

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

В.П. Вейко, А.А. Петров, А.А. Самохвалов

ВВЕДЕНИЕ В ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

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

РЕКОМЕНДОВАНО ФЕДЕРАЛЬНЫМ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИМ
ОБЪЕДИНЕНИЕМ в системе высшего образования по укрупненной группе
специальностей и направлений подготовки 12.00.00 Фотоника,
приборостроение, оптические и биотехнические системы и технологии в
качестве учебного пособия для реализации образовательных программ высшего
образования по направлению подготовки бакалавриата 12.03.05 «Лазерная
техника и лазерные технологии».



**Санкт-Петербург
2018**

В.П. Вейко, А.А. Петров, А.А. Самохвалов

Введение в лазерные технологии. Опорный конспект лекций по курсу «Лазерные технологии» под редакцией В.П. Вейко.: - СПб: Университет ИТМО, 2018 - 161 с.

Рецензент: Борейшо Анатолий Сергеевич, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Лазерная техника», БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

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



Университет ИТМО - ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО - участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО - становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

Оглавление

Предисловие редактора	5
ГЛАВА 1. ОСНОВНЫЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ	8
1.1. Основные критические технологии и сравнительный уровень их развития в мире и в России	9
1.2. Основные области применения лазеров	11
1.3. Перспективные применения лазеров	12
1.4. Некоторые характерные примеры применения лазерных технологий в технике	13
1.4.1. Лазерные технологии в производстве мобильных устройств и персональных компьютеров	13
1.4.2. Лазерная термохимическая запись в пленках хрома, титана и т.п.	15
1.4.3. Лазерное микроструктурирование поверхности материалов	18
1.4.4. Обработка прозрачных материалов методом лазерно-индуцированной микроплазмы (ЛИМП)	21
1.4.5. Примеры лазерной микрообработки	24
1.4.6. Лазерная полировка оптических поверхностей	25
1.4.7. Лазерная очистка поверхности	27
1.4.8. Аддитивные лазерные технологии - принцип	30
1.5. Космические применения лазеров	35
1.5.1. Дистанционное лазерное зондирование космических объектов	35
1.5.2. Лазерная искра в воздухе и ее применения	36
1.5.3. Лазерное противоракетное оружие	39
1.6. Основные области применения лазеров в медицине	41
1.7. Преодоление дифракционного предела в лазерных технологиях	46
ГЛАВА 2. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ОБРАБОТКЕ МАТЕРИАЛОВ	47
2.1. Основные особенности воздействия лазерного излучения на твердые среды	48
2.2. Основные физические процессы лазерных технологий	49
2.3. Поглощение света и преобразование энергии света в тепло	52
2.4. Физические процессы, возникающие на поверхности твердых тел при лазерном нагреве	53
2.5. Физика лазерного формирования тонкопленочной топологии	57
2.6. Лазерная очистка поверхностей твердых тел от частиц	59
2.7. Теплофизика лазерного нагрева	60
2.8. Физические процессы лазерной обработки: испарение - движение фронта раздела фаз - одномерная модель (движение фронта испарения внутрь материала)	63
2.9. Экспериментальные результаты	65
2.10. Двумерная двухфазная (ДД) модель лазерной обработки	67

2.11. Давление отдачи при испарении. Уравнение Клаузиуса-Клапейрона	69
2.12. Экспериментальные методы изучения физических процессов лазерных технологий	70
ГЛАВА 3. ПАРАМЕТРЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЛАЗЕРОВ И ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	74
3.1. Лазерная обработка материалов: взаимосвязь между режимами обработки материалов и параметрами лазеров	75
3.2. Основные параметры излучения технологических лазеров	76
3.3. Характеристики «качества» излучения технологических лазеров: когерентность, монохроматичность, поляризация. Эксплуатационные характеристики	83
3.4. Характерные параметры технологических лазеров	89
3.5. Перспективы развития технологических лазеров	94
3.6. Области применения важнейших типов лазеров	95
3.7. Основные особенности технологических лазеров	96
ГЛАВА 4. ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ	111
4.1. Фокусирующие схемы лазерной обработки	113
4.2. Сканирующие системы А-типа для лазерной обработки	116
4.3. Проекционные схемы для лазерной обработки	121
4.4. Комбинированные оптические методы	124
4.5. Проекционно-сканирующий метод	126
4.6. Оптические системы для управления поперечным распределением интенсивности	127
4.7. Волоконно-оптические системы (ВОС) доставки лазерного излучения	129
ГЛАВА 5. НЕКОТОРЫЕ ПРИМЕРЫ СОВРЕМЕННЫХ ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ФОТОНИКЕ	131
5.1 5D оптическая память	132
5.2 Лазерные технологии создания метаповерхностей	134
5.3 Лазерные технологии синтеза наночастиц в жидкости	135
ГЛАВА 6. ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ	136
6.1. Технологические лазеры и лазерные технологии	137
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	157
КАФЕДРА ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И СИСТЕМ	158

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, 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? Так как 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.

Отметим, 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 аддитивные лазерные технологии, является важнейшим этапом разработки процесса.

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

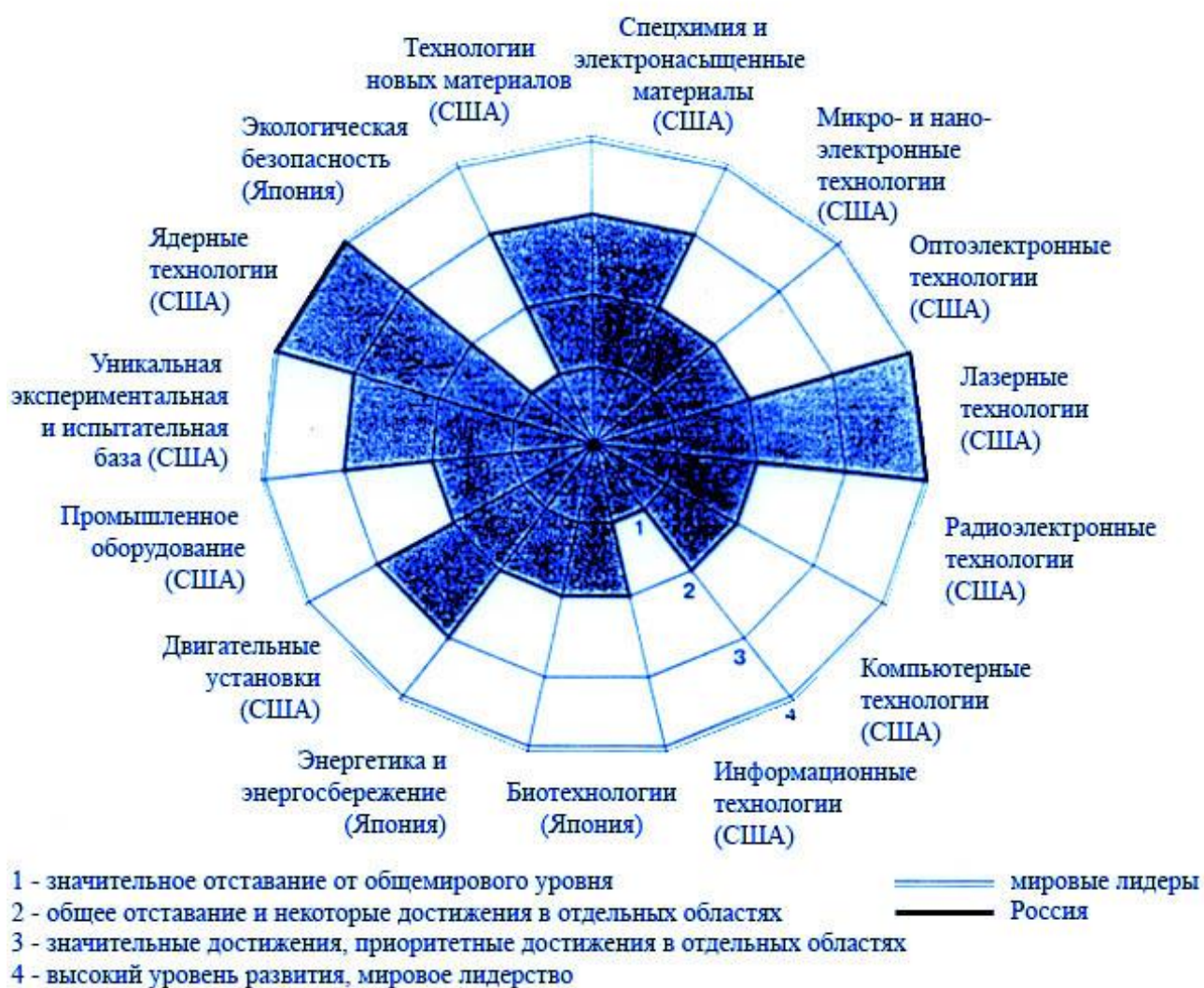
Заметим еще, что в последнее время термин «лазерные технологии» трактуется расширительно, и в них включают, по сути, все области применения лазеров. В то же время есть большая разница между приложениями лазеров, основанными, в первую очередь, на высокой мощности лазерного излучения, и теми, которые основаны на его высокой когерентности. Лидером первого направления, безусловно, являются лазерные технологии обработки материалов (конструкционных, функциональных и биологических), в то время как лидером второго являются оптическая связь и оптические измерения. Именно основам первого направления – лазерной обработки материалов – посвящено настоящее пособие. В то же время оно может быть полезно также студентам и специалистам в области лазерных технологий в широком смысле слова и вообще в области фотоники. Настоящее учебное пособие является существенно обновленным и дополненным вариантом «Введения в лазерные технологии», изданным в 2009 году ограниченным тиражом и получившим положительные отклики студенчества и академической общественности.

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.).



*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 исследований и разработок лазерных технологий в России сравним с уровнем наиболее развитых стран.

Эти два обстоятельства необходимо иметь ввиду 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 критических 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, растрованных валов, 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 (все направления клинической медицины), и биология.**
- Голография и ее применения.**
- Реставрация художественных произведений (в т. ч. очистка).**
- Аддитивные лазерные технологии.**

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,
- 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,
 - рентгеновские лазеры.

1.4. НЕКОТОРЫЕ ХАРАКТЕРНЫЕ ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ТЕХНИКЕ

1.4.1. Лазерные технологии в производстве мобильных устройств и персональных компьютеров



(по данным K.Washio, NEC - Nippon Electronic Corporation)

«В конструкции современных аудиоплееров (iPod) и мобильных устройств типа iPhone очень трудно найти хотя бы одну деталь, которая изготавливается без участия лазерных технологий» (G.Overton, S.G.Anderson, T.Hausken, D.A.Belforte. Optoelectronics report, v.16, N1, 2009).

Лазерные технологии в производстве ноутбуков



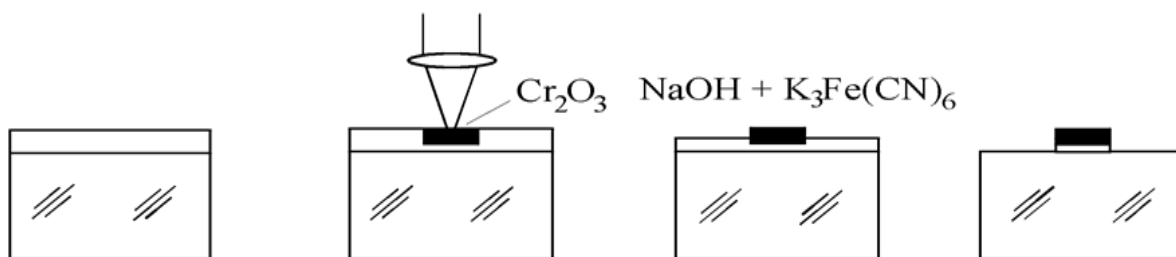
(по данным K.Washio, NEC - Nippon Electronic Corporation)

«Будь здесь только одна лазерная операция – литография, и лазерная технология уже считалась бы ключевой. Но без лазеров не обойтись и при изготовлении дисплеев и всех периферийных устройств» (G.Overton, S.G.Anderson, T.Hausken, D.A.Belforte. Optoelectronics report, v.16, N1, 2009).

1.4.2. Лазерная термохимическая запись в пленках хрома, титана и т.п.

ПРИНЦИП ЛАЗЕРНОЙ ЗАПИСИ: локальный лазерный нагрев пленки хрома формирует тонкий слой окисла, устойчивого к травителям хрома, в результате вытравливания хрома формируется прецизионная топология «термохимического» изображения.

- | | | | |
|--|--------------------------------------|--------------------------|---|
| 1. Исходная
структура плен-
ка хрома | 2. Запись
скрытого
изображения | 3. Проявление
рисунка | 4. Конечная
структура -
записанное
изображение |
|--|--------------------------------------|--------------------------|---|



ОСНОВНЫЕ ДОСТОИНСТВА МЕТОДА

- Высокая точность и устойчивость процесса записи.
- Высокая производительность.
- Простота и воспроизводимость процесса.
- Простота контроля прямым измерением отражения при лазерном нагревании
- Возможность записи на подложках большой площади и толщины, а также на криволинейных поверхностях.

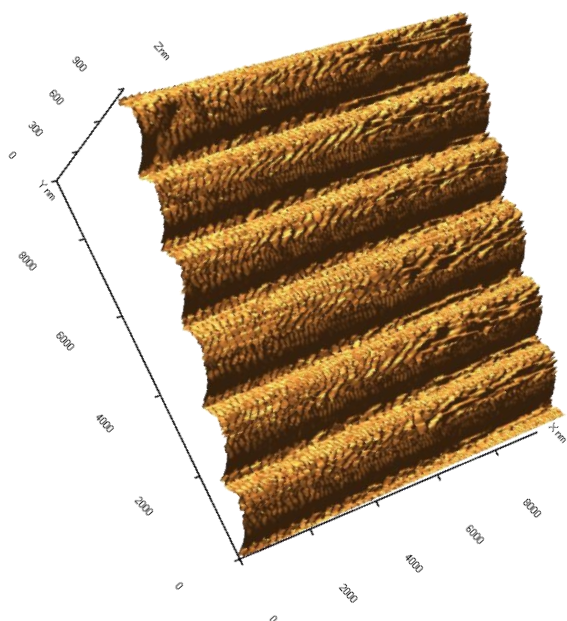
Лазерные технологии дифракционных оптических элементов

Использование дифракционных оптических элементов (ДОЭ) дает возможность сократить количество оптических элементов в схеме в результате объединения функциональных свойств, присущих отдельным элементам, объединенным в единый ДОЭ. При этом уменьшаются габариты, вес и стоимость оптического оборудования, а также появляется возможность создания новых оптических систем, не имеющих аналогов. Среди них: бифокальный микроскоп, лазерные объективы, блок оптической головки считывания информации с компакт-диска, круговой (импульсный) датчик положения и др. Но изготовление ДОЭ – это сложная техническая проблема, сравнимая с изготовлением 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.

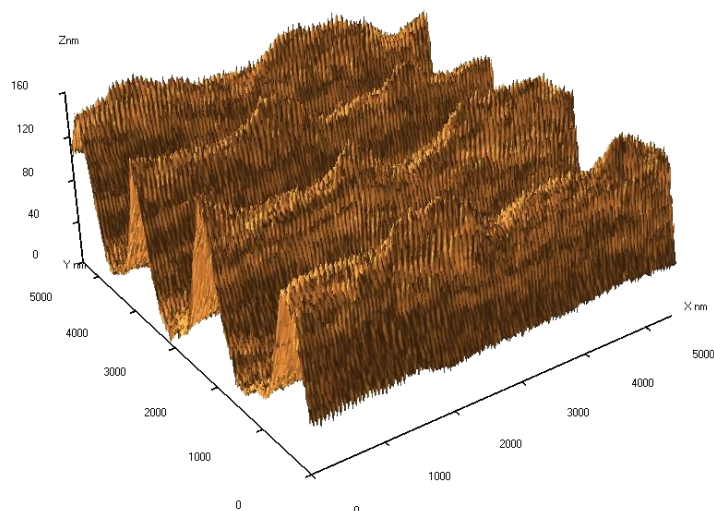


Изображение дифракционного имитатора диаметром 210 мм для тестирования главного зеркала телескопа VISTA, работает в Чилийской обсерватории) (производство ИАЭ СОРАН, А.Г. Полещук).

Лазерные технологии ДОЭ и оптической памяти – CD-ROM, CD-RW

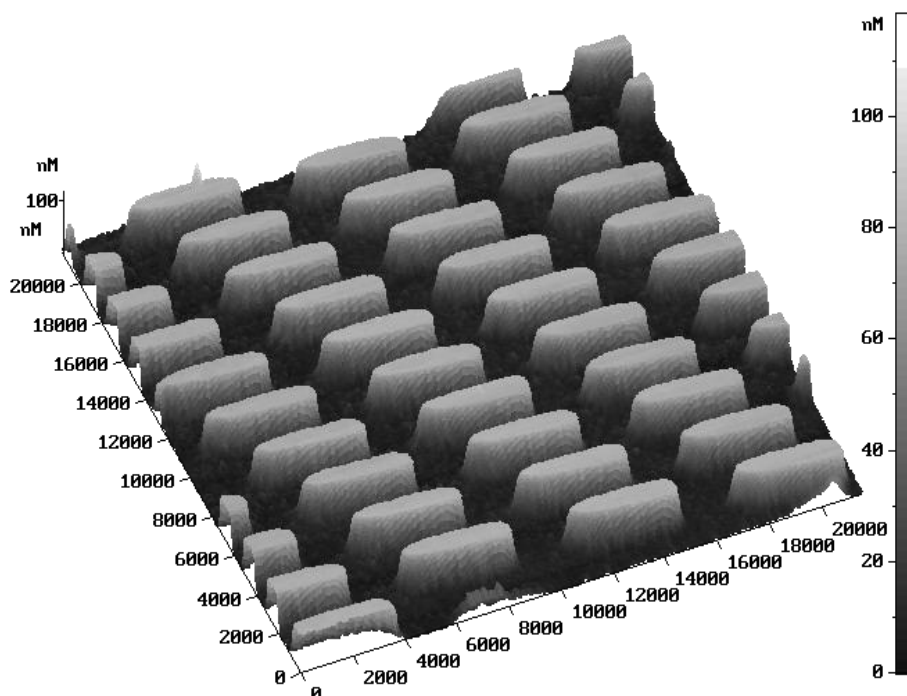


а.



б.

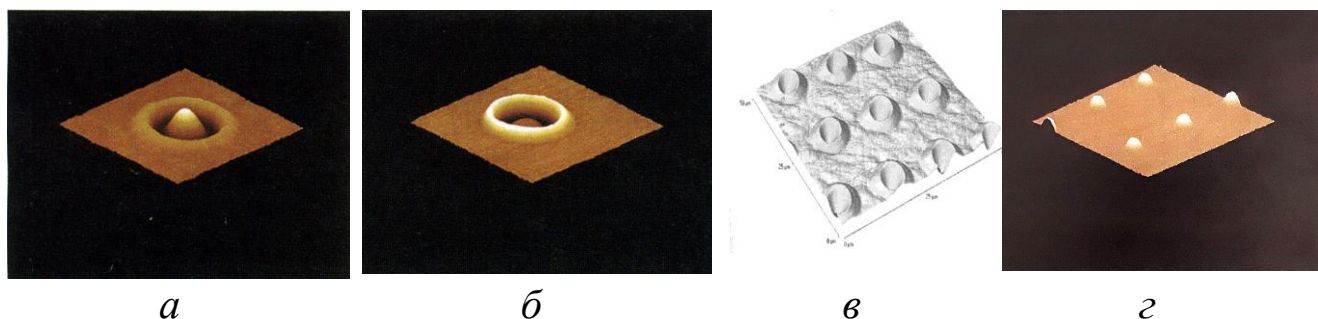
*АСМ-фотографии CD-диска:
а) без записи, б) с записью*



*Изображение ДОЭ в атомно-силовом микроскопе (АСМ),
записанное методом лазерной термохимии (А.Г. Полещук)*

1.4.3. Лазерное микроструктурирование поверхности материалов

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»)

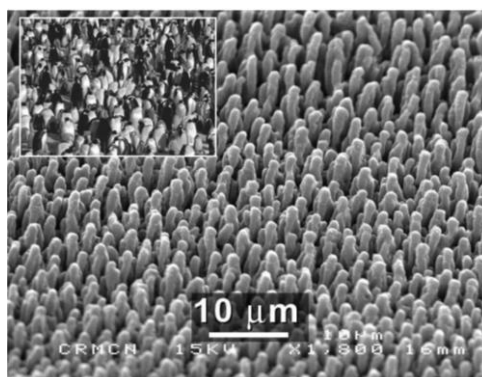


Фотографии, сделанные на атомно-силовом микроскопе, показывающие разнообразные формы нанобампов» на аморфном никель-фосфорном металлическом диске (а, б, в) и стеклянной подложке (г) (а, б, в – А.Тат; г – Y.Lu).

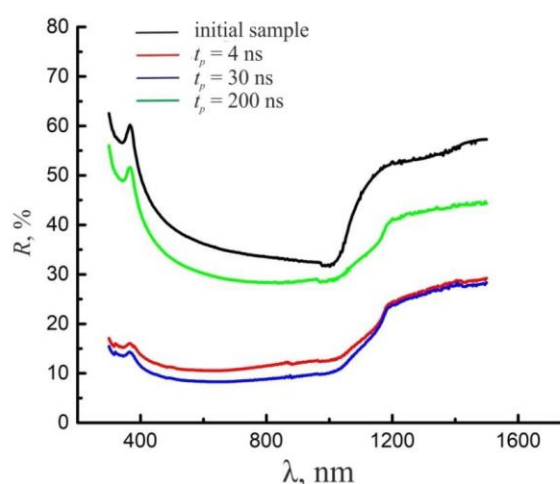
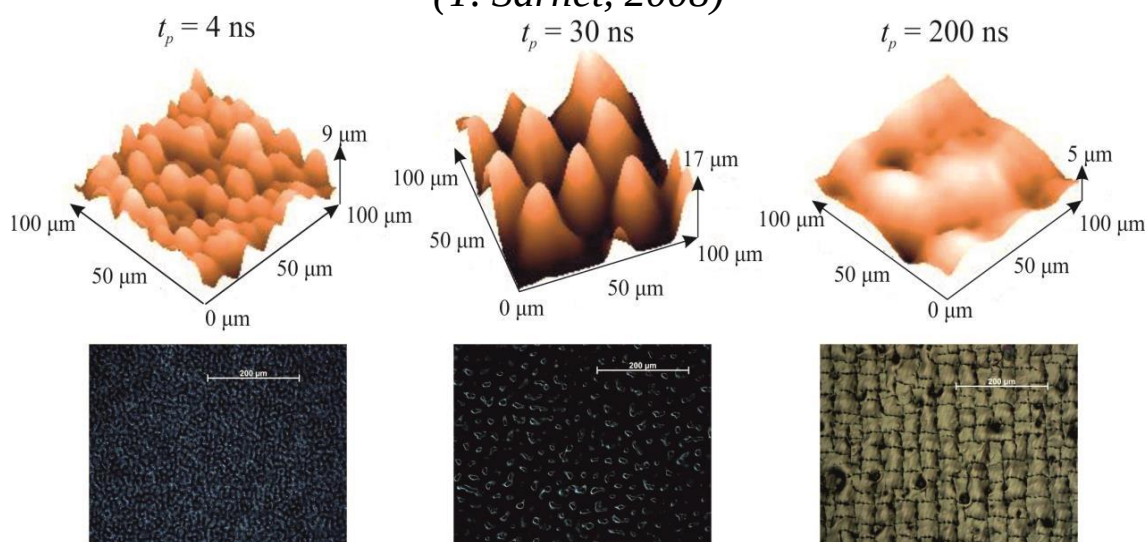
Похожие на колонны структуры могут быть образованы на поверхности твердого тела, например, на монокристаллах Si и Ge, поликристаллическом Ti и др. при многократном воздействии фемтосекундных и наносекундных лазерных импульсов (рис. ниже).

Такая структурированная поверхность имеет широкий спектр возможных применений. Например, модифицированная поверхность может быть использована при изготовлении солнечных батарей для увеличения поглощения света вместо антиотражающих слоев.

Некоторые виды поверхностных структур



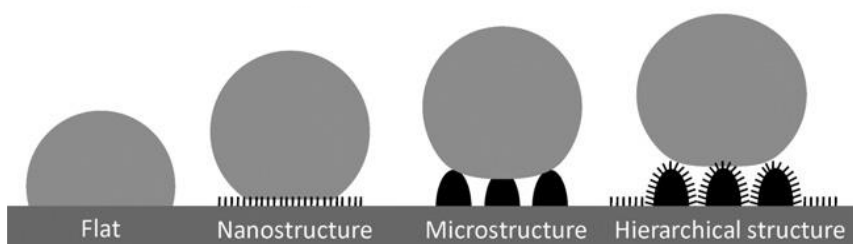
СЭМ-снимок «пингвино-подобных» структур, созданных фемтосекундным лазерным излучением на поверхности кремния (в левом верхнем углу фотография колонии пингвинов в Антарктике) (T. Sarnet, 2008)



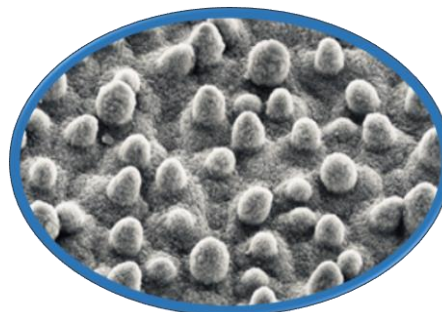
СЭМ-снимки поверхности кремния, облученного волоконным лазером и их оптические изображения (число сканирований лазерным излучением $N = 40$ при длительности импульса 4 нс, 30 нс, $N = 30$ для 200 нс) и их спектры отражения.

Существенно подчеркнуть, что использование ультракоротких лазерных импульсов позволяет формировать многоуровневый рельеф на поверхности твердых тел за счет возникновения сразу нескольких механизмов структурирования: локального удаления вещества (откол, испарение) и генерации поверхностных электромагнитных волны (ПЭВ), последнее приводит к образованию периодических поверхностных структур (LIPPS – laser-induced periodic surface structures). Данные структуры используются для управления трибологическими свойствами поверхности, ее смачиваемостью, (рис. ниже) биосовместимостью и т.д. Структурированная лазером поверхность биосовместимого металлического сплава представляет большой интерес для имплантологии. Определенные режимы лазерного структурирования поверхности твердого тела приводят к заметному росту её удельной поверхности, который представляет потенциальный интерес для катализа и создания датчиков.

Лазерное структурирование позволяет в значительной мере реализовать биомиметический подход, т.е. создавать рельефы с геометрией и свойствами, подобными тем, что существуют в живой природе.



Смачиваемость различных типов (одноуровневого и многоуровневого – иерархического) рельефов.



Лист лотоса, как пример иерархического рельефа: слева – фотография в естественных условиях, справа – SEM-снимок.

1.4.4. Обработка прозрачных материалов методом лазерно-индуцированной микроплазмы (ЛИМП)



Общая схема метода LIPAA.
(Laser-Induced Plasma assisted ablation, Sugioka, 2006)

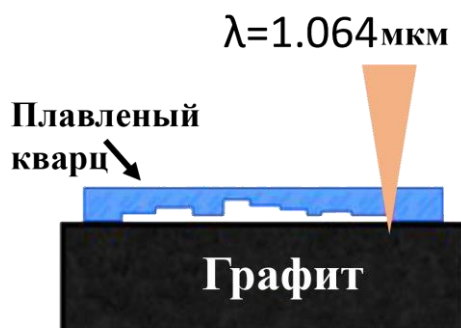
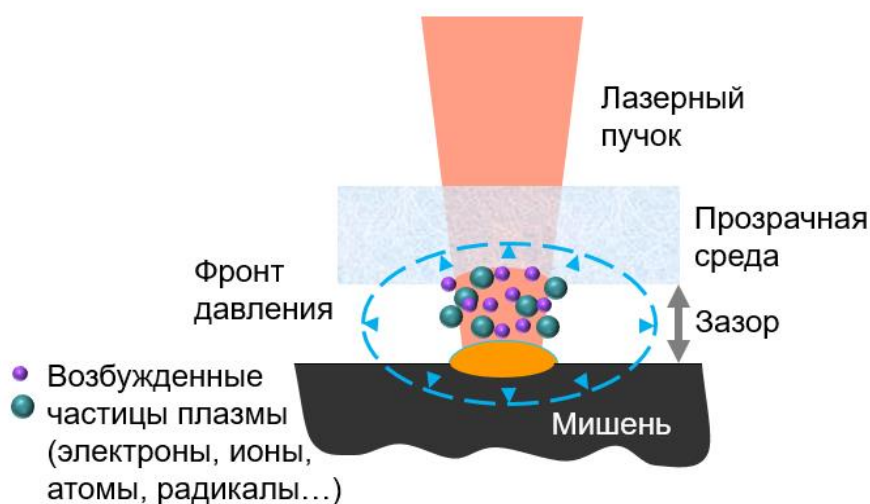


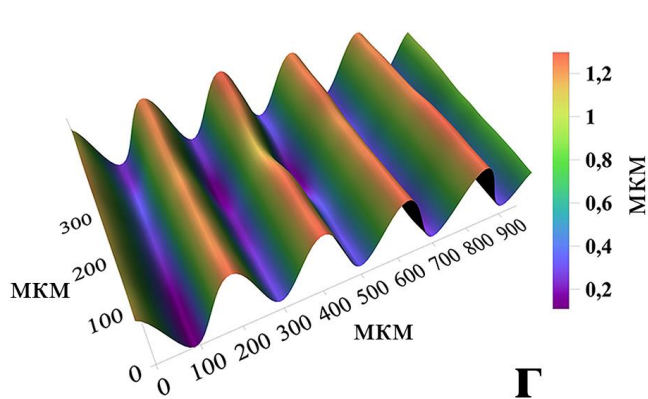
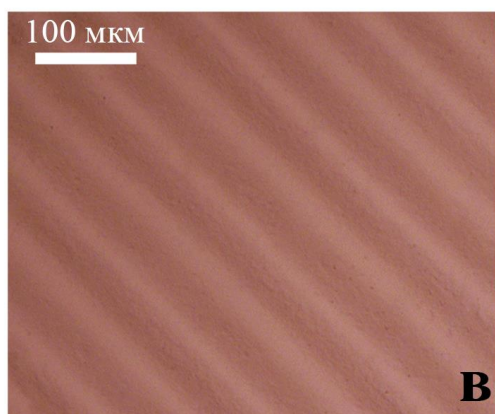
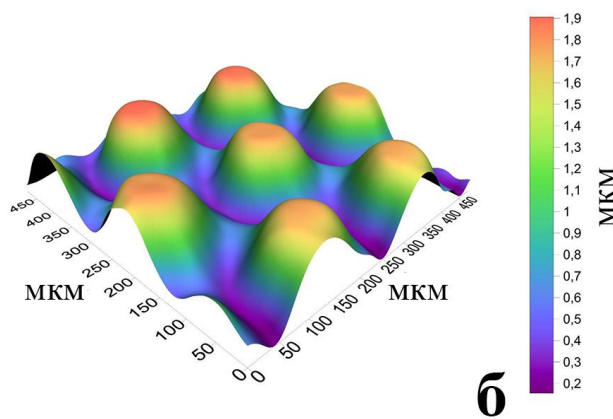
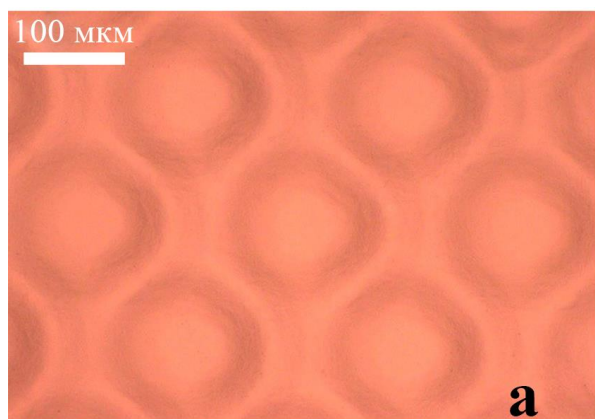
Иллюстрация принципов метода ЛИМП

Основные свойства ЛИМП и ее применение

Основные свойства:

Высокая температура плазмы $> 10^4$ К (>1 эВ) и давление ~ 1 ГПа в зоне воздействия, малое поперечное сечение, сравнимое с размером зоны облучения (сфокусированным лазерным пятном).

Метод ЛИМП позволяет управлять положением микроплазмы в пространстве и обладает высокой разрешающей способностью из-за непосредственной привязки к размерам и положению фокального пятна лазерного пучка в плоскости контакта (или в объеме прозрачной среды). ЛИМП способна удалять любой материал обрабатываемой прозрачной среды независимо от его оптических свойств (аналогично плазмохимическому травлению).



*Линзовый растр и дифракционная решетка,
изготовленные методом ЛИМП*

Лазерное сверление микроотверстий в алмазных фильерах для волочения проволоки с помощью ЛИМП

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

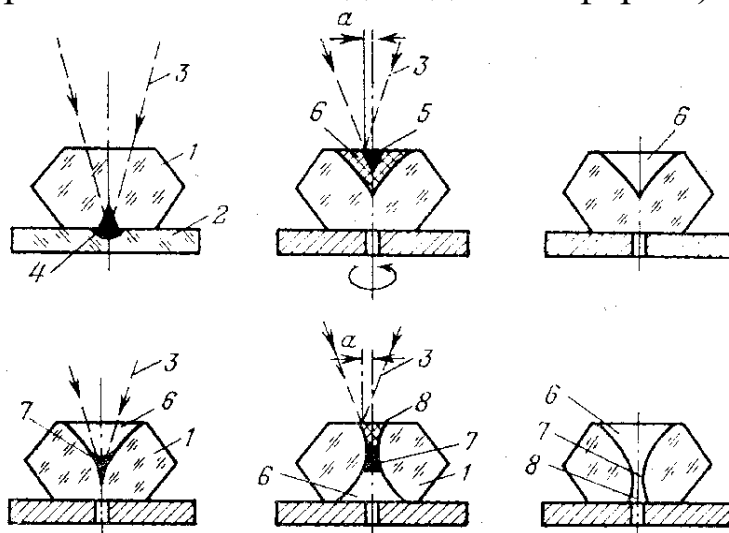
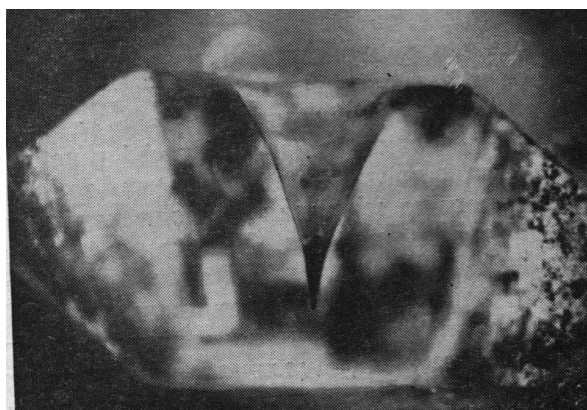
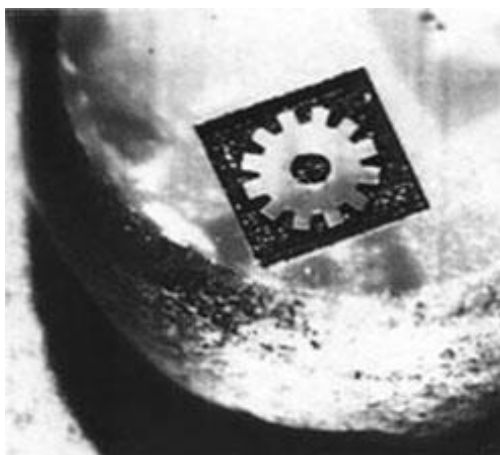


Схема процесса лазерного сверления микроотверстий в алмазных фильерах: 1 – алмазный кристалл, 2 – пластинка из материала, хорошо поглощающего лазерное излучение, 3 – фокусированный лазерный луч, 4 – исходное микроотверстие в пластинке (2), 5 – исходное микроотверстие в алмазе (графитовая преграда), 6 – входной и смазанный конус, 7 – рабочий канал, 8 – выходной конус. Последняя операция – ультразвуковая очистка. (Патент В.П.Вейко, М.Н.Либенсон, «Способ прошивки отверстий в прозрачных пластинах» № 300977 с приоритетом от 5 сентября 1969 г.)

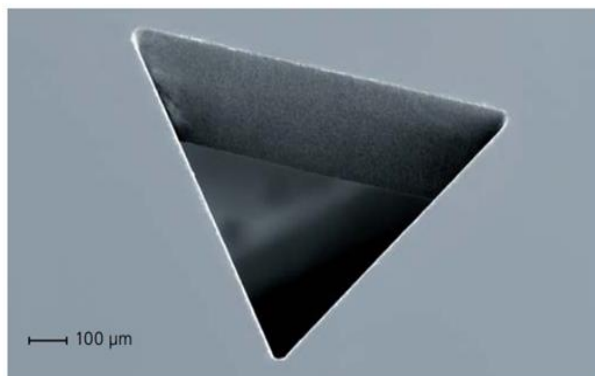


Фотография алмазной фильеры на одном из этапов сверления микроотверстия (толщина алмаза 1.6 мм). Время лазерного сверления 5–8 минут.

