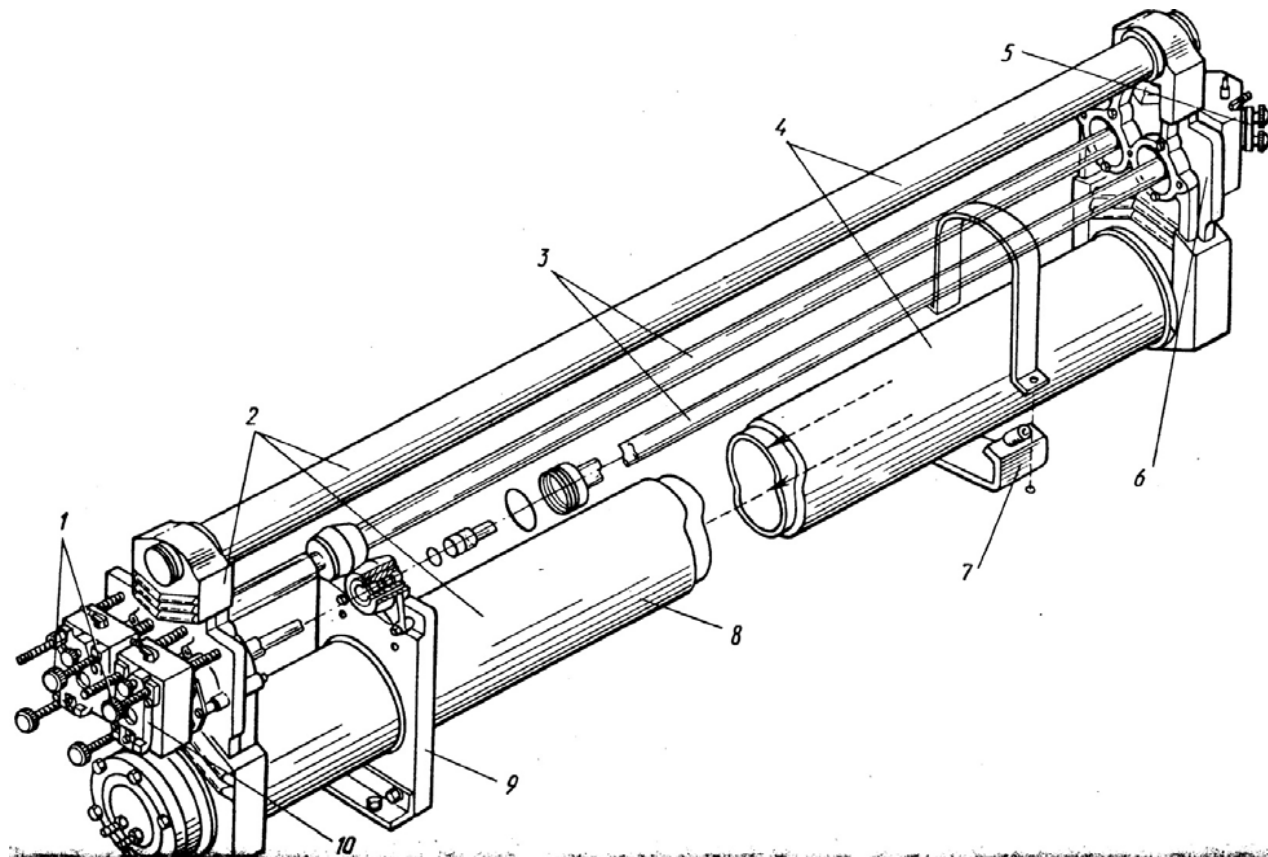


Рис.8. Конструкция ДО СО₂-лазера, модель Coherent (США)

1 — регулировочный винт, 2 — трубки оптического резонатора, 3 — газоразрядные трубки, 4 — трубки охлаждения, 5 — вращающиеся зеркала, 6 — элементы оптического стола, 7 — деталь крепежа резонатора, 8 — стальные трубы, 9 — крепежные компоненты электродов на зеркала, 10 — крепежные компоненты зеркал

