

**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, А.А.Петров**

**Опорный конспект лекций по курсу  
«Лазерные технологии»  
под редакцией В.П.Вейко**

## **ВВЕДЕНИЕ В ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**



**Санкт–Петербург  
2009**

Вейко В.П., Петров А.А. Опорный конспект лекций по курсу «Лазерные технологии». Раздел: Введение в лазерные технологии.— СПб: СПбГУ ИТМО, 2009 – 143 с.

Учебное пособие содержит краткие сведения об основных областях приложения лазеров, физических процессах при лазерной обработке; параметрах технологических лазеров и лазерного излучения; оптических системах для работы с лазерами. Для студентов специальности «Лазерная техника и лазерные технологии», бакалавров и магистров направления «Техническая физика» и «Опготехника».



Университет ИТМО в своей образовательной и научной деятельности концентрируется на приоритетных направлениях развития науки, технологии и техники, охватывающих информационно-коммуникационные технологии, программирование, компьютерные технологии и сети, автоматизацию и управление, оптические технологии, квантовую электронику и нелинейную оптику, **лазерную физику, технику и технологии**, фотонику, оптоинформатику, экологический мониторинг, нанооптику, мехатронику, приборостроение. В ряде научных областей, в том числе в лазерных технологиях, Университет претендует на право считаться одним из ведущих научно-образовательных центров мира.

- © Санкт–Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, 2009
- © В.П. Вейко, А.А.Петров, 2009.

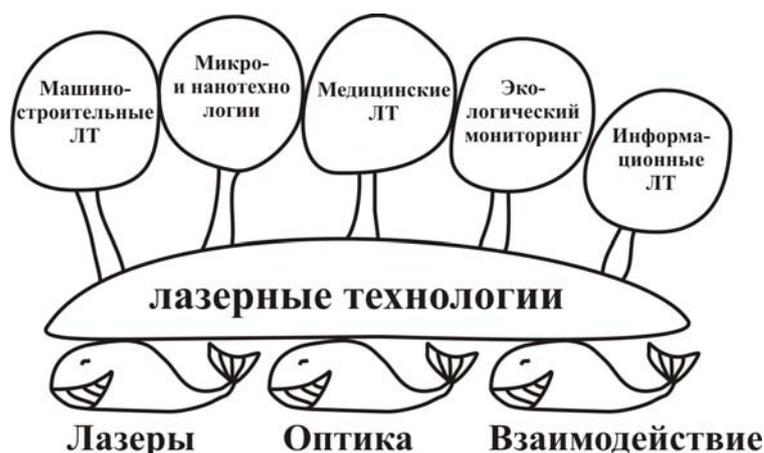
## Оглавление

Предисловие редактора	5
<b>ГЛАВА 1. ОСНОВНЫЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ</b>	<b>7</b>
1.1. Основные критические технологии и сравнительный уровень их развития в мире и в России	8
1.2. Основные области применения лазеров	10
1.3. Перспективные применения лазеров	11
1.4. Некоторые характерные примеры применения лазерных технологий в технике	12
1.4.1. Лазерные технологии в производстве мобильных телефонов и персональных компьютеров	12
1.4.2. Лазерные технологии дифракционных оптических элементов (ДОЭ), оптической памяти – CD-ROM, CD-RW и др.	14
1.4.3. Лазерное микроструктурирование поверхностей	15
1.4.4. Лазерное сверление микроотверстий в алмазных фильерах для волочения проволоки	17
1.4.5. Примеры лазерной микрообработки	18
1.4.6. Лазерная полировка оптических поверхностей	19
1.4.7. Лазерная очистка поверхности	21
1.4.8. Трехмерный лазерный синтез объектов и изображений	22
1.5. Космические применения лазеров	25
1.5.1. Дистанционное лазерное зондирование космических объектов	25
1.5.2. Лазерная реактивная тяга – атмосферные и внеатмосферные двигатели	26
1.5.3. Лазерное противоракетное оружие	27
1.6. Основные области применения лазеров в медицине	28
1.7. Преодоление дифракционного предела в оптике	31
<b>ГЛАВА 2. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ОБРАБОТКЕ МАТЕРИАЛОВ</b>	<b>32</b>
2.1. Основные особенности воздействия лазерного излучения на твердые среды	33
2.2. Основные физические процессы лазерных технологий	34
2.3. Поглощение света и преобразование энергии света в тепло	36
2.4. Физические процессы, возникающие на поверхности твердых тел при лазерном нагреве	37
2.5. Физика лазерного формирования тонкопленочной топологии	40
2.6. Лазерная очистка поверхностей твердых тел от частиц	41
2.7. Теплофизика лазерного нагревания	41

	45
<b>2.8. Физические процессы лазерной обработки: испарение – движение фронта раздела фаз – одномерная модель (движение фронта испарения внутрь материала)</b>	
<b>2.9. Экспериментальные результаты</b>	47
<b>2.10. Двумерная двухфазная (ДД) модель лазерной обработки</b>	49
<b>2.11. Давление отдачи при испарении. Уравнение Клаузиуса–Клапейрона</b>	51
<b>2.12. Экспериментальные методы изучения физических процессов лазерных технологий</b>	52
<b>ГЛАВА 3. ПАРАМЕТРЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЛАЗЕРОВ И ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ</b>	55
<b>3.1. Лазерная обработка материалов: взаимосвязь между режимами обработки материалов и параметрами лазеров</b>	56
<b>3.2. Основные параметры излучения технологических лазеров</b>	57
<b>3.3. Характеристики «качества» излучения технологических лазеров: когерентность, монохроматичность, поляризация. Эксплуатационные характеристики</b>	64
<b>3.4. Характерные параметры технологических лазеров</b>	69
<b>3.5. Перспективы развития технологических лазеров</b>	73
<b>3.6. Области применения важнейших типов лазеров</b>	74
<b>3.7. Основные особенности технологических лазеров</b>	75
<b>ГЛАВА 4. ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ</b>	83
<b>4.1. Фокусирующие схемы лазерной обработки</b>	85
<b>4.2. Сканирующие системы А–типа для лазерной обработки</b>	88
<b>4.3. Проекционные схемы для лазерной обработки</b>	92
<b>4.4. Комбинированные оптические методы</b>	95
<b>4.5. Проекционно–сканирующий метод</b>	97
<b>4.6. Волоконно–оптические системы (ВОС) доставки лазерного излучения</b>	98
<b>ГЛАВА 5. ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ</b>	100
<b>5.1. Технологические лазеры и лазерные технологии</b>	101
<b>5.2. Диодные лазеры и информационные технологии</b>	118
<b>СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ</b>	132
<b>КАФЕДРА ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ</b>	133

## Предисловие редактора «КОРНИ» И «ПЛОДЫ» ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

«Материк» лазерных технологий (рисунок), на котором «произрастают» различные конкретные процессы, базируется на трех китах, изображенных на рисунке — лазерах, оптике и взаимодействии излучения с веществом.



Для разработки любого конкретного процесса лазерных технологий надо решить 3 задачи:

1) **Какие свойства взаимодействия (действия) лазерного излучения с (на) веществом должны быть выбраны** для достижения цели (резонансные – нерезонансные, поглощение–рассеяние, фото – или термопоглощение, нагревание, закалка, плавление, размягчение, испарение, разложение, коагуляция и т.д.). Решить этот вопрос, вероятно, наиболее важная часть разработки. Эти знания должны дать возможность сделать обоснованные предложения для выбора лазерного источника (задача 2) и оптической системы (задача 3), а также снизить реальные затраты времени на эксперимент и средств на разработку всего процесса (потому что «хорошая теория — это весьма выгодная вещь!»).

2) **Какой тип лазерного источника нужно использовать** для достижения поставленной цели (длина волны, режим операции — непрерывный или импульсно–частотный, мощность, продолжительность импульса, поперечное распределение энергии в пучке, когерентность, монохроматичность, поляризация, и т.д. с учетом надежности, устойчивости процесса и его стоимости? И как рассчитать и проверить эти параметры?

**3) Какие требования к поперечной и продольной форме пучка следует предъявить и какие оптикомеханические, оптикоэлектронные, и т.п. системы необходимы для решения поставленной задачи? Т.к оптический пучок при лазерной обработке — это инструмент, то он должен быть соответствующим образом организован во времени и пространстве. Оптические системы: линзы, объективы, зеркала, электромеханические, акустооптические, оптикомеханические сканеры и системы, управляющие диафрагмами, определяют размеры и форму (размер пятна в фокусе, форму поперечного сечения, форму каустики) лазерного луча.**

Специальная оптика, оптикомеханические, оптикоакустические, электрооптические и другие модуляторы могут регулировать длительность воздействия. Одновременно приходится решать задачи передачи лазерной энергии (в свободном пространстве или по оптоволокну, и т.д.) и его коллимации, фокусировки или проецирования пучка и т.д.

Этот подход, основанный на многолетнем опыте разработок систем и процессов различных лазерных технологий, реализован и в предлагаемом опорном конспекте, где вслед за рассмотрением некоторых характерных примеров применения лазерных технологий основное внимание уделено:

- физическим процессам при лазерной обработке материалов,
- параметрам технологических лазеров и лазерного излучения, и
- оптическим системам лазерной обработки.

Заметим, что рассмотрение этих вопросов до и применительно почти к любой лазерной технологии, будь то резка металлов или обработка тонких пленок, приварка отслоившейся сетчатки глаза или лечение кариеса зубов, очистка скульптур или создание трехмерных изделий является важнейшим этапом разработки процесса..

В последней главе на основе ежегодных «Обзоров и прогнозов рынка лазерных технологий », публикуемого в журнале “Laser focus world” рассмотрены основные направления развития лазерных технологий.

## **ГЛАВА 1.**

# **ОСНОВНЫЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

## 1.1. ОСНОВНЫЕ КРИТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ УРОВЕНЬ ИХ РАЗВИТИЯ В МИРЕ И В РОССИИ

Для правильного понимания места лазерных технологий и их роли в современном обществе (не только промышленности, но и медицине, информационном секторе, связи, оборонном секторе, а также в других сферах жизни) приведем, в частности, перечень основных критических технологий и сравнительный уровень их развития в мире и в России (по версии Минобороны России, 2005 г.).



- 1 - значительное отставание от общемирового уровня  
 2 - общее отставание и некоторые достижения в отдельных областях  
 3 - значительные достижения, приоритетные достижения в отдельных областях  
 4 - высокий уровень развития, мировое лидерство

— мировые лидеры  
 — Россия

*Перечень основных критических технологий  
и уровень их развития в разных странах.*

Хотя приведенная схема, на наш взгляд, не вполне отражает современное положение вещей, тем не менее, из нее можно сделать два важных для нас вывода:

- 1) лазерные технологии относятся к списку критически важных для независимого развития государства, и
- 2) уровень развития лазерных технологий в России сравним с уровнем наиболее развитых стран.

Эти два обстоятельства необходимо иметь в виду при оценке актуальности лазерных технологий и требований к уровню их разработки, а также при подготовке специалистов, бакалавров и магистров по лазерным технологиям и системам

**Таким образом, научно-техническое и образовательное направление «Лазерные технологии и системы» соответствует приоритетным направлениям развития науки, техники и технологий в России.**

## **1.2. ОСНОВНЫЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРОВ**

- Металлообработка — сварка, резка, упрочнение.**
- Микротехнологии—микроэлектроника, обработка пленок, нанесение пленочных слоев, литография, подстройка параметров, интегральная оптика, микрооптика, микромеханика микрохимия и др.**
- Лазерная маркировка материалов и изделий.**
- Полиграфия — изготовление печатных форм, лазерная печать (принтеры) и др.**
- Оптическая связь и волоконные технологии.**
- Химические технологии: разделение изотопов, катализ и т.д.**
- Звуко– и видеозапись и воспроизведение.**
- Измерения и контроль в технологических процессах, дефектоскопия.**
- Дистанционные измерения, экологический мониторинг.**
- Оптическая локация, навигация, дальнометрия, батиметрия.**
- Лазерная спектроскопия.**
- Клиническая медицина — хирургия, терапия и диагностика, и биология (все направления клинической медицины).**
- Голография и ее применения.**
- Реставрация художественных произведений (в т. ч. очистка).**
- Трехмерное моделирование и синтез 3-х мерных объектов.**

### **1.3. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРОВ**

#### **Космос**

- лазерные реактивные двигатели,
- разведка и добыча полезных ископаемых на космических телах,
- удаление космического «мусора» с Земли или из космоса.

#### **Энергетика**

- передача энергии на большие расстояния (из космоса),
  - разделение изотопов,
  - термоядерный синтез,
  - рентгеновские лазеры,
- управление грозowymi разрядами,
- очистка и утилизация радиоактивно-зараженных объектов.

#### **Строительство**

- резка бетона, скал, камня, стали, стекла и т.п.,
- поверхностная обработка строительных материалов,
  - проходка туннелей и скважин,

#### **Экология — очистка среды**

- ликвидация разливов нефтепродуктов,
- ликвидация аварий и разрезка ядерных реакторов (дистанционная);
- ликвидация аварий железнодорожных, авто и т.п. — разрезка на мобильных лазерах.

#### **Лазерное оружие**

- космическое – противоракетное, ослепляющее.

#### **Наука**

- различные области естественных наук и наук о человеке

## 1.4. НЕКОТОРЫЕ ХАРАКТЕРНЫЕ ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ТЕХНИКЕ

### 1.4.1. ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОИЗВОДСТВЕ МОБИЛЬНЫХ ТЕЛЕФОНОВ И ПЕРСОНАЛЬНЫХ КОМПЬЮТЕРОВ



( по данным NEC–Nippon Electronic Corporation)

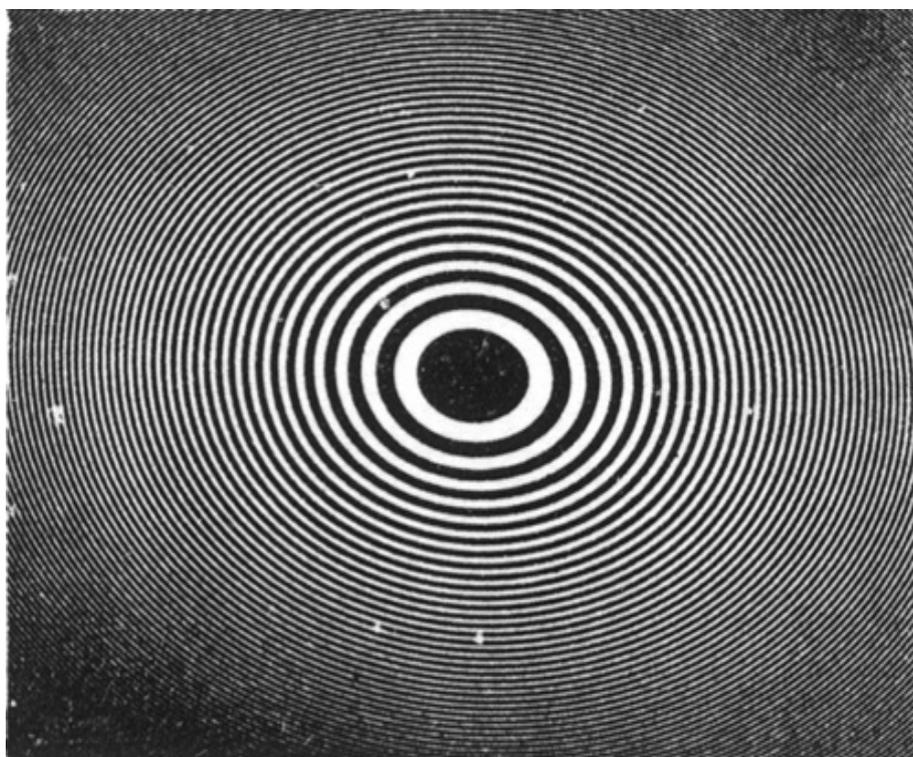
# ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОИЗВОДСТВЕ НОУТБУКОВ



( по данным NEC–Nippon Electronic Corporation)

### 1.4.2. ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДИФРАКЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ (ДОЭ), ОПТИЧЕСКОЙ ПАМЯТИ – CD-ROM, CD-RW И ДР.

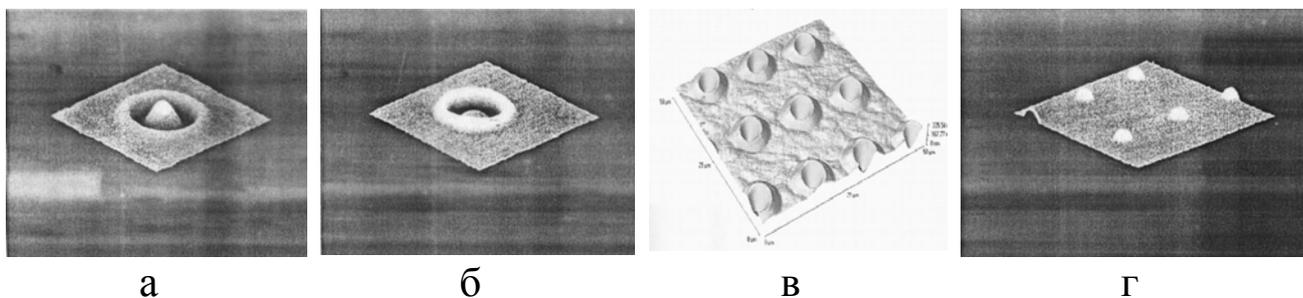
Использование дифракционных оптических элементов дает возможность сократить количество оптических элементов в схеме в результате объединения всех функциональных свойств, присущих некоторым элементам, соединенных в едином ДОЭ. При этом возможно уменьшение габаритов, веса, стоимости обычного оптического оборудования, а также создание новых оптических систем, не имеющих аналогов. Среди них: бифокальный микроскоп, лазерные объективы, блок оптической головки считывания информации с компакт-диска, круговой (импульсный) датчик положения. Но изготовление ДОЭ это сложная техническая проблема такая же как, изготовление СБИС (фотошаблонов сверхбольших интегральных схем). Та же технология, но другая топология и другие физические механизмы записи применяются при создании устройств оптической памяти – CD-ROM, CD-RW и др.



*Изображение фрагмента асимметричной структуры ДОЭ:  
эллиптическая зонная пластинка (количество зон — 500,  
полный диаметр — 40 мм).*

### 1.4.3. ЛАЗЕРНОЕ МИКРОСТРУКТУРИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Давление паров, гидродинамическая неустойчивость и неоднородность поверхностного натяжения при лазерной абляции могут изменить форму поверхности ванны расплава и это приводит к появлению поверхностных структур различной формы. Все эти явления можно использовать для изменения топологии поверхности. В фирме IBM, США широко использовали эти возможности для создания магнитных дисков со специальной наноструктурой «зоны торможения» магнитных головок (до 10000 «лазерных бампов»)

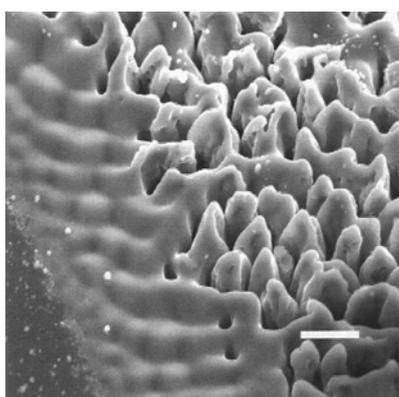


*Фотографии, сделанные на атомно-силовом микроскопе, показывающие разнообразные формы нанобампов» на аморфном никель–фосфорном металлическом диске (а, б, в) и стеклянной подложке (г).*

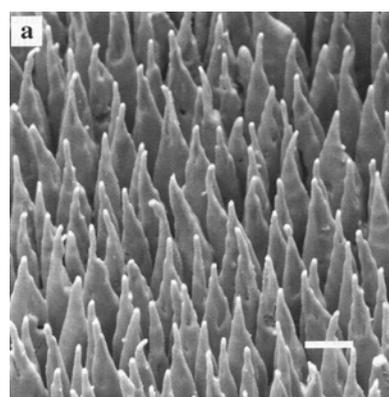
Похожие на колонны структуры могут быть образованы на поверхности твердого тела (монокристаллах Si и Ge, поликристаллическом Ti) при многократном воздействии лазера на парах меди (наносекундные импульсы).

Такая структурированная поверхность имеет широкий спектр возможных применений. Например, измененная поверхность может быть использована в изготовлении солнечных батарей, вместо антиотражающих слоев.

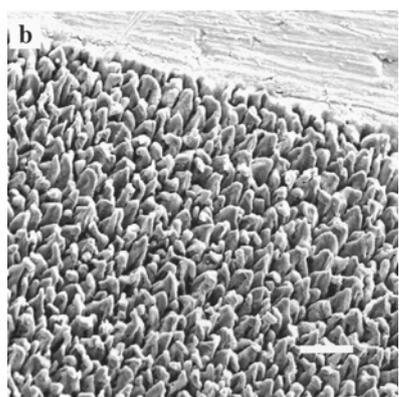
Лазерное структурирование поверхности твердого тела ведет к заметному росту её удельной поверхности, который представляет потенциальный интерес в катализе и датчиках. Структурированная лазером поверхность биосовместимого металлического сплава представляет интерес в медицине и биологии.



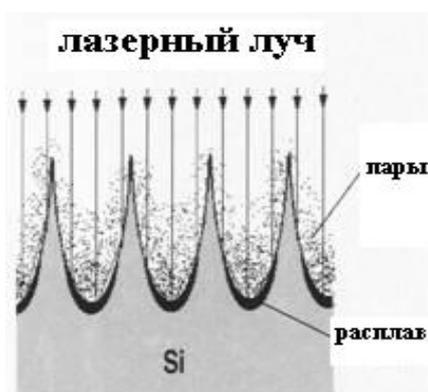
а



б



в



г

*Рисунок: при многократном воздействии импульсов Si- лазера поверхностная структура кремния преобразуется в набор микроконусов (а); поверхностная структура монокристалла Ge преобразуется в коническую структуру, изображенную на поз.б; образующаяся поверхностная структура поликристалла Ti показана на поз.в; на позиции г — схема развития конической структуры в течение лазерного испарения, темные области указывают на расплавленный материал, образующийся в течение лазерного импульса, в то время как конусы остаются твердыми.*

#### 1.4.4. ЛАЗЕРНОЕ СВЕРЛЕНИЕ МИКРООТВЕРСТИЙ В АЛМАЗНЫХ ФИЛЬЕРАХ ДЛЯ ВОЛОЧЕНИЯ ПРОВОЛОКИ

Объемы-до 30 000 фильер в год в мире (3 тыс. новых), время механического сверления каждой -60 часов (48 часов – сверление черного отверстия и 12 часов – доводка его формы)

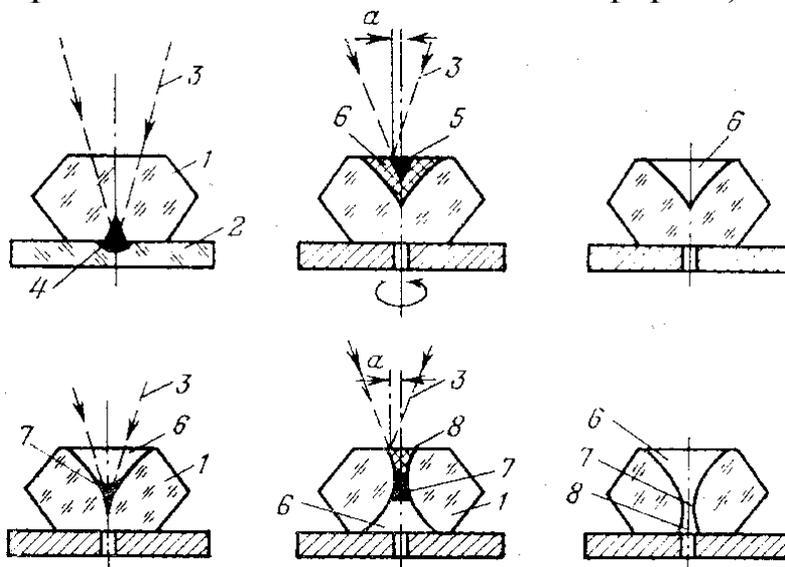
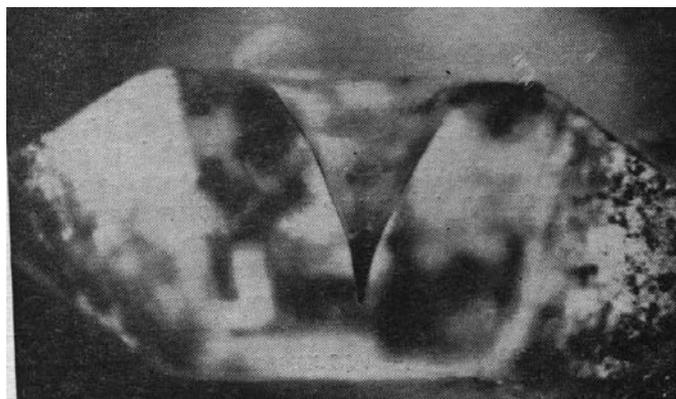
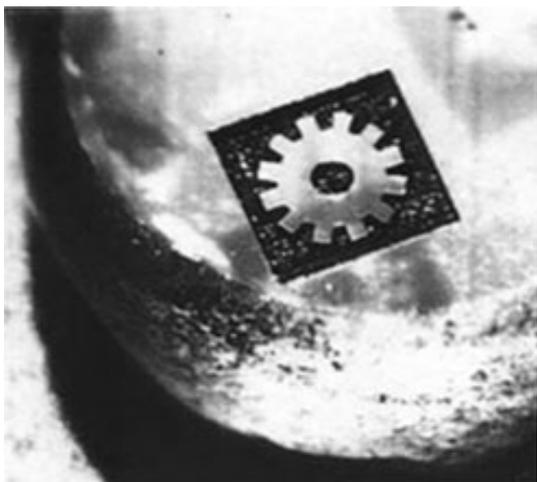


Схема процесса лазерного сверления микроотверстий в алмазных фильерах: 1 — алмазный кристалл, 2 — пластинка из материала, хорошо поглощающего лазерное излучение, 3 — фокусированный лазерный луч, 4 — исходное микроотверстие в пластинке (2), 5 — исходное микроотверстие в алмазе (графитовая преграда), 6 — входной и смазанный конус, 7 — рабочий канал, 8 — выходной конус. Последняя операция — ультразвуковая очистка.

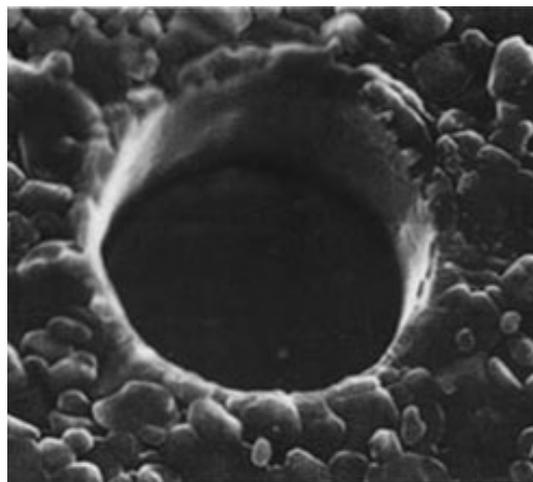


Фотография алмазной фильеры на одном из этапов сверления микроотверстия (толщина алмаза 1.6 мм). Время лазерного сверления 5-8 минут.

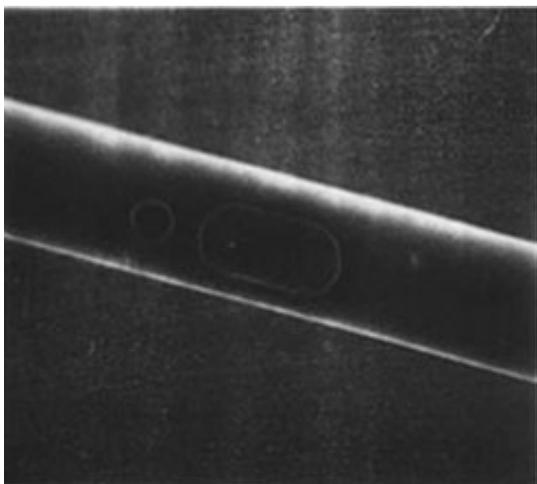
## 1.4.5. ПРИМЕРЫ ЛАЗЕРНОЙ МИКРООБРАБОТКИ



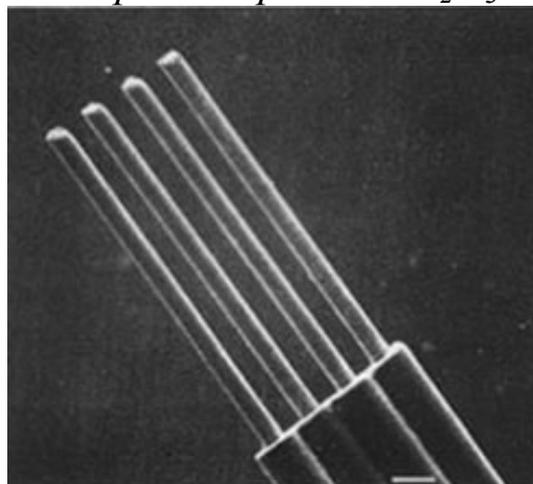
*300 микронная 3D шестерня  
в алмазе*



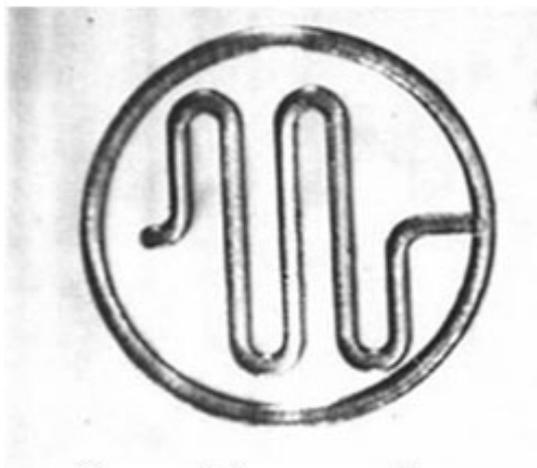
*Микроотверстие диаметром 300  
микрон в керамике Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>*



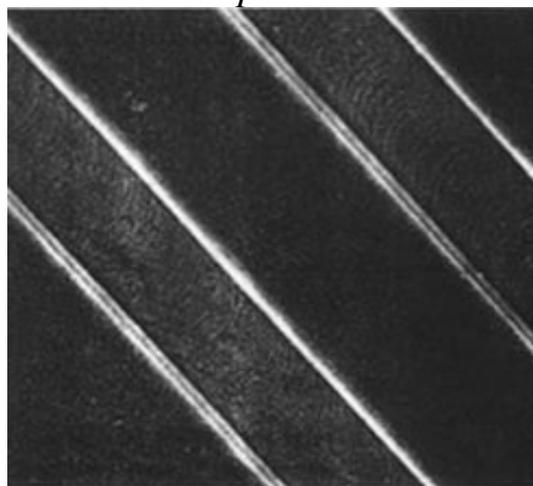
*Микроотверстие диаметром 100  
мкм и щель в полиамидной трубке*



*Снятие изоляции с провода  
диаметром 50 мкм*



*Змеевидный образец с шириной  
линии 30 мкм в стекле*

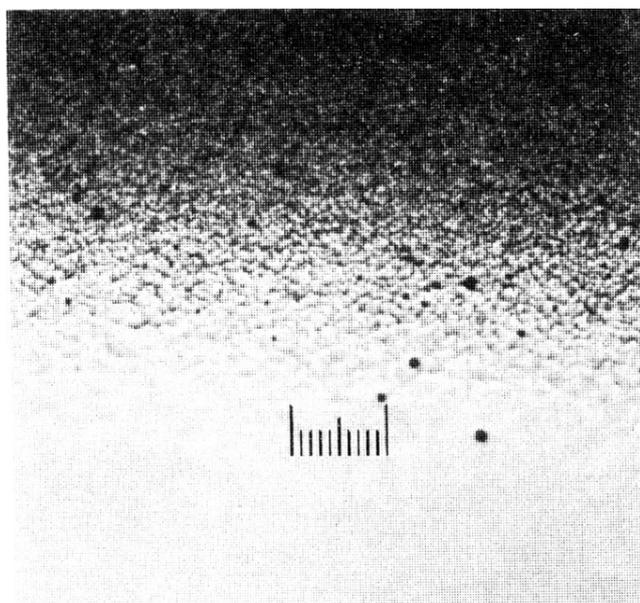


*Крупный план змеевидного  
образца в стекле*

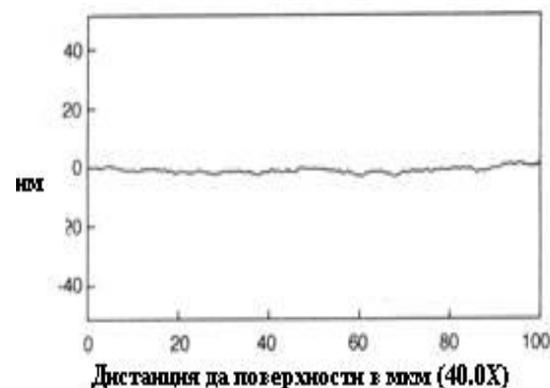
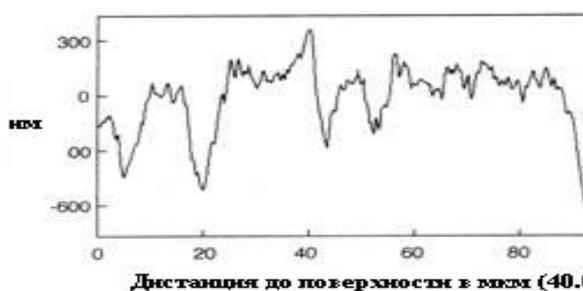
## 1.4.6. ЛАЗЕРНАЯ ПОЛИРОВКА ОПТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Физическая идея лазерной полировки стеклянной поверхности сходна с огневой полировкой стекла: при лазерном нагреве вязкость стекла уменьшается, а силы поверхностного натяжения стремятся минимизировать свободную (поверхностную) энергию и соответственно, объем и шероховатость поверхности. Проблемы, которые при этом возникают—это гидродинамические волны и термомеханические напряжения

Положительные результаты продемонстрированы для мини- и микрооптики и даже для макрооптики.