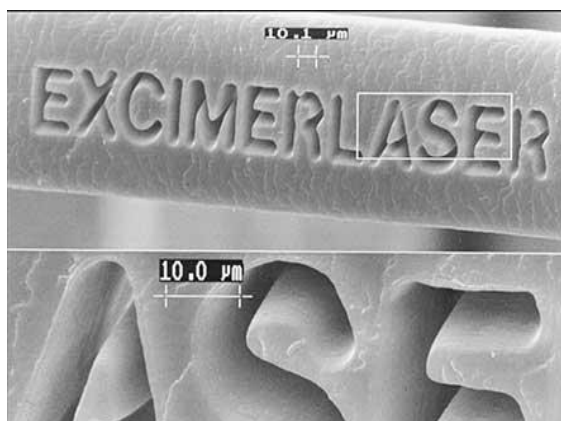
1.4.5. Примеры лазерной микрообработки



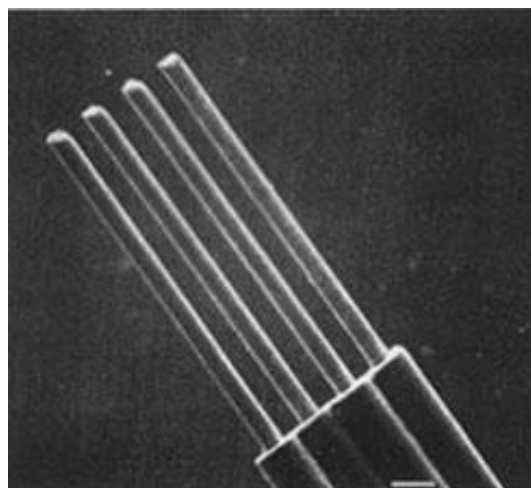
*300 микронная 3D шестерня
в алмазе*



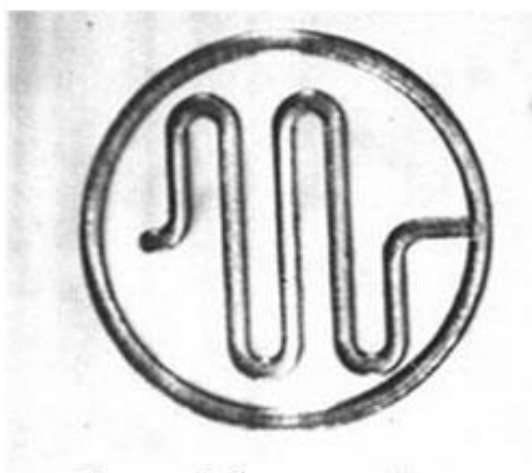
*Треугольное отверстие в
сапфировом стекле*



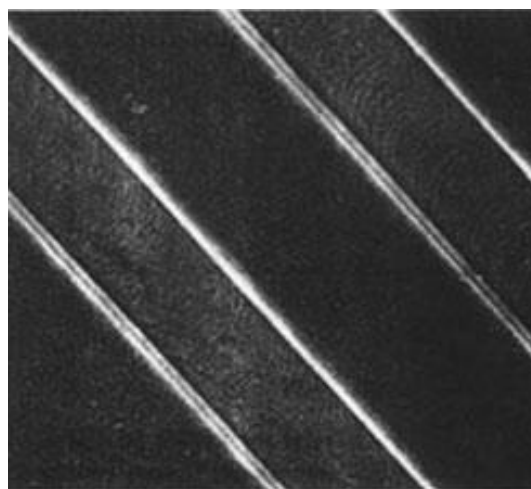
*SEM-фото человеческого
волоса, обработанного
эксимерным лазером*



*Снятие изоляции с провода
диаметром 50 мкм*



*Змеевидный образец с
шириной линии 30 мкм
в стекле*

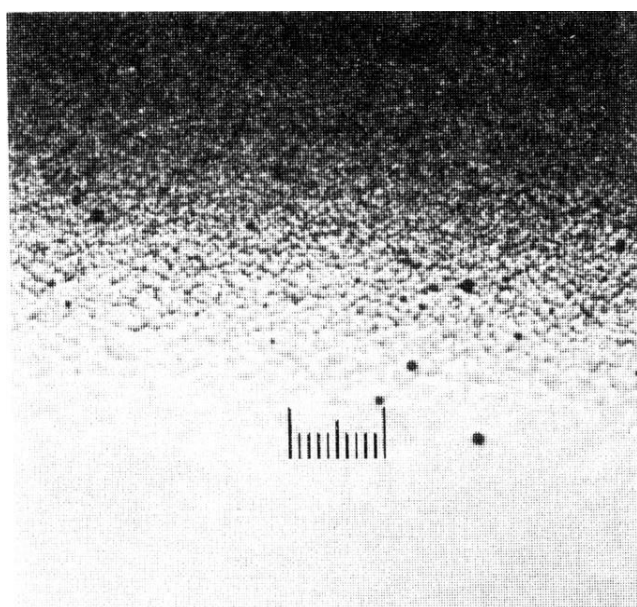


*Крупный план змеевидного
образца в стекле*

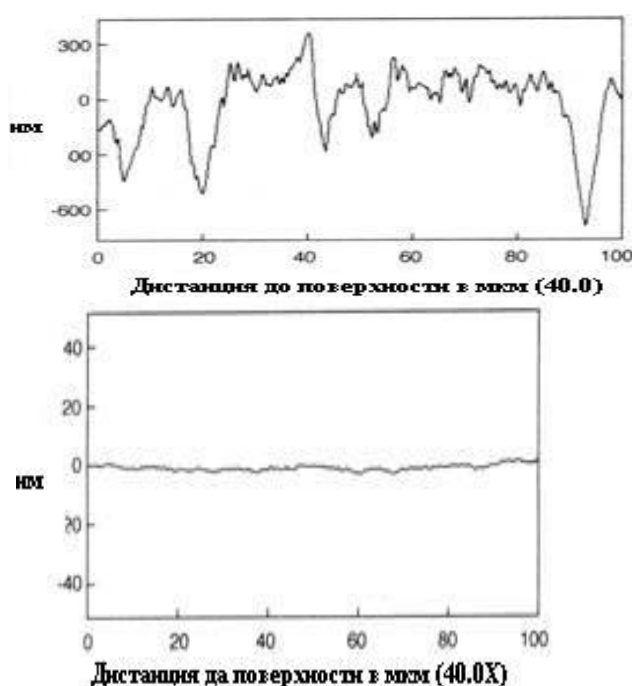
1.4.6. Лазерная полировка оптических поверхностей

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

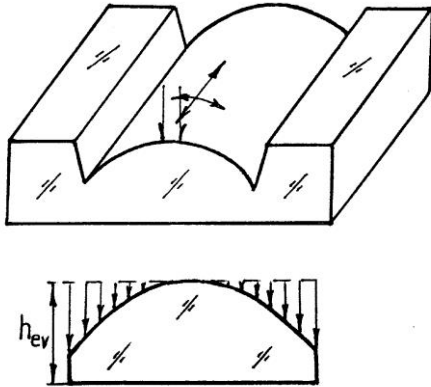


б

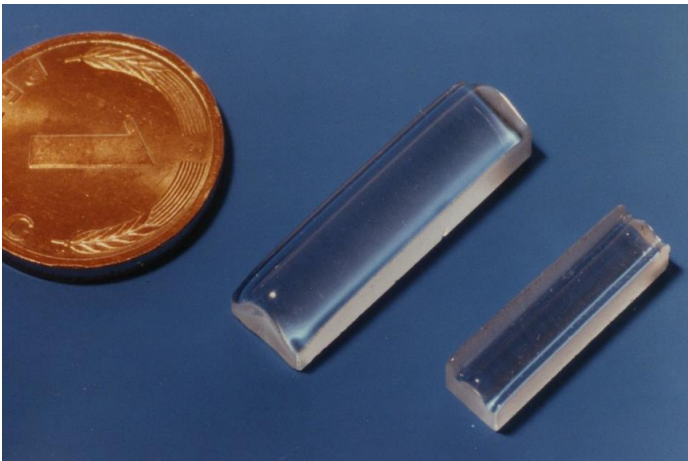
Рисунок: лазерная полировка стекла: слева электронная микрофотография образца из стекла В-270 после механической полировки (а, сверху) и после дополнительной лазерной полировки (а, снизу), показана переходная область между облученной и необлученной зоной; соответствующий измеренный профиль после механической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

Лазерная асферизация оптических поверхностей

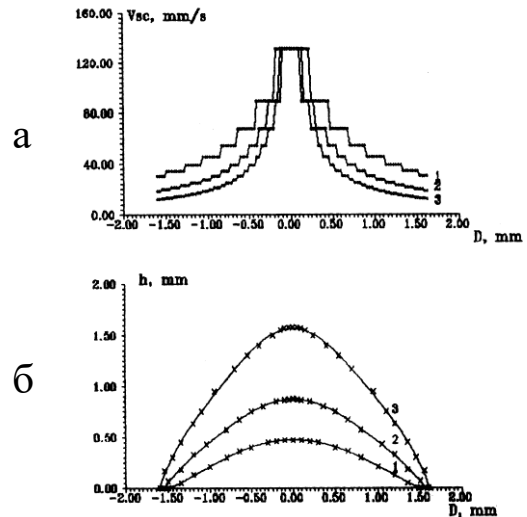
Материалы: термостойкое стекло (кварцевое стекло) ($\text{TKC} \sim 10^{-5} - 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) или другие стекла с предварительным подогревом



*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 (х) 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.

Лазерная реставрация «клада» Лихачевой М.И.



До реставрации



После реставрации



до реставрации

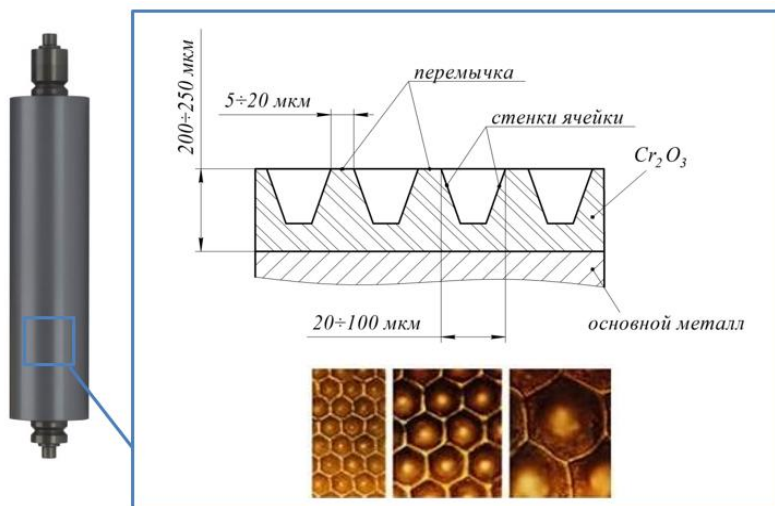


после реставрации

Примеры лазерной очистки

Лазерная очистка полиграфических валов.

В полиграфической промышленности (многотиражная печать) качество конечной продукции зависит от стабильности и толщины красочного слоя, который переносится в печатной машине растрованным валом, поверхность которого имеет микроструктуру «пчелиных сот» (рис. ниже). В процессе печати микроячейки забиваются краской, поэтому требуется профилактическая очистка поверхности валов от оставшейся на стенках и дне ячеек краски. Данная проблема была решена с помощью лазерной очистки импульсным волоконным лазером.



Структура поверхности растрованного вала, который служит для переноса краски в полиграфической машине.



Стационарная установка (ООО «ЛазерЪ») для лазерной очистки растрованных валов.

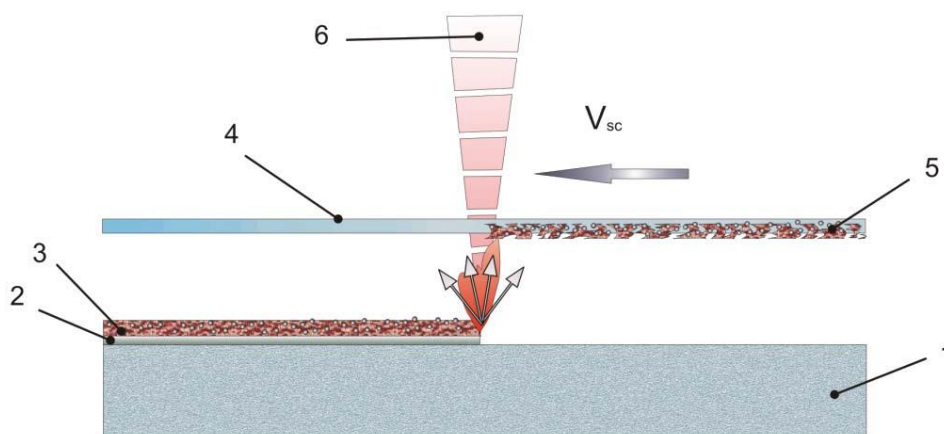
Лазерная дезактивация



Общий вид Чернобыля в настоящее время

Достоинства лазерной дезактивации

- бесконтактное воздействие на материал,
- возможность проводить очистку дистанционно,
- локальность и утилизация продуктов очистки;
- возможность очистки объектов сложной формы и труднодоступных областей,
- высокая производительность (свыше 3 м² в час),
- отсутствие жидких продуктов очистки,
- мобильность оборудования, особенно при работе с волоконными лазерами.

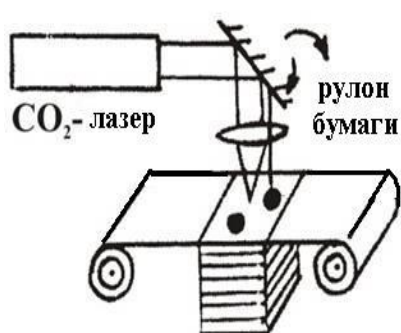


1 – очищаемая подложка, 2 – плотный нижний слой оксидов, 3 – верхний слой оксидов, 4 – пленка, 5 – продукты очистки, 6 – лазерный пучок (В.Н. Смирнов и др., Патент 2468457 «Способ удаления радиоактивной пленки с поверхности объекта»).

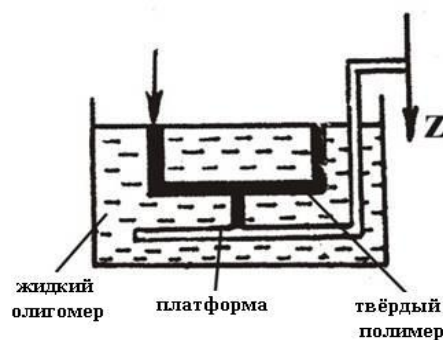
1.4.8. Аддитивные лазерные технологии — принцип



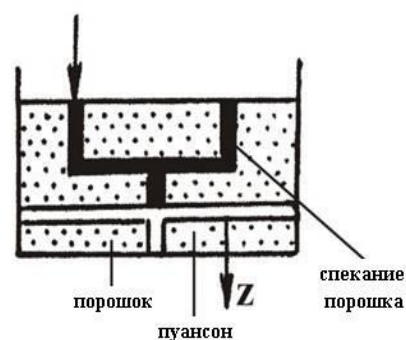
*Схемы подготовки информации(вверху)
и методов 3-х мерного лазерного синтеза (внизу)*



*послойный синтез
из целлюлозно-
бумажных слоев*



*стерео-
литография*



*спекание
из порошков*

Основные виды аддитивных лазерных технологий

Аддитивные технологии: процессы локального или послойного нанесения материала с целью создания объекта из данных 3D-модели, как правило, «точка» за «точкой» или слой за слоем, в отличие от "вычитающих" производственных технологий металлообработки – фрезерования, шлифовки и т.п.

Селективное лазерное спекание (SLS) и селективное лазерное сплавление (SLM)

Селективное лазерное спекание – технология, основанная на последовательном спекании слоев порошкового материала с помощью лазера высокой мощности, в то время как **селективное лазерное сплавление** подразумевает полное сплавление, необходимое для построения монолитных моделей.

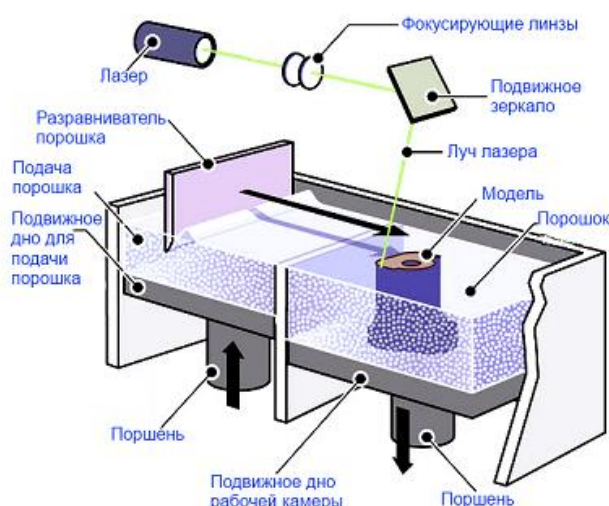


Схема установки SLS

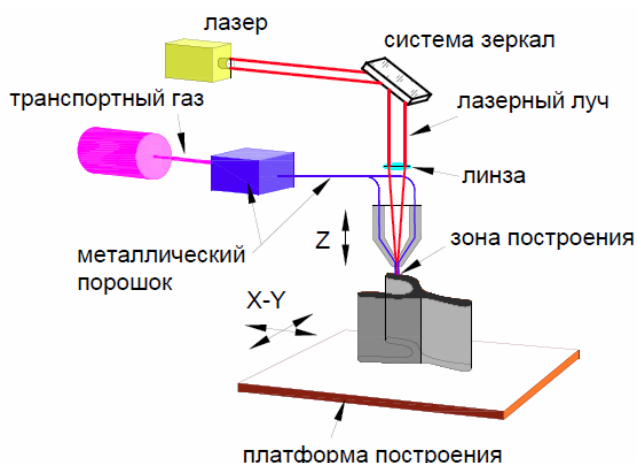


Схема установки SLM



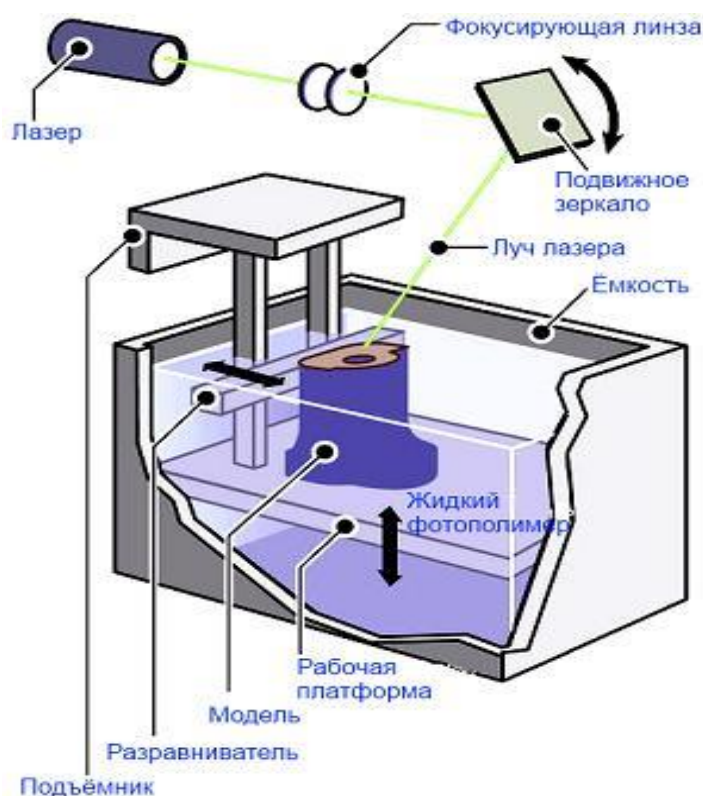
Турбинная лопатка



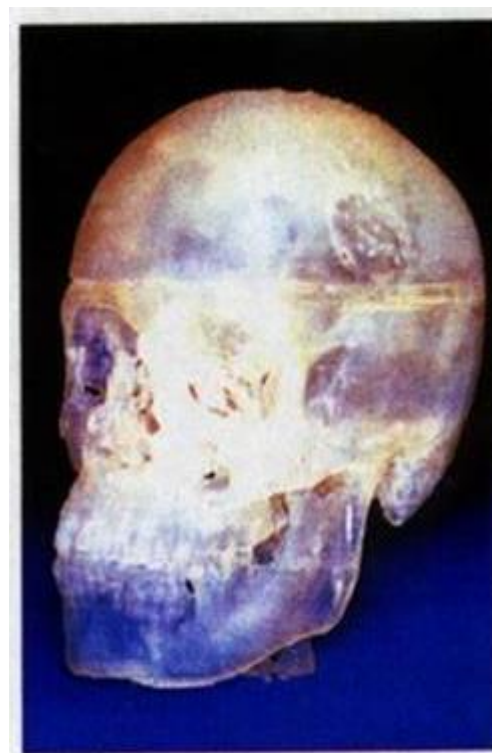
Элемент медицинского имплантата
(Fraunhofer IWU)

Стереолитография (SLA или SL)

Стереолитография – технология создания трехмерных объектов послойным отверждением жидких фотополимерных материалов



*Принципиальная схема SLA установки
(Лысыч М.Н. и др.)*



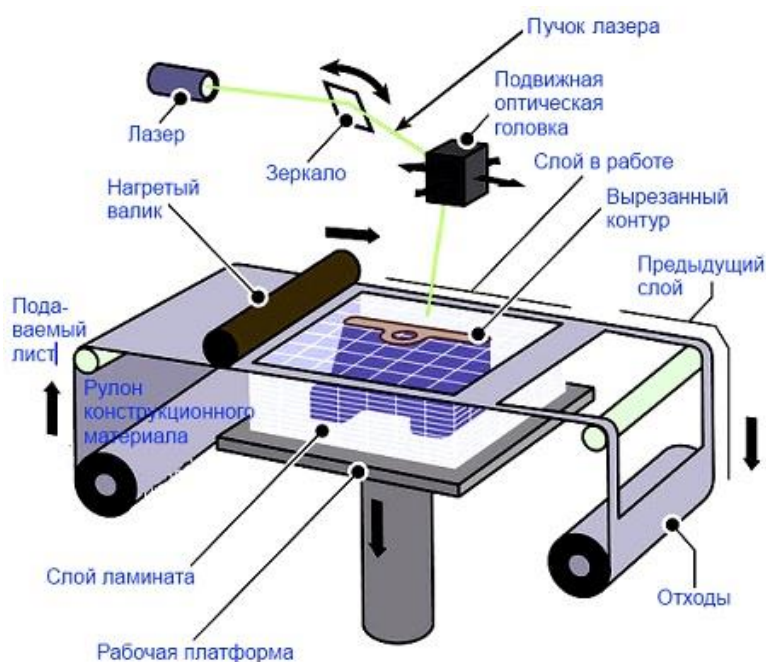
Модель черепа

Лазерная микростереолитография широко применяется для моделирования точных изделий небольшого размера (ювелирная промышленность).

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

Послойная сборка из плоских слоев (LOM)

Послойная сборка из плоских слоев (Laminated Object Manufacturing, LOM) – технология создания трехмерных объектов по заданной в компьютере модели методом послойного соединения (склеивания) элементов, вырезанных лазерным пучком из листового материала.



Принципиальная схема LOM-установки (Лысыч М.Н. и др.)

Геопространственная модель горного массива (Mcor Technologies)

Технология послойной сборки из плоских слоев (LOM) нашла применение в области ландшафтного моделирования и создания геопространственных моделей участков земной поверхности, а также в области архитектуры и дизайна. Окрашивание слоев в процессе печати позволяет получать полноцветные объемные модели.

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 молекул, для изготовления портретов и т.п.

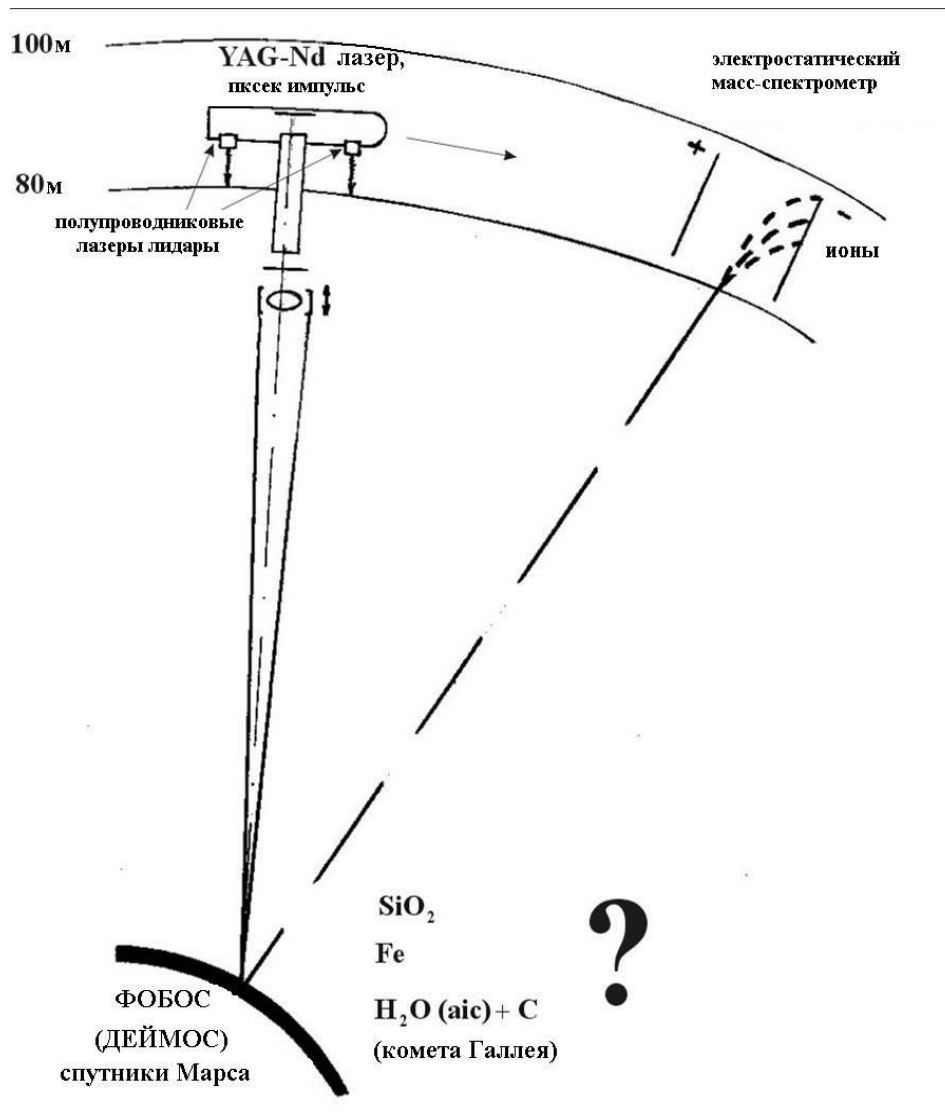


*Фотографии изображений в стекле,
записанных компанией «Laser Star»*

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

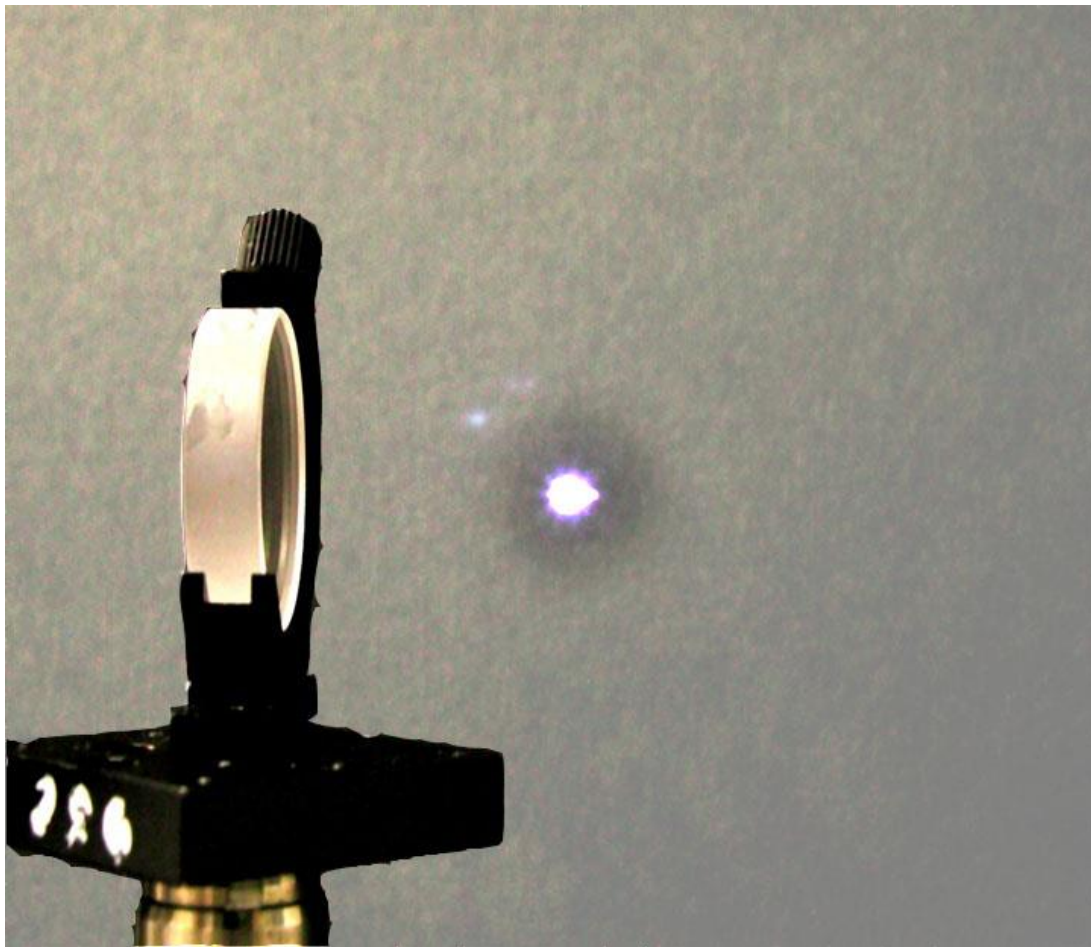
1.5.1. Дистанционное лазерное зондирование космических объектов



Комета Галлея 8 марта 1986 года

1.5.2. Лазерная искра в воздухе и ее применения

- Лазерная реактивная тяга в атмосфере
- Лазерное зажигание двигателей внутреннего сгорания
- Управление грозowymi разрядами,



*Лазерная искра в воздухе, созданная импульсом
TEA CO₂-лазера*

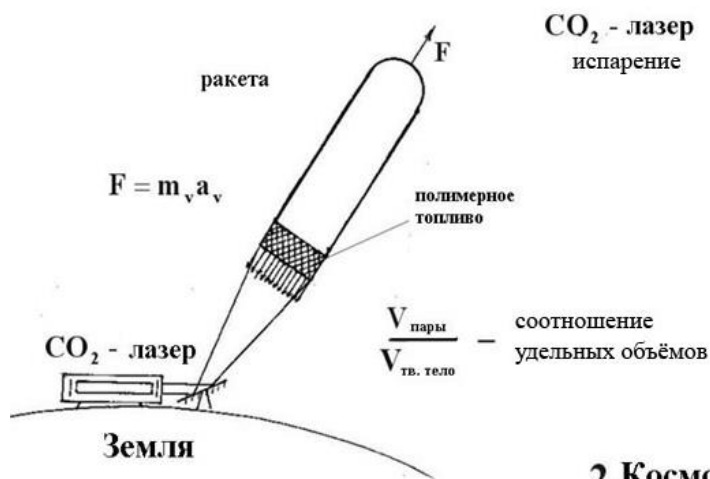
Лазерная реактивная тяга – атмосферные и внеатмосферные двигатели



1. Атмосфера



*Мощность CO₂-лазера 20 кВт, максимальная тяга 2,5 Н,
удельный импульс отдачи 12 дин/Вт.*



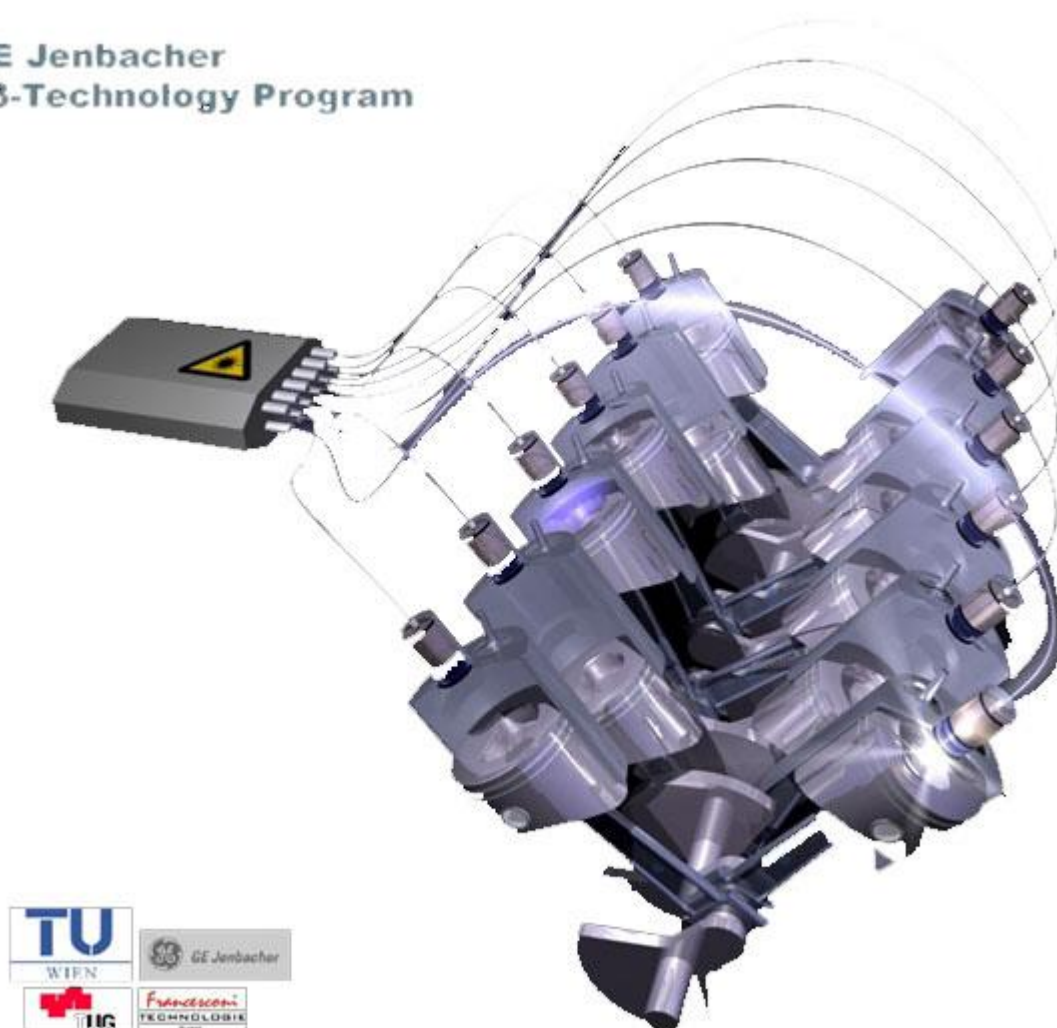
2. Космос



Аппараты с лазерным реактивным двигателем (Lightcraft).