Некоторые принципы конструирования CO_2 -лазеров

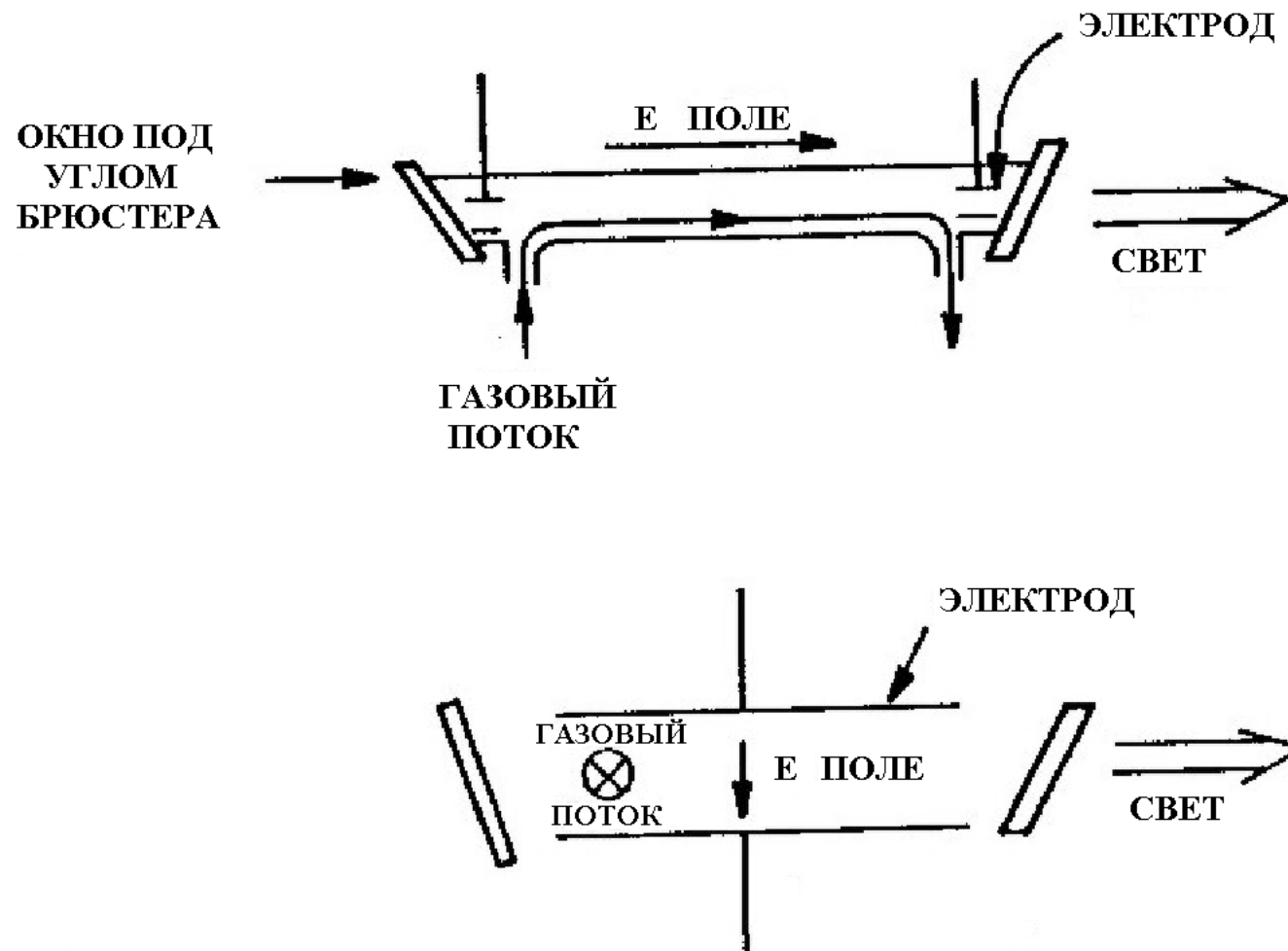


Рис. 9. Развитие принципов конструирования CO_2 -лазеров

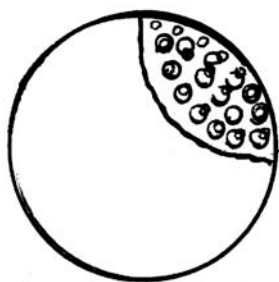
**СО₂–лазер
(непрерывный режим)**

- **Малой мощности (от 3 до 100 Вт на метр)**
 - В основном отпаянная трубка или волновод
 - Одномодовые
 - Области применения: медицина,
датчики,
научные исследования

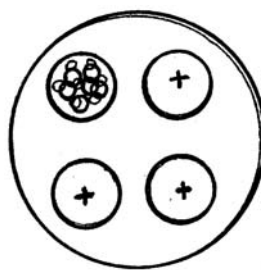
- **Средней мощности (от 100 до 3000 Вт на метр)**
 - Медленная продольная прокачка до 900 Вт
 - Быстрая продольная прокачка (>350 Вт на метр)
 - Одномодовое или “околоодномодовое” излучение (порядка 2–х дифракционных пределов при 1000 Вт)
 - Область применения: обработка материалов

- **Большой мощности (>3 кВт на метр)
(коммерческое исполнение до 25 кВт)**
 - Быстрая продольная прокачка (до 6000 Вт)
 - Поперечное возбуждение (>5000 Вт)
 - Обычно многомодовое излучение
 - Области применения: промышленное, военное

Многолучевые CO₂-лазеры с диффузным охлаждением

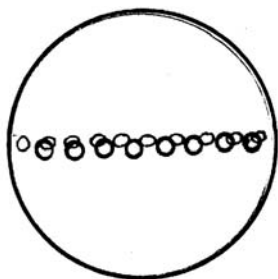


МТЛ-2
61 трубка
2.5 кВт
МТЛ-4
85 трубок
4.0 кВт
 $M^2 \sim 3$, длина
1.7 м

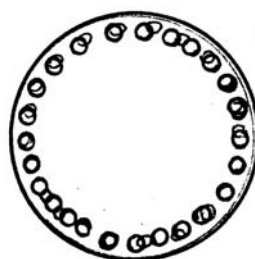


ТЛ-6
31 x 4 = 124 трубок
ки
6.0 кВт
 $M^2 = 3$
 $L = 2$ м

Многоканальные однолучевые

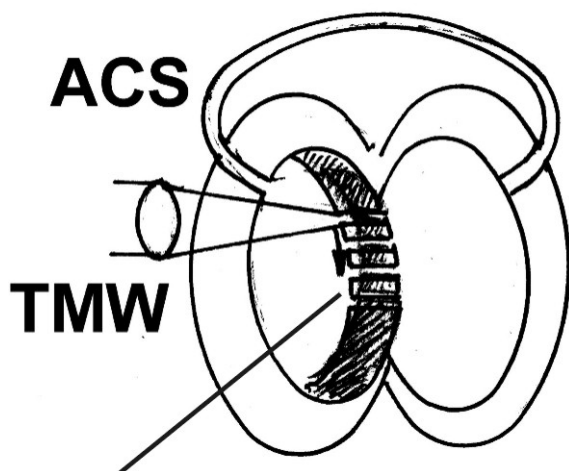


ТЛ-500
9 трубок
 TEM_{00}
500 Вт
 $M^2 = 1$
 $L = 1.7$ м



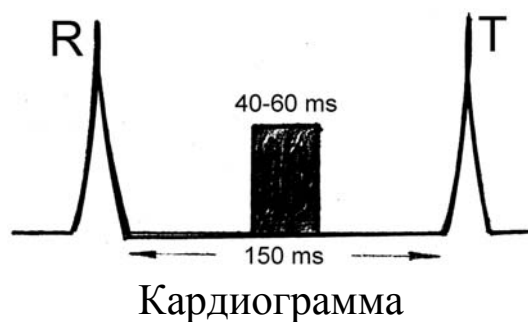
ТЛ-1000
20 трубок
 TEM_{00}
1 кВт
 $M^2 = 1$
 $L = 2$ м

Трансмиокардиальная лазерная васкуляризация (вместо аутокоронарного шунтирования)



десятки каналов

Лазерные установки для операции на сердце PLC C₀ (США) — 1 млн. \$,
«Геном 4; 5» (Россия) — 100000 \$



С 1997 по 2000 г. в России
прооперировано 15 человек
В США 1 операция — 45000 \$
В России 1 операция — 5500 \$

2.2. Твердотельные лазеры

Доминируют YAG:Nd

- **Длины волн: 1064, 1319, 532, 355, 266 нм**
- **Мощность непрерывного излучения (с ламповой накачкой):
10 – 1800 Вт (TEM₀₀ до 30 Вт)**
- **Мощность непрерывного излучения (с диодной накачкой):
1 мВт — 10 Вт, TEM₀₀**
- **Мощность в импульсе (с ламповой накачкой):
до 100 Дж в мс импульс и до 1,4 Дж в нс**
- **Мощность в импульсе (с диодной накачкой):
до 20 мДж в нс импульсе, дес. мкДж при 104 Гц**

Другие среды, активируемые Nd: стекло, YLF (иттрий-литиевый фторид), GSGG (галлий-скандий-гадолиниевый гранат), александрит (Cr–BeAl₂O₄)

Другие материалы: рубин (694 нм), Er: YAG (2.9 мкм), Ho: YAG (2.1 мкм)

Перестраиваемые лазеры с регулируемой длиной волны: александрит (720 – 780 нм), Ti:Сапфир (600-1100 нм)

Области применения:

- **обработка материалов,**
- **медицина,**
- **испытания и измерения под водой,**
- **научно-исследовательские и опытно-конструкторские разработки**

Преимущества твердотельных лазеров

- Высокая удельная мощность;
- Высокое качество при большой мощности (TEM_{00});
- Высокий КПД (с диодной накачкой) $> 20\%$;
- Большая энергия (до кДж/импульс);
- Широкий диапазон длин волн;
- Широкий диапазон длительностей импульсов (от 10^{-2} до 10^{-15} с);
- Совместимость длин волн с оптическим волокном;
- Возможность получения генерации в волокнах и высокие характеристики этих лазеров
- Большая яркость;
- Высокая надежность

Основные виды твердотельных лазеров

- Nd-YAG — 1.06, 0.53, 0.355, 0.266 мкм;
- Nd-стекло — 1.06, 0.53, 0.355, 0.266 мкм;
- Er-стекло — 1.54 мкм;
- Рубиновый — 0.63 мкм;
- Ti-сапфир — 0.66–0.98 мкм;
- Cr-BeAl₂O₄ (александрит) — 0.72–0.78 мкм.