а



б

Рисунок: лазерная полировка стекла: слева электронная микрофотография образца из стекла В-270 после механической полировки (а, сверху) и после дополнительной лазерной полировки (а, снизу), показана переходная область между облученной и необлученной зоной; соответствующий измеренный профиль после механической (б, сверху) и лазерной (б, снизу) обработки стеклянных образцов.

# ЛАЗЕРНАЯ АСФЕРИЗАЦИЯ ОПТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Материалы- термостойкое стекло (кварцевое стекло) ( $\text{TKC} \sim 10^{-5} - 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ) или другие стекла с предварительным подогревом

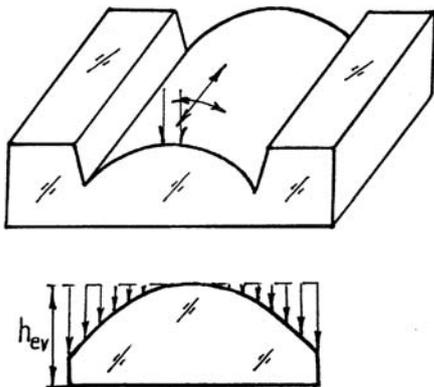
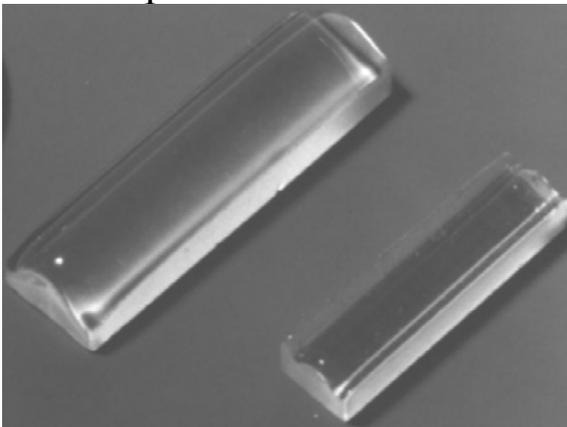
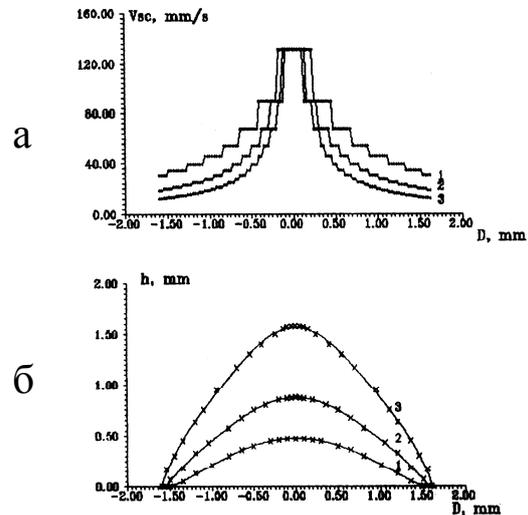


Схема лазерного испарения при профилировании цилиндрической поверхности



Фотографии асферических цилиндрических линз после лазерно-плазменной обработки (лазерное профилирование одновременно с плазменной полировкой)



Графики изменения скорости сканирования по ширине цилиндрического образца  $V_{\text{ск}}(D)$  для асферической поверхности при гиперболическом профиле  $y = -\left(0.4 - \sqrt{0.16 + 4.4x^2}/2.2\right)$ .

С различным сжатием 1, 2, 3 сканируемой функции  $y$ , а), соответствующие профили экспериментальной (x) и рассчитанной (-) линз (б).

#### 1.4.7. ЛАЗЕРНАЯ ОЧИСТКА ПОВЕРХНОСТИ

**может производиться дистанционно,  
в условиях музейных интерьеров,  
в труднодоступных местах с помощью  
волоконной доставки излучения,  
а также локально -в микроэлектронике, и т.д.**

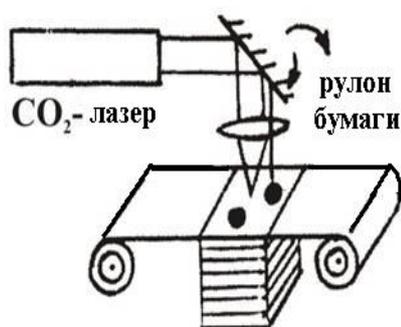


*Фотография медной статуэтки Петра I  
в процессе лазерной очистки*

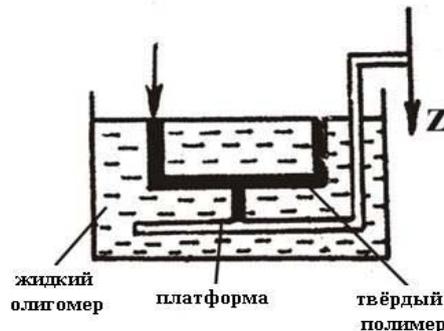
## 1.4.8. ТРЕХМЕРНЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ СИНТЕЗ ОБЪЕКТОВ И ИЗОБРАЖЕНИЙ



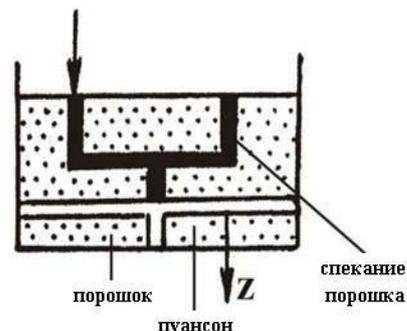
*Схемы подготовки информации(вверху)  
и методов 3-х мерного лазерного синтеза (внизу)*



послойный синтез  
из целлюлозно-  
бумажных слоев



стерео-  
литография



спекание  
из порошков

## ТРЕХМЕРНЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ СИНТЕЗ – ПРИМЕРЫ

### Быстрое создание опытных образцов-прототипов



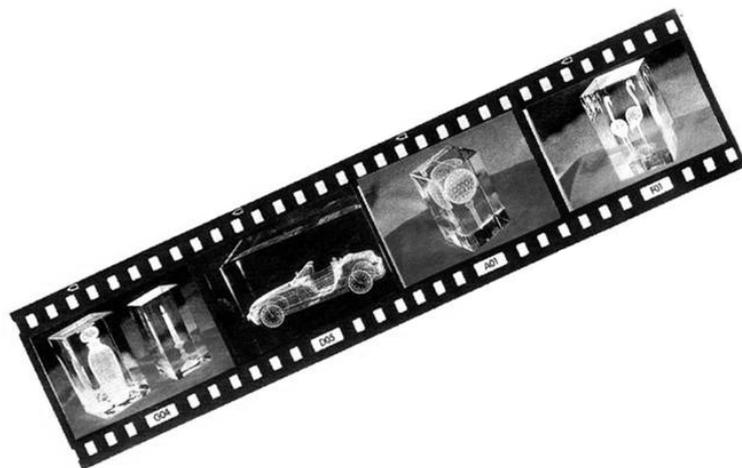
В медицине структура костей или органов имитируются при помощи данных компьютерной томографии, чтобы планировать операции или встраивать имплантанты, которые с помощью методов 3-х мерного лазерного синтеза можно изготовить индивидуально и оперативно подогнать для каждого пациента.

*Фотография трехмерной модели Нефертити (слева) и черепа доисторического человека (внизу), изготовленных методом стереолитографии из фотополимера.*

Процессы послойного синтеза из целлюлозно-бумажных слоев, стереолитографии или спекания из порошков позволяют создавать любые трехмерные модели из данных САД в течение короткого времени. Такие модели являются прототипами и радикально сокращают время изготовления литейных форм. Преимущества действующих и наглядных моделей заключается также в значительной экономии времени при разработках в медицине, промышленности, архитектуре и т. д.

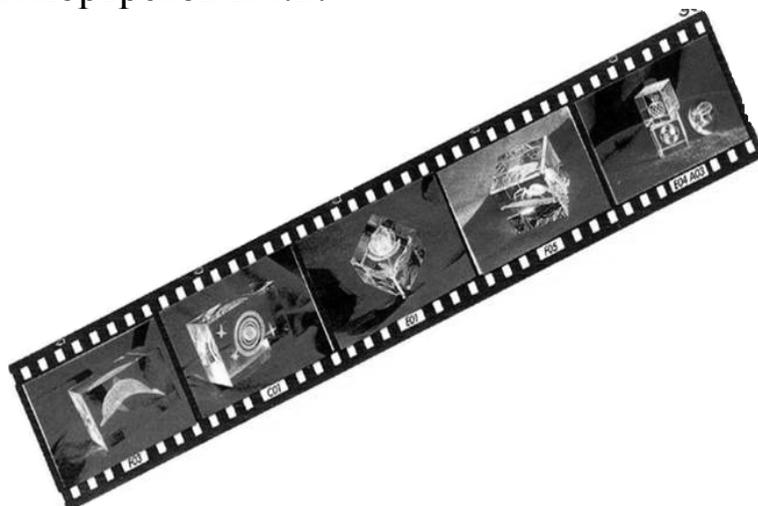


## ТРЕХМЕРНЫЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ В СТЕКЛЕ



### Принцип.

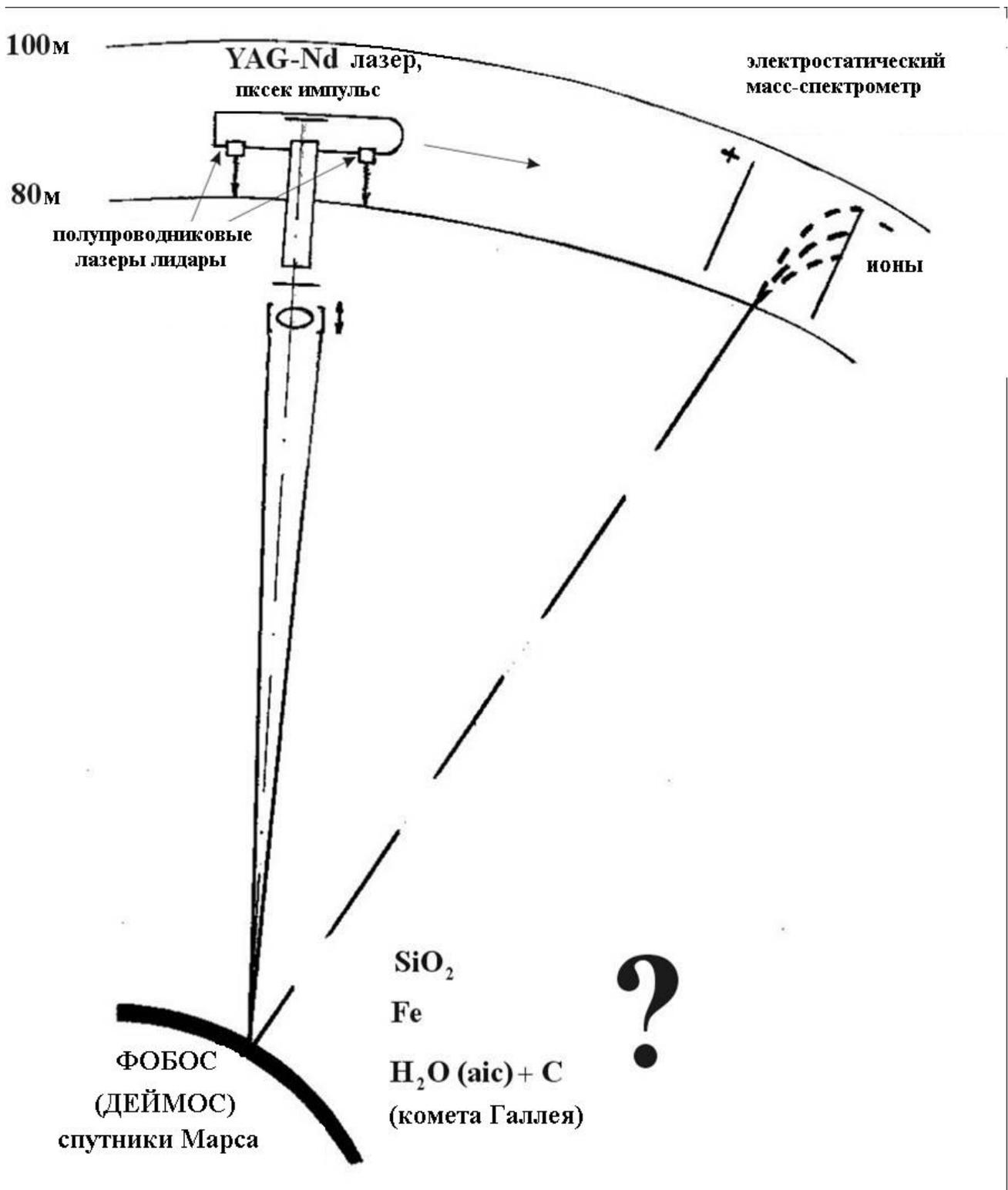
Трехмерные изображения записываются в стеклянных блоках путем послойной записи рассеивающих точек. Внутри прозрачного стеклянного блока (призмы, куба и т.п.) формируется объект, который можно рассмотреть со всех сторон. Применение: в рекламе, в науке для наглядного представления о структуре сложных молекулах, для изготовления портретов и т.п.



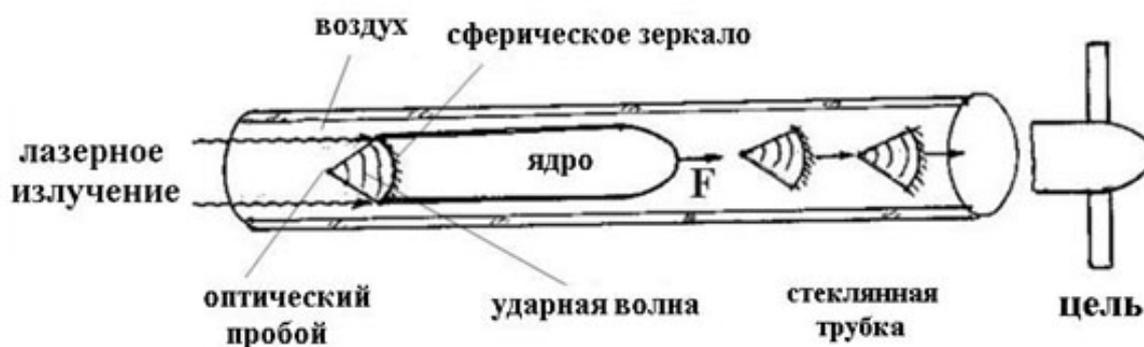
**Реализовано множество мотивов композиций** –от архитектурных сооружений (церквей, храмов и т.п.), изображений технических объектов (ракет, самолетов, автомобилей) до изображений животных, картин спортивных игр, портретов людей и т.д.

## 1.5. КОСМИЧЕСКИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРОВ

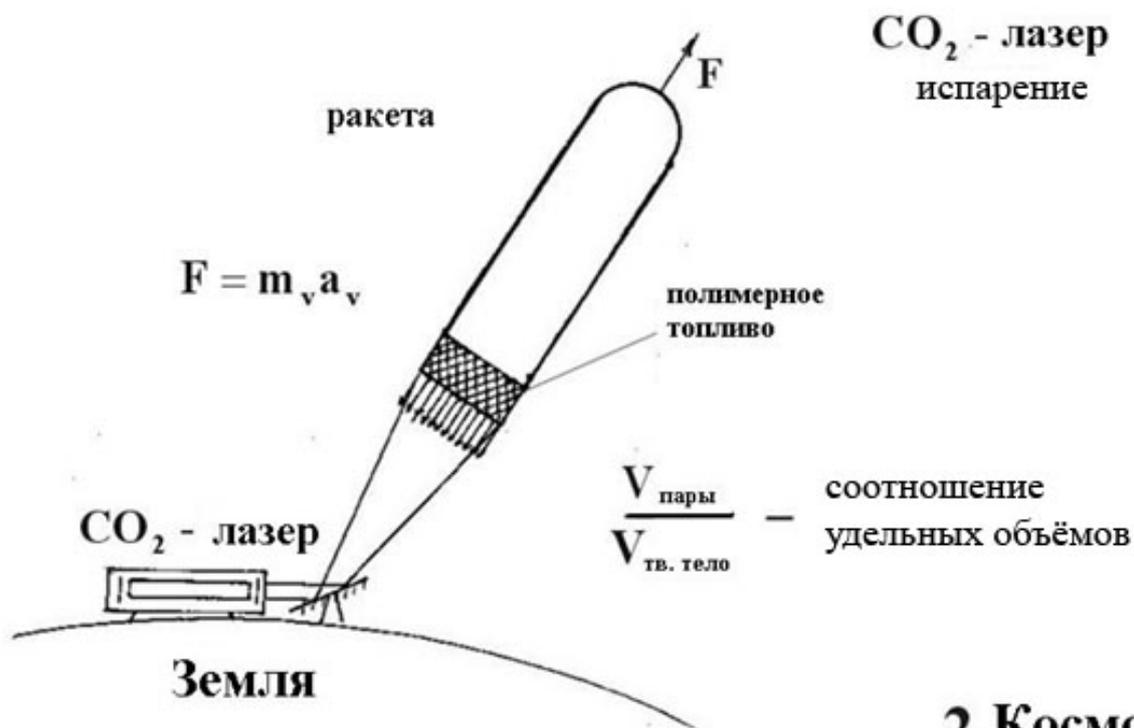
### 1.5.1. ДИСТАНЦИОННОЕ ЛАЗЕРНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ



## 1.5.2. ЛАЗЕРНАЯ РЕАКТИВНАЯ ТЯГА – АТМОСФЕРНЫЕ И ВНЕАТМОСФЕРНЫЕ ДВИГАТЕЛИ

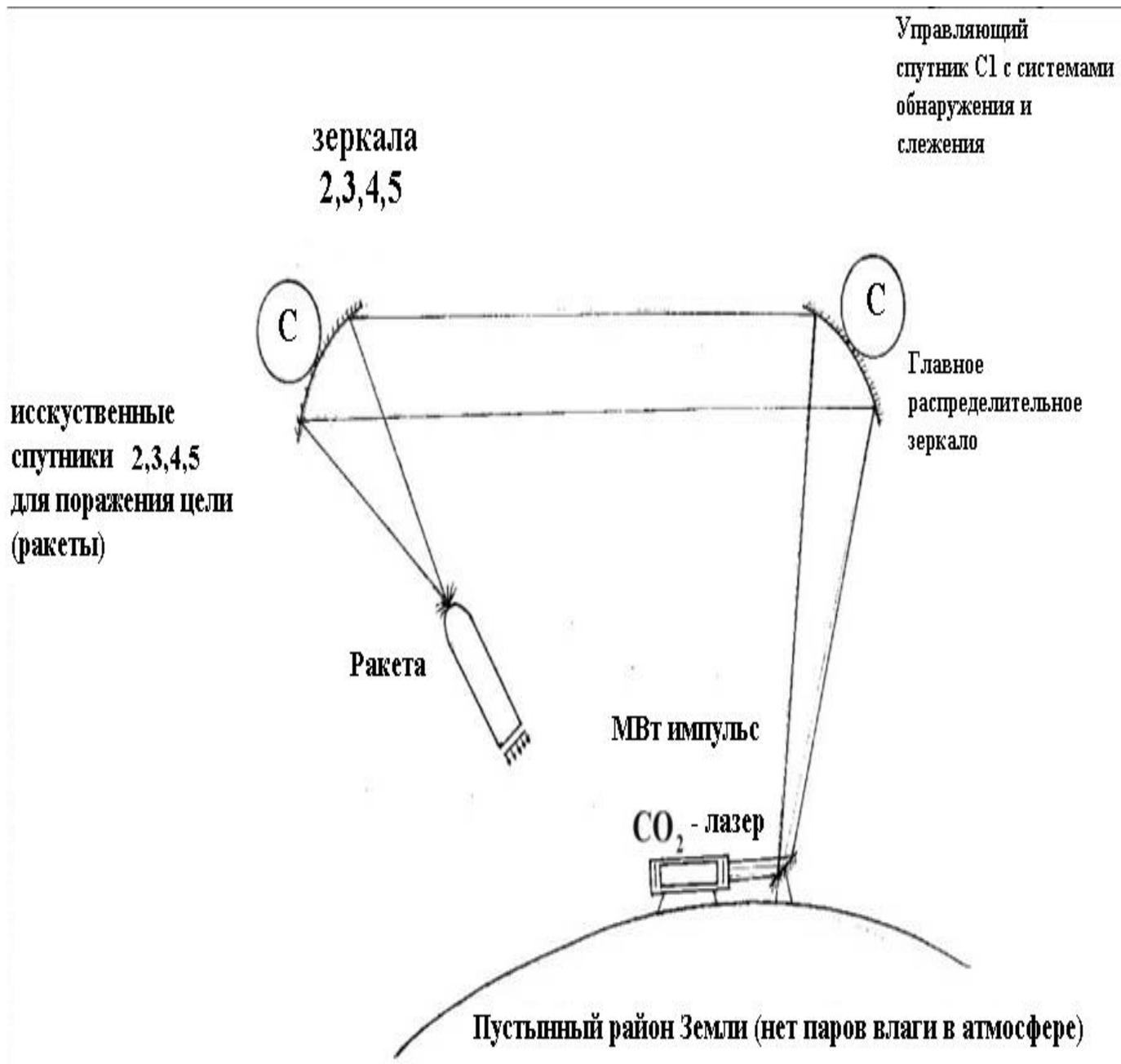


### 1. Атмосфера

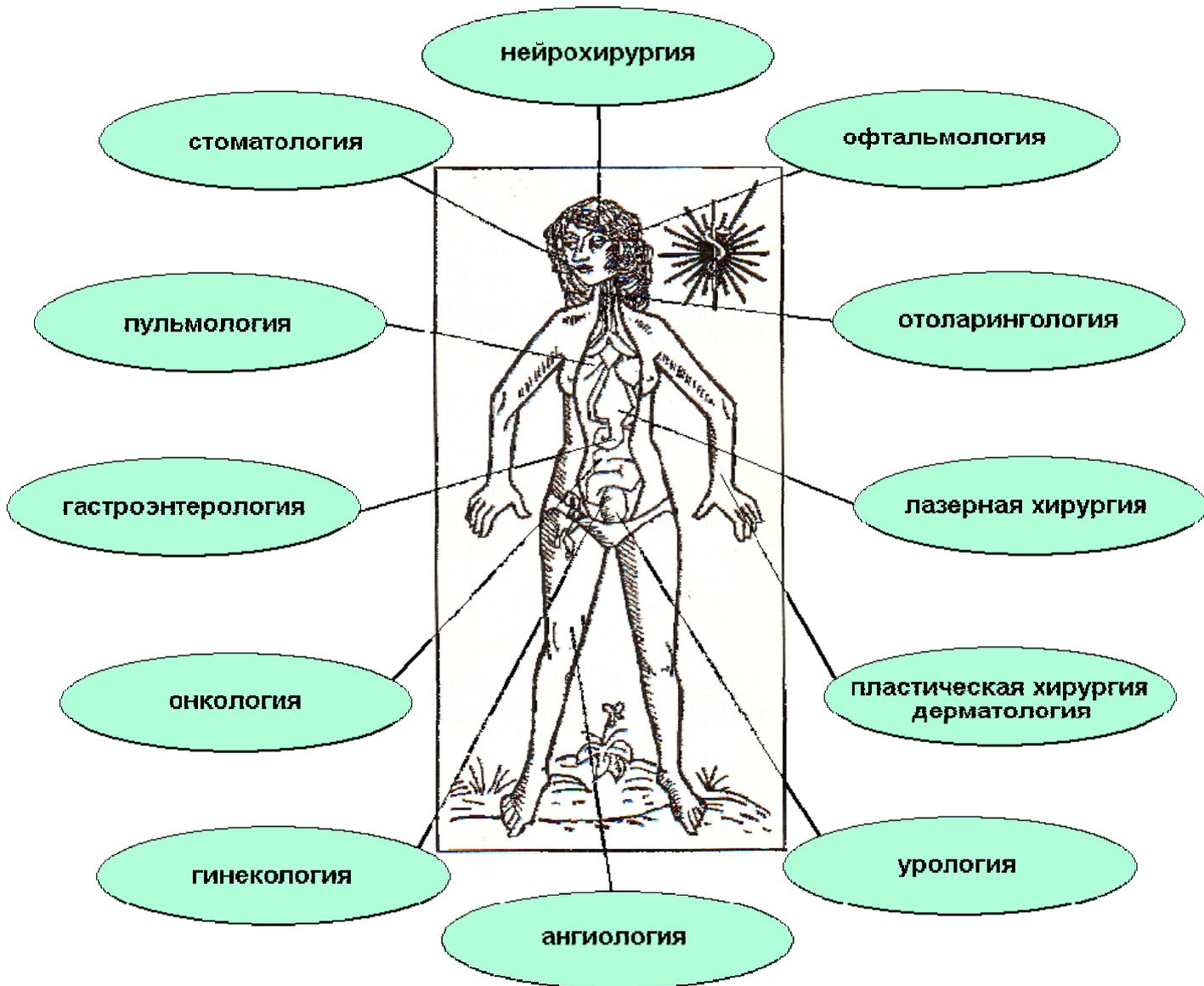


### 2. Космос

### 1.5.3. ЛАЗЕРНОЕ ПРОТИВОРАКЕТНОЕ ОРУЖИЕ



## 1.6. ОСНОВНЫЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРОВ В МЕДИЦИНЕ

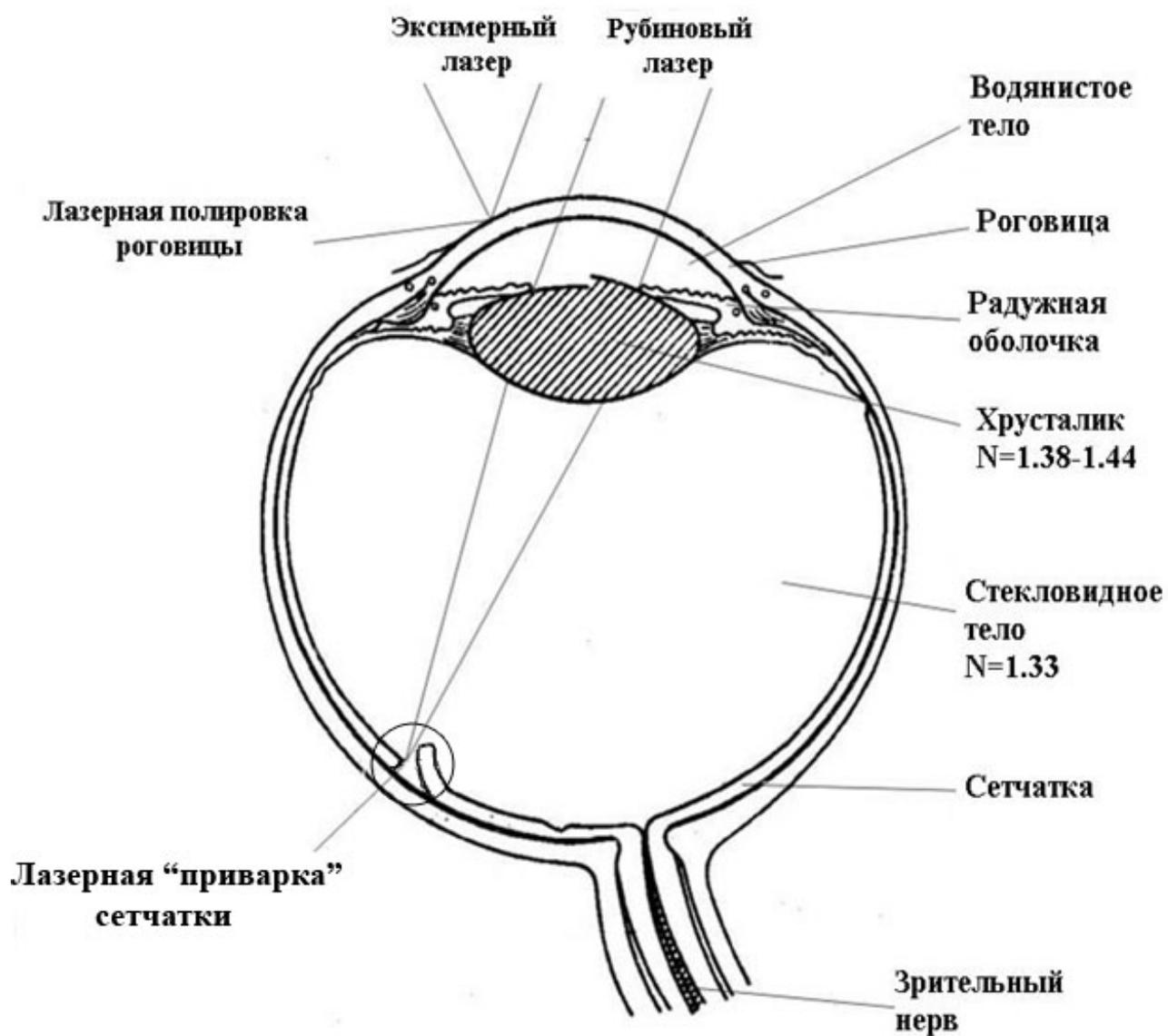


## ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МЕДИЦИНЕ

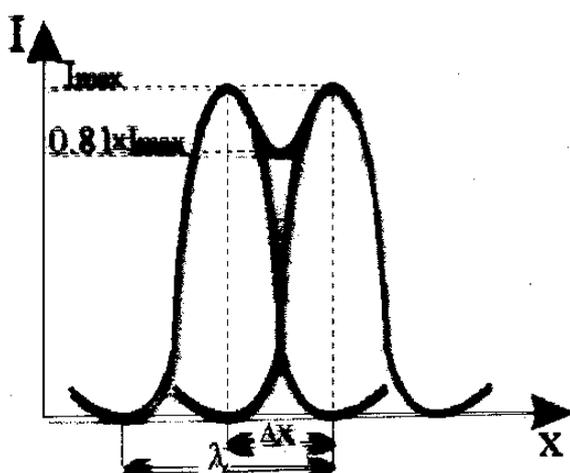


Полное число процедур по лазерному “омоложению” кожи и удалению морщин увеличилось со 120 000 в 2000 г. до 550 000 в 2006 г. с соответствующим увеличением производства Er лазеров, включая Er волоконные лазеры. Еще более перспективным оказался рынок диодных лазеров для удаления нежелательных волос (~44% полной суммы продаж медицинских лазеров) - число процедур увеличилось с 480 000 в 2000 г. до 1.5 миллионов в 2006 г. и их число должно удвоиться к 2010 г. Быстро растущий сектор – диагностические лазеры (оптическая когерентная томография), ежегодный прирост 25% (>15% полной суммы продаж). В то же время офтальмологический сектор коррекции зрения, выполняемой с эксимерными лазерами, не меняется в течение последних трех лет.

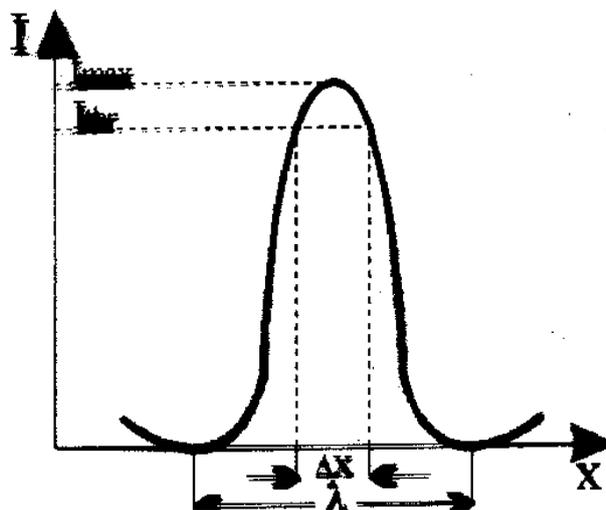
## ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОФТАЛЬМОЛОГИИ



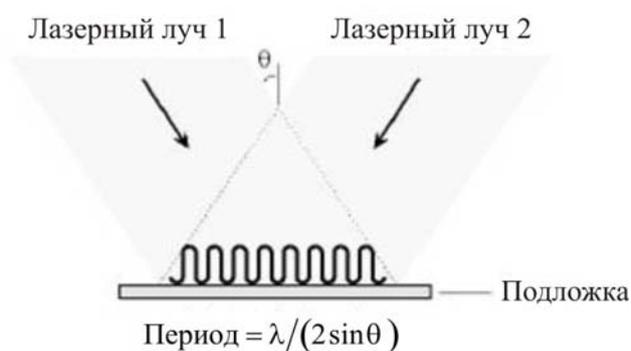
# 1.7. ПРЕОДОЛЕНИЕ ДИФРАКЦИОННОГО ПРЕДЕЛА В ОПТИКЕ



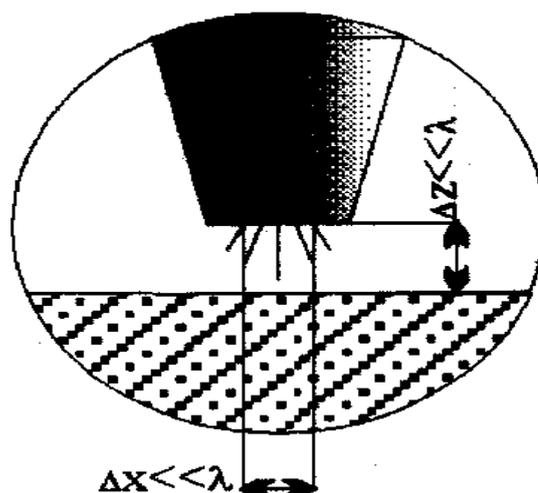
**Дифракционный  
предел в оптике**



**Пороговые процессы  
в лазерных технологиях**



**Интерференция лазерных  
пучков ( 2-х, 4-х волновая)**



**Формирование изображений  
в ближнепольной оптике**

## **ГЛАВА 2.**

# **ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ОБРАБОТКЕ МАТЕРИАЛОВ**

## 2.1. ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ТВЕРДЫЕ СРЕДЫ

– высокая плотность фотонов –

$$N(\text{см}^2 \cdot \text{с}) = q/h\nu \quad (2.1)$$

многофотонные процессы  
(с плотностью фотонов до  $10^{30}$  и более)

– высокое давление света

$$p_{\text{св}} = \varepsilon(1 + R), \quad (2.2)$$

где  $\varepsilon$  — объемная плотность энергии излучения,  
 $R$  — коэффициент отражения поверхности при нормальном падении света).