Лазерное зажигание горючей смеси в двигателях внутреннего сгорания

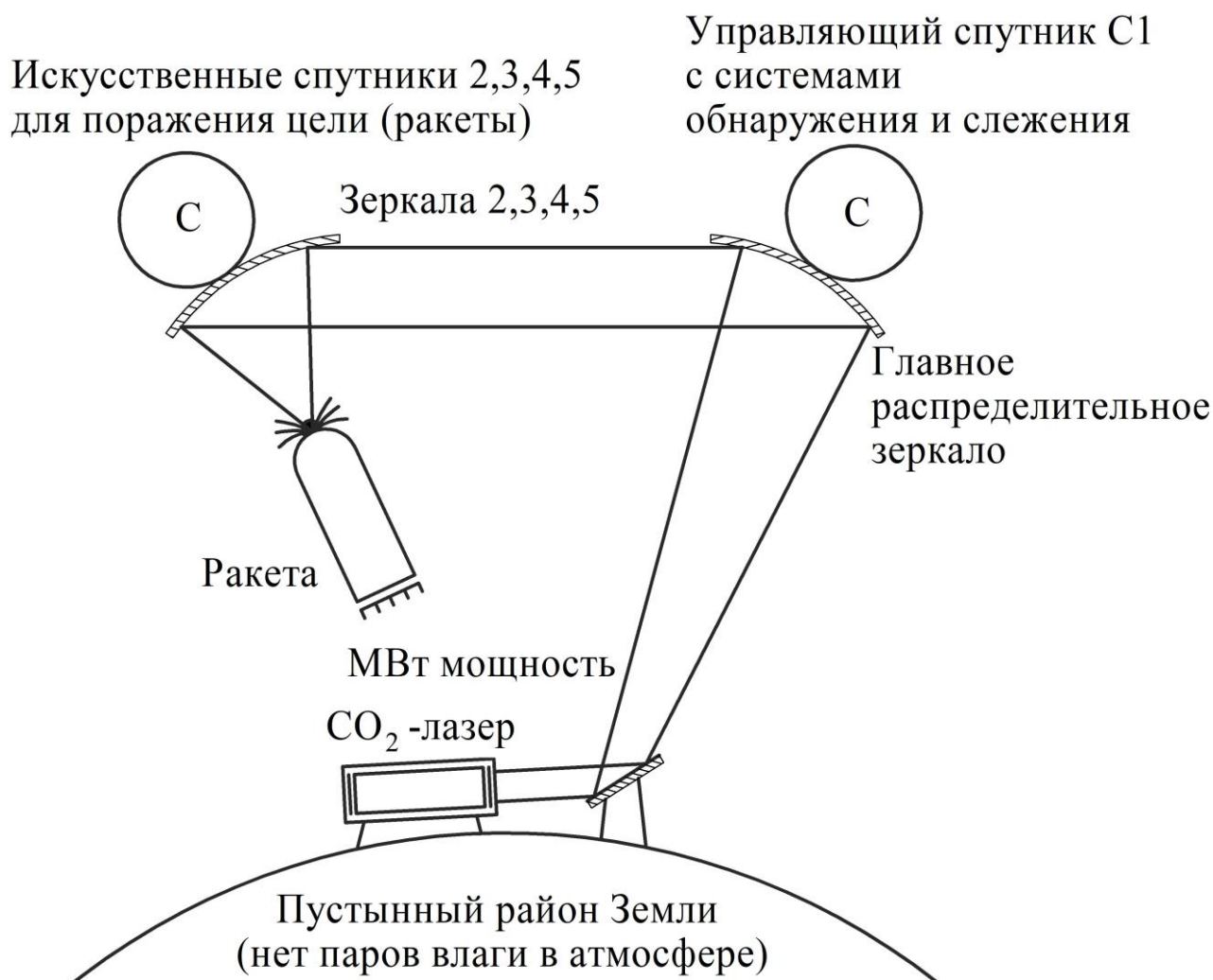
**GE Jenbacher
A3-Technology Program**



(E. Wintner)

**Работает в газовых турбинах в Австрии
и в опытных автомобильных двигателях в Японии**

1.5.3. Лазерное противоракетное оружие



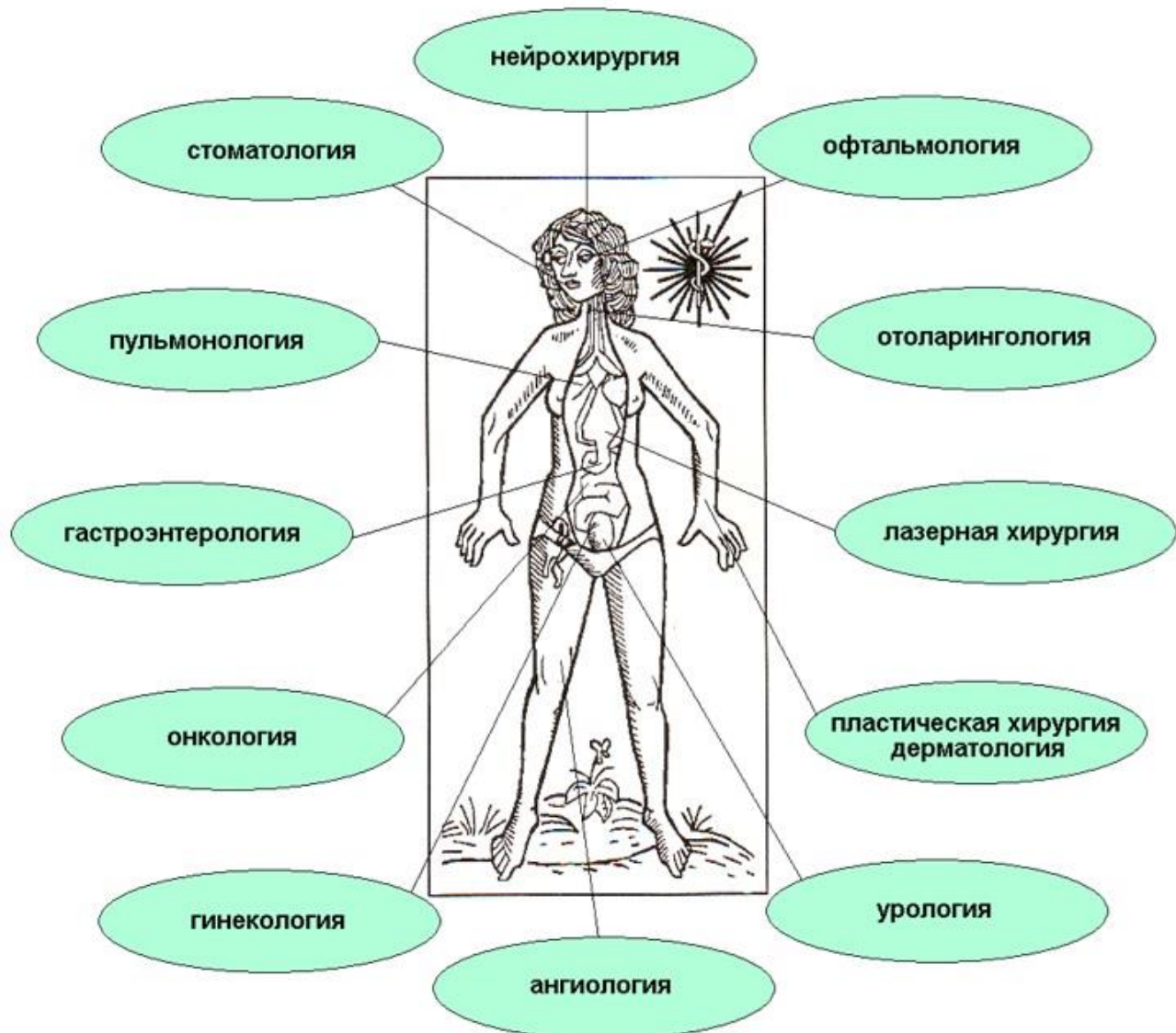
Определим окно «оптической» прозрачности земной атмосферы. По данным NASA средняя температура на поверхности Земли составляет $T \sim 15^\circ\text{C}$, отсюда из закона смещения Вина ($\lambda_{\text{MAX}} = 0,28999/T$) следует, что максимум спектра излучения Земли соответствует длине волны ~ 10 мкм. Таким образом, окно «оптической» прозрачности земной атмосферы близко к длине волны СО₂-лазера.

Лазерное раскалывание льдов



Национальный Российский центр лазерных систем и комплексов «Астрофизика» проводит испытания лазерной установки, предназначенной для установки на ледоколы. Как пишет газета «У Белого моря», первые испытания установки мощностью 30 кВт проведены в ноябре 2017 г. На время проверок лазер, предназначенный для разрезания льда, был установлен на дизельный ледокол «Диксон». Предполагается, что лазер мощностью 200 кВт позволит проводить суда в высоких широтах, в тех зонах, где толщина льда достигает 4-х метров. При этом скорость проводки составит до трех узлов (5,6 км/час).

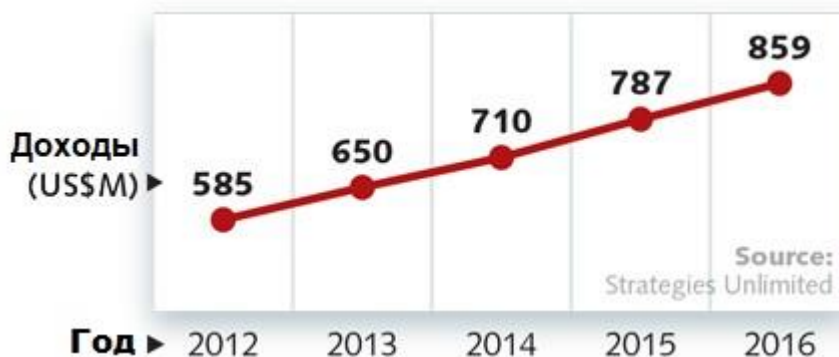
1.6. ОСНОВНЫЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРОВ В МЕДИЦИНЕ



Лазерные технологии в медицине



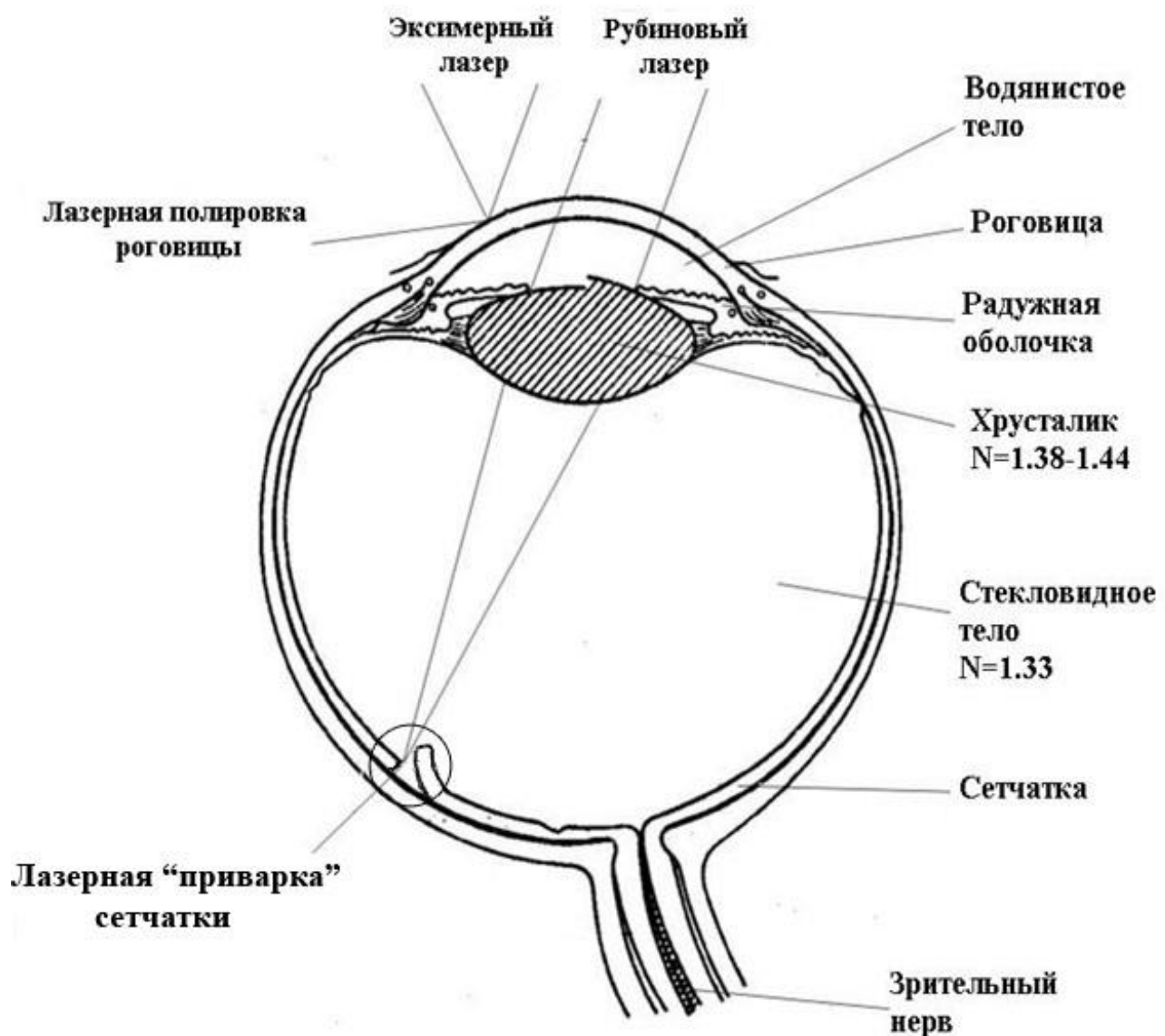
Полное число процедур по лазерному “омоложению” кожи и удалению морщин увеличилось со 120 000 в 2000 г. до 550000 в 2006 г. с соответствующим увеличением производства Er лазеров (включая волоконные). Еще более перспективным оказался рынок диодных лазеров для удаления нежелательных волос (~44% полной суммы продаж медицинских лазеров) – число процедур увеличилось с 480 000 в 2000 г. до 1.5 миллионов в 2006 г., и их число удвоилось к 2010 г. Быстро растущий сектор – диагностические лазеры (оптическая когерентная томография), ежегодный прирост 25% (>15% полной суммы продаж). В 2012-2016 г.г. и далее рынок лазерной медицины растет еще более быстрыми темпами, включая все лазеры, используемые для офтальмологии, общей хирургии, стоматологии, терапевтических процедур, дерматологии и косметических процедур по улучшению вида кожи.



Некоторые характерные примеры применения лазерных технологий в медицине

Лазерные технологии в офтальмологии

- приварка сетчатки,
- коррекция зрения (близорукости и дальнозоркости),
- экстракция катаракты,
- лечение глаукомы



«Эстетические» применения лазеров (в дерматологии и косметологии): удаление морщин, шрамов, татуировок, нежелательных волос, уменьшение жировых отложений («скульптурирование» тела), осветление кожи и т.п.)

Лазерное (фото)омоложение кожи (А.В. Беликов)



Создание линий абляционного разрушения различной ориентации с помощью Groove optics (Palomar Lux2940™ Groove)



Результат (удаление - разглаживание морщин)



До



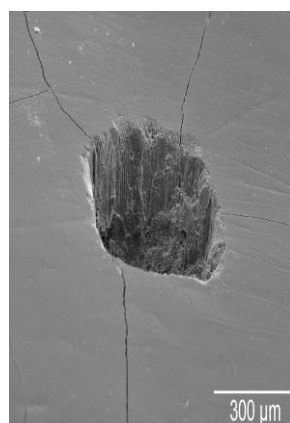
После

Лазерные технологии в стоматологии (А.В. Беликов)

- Контактный наконечник
- Неконтактный наконечник (TEM₀₀)
- Тепловая ОС (APC)
- Диодная накачка кристалла YLF:Er

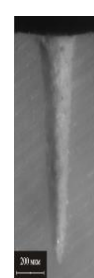
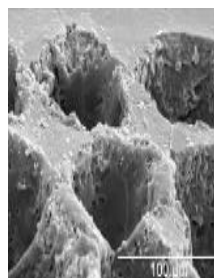
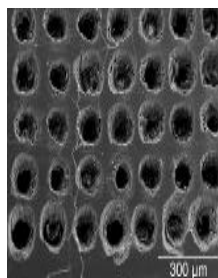
Диодный лазер (0.97мкм)

- Хирургия мягких тканей с APC
- Регенерация десен с miniSpot
- Накачка эрбиевого лазера



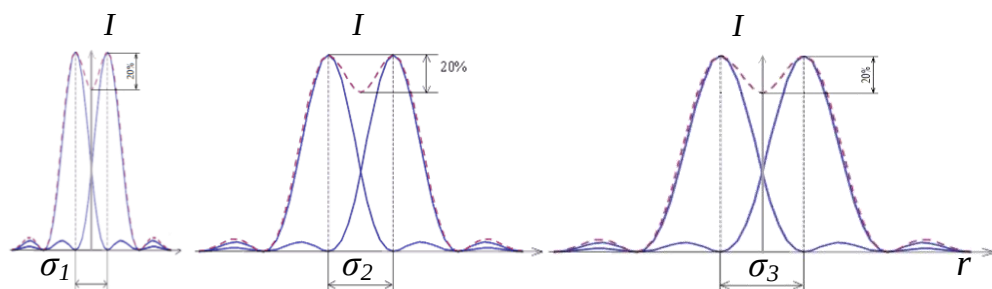
Эрбиевый лазер (2.8-3мкм)

- Обработка твердых тканей M2
- Хирургия кости и корней зубов
- Super bonding (текстуры) (5п)
- Хирургия и терапия корневого канала
- Внутреннее отбеливание (TEM₀₀)



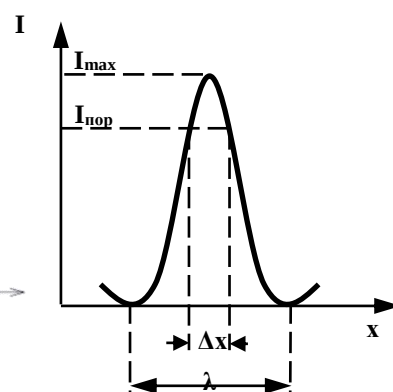
1.7. ПРЕОДОЛЕНИЕ ДИФРАКЦИОННОГО ОПТИЧЕСКОГО ПРЕДЕЛА В ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

Оптическое разрешение δ и контраст $K = dI/dr$

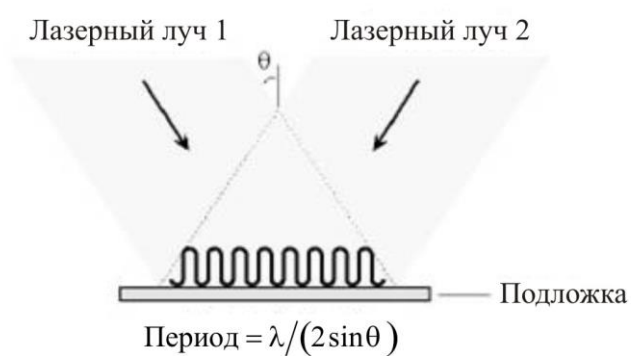


$$\delta_1 = 1/\sigma_1 > \delta_2 = 1/\sigma_2 > \delta_3 = 1/\sigma_3$$

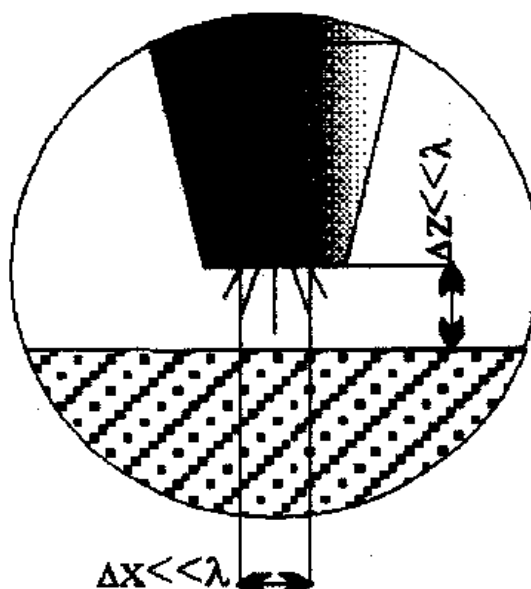
Дифракционный предел в оптике



*Пороговые процессы
в лазерных технологиях*



*Многоволновая интерференция
лазерных пучков*



*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 –

$$N(1/\text{см}^2 \cdot \text{с}) = q/h\nu \quad (2.1)$$

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

- большое световое давление

$$P_{CB} = (1+R) \cdot I/c \text{ (Н/м}^2\text{)} \quad (2.2)$$

где R – коэффициент отражения поверхности при нормальном падении света, I – интенсивность и c – скорость света соответственно (при мощности лазерного излучения 1 Вт, фокусировке в пятно диаметром 50 мкм для зеркальной поверхности мишени величина светового давления 3,5 Н/м²)

- высокая напряженность электрического поля

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

(быстропеременное 10^{15} Гц, но напряженность может быть соизмерима с внутриатомной $\sim 10^9$ В/см)
(при $q \leq 10^6 - 10^7$ Вт/см², $f \approx 10^{15}$ Гц, $E_l \leq 10^5 - 10^6$ В/см)

- высокая плотность мощности

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

где W – энергия в импульсе, S – площадь сечения пучка, τ – длительность воздействия, которая может вызвать очень локальный $\sim 1 \text{ м}^2$ 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 – унос продуктов разрушения в виде пара, расплава и даже твердых фрагментов) – наиболее распространенный процесс, который лежит в основе большинства промышленных технологий обработки любых материалов в машиностроении и микротехнологиях; в настоящее время актуальными остаются проблемы точности и качества.

2. Плавление материалов с целью их последующего соединения при сварке и пайке.

3. 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 элементов из стекла и т.п.

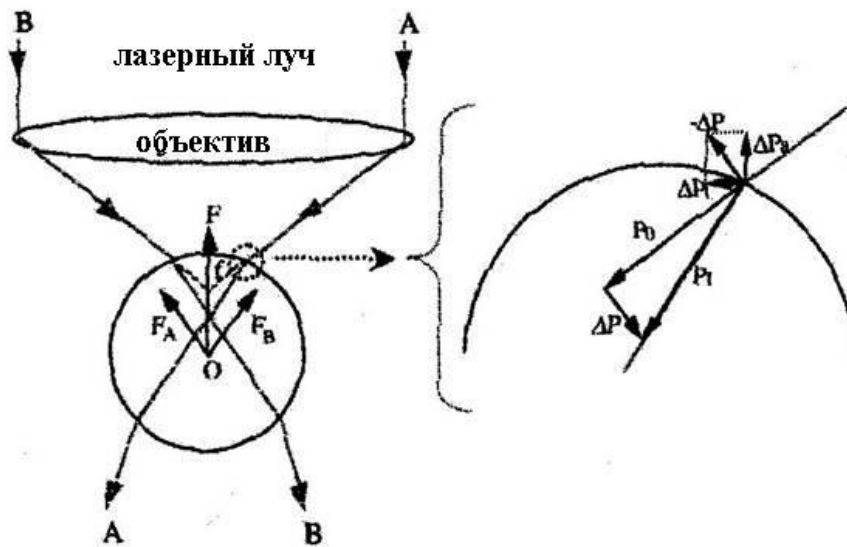
4. Направленное локальное нагревание, вызывающее появление контролируемого поля напряжений, приводящего к управляемому деформированию листовых материалов (laser forming), причем не только с целью формообразования, но и прецизионной сборки и юстировки микромеханических компонентов.

5. Формирование ударных волн в твердом теле, в том числе через жидкую среду для лазерной «ковки» (laser peening) и очистки, направленная кавитация (холодное кипение) в жидкости для «гидролазерной» обработки, в т.ч. в медицине (*С.Н. Смирнов*)

6. Фотоабляция, термокоагуляция и некоторые другие механизмы, специфические для взаимодействия с биологическими тканями

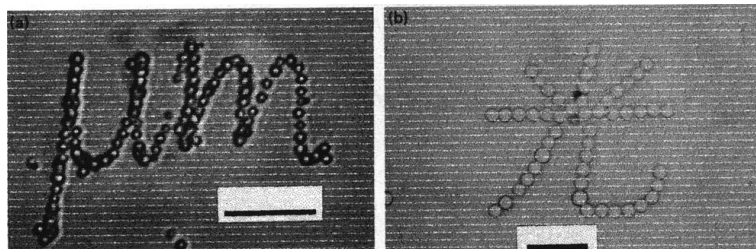
Лазерные технологии могут быть основаны не только на высокой плотности мощности, но также и на большой плотности фотонов, что важно для нелинейных процессов (нелинейное поглощение в слабопоглощающих средах), в селективных технологиях (химические, биомедицинские технологии). Могут найти применение сильные 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)

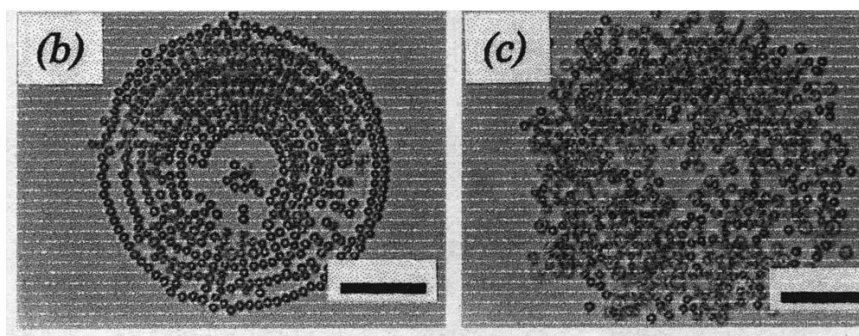


Принципы laser trapping

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



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



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

Многофотонное поглощение лазерного излучения

В технологических процессах эффективность лазерного воздействия определяется величиной поглощенного лазерного излучения. При высокой плотности фотонов в лазерном пучке реализуется механизм многофотонного поглощения, который позволяет эффективно воздействовать на прозрачные среды лазерным излучением видимого диапазона.

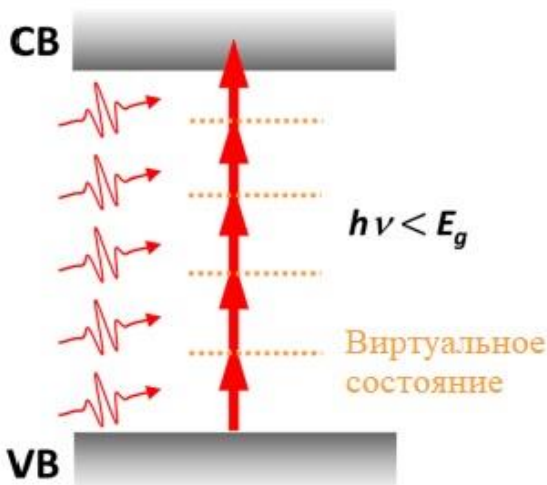
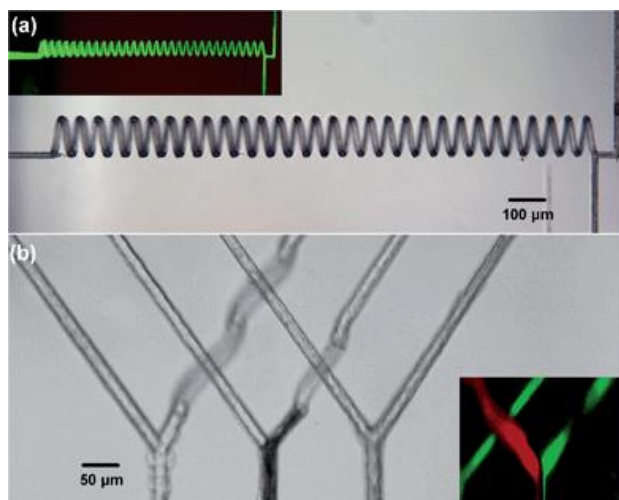


Схема многофотонного поглощения. СВ – зона проводимости, VB – валентная зона, E_g – ширина запрещенной зоны. (К. Sugioka, 2014).



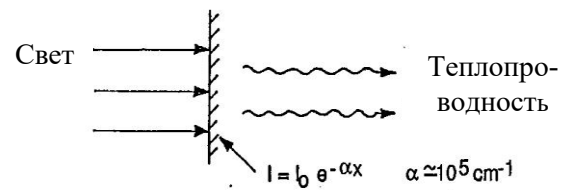
Спиральный микроканал в объеме пористого стекла (а), созданный фемтосекундным лазером (на вставке слева микрофотография спирального микроканала, заполненного флуоресцентным красителем); (b) Y-образные микрофлюидные каналы, записанные друг над другом. (К. Sugioka, 2012).

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

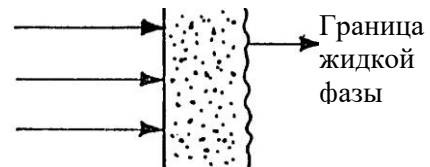
Поглощение лазерного излучения по закону $q(x) = q_0(1-R)e^{-\alpha x}$ (2.7) при глубине проникновения света $\delta = 1/\alpha \sim 10^{-5} - 10^{-6}$ см для металлов (скин-слой).



Нагрев материала

до точки плавления $T_{пл}$

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



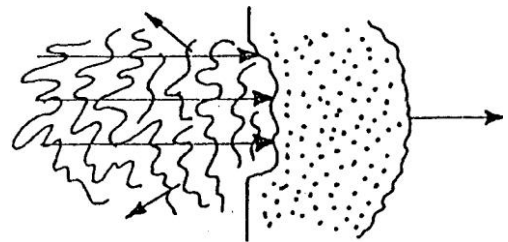
Дальнейший нагрев

до точки испарения

(кипения) $T_v = T_b|_{P=P_{atm}}$

Испарение

после поглощения удельной теплоты парообразования $L_{исп}$



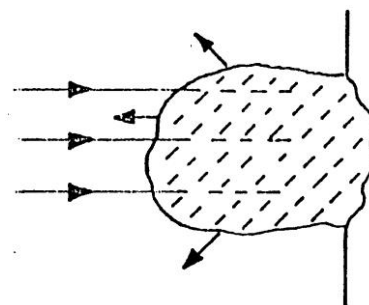
Движение испаряемой поверхности

вглубь материала

со скоростью V_0

Образование плазмы

разлет плазменного факела



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 (пирометрические измерения),
- генерация рентгеновского излучения.

Структурные процессы (локальные)

- рекристаллизация,
- структурные изменения в Fe-C сплавах (закалка сталей),
- управление плотностью пористых сред (стекол),
- аморфизация и кристаллизация стеклокерамик,
- аморфизация тонких металлических пленок – взаимная диффузия нагретых слоев (микрометаллургия),
- отжиг дефектов (в полупроводниках),
- рафинирование металлов.

Поверхностные химические реакции – возможность управления размерами и геометрической формой реакционной зоны

- локальное окисление металлов и полупроводников (литография),
- восстановление поверхности окисных материалов,
- термическое разложение металлоорганических соединений,
- полимеризация (и деструкция) полимеров,
- фоторазложение химических соединений в газовой фазе,
- селективное лазерное фототравление.

Физические процессы, возникающие на поверхности твердых тел при лазерном нагреве (продолжение)

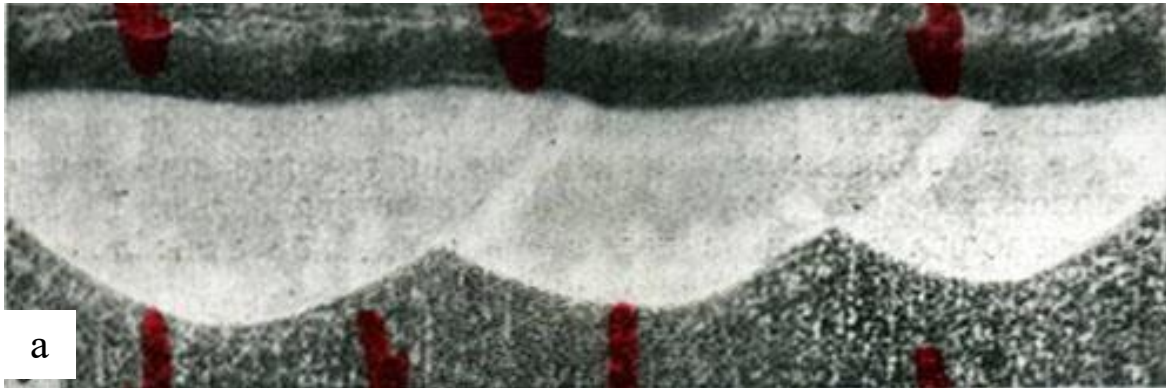
Термомеханические эффекты

- тепловое расширение, включая импульсное, появление термонапряжений (shock cleaning),
- генерация ударных волн в твердом теле (ковка), жидкости и газе,
- генерация ультразвука (дефектоскопия),
- оптический пробой в прозрачных диэлектриках - в прозрачных твердых телах, жидкостях и газах (зажигание двигателей и т.п.),
- светогидравлический эффект,
- лазерная реактивная тяга,

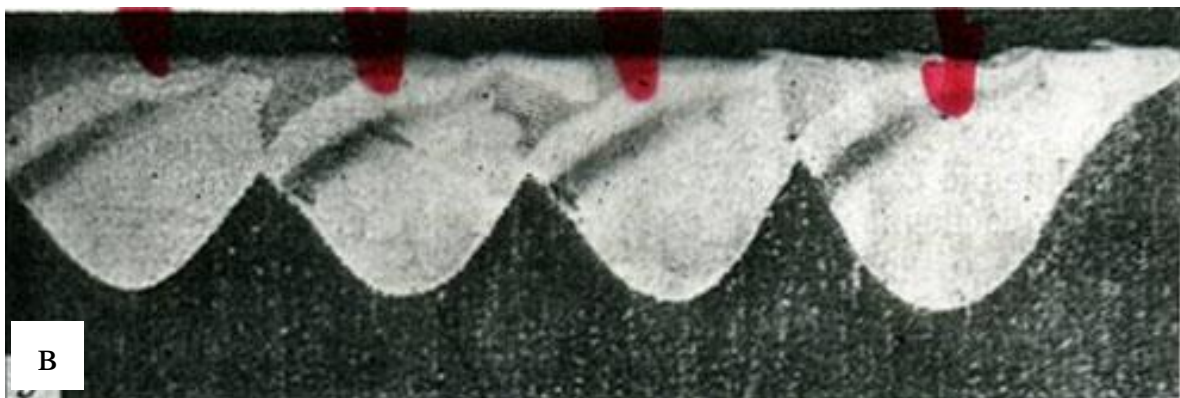
Физические переходы (фазовые переходы первого рода)

- плавление (сварка, пайка),
- парообразование: испарение, термическое разложение, (резка, сверление отверстий, маркировка, гравировка) очистка и т.п.)
- объемное кипение - термическое и холодное (кавитация),
- воспламенение и горение,
- детонация активных (дистанционная) 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

Лазерно-индуцированные фазовые переходы первого рода (аморфизация и кристаллизация) в стеклокерамических материалах могут использоваться для формирования элементов фотоники.



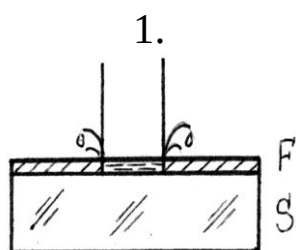
*Фотография исходная пластина ситалла
СТ-50-1 ($\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$, Al_2O_3 , CaO , MgO)
(в отраженном свете)*



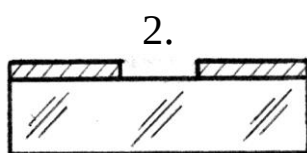
*Фотография той же пластины
после локальной лазерной аморфизации
(формирование линзового растра)*

2.5. ФИЗИКА ЛАЗЕРНОГО ФОРМИРОВАНИЯ ТОНКОПЛЕНОЧНОЙ ТОПОЛОГИИ

1. Удаление
пленок
(испарение абляция)

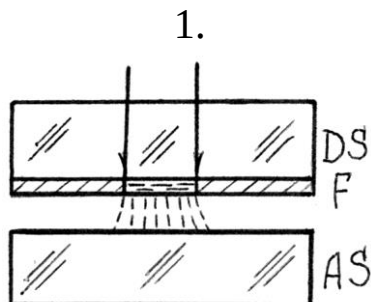


экспозиция
(удаление)

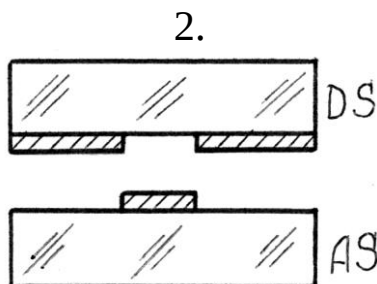


результат -
отверстие
в пленке

2. Локальное
лазерное
осаждение

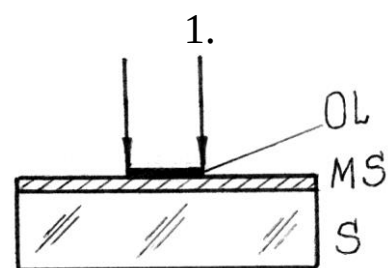


экспозиция
(осаждение)

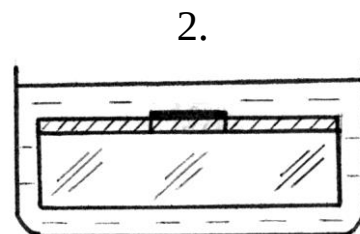


результат -
локальная
конденсация

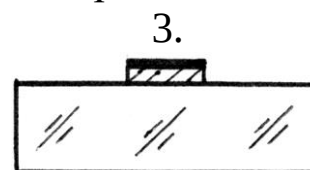
3. Локальное
окисление -
селективное травление



экспозиция
(окисление)

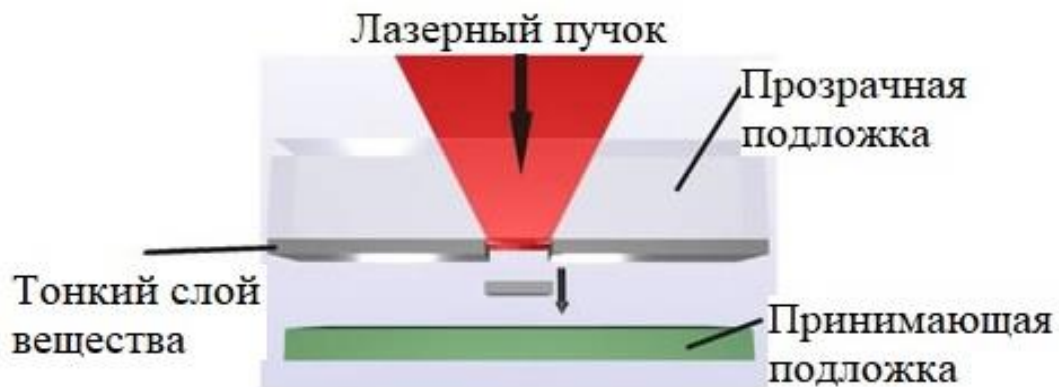


HCl + Al
катализатор
селективное
травление

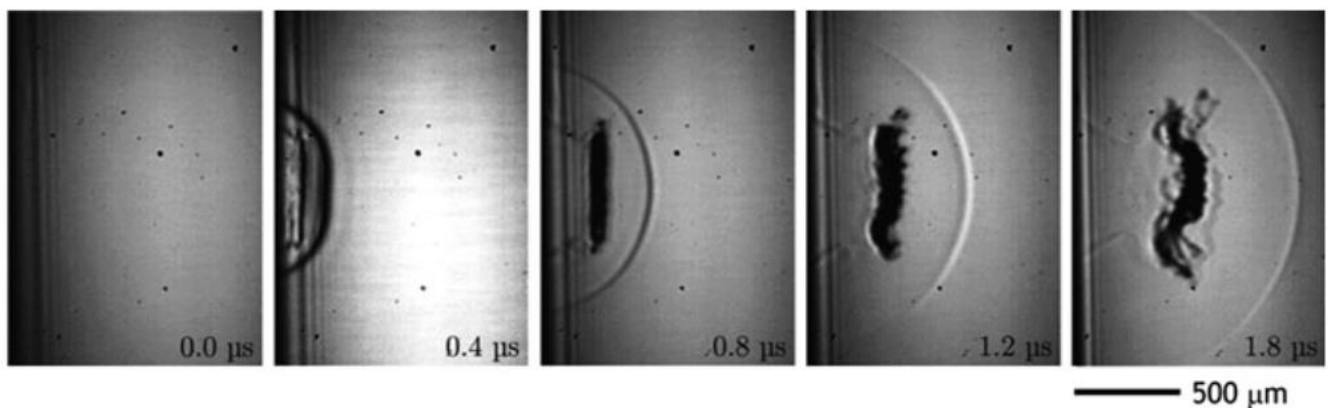
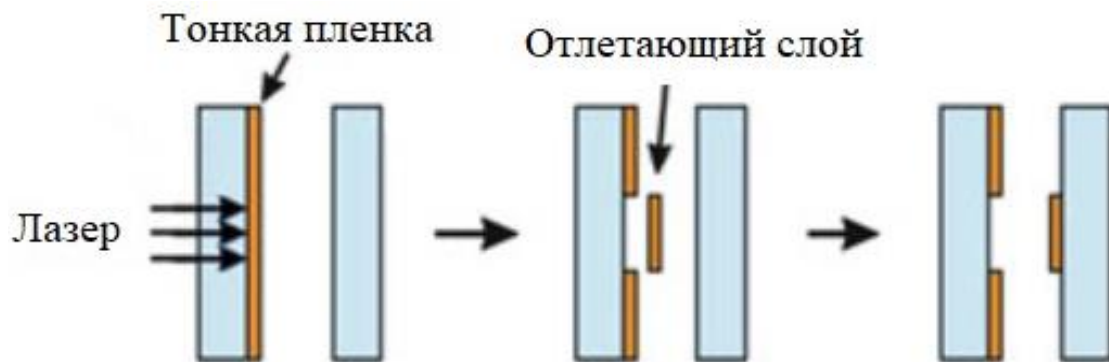


результат -
пленочный элемент

Принципиальная схема метода локального лазерного переноса (LIFT)

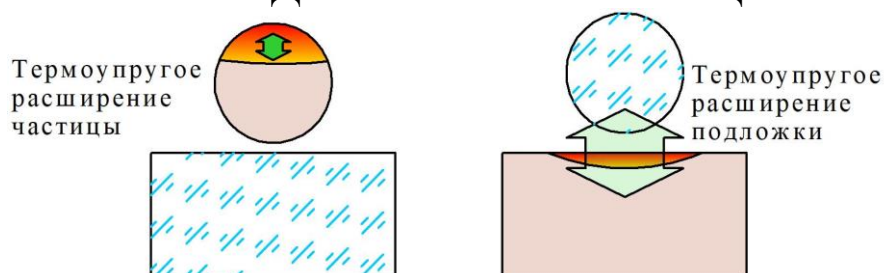


Принципиальная схема метода LIFT (Laser-Induced Film Transfer)



*LIFT: динамика отлета тонкой (460 нм) полимерной пленки при
воздействии лазерного излучения с плотностью мощности 110
мДж/см² (Fardel, 2010)*

2.6. ЛАЗЕРНАЯ ОЧИСТКА ПОВЕРХНОСТЕЙ ТВЕРДЫХ ТЕЛ ОТ ЧАСТИЦ

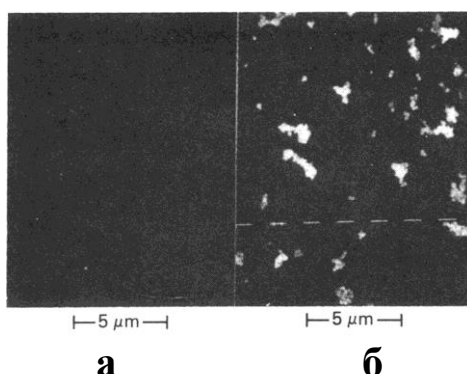


*Иллюстрация физического механизма
сухой лазерной очистки поверхности от микрочастиц.*

Примером использования импульсных термонапряжений при лазерном воздействии на твердые тела является механизм сухой лазерной очистки. Он реализуется при плотностях мощности до $T_{пл}$, что обусловлено требованием сохранения целостности очищаемой подложки. Импульсный нагрев поглощающей частицы или поглощающей поверхности приводит к возникновению термоупругих напряжений, приводящих к ускорению частицы/поверхности, в результате чего нарушается (адгезионная) связь между частицей и подложкой и частица отрывается от поверхности.