Nd-YAG лазер (с оптической накачкой)

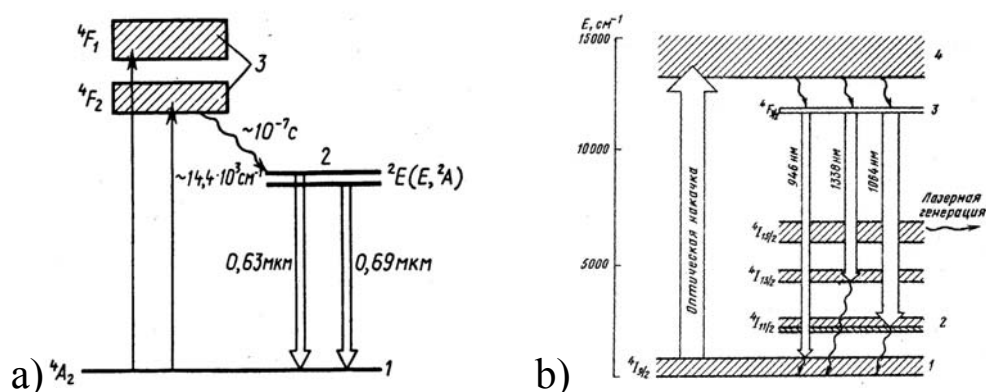


Рис.10. Схема энергетических уровней: а) трехуровневая (Ru), б) четырехуровневая (Nd-YAG, стекло)

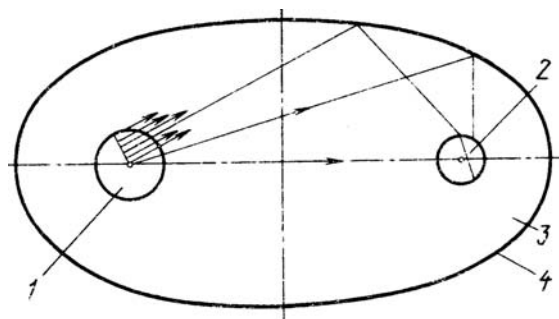


Рис.11. Система оптической накачки

1 — лампа, 2 — активный элемент, 3 — резонатор, 4 — отражающее покрытие

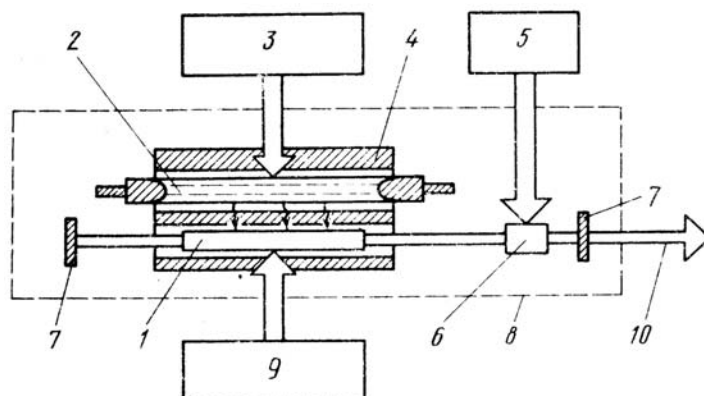


Рис.12. Принципиальная схема твердотельного лазера с оптической накачкой

1 — активный элемент, 2 — лампа, 3 — блок питания, 4 — резонатор, 5 — блок управления, 6 — элемент управления, 7 — зеркала резонатора, 8 — корпус лазера, 9 — охлаждение, 10 — излучение лазера

Основные режимы работы твердотельных лазеров

Таблица 9

Тип лазера	Режим работы	Длина волны
Nd–YAG	Свободная генерация	10^{-3} – 10^{-4}
Nd–YAG	Q–модуляция (акусто–оптическая, электро–оптическая)	10^{-7} – 10^{-8}
Nd–YAG	Самосинхронизация мод	10^{-11} – 10^{-12}
Ti–Al ₂ O ₃	Синхронизация мод	10^{-13} – 10^{-15}

Основные параметры твердотельных лазеров с регулируемой длиной волны

Таблица 10

Кристалл	Диапазон длин волн λ , мкм	Режим		Средняя выходная мощность Вт	Источник накачки
		непрерывный	импульсный		
Ti ³⁺ : Al ₂ O ₃ (Ti–сапфир)	660 ... 986	+		0.07	Ar ⁺ –лазер
Cr ³⁺ : BeAl ₂ O ₄ (александрит)	701 ... 826	+	+	100	Arc лампа/ Имп. лампа
Гранаты					
Cr ³⁺ : Cd ₃ Sc ₂ Ga ₃ O ₁₂ (GSGG)	742 ... 842	+	+	0.25	Kr ⁺ –лазер, лампа
Cr ³⁺ : Cd ₃ Sc ₂ Al ₃ O ₁₂ (GSAG)	~780	+		0.09	Kr ⁺ –лазер
Фториды					
Cr ³⁺ : KZnF ₃	785 ... 865	+		0.085	Kr ⁺ –лазер
Co: MgF ₂	1500 ... 2300	+	+		Nd:стекло лазер
Nd: LaF ₃	172		+		Лазер
Ce: YLF	325		+		
Ce: LaF ₂	286		+		

Cr^{3+} : $\text{Be}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_3)_6$ (изумруд)	729 ... 809 685	+	+	0.32	Kr^+ –лазер Лампа
Cr^{3+} : ZnWO_4	980 ... 1050		+		Kr^+ –лазер

КОМЕРЧЕСКИ ДОСТУПНЫЕ YAG:Nd ЛАЗЕРЫ

Таблица 11

Непрерывное излучение, ламповая накачка

Модель	Фирма, страна	λ , нм	ТЕМ	Мощность Вт	Примечания
ИЛТН–121	Туламашзавод, Россия	1064	mn	1000	
YL117–4B	NEC/IBBGMBH, Германия	1064	–	1200	Четыре активных элемента
400 Series	US LaserCorp., США	1064	mn	900–1000	Четыре модуля

Импульсный режим, непрерывная ламповая накачка

Модель	Фирма, страна	λ , нм	Частота следования имп. кГц	$\tau_{\text{имп}}$, нс	Средняя мощность Вт	Примечания
ЛТИ–533	“ПОЛЮС”, Россия	1079	1–5	150	20	
117R–0/QS–18	Квантроникс, США	1067	1	80	18	Q–модуляция

Импульсный режим, импульсная ламповая накачка

Модель	Фирма, страна	λ , нм	Частота следования имп. Гц	$\tau_{\text{имп}}$, нс	Энергия в им- пульсе, Дж	Примечания
ЛИТ–600	“Завод Ильича”, Россия	1064	150	2.5 мс	4.6	
ЛТИ–212М	“ПОЛЮС”, Россия	1064	100	0.25 мс	1.5	
–	Spindler Hayer, Германия	1064	25	–	0.6	Свободная генерация КПД= 5%