– высокая напряженность электрического поля  
(быстро переменное  $10^{15}$  Гц, но напряженность соизмерима с внутриатомной  $\sim 10^5 - 10^6$  В/см)

$$E_l = \left( \frac{4\pi q}{\varepsilon c} \right)^{1/2} \quad (2.3)$$

(при  $q \leq 10^6 - 10^7$  Вт/см<sup>2</sup>,  $f \approx 10^{15}$  Гц,  $E_l \leq 10^5 - 10^6$  В/см)

– высокая плотность мощности –

$$q = \frac{W}{S \tau} \quad \text{Дж/см}^2 \text{ сек (Вт/см}^2) \quad (2.4)$$

где  $W$  — энергия излучения,  $S$  — площадь сечения пучка,  
 $\tau$  — длительность воздействия, которая может вызвать  
очень локальный  $\sim 1 \mu^2$ ,  
с большими градиентами до  $10^9$  град/см  
и скоростями до  $10^{15}$  град/сек и более —нагрев

## 2.2. ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

1. Испарение (и абляция в расплавленной фазе) — наиболее популярный процесс, который лежит в основе большинства промышленных технологий любых материалов в микроэлектронике, микромеханике и микрооптике; в настоящее время актуальными остаются проблемы точности и качества.

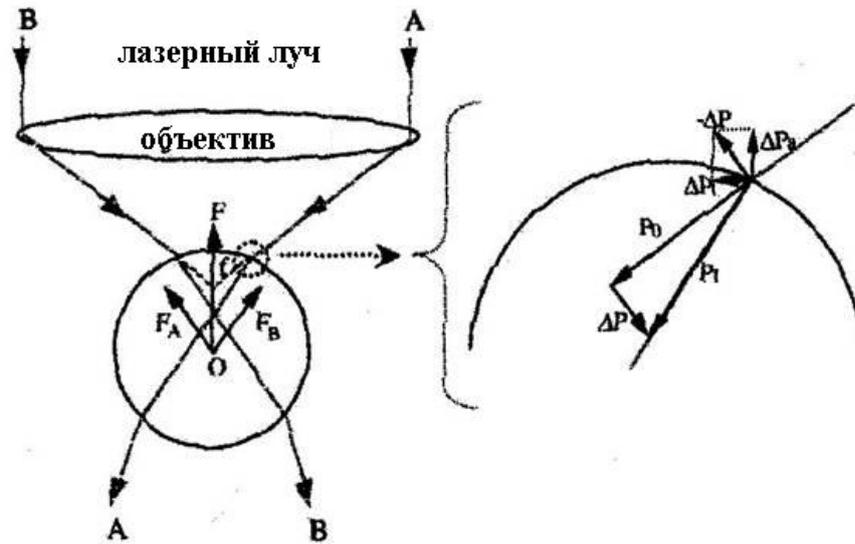
2. Нагревание до температуры размягчения (или плавления) с последующим деформированием в вязко–текучей фазе (дополненное тем или иным механическим воздействием — вытяжкой, вращением и т.п.) применяется для изготовления ближнепольных оптических зондов, медицинского оптического инструментария и т.п.

3. Направленное локальное нагревание, вызывающее появление контролируемого поля напряжений, приводящего к управляемому деформированию листовых материалов (*laser forming*), причем не только с целью формообразования, но и прецизионной сборки и юстировки микромеханических компонентов.

4. Послойный синтез трехмерных объектов методом послойного наращивания, в том числе стереолитография, селективное лазерное спекание и послойная сборка из листовых материалов (*laminated object manufacturing*).

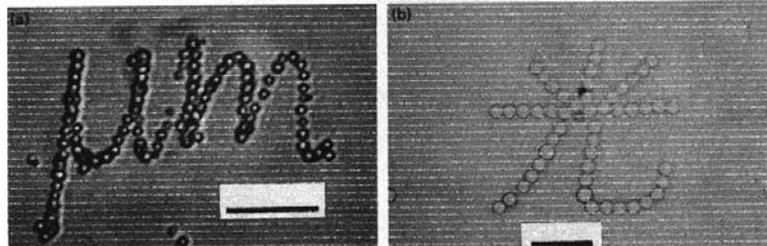
Лазерные технологии могут быть основаны не только на высокой плотности мощности, но также и на большой плотности фотонов, что важно для нелинейных процессов (нелинейное поглощение в слабопоглощающих средах), в селективных технологиях (химические, биомедицинские технологии). Могут найти применение сильные и сверхсильные электромагнитные поля в области фокуса пучка. В последнее время появились технологии (манипулирование микрочастицами, атомно–молекулярная сборка — *laser trapping*), где используется давление света.

# ЛАЗЕРНАЯ МАНИПУЛЯЦИЯ МИКРОЧАСТИЦАМИ (LASER TRAPPING)

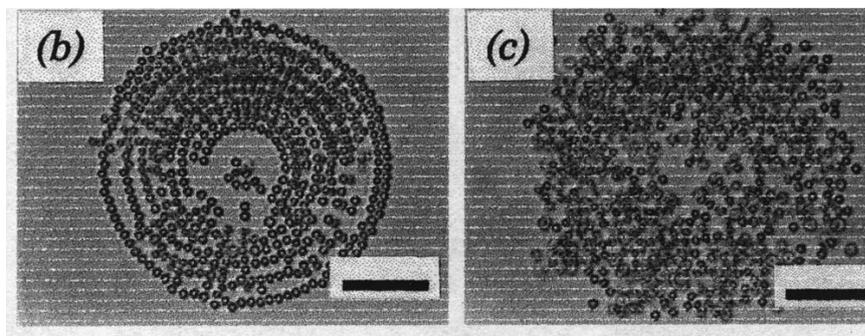


Принципы *laser trapping*

$$n = c_0/c_1 \quad (2.5), \quad DP = P_1 - P_0, \quad F = \frac{dP}{dt} \quad (2.6)$$



Фотография: иллюстрация сканирующей лазерной микроманипуляции частицами полистирена  $d = 1$  мкм: мкм и иероглиф «свет», (мощность лазера – 145 мВт на длине волны 1.06 мкм).



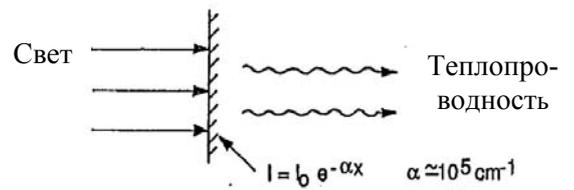
«Спроецированные» *laser trapping* изображения.  
Масштаб – 10 мкм.

## 2.3. ПОГЛОЩЕНИЕ СВЕТА И ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ СВЕТА В ТЕПЛО

Большинство лазерных технологий основаны на тепловом действии излучения. Остановимся на нем подробнее.

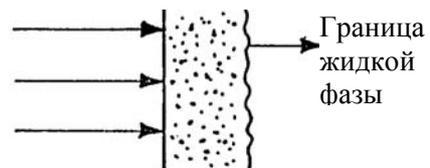
### Физическая модель лазерной обработки

**Поглощение** лазерного излучения по закону  $q(x) = q_0(1-R)e^{-\alpha x}$  (2.7) при глубине проникновения света  $\delta = 1/\alpha \sim 10^{-5} - 10^{-6}$  см для металлов



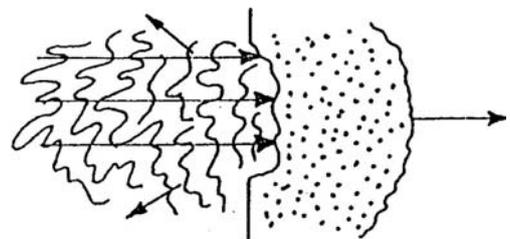
**Нагрев** материала до точки плавления  $T_{\text{пл}}$

**Плавление** после поглощения удельной теплоты плавления  $L_{\text{пл}}$



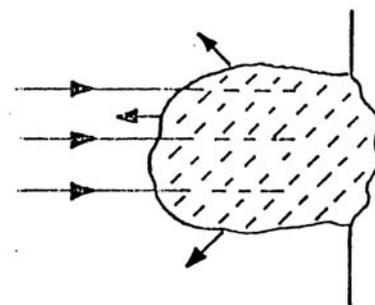
**Дальнейший нагрев** до точки испарения (кипения)  $T_v = T_b|_{P=P_{\text{атм}}}$

**Испарение** после поглощения удельной теплоты парообразования  $L_{\text{исп}}$



**Движение испаряемой поверхности** вглубь материала со скоростью  $V_0$

**Образование плазмы**



## **2.4. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, ВОЗНИКАЮЩИЕ НА ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ ПРИ ЛАЗЕРНОМ НАГРЕВЕ**

### **Эмиссионные процессы**

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

### **Структурные процессы**

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

### **Поверхностные химические реакции**

- локальное окисление металлов и полупроводников,
- восстановление окислов,
- термическое разложение металлоорганических соединений
- полимеризация (деструкция) полимеров.

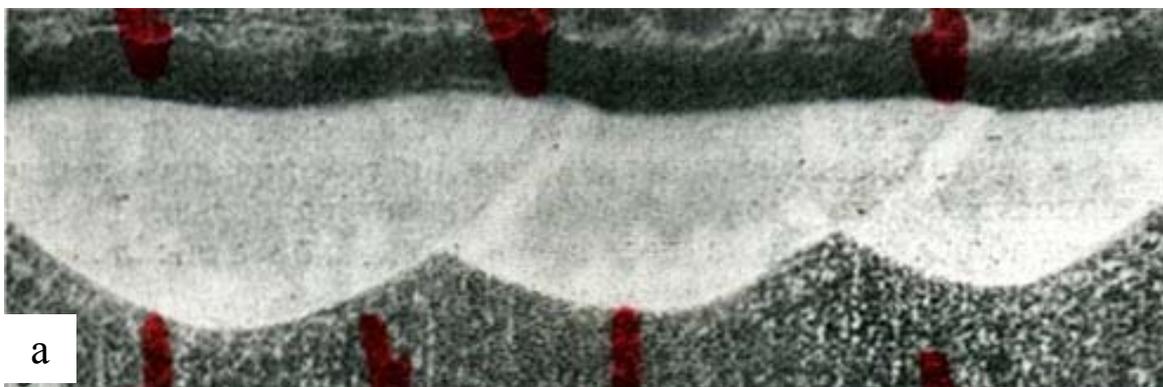
### **Термомеханические эффекты**

- тепловое расширение (включая импульсное),
- появление термонапряжений,
- генерация ударных волн в твердом теле и в воздухе,
- генерация ультразвука (дефектоскопия),
- оптический пробой в прозрачных диэлектриках

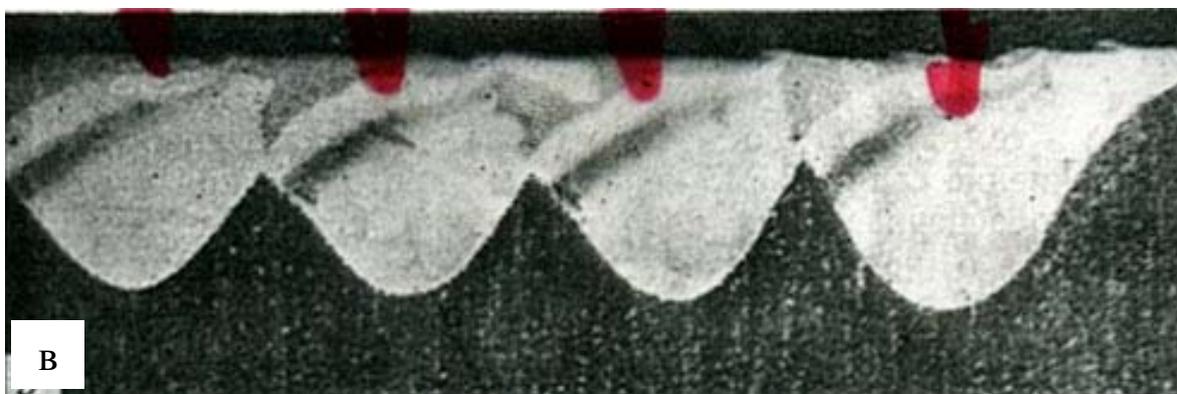
### **Физические переходы**

- плавление,
- испарение,
- воспламенение и горение,
- детонация активных и взрыв пассивных сред.

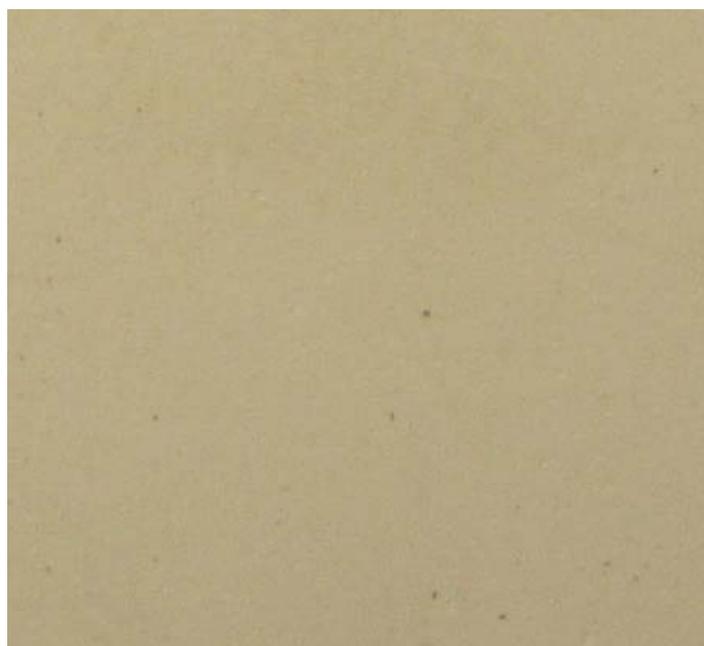
## ЛАЗЕРНАЯ ЗАКАЛКА ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ



*Рисунок:  
упрочненный слой в  
стали Р6М5: а — на  
воздухе X100, б — при  
обработке на воздухе  
X500, в — в среде аргона  
X100.*



## ЛАЗЕРНАЯ АМОРФИЗАЦИЯ СТЕКЛОКЕРАМИК



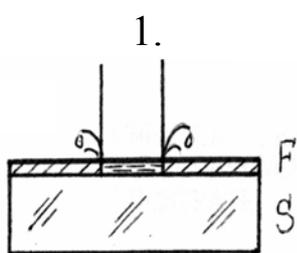
*Фотография исходная пластина ситалла  
СТ-50-1 ( $TiO_2-SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $CaO$ ,  $MgO$ )  
(в отраженном свете)*



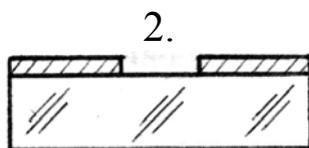
*Фотография той же пластины после лазерной аморфизации  
(формирование линзового растра)*

## 2.5. ФИЗИКА ЛАЗЕРНОГО ФОРМИРОВАНИЯ ТОНКОПЛЕНОЧНОЙ ТОПОЛОГИИ

1. Удаление пленок  
(испарение абляция)

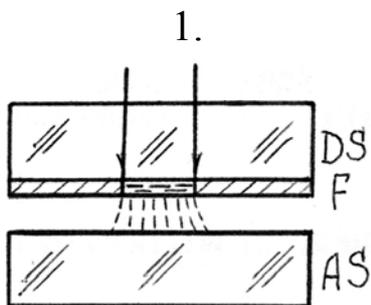


экспозиция  
(удаление)

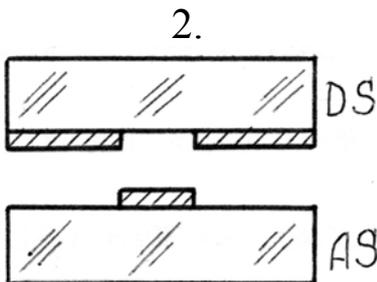


результат –  
отверстие  
в пленке

2. Локальное  
лазерное  
осаждение

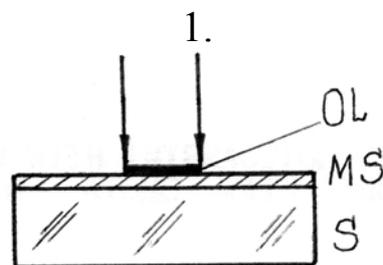


экспозиция  
(осаждение)

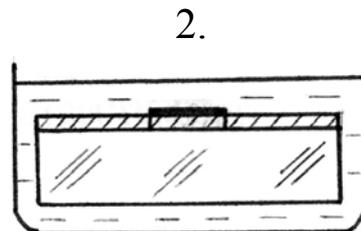


результат –  
локальная  
конденсация

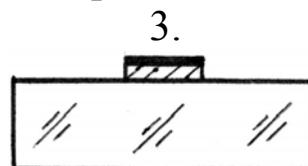
3. Локальное  
окисление –  
селективное травление



экспозиция  
(окисление)



HCl + Al  
катализатор  
селективное  
травление



результат –  
пленочный элемент

## 2.6. ЛАЗЕРНАЯ ОЧИСТКА ПОВЕРХНОСТЕЙ ТВЕРДЫХ ТЕЛ ОТ ЧАСТИЦ

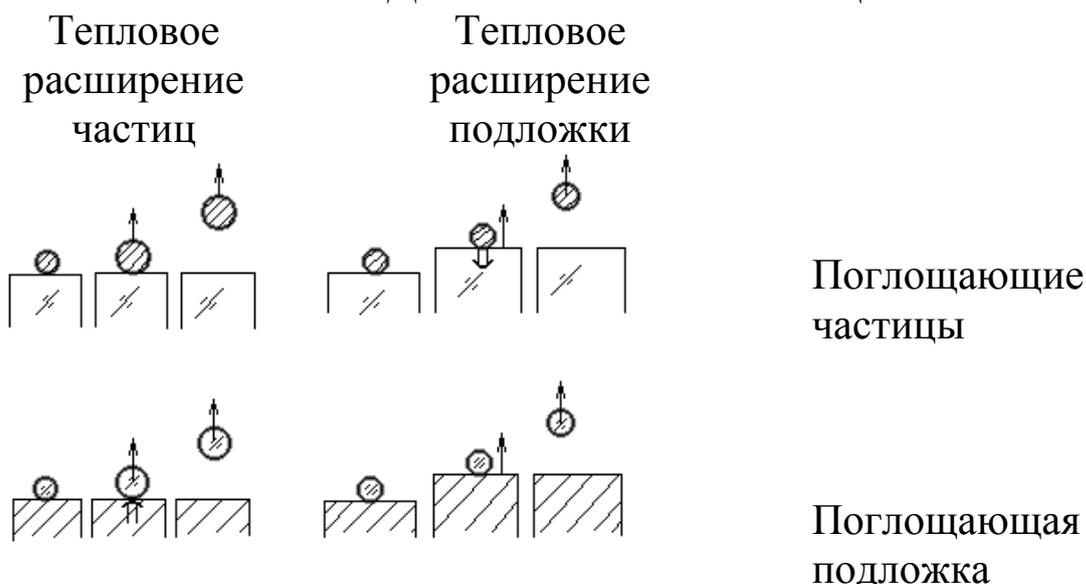
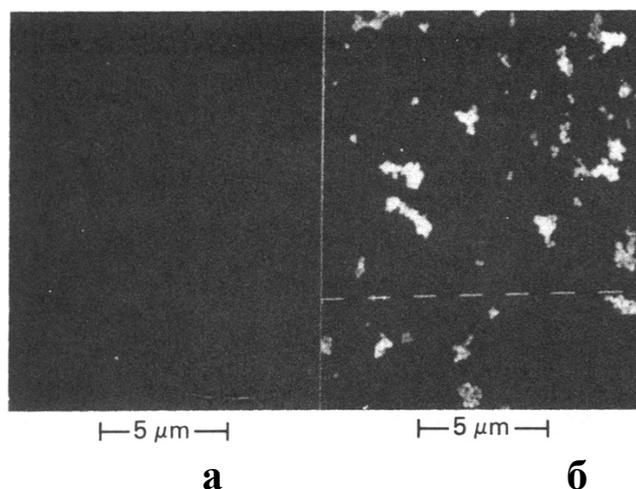


Рисунок: иллюстрация физического механизма сухой лазерной очистки



Рисунок: иллюстрация физического механизма влажной лазерной очистки.



Фотография поверхности Si подложки с 0.2 мкм Au частицами, KrF-лазер (0.2 Дж/см<sup>2</sup>, 4 импульса, пленка воды):  
а) до очистки, б) после очистки

## 2.7. ТЕПЛОФИЗИКА ЛАЗЕРНОГО НАГРЕВАНИЯ

Температура поверхности  $T$  зависит от мощности  $P$ , поглощенной единицей площади  $S$ :  $q = P/S$  (2.8), где  $q$  так называемая плотность мощности,  $P = W/\tau$  (2.9) ( $W$  — энергия в импульсе,  $\tau$  — длительность воздействия).

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

$$\frac{\partial T}{\partial t} - a\Delta T = \frac{Q(x, y, z, t)}{\rho c} \quad (2.10)$$

где  $\Delta$  — 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,  $\rho$  — плотность,  $c$  — теплоемкость.

Чтобы решить уравнение (2.10) необходимо задать одно начальное условие, 6 граничных и определить  $Q(x, y, z, t)$ .

$$T_{x,y,z,0} = T_H, \quad T_{x=\infty,t} = T_{y=\infty,t} = T_{z=\infty,t} = T_H \quad (2.11),$$

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

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 (2.10) при условиях (2.11) для круглого источника тепла — лазерного пятна с радиусом  $r_0$ , будет:

$$T = \frac{2q_0(1-R)\sqrt{a\tau}}{k} \left( \frac{1}{\sqrt{\pi}} - \text{ierfc} \frac{r_0}{2\sqrt{a\tau}} \right) + T_n \quad (2.12)$$

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

$$T = \frac{2q_0(1-R)\sqrt{a\tau}}{k\sqrt{\pi}} + T_n \quad (2.13)$$

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

$$T = \frac{q_0(1-R)r_0}{k} + T_n \quad (2.14)$$

Формулы (2.13) и (2.14) позволяют посчитать так называемую пороговую (критическую) плотность мощности  $q^{\text{пор}}$ , необходимую для нагревания поверхности до заданной температуры  $T$ :

$$\boxed{q_{\text{имп}}^{\text{пор}} = \frac{(T - T_n)k\sqrt{\pi}}{2(1-R)\sqrt{a\tau}}} \quad (2.15)$$

$$\boxed{q_{\text{непр}}^{\text{пор}} = \frac{(T - T_n)k}{(1-R)r_0}} \quad (2.16)$$

Пороги испарения для импульсного воздействия ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ) представлены в таблице 2.1, а для непрерывного – в таблице 2.2.

Таблица 2.1

Материал	$T_{\text{исп}}, \text{K}$	$k, \text{Вт/м} \cdot \text{K}$	$A=1-R$ (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

Таблица 2.2

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

Пороги испарения ( $\text{Вт/м}^2$ ) для непрерывных лазеров (источник неподвижный) сосчитанные по формуле (2.16) при радиусе лазерного пятна  $r_0 = 15 \text{ мкм}$ , представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3

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

## 2.8. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ: ИСПАРЕНИЕ – ДВИЖЕНИЕ ФРОНТА РАЗДЕЛА ФАЗ – ОДНОМЕРНАЯ МОДЕЛЬ, (ДВИЖЕНИЕ ФРОНТА ИСПАРЕНИЯ ВНУТРЬ МАТЕРИАЛА)

Энергия  $W$ , требуемая для удаления объема вещества  $\Omega = hS$  (пренебрегая теплопроводностью), равна:

$$E = \Omega \left[ \rho c T_m + L_m + \rho c (T_v - T_m) + L_v \right] \quad (2.17)$$

Для плотности мощности  $q = \frac{F}{St}$  ( $S$  — площадь светового пятна на поверхности материала,  $t$  — длительность воздействия) уравнение (2.17) преобразуется в:

$$q = \frac{h}{t} (\rho c T_{\text{и}} + L_{\text{пл}} + L_{\text{и}}) \quad (2.18)$$

где обычно  $\rho c T_{\text{и}} \approx 10^3$  Дж/см<sup>3</sup>,  $L_{\text{пл}} \leq 10^3$  Дж/см<sup>3</sup>,  $L_{\text{и}} \geq 10^4$  Дж/см<sup>3</sup>

Скорость проникновения фронта испарения  $V_0$  вглубь материала (в предположении, что поглощенная энергия потрачена только на испарение (пренебрегая  $\rho c T_{\text{и}}$ ,  $L_{\text{пл}} \ll L_{\text{и}}$ ) равна:

$$V_0 = \frac{q}{L_{\text{и}}} \quad (2.19)$$

С другой стороны, скорость  $V$  может быть выражена через температуру поверхности  $T_0$  (согласно модели твердого тела) **формулой Френкеля:**

$$V_0 \approx C_{\text{зв}} \exp\left(-\frac{T^*}{T_0}\right) \quad (2.20)$$

где  $C_{\text{зв}}$  — скорость звука в твердых телах,  $T^* = \frac{L_{\text{и}}^*}{k}$ , ( $k$  — постоянная Больцмана,  $T^*$  — температура испарения,  $L_{\text{и}}^*$  — это  $L_{\text{и}}$ , рассчитанная на атом).

Вычисленные по формулам (2.18) и (2.19) величины  $T_0$ ,  $V_0$  приведены в таблице 2.4.

Таблица.2.4

NN	$q$ , Вт/см <sup>2</sup>	$T_0$ , К	$V_0$ , см/с	$h$ , см
1	$10^6$	4050	14.3	$2.5 \cdot 10^{-2}$
2	$5 \cdot 10^6$	4800	70.0	$5.2 \cdot 10^{-3}$
3	$10^7$	5100	$1.42 \cdot 10^2$	$2.5 \cdot 10^{-3}$
4	$5 \cdot 10^7$	6400	$6.8 \cdot 10^2$	$5.3 \cdot 10^{-4}$
5	$10^8$	7000	$1.32 \cdot 10^3$	$2.7 \cdot 10^{-4}$

$h$  – глубина расположения фронта (отверстия) в одномерной модели испарения.

### Характерные особенности одномерной модели

– глубина отверстия  $h$  увеличивается линейно с длительностью импульса  $\tau$ , со скоростью  $V_0$ :

$$h = V_0 \tau = \frac{q}{L_{и}} \tau \quad (2.21)$$

– диаметр отверстия не увеличивается:

$$d = d_0 = \text{const}$$

– отсутствует жидкая фаза – только испарение  
– высокая точность  
– высокое качество

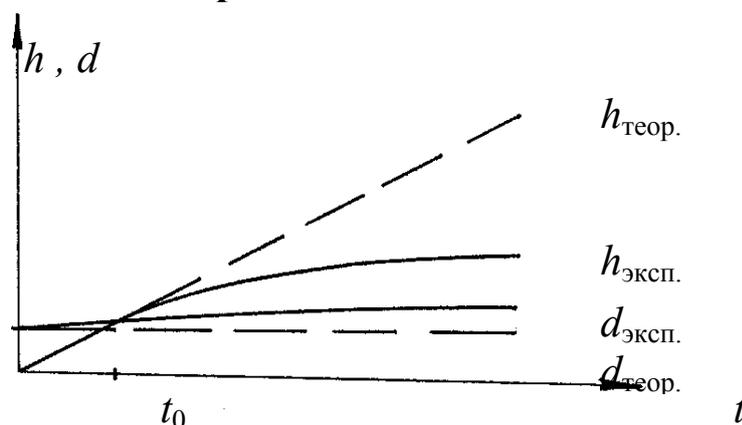
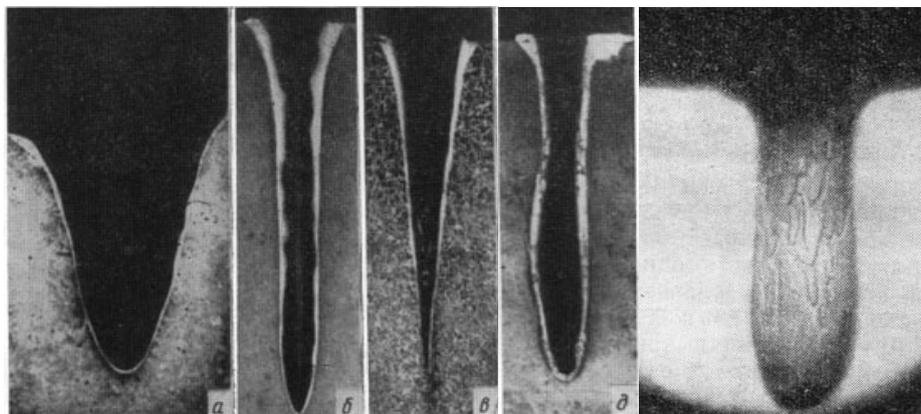


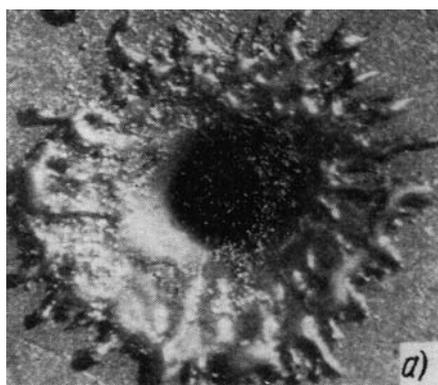
Рисунок: качественные характеристики одномерной модели микроформообразования.

Одномерная модель до статочно хорошо соответствует эксперименту при коротких импульсах (от нсек до пксек) но не работает после  $t > t_0$ , когда  $h > d_0$ . Почему ?

## 2.9. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ (1)



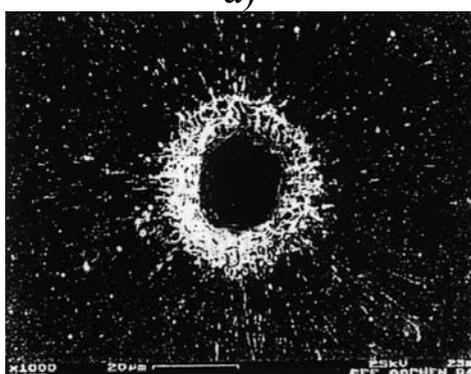
*Фотографии продольных шлифов  
«лазерных» лунок в стали,  $h = 1$  мм.*



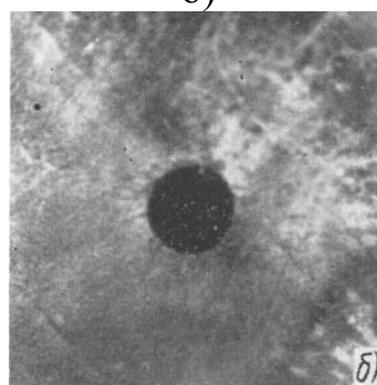
*а)*



*б)*



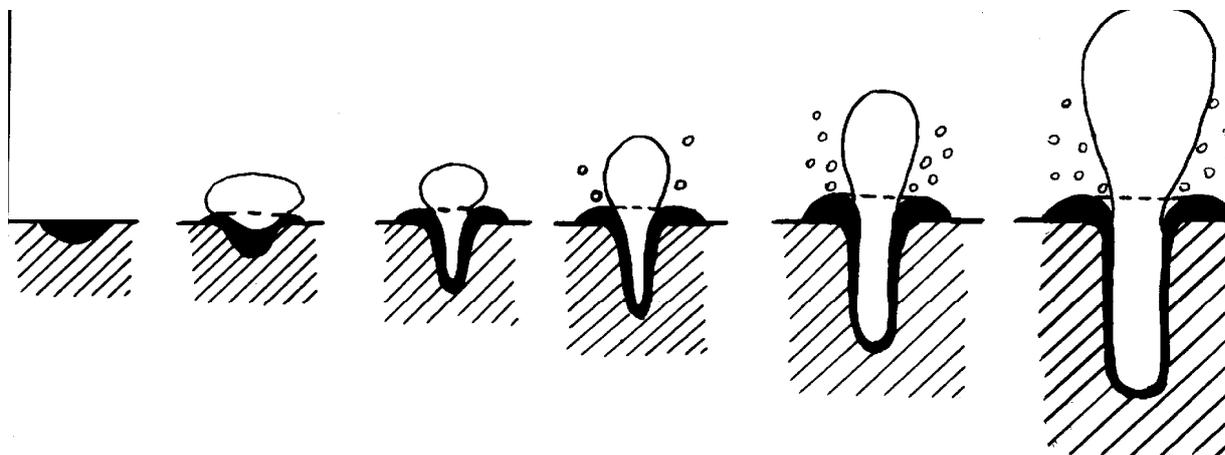
*в)*



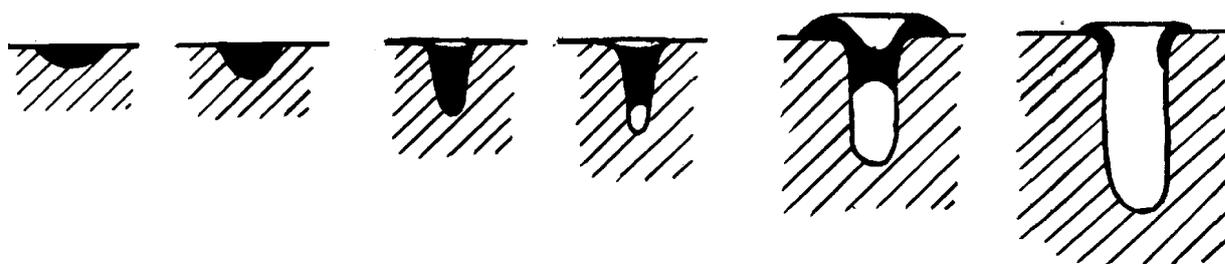
*г)*

*Вид «сверху» на «лазерные» лунки в стали  
(длительность импульса: а) ~ мс, б) ~ мкс, в) ~ нс, г) ~ фс)*

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ (2)



а



б



*Схема (вверху) и фотография (внизу),  
характеризующие поведение жидкой фазы  
в течение, а) и после, б) лазерной обработки  
в) эксперимент*

## 2.10. ДВУМЕРНАЯ ДВУХФАЗНАЯ (ДД) МОДЕЛЬ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

Одномерная модель не может применяться для описания кинетики формирования лунки с того момента, когда ее глубина  $h$  становится сопоставимой с размером светового пятна  $r_0$ , т.к. более нельзя пренебрегать процессами, приводящими к росту ее диаметра.

