

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН**

**ГОЛОВНОЙ НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ ЦЕНТР ПО ОРГАНИЗАЦИИ
ПЕРЕПОДГОТОВКИ И ПОВЫШЕНИЯ КВАЛИФИКАЦИИ
ПЕДАГОГИЧЕСКИХ И РУКОВОДЯЩИХ КАДРОВ СИСТЕМЫ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ**

**ОТРАСЛЕВОЙ ЦЕНТР ПЕРЕПОДГОТОВКИ И ПОВЫШЕНИЯ
КВАЛИФИКАЦИИ ПЕДАГОГИЧЕСКИХ КАДРОВ ПРИ
ТАШКЕНТСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ ТЕХНИЧЕСКОМ
УНИВЕРСИТЕТЕ**

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС

по модулю

**“Современные лазерные
технологии”**

Тошкент – 2019

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН**

**ГОЛОВНОЙ НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ ЦЕНТР ПО
ОРГАНИЗАЦИИ ПЕРЕПОДГОТОВКИ И ПОВЫШЕНИЯ
КВАЛИФИКАЦИИ ПЕДАГОГИЧЕСКИХ И РУКОВОДЯЩИХ
КАДРОВ СИСТЕМЫ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**ОТРАСЛЕВОЙ ЦЕНТР ПЕРЕПОДГОТОВКИ И
ПОВЫШЕНИЯ КВАЛИФИКАЦИИ ПЕДАГОГИЧЕСКИХ
КАДРОВ ПРИ ТАШКЕНТСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ
ТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ**

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС

по модулю

«СОВРЕМЕННЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

ТАШКЕНТ -2019

Данный учебно-методический комплекс разработан на основании учебного плана и программы утвержденного приказом Министерства высшего и среднего специального образования Республики Узбекистан № 1023 от 2 ноября 2019 года

Разработал: И.А.Кулагин – профессор ТашГТУ

Рецензенты: Т.Усманов - академик АН РУз, зав.лабораторией Института ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз
Р.Р.Вильданов – доцент кафедры “Фотоника” физического факультета Национального университета Узбекистана

Данный учебно-методический комплекс рекомендован к изданию Советом Ташкентского государственного технического университета (протокол № 1 от 24 сентября 2019 года).

СОДЕРЖАНИЕ

I. Рабочая программа.....	5
II. Интерактивные методы обучения, используемые в модуле.....	11
III. Теоретические материалы	15
IV. Материалы практических занятий.....	71
V. Банк кейсов.....	72
VI. Глоссарий	74
VII. Используемая литература	81

I. РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

Введения

Программа составлена на основе указа ПФ-4732 от 12 июня 2015 года Президентом Республики Узбекистан «О мерах улучшения системы переподготовки и повышения квалификации руководящих и педагогических кадров высших учебных заведений», цель которой является улучшение, переподготовка и суть процесса повышения квалификации на основе современных требований, а так же поставленная задача регулярно повышать профессиональную компетентность педагогических кадров высших учебных заведений.

Рабочая программа включает в себя изучение теоретических и практических основ лазерных технологий, лазерной техники и систем, а также задач по проведению научно-исследовательских работ данной дисциплины.

Цели и задачи учебного модуля

Целью изучения модуля является формирование у слушателей представления об основах физики лазеров, взаимодействия лазерного излучения с различными материалами, современных и перспективных направлениях применения лазерных технологий в различных областях человеческой деятельности, современных типовых технологических процессах лазерной обработки, выполняемых на лазерных технологических комплексах.

Задачи модуля включают:

- физические и технико-конструкторские начала лазерной техники;
- основные физические процессы при взаимодействии лазерного излучения с материалами;
- технологические лазерные комплексы;
- технологические лазеры;
- организационные и технические меры по сведению лазерной опасности к минимуму;
- начала оптоволоконной техники;
- технологии лазерной обработки материалов;
- современные лазерные технологии создания новых перспективных материалов;
- применение лазерных технологий в биологии и медицине;
- ясное представление о потенциальной опасности лазерных установок для человека.

Требования, предъявляемые к знаниям, умениям и навыкам по модулю

Слушатель, в пределах задач модуля “Современные лазерные технологии”, должен:

знать и уметь:

- место и роль лазерных технологий в развитии человеческого общества на современном этапе;
- основные тенденции развития современных лазерных технологий;
- передовой отечественный и зарубежный научный опыт в профессиональной сфере деятельности;
- физические механизмы и принципы взаимодействия лазерного излучения с веществом,
- основные типы лазерных технологических систем;
- технику безопасности при работе с мощными лазерными источниками излучения;
- современные лазерные технологии обработки и создания материалов;
- самостоятельно использовать теоретические и практические знания для решения задач различных типов и различных уровней сложности, как в рамках изучаемой дисциплины, так и в других дисциплинах, использующих материалы данной дисциплины;
- анализировать полученные результаты.

владеть:

- символикой изучаемой дисциплины;
- терминологией изучаемой дисциплины;
- навыками практического использования математического аппарата дисциплины для решения различных задач, возникающих в дальнейшей учебной и профессиональной деятельности;
- навыками научного творчества.

владеть навыками:

- работы с современным лазерным технологическим оборудованием;
- пользования и применения на практике компьютерных и коммуникационных технологий;
- создания показательных презентаций для лекционных и практических занятий с применением современных педагогических и информационных технологий их применения на практике;
- создания и использования электронной учебно-методической базы по данному модулю дисциплин.

обладать компетенцией:

- способностью применять знания на практике;
- способностью приобретать новые знания, используя современные образовательные и информационные технологии;

- фундаментальной подготовкой по основам профессиональных знаний и готовностью к использованию их в профессиональной деятельности;
- навыками работы с компьютером;
- базовыми знаниями в областях информатики и современных информационных технологий, навыки использования программных средств и навыки работы в компьютерных сетях, умение создавать базы данных и использовать ресурсы Интернет;
- способностью к анализу и синтезу;
- умением понять поставленную задачу;
- умением формулировать результат;
- умением на основе анализа увидеть и корректно сформулировать результат.

Применение информационных и педагогических технологий

При проведении обучения запланировано использование современных методов, педагогических и информационно-коммуникативных технологий:

- лекции запланировано проводить в форме презентаций с использованием современных компьютерных технологий;
- практические занятия запланировано проводить с помощью интерактивных методов (кейс-стади, деловые игры, интервью и др.).

Взаимосвязь учебного модуля с другими модулями

Содержание модуля “Современные лазерные технологии” непосредственно связано с модулями учебной программы “Лазерные технологии и оптоэлектроника” и служит для решения вопросов внедрения в педагогическую деятельность проблематики и задач дисциплины, а также служит для объединения учебного процесса и производства путем внедрения новой техники и технологий данной отрасли.

Роль модуля в системе высшего образования

Происходящие коренные изменения в системе образования, а также научно-техническое развитие общества определяет роль модуля “Современные лазерные технологии” в системе высшего образования.

Организация эффективного и плодотворного образования путем создания новых инновационных технологий обучения модуля “Современные лазерные технологии” и их применение в системе образования помогает системно увеличить качество образования.

Распределение часов модуля

№	Темы модуля	Учебная нагрузка, час					
		Общие	Аудиторная учебная нагрузка				
			Итого	из них:			
				Теоретические	Практические	Внеаудиторное	
1	Основные физические принципы взаимодействия лазерного излучения с материалами	8	8	2	2	4	
2	Современные технологические лазерные системы	4	4	2	2		
3	Области применения современных лазерных технологий	4	4	2	2		
Общие		16	16	6	6	4	

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ СОДЕРЖАНИЕ МОДУЛЯ

1-тема. Основные физические принципы взаимодействия лазерного излучения с материалами

Основные особенности воздействия лазерного излучения на твердые среды. Основные физические процессы лазерных технологий. Поглощение света и преобразование энергии света в тепло. Физические процессы, возникающие на поверхности твердых тел при лазерном нагреве. Физика лазерного формирования тонкопленочной топологии. Лазерная очистка поверхностей твердых тел от частиц. Физические процессы лазерной обработки. Двумерная двухфазная модель лазерной обработки. Уравнение Клаузиуса–Клапейрона. Экспериментальные методы изучения физических процессов лазерных технологий.

2-тема. Современные технологические лазерные системы

Взаимосвязь между режимами обработки материалов и параметрами технологических лазеров. Основные параметры излучения технологических лазеров. Характеристики оптического качества излучения технологических лазеров. Эксплуатационные характеристики. Характерные параметры технологических лазеров. Области применения

важнейших типов лазеров. Основные особенности технологических лазеров. Перспективы развития технологических лазерных систем.

3-тема. Области применения современных лазерных технологий

Основные критические технологии и сравнительный уровень их современного развития. Основные области применения лазеров. Основные области применения лазеров в медицине. Трехмерный лазерный синтез объектов и изображений. Лазерные технологии дифракционных оптических элементов, оптической памяти и др. Лазерное структурирование поверхностей. Лазерное сверление. Лазерная полировка и очистка поверхностей. Лазерная очистка поверхности. Лазерные нанотехнологии. Космические применения лазеров. Лазерное противоракетное оружие. Основные направления развития лазерных технологий.

СОДЕРЖАНИЕ ПРАКТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ МОДУЛЯ

На практических занятиях у слушателей закрепляются изученные теоретические основы лазерных технологий, решаются практические задачи. Полученные знания и навыки подкрепляются учебниками и учебными пособиями, лекционными материалами, научными статьями и тезисами, раздаточным материалом.

1-практическое занятие:

Физические процессы лазерной обработки

Процессы, возникающие на поверхности твердых тел при лазерном нагреве. Уравнение теплопроводности.

2-практическое занятие:

Формирование тонкопленочной топологии

Лазерная абляция поверхности. Лазерное осаждение. Селективное травление.

3-практическое занятие:

Модели лазерной обработки

Одномерная и двумерные модели лазерной обработки. Давление отдачи при лазерной обработке. Экспериментальные результаты лазерной обработки.

Выездные занятия

Тема. Основные физические принципы взаимодействия лазерного излучения с материалами

Знакомство слушателей ООО. КОМПОЗИТ NANOTEKNOLOGIYA

Форма обучения

Форма обучения отражает такие внешние стороны учебного процесса, как способ его существования: порядок и режим; способ организации обучения: лекция, семинар, самостоятельная работа и пр;

способ организации совместной деятельности обучающего и обучающихся: фронтальная, коллективная, групповая, индивидуальная.

При обучении важным является выбор формы организации учебной деятельности участников:

- Коллективная – коллективное, совместное выполнение общего учебного задания всеми студентами. Характер полученного результата: итог коллективного творчества.
- Групповая – совместное выполнение единого задания в малых группах. Характер полученного результата: итог группового сотрудничества на основе вклада каждого.
- Индивидуальная – индивидуальное выполнение учебного задания. Характер полученного результата: итог индивидуального творчества. Обычно предшествует групповой работе.

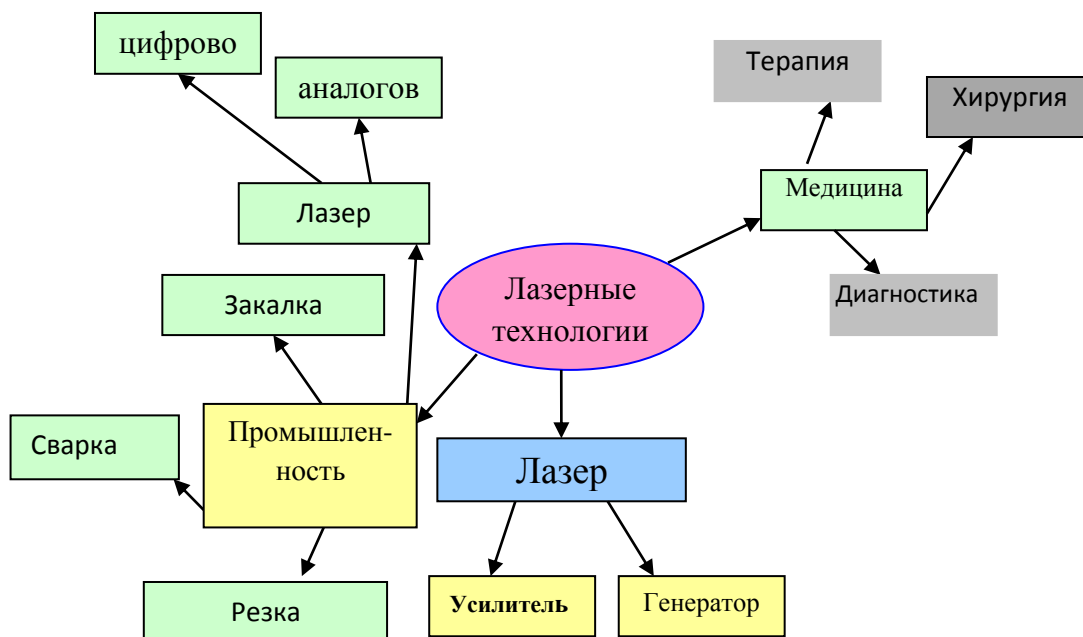
I. ИНТЕРАКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ОБУЧЕНИЯ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В МОДУЛЕ

Техника КЛАСТЕР

<p>2.3. Кластер Кластер - (пучок, связка).</p> <ul style="list-style-type: none">• Стимулирует актуализацию знаний, помогает свободно и открыто вовлекать в мыслительный процесс новые ассоциативные представления по теме.• Применяется на всех этапах учебного занятия.	<p>Знакомятся с «Правилами составления кластера». В центре классной доски или большого листа бумаги пишется ключевое слово / название темы из 1-2-х слов.</p>
	<p>По ассоциации с ключевым словом приписывают сбоку от него в кружках меньшего размера «спутники», соединяя их линиями с «главным». У этих «спутников» могут быть «малые спутники» и т.д. Записывают те слова или предложения, которые связаны с данной темой.</p>
	<p>Обмениваются кластерами для обсуждения.</p>

Правила составления кластера

1. Записывайте все, что приходит вам на ум. Не судите о качестве идей: просто записывайте их.
2. Не обращайте внимания на орфографию и другие факторы, сдерживающие письмо.
3. Не переставайте писать, пока не закончится отведенное время. Если идеи вдруг перестанут приходить вам на ум, то порисуйте на бумаге, пока у вас не появятся новые идеи.
4. Постарайтесь построить как можно больше связей. Не ограничивайте количество идей, их поток и связи между ними.



Метод «Мозговая атака» («Мозговой штурм»)

«Мозговая атака», «мозговой штурм» – это метод, при котором принимается любой ответ обучающегося на заданный вопрос. Важно не давать оценку высказываемым точкам зрения сразу, а принимать все и записывать мнение каждого на доске или листе бумаги. Участники должны знать, что от них не требуется обоснований или объяснений ответов.

«Мозговая атака» является эффективным методом при необходимости:

обсуждения спорных вопросов, стимулирования неуверенных обучаемых для принятия участия в обсуждении, сбора большого количества идей в течение короткого периода времени, выяснения информированности или подготовленности аудитории. Можно применять эту форму работы для получения обратной связи.

«Мозговой штурм» – это простой способ генерирования идей для разрешения проблемы. Во время мозгового штурма участники свободно обмениваются идеями по мере их возникновения, таким образом, что каждый может развивать чужие идеи.

Цель: выявление информированности или подготовленности аудитории в течение короткого периода времени

Задачи:

- формирование общего представления об уровне владения знаниями у слушателей, актуальными для занятия;
- развитие коммуникативных навыков (навыков общения).

Методика проведения:

1. Задать участникам определенную тему или вопрос для обсуждения.
2. Предложить высказать свои мысли по этому поводу.
3. Записывать все прозвучавшие высказывания (принимать их все без возражений). Допускаются уточнения высказываний, если они кажутся вам неясными (в любом случае записывайте идею так, как она прозвучала из уст участника).
4. Когда все идеи и суждения высказаны, нужно повторить, какое было дано задание, и перечислить все, что записано вами со слов участников.
5. Завершить работу, спросив участников, какие, по их мнению, выводы можно сделать из получившихся результатов и как это может быть связано с темой тренинга.

После завершения «мозговой атаки» (которая не должна занимать много времени, в среднем 4-5 минут), необходимо обсудить все варианты ответов, выбрать главные и второстепенные.

Применения метода Мозгового штурма к теме:

1. Какие основные преимущества лазерных методов обработки материалов?
2. От каких параметров излучения и материала зависит пространственный градиент температуры?
3. Интенсивность излучения неодимового лазера на длине волны 1064 нм - 10 МВт/см². Какова плотность фотонов? Значения каких фундаментальных величин необходимо знать для проведения расчетов?

Таблица Инсёрт



Таблица Инсерт

V	+	-	?
Здесь тезисно записываются термины и понятия, встречающиеся в тексте, которые уже были известны.	Отмечается все новое, что стало известно из текста.	Отмечаются противоречия. То есть, отмечается то, что идет вразрез со знаниями и убеждениями слушателя.	Перечисляются непонятные моменты, те, что требуют уточнения или вопросы, возникшие по мере прочтения текста.

Применения метода к теме:

V	+	-	?
Лазерные технологии широко применяются в медицине и биологии	Лазеры используются в офтальмологии для лечения отслоившейся сетчатки глаза	Лазерные процедуры обычно дают меньшие кровотечения, чем обычные операции.	Для заживления ран используются лазеры, излучающие в красном оптическом диапазоне.

III. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

1-тема: Основные физические принципы взаимодействия лазерного излучения с материалами

План:

1. Основные особенности воздействия лазерного излучения на твердые среды.

2. Модели лазерной обработки.

Ключевые слова: Лазерное излучение, испарение, нагревание, парообразование, лазерная манипуляция

1.1. Основные особенности воздействия лазерного излучения на твердые среды

Характеристики лазерного излучения

– высокая плотность фотонов

$$N(\text{см}^2 \cdot \text{с}) = I/h\nu \quad (1.1)$$

(при $I \sim 10^6 - 10^7$ Вт/см², $h = 6.62 \times 10^{-34}$ Дж·с, $\nu = 10^{15}$ Гц, плотностью фотонов более 10^{25} см²·с - возможность многофотонных процессов)

– высокое давление света

$$p_l = W(1 + R), \quad (1.2)$$

(где W — объемная плотность энергии излучения, R — коэффициент отражения поверхности при нормальном падении света).

– высокая напряженность электрического поля

(напряженность соизмерима с внутриатомной)

$$E_l = \left(\frac{4\pi I}{\varepsilon c} \right)^{1/2} \quad (1.3)$$

($E_l \sim 10^5 - 10^6$ В/см)

– высокая плотность мощности

$$I = \frac{E}{S\tau} \text{ [Дж/см}^2 \text{ сек (Вт/см}^2\text{)]} \quad (1.4)$$

(где E — энергия излучения, S — площадь сечения пучка, τ — длительность воздействия, которая может вызвать очень локальный нагрев на площади ~

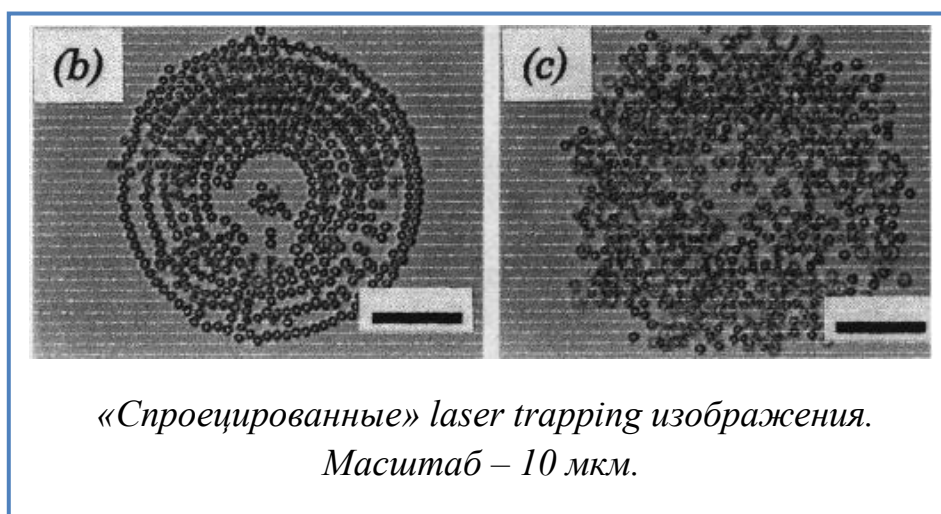
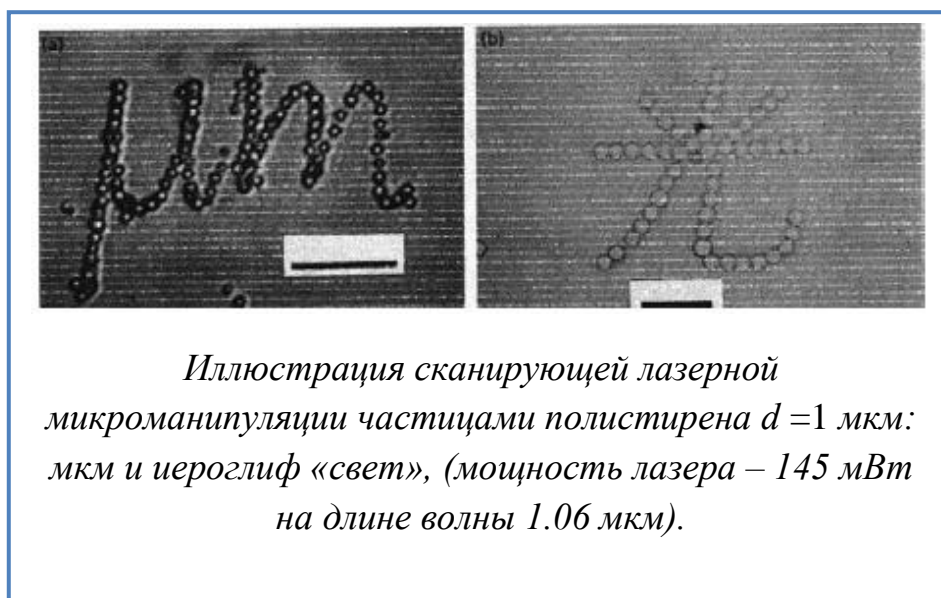
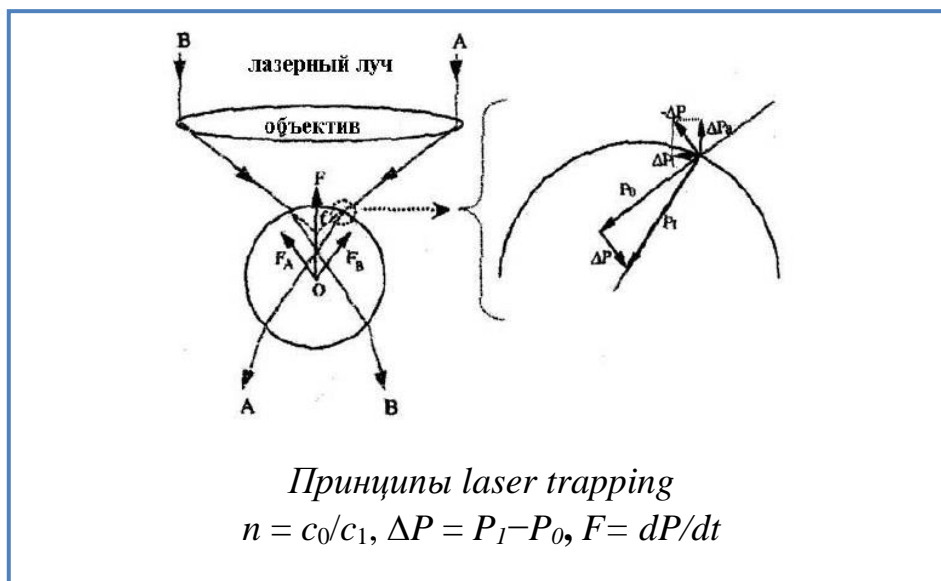
1 мкм² с большими градиентами температуры до 10⁹ К/см и скоростями до 10¹⁵ К/с)

Основные физические процессы лазерных технологий

- Испарение (и абляция в расплавленной фазе) — часто используемый процесс, который лежит в основе большинства промышленных технологий любых материалов в микроэлектронике, микромеханике и микрооптике; в настоящее время актуальными остаются проблемы точности и качества.
- Нагревание до температуры размягчения (или плавления) с последующим деформированием в вязко–текучей фазе (дополненное тем или иным механическим воздействием — вытяжкой, вращением и т.п.) применяется для изготовления ближнепольных оптических зондов, медицинского оптического инструментария и т.п.
- 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.
- Послойный синтез трехмерных объектов методом послойного наращивания, в том числе стереолитография, селективное лазерное спекание и послойная сборка из листовых материалов (laminated object manufacturing).

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

Лазерная манипуляция микрочастицами (laser trapping)



Режимы лазерной обработки

Тепловая обработка

$T < T_s$, температура плавления.

Сварка, переплавка, поверхностное легирование

$T_s \leq T \leq T_v$, температура испарения

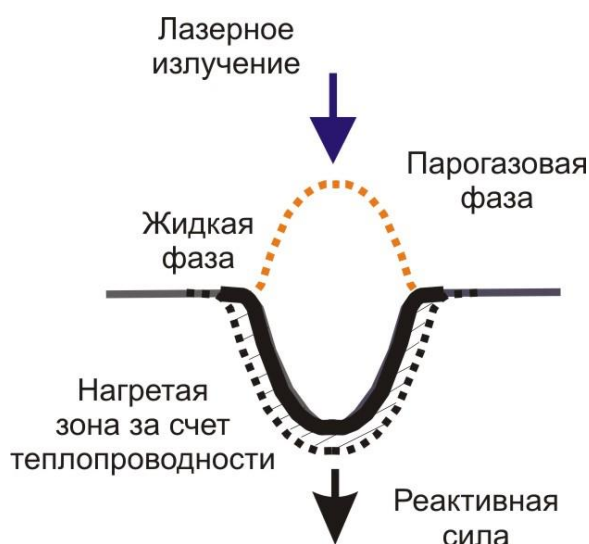
Резка, сверление, фрезерование, скрайбирование, удаление материала

$T < T_v$

Физика взаимодействия.

Фазы воздействия.

1. Отражение и поглощение.
2. Преобразование излучения в тепло, повышение температуры и фазовые превращения.
3. Перемещение зоны расплава и испарения в более глубокие области.



Баланс энергии

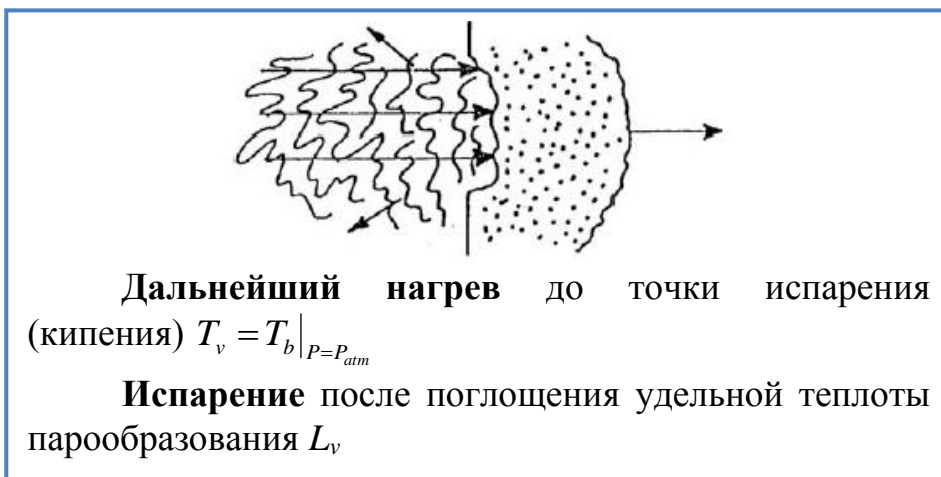
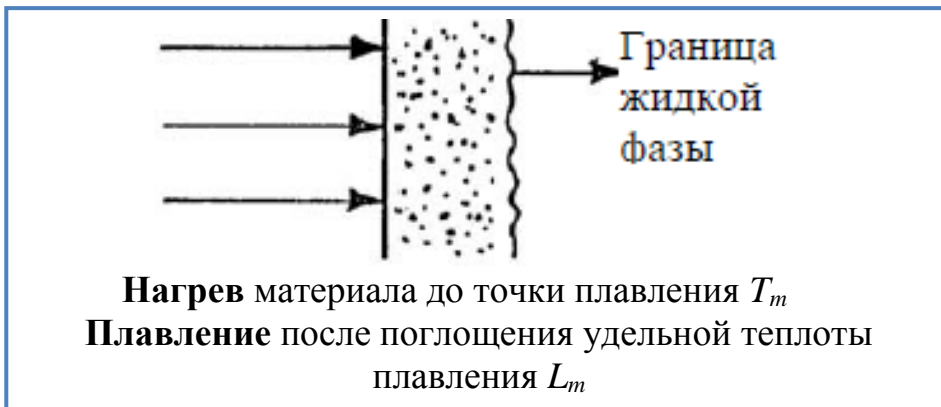
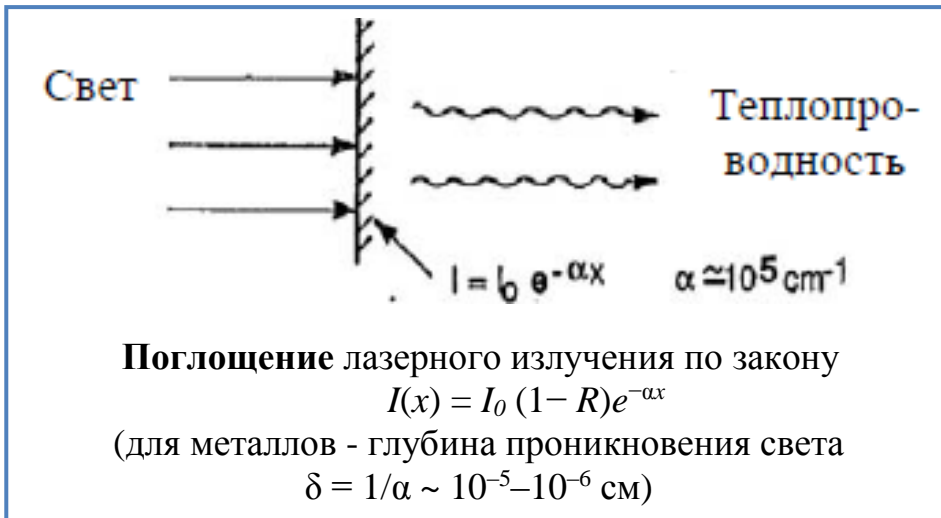
$$E_{las} = E_{ref} + E_{th.cond} + E_{ab.plasma} + E_{liquid} + E_{evap}$$

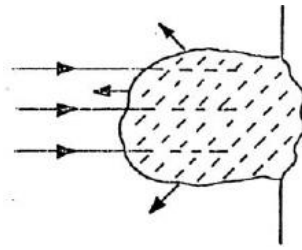
Поглощение $I = I_0 e^{-\alpha l}$

Обычно металлическая поверхность поглощает 30-40% энергии лазерного импульса на длине волны излучения 1,06 мкм поглощения происходит в тонком поверхностном слое ~0.1 мкм и за время $\sim 10^{-12}$ с формируется источник тепла, характеристики которого определяются параметрами лазерного излучения и состоянием поверхности.

Преобразование энергии света в тепло

Большинство лазерных технологий основаны на тепловом действии излучения





Движение испаряемой поверхности вглубь материала со скоростью V_0
Образование плазмы

Процессы, возникающие на поверхности твердых тел при лазерном нагреве

Эмиссионные процессы

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

Структурные процессы

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

Поверхностные химические реакции

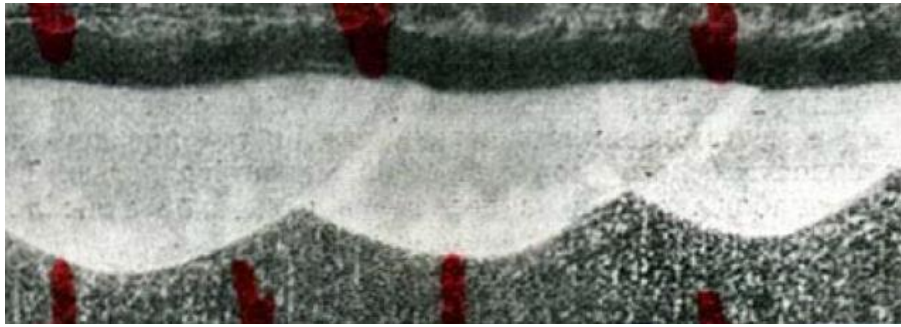
- локальное окисление металлов и полупроводников,
- восстановление окислов,
- термическое разложение металлоорганических соединений,
- полимеризация (деструкция) полимеров.

Термомеханические эффекты

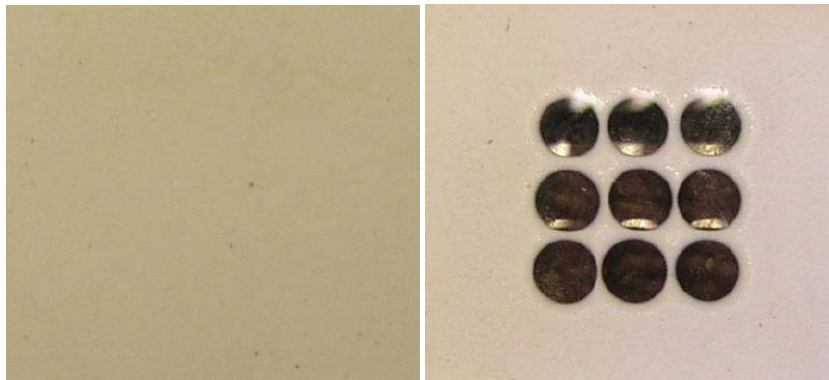
- тепловое расширение (включая импульсное),
- появление термонапряжений,
- генерация ударных волн в твердом теле и в воздухе,
- генерация ультразвука (дефектоскопия),
- оптический пробой в прозрачных диэлектриках

Фазовые переходы

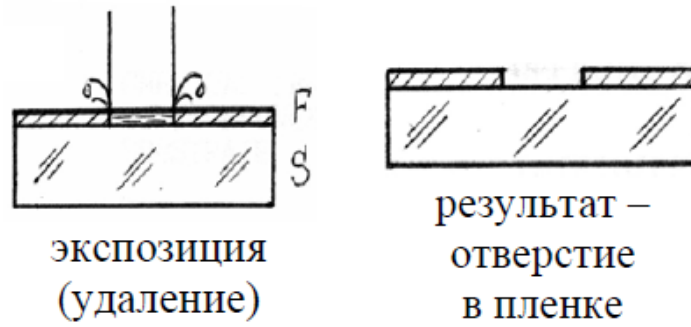
- плавление,
- испарение,
- воспламенение и горение,
- детонация активных и взрыв пассивных сред.