Непрерывное излучение, диодная накачка

Модель	Фирма, страна	λ , нм	Мощность мВт	Электрическая мощность на- качки	Цена, тыс. \$	Способ накачки	Примечания
--------	---------------	----------------	-----------------	---	------------------	-------------------	------------

DPY 301	ADLAS, Германия A–B Lasers, США	1064	1000	15	7–20	Продольный	Мода ТЕМ ₀₀ , диапазон температур 0–30 ⁰ С
---------	--	------	------	----	------	------------	--

КОМЕРЧЕСКИ ДОСТУПНЫЕ YAG:Nd ЛАЗЕРЫ

Таблица 11 (окончание)

Непрерывное излучение, диодная накачка

Модель	Фирма, страна	λ , нм	Мощность мВт	Электрическая мощность накачки	Цена, тыс. \$	Способ накачки	Примечания
ALC 1064–150P	Amoco Lasers, США	1064	150	–	14	Продольный	Мода ТЕМ ₀₀ , диапазон температур 0–40 ⁰ С
ЛТН–302	“ПОЛЮС”, Россия	1064	30–100	2–3	–	–	

Импульсный режим, диодная накачка

Модель	Фирма, страна	λ , нм	Энергия в имп., мкДж	Частота след. имп., кГц	Способ накачки	Цена, тыс. \$	Примечания
DPY–203	ADLAS, Германия A–B Lasers, США	1320	10	2	Продольный	7–20	τ =200–500 нс
7950–Y106	Спектрафизикс, США	1064	5/10	До 10	Волоконный	25	τ =50нс
LDP–2QW	Laser Diode Products, США	1064	100	7	Поперечный	10.229	Модуляция коэф. усиления
ЛТИ–508	“ПОЛЮС”, Россия	532	–	–	–	–	

2.3. Полупроводниковые лазеры

Преимущества:

- Высокий КПД ($\approx 50\%$)
- Малые габариты
- Большая мощность (до 2 кВт — 1999
5 кВт — 2000, 10 кВт — 2004)
- Совместимость длины волны с оптическим волокном
- Регулирование длины волны
- Малое время включения–выключения
- Удобство управления
(временными характеристиками включительно);

Недостатки

- Плохое качество излучения —
высокая асимметричная расходимость

Принципы устройства и работы полупроводниковых лазеров

Лазерная генерация в п/п лазерах возможна в активной среде, где преобладает излучательная рекомбинация, когда возникает неравновесное состояние с инверсией населенностей — большинство частиц находятся в верхней зоне (проводимости).

Существуют различные способы возбуждения в п/п лазерах. Для того, чтобы получить инверсию населенностей применяют: инжекцию носителей в р-п переход, возбуждение электронов пучком быстрых электронов, оптическую накачку, прямое электрическое возбуждение — пробой полупроводниковой структуры и т.д. Наибольший интерес представляет первый тип – инжекционные лазеры.

Инверсия населенностей создается здесь приложением электрического напряжения в прямом направлении (Рис. 13)

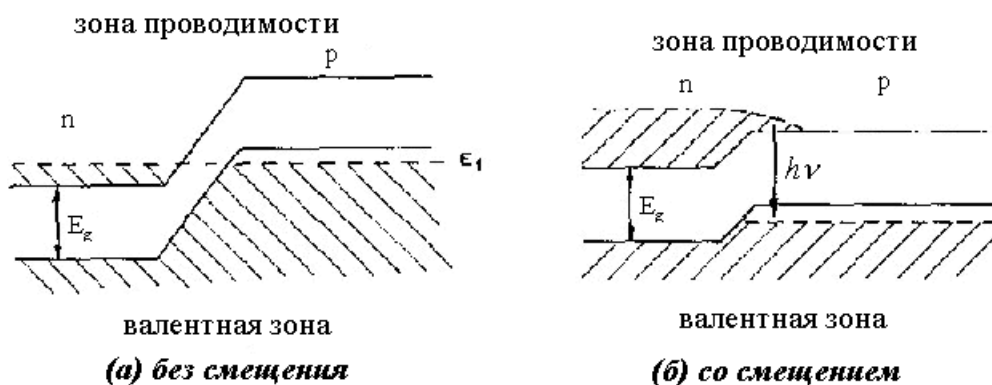


Рис.13. Зонная структура п/п вблизи р-п перехода.