Увеличение глубины  $h$  может быть описано, как прежде, моделью испарения, но определение диаметра отверстия  $d$  более сложно из-за взаимодействия многих факторов, влияющих на нагревание и разрушение стенок.

Прежде всего надо учитывать появление жидкой фазы из-за плавления материала между изотермами испарения поверхности  $T_{и}$  и плавления  $T_{пл}$  (под поверхностью).

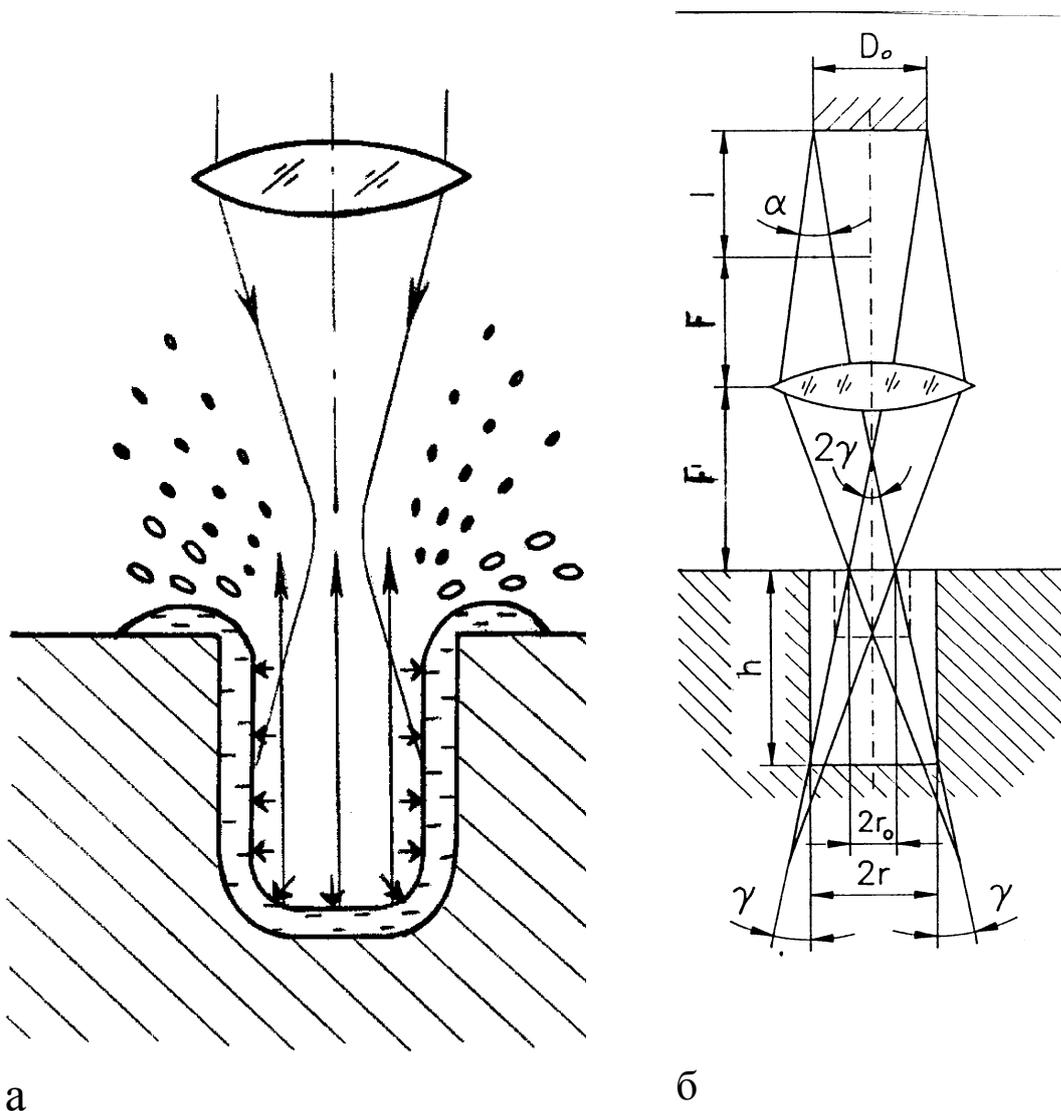
Другие важные факторы, которые влияют на процесс формирования отверстия:

- конденсация пара,
- прямое поглощение света стенками из-за расфокусировки луча,
- рассеяние света паром,
- радиационный и конвективный теплообмен между струей пара и стенками,
- теплопроводность.

К этим явлениям следует добавить:

- реактивное давление отдачи паров, которое должно удалять расплавленный материал из отверстия,
- эффекты экранирования лазерного излучения продуктами испарения–плазмой.

## ДД МОДЕЛЬ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ (2)



Схематическая диаграмма двумерного микроформообразования, (а) и диаграмма временного изменения глубины отверстия  $h$  и диаметра  $d = 2r$ , (б) при условии совпадения фокальной плоскости линзы с поверхностью.

( $\gamma$  — половина угла светового конуса,  $\operatorname{tg} \gamma = (D_0 - \alpha l) / 2F$ ,  $D_0$  — диаметр источника излучения,  $l$  — расстояние между лазером и передним фокусом линзы с фокусным расстоянием  $F$ ,  $r_0$  — начальный радиус отверстия (равен радиусу светового пятна),  $\alpha$  — угол расходимости пучка).

## 2.11. ДАВЛЕНИЕ ОТДАЧИ ПРИ ИСПАРЕНИИ. УРАВНЕНИЕ КЛАУЗИУСА–КЛАПЕЙРОНА

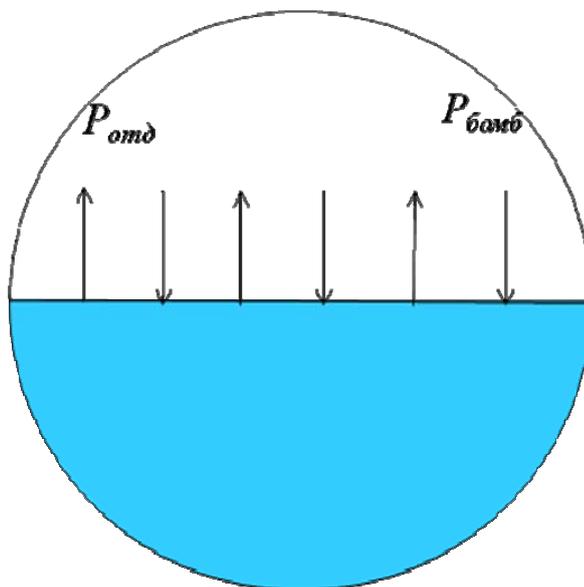


Схема жидкости в равновесии с собственным паром

$$P_{\text{нп}} = P_{\text{отд}} + P_{\text{бомб}} \quad (2.22)$$

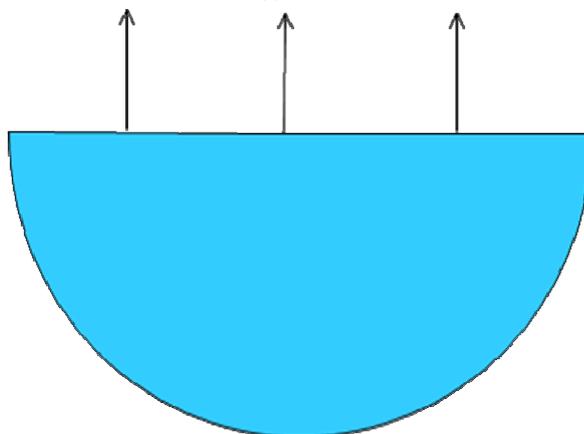


Схема «лазерного» расплава и пара.

$$P_{\text{отд}} = 0.5P_{\text{нп}}$$

Связь давления насыщенного пара с температурой дается формулой Клаузиуса–Клапейрона:

$$P_T = P_0 \frac{T}{T_0} \exp \left[ \frac{L_v \mu}{\rho R T_0} \left( 1 - \frac{T_0}{T} \right) \right] \quad (2.23)$$

## 2.12. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

### Отличие экспериментальных и теоретических данных

#### Основные экспериментальные методы

#### измерения лазерных параметров

##### 1. Температура:

–пирометрический метод — измерение интенсивности излучения нагретого тела, **закон Вина** —  $\lambda_{\max} T_{\text{цв}} = 2897 \text{ мкм} \cdot \text{град}$  (2.24);

–измерение тока термоэмиссии, **закон Ричардсона** (неравновесность, нестационарность)

$$I = AT^2 \exp\left(-\frac{W_{\text{вых}}}{kT}\right) \quad (2.25)$$

–измерение спектрального состава лазерной плазмы,

**формула Саха** (неравновесность, нестационарность)

$$\frac{\alpha^2}{1-\alpha^2} = C \frac{(kT)^{5/2}}{P} \exp\left(-\frac{W_i}{kT}\right) \quad (2.26)$$

$\alpha$  – степень термической ионизации,  $P$  — давление (суммарное),

$C$  – константа  $\left(\frac{2\pi m_e}{h^2}\right)^{3/2} \frac{g_i}{g_c}$ ,  $W$  – энергия ионизации атома;

–регистрация фронта фазового перехода (металлография, термокоагуляция и др.);

–измерение электрического сопротивления (боллометрический метод)

$\rho = \rho_0 + \rho_0(T)$  ( $\rho \gg \rho_0$ ),  $\rho_i(T) \sim T$ , т.е.  $T(t) \sim R(T)$  до  $T_{\text{пл}}$ ;

–термопарный метод.

2. Кинетика – киносъемка, микровидеосъемка, рентгенография.

3. Интегральные закономерности:

–пороги – визуальный – по факелу, микроскопический – по следу, по кварцевому резонатору;

–импульс – по маятнику, по клину.

4. Структура и состав зон воздействия:

–оптическая микроскопия;

–электронная микроскопия;

–электронная спектроскопия для химического анализа (ЭСХА),

–дифракция вторичных электронов, дифракция рентгеновских лучей.

–Оже–спектроскопия, и др.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ОБРАЗОВАНИЯ ЛУНКИ МЕТОДОМ СКОРОСТНОЙ КИНОСЪЕМКИ

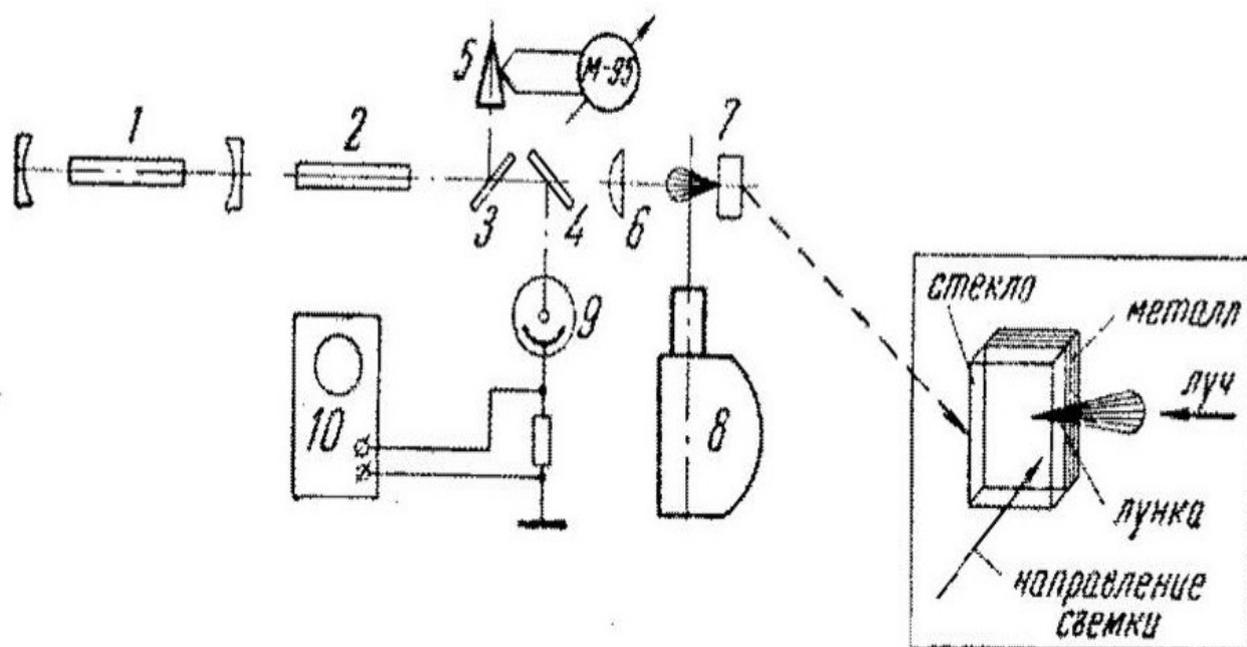


Схема установки для исследования воздействия лазерного излучения на металлы: 1 – задающий генератор, 2 – усилитель мощности, 3, 4 – светоделительные пластинки, 5 – калориметр, 6 – линза, 7 – мишень, 8 – высокоскоростная кинокамера ФП-22 или скоростной фоторегистратор СФР-2, 9 – фотоэлемент Ф-5, осциллограф ОК-17.

## КИНЕТИКА ПРОЦЕССА АБЛЯЦИИ МЕТАЛЛОВ

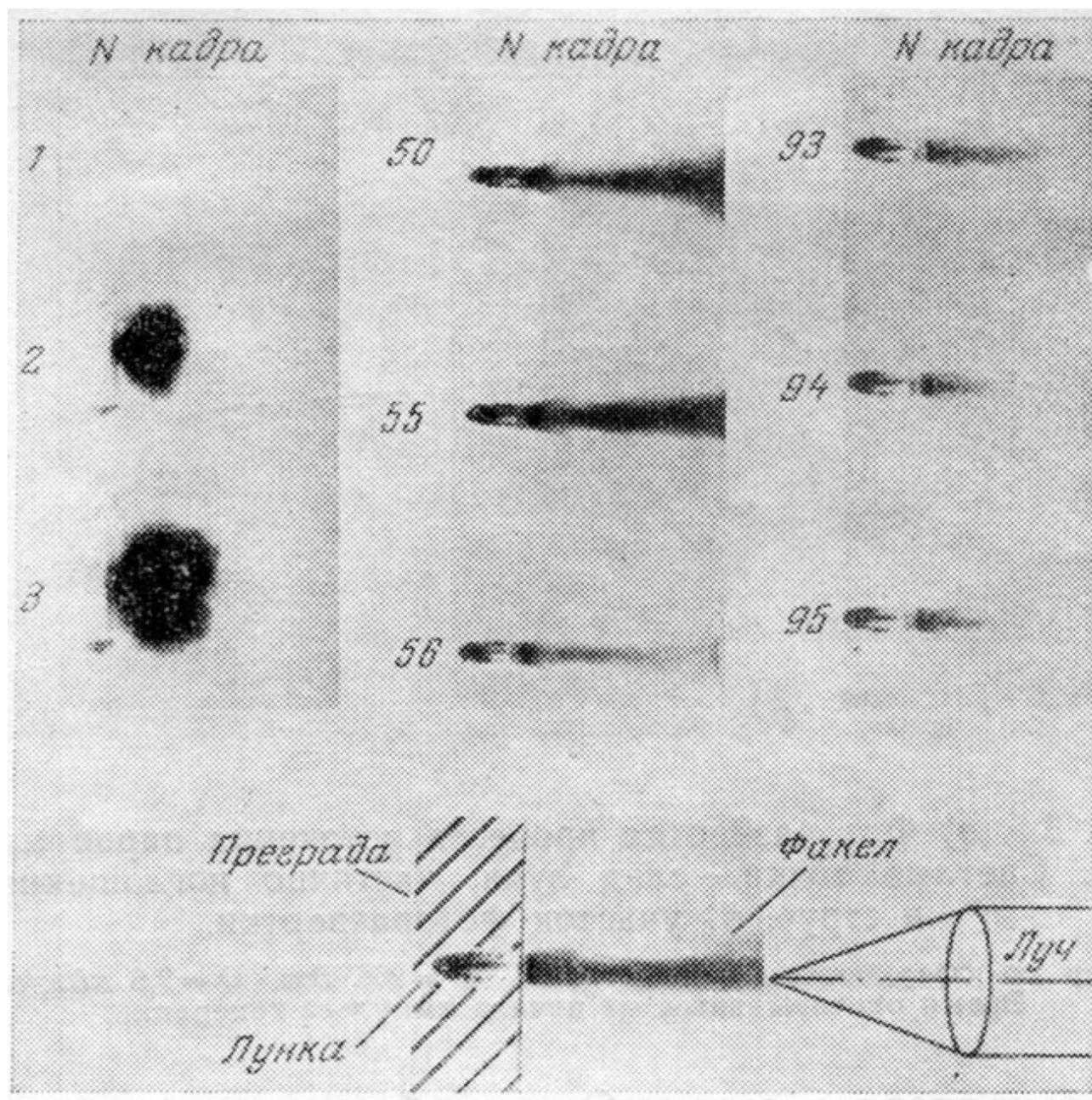


Схема формирования лунки и струи испаренного металла при действии лазерного излучения на магний; съемка произведена скоростной кинокамерой ФП-22 со скоростью 100000 кадров/с через стеклянную пластинку, приклеенную к образцу, луч фокусировался на границу стекло-металл. Лазер с параметрами.  $W = 130$  Дж,  $Q = 65$  кДж/см<sup>2</sup>.

**ГЛАВА 3.**

**ПАРАМЕТРЫ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЛАЗЕРОВ  
И ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

### 3.1. ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ: ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕЖДУ РЕЖИМАМИ ОБРАБОТКИ 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.

Формулы (2.15) и (2.16) гл. 2 позволяют посчитать пороговую (критическую) плотность мощности  $q^{\text{пор}}$ , необходимую для нагревания поверхности до заданной температуры  $T$ :

Значения порогов испарения  $q^{\text{пор}}$  некоторых металлов импульсным излучением, вычисленные по формуле (2.15) приведены в таблицах 2.2 и 2.3 гл 2. Пороги испарения для импульсного воздействия ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ) представлены в таблице 2.2, а для непрерывных лазеров (источник неподвижный) в таблице 2.3 (гл.2)

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

Теперь легко можно задать критерий для мощности технологических лазеров.

$$\text{Из} \quad P = qS \quad (3.1),$$

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

Таким образом, при различных операциях с большинством материалов достаточная мощность (как в импульсном так и непрерывном режиме) составляет

$$P \approx 10^3 \text{ Вт}$$

Эту величину можно рассматривать как **критерий** необходимой мощности «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 (2.14, 2.15, 2.16, 3.1) 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 необходимое время воздействия, влияние степени фокусировки, теплофизических и оптических параметров материала и т.д.

## 3.2. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ИЗЛУЧЕНИЯ 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:

$$P_{\text{имп}} = \bar{P} / f \tau \quad (3.2)$$

Таким образом, даже при малой  $\bar{P}$  можно обеспечить необходимую степень воздействия при коротких  $\tau$  ( $P_{\text{имп}} \tau = W$  — энергия импульса) — пример — нано-пико- и 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  $\alpha$  (глубина проникновения света  $\delta = 1/\alpha$ ).

## 3. Длительность воздействия ф

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

Длительность воздействия определяет следующие характеристики процесса:

– пороговую энергию импульса  $W_{\text{имп}} = \frac{kT_{\text{и}}}{2A} \sqrt{\frac{\pi}{a}} \sqrt{\tau}$  (3.3),

– глубину прогреваемого слоя  $x_{\text{пр}} \sim \sqrt{a\tau}$  (3.4)

и количество образующейся жидкой фазы,

– величину давления отдачи паров  $P_{\text{и}} \sim W_{\text{и}}/\tau$  (3.5),

– 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:

$$\tau = d_0 / V_{\text{ск}} \quad (3.6),$$

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

В любом случае, чтобы использовать (3.6) надо, чтобы плотность потока превышала пороговую, т.е. соблюдалось условие (3.3).

При оценке эффективности использования коротких импульсов лазерного излучения надо также понимать, что  $h_{\text{исп}} \sim V_{\text{и}} \tau$ , и чем меньше  $\tau$ , тем меньше толщина слоя, испаренного при воздействии одного импульса.

### **Возможности регулировки длительности импульса:**

– **твердотельные лазеры** – модуляция добротности (внутрирезонаторная)

Nd–YAG – акустооптическая,  
стекло:Nd – электрооптическая,  
рубиновый и другие – пассивная – светофильтры, примеси в газах,

– **полупроводниковые лазеры** – электрическая модуляция,  
другие лазеры – внерезонаторная электромеханическая модуляция

– **СО<sub>2</sub>–мощные лазеры** – электромеханическая модуляция (прерыватель – обтюратор, невыгодно по мощности)

пассивная – светофильтры, примеси в смеси газов

– **СО<sub>2</sub>–волноводные лазеры** – по питанию (накачка радиочастотным разрядом)

– **твердотельные 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,

– **N<sub>2</sub>, Cu, эксимерный лазер** и тому подобные спектрально–люминесцентные свойства среды (самоограниченные верхние переходы — малое время жизни на верхнем уровне),  $\tau \sim 10^{-8}$  с

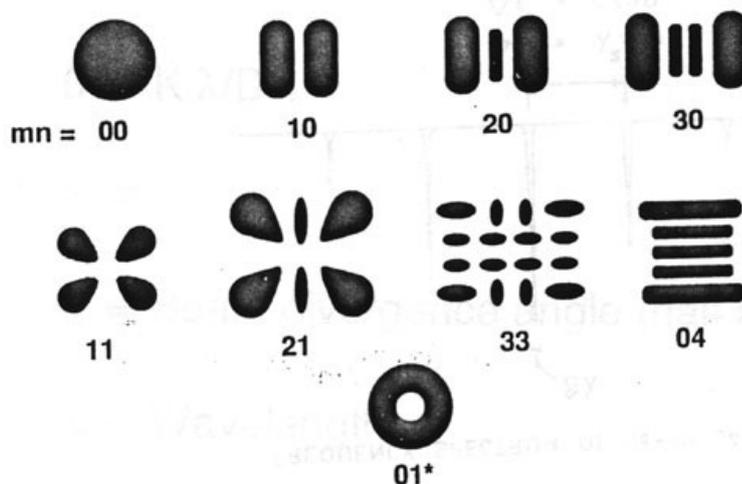
– **CO<sub>2</sub>, Ar — непрерывного действия** — сканирование пучка или движение (вращение) объекта со скоростью  $V_{ск}$ .

Различные длительности импульса лазеров и варианты их реализации приведены в Таблице 3.1.

Таблица 3.1

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

#### 4. Пространственные характеристики лазерного пучка. Модовая структура излучения (TEM<sub>mn</sub>)



*Изображения модовой структуры пучков  
некоторых низших порядков.*

Угловая расходимость пучка

$$\alpha = A_d \frac{\lambda}{b_d} \quad (3.7)$$

где  $\alpha$  — полный угол расходимости пучка,  $\lambda$  — длина волны,  $b_d$  — характерный размер выходного окна лазера, ответственного за дифракцию,  $A_d$  — коэффициент, отвечающий за распределение интенсивности в поперечном сечении пучка.

Величины  $b_d$  и  $A_d$ , и  $\alpha$  для разных лазерных лучей приведены в таблице 3.2.

*Таблица 3.2*

Тип лазерного пучка	$b_d$	$A_d$	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  $\alpha$  к расходимости того же лазера, если бы он излучал одномодовый Гауссовский пучок,  $\alpha_{\Gamma}$ :

$$M^2 = \alpha / \alpha_{\Gamma} \quad (3.8)$$

Как известно,

$$\alpha_{\Gamma} = \lambda / \pi w_0 = 4\lambda / \pi d_{\min} \quad (3.9)$$

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:

$$\alpha_{\text{л}} = D_{\text{л}} / 2f \quad (3.10)$$

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

$$d_{\min} = 8M^2 f \lambda / \pi D_{\text{л}} \quad (3.11)$$

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  $\lambda_{\text{м}} = M^2 \lambda$ .

Инвариант Лагранжа–Гельмгольца.

Другой способ характеристики пространственно–геометрических характеристик оптических пучков основан на использовании инварианта Лагранжа–Гельмгольца  $J$

$$D\alpha = D'\alpha' = J = \text{const} \quad (3.12)$$



### 3.3. ХАРАКТЕРИСТИКИ «КАЧЕСТВА» ИЗЛУЧЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЛАЗЕРОВ: КОГЕРЕНТНОСТЬ, МОНОХРОМАТИЧНОСТЬ, ПОЛЯРИЗАЦИЯ. ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

#### 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  $\Phi$  в результате расщепления лазерного пучка на две части и последующего их сложения после прохождения оптических путей различной длины:

$$\Phi = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (3.13)$$

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, время и область существования когерентности лазерного излучения ограничены конечной спектральной шириной линии генерации (усиления)  $\Delta\nu_{\text{л}}$ , когда в течение времени  $\tau$  могут излучаться разные  $\nu$  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  $2\pi$  через время

$$t = \tau_{\text{ког}} = \frac{1}{\Delta\nu_{\text{л}}}, \quad \boxed{\tau_{\text{ког}} = \frac{1}{\Delta\nu_{\text{л}}}} \quad (3.14)$$

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  $L_{\text{ког}}$ :

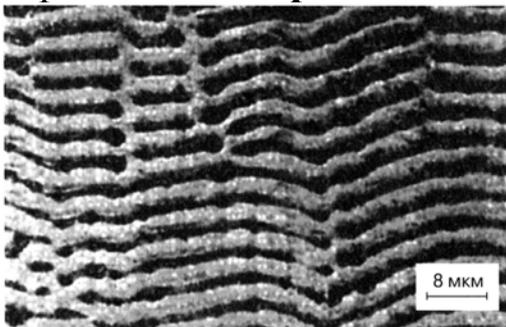
$$L_{\text{ког}} = c\tau_{\text{ког}} = \frac{c}{\Delta\nu_{\text{л}}} \quad (3.15)$$

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**, интерферирующей с падающей, что приводит к изменению энергетики процесса и к образованию **периодических поверхностных структур**.



Фотография периодической структуры, полученной на поверхности кремния под действием одиночного импульса излучения Nd:YAG лазера длительностью  $\tau = 1$  мс,  $q = 0.7 \cdot 10^6$  Вт/см<sup>2</sup>

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<sub>2</sub>-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  $\varphi_1, \varphi_2$  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  $I_i = \bar{I}$   $I_\Sigma = N_\lambda \bar{I}$ , где  $N_\lambda$  — 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.  $E_\Sigma = \sum_i E_i = N_\lambda \bar{E}$ ,  $I_\Sigma = N_\lambda^2 E^2 = N_\lambda^2 I$  — 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

$$M_{xp} = \frac{\Delta\nu}{\nu_0} \quad (3.16)$$

где  $\Delta\nu$  — спектральная ширина контура излучения лазера,  $\nu_0$  — центральная частота контура.

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

На понятии монохроматичности основаны определения спектральной яркости лазеров:

$$\Phi_c = \frac{Q}{\Delta\nu\Delta\Omega} \quad (3.17)$$

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  $\vec{C}$ .

Индуцированное 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
- приемлемые эксплуатационные характеристики:
- максимальный ресурс и надежность,
- простота конструкции и обслуживания,
- минимальный вес и размеры
- экономическая эффективность

### 3.4. ХАРАКТЕРНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЛАЗЕРОВ

Таблица 3.4

Тип лазера	Длина волны $\lambda$ , мкм	Энергия в импульсе $W$ , Дж	Длительность импульса $\tau$ , с	Частота повтор. импульсов $f$ , Гц	Мощность (непр.) $P$ , Вт	Угловая расходимость $\alpha$ , мрад	Эффективность (кпд) $\eta$ , %	Применения, примечания
<b>Nd-YAG, импульсный режим</b>								
Nd-YAG, свободная генерация	1.06	1	$10^{-3}$	$10^2$		1-10	1-3	сверление отверстий, резка пластин
Nd-YAG, акусто-оптическая Q-модуляция	1.06	$10^{-3}$	$10^{-7}$	$10^4$		1	$\leq 1$	технологические применения
Nd-YAG, электрооптическая Q-модуляция	1.06	$1 (10^{-3} - 10^{-4})$	$10^{-3} (10^{-8})$	$10^2 (10^5)$		1	$\leq 1$	измерительные применения, технология, медицина
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	повышенный КПД,
Nd-YAG, волоконного типа	1.06	$0.5 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^4$		$< 1$	$> 1$	высокая эффективность всех применений
<b>Nd-YAG, непрерывное излучение</b>								
Nd-YAG, ламповая накачка	1.06				10-2000	1-10	3	доступна большая мощность
Nd-YAG, диодная накачка	1.06				20-100	1-10	10	до 10 кВт в исследованиях
Yb-YAG, волоконный	1.06				50-20000	1	25-30	до 20 кВт и более

## ХАРАКТЕРНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЛАЗЕРОВ

Таблица 3.4 (продолжение 1)

Тип лазера	Длина волны $\lambda$ , мкм	Энергия в импульсе $W$ , Дж	Длительность импульса $\tau$ , с	Частота повтор. импульсов $f$ , Гц	Мощность (непр.) $P$ , Вт	Угловая расходимость $\alpha$ , мрад	Эффективность (кпд) $\eta$ , %	Применения, примечания
<b>CO<sub>2</sub>, импульсный режим</b>								
CO <sub>2</sub> с радиочастотной накачкой	10.6	$5 \cdot 10^{-2}$	$10^{-4}$	100–2500		4	$\leq 10$	квази-непрерывный
CO <sub>2</sub> –щелевой	10.6		$3 \cdot 10^{-5}$ $5 \cdot 10^{-4}$	100–5000		3 4	$\leq 10$	слабо представлен на рынке
CO <sub>2</sub> –ТЕА	10.6	$10^{-1}$ 20	$10^{-5}$ $10^{-6}$	$10^2$ 200		2.5 10	$\leq 10$ $\leq 10$	некоммерческий
<b>CO<sub>2</sub>, непрерывный режим</b>								
CO <sub>2</sub> , с медленной продольной прокачкой	10.6				100–1000	1	10	резка и обработка стекла
CO <sub>2</sub> , высокой мощности								
С медленной продольной прокачкой, диффузное охлаждение, многолучевой	до 3 кВт/м							обычно не используется для точного формования
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 3.4 (продолжение 2)

Тип лазера	Длина волны $\lambda$ , км	Энергия в импульсе $W$ , Дж	Длительность импульса $\tau$ , с	Частота повтор. импульсов $f$ , Гц	Мощность (непр.) $P$ , Вт	Угловая расходимость $\alpha$ , мрад	Эффективность (кпд) $\eta$ , %	Примечания, применения	
<b>Другие твердотельные лазеры</b>									
Рубиновый	0.69	0.1–1.0	$10^{-3}$ – $10^{-7}$	10		1–10	$\geq 1$	применяются в офтальмологии спектроскопии	
Ti-сапфир	0.6–1.1	$10^{-8}$	$10^{-13}$ – $10^{-14}$	$10^8$		0.5	$< 1$	технологии будущего (высокое качество)	
<b>Основные полупроводниковые лазеры</b>									
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 3.4 (окончание)

Тип лазера	Длина волны $\lambda$ , мкм	Энергия в импульсе $W$ , Дж	Длительность импульса $\tau$ , с	Частота следования импульсов $f$ , Гц	Мощность (непр.) $P$ , Вт	Угловая расходимость $\alpha$ , мрад	Эффективность (кпд) $\eta$ , %	Применения, примечания
<b>Газовые лазеры</b>								
На парах меди	0.51–0.57	$10^{-3}$	$10^{-8}$	$10^4$		1	1	обраб. пленок, микроскопия
<b>Эксимерные</b>								
XeCl	0.308	0.1–100	$10^{-8}$	10–500	150 Вт (средняя)	1x3	1	лазерная литография; размер пучка 10x30 мм.
KrF	0.249							
ArF	0.193							
На ионах Ar	0.50				20	0.5–1	<1	стереолитография
N <sub>2</sub>	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	измерения, голография

### 3.5. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЛАЗЕРОВ

Таблица 3.5

Новые спектральные диапазоны	Высокая мощность	Короткие импульсы
Эксимерные лазеры глубокого УФ	Волоконные лазеры (с полупроводниковой накачкой) — до 50 кВт и более	Лазеры Тi-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 (перестройка частоты)	CO <sub>2</sub> -лазеры	Лазеры на стекле с Nd (до $10^{-12}$ , максимальная мощность)
Лазеры на свободных электронах (терагерцы и др.)		
<p>Высокая стабильность, компьютерное управление, возможность снижения себестоимости</p>		