*Иллюстрация физического механизма
влажной лазерной очистки (при температуре кипения воды).*



а

б

*Фотография поверхности Si подложки с 0.2 мкм Au частицами, KrF-лазер (0.2 Дж/см², 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, τ – длительность воздействия).

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

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

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

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

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

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

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 (Вт/м²) представлены в таблице 2.1, а для непрерывного – в таблице 2.2.

Таблица 2.1

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

Таблица 2.2

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

Пороги испарения (Вт/м^2) для непрерывных лазеров (источник неподвижный) сосчитанные по формуле (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
$q_{\text{и}}$	$6.1 \cdot 10^{11}$	$7.3 \cdot 10^{11}$	$1.5 \cdot 10^{11}$	$4.9 \cdot 10^{10}$

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:

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

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/см³, $L_{\text{пл}} \leq 10^3$ Дж/см³, $L_{\text{и}} \geq 10^4$ Дж/см³

Таким образом, средняя скорость проникновения фронта испарения $V_0 = h/t$ 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:

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

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

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

где $C_{\text{зв}}$ – скорость звука в твердых телах, $T^* = L_{\text{и}}^* / k$, (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 ²	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 τ , со скоростью V_0 :

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

- диаметр отверстия не увеличивается:

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

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

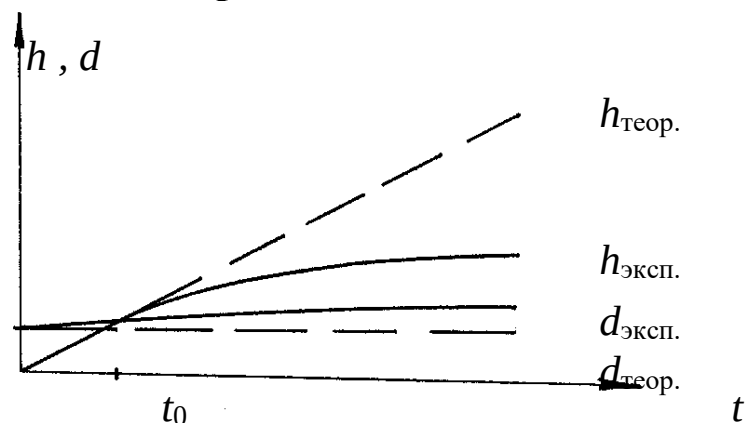
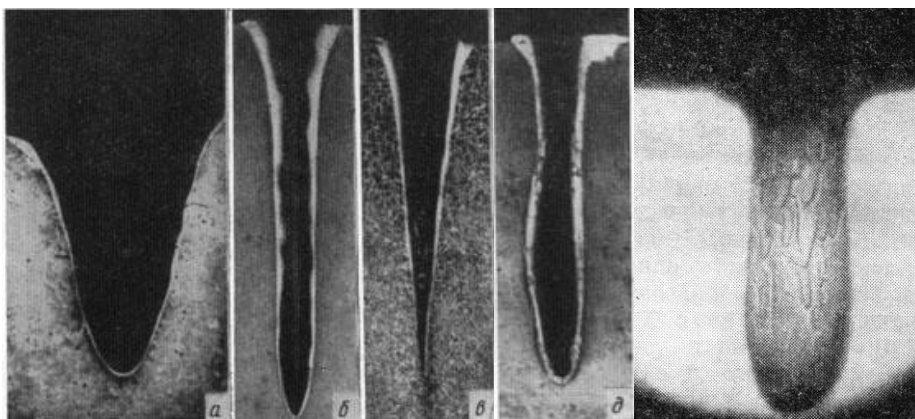


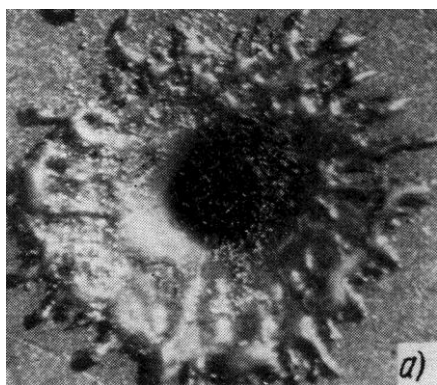
Рисунок:
качественные характеристики
одномерной модели
микро-формообразования.

Одномерная модель достаточно 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)



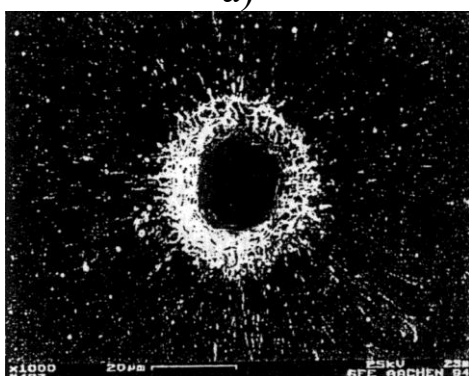
*Фотографии продольных шлифов
«лазерных» лунок в стали, $h = 1$ мм.*



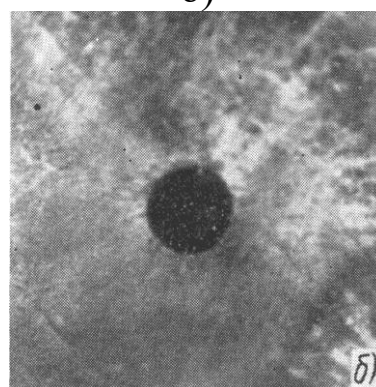
а)



б)



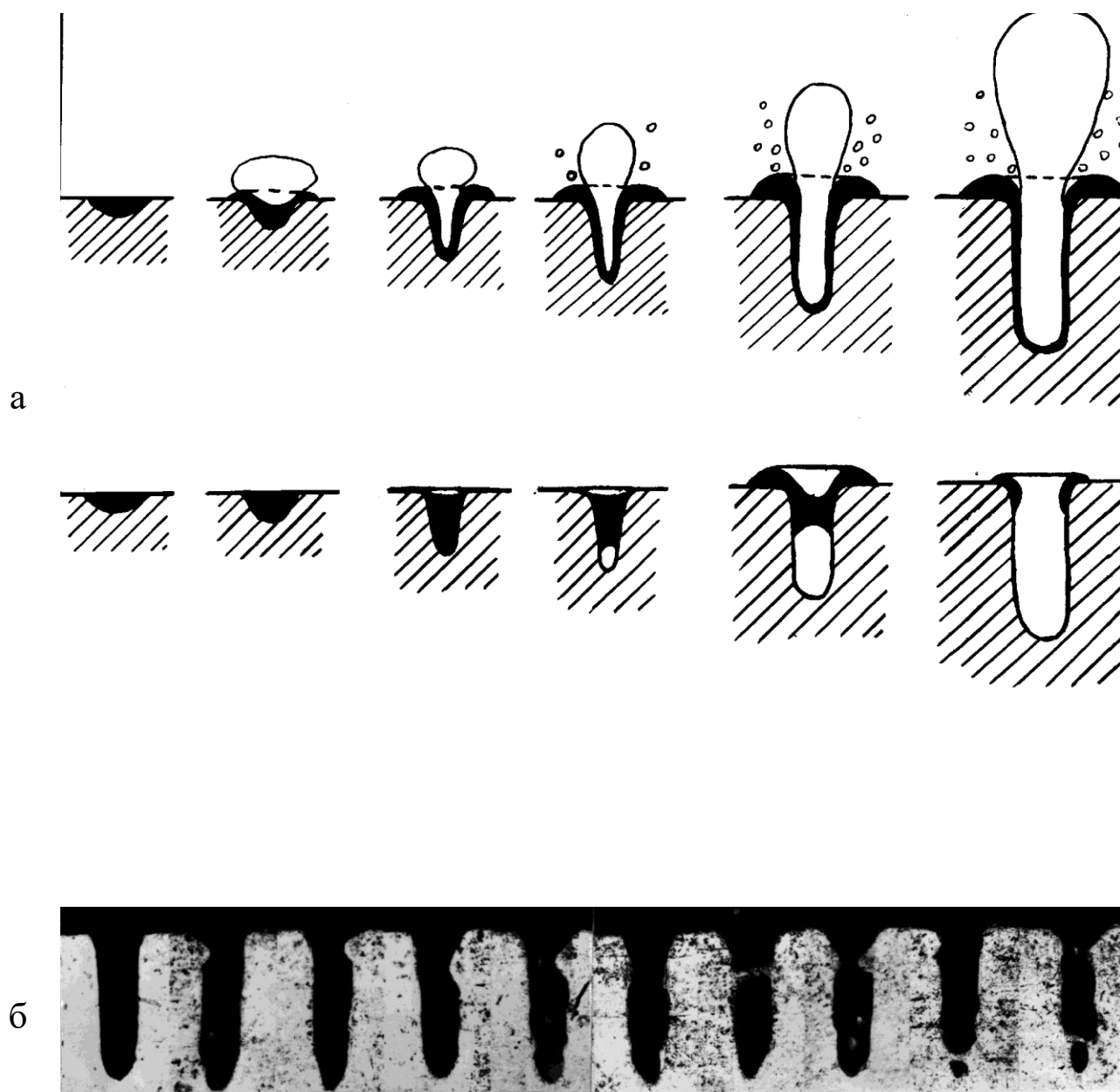
в)



г)

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

Экспериментальные результаты (2)



*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 , так как 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 $T_{\text{и}}$ и плавления $T_{\text{пл}}$ (под поверхностью).

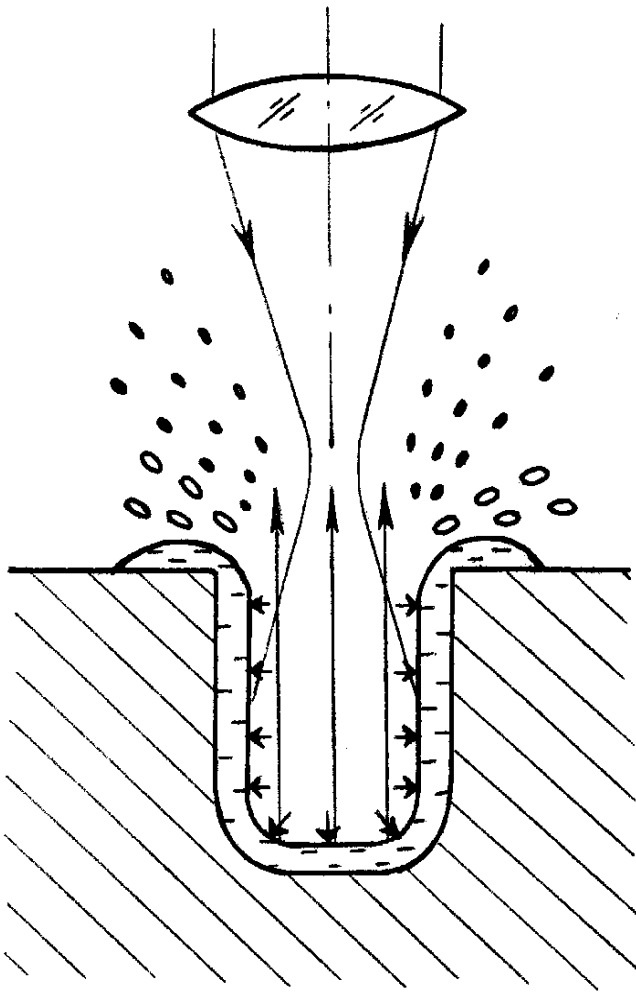
Другие важные факторы, которые влияют на процесс формирования отверстия:

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

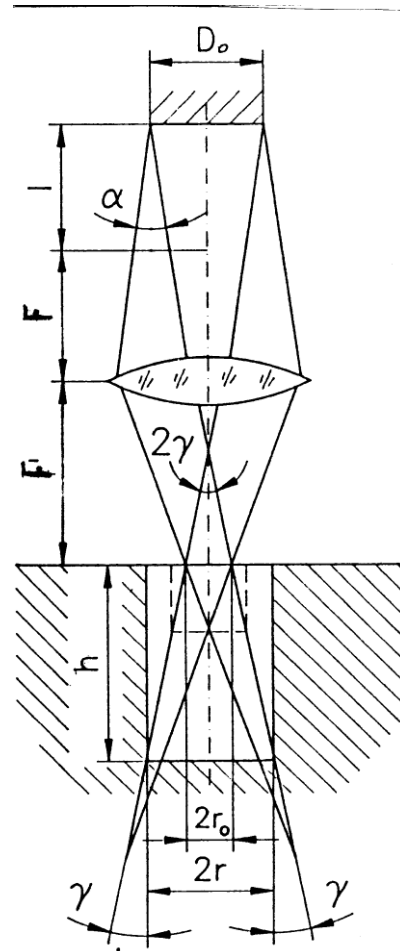
К этим явлениям следует добавить:

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

ДД модель лазерной обработки (2)



а



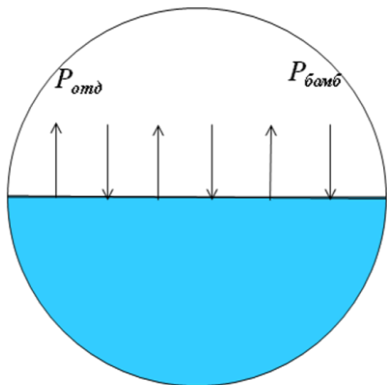
б

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

(γ – 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),
 α – угол расходимости пучка).

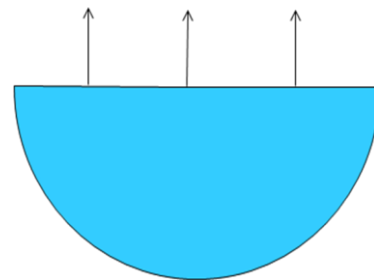
2.11. ДАВЛЕНИЕ ОТДАЧИ ПРИ ИСПАРЕНИИ. УРАВНЕНИЕ КЛАУЗИУСА-КЛАПЕЙРОНА

Давление отдачи паров при лазерной обработке (плавлении, интенсивном испарении) твердых тел играет большую роль как с точки зрения точности (искажение границы обработки и загрязнение поверхности каплями расплава), так и производительности процесса (вынос вещества в жидкой фазе).



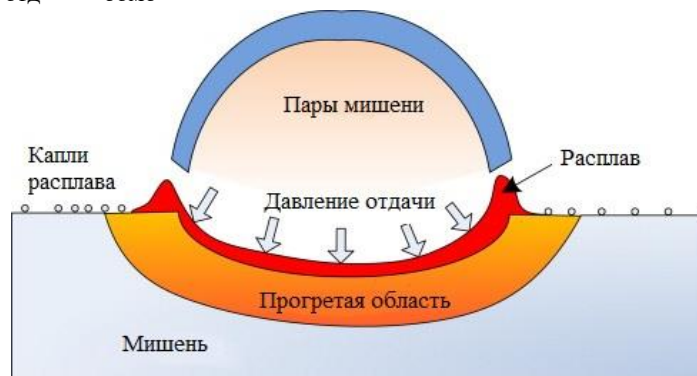
Давление насыщенного пара жидкости в равновесии с собственным паром:

$$P_{\text{нп}} = P_{\text{отд}} + P_{\text{бомб}}$$



а давление отдачи в случае равновесия, когда $P_{\text{отд}} = P_{\text{нп}}$

$$P_{\text{отд}} = 0.5P_{\text{нп}},$$



Связь давления насыщенного пара с температурой T дается формулой **Клаузиуса-Клапейрона**:

$$P_T = P_0 \frac{T}{T_0} \exp \left[\frac{L_u^M \mu}{R_T T_0} \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) \right],$$

Где μ – молярная масса обрабатываемого материала, L_u^M – скрытая теплота испарения единицы массы материала, R – универсальная газовая постоянная, P_0 – давление насыщенных паров при температуре T_0 .

2.12. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Основные экспериментальные методы измерения параметров взаимодействия лазерного излучения с веществом.

1. Температура:

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

- зондовые измерение тока термоэмиссии, **закон Ричардсона** (неравновесность, нестационарность)

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

$W_{\text{вых}}$ – работа выхода, T – температура поверхности, A – константа.

- измерение спектрального состава лазерной плазмы (оптическая эмиссионная спектроскопия) **формула Саха** (степень ионизации для равновесной плазмы неравновесность, нестационарность)

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

α – 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 (болометрический 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. Интегральные закономерности:

- пороги – визуальный – по факелу, микроскопический – по следу, по кварцевому резонатору;
- импульс отдачи – по маятнику, по клину, измерения с помощью широкополосного УЗ-датчика.

3. Давление в зоне воздействия – в мишени и в окружающей среде

- акустические датчики,
- оптоакустические методы

4. Кинетика

- высокоскоростная кино- и видеосъемка и рентгенография.

5. Структура и состав зон воздействия:

Морфология и внешний вид поверхности

- оптическая микроскопия,
- электронная микроскопия,
- сканирующая зондовая микроскопия,

Химический состав поверхности и продуктов абляции

- энергодисперсионный анализ,
- спектроскопия комбинационного рассеяния (Рамановская спектроскопия),
- Оже-спектроскопия
- дифракция вторичных электронов и др. методы,

Кристаллографическое состояние материала

- дифракция рентгеновских лучей, и др. -

Экспериментальное исследование кинетики образования лунки методом скоростной киносъемки

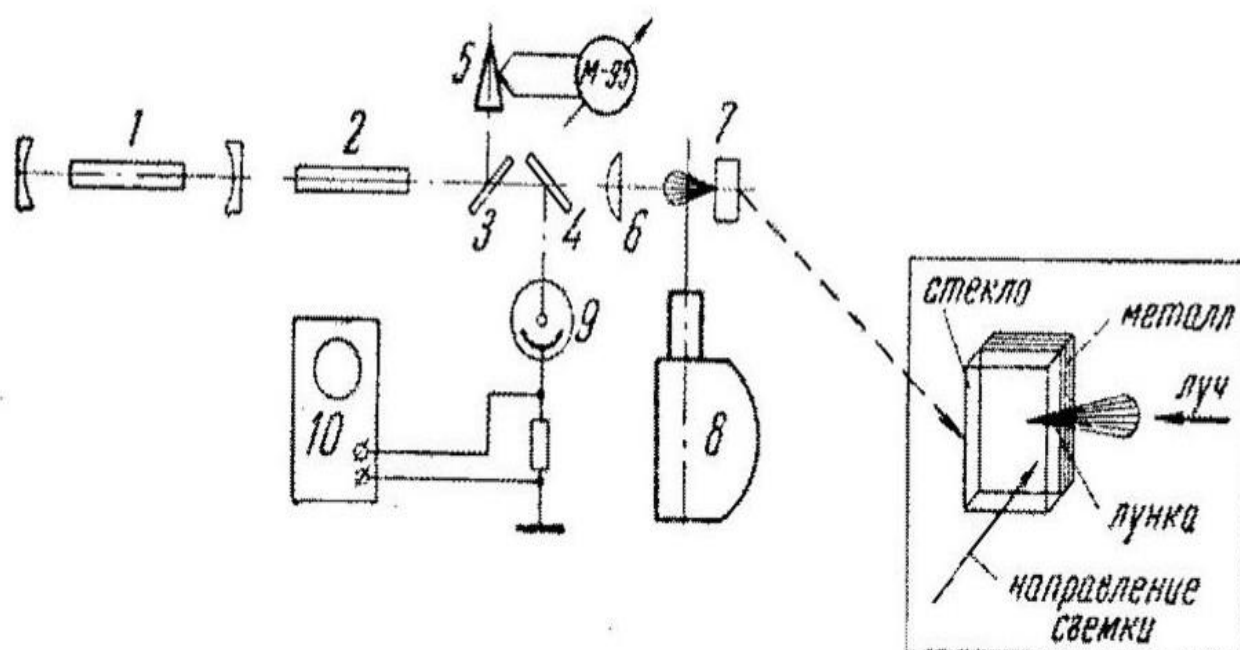


Схема установки для исследования воздействия лазерного излучения на металлы: 1 – задающий генератор, 2 – усилитель мощности, 3, 4 – светоделительные пластинки, 5 – калориметр, 6 – линза, 7 – мишень, 8 – высокоскоростная кинокамера ФП-22 или скоростной фоторегистратор СФР-2, 9 – фотозаэлемент Ф-5, осциллограф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

Кинетика процесса абляции металлов

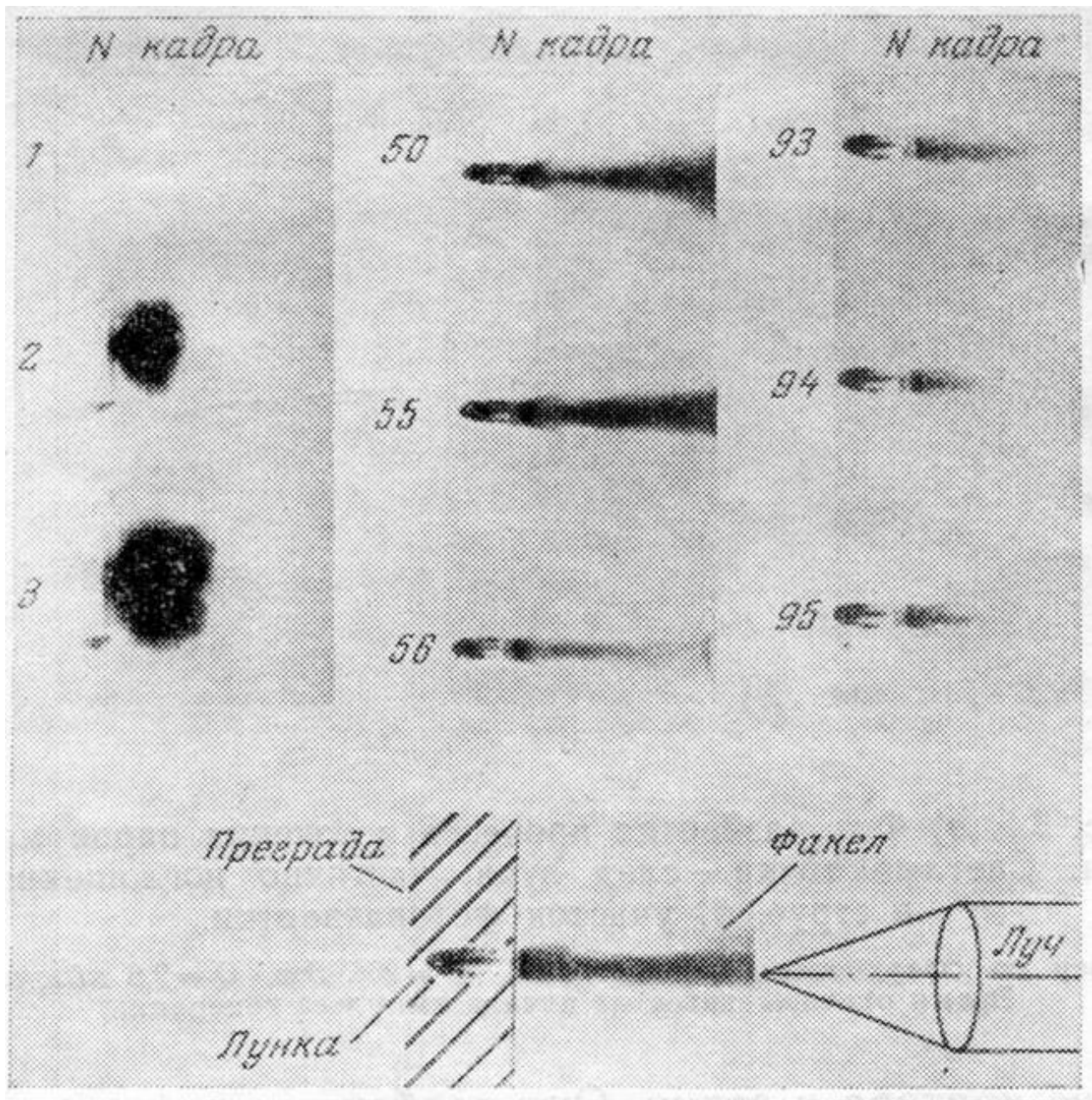


Схема формирования лунки и струи испаренного металла при действии лазерного излучения на магний;
съемка произведена скоростной кинокамерой ФП-22 со скоростью 100000 кадров/с через стеклянную пластинку, приклеенную к образцу, луч фокусировался на границу стекло – металл.
Лазер с параметрами. $W = 130$ Дж, $Q = 65$ кДж/см².

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?

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

Теперь легко можно задать критерий для мощности технологических лазеров.

$$\begin{aligned} \text{Из} \quad & P = qS \quad (3.1), \\ \text{при } 2r_0 = 30 \text{ мкм } (S \approx 10^{-9} \text{ м}^2) \quad & P_{\text{имп}}^{\text{пор}} = 2.9 \cdot 10^3 \text{ Вт}, \quad P_{\text{непр}}^{\text{пор}} = 7.3 \cdot 10^2 \text{ Вт}. \end{aligned}$$

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

$$\boxed{P \approx 10^3 \text{ Вт}}$$

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 и объем материала, подвергнувшегося воздействию, а не на величину (пороговой) 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 $\bar{P}$ (или W) можно обеспечить необходимую степень воздействия при коротких τ ($P_{\text{имп}} \tau = W$ – 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 α (глубина проникновения света $\delta = 1/\alpha$).

3. Длительность воздействия τ

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

Длительность воздействия определяет следующие характеристики процесса:

- пороговую энергию импульса $W_{\text{имп}} = \frac{kT_{\text{и}}}{2A} \sqrt{\frac{\pi}{a}} \sqrt{\tau}$ (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 τ , 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 – насыщающиеся поглотители, примеси в газах,
- **полупроводниковые лазеры** – прямая электрическая модуляция,
другие лазеры – внerezонаторная электромеханическая модуляция
- **СО₂-мощные лазеры** – электромеханическая модуляция (прерыватель – обтюратор, невыгодно по мощности)
пассивная – светофильтры, примеси в смеси газов
- **СО₂-волноводные лазеры** – по питанию (накачка радиочастотным разрядом)
- **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,

- **N₂, Cu, эксимерный лазер** и тому подобные спектрально-люминесцентные свойства среды (самоограниченные верхние переходы – малое время жизни на верхнем уровне), $\tau \sim 10^{-8}$ с

- **CO₂, Ar – непрерывного действия** – сканирование пучка или движение (вращение) объекта со скоростью $V_{ск}$.

- **волоконные лазеры** – электрическая модуляция за счет накачки или накачка импульсными лазерными диодами обеспечивает широкий диапазон τ от $\sim 10^{-7}$ до 10^{-12-15} с.

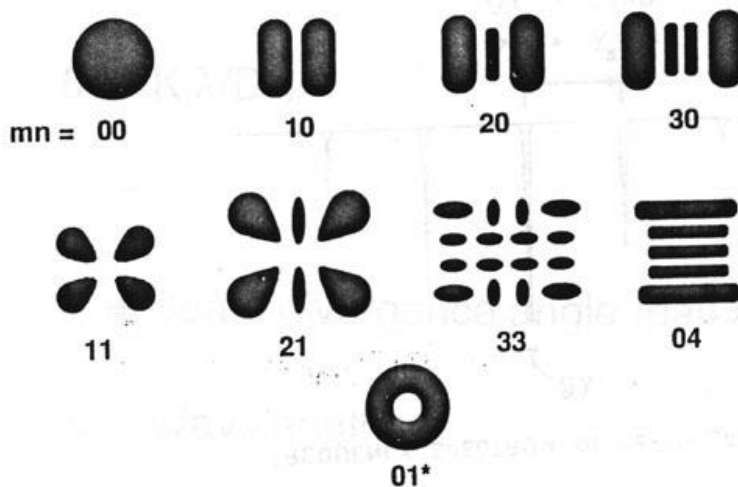
Различные длительности импульса лазеров и варианты их реализации приведены в Таблице 3.1.

Таблица 3.1

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

4. Пространственные характеристики лазерного пучка.

Модовая структура излучения (TEM_{mn})



*Изображения модовой структуры пучков
некоторых низших порядков.*

Угловая расходимость пучка

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

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

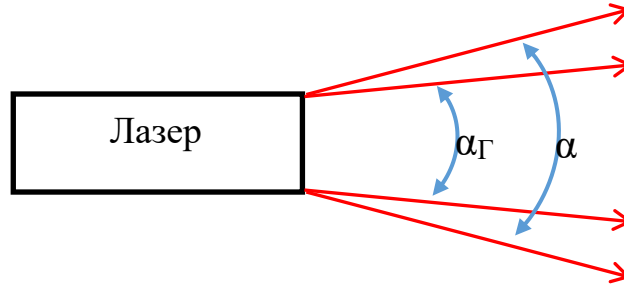
Величины b_d и A_d , и α для разных лазерных пучков приведены в таблице 3.2.

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 α к расходимости того же лазера, если бы он излучал одномодовый Гауссовский пучок, α_Γ :



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

Как известно,

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

где w_0 - радиус пучка в перетяжке.

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

$$\alpha_\Gamma = D_\Gamma / 2f \quad (3.10)$$

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

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

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 $\lambda_m = M^2 \lambda$.

Инвариант Лагранжа-Гельмгольца.

Другой способ характеристики пространственно-геометрических характеристик оптических пучков основан на использовании инварианта Лагранжа-Гельмгольца J , который представляет собой, по сути, закон сохранения энергии для оптических пучков:

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

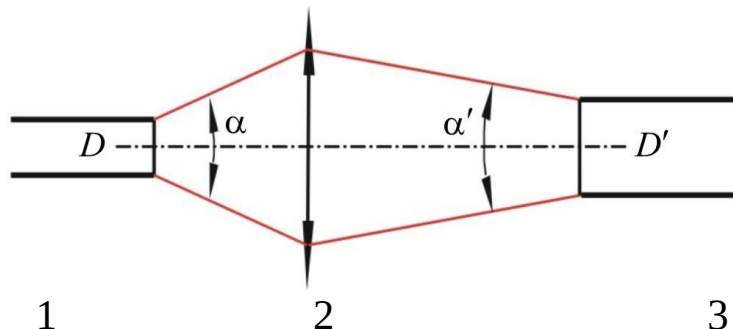


Схема оптической системы, состоящей из функциональных (1, 3) и согласующих (2) компонентов.

Чем меньше значение J , тем выше качество пучка.

Значения инварианта J для некоторых типов лазеров приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3

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

Метод инварианта Лагранжа-Гельмгольца особенно важен при расчете волоконно-оптических систем генерации и доставки лазерного излучения.

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 Φ в результате расщепления лазерного пучка на две части и последующего их сложения после прохождения оптических путей различной длины:

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

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 τ могут излучаться разные ν в пределах $\Delta\nu_{\text{люм}}$. Действительно, если электромагнитные колебания представить в виде $E(\vec{r}t) = E_g(\vec{r})\cos(2\pi\nu t + \varphi(\vec{r}, t))$, то максимальное изменение относительной фазы $\varphi(\vec{r}, t)$ синхронных в момент времени $t=0$ колебаний (с частотами, отличающимися на $\Delta\nu_{\text{л}}$) будет возрастать со

временем до $\Delta\varphi \approx 2\pi\Delta\nu_{\text{л}}t$, и станет равным максимуму 2π через время

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

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 $L_{\text{ког}}$:

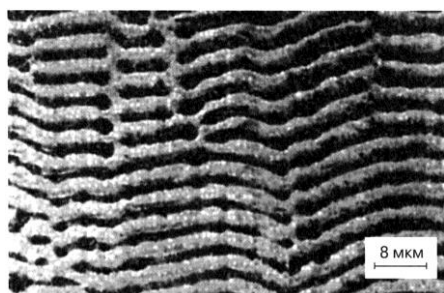
$$L_{\text{ког}} = c\tau_{\text{ког}} = \frac{c}{\Delta\nu_{\text{л}}} \quad (3.15)$$

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.

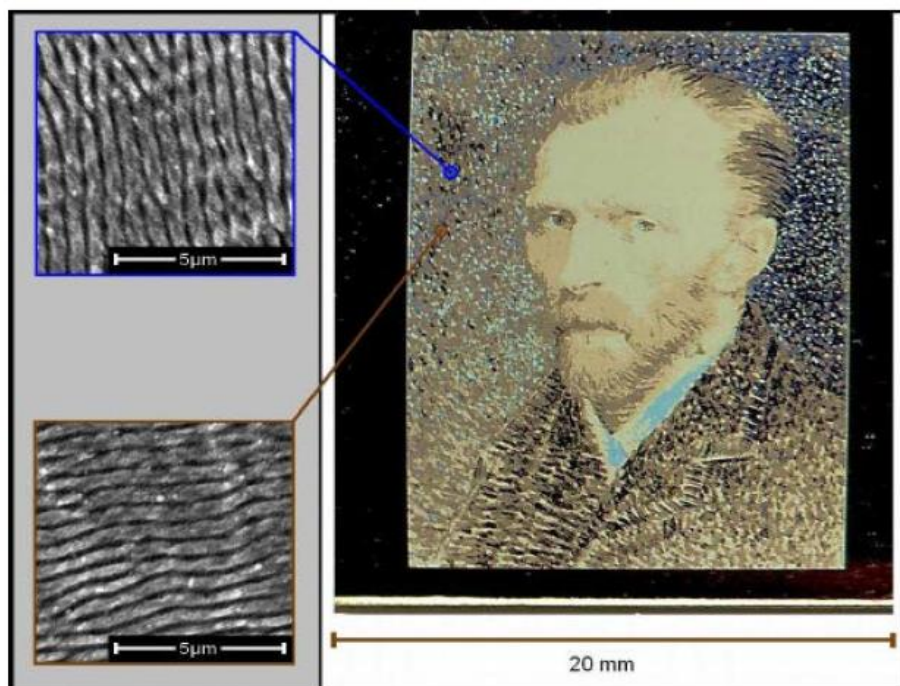
На высокой степени временной когерентности основано использование лазерного излучения в измерительной технике – длин, углов, скоростей, малых перемещений, для передачи информации на оптических частотах и т.п.