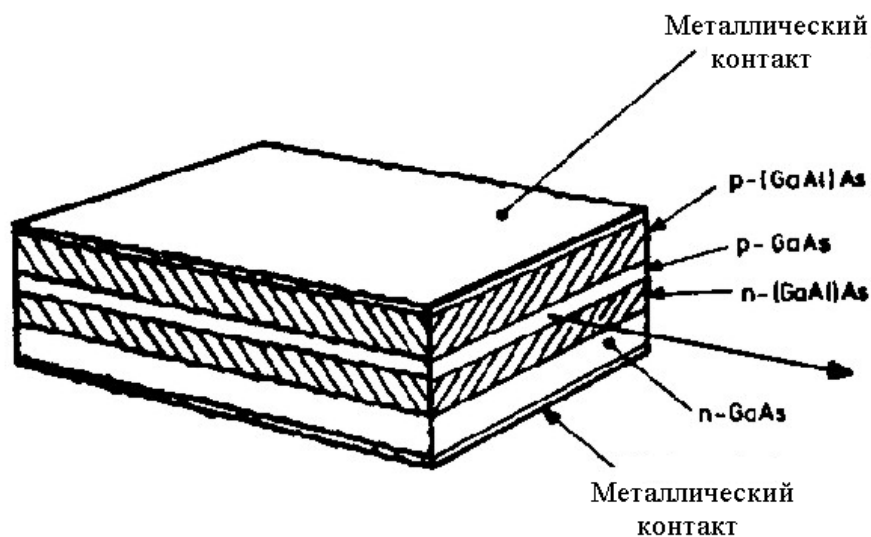


Рис.14. Изображение двойной слоистой гетероструктуры

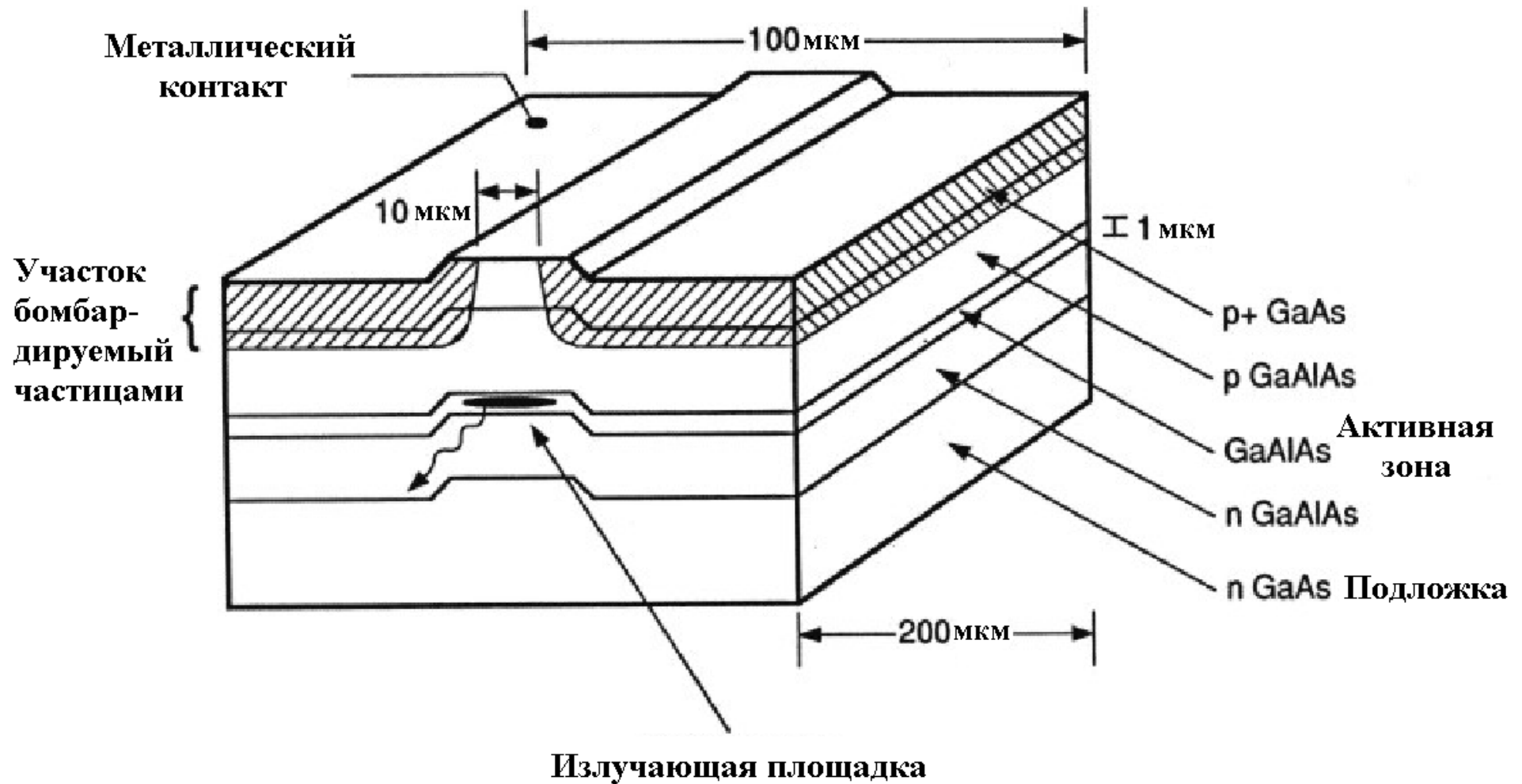


Рис. 15. Стандартная конструкция полупроводникового лазера.