### **3.6. ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ВАЖНЕЙШИХ ТИПОВ ЛАЗЕРОВ**

<b>CO<sub>2</sub>-лазеры:</b>	<b>обработка материалов, медицина, научные исследования, оборона</b>
<b>Твердотельные (YAG:Nd):</b>	<b>обработка материалов, датчики, спектроскопия, научные исследования, оборона</b>
<b>Ионные лазеры (Ar):</b>	<b>печать, датчики, развлечения, обработка материалов, научные исследования</b>
<b>Полупроводниковые:</b>	<b>оптическая связь, хранение информации, печать, сканеры, юстировка, датчики, научные исследования, медицина</b>
<b>Волоконные:</b>	<b>оптическая связь, медицина, промышленность</b>
<b>Эксимерные:</b>	<b>микроэлектроника-литография, медицина, научные исследования</b>
<b>На парах металлов (Cu):</b>	<b>научные исследования, микроскопия, обработка материалов</b>
<b>He-Ne:</b>	<b>сканирование, измерения, датчики, юстировка, голография, научные исследования</b>
<b>На красителях:</b>	<b>спектроскопия, научные исследования</b>

### 3.7. ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЛАЗЕРОВ

#### ГАЗОВЫЕ ЛАЗЕРЫ. ДОСТОИНСТВА

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

Доминируют  $\text{CO}_2$ -лазеры  
(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)

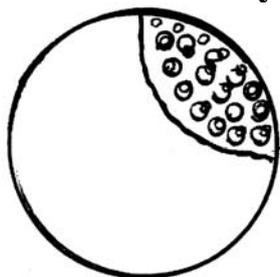
- Медленная продольная прокачка до 900 Вт
- Быстрая продольная прокачка (>350 Вт на метр)
- Одномодовое или “околоодномодовое” излучение (порядка 2-х дифракционных пределов при 1000 Вт)
- Области применения: обработка материалов, медицина

Большой мощности (>3 кВт на метр)

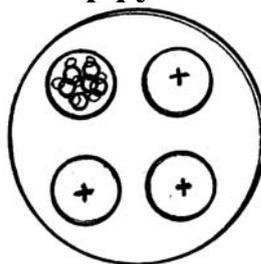
(коммерческое исполнение до 25 кВт)

- Быстрая продольная прокачка (до 6000 Вт)
- Поперечное возбуждение (>5000 Вт)
- Обычно многомодовое излучение
- Области применения: промышленные, военные

## Многолучевые CO<sub>2</sub>-лазеры с диффузным охлаждением

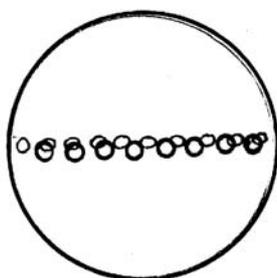


МТЛ-2  
61 трубка  
2.5 кВт  
МТЛ-4  
85 трубок  
4.0 кВт  
 $M^2 \sim 3$ , длина  
1.7 м

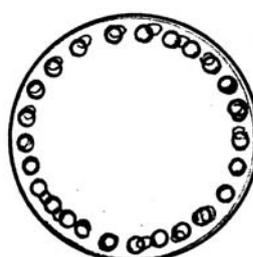


ТЛ-6  
 $31 \times 4 = 124$   
трубки  
6.0 кВт  
 $M^2 = 3$   
 $L = 2$  м

## Многоканальные однолучевые

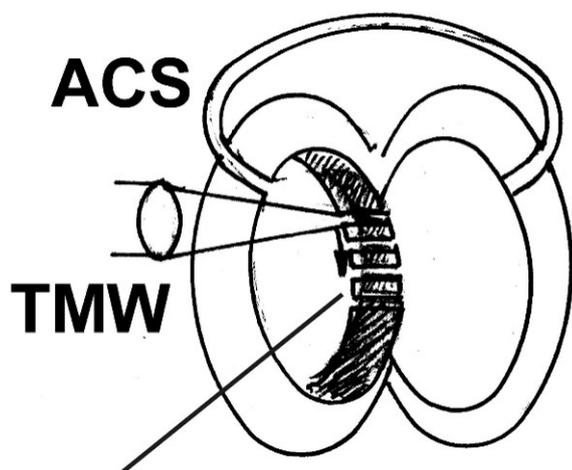


ТЛ-500  
9 трубок  
TEM<sub>00</sub>  
500 Вт  
 $M^2 = 1$   
 $L = 1.7$  м

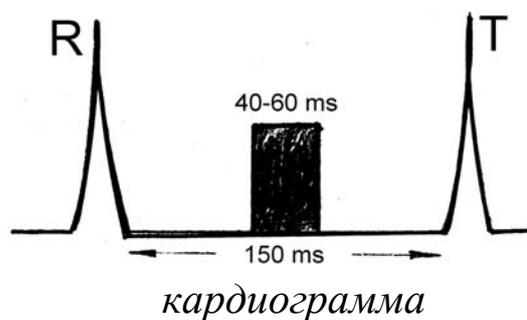


ТЛ-1000  
20 трубок  
TEM<sub>00</sub>  
1 кВт  
 $M^2 = 1$   
 $L = 2$  м

## Трансмиокардиальная лазерная васкуляризация (вместо аутокоронарного шунтирования)



десятки каналов



Лазерные установки для операции на сердце PLC C<sub>0</sub> (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 \$

## **ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ ЛАЗЕРЫ. ПРЕИМУЩЕСТВА**

- высокая удельная мощность,
- высокое качество при большой мощности (TEM<sub>00</sub>),
- высокий КПД (с диодной накачкой) > 20%,
- большая энергия (до кДж/импульс),
- широкий диапазон длин волн,
- широкий диапазон длительностей импульсов (от 10<sup>-2</sup> до 10<sup>-15</sup> 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-BeAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (александрит) — 0.72–0.78 мкм.

## Доминируют YAG:Nd

Длины волн: 1064, 1319, 532, 355, 266 нм

Мощность непрерывного излучения  
(с ламповой накачкой):

10 – 1800 Вт (TEM<sub>00</sub> до 30 Вт)

Мощность непрерывного излучения  
(с диодной накачкой):

1 мВт — 10 Вт, TEM<sub>00</sub>

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, десятки мкДж при 104 Гц

Другие среды, активируемые Nd: стекло, YLF (иттрий-литиевый фторид), GSGG (галлий–скандий–гадолиниевый гранат), александрит (Cr–BeAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>)

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

**Nd–YAG лазер (с оптической накачкой)**  
**Основные режимы работы твердотельных лазеров**  
 приведены в таблице 3.6

Таблица 3.6

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 <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Синхронизация мод	$10^{-13}–10^{-15}$

**Основные параметры твердотельных лазеров**  
 с регулируемой длиной волны приведены в таблице 3.7

Таблица 3.7

Кристалл	Диапазон длин волн $\lambda$ , мкм	Режим		Средняя выходная мощность Вт	Источник накачки
		непрерывный	импульсный		
Ti <sup>3+</sup> : Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Ti–сапфир)	660 ... 986	+		0.07	Ar <sup>+</sup> –лазер
Cr <sup>3+</sup> : BeAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub> (александрит)	701 ... 826	+	+	100	Арс лампа/ Имп. лампа
Гранаты					
Cr <sup>3+</sup> : Cd <sub>3</sub> Sc <sub>2</sub> Ga <sub>3</sub> O <sub>12</sub> (GSGG)	742 ... 842	+	+	0.25	Kr <sup>+</sup> –лазер, лампа
Cr <sup>3+</sup> : Cd <sub>3</sub> Sc <sub>2</sub> Al <sub>3</sub> O <sub>12</sub> (GSAG)	~780	+		0.09	Kr <sup>+</sup> –лазер
Фториды					
Cr <sup>3+</sup> : KZnF <sub>3</sub>	785 ... 865	+		0.085	Kr <sup>+</sup> –лазер
Co: MgF <sub>2</sub>	1500 ... 2300	+	+		Nd:стекло лазер
Nd: LaF <sub>3</sub>	172		+		Лазер
Ce: YLF	325		+		
Ce: LaF <sub>2</sub>	286		+		
Cr <sup>3+</sup> : Be <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> (SiO <sub>3</sub> ) <sub>6</sub> (изумруд)	729 ... 809 685	+	+	0.32	Kr <sup>+</sup> –лазер Лампа
Cr <sup>3+</sup> : ZnWO <sub>4</sub>	980 ... 1050		+		Kr <sup>+</sup> –лазер

## 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

## 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.

## 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 - 30 %;
  - выход — волокно 50-200 мкм;
- качество пучка —  $M^2 = 2.5 - 6$  мрад;
- срок службы —  $> 100000$  часов;
- 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;
- компактность с воздушным охлаждением;
- коллимированный выходной пучок с  $M^2 = 1.4 - 5$ ;
- срок службы —  $> 100000$  часов;
- КПД — более 10 %.

**ГЛАВА 4.  
ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ  
ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ**

## ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

Делятся на энергетические и наблюдательные  
(ниже рассматриваются только энергетические оптические системы, предназначенные для управления лазерным пучком)

**Энергетические оптические системы должны обеспечивать :**

**плотность мощности излучения**, достаточную для выполнения заданного типа поверхностной обработки,

**максимальное использование энергии лазерного пучка**, с учетом потерь на диафрагмах (виньетирование) и на оптических компонентах (Френелевское отражение и остаточное поглощение)

**точностные параметры:**

формирование зоны обработки заданной и строго очерченной формы,

формирование изображения зоны воздействия с минимальной неровностью края

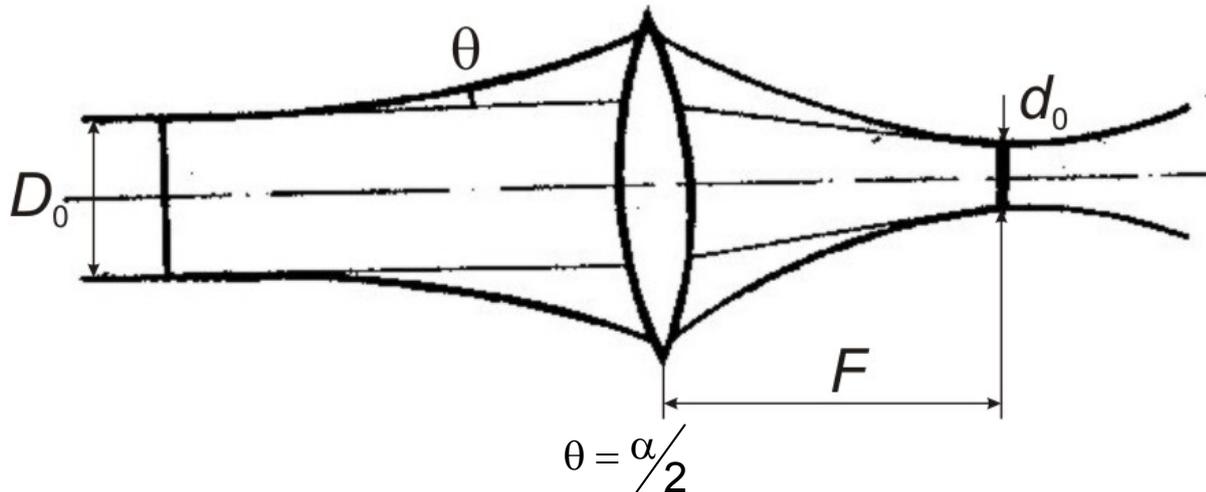
При рассмотрении требований к ОС в части **рабочего поля** наиболее важные вопросы:

как перекрыть полную рабочую зону посредством сканирующих оптикомеханических систем или проекционных оптических систем с приемлемой точностью, производительностью и самым простым путем

## 4.1. ФОКУСИРУЮЩИЕ СХЕМЫ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

### Основные пространственно–геометрические модели лазерных источников

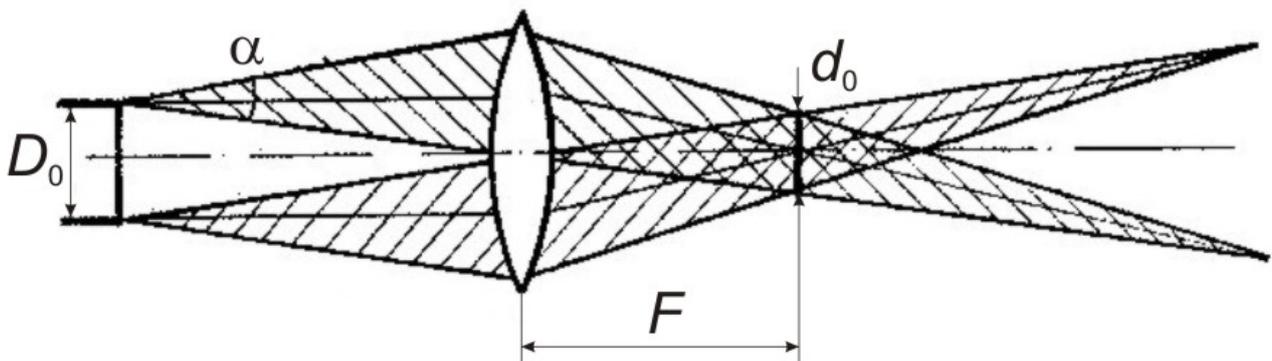
#### Гауссова модель лазерного источника (одномодовый режим)



в перетяжке  $d_0 = 2\omega_0$

#### Телецентрическая модель лазерного источника (многомодовый режим)

(оси всех пучков  $\parallel$  оптической оси, все направления внутри  $\alpha$  равноценны)



фокальное пятно  $d_0 = \alpha F$ , глубина резкости  $l = 2d_0 F/D$

теоретические пределы:  $d_0 = \lambda F/D \approx \lambda$ ;  $L \approx 2d_0^2/\lambda \approx 2d_0$

Пример: при  $\alpha = 10^{-3}$  рад,  $F = 1$  см,  $d_0 = 10$  мкм,  $l_0 = 20$  мкм

**ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ В ФОКАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ**  
приведены в таблице 4.1

Таблица 4.1

Тип лазерного пучка (поперечного распределения интенсивности)	Теоретические параметры лазерного пучка			Примечания
	Полный угол расходимости пучка $\alpha = 2\theta$	Фокальный диаметр пятна $d_0 = \alpha F$	Распределение интенсивности в фокальном пятне	
Гауссовый — одномодовый	$1.26 \frac{\lambda}{D}$	$1.26 \frac{\lambda}{D} F$		вся энергия в фокальном пятне
Супергауссовый — многомодовый	$1.26 \frac{\lambda}{D} \sqrt{N}$	$1.26 \frac{\lambda}{D} \sqrt{N} F$		вся энергия в фокальном пятне
Однородный — дифракционно ограниченный	$2.44 \frac{\lambda}{D}$	$2.44 \frac{\lambda}{D} F$		в центральном максимуме 84% энергии
Теоретический дальнепольный предел	$\sim \frac{\lambda}{D}$	$\sim \lambda$		

Но что такое  $d_0$  — минимальный размер воздействия?

Что будет если интенсивность воздействия на материал внутри  $d_0$  будет на уровне  $q > q_n$ ?

**Ответ смотрите далее**

## ДОСТОИНСТВА И НЕДОСТАТКИ ФОКУСИРУЮЩЕЙ ТЕХНИКИ

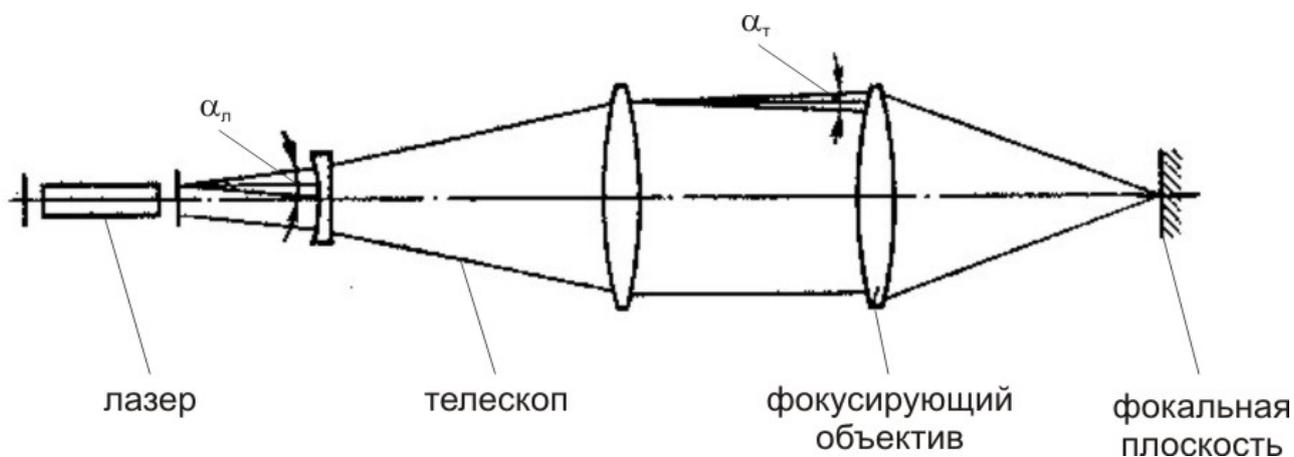
Фокусирующая техника характеризуется простотой, полным использованием лазерной энергии и оптическим разрешением (размером светового пятна), определяемым расходимостью пучка и фокусным расстоянием линзы.

Дальнейшее уменьшение размера пятна может быть достигнуто размещением перед объективом телескопического расширителя пучка с увеличением  $\Gamma$  (снижение расхождения в  $\Gamma$  раз). При этом можно либо уменьшать  $d_0$ , либо увеличивать фокусное расстояние объектива  $f$  без изменения  $d_0$  ( $d_0 = \alpha_n f / \Gamma$ ).

Использование расширителя пучка в рабочей станции «КВАНТ-3» приводит к получению пятна диаметром 5 мкм с рабочим отрезком объектива 70 мм. Такая большая величина рабочего отрезка обеспечивает размещение (если необходимо) образца с различными зондами, контактных измерительных и других устройств.

**Главные недостатки фокусирующей техники:**

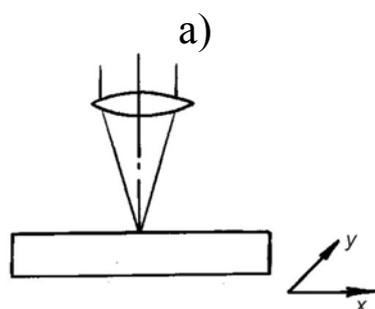
- неоднородное распределение интенсивности в фокальном пятне
- неопределенность размера зоны воздействия, который зависит от порога чувствительности материала,
- сложность обеспечения достаточной точности краев зоны воздействия при сканировании.



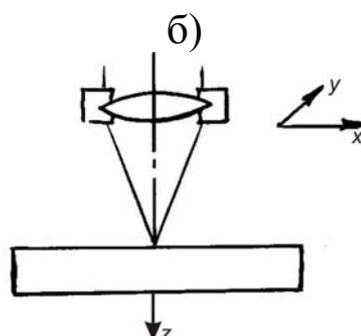
*Схема уменьшения размера фокального пятна  
с помощью телескопической системы*

## 4.2. СКАНИРУЮЩИЕ СИСТЕМЫ А-ТИПА ДЛЯ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

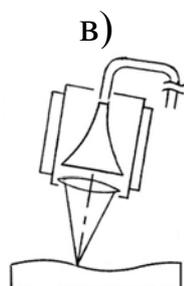
**А-тип: поверхность обработки расположена в фокальной плоскости линзы  
(сканирование с прямоугольной разверткой)**



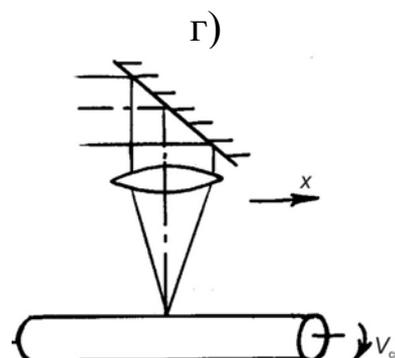
2-х мерное сканирование  
(координатный стол)



3-х мерное сканирование  
(«летающая» оптика для  
последовательного лазерного синтеза)



6- координатная ( $x, y, z, \varphi, \psi, \chi$ )  
роботизированная  
микрообработка (волоконно-  
оптический кабель в «руке»  
робота)



2-х мерная развертка  
(офсетная печать)

*Схемы сканирующих систем А-типа*

## ТОЧНОСТЬ СКАНИРУЮЩИХ СИСТЕМ А-ТИПА

**Важное замечание:** очевидно, что для стабильных условий микрообработки (стабильного качества) необходимо обеспечить постоянство плотности потока мощности  $q$ . Из условий (2.18) и (3.6) видно, что требуемая величина  $q$  для сканирующих систем равна:

$$q = \frac{hV_{\text{ск}}}{d_0} L_{\text{и}} \quad (4.1)$$

или относительно мощности лазера  $P$  из (2.8) то же условие выражается как:

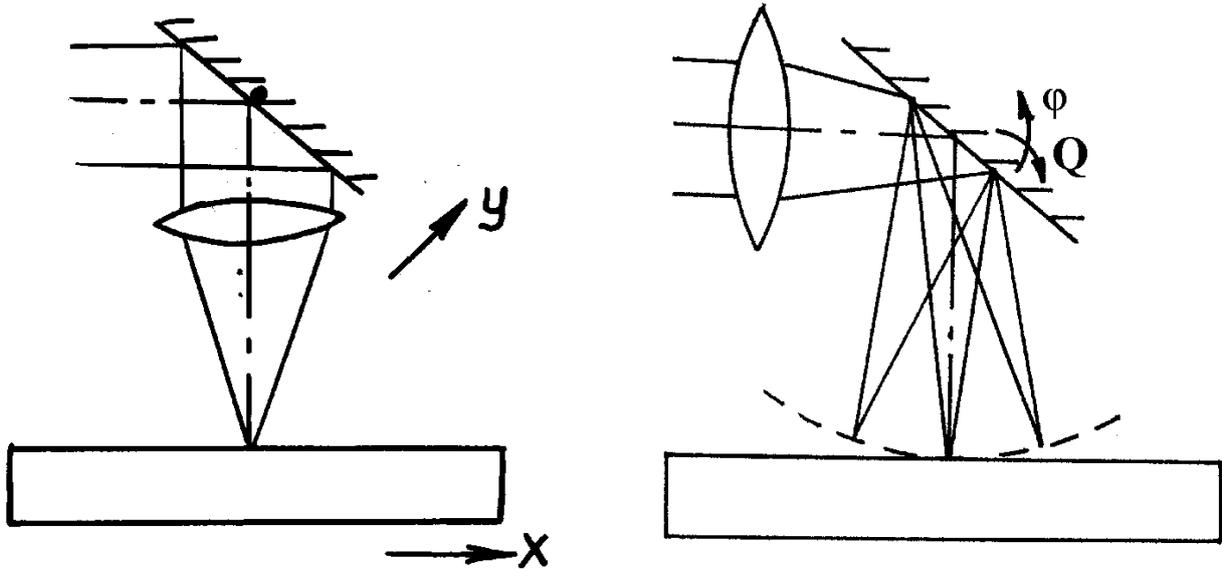
$$\frac{P}{V_{\text{ск}}} = hd_0 L_{\text{и}} = \text{const} = B \quad (4.2)$$

Это означает, что стабильные условия подразумевают постоянство мощности лазера  $P$  и скорости сканирования пучка  $V_{\text{ск}}$ . Это особенно важно для обработки образцов сложной формы с высокой скоростью. В этом случае невозможно поддерживать одинаковую скорость на прямых линиях и на крутых поворотах. Если  $V_{\text{ск}}$  не константа, а изменяется в соответствии с некоторым законом  $V_{\text{ск}}(t)$ , невозможно удовлетворить условию (4.2)  $P = BV_{\text{ск}}(t)$  при никаком контроле мощности непрерывного лазера.

**Таким образом, только импульсные лазеры могут обеспечить условие (4.2), т.е. Постоянную плотность потока мощности в обрабатываемой зоне и стабильное качество лазерной микрообработки.**

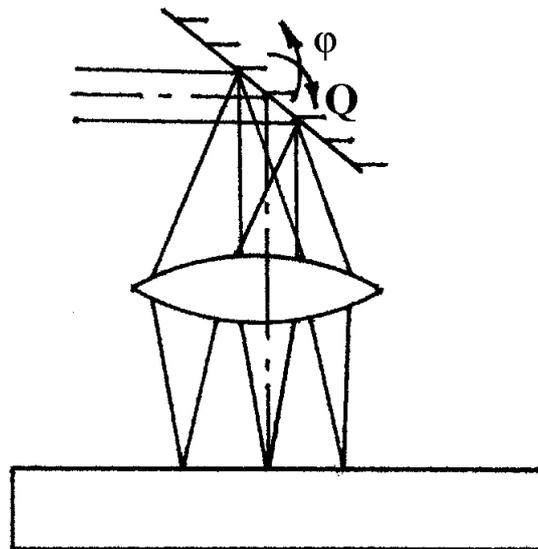
## СКАНИРУЮЩИЕ СИСТЕМЫ Б–ТИПА ДЛЯ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

**Б–тип: только центральная точка обрабатываемой поверхности  
находится в фокальной плоскости линзы  
(сканирующие системы с угловым отклонением пучка)**



одномерное угловое отклонение

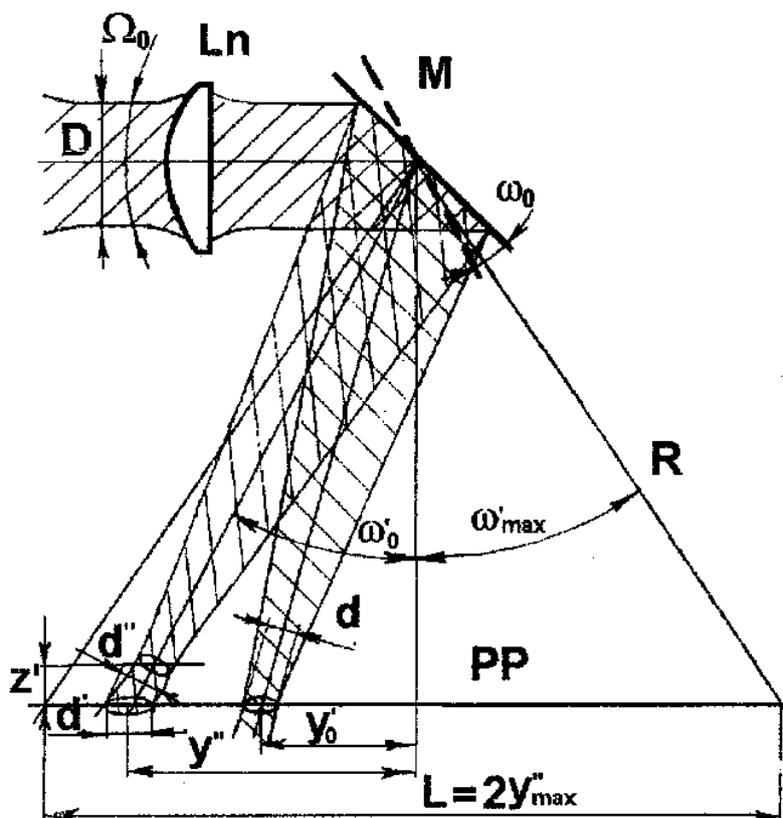
2–х мерная сканирующая система  
с внешней линзой



2–х мерная система типа линзы с “плоским полем”

*Схемы сканирующих систем Б–типа*

## ТОЧНОСТЬ СКАНИРУЮЩИХ СИСТЕМ Б–ТИПА, КАК ФУНКЦИЯ ОПТИЧЕСКИХ ( $L, f$ ) И ЛАЗЕРНЫХ ( $D, \Omega$ ) ПАРАМЕТРОВ



*Схема хода лучей в сканирующей системе Б–типа*

Инвариант Лагранжа–Гельмгольца  $J$

$$J = D\Omega_0 = \text{const} \quad (4.3)$$

$$\Delta = \frac{d' - d}{d} \quad (4.4)$$

$$\Delta = (Z'/Z'_0)^2/2 + (y'/f'_0)/2 \quad (4.5)$$

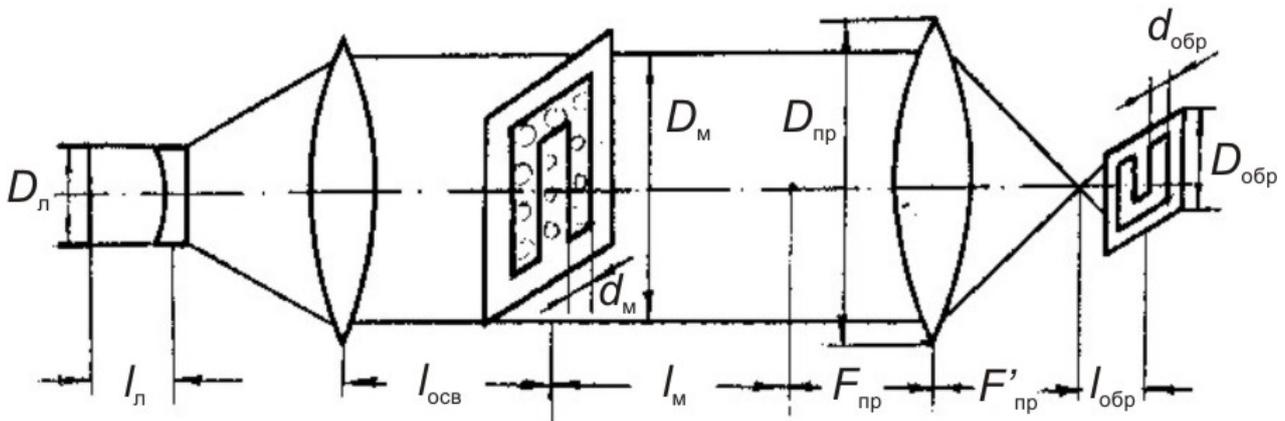
$$\Delta = \left(\frac{Ll}{4Dd}\right)^2 \left[ 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{Ll}{4Dd}\right)^2 (D/d)^2 \right] \quad (4.6)$$

$$\Delta = \left[ 1 + 0.5\omega_0^2 (D/d)^2 \right] \quad (4.7)$$

Из (4.5–4.7) ясно, что требования увеличения поля обработки  $L$  и разрешающей способности  $1/d$  (уменьшения диаметра фокального пятна  $d$ ) противоречат требованию снижения погрешности.

### 4.3. ПРОЕКЦИОННЫЕ СХЕМЫ ДЛЯ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

#### МИКРОПРОЕКЦИОННЫЙ МЕТОД



Оптическая схема микропроекторной системы

#### Размерный расчет

$$\beta_{\text{осв}} = \frac{D_{\text{м}}}{D_{\text{л}}} = \Gamma_{\text{Т}} \quad (4.8)$$

$$\beta_{\text{пр}} = \frac{D_{\text{обр}}}{D_{\text{м}}} = \frac{l_{\text{обр}}}{F_{\text{пр}}} = \frac{F_{\text{пр}}}{l_{\text{обр}}} \quad (4.9)$$

Из  $\beta_{\text{осв}}$  и  $\beta_{\text{пр}}$  возможно определить  $D_{\text{м}}$ ,  $d_{\text{м}}$ ,  $l_{\text{м}}$  и  $l_{\text{обр}}$  — все главные параметры схемы.

#### Энергетический расчет ( $Q$ — плотность энергии)

$$Q_{\text{м}} = \frac{Q_{\text{л}}}{\beta_{\text{осв}}^2}$$

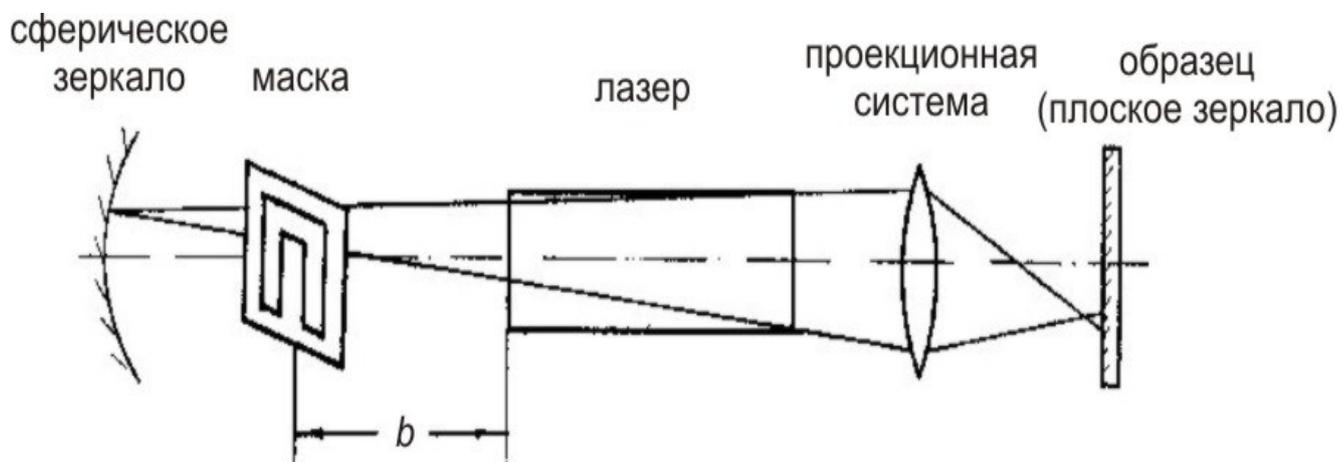
$$Q_{\text{обр}} = \frac{Q_{\text{л}}}{\beta_{\text{обр}}^2 \beta_{\text{пр}}^2}$$

$$Q_{\text{м}}^{\text{пор}} \beta_{\text{осв}}^2 > Q_{\text{л}} > Q_{\text{обр}}^{\text{пор}} \beta_{\text{осв}}^2 \beta_{\text{пр}}^2$$

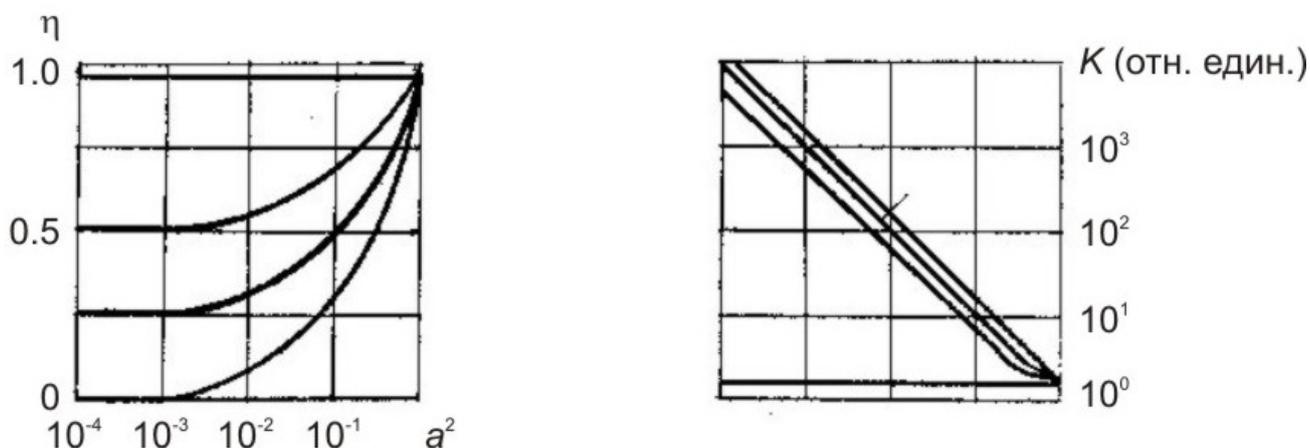
Пример: если дано  $D_{\text{обр}} = 1$  мм,  $d_{\text{обр}} = 5$  мкм,  $D_{\text{л}} = 1$  см,  $d_{\text{м}} = 100$  мкм, тогда из (4.5)  $\beta_{\text{пр}} = 1/20$ ,  $D_{\text{м}} = 2$  см, из (4.4)  $\beta_{\text{осв}} = 2$ , если  $F_{\text{м}} = 5$  см,  $l_{\text{м}} = 1$  м.