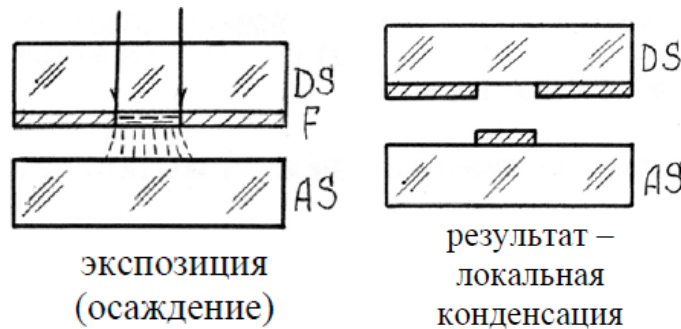
Лазерная закалка железоуглеродистых сталей
упрочненный слой в стали Р6М5: сверху — на воздухе, снизу — в среде аргона (X100)



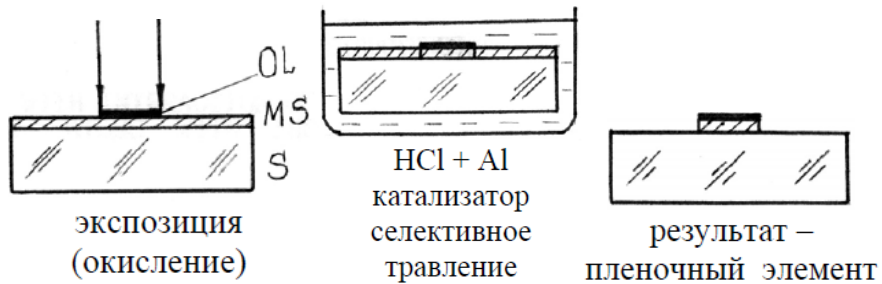
Лазерная аморфизация стеклокерамик
Слева - исходная пластина ситалла СТ-50-1 ($TiO_2-SiO_2, Al_2O_3, CaO, MgO$) (в отраженном свете), справа - та же пластина после лазерной аморфизации (формирование линзового растра)



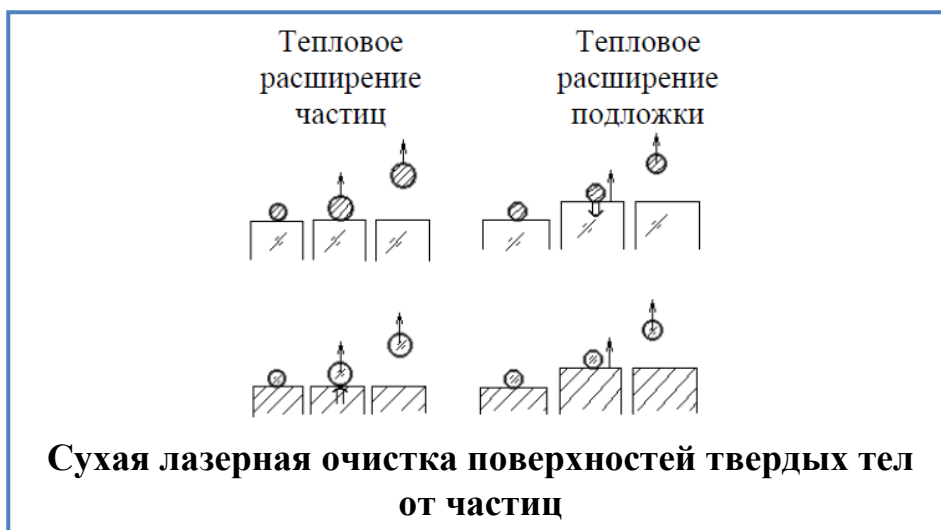
Лазерное формирование тонкопленочной топологии
Удаление пленок (испарение абляция)



Лазерное формирование тонкопленочной топологии
Локальное лазерное осаждение



Лазерное формирование тонкопленочной топологии
Экспозиция (осаждение)



1.2. Теплофизика лазерного нагрева

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

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

$$\frac{\partial T}{\partial t} - a \Delta T = \frac{Q(x, y, z, t)}{\rho c} \quad (1.10)$$

Δ — оператор Лапласа, Q — объемная плотность поглощенного светового потока, a — температуропроводность, ρ — плотность, c — теплоемкость. Чтобы решить это уравнение необходимо задать одно начальное условие, 6 граничных и определить $Q(x, y, z, t)$.

$$T_{x,y,z,0} = T_0, \quad T_{x=\infty,t} = T_{y=\infty,t} = T_{z=\infty,t} = T_0$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{0,t} = \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{0,t} = \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{0,t} = 0, \quad Q = I_0(1 - R)\alpha \exp(-\alpha x)$$

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

$$T = f \left[\begin{array}{l} I(1-R) - \text{поглощенная мощность} \\ \rho, c, a, R, \alpha - \text{теплофизические и оптические параметры} \\ x, y, z, t - \text{аргументы} \end{array} \right] \quad (1.11)$$

Так например, для металлов решение уравнения теплопроводности (1.10) при заданных начальных и граничных условиях для круглого источника тепла (лазерного пятна с радиусом r_0) будет:

$$T = \frac{2I_0(1-R)\sqrt{a\tau}}{k} \left[\frac{1}{\sqrt{\pi}} - \text{ierfc} \left(\frac{r_0}{2\sqrt{a\tau}} \right) \right] + T_0 \quad (1.12)$$

При импульсном нагреве $r_0 \gg \sqrt{a\tau}$

$$T = \frac{2I_0(1-R)\sqrt{a\tau}}{k\sqrt{\pi}} + T_0 \quad (1.13)$$

При непрерывном нагреве $r_0 \ll \sqrt{a\tau}$

$$T = \frac{I_0(1-R)r_0}{k} + T_0 \quad (1.14)$$

Формулы (1.13) и (1.14) позволяют посчитать так называемую пороговую (критическую) плотность мощности I_{th} , необходимую для нагревания поверхности до заданной температуры T :

$$I_{th}^{cw} = \frac{(T - T_0)k}{2(1-R)r_0} \quad (1.15)$$

$$I_{th}^{im} = \frac{(T - T_0)k\sqrt{\pi}}{2(1-R)\sqrt{a\tau}} \quad (1.16)$$

Необходимые данные для расчетов приведены в таблице 1.1, а пороги испарения для импульсного воздействия (Вт/м^2) представлены в таблице 1.2, а для непрерывного при радиусе $r_0=15$ мкм – в таблице 1.3.

Таблица 1.1

Материал	T_b, K	$k, Вт·К/м$	$A=(1-R)$ ($\lambda=1.06 \text{ мкм}$)	$a \cdot 10^{-3}, м^2/с$
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 1.2

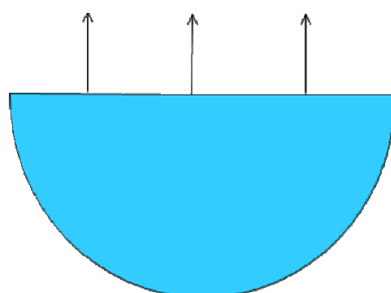
Длительность импульса	Al	Cu	W	Fe
$\tau=10^{-3} \text{ с}$	$2.4 \cdot 10^{10}$	$2.9 \cdot 10^{10}$	$1.0 \cdot 10^{10}$	$3.6 \cdot 10^9$
$\tau=10^{-7} \text{ с}$	$2.4 \cdot 10^{12}$	$2.9 \cdot 10^{12}$	$1.0 \cdot 10^{12}$	$3.6 \cdot 10^{11}$

Таблица 1.3

Материал	Al	Cu	W	Fe
I_{th}	$6.1 \cdot 10^{11}$	$7.3 \cdot 10^{11}$	$1.5 \cdot 10^{11}$	$4.9 \cdot 10^{10}$

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

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



Давление отдачи в схеме «лазерного» расплава и пара

$$P_P = 0.5 P_T$$

Контрольные вопросы

- 1- Перечислите характеристики лазерного излучения, определяющие возможное его технологическое применения
- 2- Перечислите основные физические процессы лазерных технологий
- 3- Чем отличаются режимы лазерной обработки материалов?
- 4- Перечислите возможные эмиссионные процессы структурные изменения материала при воздействии лазерного излучения.
- 5- Перечислите возможные структурные изменения материала при воздействии лазерного излучения.
- 6- Перечислите возможные химические реакции при воздействии лазерного излучения на материалы.
- 7- Перечислите возможные фазовые переходы при воздействии лазерного излучения на материалы.
- 8- Какие существуют методы лазерного формирования тонкопленочной топологии?
- 9- На каком эффекте основана лазерная очистка поверхности?
- 10- Из какого уравнения можно определить пороги испарения при лазерном воздействии?

Литературы:

1. В.Hitz, J.J.Ewing, J.Hecht. Introduction to Laser Technology. – N.Y.: IEEE Press, 2012.
2. D.L. Elliott. Ultraviolet Laser Technology and Applications. - N.Y.: Academic Press Inc., 2014
3. А.Г.Григорьянц. Основы лазерной обработки материалов. - М.: Машиностроение, 1989.
4. В.П.Вейко, А.А.Петров. Введение в лазерные технологии. - Санкт-Петербург, СПбГУ, 2009.
5. Handbook of Laser Technology and Application / Ed. C.E.Webb. – Bristol: IOP Publishing, Ltd., 2004. - V.I-III.
6. Справочник по лазерной технике/ под ред. А.П.Напартовича. – М., Энергоатомиздат, 1991.
7. А.Г.Григорьянц, И.Н.Шиганов. Оборудование и технология лазерной обработки материалов. – М.: Высшая школа, 1990.
8. С.И.Анисимов, Я.И.Имас, Г.С.Романов, Ю.В.Ходько. Действие излучения большой мощности на металлы - М.: Наука, 1980
9. Григорьянц А.Г., Сафонов А.Н. Лазерная техника и технология. В 7 кн. - М. Высшая школа, 1987 - 1988.
10. Промышленное применение лазеров/ под ред. Г.Кебнера. - М.: Машиностроение, 1988
11. G.Saxby. Practical Holography. - Bristol: IOP Publishing, Ltd., 2004.
12. U.Schnars, W.Jueptner. Digital Holography. – Berlin: Springer, 2005.
13. Клышко Д.Н. Физические основы квантовой электроники. – М., «Наука», 1986.

14. Быковский Ю.Л., Неволин В.Н., Фоминский В.Ю. Ионная и лазерная имплантация металлических материалов. – М.: Энергоатомиздат, 1991.
15. Handbook of Laser Material Processing / Ed. J.F. Ready. – N.Y.: Magnola Publishing, Inc., 2001
16. Применения лазеров/под ред. Тычинского В.П.- М.: Мир, 1984
17. Физическая энциклопедия, т.1-5. - М. Большая российская энциклопедия. (www.phys-encyclopedia.net)
18. Справочник по лазерам. / под ред. А.М. Прохорова. Т.1,2.– М., Советское радио. 1978.
19. Ганеев Р. Лазер одамлар хизматида. Тошкент, “Фан”, 1990.
20. Процессы лазерной сварки и термообработки / В.М. Андрияхин. – М.: Наука, 1988.
21. R.A.Ganeev, S.R.Kamalov, I.A.Kulagin, A.V.Zinoviev, V.I.Redkorechev, A.I.Ryasnyansky, R.I.Tugushev, T.Usmanov. "An automated set-up for investigation of nonlinear-optical characteristics of various materials by the Z-scan method". Instruments and Experimental Technique, V.45, No 6, P.810-815 (2002).
22. Гренишин С.Г., Березин Н.П., Виноградов К.М. и др. Терминологический словарь по оптике. Оптический журнал. 1996, Т.63, № 8. с.76-94.
23. Гренишин С.Г., Макушенко А.М. Перечень оптических терминов и понятий. Дополнение 1. Оптический журнал. - 1998. - Т 65, № 6, с. 90-106.
24. Квантовая электроника. Терминология. М.: Наука, 1976.
25. I.A.Kulagin, R.A.Ganeev, R.I.Tugushev, A.I.Ryasnyansky, T.Usmanov. “Analysis of third-order nonlinear susceptibilities of quadratic nonlinear optical crystals“. J. Opt. Soc. Am. B, V.23, .No.1, P.75-80 (2006)
26. D. Bailey, E. Wright. Practical Fiber Optics, Elsivier, 2005. pp. 320

2-тема. Современные технологические лазерные системы

План:

1. Особенности технологических лазеров.
2. Режимы работы технологических лазеров.

Ключевые слова: Технологические лазеры, режимы работы, характеристики, модуляция добротности, синхронизация мод

2.1. 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

Твердотельные лазеры.

Преимущества

- высокая удельная мощность,
 - высокое качество при большой мощности (TEM₀₀),
 - высокий КПД (с диодной накачкой) > 20%,
 - большая энергия (до кДж/импульс),
 - широкий диапазон длин волн,
 - широкий диапазон длительностей импульсов (от 10⁻² до 10⁻¹⁵ с),
 - совместимость длин волн с оптическим волокном,
 - возможность получения генерации в волокнах
- и высокие характеристики этих лазеров,
- большая яркость,
 - высокая надежность.

Основные виды твердотельных лазеров

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

Доминируют Nd:YAG лазеры

Длины волн: 1064, 1319, 532, 355, 266 нм (гармоники)

Мощность непрерывного излучения

(с ламповой накачкой):

10 – 1800 Вт (TEM₀₀ до 30 Вт)

Мощность непрерывного излучения

(с диодной накачкой):

1 мВт — 10 Вт, TEM₀₀

Мощность в импульсе (с ламповой накачкой):

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

Мощность в импульсе (с диодной накачкой):

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

Другие среды, активируемые Nd:

стекло, YLF (иттрий-литиевый фторид), GSGG (галлий-скандий-гадолиниевый гранат), александрит (Cr-BeAl₂O₄)

Другие материалы:

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

Перестраиваемые лазеры с регулируемой длиной волны:

александрит (720 – 780 нм), Ti:Сапфир (600-1100 нм)

Области применения:

обработка материалов,

медицина,

испытания и измерения под водой,

научно-исследовательские и

опытно-конструкторские разработки

Основные режимы работы твердотельных лазеров с оптической накачкой

Тип лазера	Режим работы	Длительность импульса, с
Nd-YAG	Свободная генерация	10 ⁻³ –10 ⁻⁴

Nd-YAG	Q-модуляция (акусто-оптическая, электрооптическая)	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

Кристалл	Диапазон длин волн λ , мкм	Режим работы		Средняя выходная мощность, Вт	Источники 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	Ar ⁺ -лазер/Имп. лампа
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
	Cr ³⁺ : KZnF ₃	785 ... 865	+		0.085
Kr ⁺ -лазер	Co: MgF ₂	1500 ... 2300	+	+	Nd:glass лазер
Nd: LaF ₃	172		+		
Ce: YLF	325		+		Лазер
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

Полупроводниковые лазеры

Преимущества:

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

Недостатки

- Плохое качество излучения —
высокая асимметричная расходимость

Волоконные лазеры

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

Преимущества:

- высокий КПД до 40 % и более от розетки,
- высокое качество (малая расходимость) излучения –до $M2 \approx 1.05$ при выходной мощности 100 Вт,
- возможность генерации как непрерывного, так и коротких (до нс) импульсов излучения с большой частотой (20 кГц и более),
- рекордно большие мощности излучения – до 50 кВт (в 2005 г.) –
- и это не предел,
- эффективность генерации на многих длинах волн (1.06 мкм (Nd, Yt), 1.56 мкм (Er), 1.75–2.0 мкм (Tu) и др.) для обработки материалов (1.06 мкм), медицины (1.75–2.0 мкм) и связи (1.56 мкм),
- удобство электрического управления временными и переключательными характеристиками,
- электрическая (по существу) накачка (диодов) электроэнергией с низким напряжением,

- естественная волоконная доставка излучения,
- высокая надежность и большой ресурс работы (более 1 млн. часов),
- высокая стабильность параметров $\pm 2\%$, устойчивость к механическим, тепловым, загрязненности окружающей среды (пыли) и другим воздействиям,
- высокая пространственная и спектральная яркость,
- малые массогабаритные размеры.