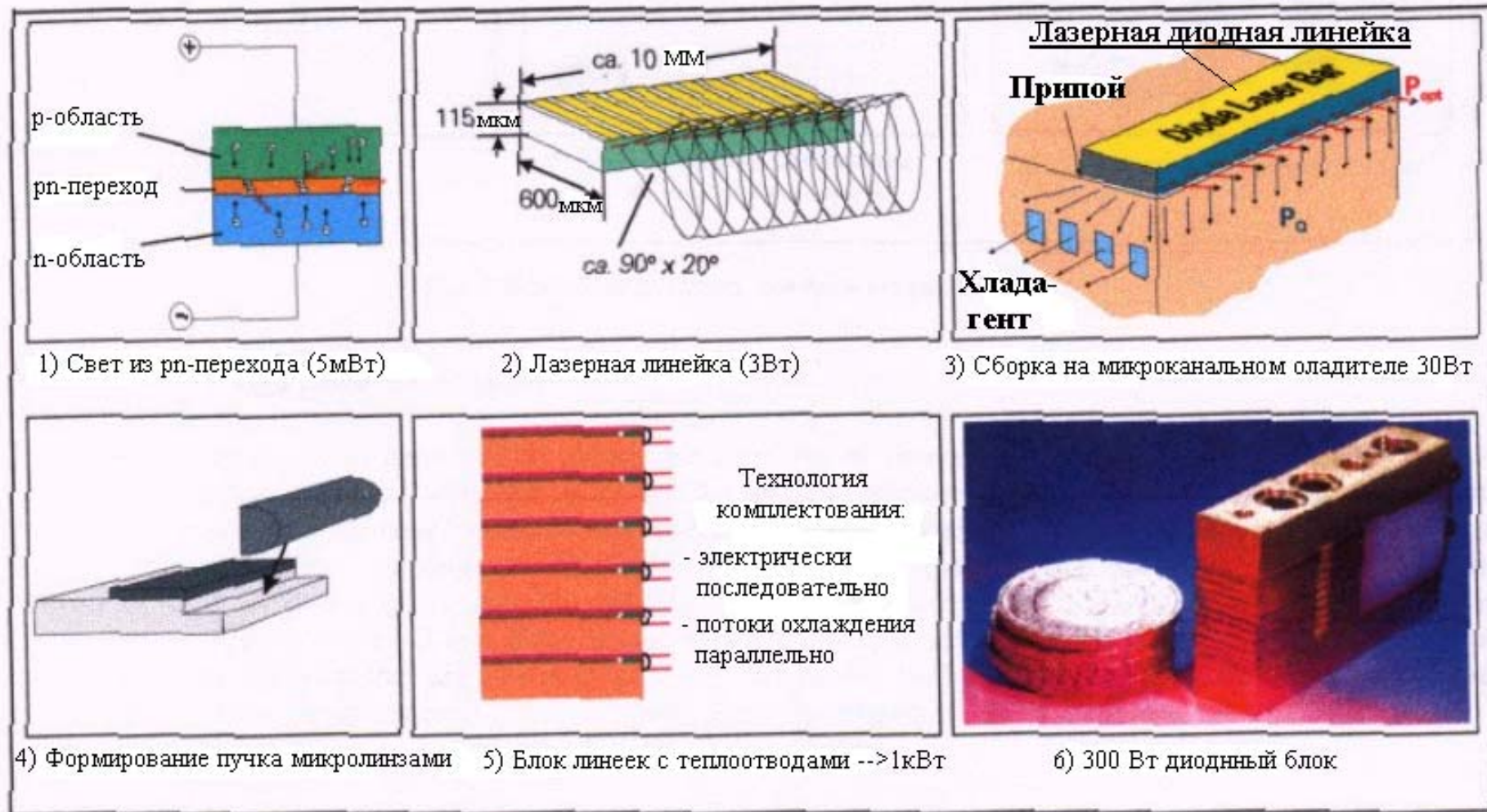


Рис. 16. От диода к мощному лазеру

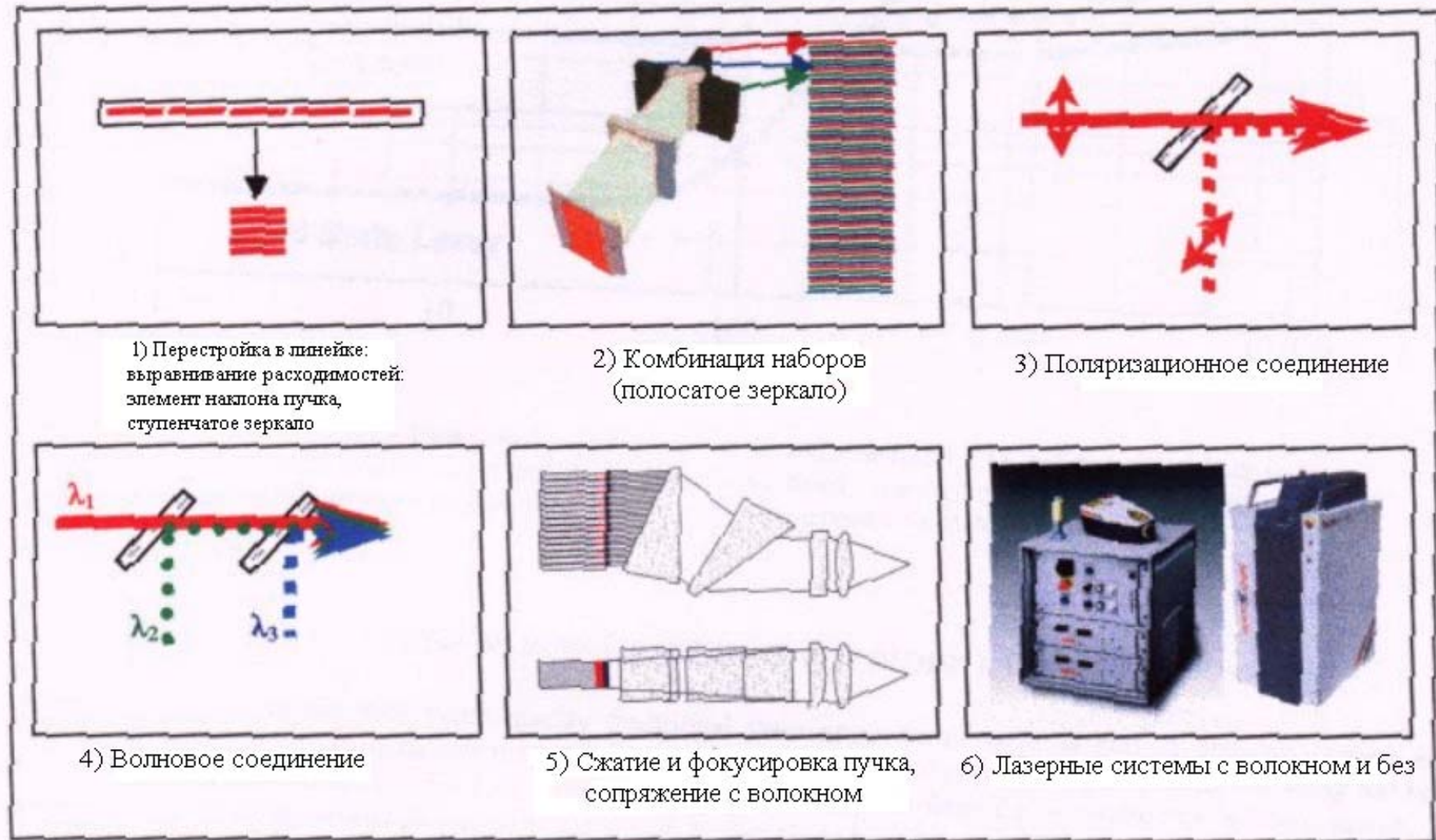


Рис. 17. Перестройка, комбинация и формирование пучка

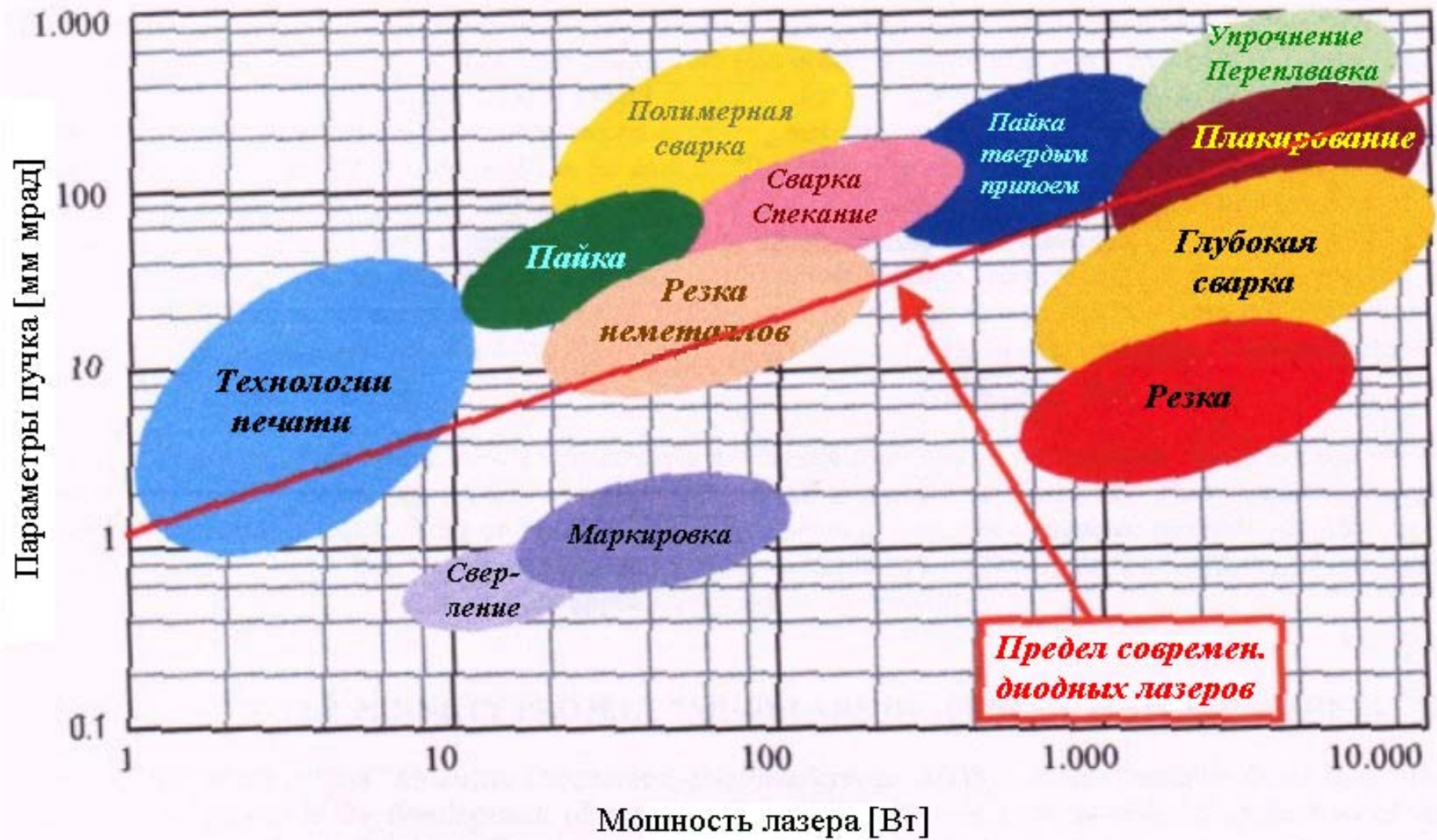


Рис. 18. Параметры лазерного пучка при обработке материалов

2.4. Волоконные лазеры

По сути дела представляют собой конструктивную разновидность твердотельных лазеров, генерирующих на стеклянных волокнах твердотельных активных материалов. Однако в связи с развитием методов диодной накачки на данном этапе их целесообразно выделить в отдельную группу. В некотором смысле волоконный лазер осуществляет активное когерентное суммирование излучения полупроводниковых (ПП) лазеров накачки (КПД преобразования в когерентное излучение $\approx 90\%$), и таким образом вбирает в себя все достоинства ПП лазеров, не имея их недостатков плюс оптимальная конструкция твердотельных лазеров.