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/см² (А.М. Бонч-Бруевич, М.Н. Либенсон)



(a) Цветное изображение на поверхности нержавеющей стали, образованное периодическими поверхностными структурами, сформированными фемтосекундным лазерным излучением.

Изображение (справа) получено с помощью обычного сканера.

(b) SEM-снимки контролируемых периодических наноструктур с различной угловой ориентацией, созданных фемтосекундным лазерным излучением (B. Dusser, 2009).

2. В последнее время все чаще применяются **многолучевые** или многоканальные системы, представляющие собой 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 CO₂-лазеров и т.д. При сложении двух гармонических колебаний с одинаковой частотой (световой) и произвольными амплитудами напряженности электромагнитного поля E_1 и E_2 и фазами φ_1, φ_2 образуются гармонические колебания той же частоты с амплитудой и фазой $E^2 = E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2)$.

Поэтому, если сдвиг фаз $(\varphi_1 - \varphi_2)$ случайный (хаотически изменяющийся), суммарная интенсивность в пятне ($I \sim E^2$) определяется с учетом $\cos \Delta\varphi$ и будет равна сумме интенсивностей всех источников (так как $\cos(\varphi_1 - \varphi_2)$ в среднем за период равен 0)

$I_{\Sigma} = \sum_i I_i$ или, считая $I_i = \bar{I}$ $I_{\Sigma} = N_{\text{л}} \bar{I}$, где $N_{\text{л}}$ – количество отдельных лазеров (каналов) в системе (для двух пучков $I_{\Sigma} = E_1^2 + E_2^2 = I_1 + I_2 = 2I$).

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

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

6. Монохроматичность излучения

Монохроматичность особенно важна для процессов лазерных измерений, локации, связи, навигации, а также лазерной химии, разделения изотопов, медицины, биологии и т.п., кроме того, для создания оптических систем. Она характеризуется способностью лазеров излучать в узком диапазоне длин волн и определяется соотношением

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

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

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

Индукцированное 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 (так как 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 также сказывается 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 ТИПЫ ЛАЗЕРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЛАЗЕРОВ

Таблица 3.4(выделены наиболее актуальные типы лазеров)

Тип лазера	Длина волн ы λ , мкм	Энергия в импульсе W , Дж	Длительность импульса τ , с	Частота повтор. импульсов f , Гц	Угловая расходимость α , мрад	Эффек- тивность (кпд) η , %	Применения, примечания
Nd:YAG, импульсный режим							
Nd:YAG, свободная генерация	1.06	1	10^{-3}	10^2	1-10	1-3	сверление отверстий, резка пластин
Nd:YAG, электрооптическая модуляция,	1.06	10^{-2}	10^{-9}	10^5	1-10	1-5	технологические применения, повышенный КПД
Nd:YAG, электрооптическая модуляция,	1.06	1	10^{-9}	10-100	1	≤ 1	измерительные применения, технология, медицина
Yb:YAG дисковые лазеры							
Yb:YAG электрооптическая модуляция	1.03	$80 \cdot 10^{-3}$	$10^{-8} - 10^{-13}$	$8 \cdot 10^5$	$M^2 < 1.2$	-	для резки, сверления, обработка тонких пленок

Тип лазера	Длина волны λ , мкм	Мощность (непр.) P , Вт	Угловая расходимость α , мрад	Эффек- тивность (кпд) η , %	Применения, примечания
Yb: YAG непрерывное излучение					
Nd:YAG, ламповая накачка	1.06	10-2000	1-10	$\geq$	доступна большая мощность
Yb:YAG, диодная накачка	1.06	>10 кВт	1-10	10	до 10 кВт в исследованиях
Yb:YAG дисковые лазеры (непрерывное излучение)					
Yb:YAG, диодная накачка	1.03	>16 кВт	8	-	технологические применения, волоконный выход,

Характерные параметры технологических лазеров

Таблица 3.4 (продолжение 1)

Тип лазера	Длина волны λ , нм	Мощность (непр.) P , Вт	Качество пучка M^2	Эффективность (кпд) η , %	Применения, примечания
Волоконные лазеры, непрерывное излучение					
Yb-волоконный лазер	1064	10Вт-100кВт	-	25-30	доступная большая мощность
Yb-волоконный лазер, 2-я гармоника	515, 532 535	15	1,05	8-10	обработка материалов, медицинские приборы
Er-волоконный лазер	1530 - 1600	2 кВт	1,1	10	безопасный для глаз спектральный диапазон, дальномеры
Ti- волоконный лазер	1800-2100	500	1,1	20	медицинские приборы, экологический мониторинг, научное приборостроение

Тип лазера	Длина волны λ , нм	Энергия в импульсе W , Дж	Длительность импульса τ , с	Частота повтор. импульсов f , кГц	Мощность (непр.) P , Вт	Качество пучка M^2	Эффективность (кпд) η , %	Применения, примечания
Волоконные лазеры, импульсный режим и ультракороткие импульсы								
Yb-волоконный лазер	1064	до 0,1 много-модовый	$\sim 10^{-7}$	1,6 Гц-1 МГц	1000	$\sim 1,1$	20	гравировка маркировка микро-обработка прецизионная резка научное приборостроение
Yb-волоконный лазер	1064	10^{-5}	10^{-14}	10^5	20	$\sim 1,1$	20	гравировка, маркировка, прецизионная резка

Характерные параметры технологических лазеров

Таблица 3.4 (продолжение 2)

Тип лазера	Длина волны λ , мкм	Энергия в импульсе W , Дж	Длительность импульса τ , с	Частота повтор. импульсов f , Гц	Угловая расходимость α , мрад	Эффективность (кпд) η , %	Применения, примечания
CO₂, импульсный режим							
CO₂ с радиочастотной накачкой	10.6	5·10⁻²	10⁻⁴	100-2500	4	≤10	квази-непрерывный
CO ₂ -щелевой	10.6		3·10 ⁻⁵ 5·10 ⁻⁴	100-5000	3 4	≤10	слабо представлен на рынке
CO ₂ -TEA	10.6	0,1-1	10 ⁻⁶ 10 ⁻⁷	300-1000	3	≤10	сверление отверстий, лидарная техника

Тип лазера	Длина волны λ , мкм	Мощность (непр.) P , Вт	Угловая расходимость α , мрад	Эффективность (кпд) η , %	Применения, примечания
CO₂, непрерывный режим					
CO ₂ , с медленной продольной прокачкой	10.6	100-1000	1	10	резка и обработка стекла

Тип лазера	Мощность (погонная)	Применения, примечания
CO₂, высокой мощности		
С медленной продольной прокачкой, диффузное охлаждение, многолучевой	до 3 кВт/м	обычно не используется для точного формообразования
С быстрой продольной прокачкой, конвективное охлаждение	до 5 кВт/м	
С поперечной прокачкой, конвективное охлаждение	до 100 кВт/м	
Газодинамический, конвективное охлаждение	более 100 кВт/м	

Характерные параметры технологических лазеров

Таблица 3.4 (продолжение 3)

Тип лазера	Длина волны λ , км	Энергия в им-пульсе W , Дж	Длительность им-пульса τ , с	Частота повтор. импульсов f , Гц	Угловая расходимость α , мрад	Эффективность (кпд) η , %	Примечания, применения
Другие твердотельные лазеры							
Рубиновый	0.69	0.1-1.0	10^{-3} - 10^{-7}	10	1-10	≥ 1	применяются в офтальмологии спектроскопии
Ti:сапфир	0.6-1.1	$350 \cdot 10^{-6}$	10^{-13}-10^{-14}	10^7	0.5	< 1	технологии будущего (высокое качество)

Тип лазера	Длина волны λ , км	Мощность P , Вт	Частота повтор. импульсов f , Гц	Угловая расходимость α , мрад	Эффективность (кпд) η , %	Примечания, применения
Основные полупроводниковые лазеры						
GaAs	0.635-0.95	10 мВт-20 Вт (P_n до 100 Вт) (stacks 5 кВт)	10^3	250x150	> 10	информационные технологии
InP	1.1-2.0	10-100				информационные технологии
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	Энергия в импульсе	Длительность импульса	Частота следования импульсов	Мощность (непр.)	Угловая расходимость	Эффективность (кпд)	Применения, примечания
	λ , мкм	W , Дж	τ , с	f , Гц	P , Вт	α , мрад	η , %	
Экимерные								
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							
Газовые лазеры								
На парах меди	0.51-0.57	10^{-3}	10^{-8}	10^4	-	1	1	обраб. пленок, микроскопия
На ионах Ar	0.50	-	-	-	20	0.5-1	<1	стереолитография
N ₂	0.34	10^{-3} - 10^{-4}	10^{-8}	10^4	0.1	~1	<1	обработка пленок
He-Cd	0.44	-	-	-	0.1	0.5	~1	стереолитография
He-Ne	0.63	10^{-6} - 10^{-3}	$\sim 10^{-7}$	10^3		0.2-1	<1	измерения, голография

3.5. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЛАЗЕРОВ

Таблица 3.5

Новые спектральные диапазоны	Высокая мощность	Короткие импульсы
Экимерные лазеры глубокого УФ	Волоконные лазеры (с полупроводниковой накачкой) - до 100 кВт и более	Лазеры Ti:сапфир (до 10^{-18})
Рентгеновские лазеры (синхротроны 3,4 по- коления), в том числе настольные рентге- новские лазеры мягкого и жесткого рентгеновского диа- пазон.	Nd:YAG (с диодной накачкой) до 1 МВт	Экимерные лазеры (до 10^{-15} , высокая мощность)
Лазеры на красителях (видимый диапазон)	CO ₂ -лазеры	Лазеры на стекле с Nd (до 10^{-12} , максималь- ная мощность)
Лазеры на свободных электронах терагерцы (FIR) и др.		
Надежность, высокая стабильность параметров, компьютерное управление, возможность снижения себестоимости		

3.6. ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ВАЖНЕЙШИХ ТИПОВ ЛАЗЕРОВ

Волоконные:	промышленность, медицина, оптическая связь,
Полупроводниковые:	оптическая связь, хранение информации, печать, сканеры, юстировка, датчики, научные исследования, медицина
Твердотельные (Nd:YAG):	обработка материалов, датчики, спектроскопия, научные исследования
CO₂-лазеры:	обработка материалов, медицина, научные исследования
Экцимерные:	микроэлектроника, медицина, научные исследования
Ионные лазеры (Ar):	печать, датчики, развлечения, обработка материалов, научные исследования, стереолитография
На парах металлов (Cu):	научные исследования, обработка материалов
He-Ne:	сканирование, измерения, датчики, юстировка, голография, научные исследования
На красителях:	спектроскопия, научные исследования

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.
- Высокая яркость, и
- Высокая плотность мощности, что наиболее важно в лазерных технологиях обработки материалов.

Доминируют СО₂-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

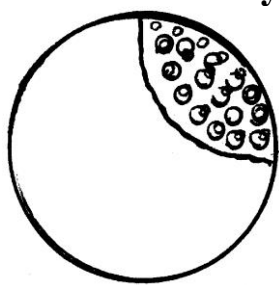
Средней мощности (от 100 до 3000 Вт на метр)

- 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

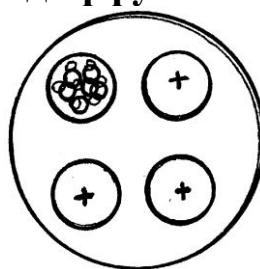
Большой мощности (>3 кВт на метр), коммерческое исполнение до 25 кВт

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

Многолучевые СО₂-лазеры с диффузным охлаждением

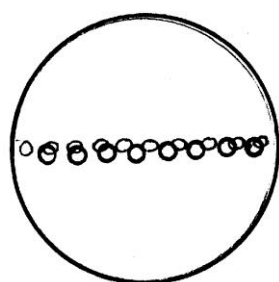


МТЛ-2
61 трубка
2.5 кВт
МТЛ-4
85 трубок
4.0 кВт
 $M^2 \sim 3$, длина
1.7 м

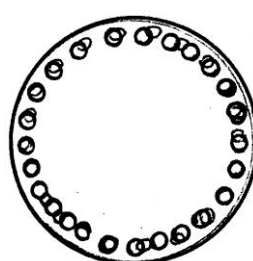


ТЛ-6
 $31 \times 4 = 124$
трубки
6.0 кВт
 $M^2 = 3$
 $L = 2$ м

Многоканальные однолучевые



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



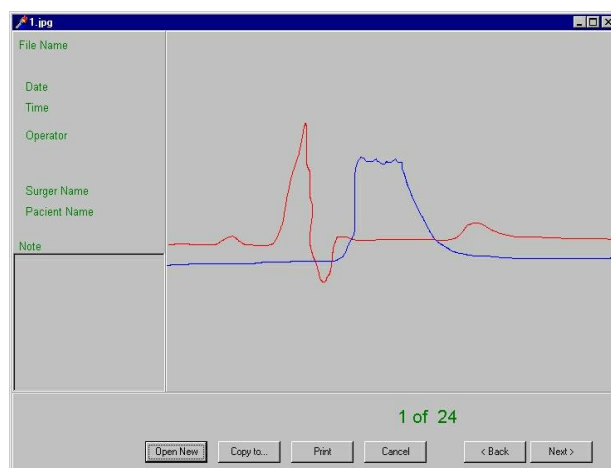
ТЛ-1000
20 трубок
 TEM_{00}
1 кВт
 $M^2 = 1$
 $L = 2$ м

Трансмиокардиальная лазерная васкуляризация (вместо аутокоронарного шунтирования)



десятки каналов

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



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

Твердотельные лазеры. Преимущества

- высокая удельная мощность,
- высокое качество при большой мощности (TEM_{00}),
- высокий КПД (с диодной накачкой) $> 20\%$,
- большая энергия (до кДж/импульс),
- широкий диапазон длин волн,
- широкий диапазон длительностей импульсов (от 10^{-2} до 10^{-15} с),
- совместимость длин волн с оптическим волокном,
- возможность получения генерации в волокнах и высокие характеристики этих лазеров,
- большая яркость,
- высокая надежность.

Основные виды твердотельных лазеров

- Nd:YAG - 1.06, 0.53, 0.355, 0.266 мкм,
- Nd:стекло - 1.06, 0.53, 0.355, 0.266 мкм,
- Er:стекло - 1.54 мкм, 3,2 мкм,
- Рубиновый - 0.63 мкм,
- Ti:сапфир - 0.66-0.98 мкм,
- Cr-BeAl₂O₄ (александрит) - 0.72-0.78 мкм.

Доминируют YAG:Nd

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

Мощность непрерывного излучения
(с диодной накачкой):

1 мВт – 1 кВт TEM₀₀

Мощность в импульсе (с ламповой накачкой):

до 100 Дж в мс импульс и до 1,4 Дж в нс

Мощность в импульсе (с диодной накачкой):

до 20 мДж в нс импульсе, десятки мкДж при 104 Гц

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

Другие легирующие примеси: Er: YAG (3,2 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,

спектроскопия, дистанционное зондирование,

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 ₂ O ₃	Синхронизация мод	10^{-13} - 10^{-15}

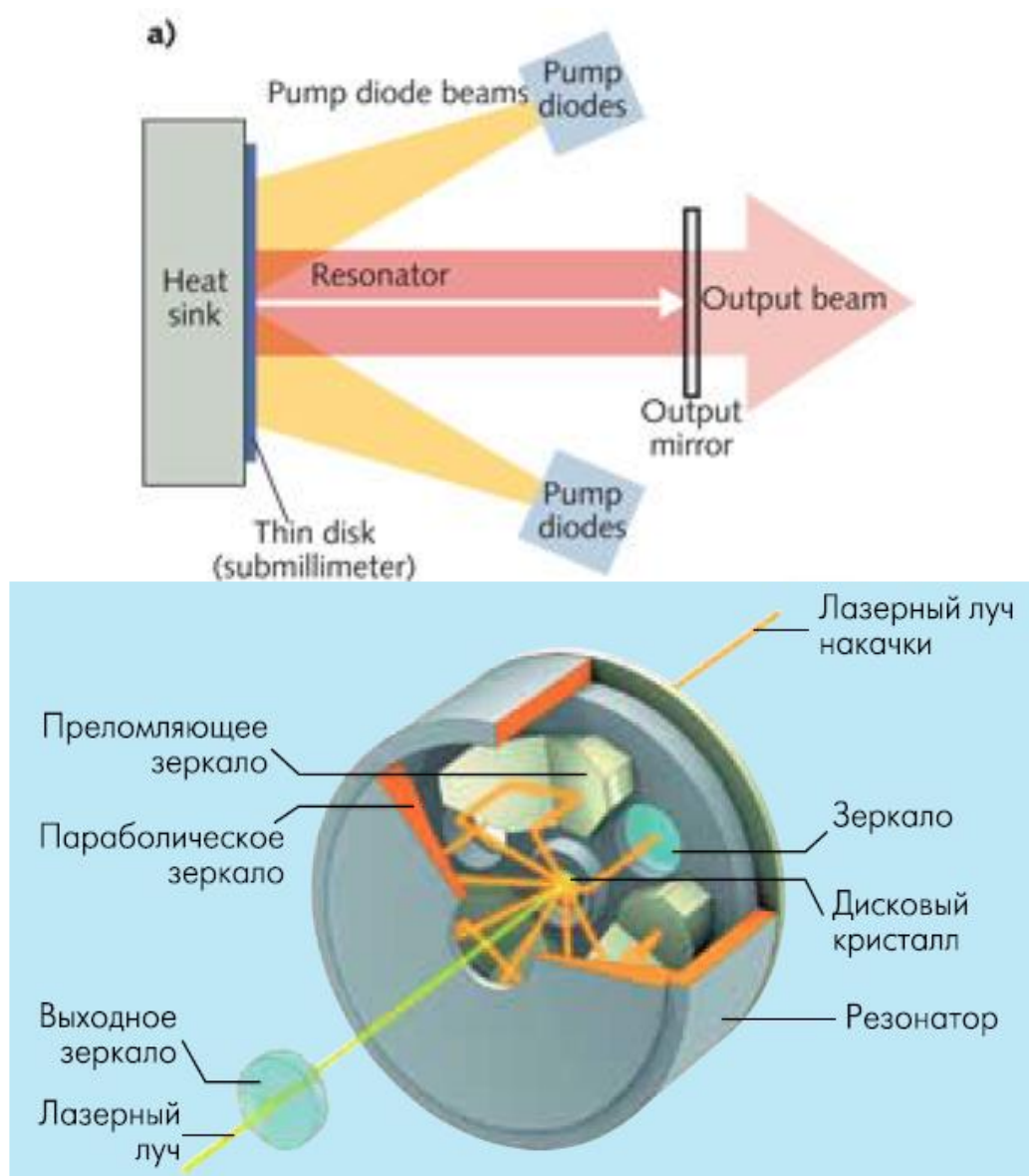
Основные параметры твердотельных лазеров с регулируемой длиной волны приведены в таблице 3.7

Таблица 3.7

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

Дисковые лазеры

Геометрия активной среды лазерного источника сильно влияет на энергетические и спектральные параметры формируемого лазерного пучка и в целом на надежность и стабильность работы лазера. Одной из альтернатив мощным непрерывным волоконным лазерам являются дисковые лазеры. За счет большой площади поверхности диска в сравнении с его объемом в этих лазерах достигается эффективное охлаждение активной среды, благодаря чему возможно получить высокую среднюю мощность излучения (более 10 кВт).



*Принципиальные схемы построения дисковых лазеров
(мощность в непрерывном режиме до 16 кВт)*

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 в смысле оптического качества излучения 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 фс) импульсов излучения с большой частотой (20 кГц и более),
- возможность масштабирования их энергетических параметров - рекордно большие мощности излучения - до 50 кВт и более,
- эффективность генерации на многих длинах волн (1.06 мкм (Nd, Yt), 1.56 мкм (Er), 1.75-2.0 мкм (Tm) 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)

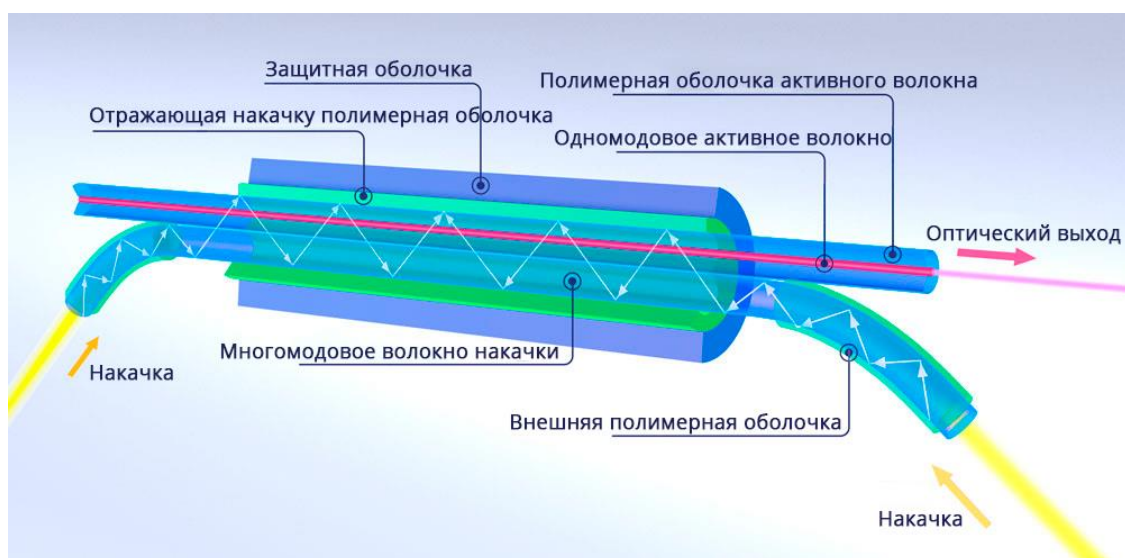
Основные характеристики:

Непрерывный режим

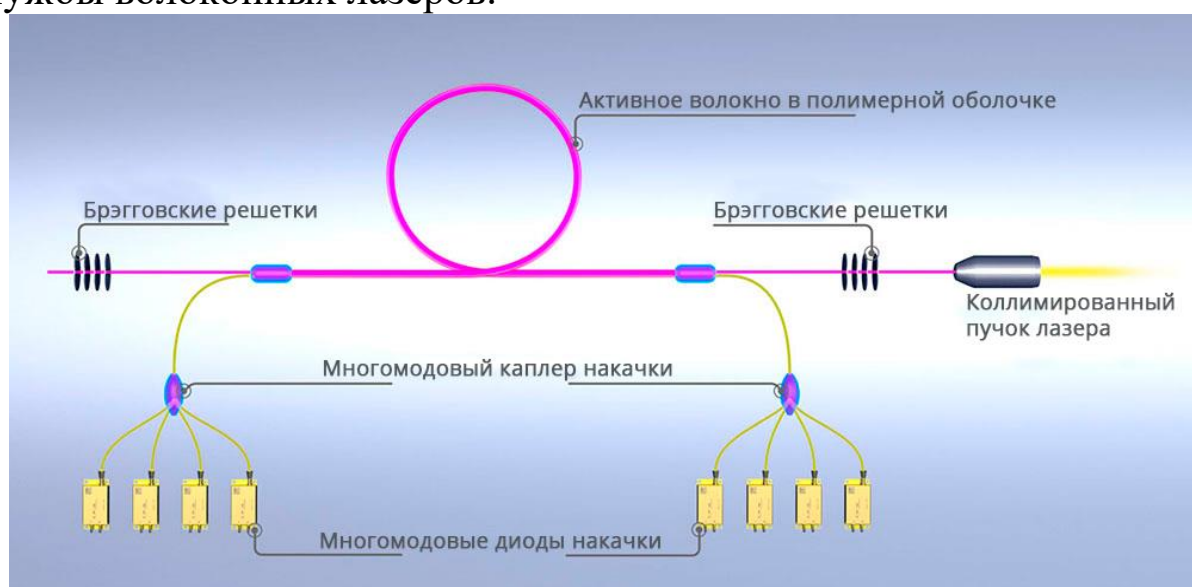
- выходная мощность - до 100 кВт;
- возможна модуляция выходного излучения с частотой 5 кГц;
 - КПД - 25 - 30 %;
- выход - волокно 50-200 мкм;
- качество пучка - $M^2 = 2.5 - 6$ мрад;
- срок службы - > 100000 часов;
- габариты - 86x81x150 см;
- вес - 100 кг при 10 кВт.

Импульсный режим

- средняя выходная мощность – до 200 Вт;
- длительность импульса – 4–200 нс;
- энергия в импульсе – до 50 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 %.



Техника боковой накачки для передачи энергии лазерного диода в тонкую сердцевину (одномодового) волокна для усиления света (IPG-photonics). Данная схема накачки активной среды (одномодового легированного редкоземельными ионами волокна) обеспечивает высокий КПД, надежность, качество пучка и срок службы волоконных лазеров.



Типичная конструкция волоконного лазера с торцевой накачкой.

В качестве резонатора лазера выступают Брэгговские решетки, записанные непосредственно в волокне, ввод излучения накачки от лазерных диодов осуществляется через волоконное соединение, в качестве активной среды выступает волокно, легированное редкоземельными ионами. Все это обеспечивает высокую стабильность и надежность: отсутствуют юстируемые компоненты и эффект термолинзы в активной среде, характерный для твердотельных лазеров.

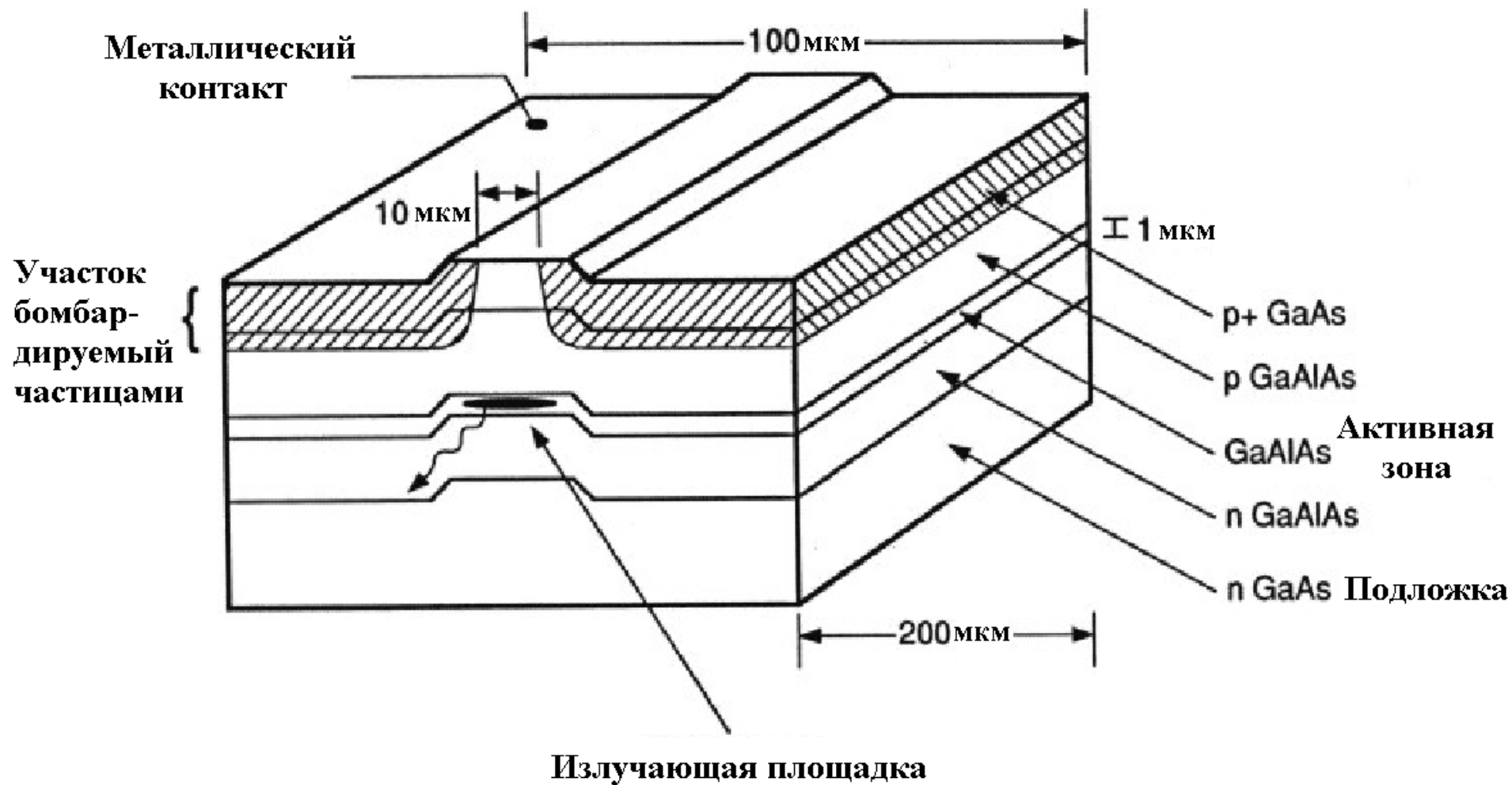
Полупроводниковые лазеры

1. Лазеры на гетероструктурах – основной тип лазера для технологических целей в настоящее время. В этих устройствах слой материала с более узкой запрещённой зоной располагается между двумя слоями материала с более широкой запрещённой зоной (рис. ниже). Такие лазеры имеют высокую эффективность до 74% и мощность более 20 Вт. Область применения – создание мощных полупроводниковых лазеров стеков и матриц для прямой лазерной обработки материалов, лазерной накачки твердотельных и волоконных лазеров, для работы в ВОЛС.

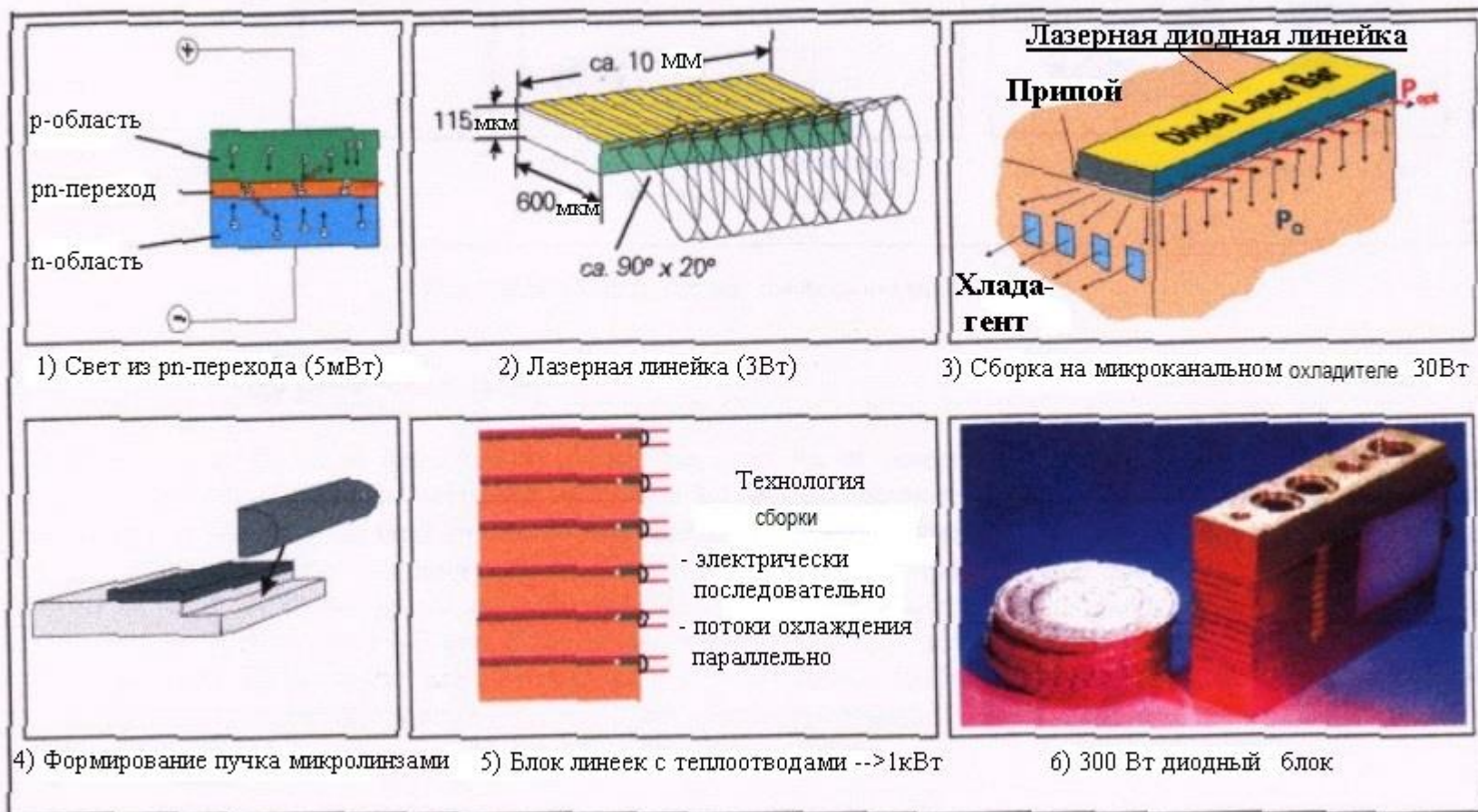
2. Вертикально излучающие лазеры (VCSEL), разновидность диодного лазера, излучающего свет в направлении, перпендикулярном поверхности кристалла, основаны на использовании вертикальных оптических микрорезонаторов с зеркалами в виде распределённых брэгговских отражателей. Основными достоинствами являются малая угловая расходимость и симметричная диаграмма направленности выходного оптического излучения. Область применения – ВОЛС, оптические компьютеры.

3. Лазеры на квантовых точках – полупроводниковые лазеры, которые используют в качестве активной лазерной среды квантовые точки в их излучающей области. Такие лазеры обеспечивают усиление в большем спектральном диапазоне, имеют более низкий порог плотности тока и меньшую температурную зависимость порогового тока. Область применения – системы передачи и обработки информации, ВОЛС.

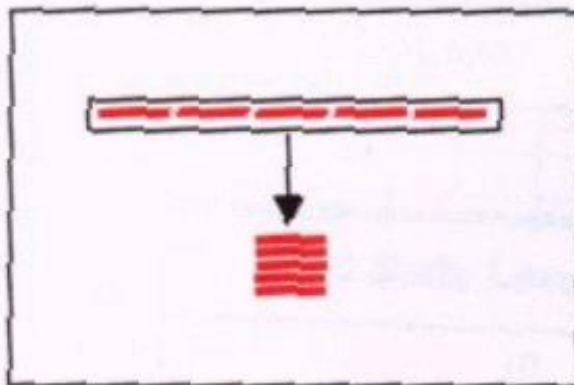
4. Квантово-каскадные лазеры (QCL) работают на внутризонных переходах электронов в зоне проводимости. Такие лазеры формируются как последовательность специально спроектированных в процессе роста структуры эпитаксиальных слоев. Лазеры типа QCL не имеют каких-то фундаментальных ограничений на верхнюю граничную длину волны излучения. Получены длины волн от 2,6 до 250 мкм. Область применения – сенсорная техника – детекторы жидкостей и газов, терагерцовая техника.