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

Основные характеристики:

Непрерывный режим

- выходная мощность — до 50 кВт;
- возможна модуляция выходного излучения с частотой 5 кГц;
- КПД — 25 - 30 %;
- выход — волокно 50-200 мкм;
- качество пучка — $M2 = 2.5 - 6$ мрад;
- срок службы — > 100000 часов

Импульсный режим:

- средняя выходная мощность — до 200 Вт;
- длительность импульса — 30–100 нс;
- энергия в импульсе — 0.5–2 мДж;
- частота следования импульсов — 20–100 кГц
- волоконный выход;
- внешнее цифровое управление;
- компактность с воздушным охлаждением;
- коллимированный выходной пучок с $M2 = 1.4 - 5$;
- срок службы — > 100000 часов;
- КПД — более 10 %.

2.2. Режимы работы технологических лазеров

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

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

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

–**CO₂–мощные лазеры** – электромеханическая модуляция (прерыватель – обтюратор, невыгодно по мощности)
 пассивная – светофильтры, примеси в смеси газов

–**CO₂–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,

аттосекундные, $\tau \sim 10^{-18}$ с

– **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_s .

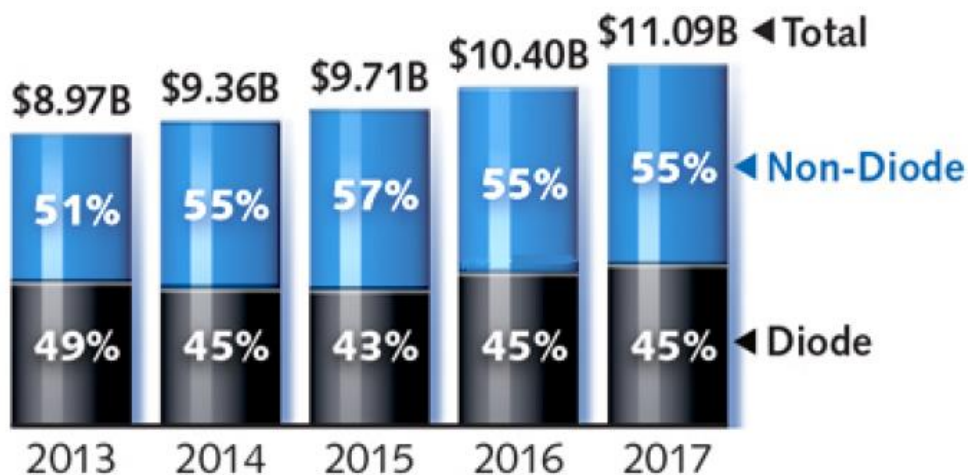
Различные длительности импульса лазеров и варианты их реализации приведены в Таблице 2.1.

Таблица 2.1

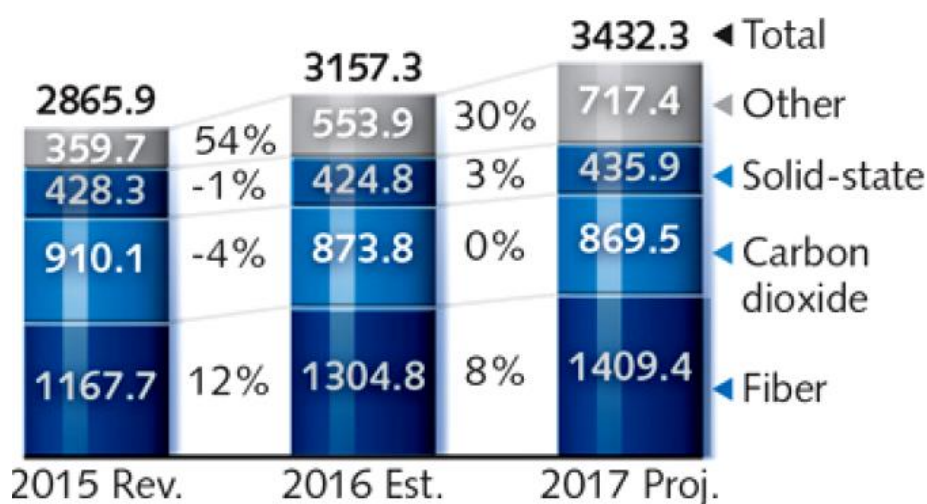
Длительность воздействия, с	Варианты реализации (тип лазера, режим модуляции)
Миллисекунды, 10^{-3}	Nd–YAG–лазер – режим свободной генерации, импульсный CO ₂ –лазер, сканирующий CO ₂ –лазер, сканирующий Nd–YAG–лазер, сканирующий Ar–ion–лазер
Микросекунды, 10^{-6}	Nd–YAG–лазер: акустооптическая модуляция,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

	самосинхронизации мод, экимерные лазеры
Аттосекунды, 10^{-18}	Ti-сапфир-лазер и генерация высших гармоник

Динамика продаж источников лазерного излучения



Динамика продаж промышленных лазеров



Гауссов пучок лазерного излучения в нелинейной среде

Нелинейное укороченное волновое уравнение.

$$\left[\frac{\partial}{\partial z} + \frac{i}{2k} \Delta_{\perp} + i\beta_1 |A(z, r)|^2 \right] A(z, r) = 0 \quad (2.1)$$

Гауссов пучок. Амплитуда.

$$A(r, z) = \frac{A_0}{f(z)} \exp\left(-\frac{r^2}{2f^2(z)a_0^2} - i\frac{g(z)}{2}k_0^2 r^2 - i\varphi(z)\right) \quad (2.2)$$

$$\beta_1 = 0$$

$$f^2(z) = 1 + \left(\frac{z}{L_{dif}}\right)^2, \quad (2.3)$$

Дифракционная длина $L_{dif} = ka_0^2$

$\beta_1 \neq 0$ Параксиальное приближение ($r \ll a_0$).

$$I(r, z) = |A(z, r)|^2 = f^{-2}(z)I_0 \left[1 - \frac{r^2}{f^2(z)a_0^2}\right] \quad (2.4)$$

$$f^2(z) = 1 + (L_{dif}^{-2} - L_{nl}^{-2})z^2 = 1 + \left(\frac{z}{L_{dif}}\right)^2 \left(1 - \frac{P_0}{P_{cr}}\right) \quad (2.5)$$

Нелинейная длина $L_{nl} = a_0(2n_0/n_2|A_0|^2)^{1/2}$

Критическая мощность самофокусировки $P_{cr} = c\lambda^2/16\pi^2 n_2$

Полная мощность излучения $P_0 = cn_0 a_0^2 |A_0|^2 / 2$

Самоканалирование $P_0 = P_{cr}$

Контрольные вопросы

- 1- Какие основные достоинства газовых лазеров?
- 2- Какие газовые лазеры чаще всего используются в технологических процессах?
- 3- Какие недостатки газовых лазеров?
- 4- Какие основные достоинства твердотельных лазеров?
- 5- Какие твердотельные лазеры чаще всего используются в технологических процессах?
- 6- Какие недостатки твердотельных лазеров?
- 7- Какие основные достоинства полупроводниковых лазеров?
- 8- Какие основные недостатки полупроводниковых лазеров?
- 9- Что представляют собой волоконные лазеры?
- 10- Чем объясняется бурный рост рынка волоконных лазеров?
- 11- Какие режимы работы лазеров используются в технологических процессах?

ЛИТЕРАТУРЫ

1. V.Hitz, J.J.Ewing, J.Hecht. Introduction to Laser Technology. – N.Y.: IEEE Press, 2012.
2. D.L. Elliott. Ultraviolet Laser Technology and Applications. - N.Y.: Academic Press Inc., 2014
3. А.Г.Григорьянц. Основы лазерной обработки материалов. - М.: Машиностроение, 1989.
4. В.П.Вейко, А.А.Петров. Введение в лазерные технологии. - Санкт-Петербург, СПбГУ, 2009.
5. Handbook of Laser Technology and Application / Ed. C.E.Webb. – Bristol: IOP Publishing, Ltd., 2004. - V.I-III.
6. Справочник по лазерной технике/ под ред. А.П.Напартовича. – М., Энергоатомиздат, 1991.
7. А.Г.Григорьянц, И.Н.Шиганов. Оборудование и технология лазерной обработки материалов. – М.: Высшая школа, 1990.
8. С.И.Анисимов, Я.И.Имас, Г.С.Романов, Ю.В.Ходько. Действие излучения большой мощности на металлы - М.: Наука, 1980
9. Григорьянц А.Г., Сафонов А.Н. Лазерная техника и технология. В 7 кн. - М. Высшая школа, 1987 - 1988.
10. Промышленное применение лазеров/ под ред. Г.Кебнера. - М.: Машиностроение, 1988

3-тема. Области применения современных лазерных технологий

План:

1. Основные области применения лазеров.
2. Направления развития лазерных технологий.

Ключевые слова: Коагуляция, голографическая интерферометрия, лазерная обработка материалов,

3.1. Основные области применения лазеров.

Лазерные технологии базируются на трех китах:



Лазерные технологии относятся к списку критически важных для независимого развития государства.

Основные области применения лазеров

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

Перспективные применения лазеров

Космос

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

Энергетика

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

Строительство

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

Экология — очистка среды

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

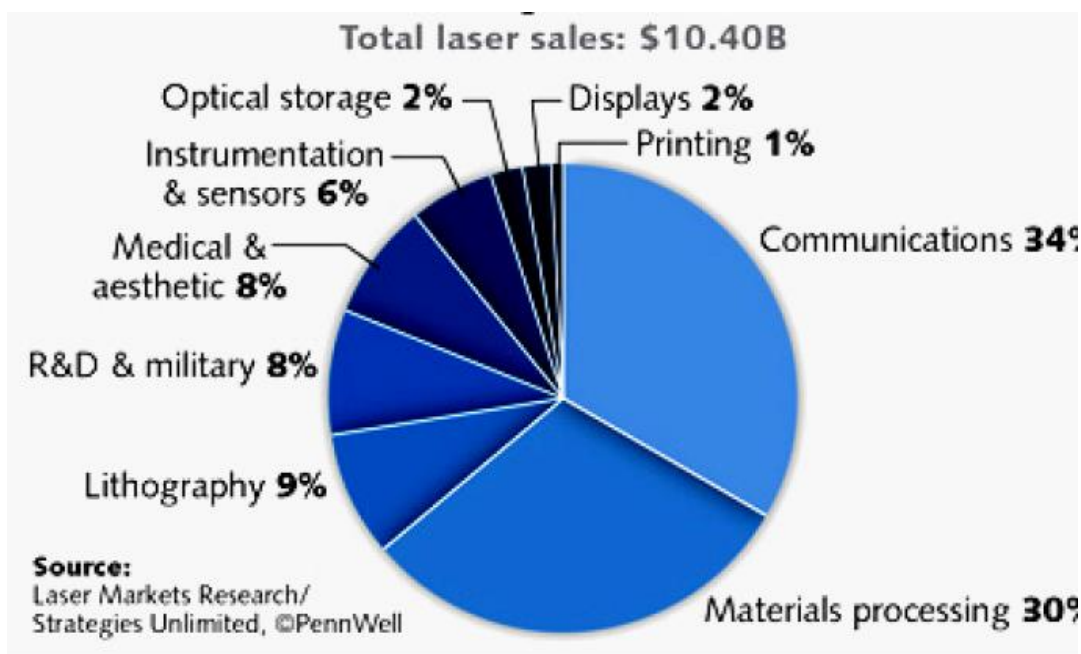
Лазерное оружие

- космическое – противоракетное, ослепляющее.

Наука

- различные области естественных наук и социальных наук.

Структура мирового рынка применения лазеров в 2016 г.



Лазерные технологии в производстве мобильных телефонов (по данным NEC—Nippon Electronic Corporation)



Лазерные технологии в производстве ноутбуков (по данным NEC-Nippon Electronic Corporation)



Лазерная резка

Для анализа образования и эволюции лазерной плазмы вблизи обрабатываемой поверхности полагается, что концентрация атомных частиц в зоне взаимодействия определяется термодинамическими параметрами плазменного образования вблизи поверхности. Отметим, что с одной стороны длительность греющего лазерного импульса превышает времена электрон-фононной ($\sim 1 - 10$ пс) и электрон-электронной (~ 0.01 пс) релаксации. С другой стороны используемая плотность мощности излучения превышает критическую плотность мощности, которая соответствует началу интенсивного испарения вещества (для используемых длительностей воздействия лазерного импульса на локальный участок поверхности $\sim 10^3 - 10^5$ Вт см⁻²), однако с учетом поглощательной способности поверхности много меньше плотностей мощности, соответствующих внутренней энергии образованного пара, превышающей теплоту испарения и при которых ионизация пара оказывает существенное влияние на процессы его нагревания и разлета. (Отсутствие значительного числа ионизированных частиц в наших экспериментах подтверждается спектром свечения пара). В этих условиях для анализа образования и нагрева лазерной плазмы возможно использование так называемой тепловой модели газодинамическими начальными условиями. В рамках тепловой модели концентрация частиц и температура пара определяется законами сохранения энергии:

$$I_p = j_v \left(\lambda_s + \frac{5}{2} kT_v + \frac{mu^2}{2} \right) \quad (3.1)$$

и потока пара и концентрацией насыщенного пара вблизи поверхности:

$$j_v = n_0 v_0 = nu \quad (3.2)$$

здесь j_v , n , u и T_v – плотность потока, концентрация, скорость и температура газа, λ_s – энергия связи атомных частиц в конденсированной фазе, m – масса атомных частиц, n_0 – число частиц в единице объема конденсированной фазы, v_0 – скорость волны испарения, движущейся в глубь твердого тела, I_s – плотность мощности лазерного излучения, поглощенная нагреваемым телом.

При низких концентрациях плазмы (низких уровнях интенсивности) из-за сравнимости длительности импульса со временем установления профиля концентрации ($\sim l'/v'$, здесь l' и v' – длина свободного пробега и скорость частиц вблизи поверхности) необходимо проводить анализ с учетом нестационарности. Также задача усложняется необходимостью анализа пространственного изменения функции распределения. Решение подобных задач требует привлечения значительных вычислительных

ресурсов. В нашей работе мы ограничимся рассмотрением изменения термодинамических характеристик.

Связь между тепловыми параметрами поверхности и пара определяется на основе решения кинетического уравнения с газодинамическими граничными условиями. Представляя интеграл столкновений в релаксационном виде

$$\left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_c = \frac{f_0 - f}{\tau} \quad (3.3)$$

решение уравнения Больцмана:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \mathbf{v} \frac{\partial f}{\partial \mathbf{r}} = \left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_c \quad (3.4)$$

можно значительно упростить. Здесь f – функция распределения, f_0 – равновесная функция распределения частиц, τ – время релаксации. Функция f_0 является максвелловской в системе координат, движущейся вместе с газом, и выбирается с учетом сохранения потока частиц, импульса и энергии. Полагая время релаксации постоянным, ограничиваясь одномерным приближением и используя законы сохранения потока, импульса и энергии, из (3) и (4) можно получить следующую связь между термодинамическими параметрами поверхности и газа: $T_v = 0.65T_0$ и $n = 0.31n_0$. На основе полученных соотношений и при использовании эйнштейновской модели твердого тела:

$$n_0 = \left(\frac{mkv_d^2}{2\pi\hbar^2T_0}\right)^{3/2} \exp\left(-\frac{\lambda_s}{kT_0} - 1\right) \quad (3.5)$$

из (1) – (2) с учетом полученных соотношений между термодинамическими параметрами плазмы и поверхности твердого тела можно получить соотношения, связывающие термодинамические параметров образующейся плазмы и плотность мощности лазерного излучения, поглощаемой поверхностью.

Температура поверхности и интенсивность лазерного излучения, поглощенного поверхностью, связаны соотношением:

$$I_s = BMv_d^3 \frac{(kT_0 + C\lambda_s)}{kT_0} \exp\left(-\frac{\lambda_s}{kT_0}\right) \quad (3.6)$$

здесь M – вес частицы в атомных единицах, v_d – частота Дебая, A, B и C – числовые параметры. Если используемые величины выражены в системе

СГСЕ, то значения числовых параметров следующие: $A = 4.0 \times 10^{-36}$, $B = 7.0 \times 10^{-24}$ и $C = 0.45$. Отметим, что здесь интенсивность, концентрация и температура является функциями времени. В проведенных нами расчетах полагалось, что поглощательная способность поверхности определяется ее температурой: $a + bT_o / (1 + T_o / T_{sat})$.

Плотность частиц вблизи поверхности, плотность потока, температура и скорость частиц определяется следующим образом:

$$n = A \left(\frac{M v_D^2}{k T_0} \right)^{3/2} \exp \left(- \frac{\lambda_s}{k T_0} \right), \quad (3.7)$$

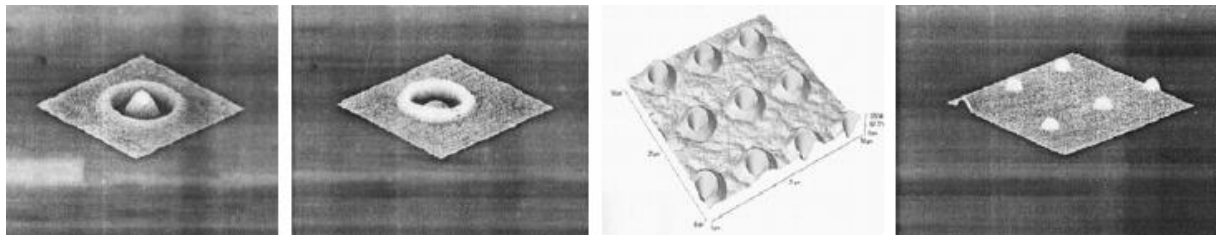
$$j_s = I_s / (\lambda_s + 2.2 k T_0) \quad (3.8)$$

$$u = D \left(\frac{k T_0}{M} \right)^{1/2} \quad (3.9)$$

здесь численный коэффициент $D = 0.81 \times 10^{12}$.