Преимущества:

- высокий КПД до 40 % и более от розетки;
- высокое качество (малая расходимость) излучения — до $M^2 \approx 1.05$ при выходной мощности 100 Вт;
- возможность генерации как непрерывного, так и коротких (до нс) импульсов излучения с большой частотой (20 кГц и более);
- рекордно большие мощности излучения — до 50 кВт (в 2005 г.) и это не предел;
- эффективность генерации на многих длинах волн (1.06 мкм (Nd, Yt), 1.56 мкм (Er), 1.75–2.0 мкм (Tu) и др.) для обработки материалов (1.06 мкм), медицины (1.75–2.0 мкм) и связи (1.56 мкм);
- удобство электрического управления временными и переключательными характеристиками;
- электрическая (по существу) накачка (диодов) электроэнергией с низким напряжением;
- естественная волоконная доставка излучения;
- высокая надежность и большой ресурс работы более 1 млн. часов;
- высокая стабильность параметров $\pm 2\%$, устойчивость к механическим, тепловым, загрязненности окружающей среды (пыли) и другим воздействиям;
- высокая пространственная и спектральная яркость;
- малые массогабаритные размеры.

На рис. 19–22 приведен внешний вид некоторых типичных узлов волоконных лазеров.

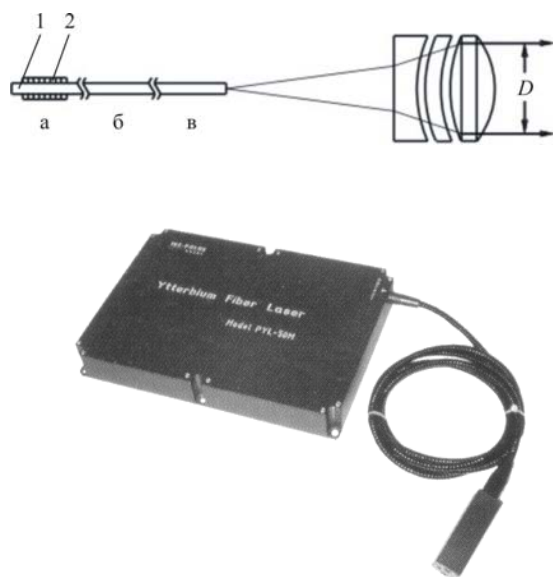
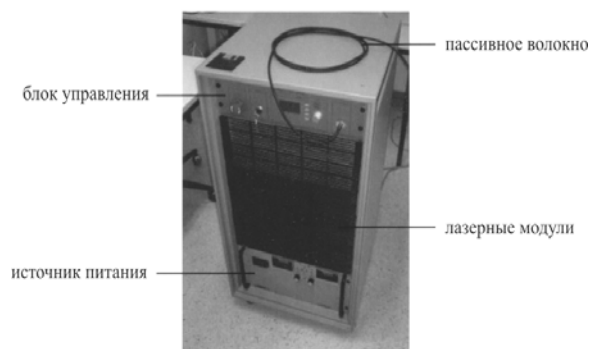
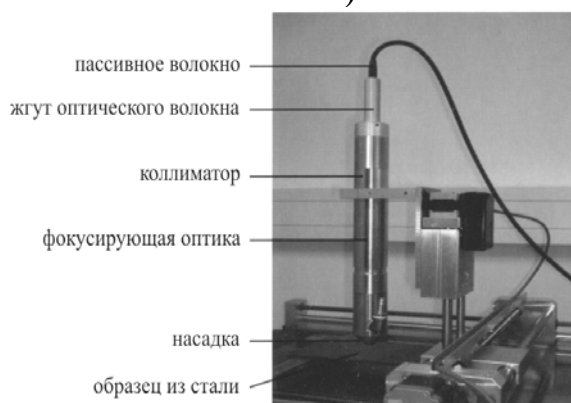


Рис.19. Задающий генератор (а), усилитель (б) и выходной коллиматор волоконного лазера и общий вид импульсного лазера мощностью 200 Вт (1 — одномодовое активное оптическое волокно, 2 — модуль ПП накачки).



а)



б)

Рис.20. 700 Вт иттербиевый волоконный лазер непрерывного действия (а) и его рабочая станция (б).

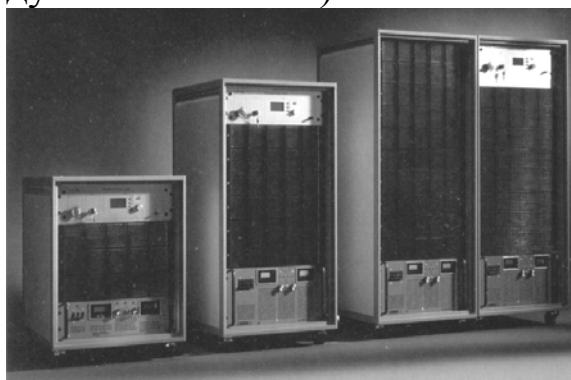


Рис.21. Мощные иттербиевые лазеры 500 Вт, 1 кВт, 2 кВт.

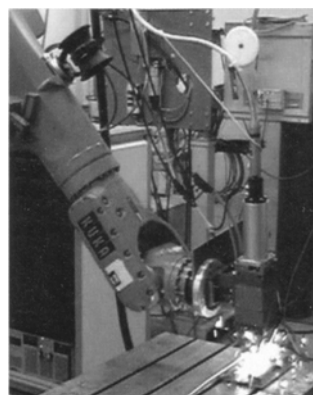


Рис.22. Лазерный обрабатывающий центр с роботом для сварки Al.

Мощные волоконные лазеры на иттербии ($\lambda = 1050 - 1080$ нм)

Основные характеристики:

Непрерывный режим

- выходная мощность — до 50 кВт;
- возможна модуляция выходного излучения с частотой 5 кГц;
- КПД — 25 %;
- выход — волокно 200 мкм;
- качество пучка — $M^2 = 2.5 - 6$ мрад;
- срок службы — > 100千очасов;
- габариты — 86x81x150 см;
- вес — 100 кг при 10 кВт.

Импульсный режим:

- средняя выходная мощность — до 200 Вт;
- длительность импульса — 30–100 нс;
- энергия в импульсе — 0.5–2 мДж;
- частота следования импульсов — 20–100 кГц
- волоконный выход;
- внешнее цифровое управление;
- компактный с воздушным охлаждением;
- коллимированный выходной пучок с $M^2 = 1.4 - 5$;
- срок службы — > 100千очасов;
- КПД — более 10 %.