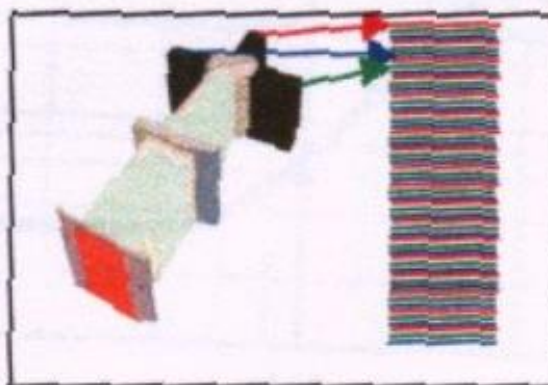
Стандартная конструкция полупроводникового лазера на гетероструктуре (F. Bachman)



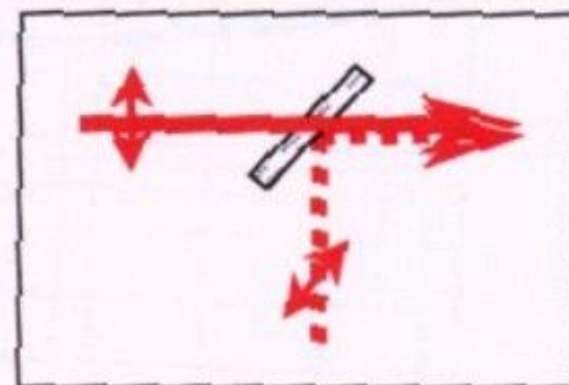
От диода к мощному лазеру (F. Vachman)



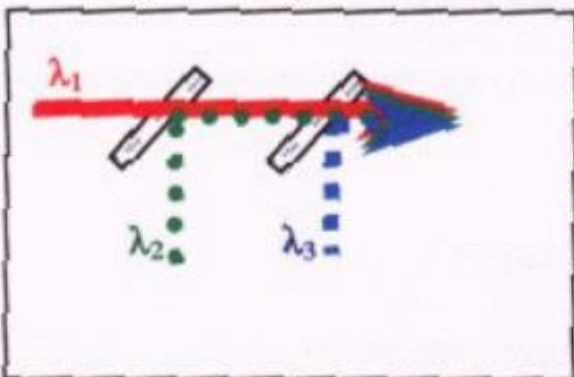
1) Перестройка в линейке:
выравнивание расходимостей:
элемент наклона пучка,
ступенчатое зеркало



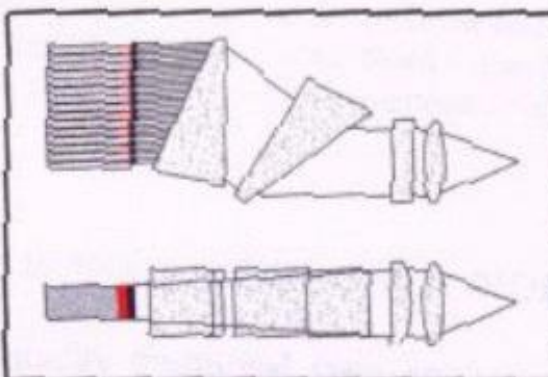
2) Комбинация наборов
(полосатое зеркало)



3) Поляризационное соединение



4) Волновое соединение

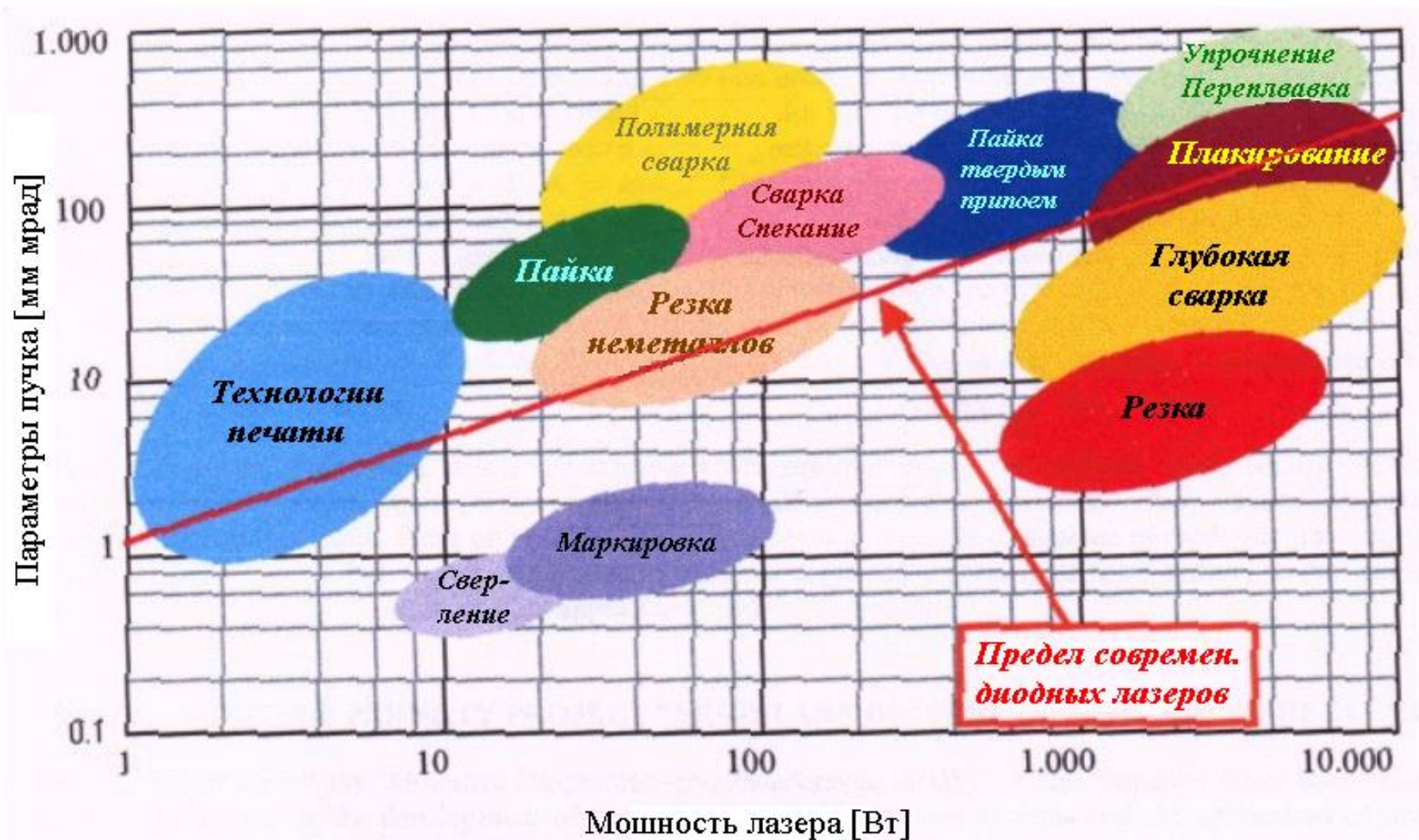


5) Сжатие и фокусировка пучка,
сопряжение с волокном



6) Лазерные системы с волокном и без

Перестройка, комбинация и формирование пучка (F. Vachman)



Параметры лазерного пучка при обработке материалов (F. Bachman)

Преимущества:

- Высокий КПД ($\approx 74\%$)
- Малые габариты
- Большая мощность (до 2 кВт -1999
5 кВт - 2000, 10 кВт - 2018)
- Совместимость длины волны с оптическим волокном
- Длины волны 400-980 нм
- Малое время включения-выключения
- Удобство управления
(временными характеристиками включительно);

Недостатки

- Низкое качество излучения
-высокая и асимметричная расходимость
классического лазера на гетероструктурах

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:

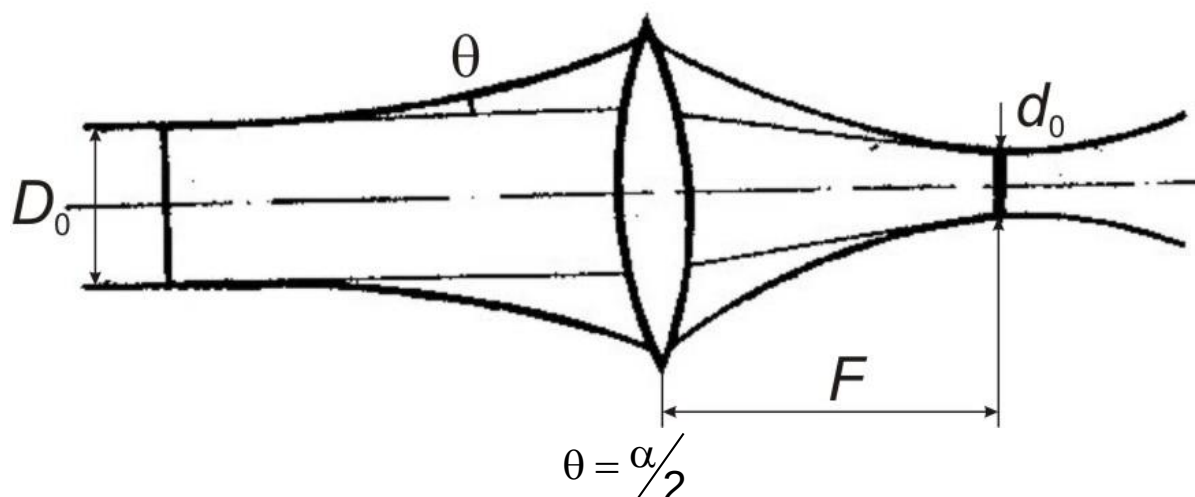
как перекрыть полную рабочую зону посредством сканирующих оптикомеханических систем или проекционных оптических систем с приемлемой точностью, производительностью и самым простым путем

Оптические системы могут основываться на прямом анализе свойств лазерных пучков и на моделях лазерных источников. Первый подход приводит к **адаптивной оптике**, второй – к **«модельной»**.

4.1. ФОКУСИРУЮЩИЕ СХЕМЫ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

Основные пространственно-геометрические модели лазерных источников

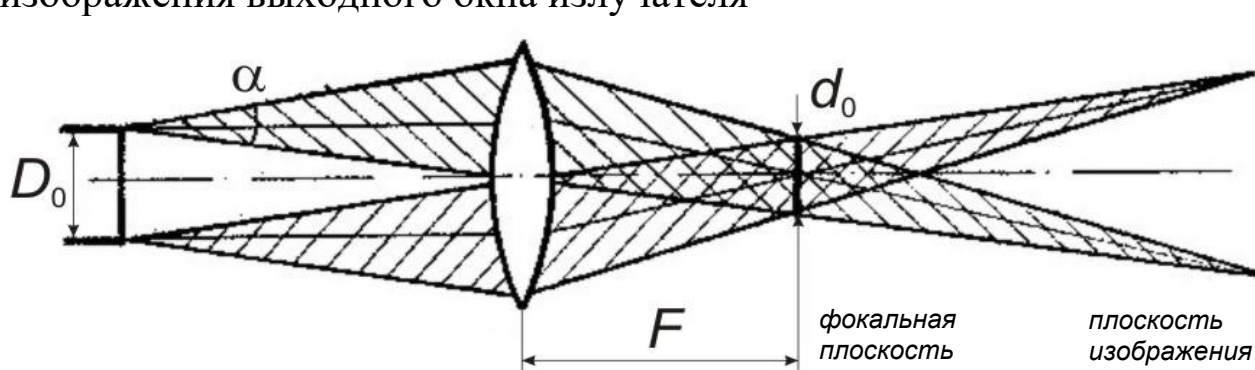
Гауссова модель лазерного источника (одномодовый режим)



в перетяжке $d_0 = 2\omega_0$

Телецентрическая модель лазерного источника (многомодовый режим) :

оси всех пучков $\parallel$ оптической оси, все направления внутри α равноценны; лучи, $\parallel$ оптической оси, пересекаются в фокусе, лучи, $\parallel$ между собой, в различных точках фокальной плоскости в зависимости от угла наклона к оси, лучи, исходящие из некоторой точки источника, пересекаются в сопряженной точке в плоскости изображения выходного окна излучателя



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

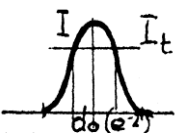
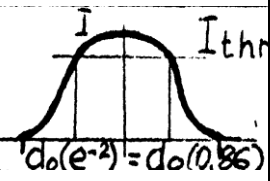
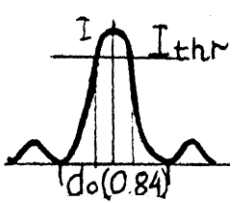
теоретические пределы: $d_0 = \lambda F / D \approx \lambda$; $L \approx 2d_0^2 / \lambda \approx 2d_0$

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 расхо- димости пучка $\alpha = 2\theta$	Фокаль- ный диаметр пятна $d_0 = \alpha F$	Распре- деление интен- сивности 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 цен- тральном 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 $q > q_n$?

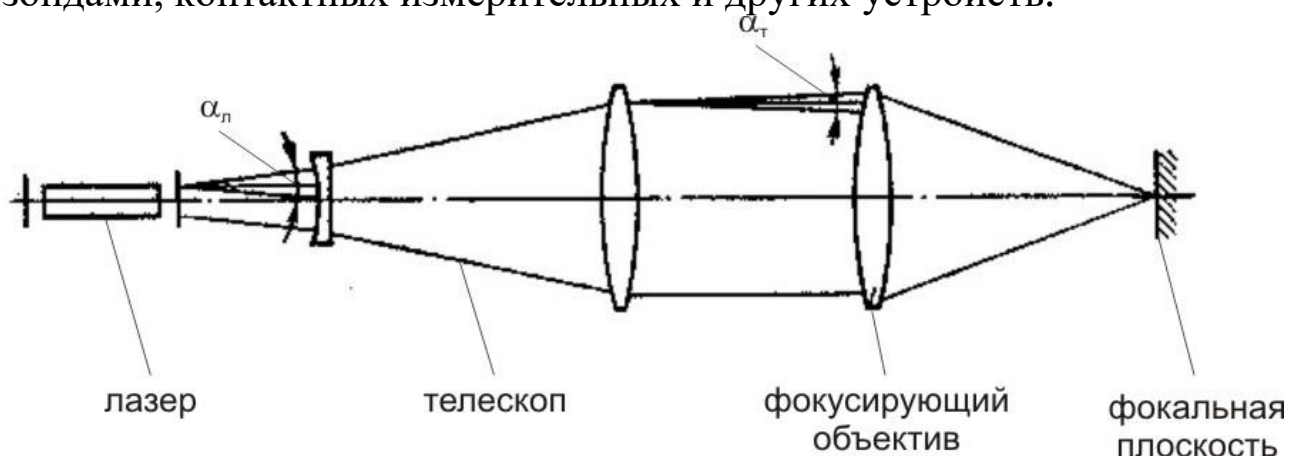
Ответ смотрите далее

Достоинства и недостатки фокусирующей техники

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

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

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.



*Схема уменьшения размера фокального пятна
с помощью телескопической системы*

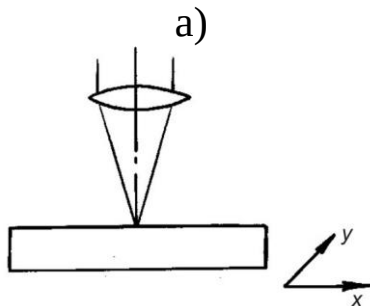
Основные недостатки фокусирующей техники:

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

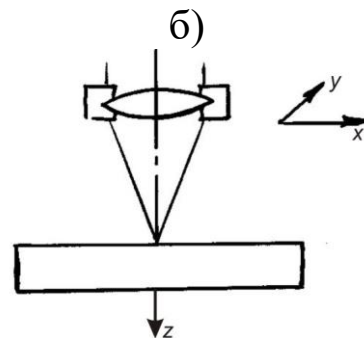
4.2. СКАНИРУЮЩИЕ СИСТЕМЫ А-ТИПА ДЛЯ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

А-тип: поверхность обработки расположена в фокальной плоскости линзы

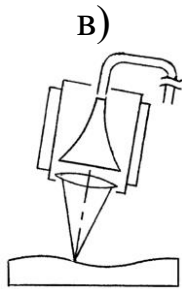
(сканирование с прямоугольной разверткой)



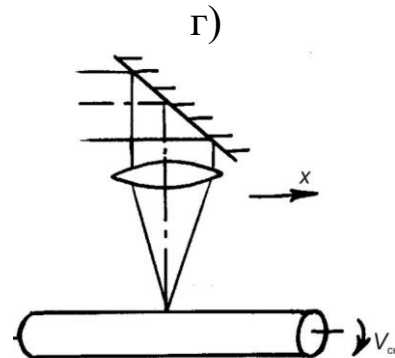
2-х мерное сканирование
(координатный стол)



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

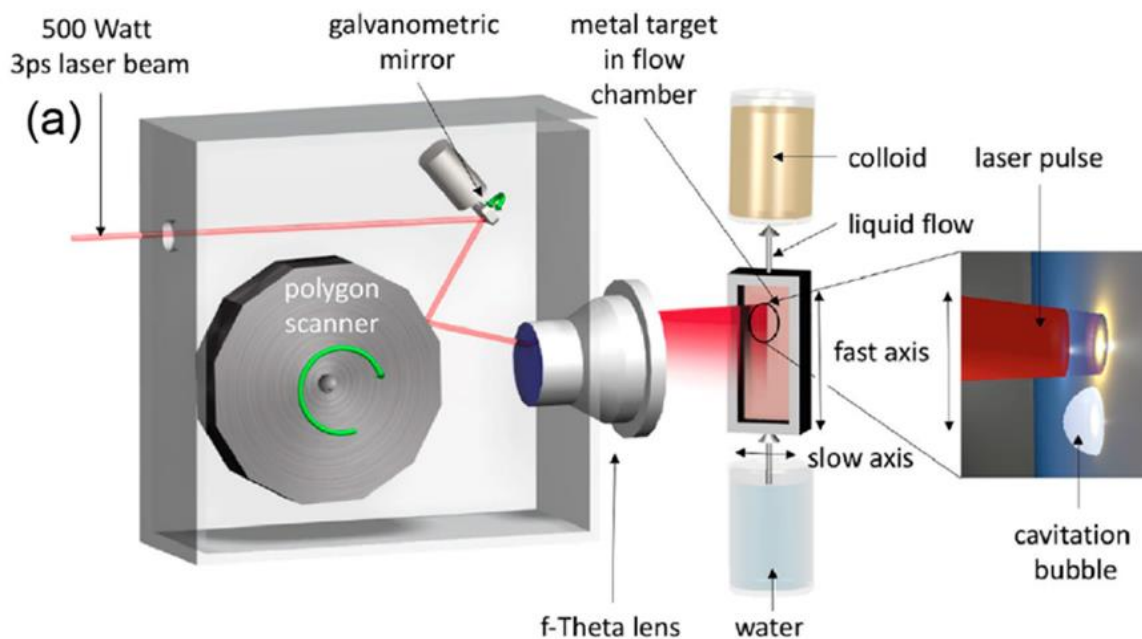


5- координатная (x, y, z, φ, ψ)
роботизированная
микрообработка (волоконно-
оптический кабель в «руке»
робота)



2-х мерная развертка
(офсетная печать)

Примеры комбинированных сканирующих систем



Пример комбинированной оптической системы для обработки поверхности с гальванометрическим сканатором и полигонным сканером. (Barcikowski, 2016).

Схемы сканирующих систем А-типа



Пример комбинированной оптической системы для обработки поверхности с полигонным сканером и координатным столом (Next Scan Technology)

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:

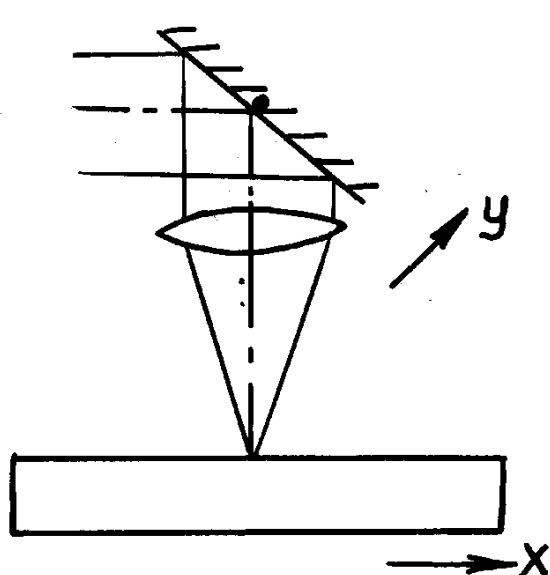
$$\frac{P}{V_{\text{ск}}} = hd_0 L_{\text{и}} = \text{const} = B \quad (4.2)$$

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.

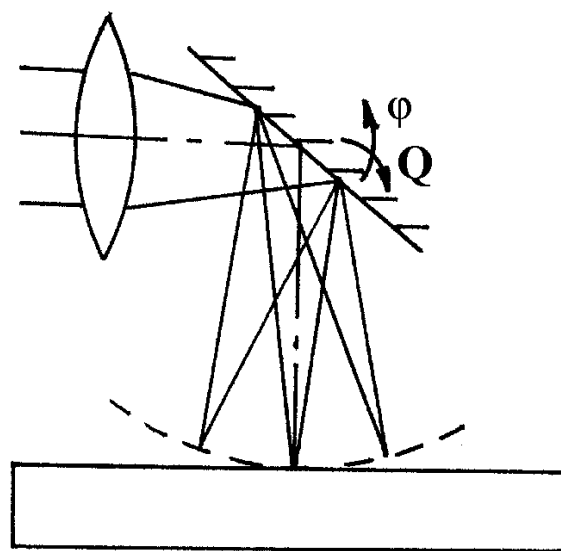
Таким образом, только импульсно-частотные лазеры могут обеспечить условие (4.2), т.е. Постоянную плотность потока мощности в обрабатываемой зоне и стабильное качество лазерной микрообработки.

Сканирующие системы Б-типа для лазерной обработки

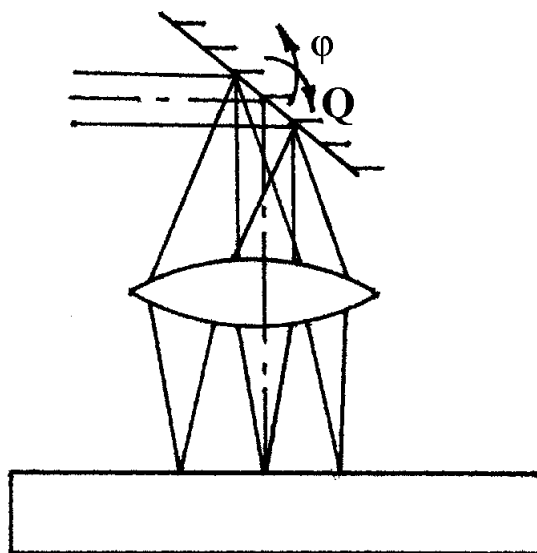
**Б-тип: только центральная точка обрабатываемой поверхности
находится в фокальной плоскости линзы
(сканирующие системы с угловым отклонением пучка)**



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, Ω) параметров**

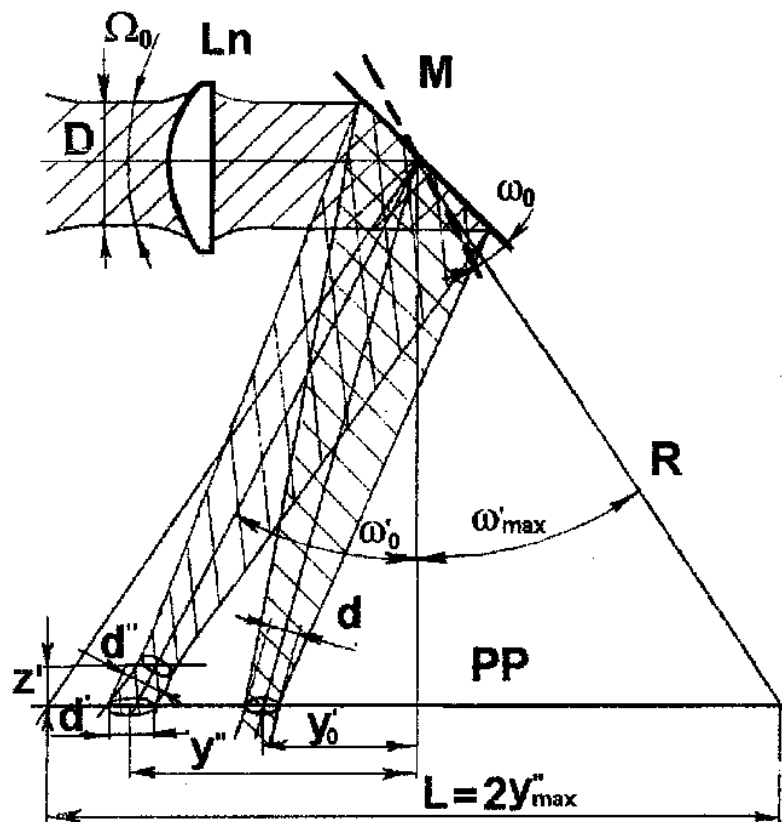


Схема хода лучей в сканирующей системе Б-типа

Инвариант Лагранжа-Гельмгольца J

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

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

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

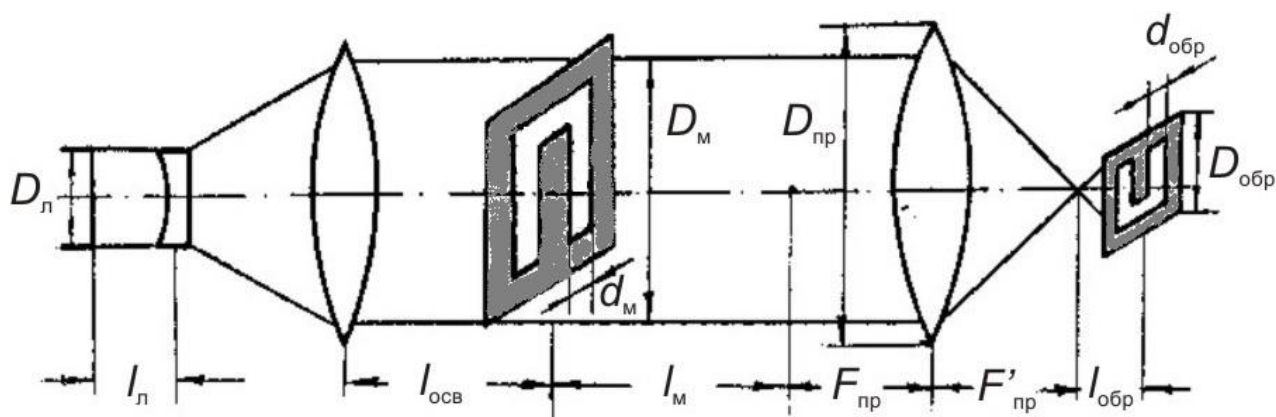
$$\Delta = \left(\frac{LI}{4Dd}\right)^2 \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{LI}{4Dd}\right)^2 (D/d)^2 \right] \quad (4.6)$$

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

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

Микропроеекционный метод



Оптическая схема микропроеекционной 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)

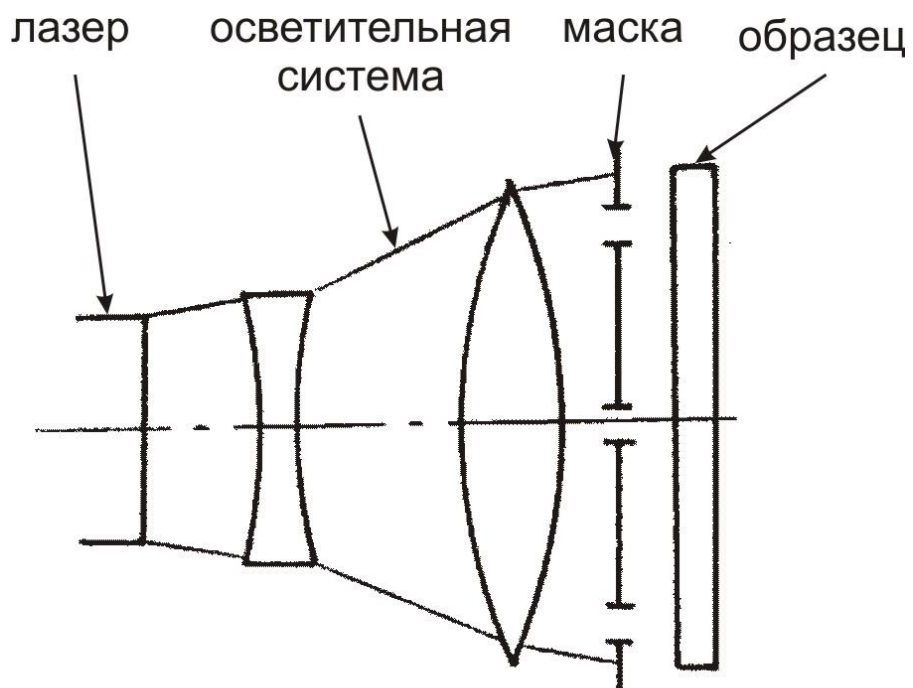
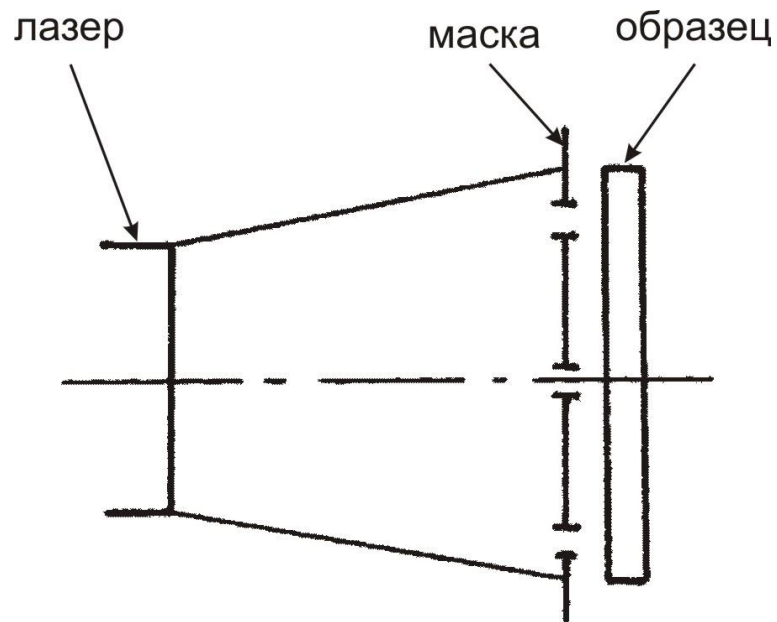
$$Q_{\text{м}} = \frac{Q_{\text{л}}}{\beta_{\text{осв}}^2}$$

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

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

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.

**Контактная (теневая) схема
(упрощается оптическая схема)**



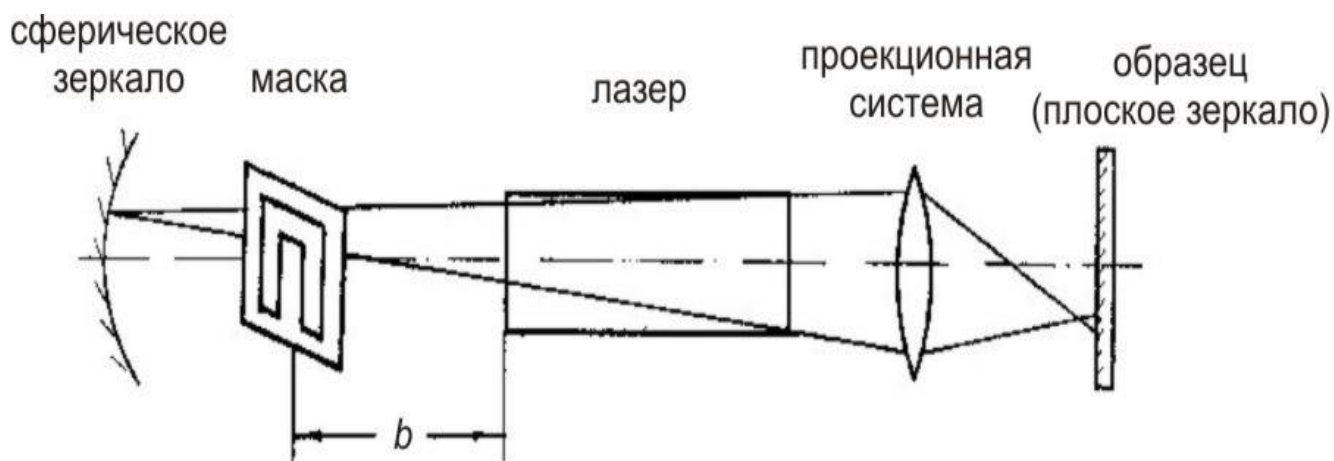
*Оптические схемы контактных (теневых) методов
формирования изображения*

$$\beta_{\text{пр}} = 1, Q_{\text{л}} = Q_{\text{м}} = Q_{\text{обр}}$$

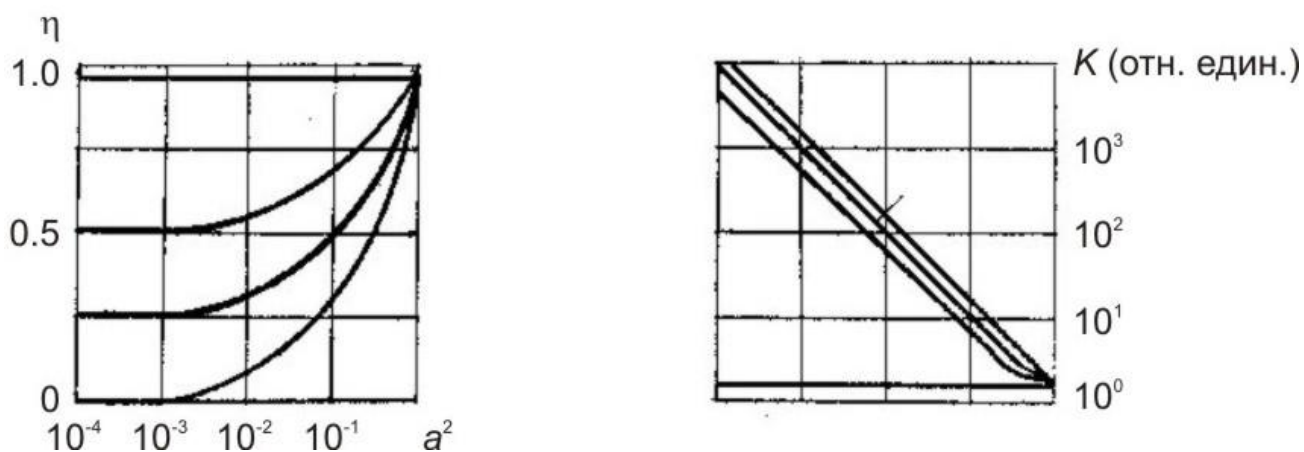
$$Q_{\text{м}}^{\text{пор}} > Q_{\text{обр}}^{\text{пор}}$$

Активный проекционный метод

Минимизируются потери энергии на маске и стабилизируются условия формирования рисунка)



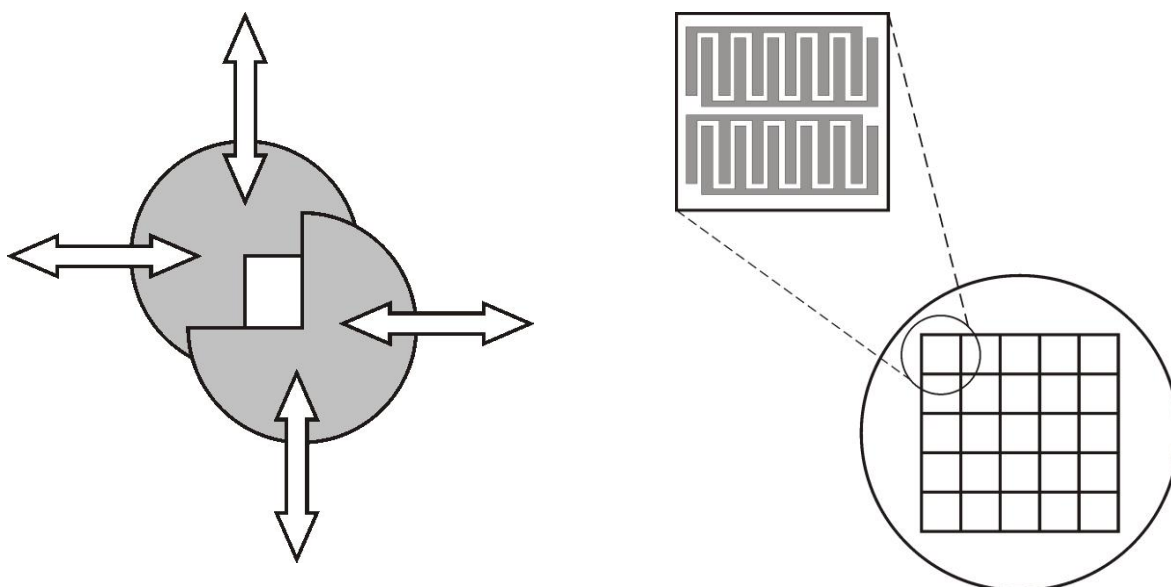
Принципиальная схема активного проекционного метода



Энергетическая эффективность η , 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.

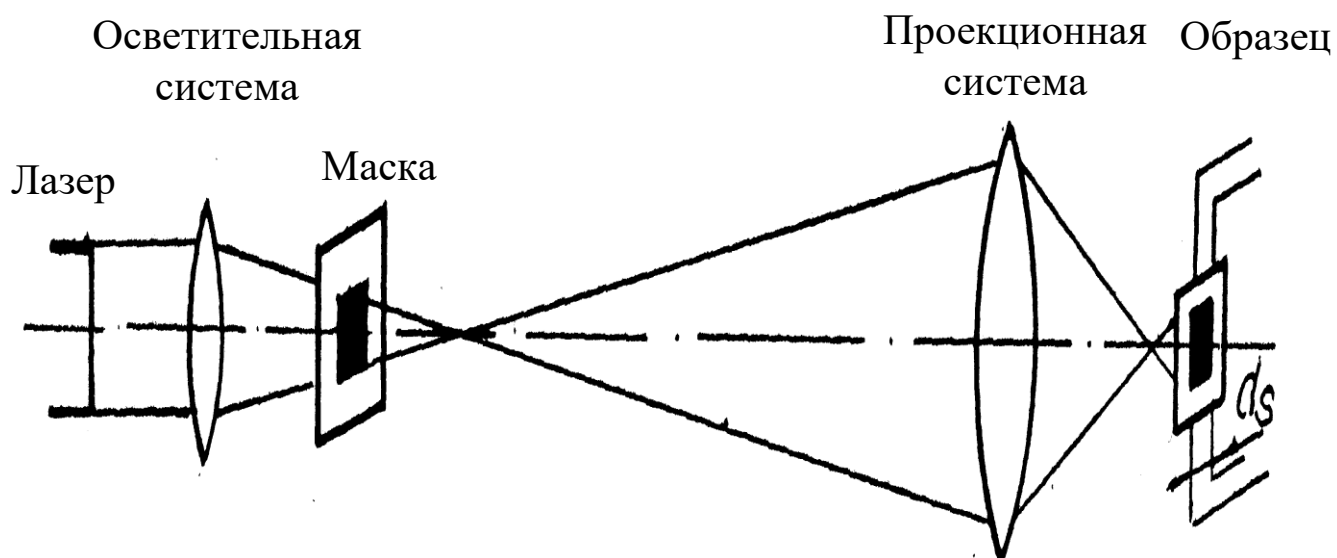
Обход заданного контура на обрабатываемой поверхности осуществляется перемещением рабочего стола, на котором располагается изделие, по программе или при использовании оптического плоттера.