Лазерное микроструктурирование поверхностей

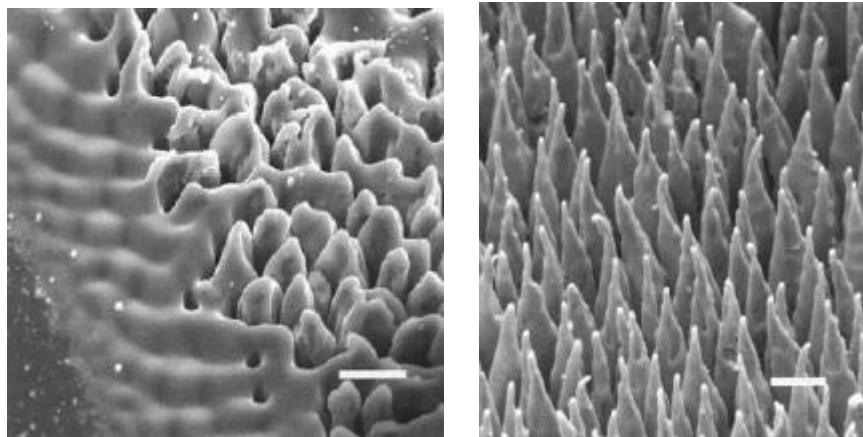
Давление паров, гидродинамическая неустойчивость и неоднородность поверхностного натяжения при лазерной абляции могут изменить форму поверхности ванны расплава и это приводит к появлению поверхностных структур различной формы. Все эти явления можно использовать для изменения топологии поверхности. В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



Фотографии, сделанные на атомно-силовом микроскопе, показывающие разнообразные формы нанобампов» на аморфном никель–фосфорном металлическом диске (три изображения слева) и стеклянной подложке (справа).

Похожие на колонны структуры могут быть образованы на поверхности твердого тела (монокристаллах Si и Ge, поликристаллическом Ti) при многократном воздействии лазера на парах меди (наносекундные импульсы). Такая структурированная поверхность имеет широкий спектр возможных применений. Например, измененная поверхность может быть использована в изготовлении солнечных батарей, вместо антиотражающих

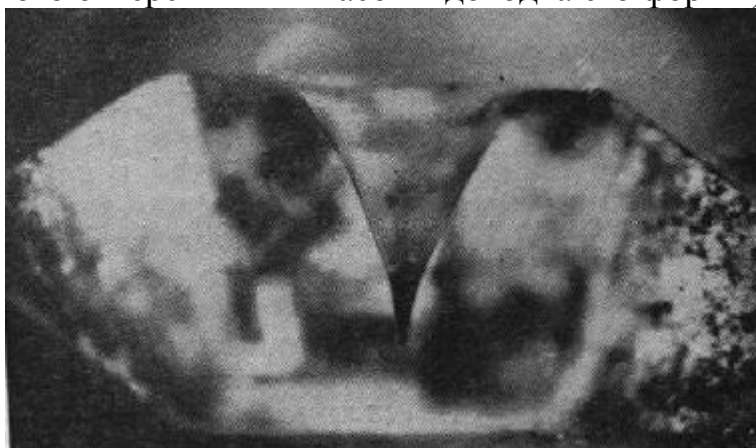
слоев. 16 Лазерное структурирование поверхности твердого тела ведет к заметному росту её удельной поверхности, который представляет потенциальный интерес в катализе и датчиках. Структурированная лазером поверхность биосовместимого металлического сплава представляет интерес в медицине и биологии.



При многократном воздействии импульсов Si- лазера поверхностная структура кремния преобразуется в набор микроконусов (слева); поверхностная структура монокристалла германия преобразуется в коническую структуру (справа)

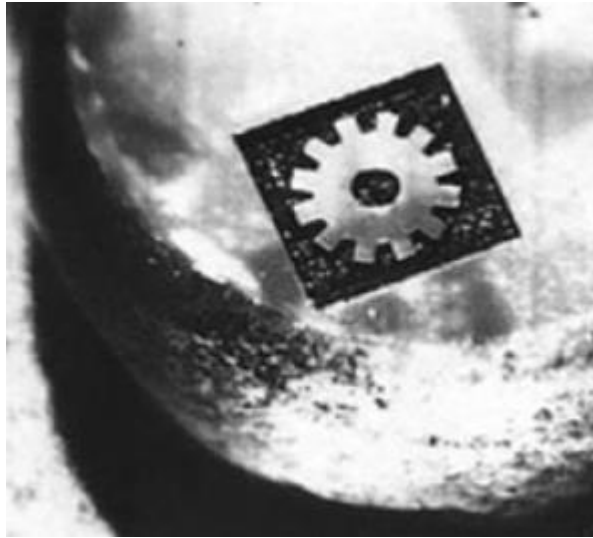
Лазерное сверление микроотверстий в алмазных фильерах для волочения проволоки

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

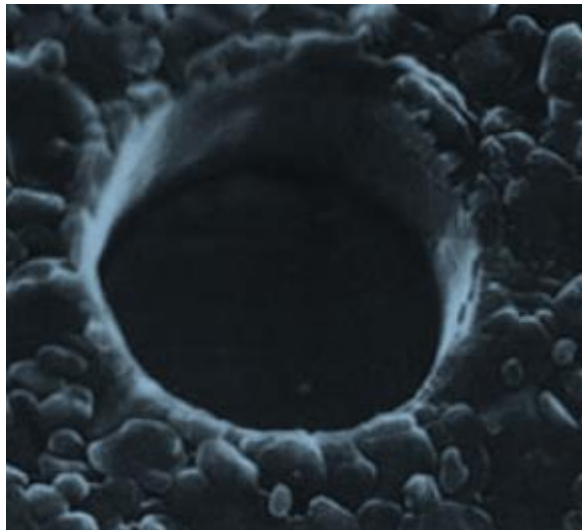


Фотография алмазной фильеры на одном из этапов сверления микроотверстия (толщина алмаза 1.6 мм). Время лазерного сверления 5-8 минут.

Лазерная микрообработка



300 микронная 3D шестерня в алмазе



Микроотверстие диаметром 300 микрон в керамике Al_2O_3



Змеевидный образец с шириной линии 30 мкм в стекле

Лазерная сварка

Лазерная сварка – технологический процесс получения неразъёмного соединения частей изделия путем местного сплавления металла этих частей по их примыкающим поверхностям, в результате чего возникает прочное сцепление, основанное на межатомном взаимодействии, причем источником нагрева служит сконцентрированный поток лазерного излучения. Для осуществления лазерной сварки необходимо иметь плотность мощности $10^5 \div 10^7$ Вт/см².

По технологическим признакам различают лазерную сварку материалов малых толщин и лазерную сварку с глубоким плавлением.

Сварка материалов малых толщин (до 1 мм) осуществляется в режимах пониженной мощности, достаточной для плавления металла, но без его интенсивного испарения. Сварка ведется как сплошными швами (непрерывный режим), так и отдельными точками с перекрытием (импульсно-периодический режим).

При сварке с глубоким плавлением соединяют материалы толщиной более 1 мм. Процесс осуществляется как в непрерывном, так и в импульсно - периодическом режимах. Скорость процесса сварки зависит от величины мощности и материала и в непрерывном режиме может достигать 30-40 мм/с. Импульсно-периодический режим отличается более высокой энергетической эффективностью плавления, однако, скорость сварки в этом случае на порядок ниже.

В зависимости от конструктивных особенностей свариваемых деталей сварка может осуществляться с использованием присадочной проволоки, которая может служить как для заполнения шва, так и для локального легирования с целью увеличения прочности сварного соединения.

Практически во всех случаях используется защита шва от окисления, в частности, путем поддува в зону сварки инертных газов.

Основное преимущество лазерной сварки состоит в том, что, благодаря высокой концентрации энергии и малому пятну нагрева объём сварочной ванны (расплава) невелик, что положительно сказывается на ряде характеристик как сварного шва, так и изделия в целом. В первую очередь, уменьшение в 2-5 раз ширины шва позволяет увеличить ассортимент свариваемых деталей, поскольку снимаются ограничения на место расположения шва как с точки зрения тепловых воздействий, так и с точки зрения компактности. Помимо этого, снижения объёма расплава и получение швов с большим отношением глубины к ширине (примерно на порядок выше, чем при дуговой сварке) позволяет существенно уменьшить деформации свариваемых деталей, и как следствие, сэкономить металл в результате уменьшения допусков. Малый объём расплава и специфическая форма шва также улучшают условия кристаллизации, что способствует повышению его механических характеристик.

Жесткий тепловой цикл с высокими скоростями нагрева и охлаждения позволяет существенно сократить зону теплового воздействия, что исключает фазовые и структурные превращения в околошовной зоне, приводящие к разупрочнению, трещинообразованию, снижению коррозионной стойкости.

На основе лазерных технологий возможна сварка практически всех основных групп конструкционных материалов: сталей, титановых, алюминиевых и магниевых сплавов.

Кроме того, эффективное использование лазерной сварки для соединения разнородных металлов, склонных к образованию интерметаллических соединений, и композиционных материалов на металлической основе. Точное регулирование режимов сварки в широком диапазоне позволяет контролировать время контакта жидких фаз в процессе их взаимодействия.

Вышеперечисленные свойства лазерной сварки ставят этот процесс в ряд эффективных современных технологий, сфера применений которых в недалёком будущем охватит значительную часть различных производств.

Как отмечалось выше, лазерная сварка по технологическим признакам разделяется на сварку материалов малых толщин и сварку с глубоким проплавлением. Эти два процесса принципиально отличаются по механизму образования сварного соединения.

Плавление происходит при определенной плотности мощности, превышающей пороговую, достаточную для достижения температуры плавления. Величина этой мощности $E_1 = (3 \times 10^3 \div 2 \times 10^4) \text{ Вт/см}^2$. Критическая плотность мощности, при которой начинается кипение металла и его выброс из зоны обработки, $E_2 = (5 \times 10^4 \div 10^5) \text{ Вт/см}^2$. Условием, обеспечивающим качественную лазерную сварку металлов, является следующее: $E_1 < E_{\text{св}} < E_2$, где $E_{\text{св}}$ – плотность мощности при сварке.

При сварке материалов малых толщин реализуется механизм теплопроводности. Процесс сварки в этом случае связан с поверхностным нагревом металла лазерным излучением. При плотности мощности вблизи нижней границы вышеприведенного неравенства попадающая на поверхность энергия благодаря теплопроводности материала распространяется на определенную глубину и нагревает его на этой глубине до температуры плавления. Нагрев продолжается до тех пор, пока воздействует лазерное излучение. После этого расплавленный металл застывает, повторяя форму изотермы плавления. Сварка с реализацией механизма теплопроводности обеспечивает глубину плавления до 1 мм.

Для сварки материалов больших толщин используется механизм глубокого плавления, физическая сущность которого заключается в следующем. Лазерное излучение с плотностью мощности вблизи верхней границы вышеприведенного неравенства сначала нагревает поверхность металла благодаря теплопроводности, как и в предыдущем случае. Однако, величина подводимой энергии при такой плотности такова, что она

поступает на поверхность быстрее, чем отводится путем теплопроводности. В результате металл нагревается до интенсивного испарения. Импульсом отдачи паров расплавленный металл выбрасывается из ванны и при этом ещё частично испаряется, что приводит к образованию лунки, в которую внедряется лазерный луч. Из-за непрерывности его воздействия материал на дне лунки вновь испаряется, образуя новую лунку.

Подобный процесс повторяется неоднократно и приводит к соединению микрополостей в канал, заполненный парами расплавленного металла. Существование канала дает возможность лазерному лучу проникать на значительную глубину. Чем больше время существования канала, тем глубже проникает лазерное излучение и тем больше глубина плавления. Расплавленный металл на стенках канала удерживается силами давления паров испаряющегося металла и силами поверхностного натяжения расплавленного металла. В процессе сварки источник теплоты перемещается, а расплавленный металл перетекает по боковым стенкам в хвост ванны, где затвердевает и образует сварной шов. Этот механизм позволил осуществить плавление лазерным лучом на глубину до нескольких десятков миллиметров (рисунок 1).

Сочетание длительности и интенсивностей.

Сварка непрерывным излучением, сварка плавлением глубоких и малых толщин. 10^5-10^6 Вт/см², $\tau > 10^{-2}$ с

Импульсная сварка глубокого проплавления. 10^6-10^7 Вт/см², $\tau < 10^{-3}$ с

Точечная сварка для малых толщин. 10^5-10^6 Вт/см², 10^{-3} с $< \tau < 10^{-2}$ с

Для обеспечения эффективного плавления время воздействия определяется формулой:

$$\tau = \frac{h^2}{4a_t},$$

Здесь h , a_t - глубина проплава и коэффициент температуропроводности.

$$a_t = \frac{\lambda_T}{c_\gamma},$$

Где λ_T, c_γ - теплопроводность и объемная теплоемкость.

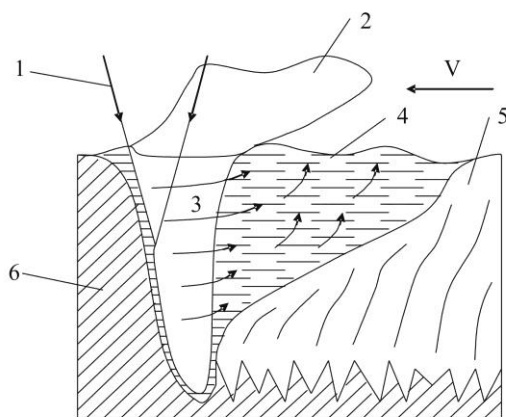
$$c_\gamma = c_p \rho,$$

Где c_p, ρ - удельная теплоемкость и плотность.

Для железа $h=1$ мм $\tau=10^{-2}$ с.

При разработке технологии сварки необходимо установить взаимосвязь режимов процесса с критериями, определяющими качество сварного соединения. Эти критерии весьма разнообразны и зависят в каждом конкретном случае от технических требований к изделию. Наиболее общими критериями являются геометрические размеры шва или литой зоны; механические свойства соединения; наличие внутренних и внешних дефектов; химический состав и структура шва.

При сварке металлов малых толщин импульсным излучением образовывается соединение в виде точки или в виде сварного шва, состоящего из ряда точек с перекрытием.



- 1 – лазерный луч, 2 – плазменный факел, 3 – парогазовый канал,
4 – хвостовая часть сварочной ванны, 5 – закристаллизовавшийся металл, 6 – свариваемый металл

Схема продольного сечения сварочной ванны.

Основными параметрами импульсной сварки являются: W – энергия в импульсе, Дж; τ – длительность импульса, мс; d – диаметр сфокусированного луча, мм; f – частота следования импульсов. Если процесс ведется непрерывным излучением, то к основным параметрам также относят: v – скорость сварки, мм/с; P – мощность излучения, Вт. Основными параметрами, определяющими размеры литой зоны в поперечном сечении, являются глубина плавления h и диаметр литой точки D . От оптимальности размеров литой зоны зависят свойства сварного соединения.

В первом приближении глубина проплава

$$h = \beta P^{1/2} v^{-\gamma}$$

γ , β – коэффициенты, определяемые из эксперимента.

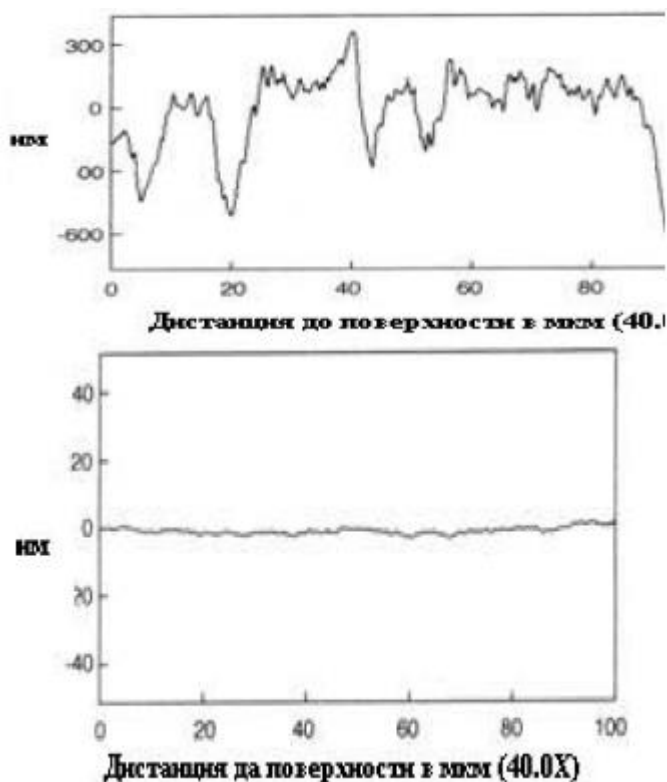
На параметры литой зоны оказывают влияние все вышеприведенные параметры режима сварки. Кроме того, при одних и тех же параметрах для различных материалов вследствие различия их теплофизических свойств

размеры литой зоны различны. Однако, характер этих зависимостей одинаков для большинства металлов.