Список рекомендуемой литературы

1. Голубев В.С., Лебедев Ф.В. Физические основы технологических лазеров. – М.: Высшая школа, 1987.
2. Вейко В.П., Метев С.М. Лазерные технологии в микроэлектронике. – София: Изд. Болгарской АН, 1991.
3. Вейко В.П. Лазерная обработка пленочных элементов. – Л.: Машиностроение, 1986.
4. Турыгин И.А. Прикладная оптика. – М.: Машиностроение, 1966.
5. Лазеры в технологии. Под ред. М.Ф. Стельмаха. – М.: Энергия, 1975.
6. Крылов К.И., Прокопенко В.Т., Митрофанов А.С. Применение лазеров в машиностроении и приборостроении. – Л.: Машиностроение, 1978.
7. Шахно Е.А. Математические методы описания лазерных технологий. Учебное пособие. – СПб: СПбГИТМО (ТУ), 2002.
8. Яковлев Е.Б. Лазерное оборудования, автоматизация и контроль технологических процессов. Конспект лекций. Часть I. Учебное пособие. – СПб: СПбГИТМО (ТУ), 2002.
9. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967.



В 2007 году СПбГУ ИТМО стал победителем конкурса инновационных образовательных программ вузов России на 2007–2008 годы. Реализация инновационной образовательной программы «Инновационная система подготовки специалистов нового поколения в области информационных и оптических технологий» позволит выйти на качественно новый уровень подготовки выпускников и удовлетворить возрастающий спрос на специалистов в информационной, оптической и других высокотехнологичных отраслях экономики.

КАФЕДРА ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

Лазерные технологии не случайно называют технологиями XXI века. Открытые при нашей жизни лазеры уже сегодня широко проникли в медицину, биологию, экологию, промышленность, строительство, транспорт, связь, шоу-бизнес и другие сферы жизни. Лазерные принтеры, лазерные CD–диски, лазерные торговые сканеры и лазерные шоу сегодня известны всем. Менее известны широкой публике, но не менее важны лазерные технологии при лечении болезней глаз, сосудов, опухолей, в микроэлектронике для нанесения и структурирования тонких пленок, для резки и сварки брони, закалки инструментальных сталей, декоративной обработки дерева, камня и кожи, и т.д., а в ближайшей перспективе — для избавления человечества от очков и морщин (да, да — сотни операций по лазерной полировке роговицы глаза и кожи уже проведены), разработка реакций лазерного управляемого термоядерного синтеза и лазерных реактивных двигателей, создание трехмерных объектов за счет прямой трансформации виртуального (компьютерного) образа в материальный объект при взаимодействии лазерного излучения с веществом и многое, многое другое.

История кафедры ЛТ и ЭП делится на 3 разных периода:

Период I — с момента появления лаборатории лазерной технологии в ЛИТМО в 1965 г. до момента организации кафедры охраны труда и окружающей среды (ОТ и ОС) с отраслевой лабораторией лазерных технологий (ОЛЛТ) в 1982 г.

Период II — период развития кафедры ОТ и ОС и ОЛЛТ — 1982–1988 гг.

Период III — с момента создания на базе кафедры ОТ и ОС и ОЛЛТ кафедры лазерных технологий — 1988 г., в дальнейшем преобразованной в кафедру лазерных технологий и экологического приборостроения и по настоящее время.

Охарактеризуем периоды 1, 2 и 3 фактами.

1976 г. — научные работы ОЛЛТ по физическим основам лазерной обработки тонких пленок удостоены Премии Президиума АН СССР за лучшую научную работу в области «Фундаментальных проблем микроэлектроники».

1983, 1984 гг. — работы кафедры удостоены Премий Минвуза СССР за лучшую научную работу.

1986 г. — работы кафедры совместно с рядом других организаций удостоены Государственной Премии СССР.

1988 г. — кафедра ОТОС с лабораторией ЛТ по инициативе ректора ЛИТМО преобразована в выпускающую кафедру «Лазерных технологий» и начинается систематический выпуск специалистов по специальности 07.23 «лазерная техника и лазерные технологии».

1996 г. — кафедра ЛТ переименована в кафедру ЛТ и ЭП и осуществляет выпуск специалистов как лазерным технологиям, так и по специальности «инженер–педагог» со специализацией «экология».

С 2000 г. — лаборатория и кафедра ЛТ признаны Ведущей научной школой Российской Федерации по «Фундаментальным основам лазерных микро-технологий».

2001 – 2007 г. — этот статус ежегодно подтверждается.

- За период времени с 1988 по 2005 г. кафедра выпустила более 300 специалистов в области лазерных технологий;
- За тот же период времени сотрудниками и аспирантами кафедры защищены 2 докторские и более 20 кандидатских диссертаций;
- По результатам работ кафедры издано 9 монографий;
- Результаты исследований сотрудников кафедры изложены более чем в 500 научных статьях и 50 патентах и авторских свидетельствах;
- В настоящее время кафедра активно сотрудничает с университетами и институтами Германии (BIAS, FHS Emden), Китая (HUST), Франции (ENISE), Италии (Lecce University) и др.

В последние годы по приглашению различных зарубежных организаций прочтен ряд курсов лекций по лазерным технологиям.

Основные научные направления кафедры

- 1). Лазерная обработка пленочных элементов.
- 2). Лазерное локальное осаждение тонких пленок.
- 3). Лазерные технологии прецизионной размерной обработки.
- 4). Создание новых оптических материалов и элементов микро– и нанооптики на базе лазерных технологий.
- 5). Лазерные технологии элементов фотоники и волоконно–оптических устройств.
- 6). Создание теории субдлинноволновых источников излучения и разработки методов изготовления и контроля ближнепольных зондов.
- 7). Лазерное медицинское оборудование и инструмент.

8). Фундаментальные исследования в области взаимодействия лазерного излучения с веществом: лазерная абляция и конденсация металлических и композиционных пленок и эффекты самоорганизации.

9). Лазерный трехмерный синтез объемных моделей.

10). Физико–математическое моделирование в задачах дистанционного лазерного зондирования морской среды.

Заведует кафедрой лазерных технологий и экологического приборостроения Заслуженный деятель науки России, Лауреат Государственной Премии СССР, действительный член Академии Инженерных Наук РФ, д.т.н., профессор В.П.Вейко. Среди преподавателей кафедры Почетный работник высшей школы, д.т.н., профессор Е.Б.Яковлев, д.т.н., профессор Е.А.Шахно, Почетный работник высшей школы, к.ф.–м.н., доцент Г.Д.Шандыбина, к.т.н., доцент В.В.Барановский, к.ф.–м.н., доц. Ю.И.Копилевич, к.ф.–м.н., доцент А.Н.Проценко.

Вадим Павлович Вейко

Опорный конспект лекций по курсу
«Физико–технические основы лазерных технологий».
Раздел: Технологические лазеры и лазерное излучение

Компьютерный набор и верстка

С.М.Сарнаков

Дизайн обложки

С.М.Сарнаков

Редакционно–издательский отдел СПб ГИТМО (ТУ)

Зав. отделом

Н.Ф.Гусарова

Лицензия ИД № 00408 от 05.11.99.

Подписано в печать

Отпечатано на ризографе

Заказ №

Тираж 200 экз.