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*

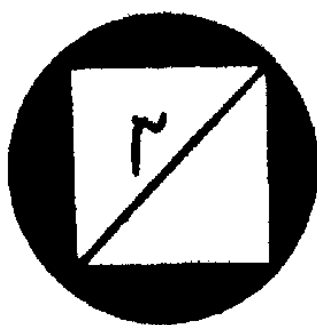


Схема расположения квадратной маски в пучке круглого сечения

Достоинства:

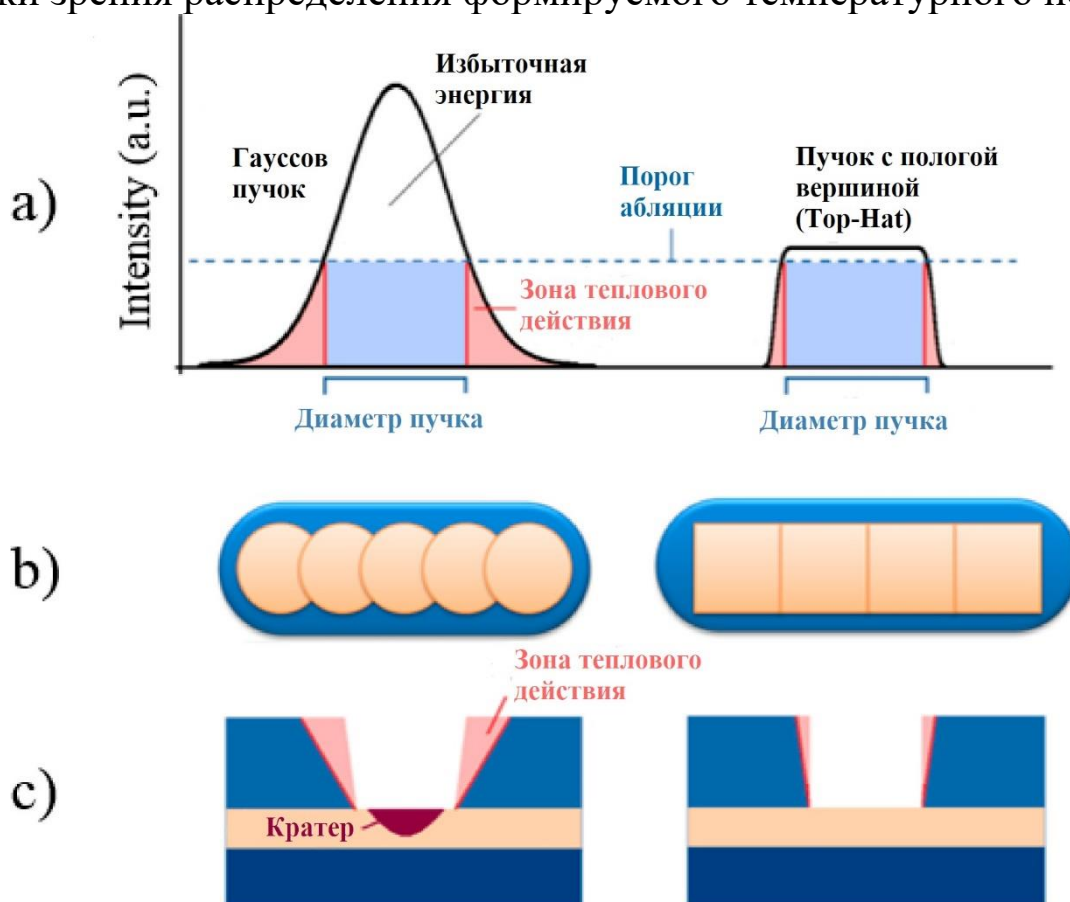
- энергетическая эффективность составляет максимум

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

- нет противоречий между разрешающей способностью $d_{\text{обр}}$ и
полем изображения $D_{\text{обр}}$

4.6. ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПОПЕРЕЧНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ИНТЕНСИВНОСТИ

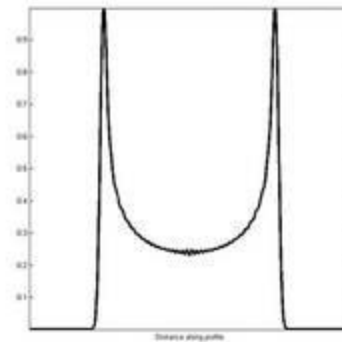
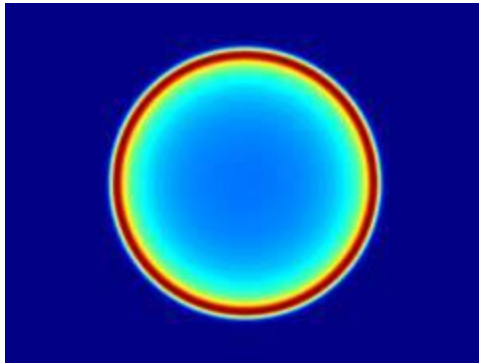
Проблема эффективного использования энергии лазерного пучка остро стоит в прецизионной лазерной обработке материалов. Поэтому в настоящее время используют различные оптические системы (гомогенизаторы) для формирования нужного распределения энергии в зоне обработки. Как видно, из рисунка а крылья гауссовского распределения могут лежать ниже плотности энергии, соответствующей порогу абляции материала, это приводит к термическому расплыванию зоны лазерного воздействия при обработке материалов, вместе с тем вершина гауссовского профиля соответствует плотности энергии, существенно превышающей порог абляции. Использование пучка с прямоугольным распределением интенсивности позволяет избежать перегрева материала в центре лазерного пятна и широкого размытия зоны воздействия на краях (рисунок с), но также не является оптимальным (равномерным) с точки зрения распределения формируемого температурного поля.



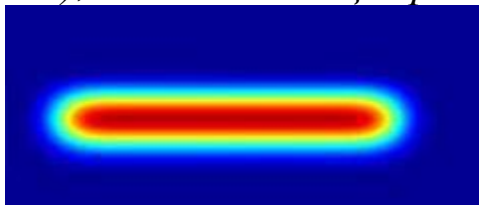
Принципиальная разница зоны воздействия при лазерной обработке гауссовым пучком (слева) и пучком Top-hat (справа).

(S. Rung, 2014)

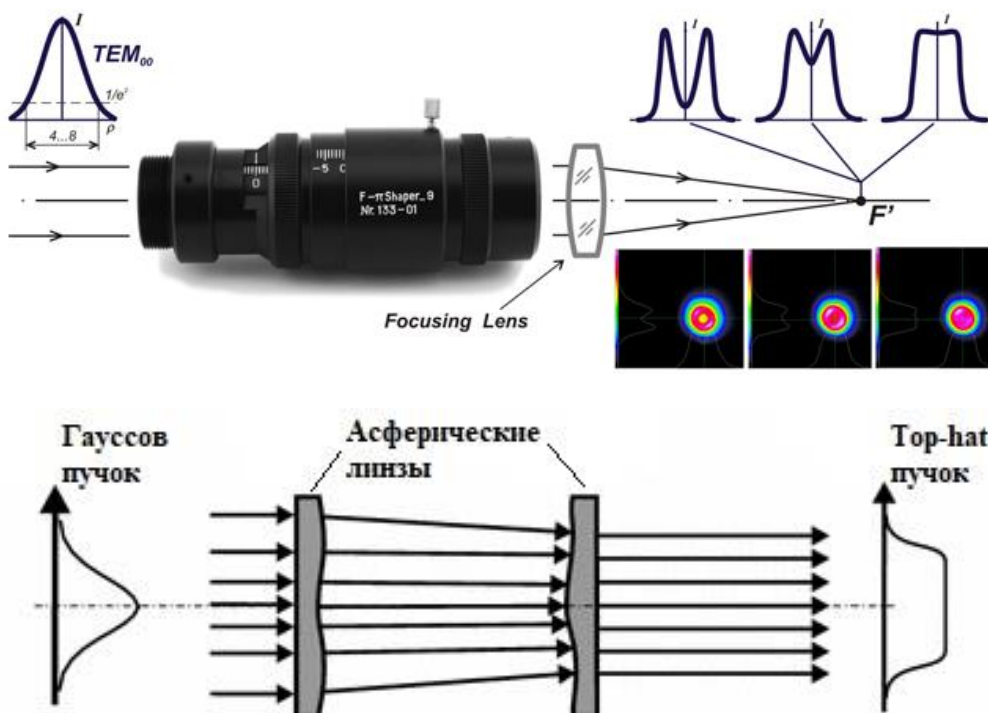
Формирование равномерного температурного поля возможно при использовании пучка, имеющего М-образное или кольцевое распределение интенсивности.



М-распределение лазерного пучка, полученное с помощью ДООЭ (Holo-OR Ltd.), обеспечивающее равномерное температурное поле.



Расчетные температурные поля при сканировании поверхности мишени пучком с гауссовым распределением (а) и М-распределением (б).

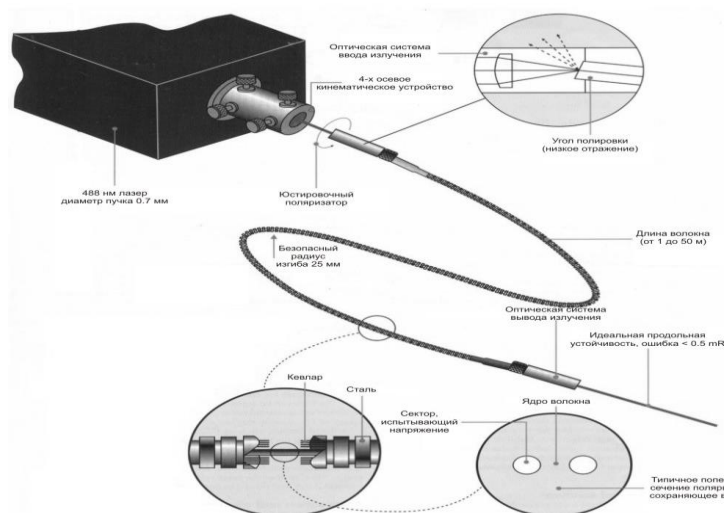


Преобразователь пучка PI-shaper на базе асферических линз.

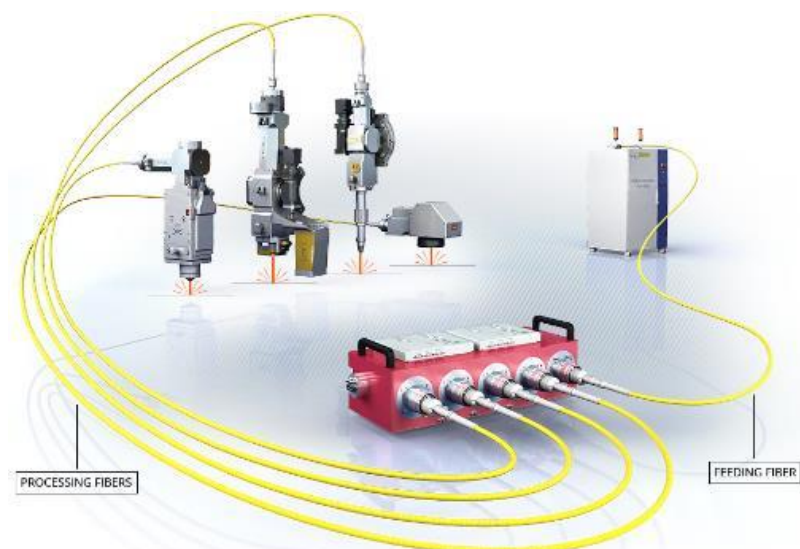
4.7. ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ (ВОС) ДОСТАВКИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

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).

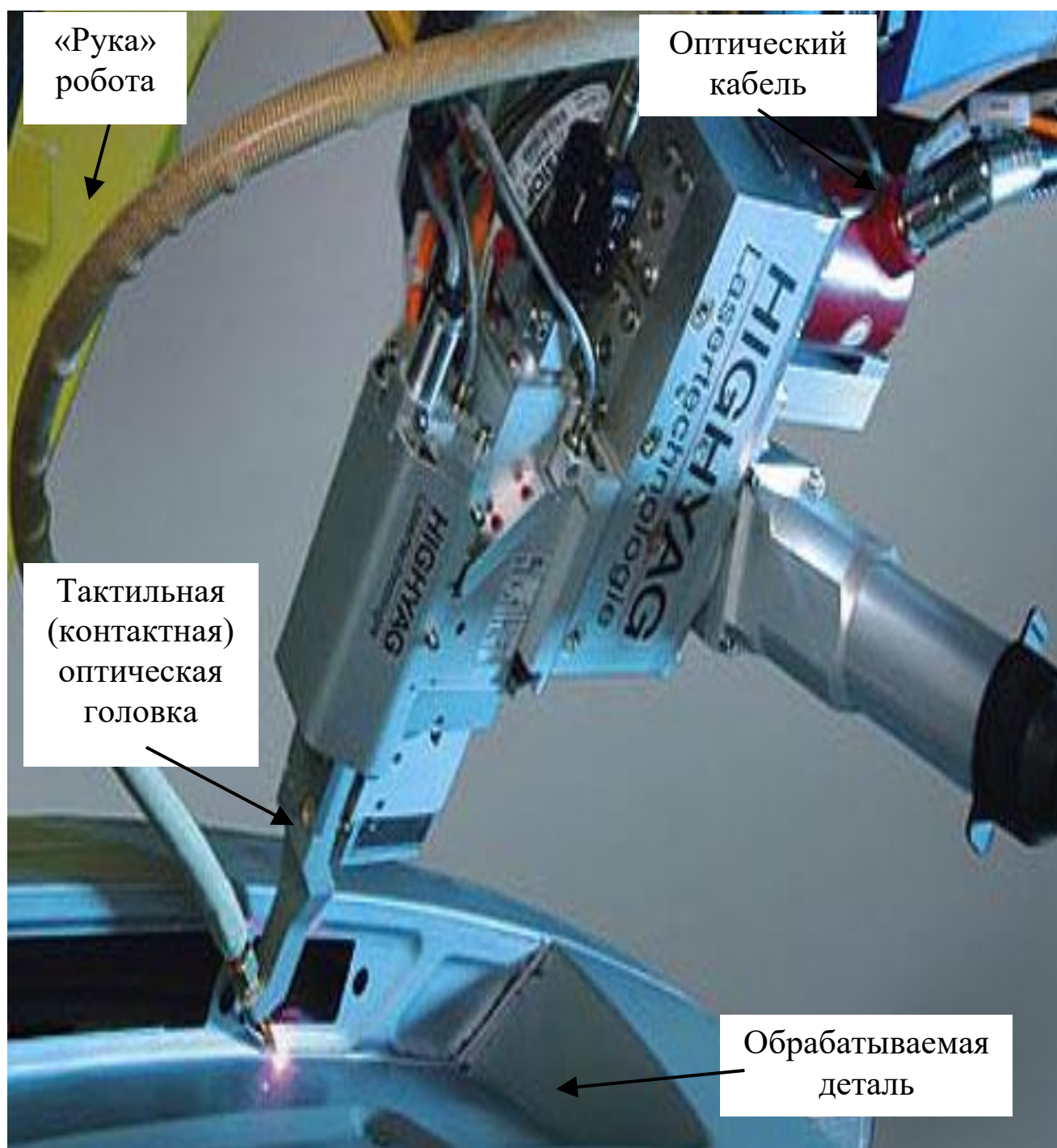


Структура ВОС доставки



Волоконная система разделения излучения от одного мощного волоконного лазерного источника по рабочим местам (LMA).

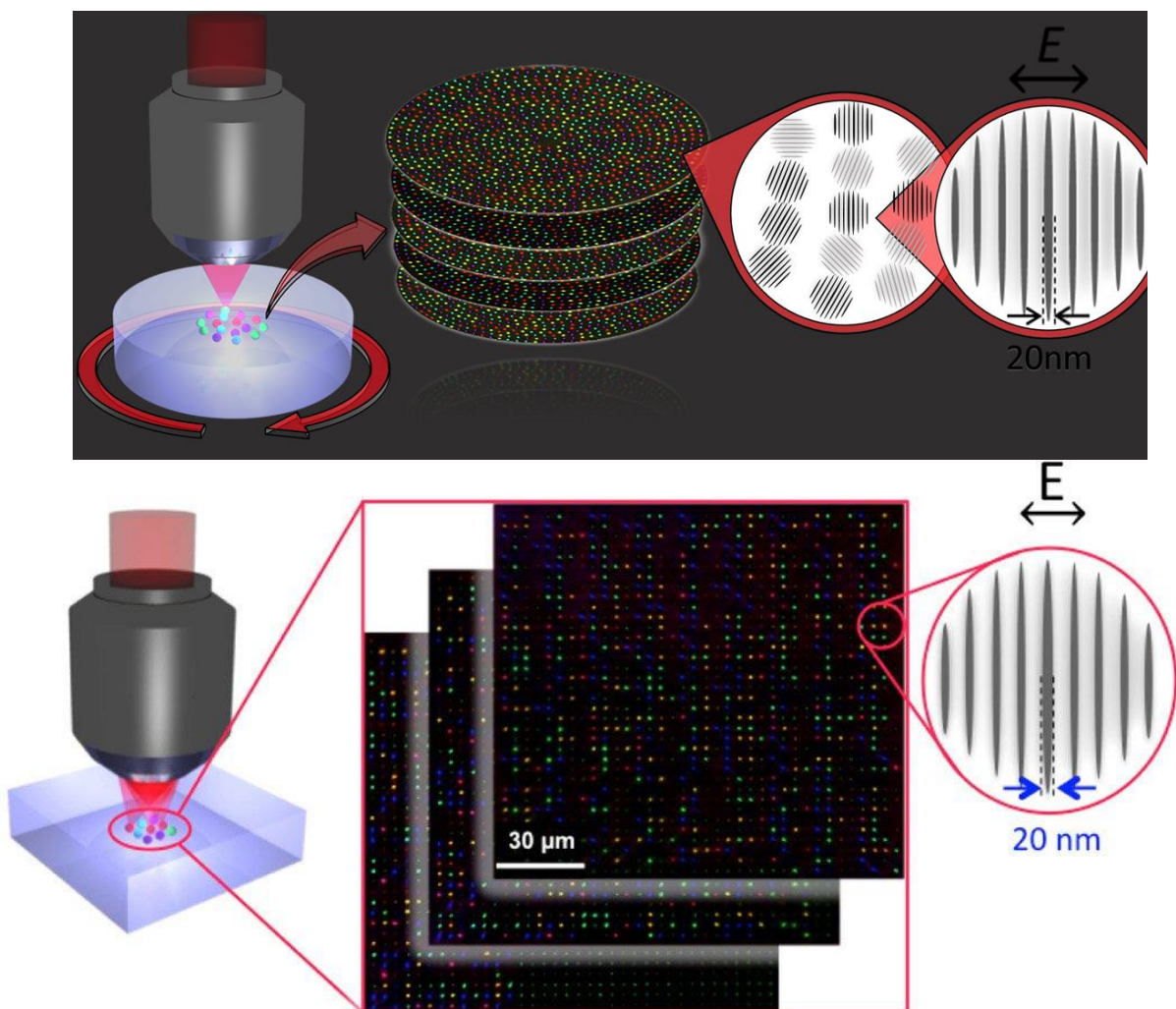
Тактильная оптическая головка “high-yag” для волоконной доставки лазерного излучения в зону обработки с помощью робота



ГЛАВА 5.
НЕКОТОРЫЕ ПРИМЕРЫ СОВРЕМЕННЫХ
ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ФОТОНИКЕ

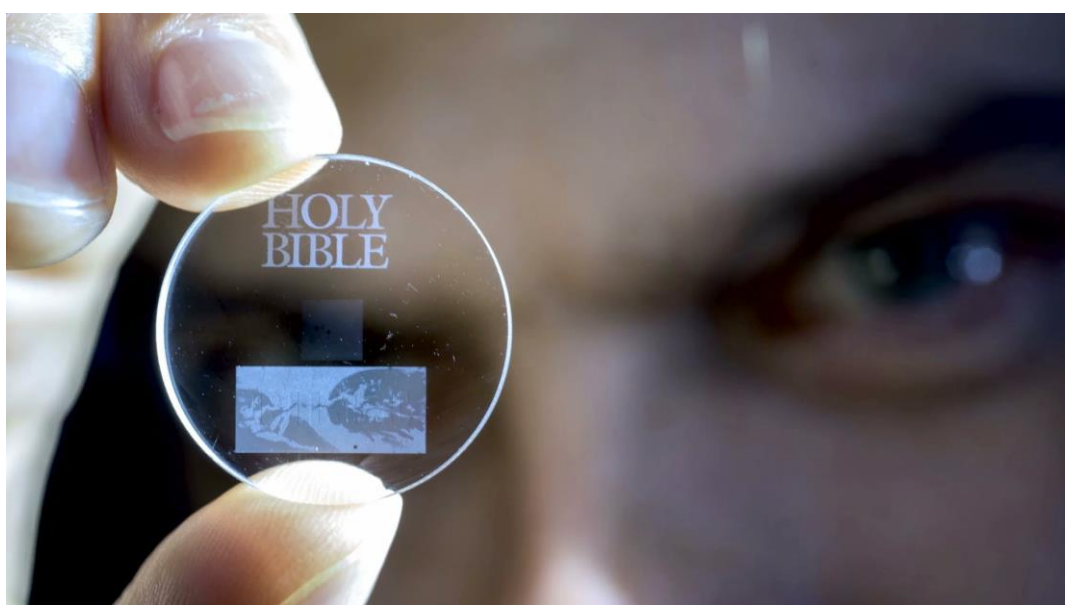
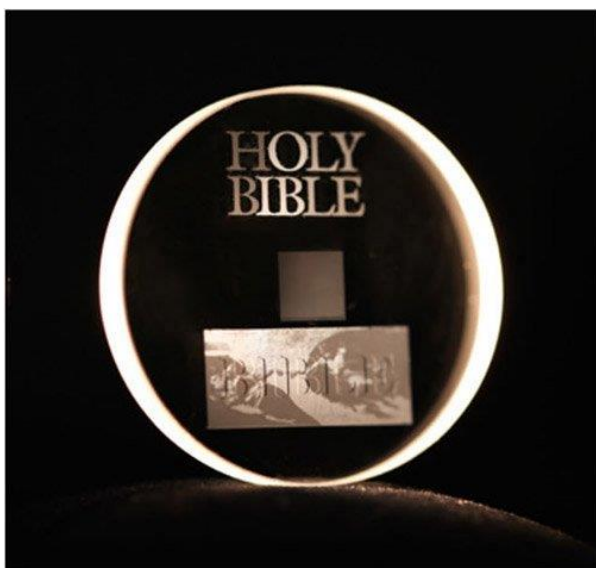
5.1 5D ОПТИЧЕСКАЯ ПАМЯТЬ.

Создание новых носителей информации, способных надежно хранить данные длительное время является актуальной задачей в информационных технологиях, проблему удалось в какой-то степени эффективно решить с помощью фемтосекундной лазерной технологии записи нанорешеток в стекле. В 2015 году была продемонстрирована возможность сверхплотной записи информации в объеме стекла с использованием фемтосекундного лазера с длительностью импульса 600 фс, энергией 200 нДж и частотой следования 500 кГц.



5D оптическая память, записанная в кварцевом стекле с помощью фемтосекундного лазера. Каждый элемент представляет собой нанорешетку определенной ориентации. Расстояние между двумя соседними элементами 3.7 мкм, между слоями 20 мкм.

(E - электрическое поле световой волны, стрелкой указано направление поляризации).

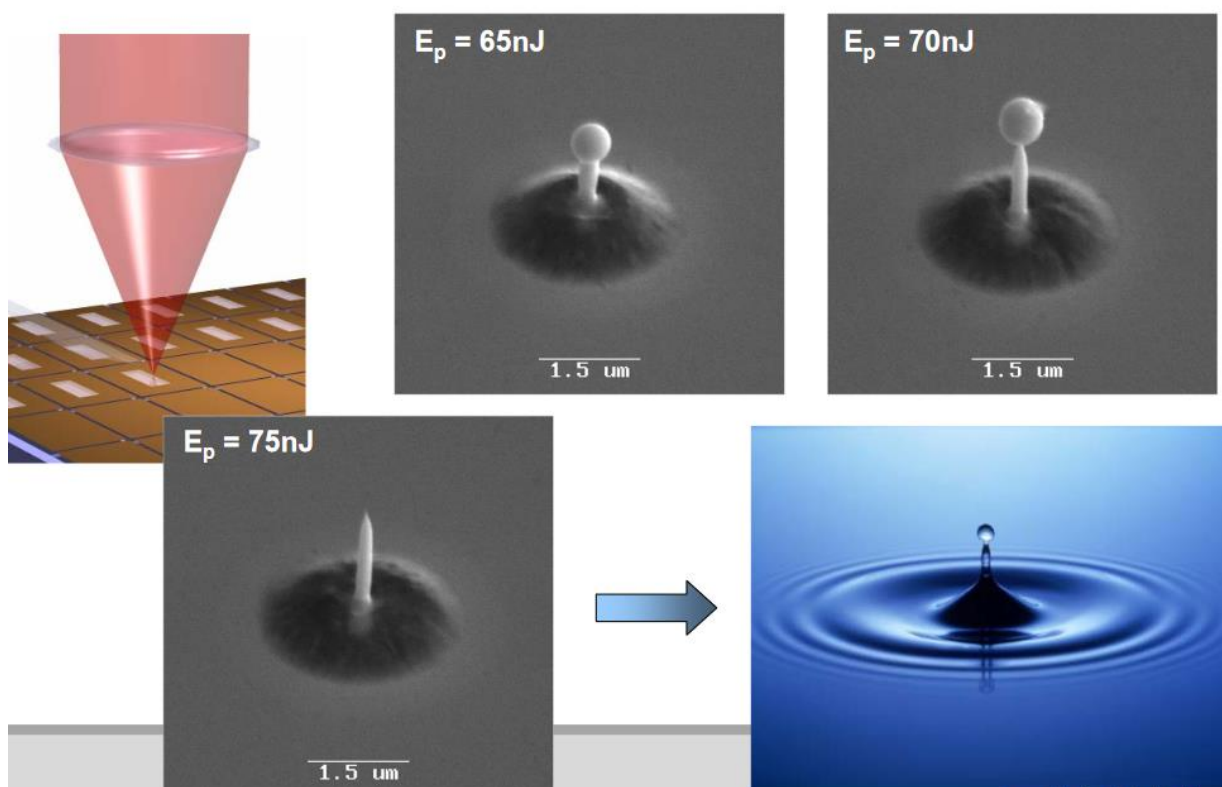


*(a) Библия короля Якова,
(b) Великая хартия вольностей (Magna Carta)
записанные в стекле.*

*Объем данных 360ТБ, время хранения информации
на таком носителе ~10 миллиардов лет, (по результатам уско-
ренных экспериментов, Kazansky, 2016, рекорд Гиннеса).*

5.2 ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ МЕТАПОВЕРХНОСТЕЙ

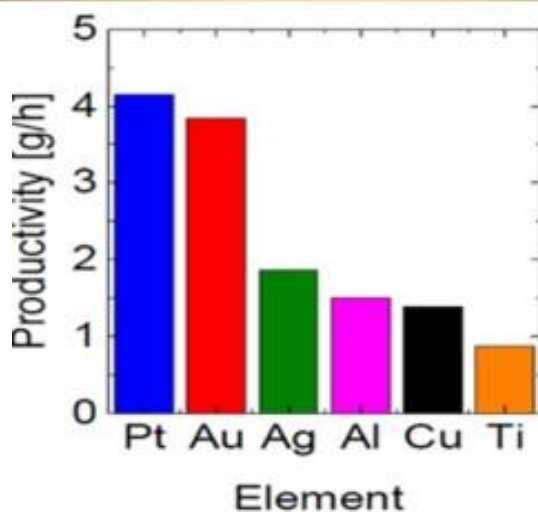
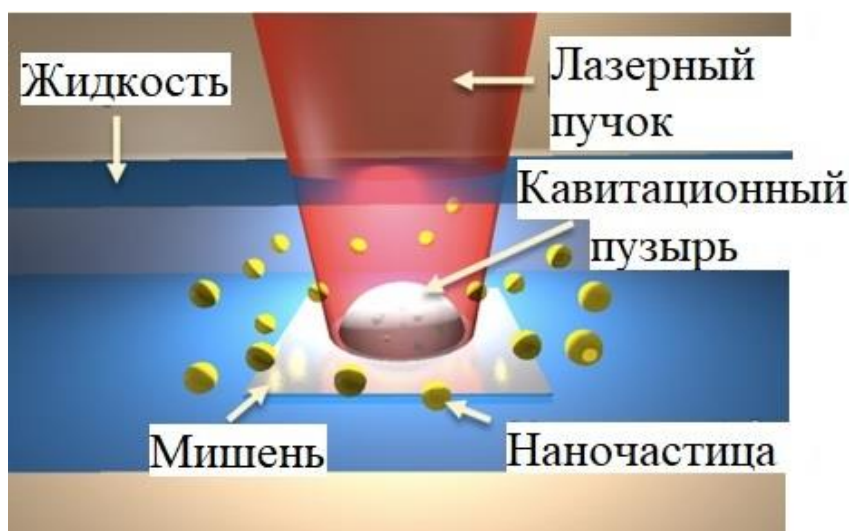
Переосмысление и фактически новое применение формируемых лазерным излучением давно и хорошо известных «нанобампов» было реализовано с помощью фемтосекундных лазерных источников в 2000-х годах. Качественного изменения возможностей управления формой нанобампов удалось добиться за счет использования ультракоротких импульсов с плотностью энергии, близкой к порогу абляции, а также использования тонких пленок нужной толщины. Формируемые субмикронные структуры в настоящее время рассматриваются как наноантенны для локального усиления и управления электромагнитным полем.



*3D нанотехнология и лазерная печать наночастиц и живых клеток
(B.N. Chichkov, 2014)*

5.3 ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СИНТЕЗА НАНОЧАСТИЦ В ЖИДКОСТИ

Наиболее экологически чистым методом синтеза наночастиц по своим физическим особенностям (метод не требует прекурсоров и не имеет отходов) является метод лазерной абляции под слоем жидкости. Но только в 2016 году за счет использования лазерного источника с мегагерцовой частотой этому методу удалось добиться промышленных масштабов, массовый выход при синтезе наночастиц металлов достигает на сегодняшний день г/час, что по некоторым критериям может конкурировать с химическими методами синтеза наночастиц.



Общая схема синтеза наночастиц методом лазерной абляции фемтосекундными лазерами под слоем жидкости и массовый выход наночастиц металлов при данном методе. (Barcikowski, 2017)

ГЛАВА 6.
ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ
ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

6.1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ЛАЗЕРЫ И ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ*

Основные сферы применения лазерных технологий.

Главные драйверы мирового рынка лазеров и лазерных технологий.

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. Время, когда лазерная технология считалась «технологией, которая ищет себе применения», давно прошло, это связано прежде всего с достаточной степенью развития основ лазерных технологий – собственно, лазерных источников излучения, оптических систем для управления параметрами лазерных пучков и процессов взаимодействия лазерного излучения с веществом. Поэтому возникающие в настоящее время новые технологические и научные задачи определяют развитие лазерной техники, а не наоборот. Так, с начала 2000 г.г. эта отрасль существенно перестроилась, ориентируясь на потребности полупроводниковой промышленности и производства бытовой электроники, затем пришло время волоконных лазеров, сейчас на повестке дня новые тенденции - аддитивные технологии, лидарные системы, новые медицинские технологии, фотоника, а также растущий потребительский спрос на высокотехнологичную бытовую технику, и, в первую очередь, на новые «гаджеты».

По статистике Laser Markets Research/Strategies Unimited (©PennWell Corp.) с 2010 года наблюдается устойчивый рост применения лазеров и лазерных технологий: до 5–7 %/год, рис. 1. В 2016 г. темпы роста рынка лазеров оказались существенно выше, чем у мировой экономики в целом – 6,6 % и 2,4 % в год соответственно.

Причиной такого опережающего роста лазерной отрасли является тот факт, что лазерные технологии и, соответственно, лазеры активно используются именно на самых быстрорастущих из существующих

*) изложено на основе «Обзоров и прогнозов лазерного рынка» 2016 2017–2018 г.г. [Laser focus world, is.1, 2016, 2017, 2018,]

рынков, являясь эффективным инструментом их инновационного развития. Примерами могут служить активное развитие аддитивных технологий, в т.ч. в двигателестроении, в авиакосмической промышленности и медицине, а также внедрение лазерных локационных/лидарных систем в автомобилестроение в связи с ближайшей перспективой их использования в автономных/роботизированных автомобилях. О масштабах грядущих изменений можно судить по такому примеру: Uber собирается высвободить за счет внедрения «самоуправляемых» автомашин около 10 млн водителей уже в ближайшем будущем. На очереди – лазерная навигация дронов и автономных промышленных роботов.

Главными драйверами мирового рынка лазерных источников излучения в 2017г. были устройства бытовой электроники (и Китай), а главными победителями на рынке лазерных технологий стали волоконные лазеры, детекторы света и лазеры для дальномеров (лидаров), а также излучающие с поверхности диодные лазеры с вертикальными резонаторами (VCSELs). Эти выводы подтверждаются рекордными доходами изготовителей оборудования для лазерной обработки материалов в т.ч. в полупроводниковой промышленности, и, соответственно, многих поставщиков лазеров и устройств фотоники для такого оборудования.

Использование лазерного луча играет ключевую роль в ускорении изготовления полупроводниковых пластин для чипов и приборов бытовой электроники, и их растущее производство требует всё большего количества лазерных систем.

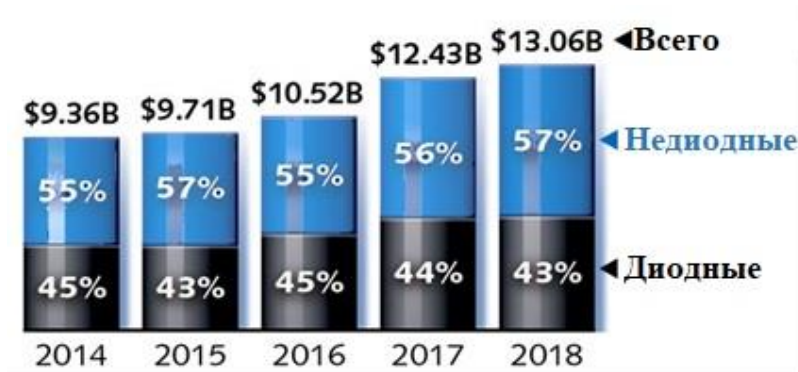
2017-й оказался весьма благоприятным для мировой лазерной промышленности. Согласно оценкам, общий объём продаж лазерных источников излучения в 2017 году вырос на 18,1% по сравнению с 2016-м, причём главным обзором за счёт сектора лазерной обработки материалов, в котором продажи подскочили за год сразу на 26% (волоконные лазеры дали ещё большой прирост – их продажи для технологических установок выросли за этот же год на 34%!)

Но 2017-й был, по-видимому, всё-таки исключением, и в 2018 году продажи лазеров должны вернуться к более умеренному росту, так как спрос на многие лазерные системы обработки материалов не будет расти столь же быстро.

Судя по имеющимся данным относительно продаж лазеров в 2017-м, «индустрия 4,0» и «интернет вещей» перестали быть просто модными словечками. Например, опубликованная в

марте 2017 года Американским институтом интегральной фотоники дорожная карта для производства интегральных фотонных систем предполагает, что интернет вещей окажет исключительно большое влияние на лазерный рынок. И индустрия 4,0 всё больше становится реальностью в 2017г. Компания Trumpf открыла в Чикаго «умный завод», на котором в технологической линии для обработки листового металла задействованы только станки и технологии с цифровой связью, в первую очередь, лазерные, а немецкая Ассоциация производителей металлообрабатывающих станков выступила с программой развития сетевого производства на базе лазерных технологий обработки металла.

Наряду с этим, произошел большой рост заказов из микроэлектроники, особенно в части производства органических светоизлучающих диодов, а также на лазеры в секторах медицинских, диагностических и терапевтических аппаратов, аэрокосмической и оборонной техники.



Динамика рынка лазерных источников излучения в 2014–2017 г.г. и прогноз на 2018-й год приведены на рисунке

Покупательский спрос

Большая часть роста лазерного рынка в 2017г. объясняется увеличением использования лазеров и оптики в бытовой технике и ростом производства такой техники. Например, изготовление любого смартфона включает в себя больше дюжины технологических процессов, реализуемых с помощью лазерного луча – резка стекла, гравировка деталей, сверление отверстий в печатных платах и др. Использование в смартфонах OLED-дисплеев позволяет компании Coherent – главному поставщику эксимерных лазеров, необходимых для изготовления таких дисплеев – ожидать продолжения «беспрецедентного» спроса на эти лазеры. Кроме того, многие

смартфоны содержат VCSEL-диоды для обеспечения возможности объёмного зондирования и определения расстояний, а это существенно увеличивает спрос на VCSEL, добавляя новую рыночную нишу для них к уже известным – таким, как системы передачи данных, мышки для компьютеров, лидарные системы для автомобилей.

По мнению экспертов, 2017-й стал годом прорыва для спроса на VCSEL-диоды, обусловленного применением этих излучателей в бытовой электронике. Следующим шагом будет распространение смартфонов системой распознавания лиц, которая также использует VCSEL-излучатель.

Перечисленные примеры – лишь верхушка айсберга. **Лазеры становятся всё более распространёнными в нашей повседневной жизни – до такой степени, что мы часто это не осознаём. Они в системах связи, в автомобилях, в домашней технике, в медицине, в магазине, на стадионе, в парке – сегодня они, кажется, используются уже везде, хотя во многих случаях мы и не знаем об их наличии в том, чем мы пользуемся.**

Одним из новых лидеров в части спроса на лазерные источники излучения становится сейчас лидар. Это устройство давно используется в дальнометрии, аэрофотосъёмке, для 3D-сканирования объектов и пространств, мониторинга движения аэрозолей, но сейчас возникло новое применение – в беспилотных автомобилях. Ожидается, что беспилотные транспортные средства превратят многомиллиардный рынок лидаров в многотриллионный.