## АКТИВНЫЙ ПРОЕКЦИОННЫЙ МЕТОД



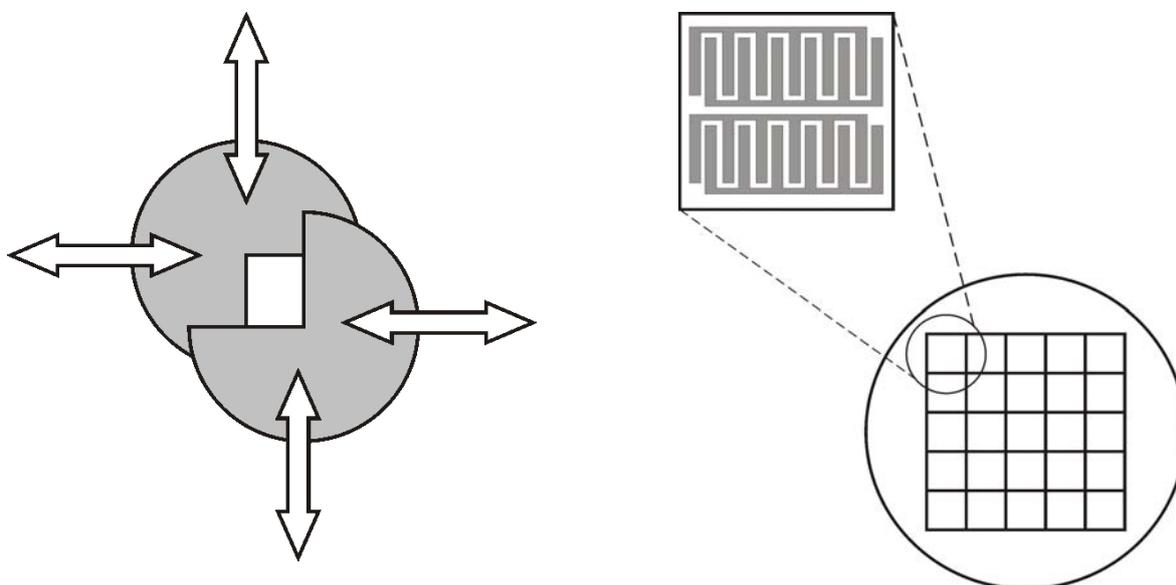
*Принципиальная схема активного проекционного метода*



*Энергетическая эффективность  $\eta$ , а) и плотность мощности  $K$ , б) активной и пассивной проекционной системы как функция относительного размера прозрачного окна в маске: 1 —  $b = \infty$ , 2 —  $b = 4$ , 3 —  $b = 0$ , 4 — пассивная микропроекционная система*

#### 4.4. КОМБИНИРОВАННЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

На практике большое распространение получили **комбинированные методы формирования изображения**, когда элемент изображения строится методом оптической проекции, а поле обработки перекрывается сканированием пучка (например, перемещением стола). К таким методам относятся **мультиплицирование изображения** и **фотонабор**, применяемые в фотолитографии и некоторые другие. В лазерных технологиях наибольшее распространение из таких методов получил **сканирующий проекционный** или **контурно-проекционный** [3, 4].



*Принципиальные схемы  
метода фотонабора (а) и метода мультипликации (б)*

**Принцип метода фотонабора** заключается в синтезе (наборе) изображения из элементарных частей (базовых элементов) путем последовательного экспонирования пятном с изменяющимся размером и формой в плоскости изображения. Для изменения геометрии пятна могут быть использованы подвижные диафрагмы

**Метод мультиплицирования** (размножения) изображений осуществляется многократным последовательным или параллельным нанесением повторяющегося топологического рисунка. Различают оптико-механическую и оптическую мультипликацию.

### **Проекционно–сканирующий (контурно–проекционный)**

метод состоит в том, что изображение синтезируется в результате последовательного обхода по контуру световым пучком специального сечения, которое представляет собой микропроекцию простого элемента, например, квадрата.

Схема контурно–проекционного метода аналогична схеме проекционного метода, но осветительная система работает с увеличением, меньшим 1.

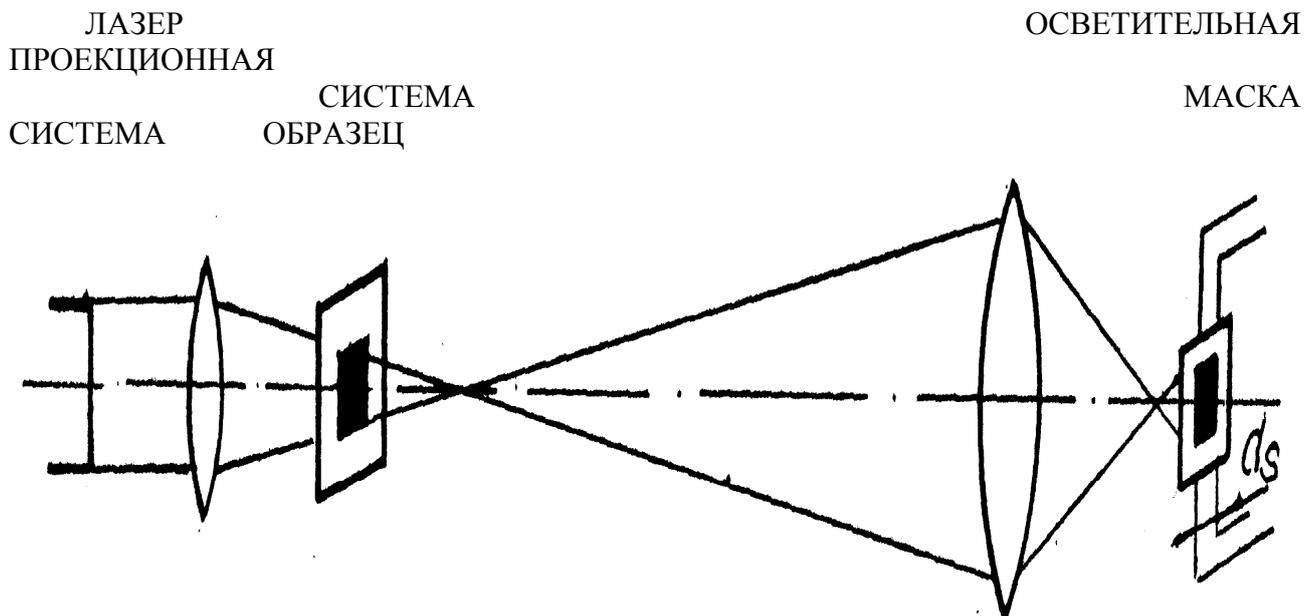
Обход заданного контура на обрабатываемой поверхности осуществляется перемещением рабочего стола, на котором располагается изделие, по программе или при использовании оптического плоттера.

Достоинствами контурно–проекционного метода формирования оптического изображения являются: независимость размеров общего поля изображения от разрешающей способности; высокая точность рисунка (вследствие использования элемента, образующего изображение, прямоугольной формы и равномерности распределения в нем энергии); высокая разрешающая способность; небольшие потери энергии на маске.

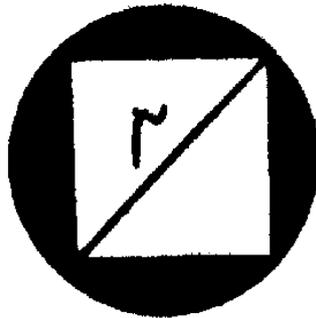
Заметим, что рассмотренное выше положение маски в плоскости изображения выходного окна лазера не является единственно возможным. Иной принцип построения осветительных систем — использование телескопа или расположение маски вблизи фокальной плоскости осветительной системы. Преимуществами таких осветительных систем являются значительно меньшие габаритные размеры и более равномерное распределение интенсивности излучения.

Для осуществления трехмерной (рельефной) обработки поверхности могут быть использованы различные модификации метода, например, контурно-проекционный метод с «дрожащей» маской (колеблющейся вдоль оптической оси системы по заданному закону в процессе перемещения облученной области по обрабатываемой поверхности), а также применение в микропроекционной схеме полутонных масок с переменным пропусканием.

## 4.5. ПРОЕКЦИОННО–СКАНИРУЮЩИЙ МЕТОД



*Принципиальная оптическая схема  
контурно–проекционного метода*



*Схема расположения квадратной маски в пучке круглого сечения*

### **Достоинства:**

–энергетическая эффективность составляет максимум

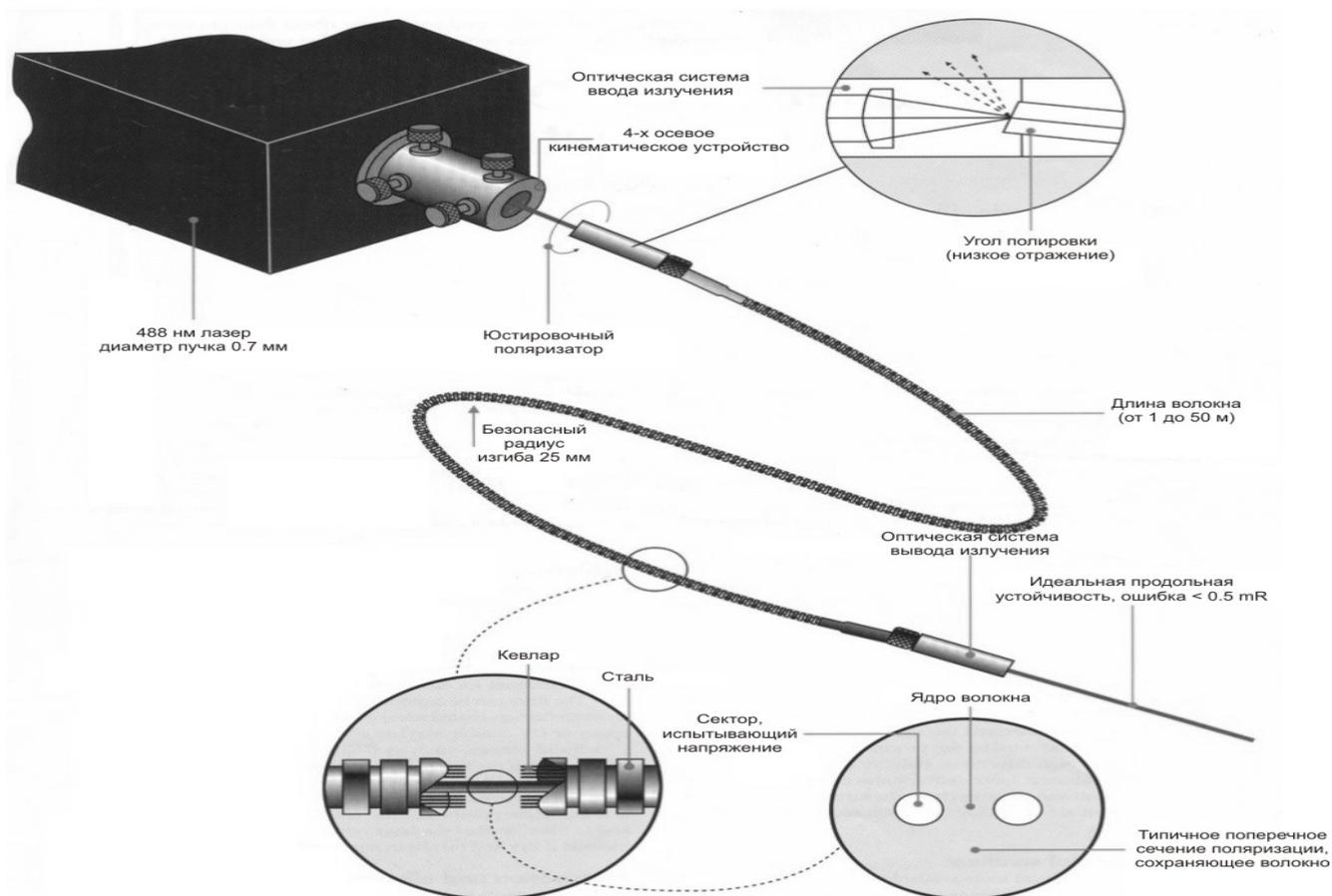
$$\eta = \frac{2r^2}{\pi r^2} \approx \frac{2}{3}$$

–нет противоречий между разрешающей способностью  $d_{обр}$  и  
полем изображения  $D_{обр}$

## 4.6. ВОЛОКОННО–ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ (ВОС) ДОСТАВКИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Применяются для доставки и распределения лазерного излучения по рабочим местам. ВОС могут улучшать качество пучка и обеспечить передачу достаточно больших мощностей до 1 кВт по одномодовому волокну и до 50 кВт по многомодовому оптическому кабелю.

Выходная апертура волокна — 0.22, требуется ее согласование с лазером (ввод) и объектом (фокусировка)



*Структура ВОС доставки*

## ТАКТИЛЬНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ ГОЛОВКА “HIGH-YAG” ДЛЯ ВОЛОКОННОЙ ДОСТАВКИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ЗОНУ ОБРАБОТКИ С ПОМОЩЬЮ РОБОТА



**ГЛАВА 5.  
ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ  
ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

## 5.1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ЛАЗЕРЫ И ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Известно, что инновации определяют сегодня экономический рост в развитых странах и что мотором инноваций является взаимопроникновение и взаимопревращение технологий. Инновационный потенциал уже давно является главной отличительной особенностью лазерно–оптической индустрии. Раньше ее часто упрекали в оторванности от практических задач («технология, которая ищет себе применения»), но в последние годы эта отрасль существенно перестроилась, ориентируясь на потребности полупроводниковой промышленности и производства бытовой электроники. Такая стратегия, ставшая заметной примерно в 2002 г., стала приносить свои плоды. Например, в 2006 г. объем продаж недиодных лазеров вырос на 10% по сравнению с 2005 г. (хотя из–за снижения цен на диодные лазеры суммарный лазерный рынок увеличился в том году всего на 2%). Но, с другой стороны, по мере усиления корреляции рынка фотоники с потребительским рынком он становится все более подверженным тем же факторам, которые определяют динамику последнего, — доверие покупателей, их готовность тратить деньги, цены на нефть и жилища, кредитные ставки, сбалансированность рынка труда, состояние американского доллара. В результате в 2007 г. после очень мощного взлета в первой половине года лазерный рынок во второй половине испытал заметные перепады, причем ситуация оказалась различной в разных секторах рынка, он далеко не однороден. В частности, на подъеме оказался спрос на лазеры для обрабатывающей промышленности — в результате появления новых быстро развивающихся рынков для них в Китае и Индии. В секторе научно–исследовательского оборудования спрос на лазеры сохранился на уровне предыдущего года, а в секторе микроэлектроники — заметно упал во многих регионах мира. В секторе медицинского оборудования продажи лазеров сильно зависят от готовности потребителей платить за новые медицинские услуги, поэтому имеют место и спады, и явный рост спроса (например, на лазеры для систем когерентной оптической томографии).

Суммарный объем продаж лазерных источников излучения в 2007 г. вырос по сравнению с 2006 г. на 9%. На 2008–й год ожидается рост на 7% — до 7.4 млрд. долл. США в абсолютном значении.

## **Экономические факторы**

Какие же макроэкономические факторы определяют столь неодинаковую эволюцию различных секторов лазерного рынка? Рассмотрим это несколько подробнее. Один из важнейших таких факторов — это, как уже упоминалось, снижение объемов производства в микроэлектронике и, соответственно, в полупроводниковой промышленности, причиной которого явилось снижение покупательского спроса на продукцию электроники. А нежелание потребителей тратить деньги на эту продукцию, по мнению экспертов, обусловлено ростом цен на строительство и аренду жилья в США, чрезвычайно быстрым в последние 2 года. Цены растут, занятость в строительстве падает, объем продаж мебели, ковров, посудомоечных машин и т.п. сокращается — в целом население (США) гораздо менее охотно тратит деньги на покупки. Индекс покупательской активности в США в октябре 2007 г. упал до уровня 80.9 (в октябре 2006 г. он был равен 93.6).

С другой стороны, ослабление американского доллара в последние 2 года существенно уменьшило внешнеторговый дефицит США, что, в свою очередь, привело к росту валового национального продукта и увеличению инвестиций в сектора экономики, не связанные непосредственно со строительством жилья. Итоговый баланс влияния двух отмеченных тенденций на экономику США, скорее всего, является положительным, но вопрос «что будет делать покупатель?» остается открытым.

## **Растущие рынки**

Поведение покупателя сегодня влияет на лазерную отрасль и оптоэлектронику как никогда прежде, поскольку они играют все возрастающую роль в производстве широкого спектра массовой электронной продукции — от игрушек и ручных компьютеризированных устройств до лазерных телевизоров и миниатюрных лазерных прожекторов. Фирмы–производители лазерной техники должны, конечно, быть внимательными к тому, что происходит на рынке сейчас и должно произойти там в ближайшие 12 месяцев, но очень важно также иметь представление о новых

лазерных технологиях, которые могут создать новые виды продукции и новые, причем расширяющиеся, рынки. Сегодняшние НИОКР могут стать толчком к очередной волне промышленного роста. Эксперты отмечают, что сегодня появилось удивительно большое число новых видов лазерной техники и основанных на ней технологий — фотонные кристаллы, светодиоды большой яркости, солнечные батареи, плазмоника, аттосекундная физика; лазерная керамика для нового поколения излучателей с мощностями мегаваттного уровня и др. Фотоника как отрасль имеет огромное влияние на общество. Она осознала это и, как результат, стала исключительно инновационно-активной.

Одним из наиболее мощных «новых» рынков для лазеров и оптоэлектроники является фотоэлектрическая (PV) энергетика. На конференции «SEMICON West» в 2007 г. более 160 компаний-поставщиков оборудования, подсистем и материалов, используемых для производства солнечных ячеек (фотоэлектрических батарей) активно рекламировали свою продукцию. По оценке экспертов, суммарный рынок PV-оборудования и материалов составил в 2006 году 3.7 млрд. долл., причем наибольший объем продаж дали материалы с нанесенным поликристаллическим кремнием. К 2010 г. прогнозируется рост этого рынка до 10 млрд. долл.

Еще одним примером рынка с огромным потенциалом спроса на оптические технологии является сектор наук о жизни. Продажи биомедицинской оптической продукции утроились за период 1995–2005 г.г, достигнув уровня в 6 млрд. долл., а к 2010 г. они должны возрасти еще в 5 раз. Причины такого роста многообразны, но главное — это объединение движущих сил на рынке с технологическими достижениями. Медицинское сообщество получило в свое распоряжение лазерно-оптические инструменты для диагностики и лечения, которые позволяют реализовать совершенно новые медицинские технологии, — и сообщество начало ими активно пользоваться. В США масла в огонь подлило и решение правительства об увеличении поддержки исследований в сфере наук о жизни, которые сегодня финансируются в этой стране больше, чем военные и оборонные НИОКР.

Вне США ситуация несколько иная, хотя отличия и не являются принципиальными. Такие факторы, как цены на нефть, курс американского доллара и дефициты торговых балансов определяют состояние экономики в странах Европы и Азии практически в той же степени, что и в Америке. На саммите в Южной Африке в ноябре 2007 г. министры финансов и руководители крупнейших банков из 20 ведущих стран мира выразили озабоченность замедлением роста мировой экономики в результате повышения цен на продовольствие и энергоресурсы. Они признали, что проблемы на финансовых рынках, вызванные рекордно высокими ценами на нефть, быстрым ростом населения в Азии и ограничением доступности кредитов из-за ипотечного кризиса в США, будут продолжаться еще от 6 до 12 месяцев.

Но в то же время некоторые географические регионы демонстрируют растущую мощь и влияние на мировой рынок. Это, прежде всего, Япония, Китай, Индия и некоторые европейские страны. Азиатские фондовые биржи были среди наиболее успешных в прошлом году. В течение всего года международные инвесторы активно покупали акции в Китае, Индии, других странах Азии (относительно менее привлекательной для них оставалась в этом плане Япония).

Стабильность азиатского и европейского рынков помогла многим лазерным и оптоэлектронным компаниям компенсировать вялость американской экономики в 2007г., особенно в индустриальном секторе. Например, продажи «Rofin-Sinar» в Северной Америке за 2007-й финансовый год сократились на 11% (до 113 млн. долл.), а в Европе и Азии — выросли на 25% (до 367 млн. долл.). Об аналогичных результатах сообщают многие другие фирмы, активно открывающие свои производства и сервисные центры в Китае.

Европейские производители лазерной техники отмечают 2007-й год как вполне успешный. Заметный спрос отмечен в части сложных систем технического зрения, метрологической аппаратуры в полупроводниковой, авиакосмической и оборонной промышленности, лазерных устройств для оборонных применений. Еще один быстро растущий сектор европейского лазерного рынка - светодиоды и органические светодиоды, где европейские специалисты занимают ведущие позиции в части новых разработок.

## **Общие тенденции**

Количественные данные по рынку недиодных лазеров в 2007г. и прогноз на 2008г. представлены на диаграммах 5.1.–5.3. и в таблицах 5.1.–5.3.

Среди многих процессов, идущих на лазерном рынке, выделяются несколько основных тенденций (сдвигов). В первую очередь надо отметить выход волоконных лазеров на рынок недиодных лазеров и продолжающееся вытеснение недиодных лазеров диодными во многих применениях -от медицины до графики.

Продолжается рост производства твердотельных лазеров, обусловленный как разнообразием требований к лазерным источникам в различных приложениях, так и совершенствованием систем накачки таких лазеров лазерными диодами. Рост продаж волоконных лазеров в 2007г. составил 40%, они «захватывают» уже, казалось бы, устоявшиеся, рынки — особенно в части промышленных технологий, где они не открывают новых применений, а заменяют другие лазеры.

Структура настоящего обзора, как обычно, основана на разделении лазерного рынка на сектора, соответствующие основным применениям лазерных технологий. В этой части речь пойдет о недиодных лазерах, рынок диодных лазеров будет рассмотрен ниже.

## **Обработка материалов**

Производство полупроводников и изделий из них продолжает оставаться главным рынком лазерной и оптоэлектронной промышленности. Например, «Newport» и «Coherent» около 30% от всех своих продаж (лазерной техники) получили из сектора микроэлектроники, а производитель эксимерных лазеров для фотолитографии — компания «Cymer» из Сан-Диего — одна выручила от проданных лазеров почти 4% от всего объема лазерного рынка, анализируемого в настоящем обзоре. Кстати, обращаем внимание на то, что в таблицах с объемами продаж учтены недавно ставшие доступными данные за 2007 г. по эксимерным лазерам из Японии, но, поскольку в 2006 г. такие цифры были недоступны, сравнительный анализ долей рынка (в %) велся без этого уточнения.

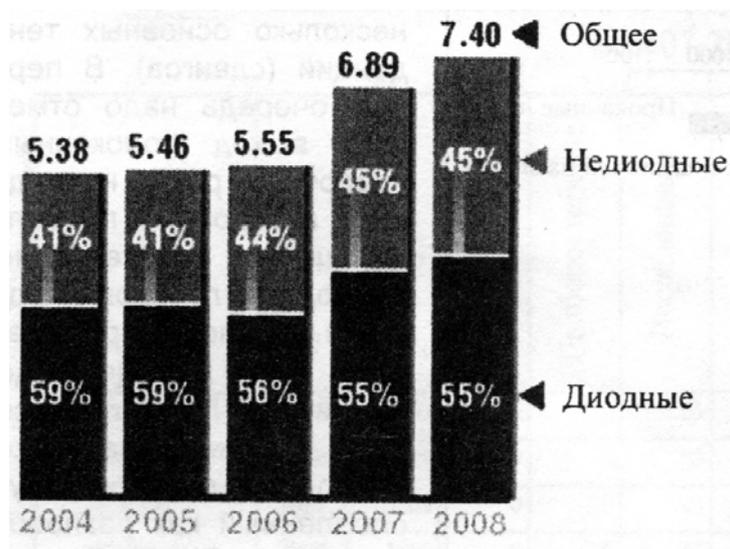


Диаграмма 5.1. Общемировой объем продаж лазеров с 2004 по 2008 г.г. (млрд. долл.)

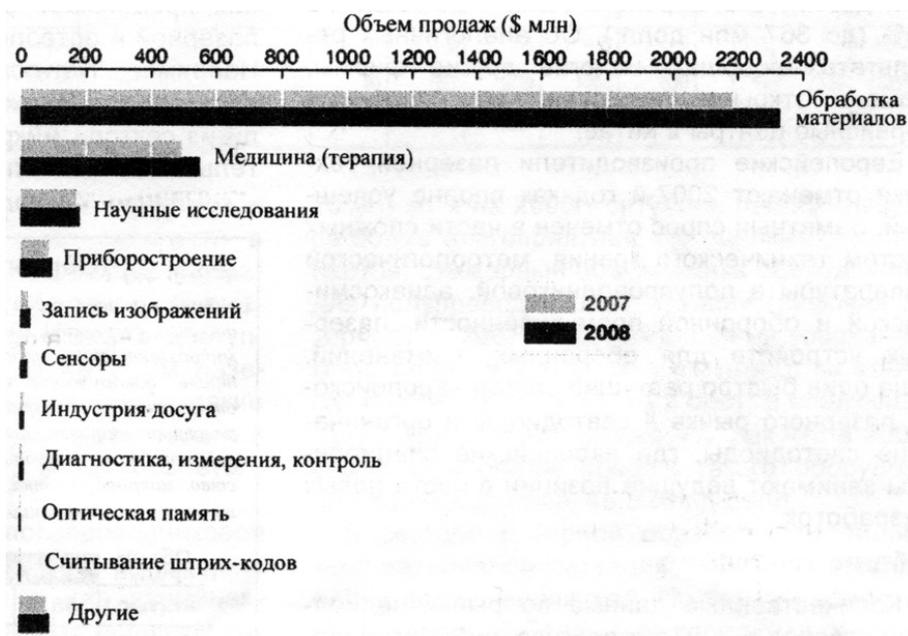
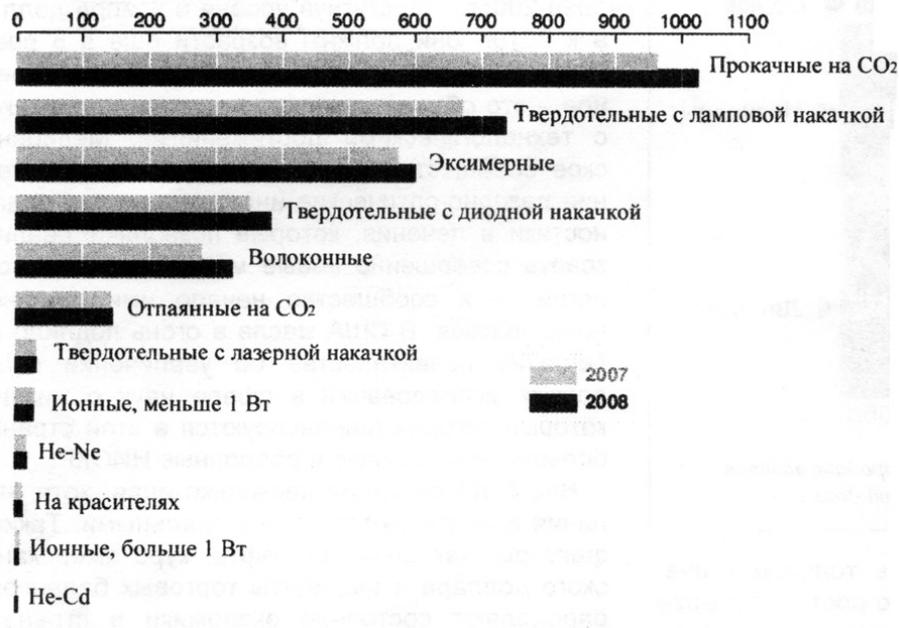


Диаграмма 5.2. Распределение мирового рынка недиодных лазеров по видам применений



*Диаграмма 5.3. Распределение мирового рынка недиодных лазеров по типам*

В прогнозе экспертов полупроводниковой промышленности, опубликованном в середине 2007г., отмечалось, что из-за уже упоминавшейся вялости покупательского спроса рост продаж продукции этой отрасли за 2007-й год должен был составить всего 1% (в 2006 г. было 26% !), хотя на 2008 г. ситуация предсказывается более благоприятная. По оценкам этих экспертов, суммарный объем рынка оборудования для полупроводниковой отрасли (включая лазерное) за 2007-й год ожидался на уровне 40.9 млрд. долл. (в 2006 г. был 41 млрд.), на 2008-й год прогнозируется 7%-й рост, в следующем году — увеличение еще на 4%, так что в 2009 г. суммарный объем продаж такого оборудования должен достичь 45.5 млрд. долл.

В секторе лазерной обработки традиционных материалов ситуация в 2007 г. оказалась более воодушевляющей. По мнению известного эксперта Д.Белфорте (издателя журнала «Industrial Laser Solutions»), экономическое развитие Европы вообще и рост немецкой лазерной промышленности, в частности (по объему производства она занимает

сейчас второе место в мире), были в 2007 г. весьма заметными, хотя и не достигли таких же темпов, как в 2006 г. В Японии цифры 2007-го года оказались несколько ниже прогнозирувавшихся. В Китае после рекордного роста национальной лазерной промышленности в 2006 г. — на 40% ! — темпы 2007-го года не могли, конечно, оказаться такими же высокими — просто потому, что достигнутый абсолютный уровень уже очень высок.