С увеличением энергии импульса W увеличиваются глубина h и диаметр D литой зоны, но до тех пор, пока не начнут образовываться выбросы металла. С ростом W прочность соединения растет совместно с ростом объёма расплавленной точки. После появления выбросов металла уменьшается площадь сечения сварной точки и, как следствие, прочность соединения. Площадь сечения точки и прочность соединения снижаются также с уменьшением длительности импульса τ . Наиболее оптимальным является $\tau = 5 \div 10$ мс.

Лазерная полировка оптических поверхностей

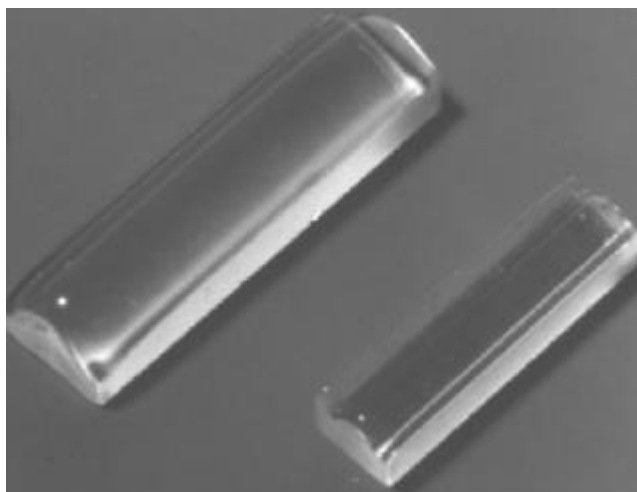
Физическая идея лазерной полировки стеклянной поверхности сходна с огневой полировкой стекла: при лазерном нагреве вязкость стекла уменьшается, а силы поверхностного натяжения стремятся минимизировать свободную (поверхностную) энергию и соответственно, объем и шероховатость поверхности. Проблемы, которые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



Лазерная полировка стекла: соответствующий измеренный профиль после механической (сверху) и лазерной (снизу) обработки стеклянных образцов.

Лазерная асферизация оптических поверхностей

Материалы- термостойкое стекло (кварцевое стекло) (ТКС ~ 10-5–10-6 К-1) или другие стекла с предварительным подогревом

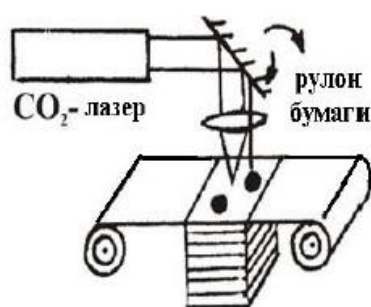


Фотографии асферических цилиндрических линз после лазерно-плазменной обработки (лазерное профилирование одновременно с плазменной полировкой)

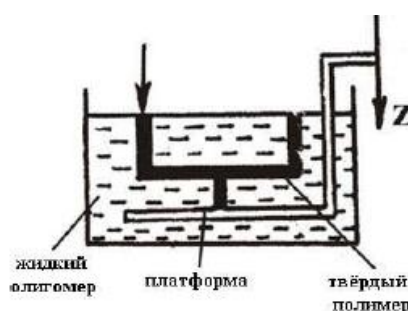
Лазерная очистка поверхности

Может производиться дистанционно, в условиях музейных интерьеров, в труднодоступных местах с помощью волоконной доставки излучения, а также локально -в микроэлектронике.

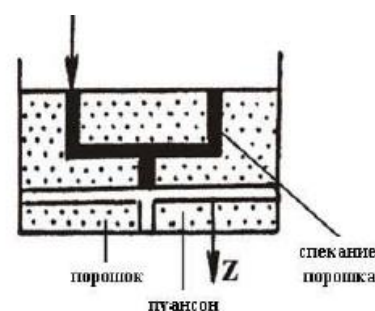
Трёхмерный лазерный синтез объектов и изображений



послойный синтез
из целлюлозно-
бумажных слоев



стерео-
литография



спекание
из порошков

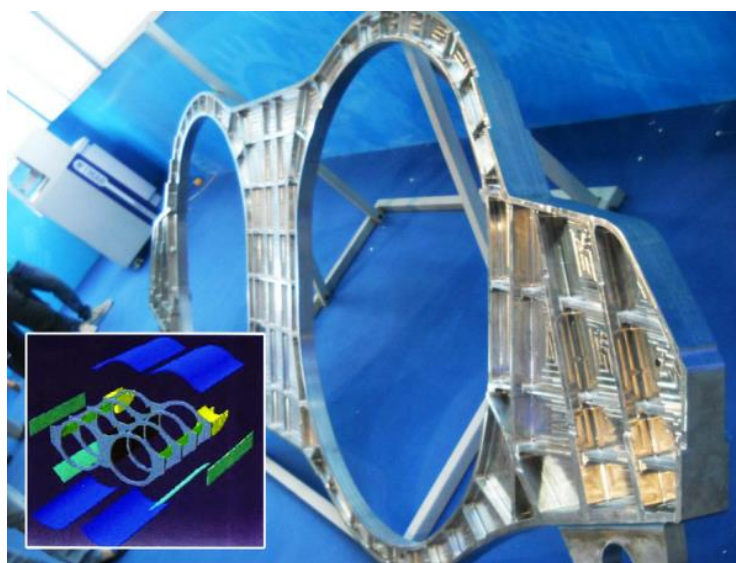
Схемы методов 3-х мерного лазерного синтеза

Быстрое создание опытных образцов-прототипов и изделий

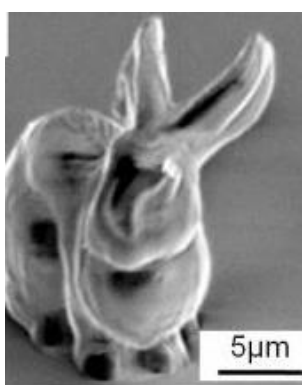
В медицине структура костей или органов имитируются при помощи данных компьютерной томографии, чтобы планировать операции или встраивать имплантаты, которые с помощью методов 3-х мерного лазерного синтеза можно изготовить индивидуально и оперативно подогнать для каждого пациента.



Создание протезов



Деталь боевого самолета



Миниатюрная модель

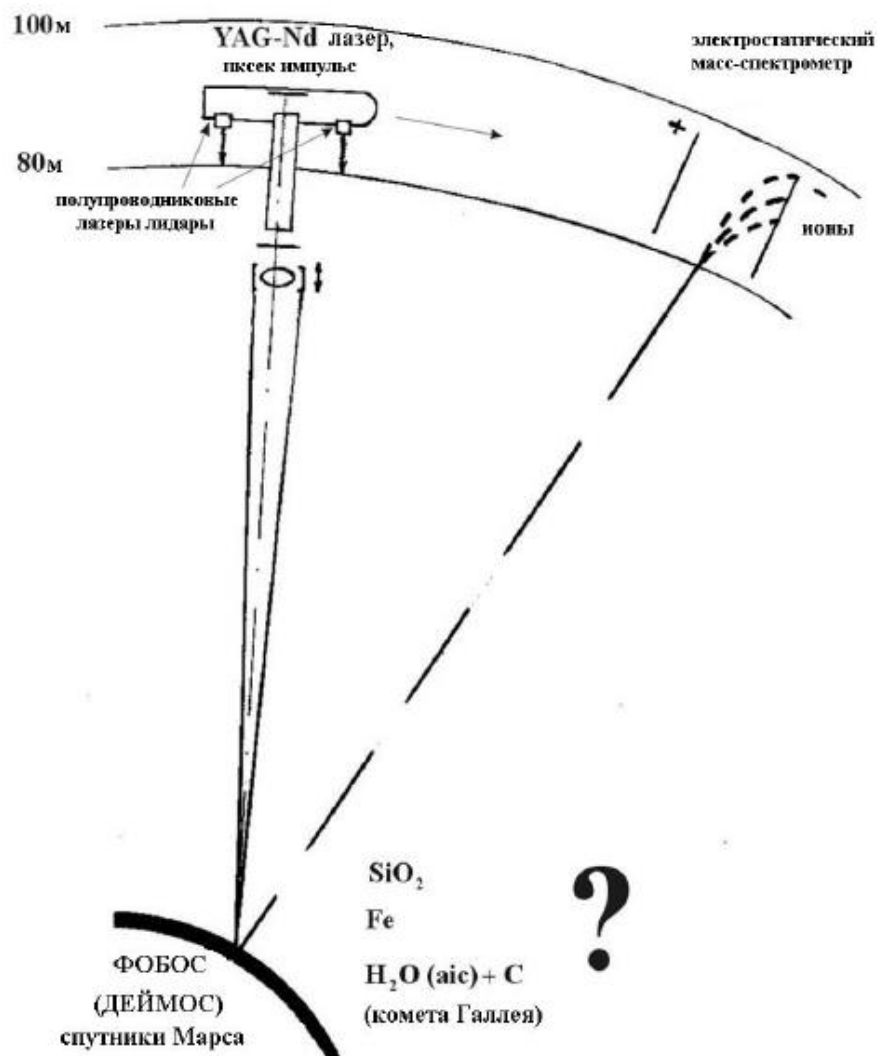
Процессы послойного синтеза из целлюлозно-бумажных слоев, стереолитографии или спекания из порошков позволяют создавать любые трехмерные модели из данных САД в течение короткого времени. Такие модели являются прототипами и радикально сокращают время изготовления литейных форм. Преимущества действующих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

Трехмерные изображения в стекле

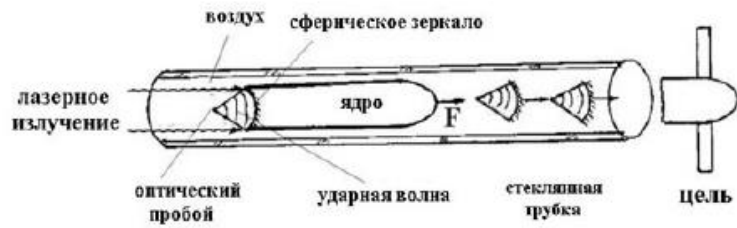
Трехмерные изображения записываются в стеклянных блоках путем послойной записи рассеивающих точек. Внутри прозрачного стеклянного блока (призмы, куба и т.п.) формируется объект, который можно рассмотреть со всех сторон. Применение: в рекламе, в науке для наглядного представления о структуре сложных молекул,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

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.

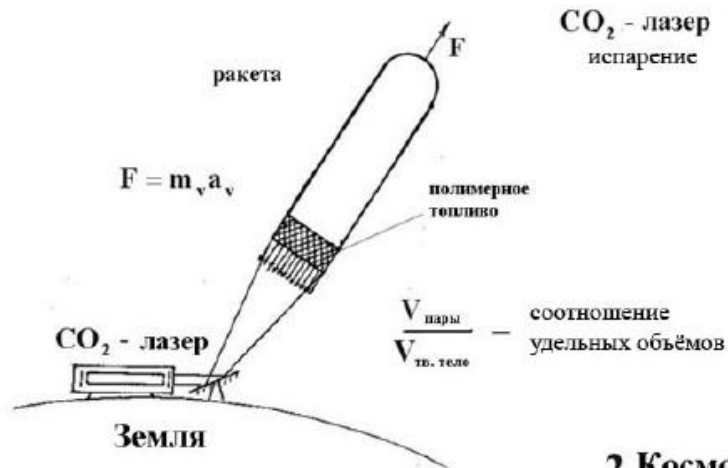
Космические применения лазеров



Дистанционное лазерное зондирование космических объектов

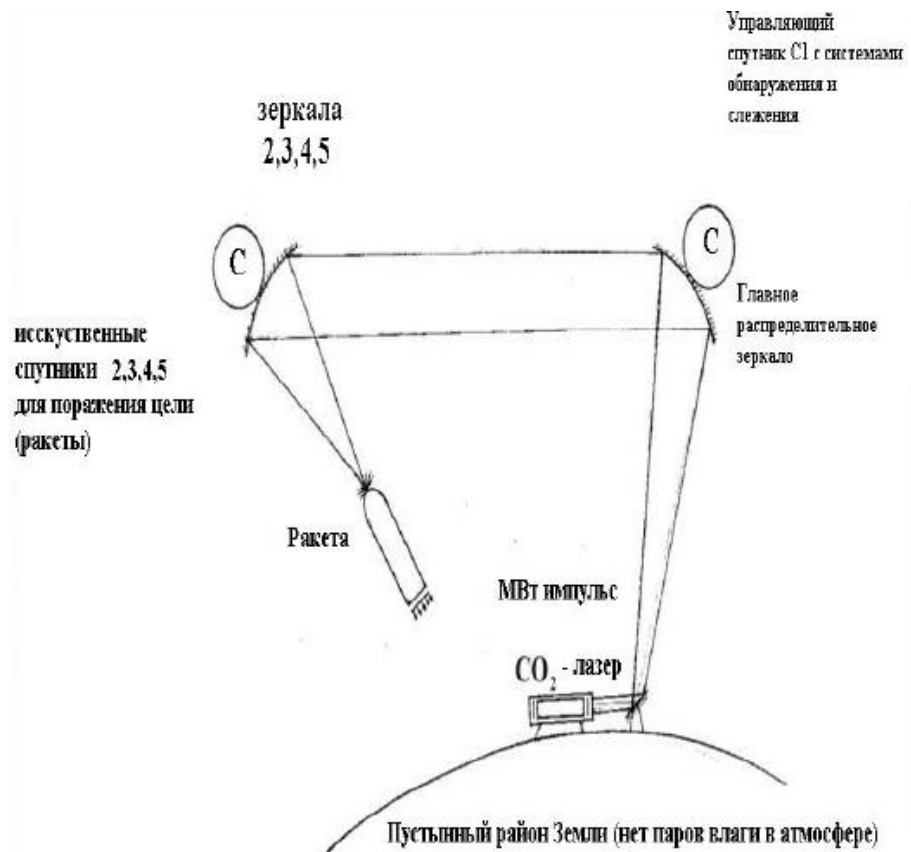


1. Атмосфера



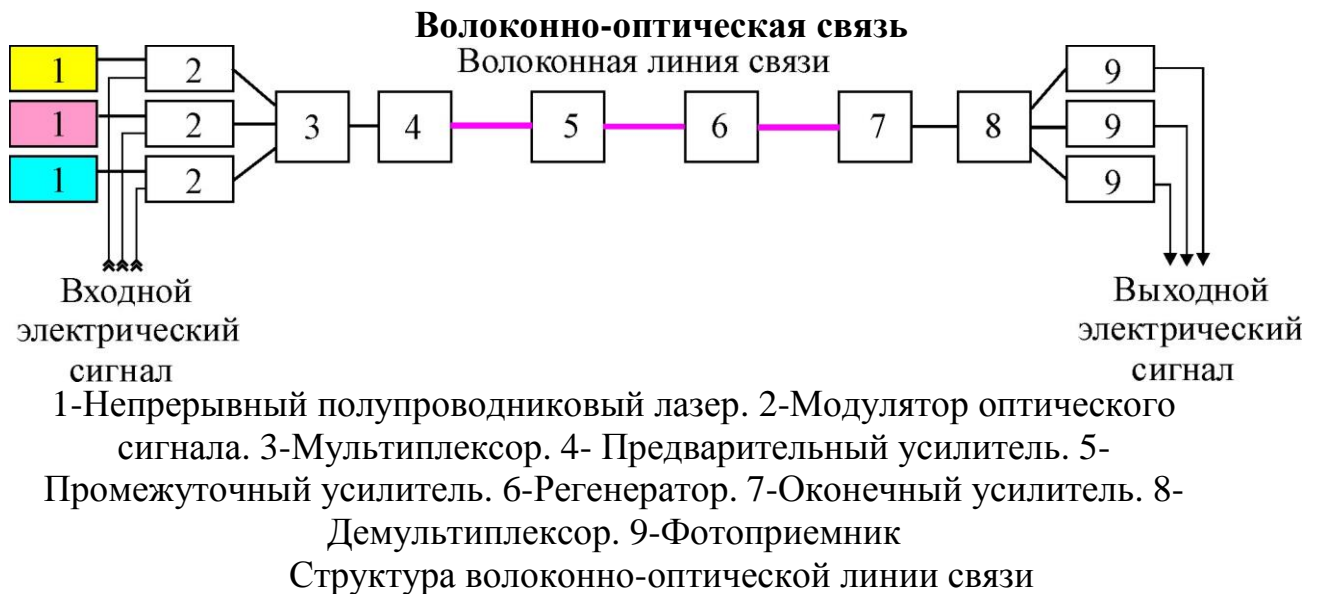
2. Космос

Лазерная реактивная тяга – атмосферные и внеатмосферные двигатели



Лазерное противоракетное оружие

3.2. Применение лазеров в связи, оптической памяти и медицине



Модуляторы. Внешняя и внутренняя. Цифровая и аналоговая. Амплитудная, фазовая, частотная, поляризационная. Электрооптическая модуляция. Эффект Погкельса, эффект Керра. Электрооптический коэффициент r . Полуволновое напряжение.

$$U_{\lambda/2} = \frac{\lambda d}{ln^2}$$

где d и l – толщина и длина электрооптического кристалла.