Заглядывая в будущее, можно указать ещё одни применения лазеров, которые в перспективе могут создать большие рынки для них. Это квантовые технологии виртуальной/дополненной (AR/VR) реальности. В 2017г. уже были сделаны инвестиции в разработку атомных часов на чипе для GPS-коммуникаций, квантовой связи, квантовых сенсоров. Расходы на AR/VR-аппаратуру, как предполагается, должны вырасти с 11,4 млрд долл. в 2017г. до более, чем 200 млрд долл. в 2021г., что повлечёт за собой рост спроса на фотонные кристаллы, дифракционную оптику, оптоэлектронику. Соответственно, потребуется больше оборудования для обработки материалов, используемых для их изготовления. Кроме того, потребуется ещё больше лазеров – они используются в шлемах-гарнитурах для отслеживания движения глаз и проектирования изображений.

Сегменты рынка

Более 90 % всех фирм-производителей, работающих в области фотоники и оптики, – это малые предприятия, но 80 % от общего объема продаж этой техники приходится на крупные компании, которые являются игроками глобальных рынков. В 2015–2016 гг. в лазерной индустрии наблюдалась наиболее высокая за все время ее существования активность в части слияний и поглощений компаний, причем они зачастую осуществлялись «через границы» традиционных секторов экономики.

На рис. приведен анализ потребности отраслей промышленности в различных странах и регионах мира. Лазерные технологии наиболее востребованы в Северной Америке (в первую очередь в США) в аэрокосмической промышленности, энергетике и медицине, а также в металлообработке, в производстве транспорта и в сельском хозяйстве. Повышенный интерес к лазерным технологиям проявляет Китай, а также Индия и Япония.

Регион \ Отрасль	Северная Америка	Южная Америка	Западная Европа	Восточная Европа	Япония	Китай	Юго-Восточная Азия	Индия	Другие
Энергетика	высокая	средняя	средняя	выше среднего	выше среднего	выше среднего	средняя	выше среднего	выше среднего
Транспорт	выше среднего	средняя	средняя	средняя	выше среднего	выше среднего	низкая	выше среднего	очень низкая
Сельское хозяйство	выше среднего	средняя	средняя	средняя	средняя	выше среднего	выше среднего	высокая	выше среднего
Аэрокосмическая	высокая	высокая	выше среднего	низкая	средняя	выше среднего	средняя	низкая	очень низкая
Связь	средняя	низкая	средняя	низкая	выше среднего	высокая	выше среднего	средняя	очень низкая
Металлообработка	выше среднего	средняя	выше среднего	низкая	выше среднего	выше среднего	выше среднего	выше среднего	выше среднего
Медицина	высокая	низкая	низкая	низкая	средняя	средняя	средняя	низкая	очень низкая

*Анализ потребности отраслей промышленности
в различных странах и регионах*

В России, особенно в условиях кризиса последних лет, лазерный рынок развивается скорее «вопреки», чем «благодаря».

Основные сегменты «лазерного» рынка 2017 г. приведены на рис.



*Структура мирового рынка
лазерных источников излучения в 2017 году.*

Обработка материалов (включая литографию) по-прежнему остается ведущей областью применения лазеров

Она включает лазеры для всех видов обработки металла (сварка, резка, отжиг, сверление), для обработки полупроводников и производства микроэлектроники (литография, скрайбирование, залечивание дефектов, прошивка отверстий в печатных платах), маркировки различных материалов и в других технологических процессах (таких как резка и сварка органических материалов, быстрое прототипирование и 3D-печать, микрообработка, изготовление дифракционных решёток), а также лазеры для литографии.

Никакие негативные политические новости не помешали росту продаж промышленных лазеров, который в период с лета 2016г. до 3-го квартала 2017г. оказался просто феноменальным. Если рассматривать этот сегмент лазерного рынка в географическом плане, то нужно сказать, что Китай оставался сильным, как всегда, но и Европа и другие страны Азии не теряли своих позиций. Северная Америка не была такой же сильной, но оставалась на респектабельном уровне. Япония оказалась единственной страной (из проанализированных), где продажи лазеров сократились.

Главным драйвером общего роста продаж промышленных лазеров оказались мощные волоконные лазеры. Высоким был спрос на лазеры для обработки панелей плоских дисплеев. В части лазеров для аддитивных технологий год начался вяло, но в конце года появились очень большие заказы, которые вполне компенсировали плохое начало.

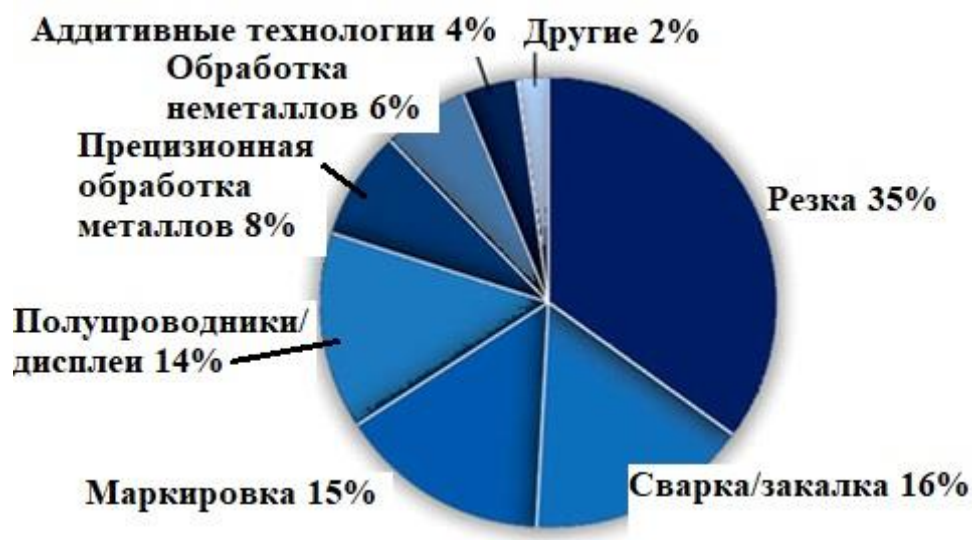
В этом сегменте рынка второй год подряд наблюдается активный рост – за счёт уже упомянутого беспрецедентного роста продаж волоконных лазеров, а также эксимерных (скачок спроса на них обусловлен их применением на производстве смартфонов) и короткоимпульсных лазеров. На 18% выросли в этом сегменте за год продажи твердотельных лазеров (дисковых), на 34% –! волоконных, но на 14% упали продажи промышленных CO₂-лазеров.

В 2017-м году наблюдался также заметный рост в автомобильной и аэрокосмической промышленности, в энергетике, связи и электронике.

Распределение продаж по технологиям оказалось следующим: маркировка – 15% от всех продаж лазеров для промышленной обработки (больше всего волоконные лазеры), микрообработка, к которой отнесли в настоящем обзоре все промышленные лазеры мощностью менее 500Вт, заняла 32% продаж (за счёт эксимерных лазеров для изготовления дисплеев), макрообработка – остальные 53%, причём внутри этого сектора 60% составили продажи лазеров для резки, они за год выросли на 29%.



Динамика мирового объёма продаж
промышленных лазеров в 2016-2017г.г.
и прогноз на 2018г.



Распределение продаж промышленных лазеров в 2017г. по видам их использования.

В секторе микрообработки спрос на лазеры для реализации аддитивных технологий – наплавки металла и прототипирования – вырос за 2017-й год на 30% благодаря спросу в авиационном двигателестроении. Здесь используются СО₂- и волоконные лазеры.

На 2018-й год прогнозируется повторение динамики 2017-го с теми же странами – лидерами и отстающими регионами (Восточная Азия, Южная Америка, Восточная Европа). Общий рост продаж в секторе лазеров для промышленности должен составить 7%, причём спрос на эксимерные и мощные волоконные лазеры уже не будет расти такими же высокими темпами, как в предыдущие два года – будет иметь место насыщение. Объём продаж в сегменте лазеров для маркировки будет расти медленнее – на 6% в год – прежде всего, из-за снижения цен на эти лазеры. В сегменте микрообработки продажи вырастут на 9% – благодаря спросу на обработку неметаллических и тонколистовых материалов. Сегмент макрообработки сохранит 53% общего объёма продаж. Заметным будет рост – на 11% – продаж мощных диодных лазеров для непосредственной обработки материалов.

Компаниями – мировыми лидерами в секторе лазеров для обработки материалов в 2016–2017 г.г. оказались **Trumpf, IPG**

Photonics и Coherent. Наибольшая активность в части приобретения промышленных лазеров имела место в автомобильной и аэрокосмической промышленности, энергетике, электронике, связи (производство смартфонов). Азия продолжает оставаться крупнейшим рынком лазерной резки листового металла с 38 внутренними и 14 международными компаниями, поставляющими лазерные обрабатывающие системы. В конце 2016 г. потребление такого оборудования в Китае увеличилось, при общем росте продаж оборудования для лазерной резки в 3,5 %.

Авторы отмечают, что волоконные лазеры сегодня уже почти полностью вытеснили CO₂-лазеры в системах лазерной резки в диапазоне мощностей до 2–12 кВт. «Волоконники» мощностью 8–12 кВт режут при таком же качестве, что и CO₂-лазеры, но на больших скоростях, с большей производительностью.

Диодные лазеры также начинают внедряться в машинах для лазерной резки. Такую попытку сделала, например, фирма MAZAK Optronics (Elgin, IL), создав систему с лазером мощностью в 4 кВт. Продвижение диодных лазеров в области лазерной резки, по-видимому, будет зависеть от их цены, которая, в свою очередь зависит от масштаба/количества продаж. Диодные лазеры становятся конкурентами волоконных даже в этом секторе.

Аналогичный, лидирующий спрос (до 60–70 %) на оборудование для лазерной резки был отмечен на российской выставке «ФОТОНИКА-2018» в начале марта 2018 г. в г. Москве. Вторым номером (до 20 %) шел спрос на маркеры и граверы. И лишь изредка посетителей (до 15 %) интересовали лазерное сверление, аддитивные технологии, сварка и наплавка.

Сварка металлов занимает лишь 9 % сектора обработки материалов. Несмотря на ее относительно небольшой объем, она является одним из основных базовых процессов в производстве металлоконструкций практически для всех отраслей промышленности, а также определяющим технологическим процессом при конструировании и создании новых образцов современной техники.

Лазерная обработка неметаллов, в особенности армированных волокном полимеров, в совокупности с прецизионной обработкой металлов добавили 5 % к общему росту рынка технологических лазеров за 2016 год.

Аддитивное производство, конкретно, лазерная послойная наплавка, продемонстрировало в 2016-18 г.г. рост спроса по лазерам на 22,1 % вследствие более широкого использования этой технологии в авиационном двигателестроении. В качестве источников излучения при этом используются CO₂- и волоконные лазеры средней и высокой мощности.

Спрос на высокоомощные лазеры растет не только в аддитивных технологиях, но и таких применениях как плакирование и очистка/снятие краски, лазерная сварка нефтепроводов.

Продажи для макрообработки волоконных лазеров с 2015 г. (589) обошли продажи CO₂-лазеров с объемом 518,3 млн долл. Продажи твердотельных лазеров держались примерно на одном уровне. Продажи диодных (и других) лазеров по темпу роста (до 15 % в 2014 г.) были близки к волоконным.

В лазерной резке и сварке идет активное вытеснение CO₂-лазеров «волоконниками» IPG и других производителей. Сильные позиции в мировом массовом производстве имеют автоматизированные комплексы на базе дисковых лазеров немецкой фирмы TRUMPF.

В наплавке и термической обработке активно внедряются диодные и волоконные лазеры.

Микрообработка

К микрообработке относят: прецизионную резку, сверление и аддитивные технологии. Наибольший рост в 2015–2016 гг. обеспечивали продажи лазеров для микрообработки – до 23,5 %/год (2016), в 2017 год ожидается аналогичный рост.

Лидерами в 2016 г. были эксимерные и диодные лазеры с рекордным ростом на 102,8 % при обычном росте продаж волоконных лазеров в 14 и 18,3 % в 2014 и 2016 годах, соответственно. Ожидается, что продажи эксимерных и диодных лазеров в 2017 г. достигнут 505,5 млн долл./год и обойдут волоконные лазеры с объемом в 413,4 млн долл./ год.

Использование поликристаллического кремния в тонкопленочных транзисторах дает возможность изготовления органических светоизлучающих диодов (OLED) дисплеев с улучшенным внешним видом, более высокой скоростью и низким энергопотреблением. Наиболее эффективным средством преобразования аморфного/поликристаллического кремния является применение эксимерных лазеров для их низкотемпературного отжига. Сказался всплеск обработки эксимерными лазерами новых моделей

дисплеев смартфонов. Фирма Coherent (Санта-Клара, Калифорния) получила уже заказы на эксимерные лазеры для поставок до 2018 года.

Значительные доходы от продажи этих лазеров начались с поставок 2016 г., в результате чего произошел быстрый двузначный рост в секторе микрообработки.

Увеличится применение лазерной резки армированных полимерных материалов. Поскольку в России очень актуальна тема импортозамещения, особенно в ВПК, в т. ч. компьютерной техники, в приборостроении и микроэлектронике, в системах связи и др., перспективы применения эксимерных лазеров в данном секторе трудно переоценить.

Лазерная маркировка и гравировка являются наиболее массовым применением по количеству проданных установок, которые находят все более широкое применение: для кодирования и идентификации, нанесения необходимых надписей на продукцию практически всех

отраслей промышленности: от сувенирной и ювелирной, оружейной до авиации, ракето- и автомобилестроения, по степени распространения ее уже сравнивают с фотопечатью.

Имеются данные по сектору маркировки и гравировки, показывающие рост продаж волоконных и диодных лазеров до 13-14 % и снижение объемов продаж твердотельных и СО₂-лазеров до 5–6 %.

Использование различных длин волн, длительности импульсов и размеров пятен позволяет выполнять знаки с различными цветами от черного до белого, очень большими площадями, с легко программируемыми по форме и размерам, различных модификаций для промышленных производственных линий.

Непрерывные, импульсные, сверхбыстрые СО₂-и волоконные лазеры, используемые для маркировки, составляют примерно 14 % от дохода всех промышленных типов лазеров. При этом диодные лазеры стали «наступать на пятки» волоконным. Волоконные и диодные лазеры вытесняют традиционные твердотельные и СО₂-лазеры. Например, в производстве российских маркеров и гравиров в «Лазерном Центре СПб» – ведущем российском производителе маркеров и гравиров, с 2012 года используются практически только волоконные лазеры.

В последнее время резко возрастает интерес к лазерной маркировке труднообрабатываемых материалов с высокой

отражающей способностью ультрафиолетовыми лазерами, за которыми ожидается всплеск продаж. Ожидается также рост продаж волоконных лазеров с длиной волны 2 мкм.

Связь и оптическая память

Включает все диодные лазеры, используемые в системах телекоммуникаций, передачи данных и оптической памяти, включая лазеры для накачки оптических усилителей. Продажи лазеров для оптической связи, как правило, цикличны, и после пика в конце 2016 г. они демонстрируют снижение. Этот циклический характер изменений легко понять. Независимо от того, о каком виде связи идёт речь — передача данных или телекоммуникации, проводная или беспроводная — освоение новых технологий и развёртывание основанных на них систем идёт во всём мире скачками после периодов неизменности структур. В настоящее время драйвером внедрения для большинства новых технологий является беспроводная сотовая связь. Всякое обновление сети такой связи предъявляет новые требования к магистральным линиям (т.е. к оптическому волокну и лазерам). Модернизация сотовой связи до 4G-уровня в настоящее время уже свёртывается, а обновления до уровня 5G, как ожидается, должно начаться после 2019 года.

Что касается оптической памяти, то будущее для лазеров в этой области представляется «тусклым». Продажи DVD, CD и Blu-ray носителей продолжают падать, а облачные технологии делают ненужным создание больших локальных хранилищ информации. Массовое производство носителей магнитной памяти с тепловой поддержкой регистрации (HAMR), в которой используется лазер, в настоящее время практически прекращено — так как ожидается вывод на рынок в 2018 г. компанией Seagate таких носителей с объёмом памяти 16 ТБ.

Начиная с 2006 года доходы крупнейших работающих в сфере оптических телекоммуникаций компаний неуклонно росли, а в период с 2014 по 2016 год многие из них получили рекордную прибыль и ожидают роста объёма своих продаж уже во 2-й половине 2018-го финансового года за счёт спроса на 100 Гбит-QSFP трансиверы для дата-центров и на матрицы мощных VCSEL-диодов для 3D-зондирования. Рынок оборудования для систем высокоскоростной оптической связи, который включает в себя в т.ч. лазеры с брэгговскими отражателями, модуляторы и другие компоненты, используемые в 100G-трансиверах, по мнению многих его

участников, является циклически изменяющимся. Провайдеры телеком-сервиса начинают свои большие инфраструктурные проекты с прокладки оптического волокна, установки усилителей и частотно-селективных переключателей (WSS). На этом этапе им требуется лишь несколько трансиверов. Дополнительные трасиверы появляются позже – по мере задействования всё большего количества каналов для увеличения скорости передачи вплоть до максимально возможной для установленной системы. При этом в последнее время глобальные провайдеры ускоряют выход смонтированных систем на полную мощность – от 3–4 лет, которые этот процесс занимал ещё несколько лет назад, до 2-х и менее лет в настоящее время. Это служит дополнительным подтверждением вывода о неизбежности подъёма спроса на лазеры в этом сегменте после некоторого затишья. То, что известно о планах китайских компаний относительно выхода на рынок с 5G-сотовой связью и инфраструктурой для неё, а также большое внимание, уделяемое сейчас в мире перспективам интернета вещей и систем VR/AR-реальности, позволяет быть оптимистичными в оценке будущего для этого сегмента лазерного рынка. Продажи лазеров для систем квантовой связи (которая, как ожидается, удовлетворит растущий спрос на обеспечение «кибербезопасности» – правда, при условии, что лазерные системы «раскалывания» квантовых кодов удастся «обезвредить») должны внести свой вклад в общий объём «связного» сегмента лазерного рынка в 2018 году и продолжать это делать потом. Однако это будут уже не DFB-лазеры, не VCSEL, а однофотонные лазерные источники (хотя и другие типы квантовых излучателей уже разработаны) В сентябре 2017г. Китай создал в городе Цзинань первую частную коммерческую сеть квантовой связи, ею пользуются более 200 государственных служащих. Ранее в этом же году Китай сообщил об успешной демонстрации «квантовой запутанности» на расстоянии 1200 км между его спутником Мисиус и наземной станцией. Европейский Союз запустил в 2017г. программу развития квантовых технологий с объёмом инвестиций в 1 млрд долл. Достижения Китая и усилия Евросоюза обещают рост продаж в секторе квантовых вычислений.

Научные исследования и военные применения

Включает лазеры, используемые для фундаментальных исследований и разработок, которые проводятся в университетах и национальных лабораториях, а также лазеры для уже существующих и новых видов вооружения – дальномеров, систем подсветки, ИК противодействия и лучевого оружия. Расходы на лазеры для научных исследований несколько возросли в мире в 2017 г. Как и в предыдущие годы, главный вклад в этот рост внес Китай, в США роста не было. Так же, как и в 2016г., существенно росли закупки лазеров для военных применений – для прицелов, дальномеров, систем связи и создания изображений. Военные во всем мире всё чаще видят необходимость использовать лазеры – и во всё большем количестве. Возможность, которая привлекает сегодня общее внимание – создание компактного лазерного оружия для стрельбы с дронов. Для всех типов воздушных судов становятся всё более важными системы защиты от ракет с тепловым наведением, которые сегодня дешёвы и доступны многим террористическим организациям.

Индустрия фотоники и оптики обеспечивают сегодня создание наибольшего количества высокотехнологичных рабочих мест в сфере научных исследований и примыкающей к ним военной и оборонной областях. Достижения в короткоимпульсных лазерах начали открывать новые возможности их применений – вне традиционной микрообработки – такие, как исследования наноматериалов и воздействия света на вещество. Новые ниши рынка формируют использование лидаров на дронах и в таких применениях, как геодезические изыскания, гражданское строительство, археология, экологический мониторинг. Космические проекты – такие, как LIGO, IWSL и LISA – хотя и не влияют пока серьёзным образом на лазерный рынок, но, тем не менее, требуют большое количество лазеров, оптики и оптоэлектроники, что стало заметно в 2017 году. В области военных применений спрос на лазеры в 2017 году снова испытал всплеск. В США каждый род войск имеет свою целевую лазерную программу – лазерное оружие для флота, высокоэнергетический мобильный лазер для сухопутных войск, наземная система противовоздушной обороны для морской пехоты и др. Принимая во внимание заявление администрации о намерении резко увеличить оборонные расходы, можно уверенно предположить, что все эти программы будут продолжены.

стал знаменательным годом для компаний, имеющих оборонные заказы на лазерные системы – таких, как Lockheed Martin. Эта компания получила контракт в 9,4 млн долл. На 9 мес. на разработку лазерного демонстратора перехватчика ракет, ей же Air Force Res. Lab выделила 26,3 млн долл. на разработку и изготовление мощного волоконного лазера, который должен быть использован в программе создания демонстратора высокоэнергетического лазера со встроенной защитой и, кроме того, эта же компания получила контракт на 131 млн долл. от ВВС на участие в производстве комплектов бомб с лазерным наведением. Тенденция ко всё более широкому использованию лазеров в военном деле является общемировой, глобальной. Рост оборонных расходов в мире ожидаемо подтолкнёт «военный» сегмент лазерного рынка, в т.ч. разработку систем лучевого оружия. Согласно оценкам, этот рынок должен вырасти от 7,4 млрд. долл. в 2017 году до более, чем 12 млрд в 2022-м. Большая часть расходов на этом рынке придётся на Азиатско-Тихоокеанский регион, но при этом отмечается, что развивающиеся страны Африки и Южной Америки имеют здесь огромный неиспользованный потенциал.

Медицинские и эстетические применения

Включает все лазерные источники излучения, используемые в офтальмологии (включая рефрактивную хирургию и фотокоагуляцию), хирургии, стоматологии, терапии, а также в косметологии – обработка кожи, удаление волос и др. В 2016г. продажи лазеров для использования в медицине достигли рекордного уровня, но в 2017 году в этой отрасли продажи для некоторых применений шли ещё лучше. Наибольшим был спрос на медицинские лазеры для разнообразных эстетических применений, улучшения красоты. На втором месте оказались лазеры для хирургии. В операциях на сердце, на простате, в челюстно-лицевой хирургии лазерные технологии обеспечивают более высокие результаты, чем традиционные методы, и являются более дешёвыми. Будущее этих лазерных технологий выглядит год от года лучше и лучше. Роста продаж лазеров для офтальмологических и стоматологических применений в 2017 году не было. Лазерные операции нератомилеза (LASIK) и фоторефрактивной кератектомии (PRK) давно стали популярными. В 2007г. было сделано 1,5 млн таких операций, но затем их число постепенно уменьшилось более чем в 2 раза, и

продолжает снижаться. Освоение лазеров в стоматологии продолжает оставаться медленным процессом.

Так же, как и в течение многих предыдущих лет, «эстетические» применения лазеров остаются основным драйвером в медицинском сегменте лазерного рынка, который в 2017 г. достиг очередного рекордного уровня. Эти применения включают в себя удаление татуировок, морщин, шрамов и нежелательных волос, уменьшение жировых отложений («скульптурирование» тела), а также осветление кожи. США и Европа являются наибольшими рынками указанных услуг, Китай и Индия быстро приближаются к ним. Рынок эстетической лазерной медицины стал настолько привлекательным, что стимулирует вложения в такую медицину со стороны компаний, которые прежде не были с ним связаны. Согласно оценкам аналитиков Hologic объём продаж на рынке эстетической медицины превышает сегодня 2 млрд долл. в год и будет расти в ближайшие несколько лет со скоростью, измеряемой двузначными числами процентов. Продажи хирургических лазеров тоже выросли в 2017 году. На рынке появился хирургический аппарат XCAVATOR на основе волоконного лазера, который, как утверждает компания-производитель biolitec (ФРГ, Йена), обеспечивает самую быструю абляцию ткани при операциях по удалению доброкачественной гиперплазии простаты. Компания Philips (Нидерланды, Амстердам) за 2 млрд долл. приобрела компанию Spectranetics (США, Колорадо-Спрингс) – производителя единственной в мире системы на основе эксимерного лазера для лечения периферической и ишемической болезней сердца, что также свидетельствует об уверенности инвесторов в надёжности рынка лазерной медицины. Офтальмологические и стоматологические лазерные технологии, хотя и остаются популярными, не дали роста продаж лазеров в истекшем году. В 2017г. серьёзные инвестиции пришли в новые быстро развивающиеся области медицинской фотоники – нейрофотонику и оптогенетику. В октябре Национальный институт здравоохранения объявил о выделении 110 новых грантов на общую сумму в 169 млн долл. на исследование мозга с применением инновационных нейротехнологий (BRAIN Initiative). Принятый в конце 2016 г. «Закон о лечении в 21-м веке» предусматривает выделение 1,6 млрд долл. на программу BRAIN на период до 2026 года. Начатая в 2013 году, эта программа должна оснастить учёных инструментами и знаниями, необходимыми для

исследования и лечения таких заболеваний как болезнь Альцгеймера, шизофрении, аутизм, эпилепсия, травмы головного мозга. Оптогенетическая лазерная стимуляция с клеточным разрешением должна стать инструментом для исследования связи между работой нейронов и поведением человека.

Приборы и сенсоры

Включает лазеры, используемые в составе биомедицинских приборов и аналитических приборов (таких как спектрометры), для контроля полупроводниковых пластин и фотошаблонов, в датчиках плоскостей и уровней, в оптических мышках, считывателях штрих-кодов, системах распознавания жестов, лидарах и других сенсорных системах. Этот сегмент рынка лазеров будет очень сильно расти в ближайшие несколько лет благодаря широкому распространению лидаров и встраиваемых в смартфоны систем распознавания лиц и жестов. В этих применениях используется измерение времени «пролёта» луча для определения расстояний и используется чаще всего VCSEL-излучатели. Другими быстро растущими областями сенсорных применений лазеров являются спектроскопия, протонная цитометрия и УФ-контроль. Единственная область в этом сегменте рынка, где спрос на лазеры сокращается по очевидным причинам, это производство компьютерных мышек.

Сектор приборов и сенсоров на лазерном рынке по объёму продаж быстро догоняет медицинский и «исследовательско-военный» сектора и демонстрирует огромный потенциал роста, поскольку заметно растёт потребность в лазерах для таких устройств как лидары и 3D-сенсоры в смартфонах. Основанные на лазерах системы мониторинга состояния различных структур всё шире используются для контроля аэропортов, мостов, транспортных средств, автотрасс, железных дорог и других ответственных устройств и объектов инфраструктуры во всем мире, что тоже способствует росту спроса на «контрольно-измерительные» лазеры.

Внутри этого сегмента, похоже, лидирует медико-биологическая аппаратура. Такие её применения как проточная цитометрия и секвенирование генов обеспечивают рост доходов многим лазерным компаниям. Лазерная проточная цитометрия, в частности, дала возможность скрининга полезных наночастиц, что

в свою очередь, позволило разработать новые методы лечения ревматоидного артрита. Постоянно расширяется использование в медицинской диагностике спектроскопии – от обнаружения бактериальных инфекций в выдыхаемом воздухе до возможности обнаруживать раковые клетки во время хирургической операции. Ультракороткоимпульсные лазеры открыли новые исследовательские возможности в нейронауке. Ультрафиолетовые и терагерцовые лазеры испытывают растущий спрос благодаря своим применениям для контроля (инспекции) пространств, в частности, в полупроводниковой промышленности и на производстве солнечных ячеек. Интересной новой тенденцией в приборостроении является то, что разработчики и производители конечных устройств все чаще ищут не лазеры, а готовые подсистемы на основе лазеров. Такой подход сокращает их затраты – в плане времени и финансов – на создаваемый прибор и, если всё идёт хорошо, улучшает его технические характеристики и упрощает обслуживание. Но **это означает, что лазерные компании должны теперь поставлять им не просто лазеры, а именно подсистемы с постоянно улучшающимися характеристиками**, которые требуются для обеспечения повышенных возможностей конечных приборов.

На рынке лазерных сенсоров сегодня господствуют лидары и 3D-датчики глубины рельефа, встраиваемые в смартфоны. Применения этих сенсоров всё расширяются, что является хорошей информацией для производителей VCSEL-диодов. Один из таких производителей следующим образом перечислил наиболее популярные направления применений лидарных сенсоров в 2017 году:

- карты и картинки дренажа полей и потоков воды
- самоуправляемые автомобили и другие транспортные средства
- дроны
- коммерческая авиация
- автопилотируемые устройства

Встроенное в смартфон 3D-зондирование делает это устройство хорошо осведомлённым о своём непосредственном окружении, что позволяет использовать его для многих новых функций – от организации виртуальной реальности до построения гугловских карт с указанием направлений движения внутри зданий и проведения точных замеров при заказе одежды или обуви через интернет. Эта лазерная технология превращает обычный

смартфон в невероятно продвинутый 3D-сканер, и в результате ожидается, что рынок лазеров для сканеров глубин картины и построения изображений вырастет к 2022 году на 40% и достигнет 9 млрд долл.

Развлечения, дисплеи, печать

Включает лазеры, используемые в световых шоу, играх, цифровом кино, проекторах. Сюда же отнесены лазеры для коммерческих систем допечатанной подготовки и изготовления фильмов и фотографий. Лазеры всё шире используются в офисных проекторах, а также в цифровом кино. В 2018 г. Ожидается введение в эксплуатацию более 2800 комплектов нового оборудования для кинотеатров, использующих лазерную проекцию на экран. Второй активный потребитель лазеров в этом сегменте рынка - это световые шоу. Спрос на лазеры для этого применения в последние годы резко вырос из-за появления мощных «цветных» диодных лазеров, которые вытеснили здесь дорогие твердотельные. Тем не менее в 2017 году объём продаж лазеров для установок светового шоу несколько снизился – рост числа продаж не компенсировал снижения цен на эту технику. Но, по мнению экспертов, возможности на этом рынке далеко не исчерпаны.

В 2017г. рост объёма продаж лазеров в сегменте дисплеев и развлечений оказался самым быстрым среди всех остальных сегментов лазерного рынка за исключением связанного с обработкой материалов, который был еще быстрее.

Ключевой причиной для этого стало использование лазеров в дисплейных системах воспроизведения изображений, в первую очередь – в кинопроекторах. Кинотеатры должны теперь использовать именно лазерные проекторы, чтобы остаться конкурентоспособными на глобальном рынке. Такое положение очень выгодно компаниям – поставщикам соответствующего лазерного оборудования. Владельцы кинотеатров, установивших лазерные кинопроекторы, выигрывают от снижения затрат на обслуживание аппаратуры, а зрители – от большей яркости картины на экране, более сочных цветов, усиления ощущения 3-мерности изображения. Главным драйвером этого сегмента лазерного рынка является Китай, который быстро развивается и строит множество кинотеатров с самым современным лазерным оборудованием, пользующихся большой популярностью среди зрителей.

По некоторым оценкам, в Китае сегодня кинотеатров больше, чем в США. Коммерческие применения лазерных принтеров также увеличивают спрос на лазеры в этом сегменте рынка и стимулируют инвестиции в его поставщиков.

Эксперты полагают что в 2018 г. и далее продолжится рост объема продаж лазерных источников для литографии, уже в первые годы будущего десятилетия на рынок должно выйти следующее поколение литографических установок с источниками излучения в крайнем ультрафиолете (EUV).

Наиболее активный спрос на лазерные технологии ожидается в ключевых промышленных секторах, таких как автомобильный, аэрокосмический, энергетический, в связи и микроэлектронике.

Промышленные лазеры являются ключевыми компонентами в автоматизированных системах обработки материалов. Переход к децентрализованной системе производства, быстрое отслеживание колебаний цепочки поставок контролируется датчиками и компьютерами, а лазеры являются по своей природе гибким компонентом, который хорошо встраивается в современное, быстро изменяющееся, во многих случаях – индивидуальное и мелкосерийное производство, что обеспечивает хорошие перспективы применения лазерных технологий в промышленности.

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. Яковлев Е.Б. Взаимодействие лазерного излучения с веществом. Учебное пособие. Часть II. - СПб: НИУ ИТМО 2014.
7. Вейко В.П., Шахно Е.А. Лазерные технологии в задачах и примерах. Учебное пособие.- СПб: НИУ ИТМО 2014.
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, - М.: Высшая школа, 1988.
11. Вейко В.П. «Лазерные микро- и нанотехнологии в микроэлектронике». Опорный конспект лекций. 2012
12. Вейко В.П. Технологические лазеры и лазерное излучение. Опорный конспект лекций. СПб: СПбГУ ИТМО, 2008.
13. Вейко В.П. Петров А.А. Введение в лазерные технологии. Опорный конспект лекций. СПб: СПбГУ ИТМО, 2009.
14. Серебряков В.А. Лазерные технологии в медицине. Опорный конспект лекций. СПб: СПбГУ ИТМО, 2010
15. Шахно Е.А. Физические основы применения лазеров в медицине. Учебное пособие. - СПб: СПбГИТМО (ТУ), 2012.

Миссия университета - генерация передовых знаний, внедрение инновационных разработок и подготовка элитных кадров, способных действовать в условиях быстро меняющегося мира и обеспечивать опережающее развитие науки, технологий и других областей для содействия решению актуальных задач.

КАФЕДРА ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И СИСТЕМ

Лазерные технологии не случайно называют технологиями XXI века. Открытые в середине прошлого века, лазеры сегодня широко проникли в промышленность, связь, строительство, транспорт, медицину, биологию, экологию, искусство, шоу-бизнес и другие сферы жизни. Лазерные принтеры, оптические диски, лазерные торговые сканеры и лазерные шоу сегодня известны всем. Менее известны широкой публике, но не менее важны лазерные технологии в микроэлектронике для нанесения и структурирования тонких пленок, для резки и сварки брони, закалки инструментальных сталей, декоративной обработки дерева, камня и кожи, при лечении болезней глаз, сосудов, опухолей и т.д. Входят в жизнь лазерные аддитивные технологии, когда детали и устройства создаются за счет прямой трансформации виртуального (компьютерного) образа в материальный объект при взаимодействии лазерного излучения с веществом за счет его «добавления» - послойного наращивания.

На повестке дня сегодня разработка лазерного управляемого термоядерного синтеза, лазерных реактивных двигателей, автомобильных лазерных лидаров и многое другое.

История кафедры Лазерных технологий и систем

Кафедра Лазерных технологий и систем образована в 2016 году путем объединения трех кафедр - Лазерной техники и биомедицинской оптики (ЛТБМО), Лазерных технологий и экологического приборостроения (ЛТиЭП) и Оптике лазеров. (ОЛ). История кафедры начинается в 1963 году, когда, всего через три года после создания первого лазера, К.И. Крыловым была создана кафедра

квантовой радиоэлектроники, впоследствии получившая название «Кафедра лазерной техники и биомедицинской оптики».

Кафедра первой в России начала подготовку и выпуск специалистов по новому направлению в науке и технике - квантовой электронике, лазерной физике и технике. С самого начала создания кафедры серьёзное внимание было уделено фундаментальной подготовке в области математики и физики, физическому эксперименту, учебно-исследовательской работе студентов. В кратчайшие сроки была создана проблемная научно-исследовательская лаборатория, а затем и отраслевая лаборатория, что значительно расширило круг проводимых научных исследований и обеспечило их высокий научный уровень. Основными научными направлениями кафедры стали оптика лазеров, силовая и нелинейная оптика, радиооптика, неразрушающий контроль материалов и изделий, биомедицинская оптика.

В 1965 г. В.П. Вейко (учеником К.И. Крылова по кафедре спецфизики в ЛЭТИ) в ИТМО была организована лаборатория лазерных технологий (совместно с ЛКТБ «Светлана»), которая в 1975-76 г.г. была преобразована в отраслевую (двух министерств - Высшего образования и Электронной промышленности), а в дальнейшем - в 1980 г. на базе лаборатории была создана кафедра, которая впоследствии получила название кафедры «Лазерных технологий и экологического приборостроения». В 1976 г. научные работы отраслевой лаборатории по «Физическим основам лазерной обработки тонких пленок» удостоены Премии Президиума АН СССР за лучшую научную работу в области «Фундаментальных проблем микроэлектроники». В 1983 и 1984 г.г. - работы кафедры ЛТиЭП удостоены Премий Минвуза СССР за лучшую научную работу, а в 1986 г. совместно с рядом других организаций - Государственной Премии СССР в области науки и техники за «Разработку и широкое внедрение в промышленность процессов лазерной обработки тонких пленок».

В 1994 г. кафедры ЛТБМО и ЛТиЭП выступили инициаторами организации новой специальности «Лазерная техника и лазерные технологии», по которой в настоящее время ведут подготовку и систематический выпуск специалистов 11 вузов России. С 2000 г. лаборатория и кафедра ЛТиЭП признаны Ведущей научной школой Российской Федерации по «Фундаментальным основам лазерных микро- и нанотехнологий», этот статус ежегодно подтверждается

вплоть до 2015 г. В 2010 г. работы кафедры совместно с рядом других организаций удостоены Премии Правительства России в области образования за «Создание инновационной системы подготовки специалистов по лазерной обработке материалов».

За время существования кафедр ЛТБМО и ЛТиЭП подготовлено более двух тысяч специалистов в области лазерной техники и лазерных технологий, свыше 80 выпускников и сотрудников кафедр защитили кандидатские и докторские диссертации и более 20 имеют учёное звание профессора.

По результатам работ кафедр издано более 15 монографий. Результаты исследований сотрудников изложены более чем в 500 научных статьях и 50 патентах и авторских свидетельствах.

В настоящее время при кафедре действуют Международные Научные Лаборатории «Лазерных систем» под руководством проф. Е.А. Викторова и «Лазерных микро- и нано технологий и систем» под руководством проф. В.П. Вейко.

Вадим Павлович Вейко,
Андрей Анатольевич Петров,
Андрей Александрович Самохвалов

**Опорный конспект лекций по курсу
«Лазерные технологии».**
Раздел: Введение в лазерные технологии

Учебное пособие

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на ризографе