Таблица 5.1. Объемы коммерческих продаж недиодных лазеров на мировом рынке в 2007–2008 г.г. (штуки)

Недиодные лазеры		Обработка материалов	Медицина (терапия)	Приборостроение	Исследования	Телекоммуникации	Оптическая память	Шоу-бизнес	Запись изображений	Контроль, измерения и управление	Считывание штриховых кодов	Сенсоры	Другие	Всего
CO <sub>2</sub> отпаянные	2007	19050	1665	0	55	0	0	0	0	0	0	200	0	20970
	2008	20025	1650	0	58	0	0	0	40	0	0	210	0	21943
CO <sub>2</sub> прокачные	2007	5500	0	0	12	0	0	0	0	0	0	0	0	5512
	2008	5850	0	0	13	0	0	0	0	0	0	0	0	5863
Твердотельные с ламп. накачкой	2007	4890	10693	20	765	0	0	0	0	0	0	10	50	16428
	2008	5132	11688	25	783	0	0	0	0	0	0	12	60	17700
Твердотельные с лазерной накачкой	2007	120	0	0	460	0	0	0	0	0	0	0	0	580
	2008	130	0	0	470	0	0	0	0	0	0	0	0	600
Твердотельные с диодной накачкой	2007	4915	1965	10700	973	0	0	600	300	0	0	370	2100	21923
	2008	4990	2199	11145	999	0	0	630	315	0	0	383	2300	22961
Ионные < 1 Вт	2007	1553	0	7100	118	0	0	20	1404	58	0	0	0	10253
	2008	1541	0	6580	121	0	0	0	1452	48	0	0	0	9742
Ионные > 1 Вт	2007	35	35	0	100	0	0	75	0	0	0	0	0	245
	2008	20	30	0	100	0	0	45	0	0	0	0	0	195
He-Cd	2007	396	0	36	35	0	40	0	0	66	0	0	0	573
	2008	364	0	26	34	0	35	0	0	64	0	0	0	523
He-Ne	2007	5500	0	26335	495	0	0	0	1620	560	630	0	0	35139
	2008	5600	0	26035	500	0	0	0	1680	600	595	0	0	35009
На красителях	2007	0	195	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	295
	2008	0	195	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	295
Экимерные	2007	527	856	0	130	0	0	0	0	0	0	0	0	1513
	2008	547	876	0	135	0	0	0	0	0	0	0	0	1558
Волоконные	2007	6325	1140	0	430	0	0	0	305	380	0	650	230	9460
	2008	6950	1494	0	470	0	0	0	355	440	0	1050	265	11024
Всего, шт.	2007	48811	16549	44191	3673	0	40	695	3629	1064	630	1230	2380	122891
	2008	51149	18132	43811	3783	0	35	675	3802	1152	595	1655	2625	127413

Таблица 5.2. Объемы коммерческих продаж недиодных лазеров

Недиодные лазеры		Обработка материалов	Медицина (терапия)	Приборостроение	Исследования	Телекоммуникации	Оптическая память	Шоу-бизнес	Запись изображений	Контроль, измерения и управление	Считывание штриховых кодов	Сенсоры	Другие	Всего
CO <sub>2</sub> отпаянные	2007	92870	46000	0	700	0	0	0	0	0	0	2400	0	141970
	2008	96500	46017	0	735	0	0	0	0	0	0	2520	0	145772
CO <sub>2</sub> прокачные	2007	962500	0	0	475	0	0	0	0	0	0	0	0	962975
	2008	1023750	0	0	498	0	0	0	0	0	0	0	0	1024248
Твердотельные с ламп. накачкой	2007	314600	304000	400	46100	0	0	0	0	0	0	100	5000	671100
	2008	335400	345500	50	47155	0	0	0	0	0	0	1200	6000	735755
Твердотельные с лазерной накачкой	2007	10250	0	0	21740	0	0	0	0	0	0	0	0	31990
	2008	9250	0	0	22215	0	0	0	0	0	0	0	0	31465
Твердотельные с диодной накачкой	2007	133620	302000	55500	57675	0	0	8250	8600	0	0	4350	53000	390995
	2008	144605	33000	65850	59133	0	0	8600	9030	0	0	4530	58000	382748
Ионные < 1 Вт	2007	5633	0	18920	990	0	0	250	2885	290	0	0	0	28968
	2008	5673	0	17240	1010	0	0	0	3005	240	0	0	0	27168
Ионные > 1 Вт	2007	1680	430	0	3550	0	0	2150	0	0	0	0	0	7810
	2008	1000	360	0	3550	0	0	1450	0	0	0	0	0	6360
He-Cd	2007	2200	0	250	350	0	320	0	0	330	0	0	0	3450
	2008	2010	0	185	335	0	280	0	0	320	0	0	0	3130
He-Ne	2007	3005	0	12375	320	0	0	0	825	265	185	0	0	16975
	2008	3225	0	12075	325	0	0	0	850	285	175	0	0	16935
На красителях	2007	0	6825	0	4000	0	0	0	0	0	0	0	0	10825
	2008	0	6825	0	4000	0	0	0	0	0	0	0	0	10825
Экимерные	2007	468115	92000	0	14950	0	0	0	0	0	0	0	0	575065
	2008	489056	94500	0	16200	0	0	0	0	0	0	0	0	599756
Волоконные	2007	189200	15575	0	21500	0	0	0	12200	7000	0	6300	25900	277675
	2008	216850	21700	0	23500	0	0	0	13400	8050	0	11400	28500	323400
Всего, долл.	2007	2183673	494830	87445	172350	0	320	10650	24510	7885	185	14050	83900	3079798
	2008	2327319	547902	95850	178656	0	280	10050	26285	8895	175	19650	92500	3307562

Таблица 5.3. Средние цены продаж недиодных лазеров в 2007–2008 г.г. (долл. США)

		Обработка материалов	Медицина (терапия)	Приборостроение	Исследования	Телекоммуникации	Оптическая память	Шоу-бизнес	Запись изображений	Контроль, измерения и управление	Считывание штриховых кодов	Сенсоры	Другие
CO <sub>2</sub> отпаянные	2007	4875	27628	0	12727	0	0	0	0	0	0	12000	0
	2008	4819	27889	0	12672	0	0	0	0	0	0	12000	0
CO <sub>2</sub> прокачные	2007	175000	0	0	39583	0	0	0	0	0	0	0	0
	2008	175000	0	0	38308	0	0	0	0	0	0	0	0
Твердотельные с ламп. накачкой	2007	64335	28430	20000	60261	0	0	0	0	0	0	100000	100000
	2008	65355	29560	20000	60223	0	0	0	0	0	0	100000	100000
Твердотельные с лазерной накачкой	2007	85417	0	0	47261	0	0	0	0	0	0	0	0
	2008	71154	0	0	47266	0	0	0	0	0	0	0	0
Твердотельные с диодной накачкой	2007	27186	15267	5187	59306	0	0	13750	28667	0	0	11757	25238
	2008	28979	15007	5908	59173	0	0	13651	28667	0	0	11843	25217
Ионные < 1 Вт	2007	3627	0	2665	8390	0	0	12500	2055	5000	0	0	0
	2008	3681	0	2620	8347	0	0	0	2070	5000	0	0	0
Ионные > 1 Вт	2007	48000	12286	0	35500	0	0	28667	0	0	0	0	0
	2008	50000	12000	0	35500	0	0	32222	0	0	0	0	0
He-Cd	2007	5556	0	6944	10000	0	8000	0	0	5000	0	0	0
	2008	5522	0	7115	9853	0	8000	0	0	5000	0	0	0
He-Ne	2007	546	0	470	646	0	0	0	509	473	294	0	0
	2008	576	0	464	650	0	0	0	506	475	294	0	0
На красителях	2007	0	35000	0	40000	0	0	0	0	0	0	0	0
	2008	0	35000	0	40000	0	0	0	0	0	0	0	0
Экимерные	2007	888264	107477	0	115000	0	0	0	0	0	0	0	0
	2008	894069	107877	0	120000	0	0	0	0	0	0	0	0
Волоконные	2007	29913	13662	0	50000	0	0	0	40000	18421	0	9692	112609
	2008	31201	14525	0	50000	0	0	0	37746	18295	0	10857	107547

### Обработка материалов

лазеры для всех видов обработки металла (сварки, резки, отжига, сверления), для производства полупроводниковой и микроэлектронной продукции (литография, инспекция, контроль, обнаружение и залечивание дефектов, сверление отверстий), для маркировки любых материалов, включая пластики, металлы, кремний, а также для таких технологий, как быстрое прототипирование, настольное производство, микрообработка, изготовление радужных голограмм, изготовление дифракционных решеток.

Объем продаж	2004	2005	2006	2007	2008
шт.(тыс.)	38,7	41,8	42,1	48,8	51,1
\$ (млн)	1467	1504	1652	2184	2327

Объем продаж технологических лазеров за 2007г. мы оцениваем в 41 тыс. шт., на 6% больше, чем в 2006–м; в денежном выражении это составило 1.7 млрд. долл., на 8% больше, чем в предыдущем году. Суммарный рынок технологических лазерных установок и систем (с недиодными лазерами) мы оцениваем в 6.1 млрд. долл., он вырос за год в денежном выражении на 6%.

Основными слагаемыми рынка лазеров для ЛТУ стали волоконные лазеры (их продано за 2007 г. примерно на полмиллиарда долларов) и мощные CO<sub>2</sub>–лазеры (их сбыт увеличился на 10% по сравнению с 2006–м).

## Медицина

В течение всего 2006 г. и в начале 2007–го аналитики Уолл–стрита вполне оптимистично оценивали состояние рынка медицинских применений лазерной техники, особенно в части аппаратов для удаления морщин и нежелательных волос. По данным Американского общества эстетической и пластической хирургии, полное число процедур лазерного удаления морщин кожи, выполняемых в США за год, выросло с 116901 в 2000 г. до 556172 в 2006 г. Такой рост рынка услуг создает весьма благоприятную ситуацию для компаний–производителей соответствующего оборудования. В частности, продажи аппаратов для пластической и эстетической хирургии на основе эрбиевых и гольмиевых лазеров выросли до 3200 шт. в 2007 г. (в 2006–м было 2800), что составило в денежном выражении 275 млн. долл.

### Медицинское оборудование

лазеры, используемые в офтальмологии (включая рефрактивную хирургию и фотокоагуляцию), а также в общей хирургии, терапии, косметологии; не включает лазеры для медицинской юстировки.

Объем продаж	2004	2005	2006	2007	2008
шт.(тыс.)	12,1	13,4	14,7	16,5	18,1
\$ (млн)	397	395	445	495	548

Еще более впечатляющим является рост активности использования лазерного удаления нежелательных волос — от 484807 процедур в 2000 г. до 1475296 в 2006 г. в США и 3.1 млн. по всему миру. Рост числа таких процедур в этом году оценивается в 18%, а к 2010-му году их число должно удвоиться. Соответственно, число лазерных аппаратов для удаления волос (сегодня это в подавляющем большинстве системы на основе диодных лазеров), продаваемых за год, увеличилось в 2007 г. до 3.6 тыс. шт., что соответствует денежному объему продаж в 400 млн. долл.

Объем рынка хирургических Nd:YAG-лазеров составил в 2007 г. 2370 шт. (202 млн. долл.), увеличившись на 13% по сравнению с 2006 г. (2100 шт., 179 млн. долл.), а в целом мировой рынок лазерных медицинских систем для хирургии и терапии продемонстрировал в 2007 г. 10%-й рост.

Быстро растущая часть «медицинского» сектора лазерного рынка — это диагностическое оборудование. В частности, объем продаж систем когерентной оптической томографии составляет сейчас 150 млн долл./год и растет на 25–30% ежегодно.

В 2007 г. не наблюдалось роста в сфере лазерного медицинского оборудования для коррекции зрения, из-за чего не было и роста спроса на используемые в таком оборудовании эксимерные лазеры. Объем их продаж в 2007 г. не изменился по сравнению с 2006 г., и такая же ситуация ожидается в 2008 г.

Суммарный объем продаж недиодных лазеров для медицинских применений за 2007 г. вырос на 11% по сравнению с предыдущим годом, составив 495 млн. долл. На 2008-й год прогнозируется такой же темп роста — еще на 11%.

## Фундаментальные научные исследования

Сектор лазерной аппаратуры для фундаментальных научных исследований в 2007 г. сохранил свое значение третьего по важности в рамках рынка недиодных лазеров. Объем продаж в этом секторе в 2007 г. вырос на 13% по сравнению с 2006 г., что довольно много для такой консервативной с точки зрения рынка сферы деятельности, как фундаментальные научные исследования.

<b>Научные исследования</b>					
<i>все лазеры, используемые в научных исследованиях и разработках, которые не попадают в другие сектора лазерного рынка</i>					
Объем продаж	2004	2005	2006	2007	2008
шт.(тыс.)	4,6	3,8	3,5	3,7	3,8
\$ (млн)	148	148	153	172	179

Вообще говоря, границы этого сектора рынка являются весьма размытыми, т.к. трудно разграничить фундаментальные и прикладные исследования. «Фундаментальные» исследования, финансируемые компаниями, на самом деле являются, как правило, прикладными, причем с четко обозначенными конечными целями. Поэтому отнесение затрат на исследовательское оборудование для таких исследований в сектор фундаментальных является не совсем правильным.

Еще одна особенность этого сектора лазерного рынка — быстрая эволюция оборудования. Совершенствование некогда очень сложных лазерных систем делает их приемлемыми для широкого использования в различных НИР, в т.ч. в таких, в которых они ранее никогда не применялись (что особенно характерно для работ в области биологии), и оборудование из сектора «фундаментальные научные исследования» плавно переходит в сектор «контрольно-измерительные приборы». Характерный пример — аппаратура, использующая ультракороткие лазерные импульсы. Совсем недавно фемтосекундный лазер представлял из себя целую отдельную лабораторию, а сегодня это компактный и достаточно массовый прибор.

На 2008 г. прогнозируется рост продаж недиодных лазеров в этом секторе рынка на 4% – до уровня в 179 млн. долл. в год.

## Аналитические приборы

Огромное количество аналитических методик, используемых сегодня в лабораториях, основано на использовании лазерного излучения, и лазерные источники стали сегодня очень широко использоваться в аналитическом приборостроении. Доминирует в этом секторе лазерного рынка диагностическая аппаратура для наук о жизни. В частности, большой объем продаж приходится сейчас на секвенсоры ДНК. После завершения проекта «Геном человека» спрос на них постепенно растет, причем на рынке появились уже такие приборы 2-го поколения.

Еще одна лазерная аналитическая методика, употребление которой сейчас быстро растет — это конфокальная лазерная сканирующая микроскопия. Еще недавно использовавшаяся только в академических лабораториях, она сегодня стала обычной для фармацевтической промышленности, где необходим автоматизированный скрининг клеток. Примером оборудования, реализующего эту методику, является система «ImageXpress Ultra» производства калифорнийской компании «Molecular Devices». Эта система включает в себя 4 твердотельных лазера (405, 488, 532 и 635 нм) и использует сложный алгоритм распознавания и анализа изображений, позволяющий автоматизировать оценку результатов.

<b>Приборостроение</b>					
<i>лазеры, используемые в биомедицинских приборах (для исследования клеток или протеинов - цитометрах, анализаторах последовательностей ДНК и т.п.), в аналитических приборах, отличных от биомедицинских (рамановская спектроскопия, спектрофлуометрия, анализ продуктов абляции), а также в микроскопах на основе лазеров.</i>					
Объем продаж	2004	2005	2006	2007	2008
шт.(тыс.)	48,5	39,8	41,6	44,2	43,8
\$ (млн)	73,5	73,8	79,3	87,4	95,9

Вне сферы наук о жизни применения лазерно–оптических аналитических приборов также весьма многочисленны. Примером

может служить аппаратура для анализа распределения частиц по размерам, уже традиционно используемая в таких отраслях как производство цемента, металлических порошков, пищевой и фармацевтической промышленности. Сегодня с помощью одного 780-нм лазера и двух 405-нм лазеров можно определять размеры частиц до 10 нм (прибор «Bluewave» американской компании «Microtrack»).

## Нанесение графических изображений, цветная печать

Рынок графических технологий продолжает мигрировать к парадигме цифровой печати, и это не лучшим образом сказывается на продажах недиодных лазеров в этом секторе. Для них, по-существу, осталась здесь единственная большая ниша — подготовка печатных клише путем переноса на пластину текста или изображения из компьютера («computer-to-plate» или СТР-система). В таких системах используются сейчас твердотельные лазеры с диодной накачкой, излучающие зеленый свет. Выпускают оборудование для СТР-технологии только 3 компании — «Kodak», «Fuji» и «Agfa», главным поставщиком источников лазерного излучения для них является «Coherent». 75% всех СТР-установок включают в себя их «зеленый» лазер «Compass» с накачкой линейкой диодов, генерирующих на длине волны 830 нм.

<b>Нанесение изображений</b>					
<i>лазеры для настольных принтеров, факсовых аппаратов и регистраторов изображений, а также для коммерческих (промышленных) цветоделителей, высокопроизводительных принтеров, выходных устройств для сканеров, радаров и систем регистрации спутников</i>					
<b>Объем продаж</b>	<b>2004</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>
шт.(тыс.)	7,1	5,0	4,5	3,6	3,8
\$ (млн)	34,2	27,5	24,8	24,5	26,3

В последние несколько лет СТР была главным применением лазеров в технике печатания изображений, особенно в случае коммерческой печати — журналов, проспектов, брошюр и т.д., причем по мере того, как повышается качество и снижается стоимость коммерчески доступных «фиолетовых» лазерных диодов, именно их начинают все шире применять в СТР-оборудовании.

По мнению экспертов, технологию СТР в США сейчас стали осваивать и производители газет, на этом же пути Европа, в Азии же процесс освоения этой технологии только начинается. Так что этот сегмент рынка лазерных источников излучения должен расти.

Другие применения недиодных лазеров в сфере нанесения изображений — цифровая фоторетушь, нанесение титров на пленку, изготовление карт печатных схем — продолжают существовать, они реализуются с использованием ТТЛ, генерирующих зеленое и голубое излучение. Небольшой объем продаж (около 100 шт./год) имеется здесь для CO<sub>2</sub>-лазеров и Nd:YAG-лазеров с диодной накачкой — их покупают для систем флексографии.

В целом, продажи недиодных лазеров в сегменте систем нанесения изображений в 2007 г. несколько снизились, но в 2008 г. они должны увеличиться здесь на 7%.

### Аппаратура для шоу и дисплеев

Мировой рынок лазерной продукции для шоу и дисплеев продолжает потреблять недиодные лазеры во все возрастающем количестве, но область наибольшего спроса уже переместилась из Европы в Китай. К сожалению, при увеличении числа продаж в этом секторе рынка объем выручки здесь не растет — из-за снижения цен, особенно на лазеры мощностью до 2 Вт. С момента появления на рынке «зеленых» твердотельных лазеров (в 1997 г.) и их «освоения» в секторе «шоу-систем» цена на них здесь постоянно снижается, и сегодня для лазеров с выходной мощностью < 1 Вт она составляет всего 20% от той цены, которая была в 1997 г. Причиной является освоение и развитие производства таких лазеров в Китае, разработка полностью твердотельных RGB- и RGY-проекторов и переход лазерных шоу-систем в разряд продукции массового спроса.

<b>Световые шоу и дисплеи</b>					
<i>лазеры для световых шоу, информационных дисплеев, лазерных указок, лазерных видеопроекторов, записи и воспроизведения дисплейных голограмм.</i>					
<b>Объем продаж</b>	<b>2004</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>
<b>шт.(тыс.)</b>	<b>2,1</b>	<b>1,7</b>	<b>0,7</b>	<b>0,7</b>	<b>0,7</b>
<b>\$ (млн)</b>	<b>11,8</b>	<b>10,4</b>	<b>10,1</b>	<b>10,7</b>	<b>10,1</b>

Лазеры с мощностью излучения более 1 Вт, выпускаемые в Китае, пока уступают по качеству мировому уровню, и позиции западных производителей этой техники («Helles Griot», «Coherent», «Jenoptik») остаются непоколебленными. К тому же разница в цене между западными и китайскими лазерами сейчас невелика. Она определяется только дешевой рабочей силой в Китае, поскольку основные комплектующие — диодные лазеры накачки и управляющая электроника — производятся вне Китая. В результате покупатели лазеров мощностью  $> 2$  Вт, работающие вне Китая, предпочитают покупать продукцию, произведенную за пределами Поднебесной. Китайские покупатели для обеспечения надежного сервиса покупают такие лазеры китайского производства, но оффшорные компании также имеют хорошие возможности на этом рынке.

Заметной тенденцией в этом секторе рынка является переход к проекционным системам на основе диодных лазеров, которые и здесь могут сильно потеснить недиодные лазеры в ближайшие 2 года. Например, немецкие компании уже предлагают лазерные шоу-системы очень высокого качества, использующие 440-нм («голубые») и 650-нм («красные») диодные лазеры с выходной мощностью 200 мВт.

В этом сегменте рынка недиодных лазеров в 2007 году наблюдался 6%-й рост продаж — и в штуках, и в денежном выражении — по сравнению с 2006 годом. На 2008-й год прогнозируется спад на 3% в шт. и на 6% — в объеме выручки.

## **Военные и авиакосмические применения**

В этом разделе учтены только военные расходы США. Отмечено, что в 2008-м году будет заметно сокращено финансирование оборонных НИОКР (что, по мнению экспертов, связано с большими военными расходами в Ираке и Афганистане и необходимостью поддерживать производство вооружений). Наибольший объем продаж в этом секторе рынка недиодных лазеров регистрируется в части лазерных источников для дальномеров и целеуказателей. Растет спрос также на «зеленые» лазеры для ослепляющих систем, которые должны временно выключать зрение противника, если он отказывается сложить оружие.

В части НИОКР в США запланированы на 2008г. финансирование проекта «Боевой лазер на самолете» в размере 549 млн. долл. и фи-

нансирование двух конкурирующих проектов системы раннего обнаружения запусков баллистических ракет (SBIRS и AISS) — для обеспечения продолжения работ, ведущихся уже несколько лет.

При всей сложности количественной оценки этого сектора лазерного рынка эксперты считают, что в 2007 г. он вырос на 24% — гораздо больше, чем предсказывалось год назад, — а на 2008-й прогнозируется более умеренный рост — на 10%.

### **Другие сегменты рынка**

Сегменты, которые включены в таблицы с количественными данными по лазерному рынку, но не обсуждаются отдельно в обзоре продаж недиодных лазеров, — это измерения и диагностика, оптическая связь, считывание штриховых кодов, оптическая память. Большинство этих областей применений лазерных источников излучения или целиком заняты диодными лазерами и потому будут рассматриваться во второй части обзора по лазерному рынку (например, считывание штрих-кодов), или представляют из себя смесь отдельных небольших секторов лазерных технологий, динамика потребления недиодных лазеров в которых не имеет явных общих закономерностей. Обсуждение этих микросекторов лазерного рынка в данном обзоре опущено.

## **5.2. ДИОДНЫЕ ЛАЗЕРЫ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

Как уже отмечалось в разделе 5.1, мировой рынок лазеров испытывает сильное влияние глобальных тенденций сегодняшней экономики. Это особенно ярко проявляется в секторе недиодных лазеров, поскольку они в большинстве своем используются в промышленном и медицинском лазерном оборудовании. Для внедрения такого оборудования требуются значительные финансовые средства, а их как раз у потенциального покупателя может не хватать в силу неблагоприятных общих экономических тенденций. Диодные лазеры, напротив, производятся обычно большими сериями, являются относительно дешевой продукцией, и их рынок напрямую зависит от

конечного потребителя – прямо или через его спрос на рынке телекоммуникаций (единственным исключением являются мощные диодные лазеры, которые используются в тех же промышленных и медицинских применениях, что и недиодные, и стоят дорого, но они составляют всего 8% от общего объема рынка лазерных диодов).

В результате рынок диодных лазеров тоже сильно зависит от общих экономических тенденций, но проявляется эта зависимость по-другому, соответственно, и динамика производства диодных лазеров отлична от аналогичной динамики для недиодных источников лазерного излучения. Например, бум в телекоммуникационном секторе лазерного рынка в 1998–2000 г.г. был вызван желанием владельцев телекоммуникационных линий резко увеличить ширину полосы пропускания таких линий, их пропускную способность, чтобы удовлетворить растущий спрос бизнеса и массовых пользователей, а также желанием владельцев капитала сделать инвестиции в быстро растущий и весьма перспективный рынок. Последовавший в 2001–2003 г.г. резкий спад спроса на лазеры в секторе телекома был обусловлен тем, что мощность установленных линий намного превзошла реальный потребительский спрос на услуги связи. В сфере «развлекательной» бытовой электроники спрос определяется желанием покупателя иметь новейшую версию электронного «ящика» и обеспечивается постоянным снижением цен на такие изделия (например, DVD-плееры), из-за чего, в частности, производители компонентов — таких, как 650-нм лазерные диоды – испытывают мощное принуждение снижать стоимость своей продукции. Ожидание непрерывного снижения цен является одной из важнейших специфических особенностей рынка диодных лазеров.

Количественные данные по рынку диодных лазеров в 2007г. и прогноз на 2008г. представлены ниже на диаграммах 5.1, 5.4–5.6 и в таблицах 5.4.-5.6.

Диодные лазеры формируют примерно 55% от общего объема мирового рынка лазерных источников излучения, сохранив в 2007 г. свою долю этого рынка (см. диаграмму 5.1.).

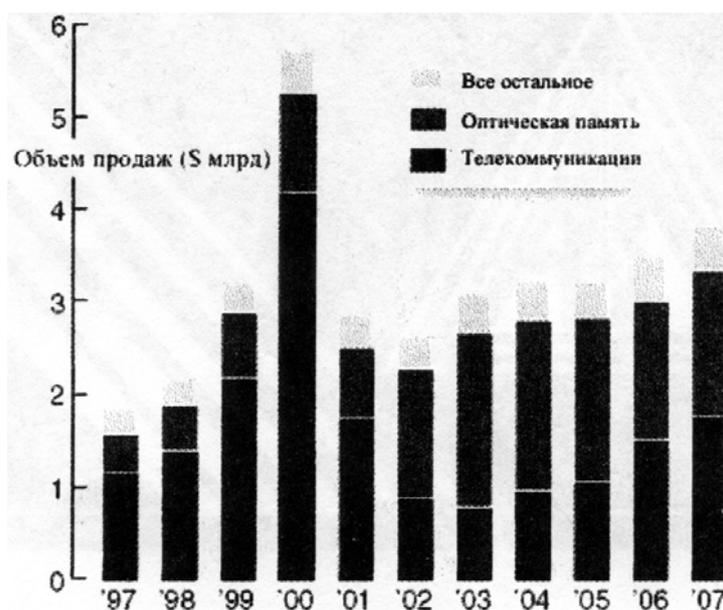


Диаграмма 5.4. Эволюция мирового рынка диодных лазеров

В полном соответствии с наблюдающейся здесь долговременной тенденцией объем продаж диодных лазеров в 2007 г. вырос на 10% по сравнению с предыдущим годом, достигнув величины 3,81 млрд. долл. Рост наблюдался практически во всех основных секторах рынка диодных лазеров. Рост производства в шт. был при этом весьма скромным (на 0.7% за год, до уровня в 827 млн. шт./год). Это означает, что рост рынка в денежном выражении был достигнут за счет увеличения объемов продаж относительно более дорогих диодных лазерных источников.

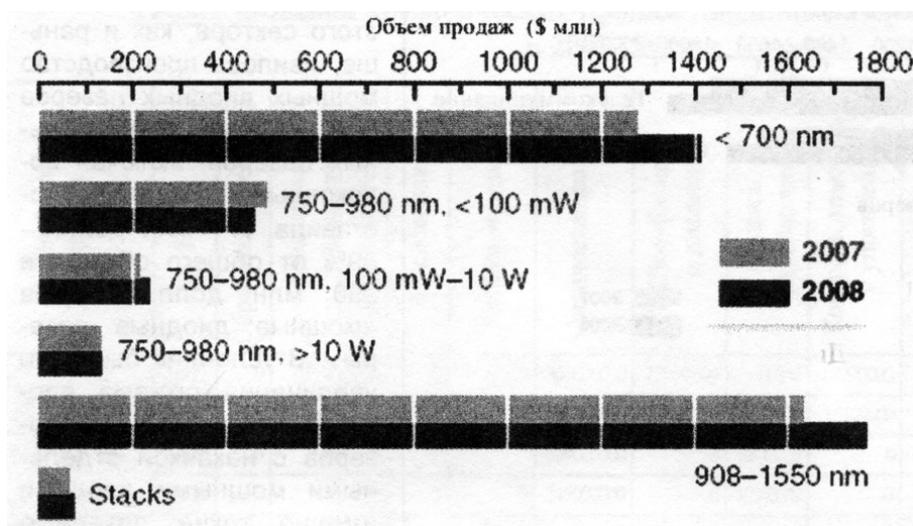


Диаграмма 5.5. Распределение мирового рынка диодных лазеров по типам

За исключением цикла «бум–провал» в 1998–2003г.г. временной ход рынка лазерных диодов в целом демонстрирует картину стабильного роста со средним темпом 7.6% в год – см. диаграмму 5.5. Далее проанализируем динамику развития некоторых важнейших секторов этого рынка.

## Телекоммуникации

В 2007г. в первый раз после 2001г. объем продаж диодных лазеров в секторе телекома (1,74 млрд. долл.) превысил объем продаж таких лазеров в секторе оптической памяти. Сектор телекома, включая передатчики сигнала, продолжает расти, особенно в части т.н. «ФТТх–применений» (волоконные линии «дом/узел связи/офис»). Число передатчиков для ФТТх–систем, проданных в 2007 г., превысило 7 млн. шт. Подчеркнем, что суммарная их стоимость составила всего около 430 млн. долл. (т.е. цена — около 60 долл. за шт.), но после многих лет ожидания ФТТх–рынок наконец состоялся, и, по–видимому, в течение нескольких предстоящих лет он будет развиваться с такой же скоростью, как и в 2007 г., хотя полный объем продаж в денежном выражении может и не расти. ФТТх–сектор является добавочным к давно существующим секторам линий дальней связи и внутригородских линий связи, продажи в которых тоже устойчиво растут.

Телекоммуникации					
<i>все лазеры, используемые в системах телефонии, передачи данных и кабельного телевидения, а также для накачки оптических усилителей в линиях связи.</i>					
Объем продаж	2004	2005	2006	2007	2008
шт.(млн)	3.7	4.4	11	12.9	14.5
\$ (млн)	943	1.052	1.512	1.738	1.863

Другие продукты, вышедшие на сильные позиции на рынке диодных лазеров для телекома, – это перестраиваемые лазеры и передатчики на 40 Гбит/с (и уже говорят о 100 Гбит/с). Перестраиваемые лазеры являются главным элементом переконфигурируемых оптических «прибавить/убрать»

мультиплексоров (*reconfigurable optical «add/drop» multiplexers — ROADMs*) в гибких WDM–системах связи.

Производство 40–Гбит/с линий связи, наконец, выросло до серийного, и 40 Гбит/с сейчас рассматривается как шаг на пути от «10 Гбит/с–Этернета» к «100 Гбит/с–Этернету».

Сектор лазерных диодов накачки в структуре рынка лазеров для телекома остается существенным, но его будущее слабо просматривается. Дело в том, что диоды накачки используются в оптических усилителях, которые покупают только тогда, когда надо задействовать неиспользуемое (резервное) оптоволокно или уложить новое волокно для увеличения пропускной способности линии. Мощные лазеры накачки — это в основном одномодовые диодные лазеры на 980 нм, но иногда используются также более дешевые многомодовые диоды, а иногда (для подводных линий) — гораздо более дорогие модели диодных лазеров. Сюда же относятся 1480–нм и 14xx–нм диоды для рамановских усилителей. Количество продаваемых за год оптических усилителей достаточно велико, но в каждом из них теперь используется меньше диодов накачки, чем раньше. Поэтому объем продаж диодных лазеров накачки на рынке телекома составил в 2007 г. всего 150 млн. долл. Кроме того, такие продажи имеют тенденцию к цикличности, так что сегодняшней период роста продаж диодных лазеров накачки может быстро смениться периодом малого спроса.

На 2008–й год для сектора телекома прогнозируется рост продаж диодных лазеров на 7/2% — до 1/86 млрд. долл./год. Этот темп роста существенно меньше, чем в 2007 г. (на 15% за год), что частично объясняется ожидаемым снижением объема спроса на ФТТх–системы. Но в целом этот сектор лазерного рынка остается весьма мощным.

### **Оптическая память**

После спада на 15% в 2006 г. сектор оптической памяти рынка диодных лазеров в 2007 г. продемонстрировал неплохое восстановление. Он вырос на 7.7% и составил 1.6 млрд. долл. в денежном выражении. Этот рост имел место, несмотря на снижение на 1.1% объемов продаж в шт. (до 714 млн. шт./год). Главной причиной роста выручки стал переход к следующему поколению техники оптической записи и считывания информации, воплощенной

в аппаратуре, выпускаемой фирмами «Sony» (Blu-ray Disc) и «Toshiba» (HD DVD–продукты).

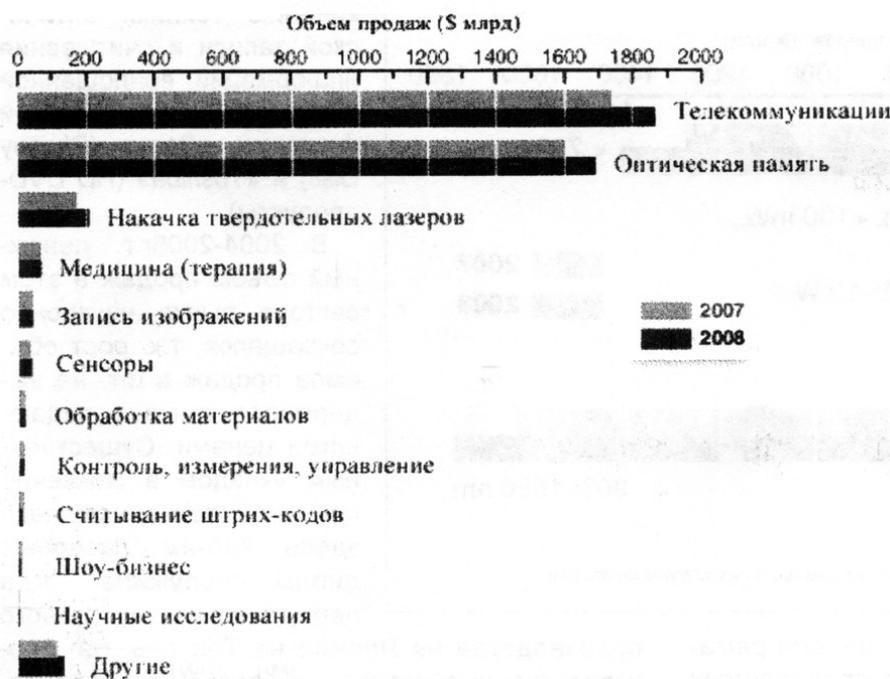
<b>Оптическая память</b>					
<i>лазеры, используемые в таких устройствах, как CD- и DVD-плееры, при изготовлении шаблонов оптических дисков, оптических и магнитооптических ROM, а также в системах голографической памяти.</i>					
<b>Объем продаж</b>	<b>2004</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>
<b>шт.(млн)</b>	<b>643.5</b>	<b>691.3</b>	<b>722.1</b>	<b>714</b>	<b>714</b>
<b>\$ (млн)</b>	<b>1.844</b>	<b>1.753</b>	<b>1.486</b>	<b>1.599</b>	<b>1.690</b>

В 2004–2006 г.г. денежный объем продаж в этом секторе рынка неуклонно сокращался, т.к. рост объемов продаж в шт. не выдерживал гонки с падающими ценами. Существенным вкладом в снижение цен на использовавшиеся здесь 780–нм лазерные диоды послужила тогда передача их массового производства из Японии на Тайвань, где производственные затраты оказались гораздо более низкими. В 2007 г. впервые снизилось и число проданных в этом секторе рынка 780–нм лазерных диодов. Причиной стал переход к двухволновым (780/650–нм) лазерам, которые стали использоваться в DVD–технике.