Магнитооптическая модуляция. Эффект Фарадея. Диамагнетики и ферромагнетики. Постоянные Верде и Кундта V . Поворот плоскости поляризации

$$\varphi = VHl \cos \gamma$$

где H – напряженность магнитного поля, l – длина магнитооптического кристалла, γ – угол между направлением распространения излучения и магнитным полем.

Акустооптический затвор. Механический затвор. Времена релаксации.

Атмосфера в качестве передающей среды. Мощность излучения на приемнике.

$$P_e / P_s = A_s A_e / \lambda^2 R^2$$

Гетеродинирование – опорная волна.

$$E_s(t) = E_{s0} \cos(\omega_s t + \varphi_s)$$

$$E_r(t) = E_{r0} \cos(\omega_r t + \varphi_r - \frac{\omega_r}{c} x \sin \alpha)$$

Усреднение по времени меньше по сравнению с периодом биений

$$T_b \sim 2\pi(\omega_r - \omega_s)^{-1}, \text{ но большее по сравнению с периодом (сигнала) } T_s = \frac{2\pi}{\omega_s}$$

для интенсивности:

$$I(t) = \frac{\gamma}{a^2} \int_{-a/2}^{a/2} \int_{-a/2}^{a/2} [E_s(t) + E_r(t)]^2 dx dy =$$

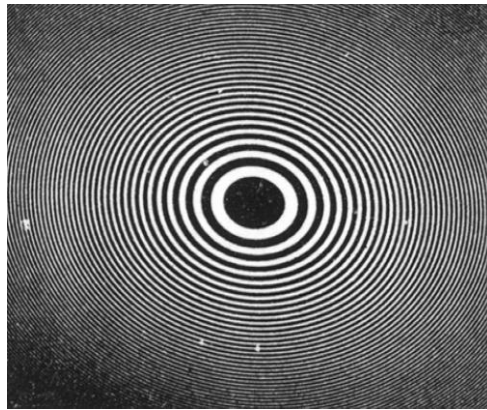
$$= \gamma \left\{ \frac{E_s^2 + E_r^2}{2} + E_{s0} E_{r0} \cos[(\omega_r - \omega_s)t + \varphi_r - \varphi_s] \frac{\sin[(\omega_s a \sin \alpha) / 2c]}{(\omega_s a \sin \alpha) / 2c} \right\}$$

Коэффициент усиления и апертура фотоприемника. Эффективность гетеродинамирования минимальна, когда

$$\alpha \approx \frac{2\pi c}{\omega_s a}$$

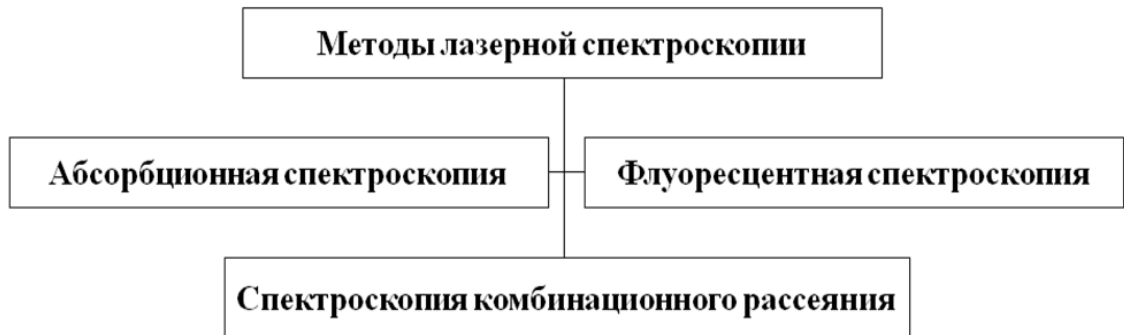
Лазерные технологии дифракционных оптических элементов (ДОЭ) и оптической памяти

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



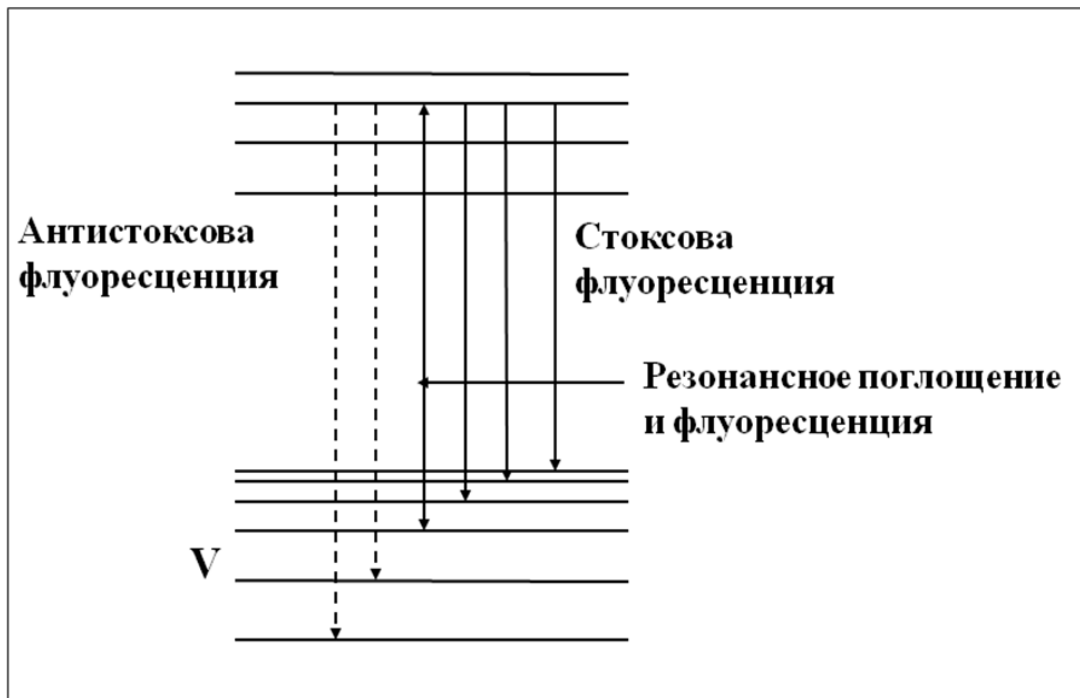
Изображение фрагмента ассиметричной структуры ДОО:
эллиптическая зонная пластинка (количество зон — 500, полный диаметр
— 40 мм).

Лазерная спектроскопия



Люминесценция – излучение, которое представляет собой избыток над тепловым излучением тела и продолжается в течение времени, значительно превышающего период световых колебаний





Отклик классического осциллятора.

Электрическая индукция

$$D = E + 4\pi P = \epsilon E$$

Поляризация

$$P = Ned$$

Уравнение осциллятора

$$md'' + m\gamma d' + m\omega_0^2 = eE \exp(i\omega t)$$

Отсюда:

$$d = \frac{e^2}{m} \frac{E}{\omega_0^2 - \omega^2 + i\gamma\omega}$$

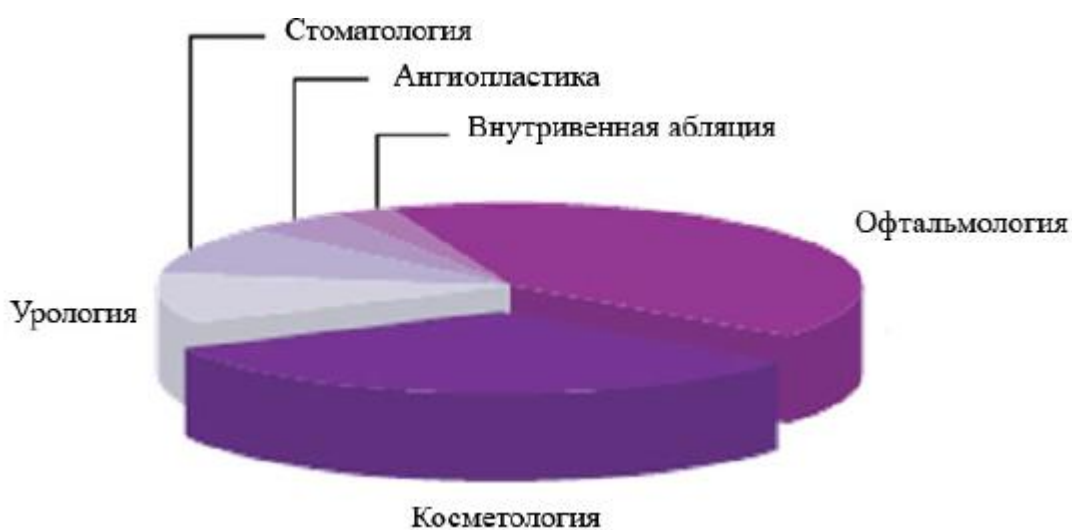
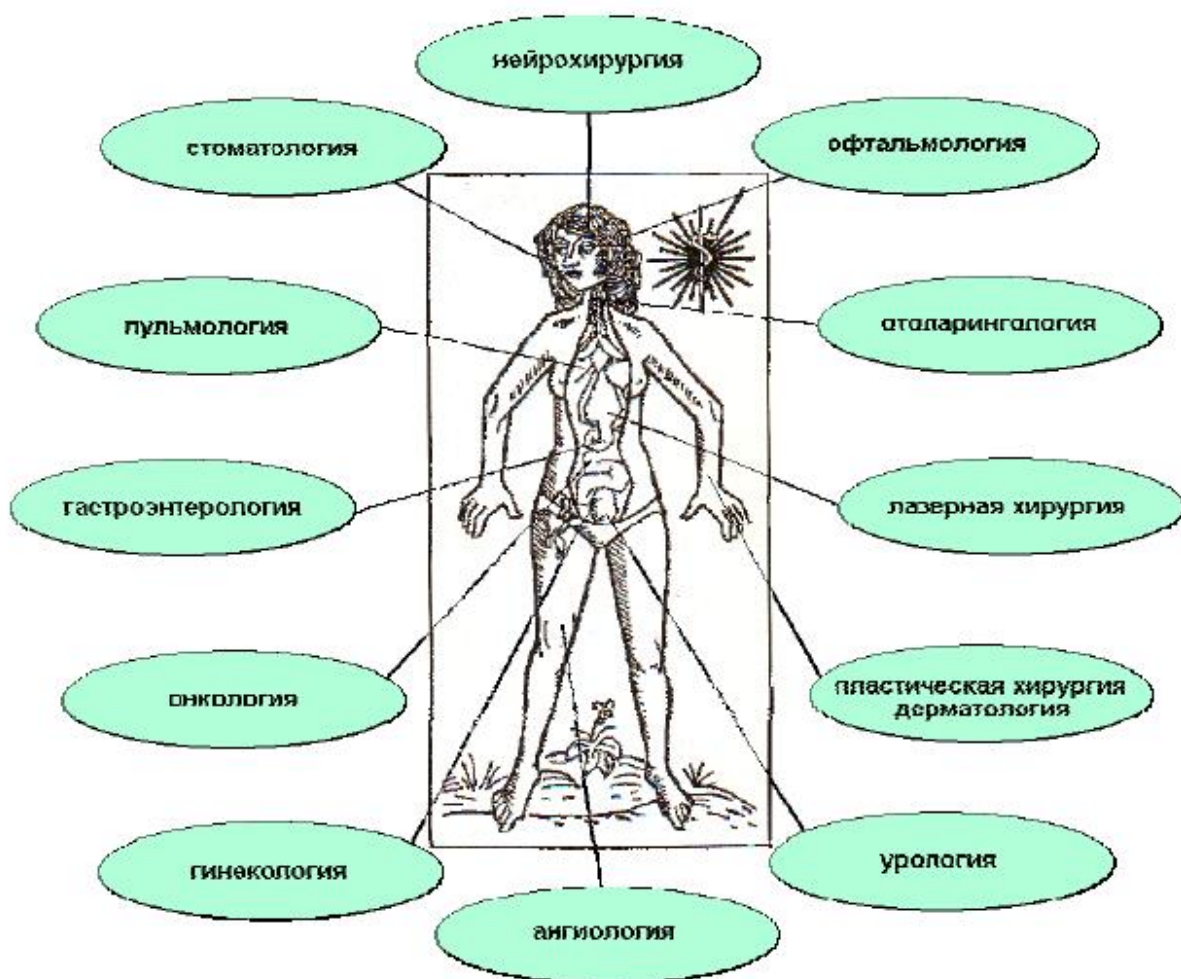
$$\epsilon = (n - i\sigma)^2 = 1 + \frac{4\pi e^2 N}{m} \frac{1}{\omega_0^2 - \omega^2 + i\gamma\omega}$$

$$n - i\sigma = 1 + \frac{2\pi e^2 N}{m} \frac{1}{\omega_0^2 - \omega^2 + i\gamma\omega}$$

$$n = 1 + \frac{2\pi e^2 N}{m} \frac{\omega_0^2 - \omega^2}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2 \omega^2}$$

$$\sigma = \frac{2\pi e^2 N}{m} \frac{\gamma\omega}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2 \omega^2}$$

Лазерные технологии в медицине

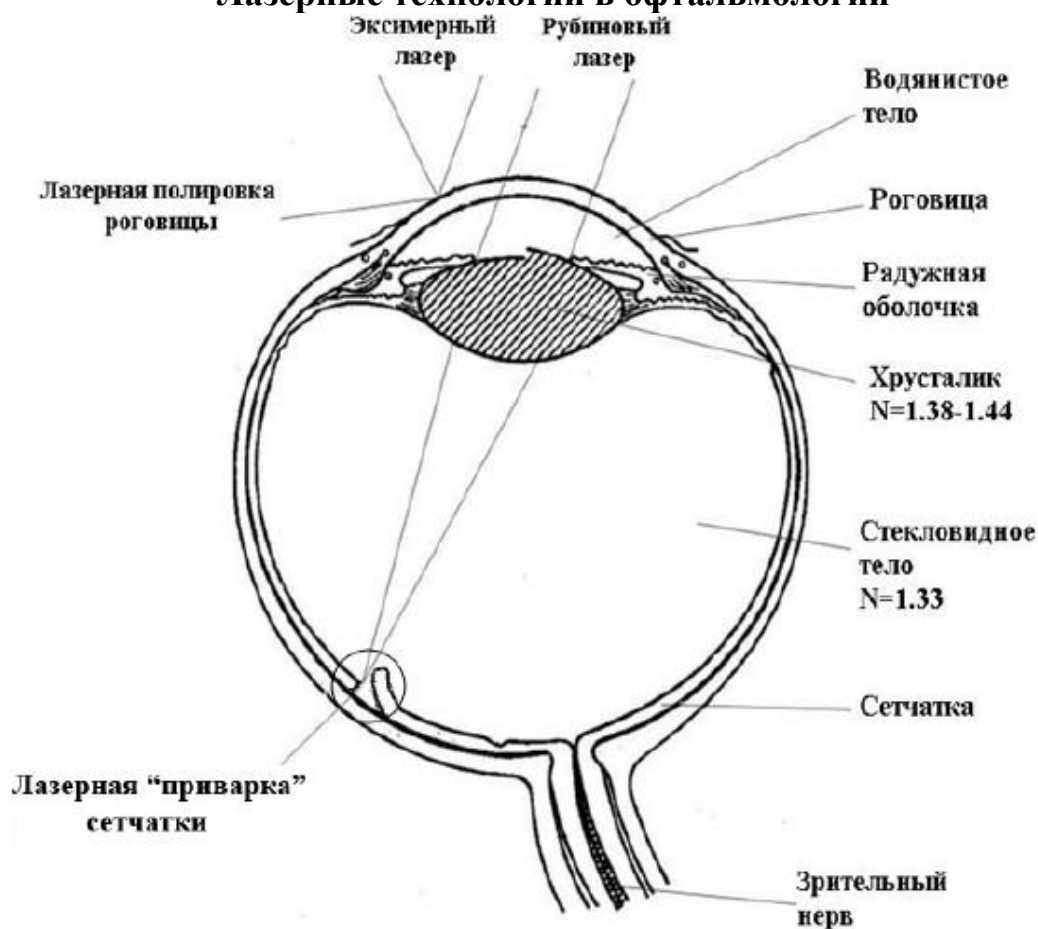


Распределение лазерных медицинских процедур

Полное число процедур по лазерному “омоложению” кожи и удалению морщин увеличилось со 120 000 в 2000 г. до 550 000 в 2006 г. с

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

Лазерные технологии в офтальмологии



3.3. Основные направления развития лазерных технологий

Сопоставление данных Мирового Банка об общей экономической ситуации в мире с доступными финансовыми отчётами крупнейших лазерных компаний свидетельствует, что и в 2016г. темпы роста рынка лазеров оказались существенно выше, чем у мировой экономики в целом – 6,6% и 2,4% в год соответственно. Причиной опережающего роста лазерной отрасли является тот факт, что лазерные технологии и, соответственно, лазеры активно используются именно на самых быстрорастущих из существующих рынков, являясь эффективным инструментом их инновационного развития. Свежими примерами могут

служить внедрение лазерных локационных (лидарных) систем в автомобилестроение в связи с перспективой активного использования автономных (роботизированных) автомобилей и аддитивных технологий в авиакосмическую промышленность (в двигателестроение). О масштабах грядущих изменений можно судить по такому примеру: Uber собирается высвободить за счёт внедрения «самоуправляемых» автомашин около 10 млн водителей уже в ближайшем будущем. А на очереди – лазерная навигация дронов и автономных промышленных роботов.