В 2006 г. на рынке впервые появились HD–DVD– и Blu–ray Disc–плееры, в которых для увеличения плотности записи использовались 405–нм лазерные диоды. Однако продажи этой продукции не были особо успешными в течение всего 2006 г. Соответственно, и спрос на 405–нм диоды не возникал – вплоть до ноября 2006 г., когда компания «Sony» запустила в широкую продажу «PlayStation 3» – 3–е поколение популярной игровой видео–приставки – в которой использовалась технология Blu–ray Disc.

Уже в 2006г. было продано 2 млн. экземпляров такой приставки, что существенно помогло сектору оптической памяти рынка диодных лазеров, но, тем не менее, не позволило ему восстановиться до уровня 2005г.

В 2007 г. было продано уже 11 млн. приставок «PlayStation–3», и их производство было главным потребителем 405–нм лазеров. Blu–ray Disc– и HD DVD–плееры активно конкурировали на рынке, используя даже экономически не обоснованное намеренное снижение цен – для подрыва позиций конкурента.



*Диаграмма 5.6. Распределение мирового рынка недиодных лазеров по видам применений*

Идущая война форматов Blu-ray Disc и HD DVD напоминает схватку Betamax – VHS в конце 1970-х – начале 1980-х. Покупателю предлагается выбрать из двух форматов, зная, что на рынке вскоре останется только один из них и тот, кто сделает «неправильный» выбор, окажется в положении инвестора, затратившего большие деньги на бесполезное оборудование. Сейчас уже ясно, что со временем – какой бы формат не стал доминирующим на рынке – цена новых видео-плееров начнет снижаться, телевидение высокой плотности (HDTV) станет стандартным и для эфирного, и для кабельного вещания, и, соответственно, HD-плееры и магнитофоны заменят распространенную сегодня DVD-аппаратуру. Поэтому будущее 405-нм лазеров представляется вполне обеспеченным, а с ростом их продаж будет развиваться и сектор оптической памяти рынка лазерных диодов.

На 2008-й год прогнозируется рост этого сектора в денежном выражении на 5.8% по сравнению с предыдущим годом – до 1.69 млрд. долл. Объем продаж 405-нм лазеров вырастет на 38% – до 381 млн. долл., что превысит ожидаемый 14%-й спад продаж 780-нм лазеров для CD-аппаратуры (до 312 млн. долл./год). Рынок 650-нм диодных лазеров для DVD-техники продолжит свой рост, но этот

рост – и в шт., и в денежном выражении – будет очень незначительным, т.к. спрос здесь практически близок к насыщению.

### Диодные лазеры высокой мощности

Этот сектор рынка диодных лазеров вырос в 2007 г. всего на 1.4% – самый низкий показатель за несколько последних лет.

Объем продаж	2004	2005	2006	2007	2008
шт.(тыс.)	134.3	213.1	525.4	576.8	847.9
\$ (млн)	109.8	121.6	163.4	171.1	205.4

Главной составляющей этого сектора, как и раньше, явилось производство мощных диодных лазеров для накачки твердотельных лазеров, включая волоконные. Эта часть составила 171 млн. долл. – 59% от общего объема в 290 млн. долл. сектора «мощные диодные лазеры». В условиях быстрого увеличения объема производства волоконных лазеров с накачкой отдельными мощными диодами именно такие лазерные диоды становятся важнейшей частью обсуждаемого сектора рынка диодных лазеров. Их продажи выросли за 2007–й год на 4.7%.

Для других «подсекторов» этого рынка рост в 2007 г. оказался либо очень слабым, либо вообще отрицательным. Так, важнейшими медицинскими потребителями мощных диодов в последние годы являются ручные аппараты и стационарные установки для удаления нежелательных волос, но поставки диодных лазеров для них составили в 2007 г. всего 62.9 и 8.3 млн. долл. соответственно. Полиграфия и графика – еще одна важная сфера применения мощных лазерных диодов – в 2007 г. пользователи из указанных отраслей приобрели таких лазеров на 22.7 млн. долл., причем здесь наблюдается очевидный спад спроса на мощные ИК источники (которые раньше использовались для обработки термопластин) и переход к УФ источникам, тем же 405–нм лазерам, которые нужны в

технологии, основанной на спектрально–чувствительных печатных пластинах.

<b>Медицина</b>					
<i>все лазеры, используемые в офтальмологии (для рефрактивной хирургии и фотокоагуляции), общей хирургии, терапии, косметологии и диагностике. Не включены лазеры, используемые в медицине для юстировки.</i>					
<b>Объем продаж</b>	<b>2004</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>
шт.(тыс.)	210.1	283.4	280.1	346.9	354.3
\$ (млн)	62.1	67.8	60.4	62.9	66.3
<b>Регистрация изображений</b>					
<i>лазеры для настольных принтеров, факсов и регистраторов изображений отнесены в эту категорию вместе с диодными излучателями, используемыми в коммерческих системах-цветоделителях, высокопроизводительных принтерах, выходных блоках радаров, спутников и т.д.</i>					
<b>Объем продаж</b>	<b>2004</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>
шт.(млн)	8.7	9.6	10.5	9.9	10.2
\$ (млн)	52	43	47.2	41.2	41.5

Еще одним емким применением мощных лазерных диодов является обработка материалов, но в последние годы здесь не проявляется каких–либо очевидных тенденций. В 2007 г. объем продаж ЛД здесь несколько снизился – до 15.9 млн. долл., разделившись примерно пополам между аппаратурой для обработки металлов, в т.ч. применениями, требующими относительно небольшую мощность излучения (склеивание и пайка, например), и теми, для которых нужна большая мощность (сварка и поверхностное упрочнение), и оборудованием для обработки неметаллов (например, сварка пластиков).

### **Другие применения**

Передача данных остается наиболее емкой и быстро растущей составляющей этого сегмента рынка диодных лазеров, формируя примерно 86% спроса в нем. Объем продаж VCSEL–источников излучения с длиной волны 950 нм и 1310–нм лазерных диодов–обычной (Фабри–Перо) геометрии, которые используются в локальных сетях связи, складских системах и соединительных линиях в аппаратуре для обработки информации, вырос за 2007–й год на 17.3% – до 95 млн. долл./год. Параллельные оптические

соединительные линии, наконец, заняли в прошлом году сильные позиции (эти линии, использующие цепочки 850-нм VCSEL-диодов, применяются для связи в суперкомпьютерах и маршрутизаторах терабитной емкости). Вообще говоря, такие линии известны и применяются уже давно, но их стоимость оставалась высокой, и они были недостаточно конкурентоспособны по сравнению с «медными» линиями, чтобы стать широко используемыми.

<b>Категория "другие"</b>					
<i>объединяет авиакосмические системы, военно-коммерческую авиацию, оборудование для военных учений, дальномеры, спутникового оборудование, лазерную пиротехнику - с локальными системами связи (LAN) и компьютерными применениями (оптические соединители и внутрикомпьютерные лазерные узлы, интегрированные в общую схему).</i>					
<b>Объем продаж</b>	<b>2004</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>
<b>шт.(млн)</b>	<b>11.8</b>	<b>12.5</b>	<b>15.5</b>	<b>18.1</b>	<b>22.5</b>
<b>\$ (млн)</b>	<b>81.8</b>	<b>78.6</b>	<b>95.8</b>	<b>110.3</b>	<b>130.8</b>

Растет объем продаж т.н. «волоконных каналов» с пропускной способностью 8 Гбит/с, применяемых в складских системах, поскольку цена используемых в них передатчиков на 4 Гбит/с упала до уровня 2-Гбит/с передатчиков.

Предпринимаются усилия к переходу на стандарт 17 Гбит/с, но переход на него в этой области применений ЛД произойдет, по-видимому, через несколько лет.

### **Диодные лазеры: типы и конфигурации**

Суммарные объемы продаж диодных лазеров, указанные в табл. 5.2, рассчитаны на основе собранной информации об объемах их продаж в шт. (см. таблицу 5.4) и средних отпускных ценах для каждого из типов таких лазеров. Средние цены широко варьируют в зависимости от длины волны и мощности излучения ЛД, а также конфигурации его сборки как готового к продаже продукта. Конфигурации сборки («упаковки» диода) зависят от типа ЛД и применений, для которых они предназначены, кроме того, ЛД может комплектоваться волоконным выводом излучения и/или системой термостабилизации. Коротковолновые (< 1000 нм) диодные лазеры с мощностью излучения менее 300 мВт – это почти всегда

однополосковые излучатели, генерирующие на одной поперечной моде, которые монтируются внутри герметичного вакуумируемого корпуса в т.н. ТО–геометрии. Сам лазер обычно устанавливается на хладопровод, и в комплект поставки включается размещаемый на задней грани диода фотодетектор, с помощью которого контролируется выходная мощность лазера.

Средняя цена таких ЛД колеблется от 0.6 долл./шт для массовой продукции, используемой в CD–системах, до примерно 1 долл./шт. для ЛД видимого (650 нм) диапазона и 3 долл./шт. для 660–нм лазеров с мощностью излучения 50–100 мВт, используемых в перезаписываемых DVD–системах. Отдельные специально разрабатываемые и выпускаемые мелкими партиями модели «коротковолновых» ЛД могут стоить значительно дороже.

Все больший объем продаж приходится в последнее время на ЛД т.н. гибридной сборки – когда излучатель и фотодетекторы изготавливаются на одном чипе и вместе с оптическими элементами монтируются в виде отдельного компонентного модуля. Такая конструкция очень удобна для производителей аппаратуры, использующей оптические диски, и ЛД этой конфигурации производятся сейчас массовым образом. Их цена — 1.3 долл./шт. для 780–нм ЛД и 2.3 долл./шт. для 650–нм ЛД. Концепция интеграции используется и для производства «двухволновых» излучателей – на 780 и 650 нм, используемых в DVD–плеерах и DVD–ROM–системах, чтобы CD–носители также могли считываться в этой аппаратуре. Этот чип интегрального излучателя включен в табл. 5.4 и 5.5 в категории <700 нм.

Большое разнообразие конфигураций и уровней мощности излучения имеет место для мощных (> 1 Вт) диодных лазеров. Нормой стали непрерывные ЛД с мощностью многомодового излучения до 10 Вт, изготовленные в виде одного широкого (до 500 мкм) полоска. Для них обычно используется монтаж ТО–типа, в конфигурацию для контроля температуры излучателя включаются обычно элементы Пельтье.

Для достижения мощности более 10 Вт единственным общепринятым подходом является изготовление многополосковых многомодовых излучателей. Стандартной моделью этого типа является т.н. «линейка ЛД» шириной 1 см, состоящая из одной или нескольких цепочек излучающих полосков, обеспечивающих в сумме необходимый уровень мощности. Цены на мощные ЛД лежат в

диапазоне от <200 долл./Вт для однополосковых излучателей до 2 тыс. долл./Вт для 50–Вт линеек. На рынке сейчас есть линейки ЛД с мощностью непрерывного излучения и в 60 Вт, но 50–Вт линейка все–таки остается наиболее распространенной конфигурацией.

Таблица 5.4. Объемы коммерческих продаж диодных лазеров на мировом рынке в 2007–2008 г.г. (штуки)

Диодные лазеры	Годы	Объемы продаж (штуки)													Всего
		Обработка материалов	Медицина (терапия)	Приборостроение	Исследования	Телекоммуникации	Оптическая память	Шоу-бизнес и дисплеи	Запись изображений	Контроль, измерение и управление	Считывание штриховых кодов	Сенсоры	Другие	Накачка твердотельных лазеров	
< 700 нм	2007	0	0	0	0	0	35500000	2500000	21500	15090000	6950000	0	0	10	402061510
	2008	0	50	0	0	0	36900000	2000000	21500	15100000	6990000	0	0	50	411111600
750–980 нм < 100 мВт	2007	0	0	0	0	0	35900000	0	9800000	0	0	2420000	15700000	0	408770000
	2008	0	0	0	0	0	34500000	0	10100000	0	0	29124000	19598000	0	403822000
750–980 нм 100 мВт - 10 Вт	2007	0	195000	0	0	207000	0	0	102500	0	0	0	1700	538000	1044200
	2008	0	185350	0	0	207000	0	0	100750	0	0	0	1800	807000	1301900
750–980 нм > 10 Вт	2007	7150	147400	0	1000	0	0	0	5000	0	0	10000	31100	29000	230650
	2008	7475	162900	0	1000	0	0	0	5000	0	0	10000	31100	30050	247525
980–1550 нм	2007	0	925	0	0	12643000	0	0	0	0	0	0	2331500	0	14975425
	2008	0	1300	0	0	14243000	0	0	0	0	0	0	2916200	0	17160500
> 1550 нм	2007	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2008	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Стэки	2007	500	3609	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1840	9800	15749
	2008	525	4713	0	50	0	0	0	0	0	0	0	2080	10750	18068
Всего	2007	7650	346934	0	1000	12850000	71400000	2500000	9929000	15090000	6950000	2428000	18066140	576810	827097534
	2008	8000	354313	0	1000	14450000	71400000	2000000	1027250	15100000	6990000	2913400	22549180	847850	833661593

Типичным для мощного ЛД является размещение конструкции с цепочкой излучателей на специальном теплоотводе, который может соединяться с водяным теплообменником. Для применений, требующих высокой пиковой мощности, выпускаются линейки ЛД, работающие в импульсно–периодическом (квазинепрерывном, или QCW) режиме с импульсной мощностью, превышающей 100 Вт.

Для получения мощности непрерывного излучения выше 60 Вт линейки мощных ЛД набираются в виде ступенек в вертикальную конструкцию, называемую стэком («stack»), они представлены в табл. 5.4 и 5.5 отдельной графой. Такие конструкции обычно предусматривают водяное охлаждение, но в последнее время на рынке появились стэки и с более эффективными системами теплоотвода (типа микроканальных пластин).

Таблица 5.5. Объемы коммерческих продаж диодных лазеров на мировом рынке в 2007–2008 г.г. (тыс. дол. США)

Диодные лазеры	Годы	Секторы применения													Всего
		Обработка материалов	Медицина (терапия)	Приборостроение	Исследования	Телекоммуникации	Оптическая память	Шоу-бизнес и дисплеи	Запись изображений	Контроль, измерения и управление	Считывание штриховых кодов	Сенсоры	Другие	Накачка твердотельных лазеров	
< 700 нм	2007	0	0	0	0	0	1234800	9000	5450	11910	13600	0	0	30	1274790
	2008	0	150	0	0	0	1377647	6400	5450	12070	8600	0	0	105	1410422
750-980 нм	2007	0	0	0	0	0	364180	0	13070	0	0	29852	79425	0	486527
< 100 мВт	2008	0	0	0	0	0	312492	0	13580	0	0	35823	96380	0	458275
750-980 нм	2007	0	7000	0	0	119030	0	0	11650	0	0	0	1600	72560	211840
100 мВт - 10 Вт	2008	0	6500	0	0	113850	0	0	11300	0	0	0	1680	101436	234766
750-980 нм	2007	10850	45800	0	2000	0	0	0	11000	0	0	2000	9000	49500	130150
> 10 Вт	2008	11100	47650	0	2000	0	0	0	11200	0	0	2000	9000	50125	133075
980-1550 нм	2007	0	1850	0	0	1619030	0	0	0	0	0	0	15625	0	1636505
	2008	0	2600	0	0	1749030	0	0	0	0	0	0	18552	0	1770182
> 1550 нм	2007	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2008	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Стэки	2007	5000	8250	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4600	49000	66850
	2008	5250	9425	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5200	53750	73625
Всего	2007	15850	62900	0	2000	1738060	1598980	9000	41170	11910	13600	31852	110250	171090	3806662
	2008	16350	66325	0	2000	1862880	1690139	6400	41530	12070	8600	37823	130812	205416	4080345

Конструкции длинноволновых (> 1000 нм) излучателей на базе ЛД, используемых в телекоммуникационной аппаратуре, предусматривают специальные приспособления для согласования лазерного излучения с одномодовым оптическим волокном (допустимое рассогласование осей – не более 1 мкм). Эти приспособления называют волоконным хвостиком («fiber pigtail») или одномодовым соединителем («single-mode connector»). Цена на телекоммуникационные ЛД с такими конструкциями составляет от 50 долл./шт. за простейший (Фабри-Перо) 1310-нм излучатель в коаксиальной упаковке до 500–1000 долл./шт. за обладающий высокими эксплуатационными характеристиками лазер с распределенной обратной связью в охлаждаемом корпусе с монтажом

типа «бабочка». Диодные лазеры, используемые в системах передачи данных на короткие расстояния, использующие многомодовое волокно, обычно гораздо дешевле. Например, VCSEL-излучатели с длиной волны 850 нм, изготавливаемые в нескольких конфигурациях, имеют цену не более 5 долл./шт.

Таблица 5.6. Средние цены продаж диодных лазеров в 2007–2008 г.г. (долл. США)

Диодные лазеры	Годы	Обработка материалов	Медицина (терапия)	Приборостроение	Исследования	Телекоммуникации	Оптическая память	Шоу-бизнес и дисплеи	Запись изображений	Контроль, измерение и управление	Считывание штриховых кодов	Сенсоры	Другие	Накачка твердотельных лазеров
< 700 нм	2007	0	0	0	0	0	3	0	253	1	2	0	3000	
	2008	0	3000	0	0	0	4	0	253	1	1	0	2100	
750-980 нм < 100 мВт	2007	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	
	2008	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	
750-980 нм 100 мВт – 10 Вт	2007	0	36	0	0	575	0	0	114	0	0	0	135	
	2008	0	35	0	0	550	0	0	112	0	0	0	126	
750-980 нм > 10 Вт	2007	1517	311	0	2000	0	0	0	2200	0	0	200	1707	
	2008	1485	293	0	2000	0	0	0	2240	0	0	200	1668	
980-1550 нм	2007	0	2000	0	0	128	0	0	0	0	0	0	0	
	2008	0	2000	0	0	123	0	0	0	0	0	0	0	
> 1550 нм	2007	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	2008	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Стэки	2007	10000	2286	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5000	
	2008	10000	2000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5000	

## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вейко В.П., Метев С.М. Лазерные технологии в микроэлектронике. – София: Изд. Болгарской АН, 1991.
2. Вейко В.П. Лазерная обработка пленочных элементов. – Л.: Машиностроение, 1986.
3. Голубев В.С., Лебедев Ф.В. Физические основы технологических лазеров. – М.: Высшая школа, 1987.
4. Турыгин И.А. Прикладная оптика. – М.: Машиностроение, 1966.
5. Вейко В.П., Либенсон М.Н., Червяков Г.Г., Яковлев Е.Б. Взаимодействие лазерного излучения с веществом. – М.: Физматлит, 2008.
6. Вейко В.П., Либенсон М.Н. Лазерная обработка. – Л.: Лениздат, 1973.
7. Крылов К.И., Прокопенко В.Т., Митрофанов А.С. Применение лазеров в машиностроении и приборостроении. – Л.: Машиностроение, 1978.
8. Григорьянц А.Г. Основы лазерной обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1989.
9. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н. Лазерная техника и технология. Лазерная сварка металлов, т. 5. – М.: Высшая школа, 1988.
10. Григорьянц А.Г., Сафонов А.Н. Лазерная техника и технология. Основы лазерного термоупрочнения сплавов, т. 6. – М.: Высшая школа, 1988.
11. Лазеры в технологии. Под ред. М.Ф. Стельмаха. – М.: Энергия, 1975.
12. Вейко В.П. Технологические лазеры и лазерное излучение. Опорный конспект лекций. СПб: СПбГУ ИТМО, 2005.
13. Вейко В.П. Лазерная микрообработка. Опорный конспект лекций. СПб: СПбГУ ИТМО, 2005.
14. Шахно Е.А. Математические методы описания лазерных технологий. Учебное пособие. – СПб: СПбГИТМО (ТУ), 2002.
15. Яковлев Е.Б. Лазерное оборудование, автоматизация и контроль технологических процессов. Конспект лекций. Часть I. Учебное пособие. – СПб: СПбГИТМО (ТУ), 2002.

## **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 микротехнологий».

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;

**Период 4** с 2008 г. характеризуется тем, что университет явился победителем конкурса Правительства РФ 2006-2008г.г., проводимого в рамках приоритетного национального проекта «Образование» по отбору образовательных учреждений высшего профессионального образования, внедряющих инновационные образовательные программы.

При этом одним из направлений научно-образовательной деятельности Университета в рамках конкурса было выбрано направление «Лазерные технологии и системы», которое соответствует приоритетным направлениям развития науки, техники и технологий в РФ и критическим технологиям РФ.

По результатам маркетинговых исследований ожидаемый рынок труда специалистов по данному направлению в Санкт-Петербурге составляет 300 чел. в год, по России - порядка 1500 человек.

Важнейшей составной частью проекта явилось создание новых научно-образовательных структур, центров и лабораторий, для оснащения которых были проведены закупки необходимого оборудования и приборов. Приведем информацию по данному разделу программы более подробно:

### **Создание новых лабораторий и центров.**

**1. Лаборатория лазерных нанотехнологий в составе 4-х научно-образовательных направлений, укомплектованных современным лазерным, измерительным и аналитическим оборудованием и финансируемых грантами РФФИ, РГНФ и Роснауки :**

**1) Лазерное формирование многофункциональных зондов (МЗ) для зондовой микроскопии с целью создания универсальных зондовых микроскопов.**

Работа базируется на значительном заделе кафедры лазерных технологий и экологического приборостроения (далее ЛТ и ЭП) по лазерной вытяжке ближнепольных оптических зондов, нанокапилляров, многослойных зондов, кантилеверов и т.п.. Она проводится на базе 15 Вт квазинепрерывного ( $f = 5$  кГц,  $\tau = 1$  мкс  $\text{CO}_2$  (Sinrad) лазера, специальной оптической системы облучения с торическим зеркалом и специализированных механических систем вытяжки с обратной электромеханической связью. Для контроля за процессом используется скоростная видеокамера **АП-тип камеры ???**, ( разрешение 1280 x 1024, размер пиксела 12 мкм, максимальная скорость съемки 32000 кадр/сек), и быстродействующий микропиrometer **(тип, параметры ???)**, а для оценки результатов и разработки мето-

дик применения МЗ — зондовый микроскоп «Nanoeducator», НТ МДТ.

Работа проводится совместно с кафедрой нанотехнологий и материаловедения ИТМО (заведующий кафедрой — А.О.Голубок), имеющей большой опыт создания и применения зондовых микроскопов.

## **2) Исследование физических основ формирования А–К–А переходов в стеклокерамиках (А — аморфизованный, К — кристаллизованный слой) и способов управления их размерами, глубиной залегания, скоростью переключения и степенью кристаллизации.**

Работа направлена на закрепление пионерского научного задела и на продвижение локальности А–К–А переходов в область наноразмеров, времен записи и переключения в область пико–и фемтосекунд, оптимизацию сред для объемной оптической записи и поиск эффективных систем считывания информации.

Для реализации заложенных научных идей созданы стенды с пикосекундным лазером типа EXPLA PL 2143 ( $\lambda = 266$  нм, 355 нм, 532 нм, 1060 нм,  $W_{\text{имп}} = 30$  мДж,  $\tau = 30$  пс,  $f = 10$  Гц) и фемтосекундным лазером типа AVESTA (TiF-100-F4  $\lambda = 710$ -950 нм,  $P_{\text{ср}} = 500$  мВт,  $f = 90$  МГц,  $\tau = 100$  фс), с 10) импульсными CO<sub>2</sub>-лазерами ( $\lambda = 10,6$  мкм) ТЕА-типа ( $P_{\text{имп}} = 10^6$  Вт,  $f = 500$  Гц,  $\tau = 200$  нс) и щелевым ( $P_{\text{ср}} = 150$  Вт,  $f = 50$ -5000 Гц,  $\tau = 30$  -500 мкс), позволяющими в максимальной степени реализовать потенциал работы.

Для контроля за процессом разработаны схемы, созданы и оснащены системы микрофотометрического контроля (микроскоп-спектрофотометр типа-АП, увеличение – до 1000X, спектральный диапазон регистрации спектров: и оптической плотности 350-900 нм, минимальный размер фотометрируемого участка 1 мкм), микротепловизионного контроля (тепловизор FLIR Titanium-55, спектральный диапазон 8-14 мкм, разрешение изображения 320 x 256 / 14 бит, , максимальная частота обновления полных кадров 60 Гц скоростной видеографии (камера того же типа, что и ранее) и др.

Работа проводится совместно с кафедрой оптоинформационных технологий и материалов (заведующий кафедрой — Н.В.Никоноров), обладающей большим опытом создания и исследования оптических материалов и всем комплексом необходимого термофизического, оптического и испытательного оборудования и приборов.

### **3) Наноструктурирование тонких металлических и полупроводниковых слоев.**

Работа основана на обнаруженном в лаборатории кафедры ЛТ еще в 1967–70 гг. эффекте локального термохимического воздействия лазерного излучения и, в частности, на радикальном изменении растворимости Cr при его лазерном окислении. В последнее время этот эффект дополнен также «микроструктурным» воздействием лазерного излучения на структуру тонких слоев Cr, Si и, соответственно Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и SiO<sub>2</sub>. Оба эффекта позволяют управлять топологией и другими параметрами структур.

Работа базируется на использовании коротких (N<sub>2</sub>-лазер, 0.337 мкм, 10 нс) и сверхкоротких импульсов (пикосекундный и фемтосекундный лазеры, упомянутые выше, эксимерный ArF лазер (CL-7020,  $W_{\text{имп}}=250$  мДж,  $P_{\text{ср}}=5$  Вт,  $f=20$  Гц,  $\tau=17$  нс) и коротких длин волн (193 нм, 226 нм, 337 нм, 355 нм) для повышения разрешающей способности метода и продвижения его в область нанометрических размеров вплоть до теоретического предела разрешающей способности (~ толщины защитной окисной пленки). При ее проведении используются также указанные выше приборы и устройства — зондовый микроскоп, микротепловизор и целый ряд химических и термофизических методик.

Работа проводится в настоящее время совместно с группой А.Г.Полещука из института автоматики и электрометрии Сибирского отделения РАН.

### **4) Управление микро– и наношероховатостью поверхностей оптических материалов**

В основе работы лежит эффект снижения шероховатости поверхности за счет лазерной абляции выступов. Этот эффект дополняется процессами гидродинамического затекания впадин, а также микроструктурирования, основанными на возникновении поверхностных электромагнитных волн и периодического рельефа и использовании других опто-физических явлений (интерференционных, ближнепольных и т.д.). Все изложенные методы и приемы позволяют создавать оптимальные параметры оптических поверхностей (асферизация, полировка, структурирование) из стекла и пластмассы, металла и др. материалов.

В работе используются импульсные  $\text{CO}_2$ -лазеры (ТЕА  $\text{CO}_2$  и щелевой), эксимерный, пико- и фемтосекундные лазеры, специальные оптические системы, системы активного контроля профиля поверхности с обратной связью, зондовый микроскоп, микротепловизор.

Отдельное направление работ этого цикла— микро- и наноструктурирование поверхности кремния за счет модификации структуры и лазерной абляции, а также управление свойствами окисла

## **2. Лаборатория лазерной очистки и реставрации произведений культуры и искусства (ПКИН) организована совместно с фирмой ООО «Мобильные лазерные системы».**

В лаборатории имеются 3 установки.

1. Лазерный комплекс очистки и реставрации ЛИК-1 на базе 200 Вт, 20 нс Nd-YAG импульсного лазера и 6-ти координатного робота (максимальный рабочий радиус (размах) 1300 мм, точность при повторении позиции  $\pm 0.08$  мм) с полной системой ориентации, управления позиционированием волоконно-оптической головки. Работает в режимах очистки металлических изделий сложной формы от загрязнений, оксидных пленок и т.п., подготовки под сварку, сварки и модификации поверхности с системой сбора продуктов очистки для производства работ в лабораториях и в условиях музейных интерьеров.

2. Мобильный лазерный комплекс МЛС2 на основе 50 Вт импульсного Yt-Er лазера ( $\tau =$  нс,  $f =$  Гц) с волоконным выводом и миниатюр-

ной оптической головкой для очистки; может быть установлен на автономную передвижную платформу с дистанционным управлением, например, для очистки поверхностей от радиоактивных загрязнений (рис 1).

3. Переносной ранцевый лазерный комплекс ЛИК-2 на основе 20 Вт импульсного Yt–Er лазера ( $\tau = \text{нс}$ ,  $f = \text{Гц}$ ) с волоконным выводом и оптической системой, миниатюрной системой сканирования поверхности и встроенной системой отсоса продуктов очистки.

Все изложенные лазерные системы опробованы при исследованиях и разработке следующих процессов лазерной очистки:

- 1) лазерная очистка радиоактивно–загрязненных поверхностей,
- 2) лазерная очистка теплообменников и др. элементов энергетического оборудования,
- 3) лазерная очистка и подготовка поверхности под лазерную сварку и консервацию ,
- 4) лазерная очистка металлических поверхностей ПКИН, городской скульптуры и декора

В настоящее время разрабатываются физико–химические основы процессов лазерной очистки неметаллических поверхностей (мрамора и др. минералов), а также процессов реставрации стеклянных и стеклокерамических изделий (смальты, финифти, стеклянных и керамических мозаик и т.п.), фресок и т.п.

**3. Учебно–производственный центр лазерных технологий резки, сварки, наплавки и термообработки создан совместно с фирмой ООО «СП Лазертех» на базе мощных иттербиевых волоконных лазеров ЛС–0.5 (кВт), ЛС– 2 (кВт) или ЛС– 5 (кВт) (IPG-Photonics, Россия, г.Фрязино) .**

Лазерный комплекс для трехмерного раскрытия деталей ЛУВР-1 на основе волоконного лазера с мощностью 5,0 кВт и выходным волоконным кабелем ( $\lambda = 1,07$ ) включает универсальный 6–ти координатный робот FA06E (KAWASAKI) с системой ориентации и позиционирования, и полный комплект остального оборудования (холодильная машина, система управления роботом (контроллер D40), , система подготовки и подачи технологических газов, фирмы Precitec), система дистанционного видеонаблюдения за техпроцессом, и т.д.

Там же установлен Лазерный комплекс «Trotec Professional 1313» предназначенный для прецизионной резки и гравировки неметаллов. Комплекс включает СО<sub>2</sub> лазер мощностью 50 Вт, механизм сканирования типа «летающая оптика». Максимальная скорость лазерной гравировки 1 м/с, максимальная площадь обрабатываемой поверхности 1300x1300 мм, программное разрешение 2 мкм, точность позиционирования +/- 15 мкм).

Установка Trotec Professional Tr1313 применяется в: рекламном бизнесе, резке промышленных изделий из листовых неметаллических материалов, изготовлении вырубных штампов, трафаретов, лекал, текстильных изделий, изготовление печатей и штампов.

Центр предназначен для подготовки специалистов современного уровня и разработки новых лазерных технологий в основном на базе волоконных технологических лазеров.

Для организации учебного процесса задействуется также современное производственное оборудование предприятий ООО «СП «Лазертех», ООО «Лазерный центр», ООО «Мобильные лазерные системы»:

– Лазерные технологические комплексы типа «Хебр» (СО<sub>2</sub>-лазеры мощностью 1-кВт с порталными столами) для резки листовых металлических и неметаллических материалов, труб, сварка.

– Лазерные технологические комплексы типа «Trumatic» (СО<sub>2</sub>-лазеры мощностью до 2,5 кВт с порталными столами) для резки листовых металлических материалов.

– Модернизированный лазерный технологический комплекс типа «Хебр» с иттербиевым волоконным лазером ЛС-2 для резки и сварки, в т.ч сплавов цветных металлов.

– Минимаркер М 10 с иттербиевым импульсным волоконным лазером для прецизионной маркировки.

– Установка «Бетамарк 2000» (лазер Nd-YAG с ламповой накачкой и модуляцией добротности) для прецизионной маркировки.

– Установка ТЕГРА – 500 (лазер Nd-YAG с ламповой накачкой) для резки цветных металлов и их сплавов.

– Специализированные лазерные комплексы со столами АП-400 (лазеры Nd-YAG с ламповой накачкой).

Таким образом, выполнение поставленных перед инновационно-образовательной программой в рамках направления «Лазерные технологии и системы» позволило создать новый научно-учебный инновационный центр в СПбГУ ИТМО, оснащенный уникальным современным лазерным и измерительным оборудованием, способным реализовать подготовку высококвалифицированных научных кадров в области лазерных технологий и проводить исследования на самом высоком научном уровне.

**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, в том числе -наноструктурирование тонких металлических и полупроводниковых слоев, - лазерное локальное осаждение тонких пленок.**
- 2. Исследование физических основ формирования А–К–А переходов в стеклокерамиках (А — аморфизованный, К — кристаллизованный слой) и способов управления их размерами, глубиной их залегания, скоростью переключения и степенью кристаллизации.**
- 3. Создание новых оптических материалов и элементов микро– и нанофотоники на базе лазерных технологий.**
- 4. Лазерное формирование многофункциональных зондов для зондовой микроскопии с целью создания универсальных зондовых микроскопов.**
- 5. Физико-химические основы лазерной очистки в промышленности и при реставрации произведений культурно–исторического наследия.**
- 6. Фундаментальные исследования в области взаимодействия лазерного излучения с веществом: лазерная абляция и конденсация металлических и композиционных пленок и эффекты самоорганизации.**

## **7. 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, молодые преподаватели, к.т.н., доц. А.А.Петров, к.т.н., доц. Н.Н.Марковкина, к.т.н., асс. Б.Ю.Новиков.

Работа кафедры проводится в тесном контакте с ведущими предприятиями Санкт–Петербурга по лазерным технологиям: ООО СП «Лазертех» (ген. директор С.Н.Смирнов), ООО «Лазерный центр» (ген. директор С.Г.Горный), ООО «Мобильные лазерные системы» (ген. директор В.Н.Смирнов).

Вадим Павлович Вейко, Андрей Анатольевич Петров

Опорный конспект лекций по курсу  
«Лазерные технологии».

Раздел: Введение в лазерные технологии

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.