Более 90% всех фирм-производителей, работающих в области фотоники и оптики – это малые предприятия, но 80% от общего объёма продаж этой техники приходится на крупные компании, которые являются игроками глобальных рынков. В 2015-2016г.г. в лазерной индустрии наблюдалась наиболее высокая за всё время её существования активность в части слияний и поглощений компаний, причём они зачастую осуществлялись «через границы» традиционных секторов экономики, что свидетельствует о масштабном проникновении лазерных технологий в эти сектора и использовании разработчиками этих технологий и соответствующего оборудования новых моделей бизнеса.

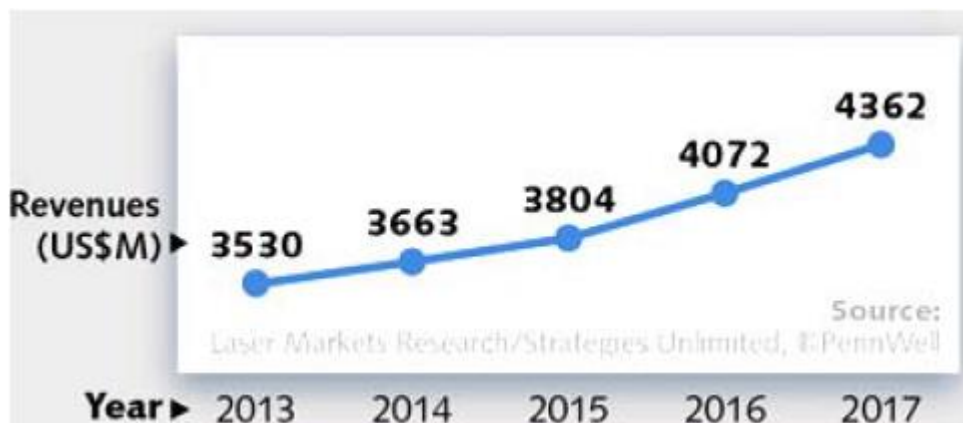
Наибольшую долю лазерного рынка, как и в предыдущие годы, сформировали лазеры для обработки материалов и литографии – 4,077 млрд из общего объёма в 10,408 млрд долл. Немного меньше доля у объединённого сектора связи и оптической памяти, в нём продано лазеров в общей сложности на 3,732 млрд долл. Следующий по объёму сектор уже значительно меньше, это лазеры для научных исследований и военных применений – на 877 млн долл. Далее следуют медицинский сектор – 838 млн долл., приборы и сенсоры – 608 млн долл., а на дисплеи, нанесение изображений и развлечения вместе пришлось 268 млн долл.

Обработка материалов и литография

2016 год был весьма нестабильным для мировой промышленности. На проявления традиционных циклов подъёмов и спадов в отдельных её отраслях наложились политические неопределённости, связанные с Брекзитом и сменой администрации в Вашингтоне, которые привели к изменению производственных планов многих компаний. Однако на «промышленном» секторе лазерного рынка все эти неопределённости никак не отразились. Ещё один год он рос со скоростью, измеряющейся двузначным числом процентов. Его основными движущими силами были продажи мощных волоконных лазеров, резкий рост спроса на эксимерные лазеры и существенное расширение применений ультракоротких лазерных импульсов – и, соответственно, увеличение спроса на соответствующие лазеры.

Киловаттные волоконные лазеры для резки и сварки металла составили 41% всего рынка технологических лазеров в 2016 году. Рост их продаж на 12% за год сопровождался небольшим спадом в продажах мощных СО₂- и твердотельных лазеров (– 4% и –1% за год,

соответственно). Если говорить о процентах, то ещё больший рост наблюдался в категории «другие лазеры». Он составил рекордные за последние несколько лет 54% в год и был обусловлен ростом спроса на мощные диодные лазеры, непосредственно используемые как источники излучения для обработки материалов, и эксимерные лазеры для отжига полупроводников.



Динамика продаж лазеров для обработки материалов и литографии

Высокие абсолютные цифры этого роста объясняются очень низким начальным уровнем – в предыдущие несколько лет продажи лазеров этого типа среди промышленных лазеров были весьма незначительны.

Компаниями – мировыми лидерами в секторе лазеров для обработки материалов в 2016г. оказались *Trumpf* – более 1 млрд долл. продаж на этом рынке, *IPG Photonics* – около 1 млрд и *Coherent* – 857 млн долл. Наибольшая активность в части приобретения промышленных лазеров имела место в автомобильной и аэрокосмической промышленности, энергетике, электронике, связи (производство смартфонов).

Три основных категории этих лазеров – для микрообработки, макрообработки и маркировки – характеризовались в истекшем году следующими цифрами: в части «микро» (мощность лазеров < 500 Вт) продажи заняли 35% всего рынка лазеров для обработки материалов, очень большой вклад составили эксимерные лазеры, используемые для отжига при производстве плоских дисплеев; в части «макро» (> 500 Вт) продажи составили 47% рынка, главным образом за счёт волоконных лазеров, на маркировку (и гравировку) пришлось оставшиеся 18% этого сектора лазерного рынка.

Резка – это наиболее важное для рынка применение промышленных лазеров. Она формирует наибольший объём продаж таких лазеров и является главным потребителем мощных волоконных лазеров. Этот сегмент лазерного рынка является ключевым и в промышленно развитых, и в развивающихся странах, темпы его развития чётко коррелируют с национальным ВВП. Экономика, как уже отмечалось, была слабой в 2016г., и рост лазерного рынка в сегменте резки оказался небольшим по сравнению с предыдущими годами – всего на 3,5% в год. И так уже

совпало, что продажи лазеров для сварки за этот год выросли на 3,4% в результате повышения спроса на них в автомобильной индустрии, а также при изготовлении скважинных труб и трубопроводов.

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

На 2017 год прогнозируется повторение общей экономической ситуации 2016 года, и годовой рост сектора промышленных лазеров в рынке лазерных источников излучения ожидается на уровне 8,7%. Объём продаж лазеров для маркировки несколько уменьшится из-за снижения цен на них, доля продаж лазеров в категории «микрообработка» вырастет до 38% в результате продолжения спроса на эксимерные лазеры и лазеры для обработки неметаллов, доля сегмента «макрообработка» останется такой же – 47% – как и в 2016 году. Продолжится рост объёма 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).

Связь и оптическая память

2016-й год показал, что телекоммуникационный «мыльный пузырь» – это история, но потребность в расширении полосы частот и увеличении скорости передачи информации вполне реальна. Лазерные источники, которые используются в линиях оптической связи со спектральным уплотнением сигнала (WDM-архитектура), в сегодняшних 100G-линиях весьма востребованы и их продажи испытывают настоящий бум. Иллюстрирует тезис рост продаж 100G-компонентов компании «Oclaro» – на 20% ежеквартально в течение уже 5 кварталов подряд.



Динамика продаж лазеров для связи и оптической памяти

В общей сложности мировой рынок лазеров для телекоммуникаций и оптической памяти вырос в 2016 году до 3,732 млрд долл. (от 3,442 в 2015-м) – несмотря на некоторый спад в сегменте оптической памяти. На ближайшее будущее прогнозируется небольшой спад на этом рынке, т.к. 4G-инфраструктура уже достигла максимума своих возможностей, но уже в 2020г. должен начаться новый цикл роста спроса на телеком-лазеры – в связи с переходом к 5G-системам.

Ещё две тенденции в этом секторе лазерного рынка – прогресс в кремниевой фотонике и увеличение числа применений диодных лазеров с вертикальным резонатором (VCSELs). Первая сейчас проявляется только в слияниях и поглощениях компаний, нацеленных на создание устройств типа фотонных интегральных схем (PIC) для датацентров. Практическое использование кремниевой фотоники в системах оптической связи пока остаётся делом будущего. А вот VCSELs – это бизнес сегодняшнего дня. Появившиеся в 1998 году на рынке VCSEL, излучающие на 850 нм, нашли широкое применение в системах передачи данных и оптических сенсорах. Позднее лазеры этого типа, излучающие на 1310 нм, были использованы в телевидении высокой чёткости (HDTV), домашних информсетях, инфраструктуре Этернета, а также во внутригородских системах телекоммуникаций.

В 2016г. было продемонстрировано успешное применение VCSEL с близкими длинами волн около 850 нм в интерконнектах дата-центров, использующих дуплексное многомодовое волокно. Широта применений обусловила рост продаж: например, «Finisar» во II квартале 2016г. поставила более 150 млн шт. таких лазеров на общую сумму 341,3 млн долл. (на 7,1% больше, чем в предыдущем квартале), «Philips Photonics» удвоила в 2016г. свои производственные мощности в городе Ульме, ФРГ, чтобы иметь возможность выполнять поступающие заказы на VCSEL, компания «II-IV» ожидает в следующем году увеличение продаж лазеров этого типа на 20%.

Научные исследования и военные применения

Среди основных событий в финансировании науки в 2016 году можно отметить два. Во-первых, неопределённость, возникшую из-за смены администрации в США и заявлений Трампа о необходимости пересмотреть политику и, соответственно, финансирование исследований в части возобновления источников энергии и возможных изменений климата. На 2016-й год прогнозировался рост финансирования науки в США на 3,4% – до 514 млрд долл/год, но сколько получилось на самом деле, пока неизвестно. Во-вторых, существенное увеличение финансирования науки в Китае, где на научные исследования уже идёт больше 2% ВВП – больше, чем в ЕС.

К 2020 году Китай должен обогнать США по общему объёму расходов на научные исследования и разработки. Здесь наблюдается быстрый рост числа публикуемых научных статей, демонстрируются «научные» мировые рекорды, например, создана самая длинная линия квантовой связи – от Пекина до Шанхая. Суммарно объём расходов в мире на научные исследования и разработки вырос в 2016г. на 3,5% и примерно в том же темпе – на 4,2% за год увеличились продажи лазеров для R&D – применений, составив 471,4 млн долл/год «Военный» сегмент лазерного рынка оказался более быстро растущим – на 9,4% в 2016г. по сравнению с 2015-м, до уровня в 406 млн долл/год.

Этот рост существенно превзошёл темпы увеличения общемировых расходов на оборону. Согласно данным Стокгольмского института изучения международного мира (SIPRI) эти расходы составили в 2015 году 1,6 трлн долл, увеличившись на 1% – впервые с 2011 года.



Динамика продаж лазеров для военного и научного применения

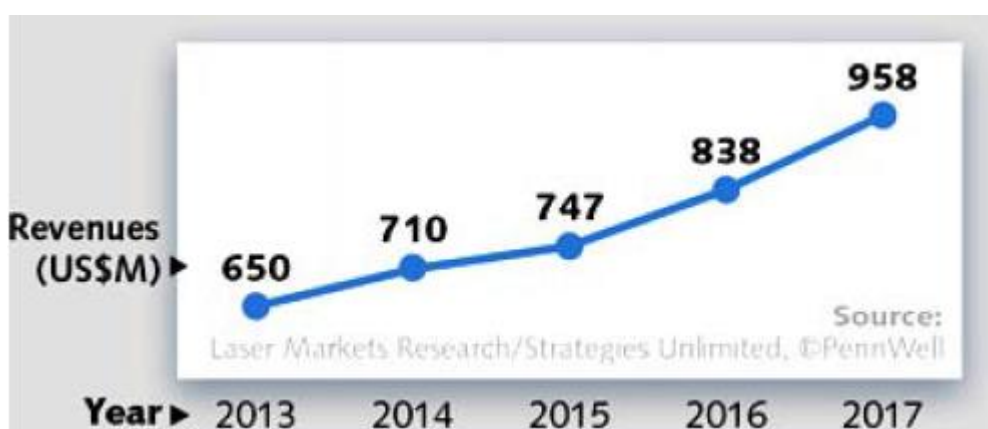
Рост продаж лазерных источников излучения, используемых для оборонных целей, был обусловлен спросом на них в следующих приложениях: лучевое оружие (затраты на него в США в 2015г. выросли на 23% по сравнению со средней величиной за предыдущие 4 года и достигли 600 млн долл), системы «инфракрасного противодействия» для защиты широкофюзеляжных самолётов, использующие волоконные или квантово-каскадные лазеры (соответствующие контракты на поставку лазерных источников измеряются многими десятками млн долл).

Следует отметить активность китайских компаний в части мощных волоконных лазеров. Они заявляли в 2016г. о своей готовности поставлять 20 кВт – лазеры этого типа (а производство 10кВт-волоконников организовано ещё несколько лет назад).

Медицинские и эстетические применения

2016 год был очень хорошим для этого сектора лазерного рынка. Компания «Lumenis» (Израиль), позиционирующая себя как крупнейшего в мире производителя лазерной медицинской техники для хирургии,

эстетической медицины и офтальмологии, сообщила о непрерывном росте продаж в течение 8 кварталов подряд со средним темпом 9,3% в год. В итоге она была куплена глобальными английским инвестором «ХЮ Group» за 510 млн долл. Номенклатура продукции этой компании иллюстрируют широту использования лазерных аппаратов в сегодняшней медицине: импульсные гольмиевые лазеры для лечения урологических заболеваний, установки для хирургии на среднем ухе, микрохирургические лазерные аппараты для удаления раковых опухолей в органах дыхания, которые демонстрируют гораздо более высокую эффективность лечения, чем химиотерапия и рентген, СО2-лазеры для лечения дерматитов, лазерные методы борьбы с сухостью глаз и др. – «Lumenis» предлагает лазерные инструменты для борьбы практически со всеми известными болезнями.



Динамика продаж лазеров медицинских и эстетических целей

О высоких темпах роста продаж – более 30% за год – сообщили и некоторые другие крупные компании, действующие на рынке медицинских лазеров, например американские «Synosure» и «Cutera». Привлекательность медицинского сектора лазерного рынка привела к большому количеству слияний и поглощений компаний, связанных с этим сектором. Примерами могут служить приобретение компаний «Jonson&Jonson» в сентябре 2016 года за 4,3 млрд долл. калифорнийской компании «Abbott Medical Optics», специализирующейся на оборудовании для хирургии катаракты и рефрактивной хирургии (процедура LASIC), а также покупка израильской «HIL Applied Medical» стартапа «Nanolabz.» в Неваде для коммерциализации разработанной здесь технологии ассистируемой лазером протонной терапии рака.

Высокие результаты в части продаж «косметических» лазеров в 2016 году дают основание прогнозировать рост медицинского сектора мирового лазерного рынка в 2017г. до величины в 958 млн долл, на 14,3% в год. В последующие годы рост продаж здесь может стать ещё большим, если удастся завершить процесс внедрения лазеров в роботизированные хирургические системы «Да Винчи».

Приборы и сенсоры

Успешное освоение лидарной технологии является одним из важнейших событий истекшего года в секторе контрольноизмерительного, диагностического и навигационного оборудования, повлекшим за собой целый ряд ярких слияний и поглощений компаний. Но нельзя не отметить и явный рост интереса к лазерному диагностическому оборудованию для дистанционного мониторинга состояния конструкций и сооружений – самолётов, автотранспорта, мостов, дорог, железнодорожных сооружений и других критически важных элементов технической инфраструктуры.

В августе 2016г. появилось сообщение об успешном детектировании акустической эмиссии трещин в клёпанном соединении листов внахлест при использовании волоконнооптического лазерного сенсора акустических сигналов. Эта методика существенно превосходит по своим возможностям пьезоэлектрическую, но кроме того, легко комбинируется с контролем напряжений и температур, которые тоже осуществляются с помощью волоконнооптических сенсоров.

Набравшись опыта использования оптоволоконных сенсоров в нефтяных и газовых скважинах, канадская компания «Opsens» разработала аналогичный сенсор для диагностики структур внутри человеческого тела, конкретно – для контроля стеноза коронарных сосудов у пациентов, имеющих проблемы с сердцем. И тот сенсор уже получил одобрение FDA для использования в медицинской практике.

Всё большее распространение получают контрольно-диагностические приборы, использующие терагерцовое излучение – например, для контроля напряжений и деформаций в композитных материалах, точности корпусирования в полупроводниковой промышленности и др.

На 2017 год прогнозируется увеличение продаж в этом секторе лазерного рынка на 8,7% – с 608 млн долл. в 2016г. до 661 млн долл. Подчеркнём, что хотя по своей абсолютной величине этот сектор составляет примерно две трети от «медицинского» или «научновоенного» секторов, он обладает громадным потенциалом роста, т.к. спрос на соответствующие лазеры при освоении лидарных технологий для организации автономного движения транспортных средств будет огромным.

К этому же сектору относится и лазерное 3Dсканирование, которое уже сегодня обеспечивает возможность быстрого создания изображений объёмом до 400 млн пиксел и рассматривание его деталей с большим увеличением в режиме высокой чёткости. На очереди объединение локационных технологий с лазерными проекционными технологиями, что даст принципиально новые возможности управления движением. Потенциал этого сектора лазерного рынка весьма велик.



Динамика продаж лазеров для сектора приборы и сенсоры

Развлечения, дисплеи, печать

Заметными явлениями в этом секторе лазерного рынка в 2016 году стали активное распространение лазерных проекторов в индустрии цифрового кино, причём наиболее перспективными были окончательно признаны дисплеи, подсвечиваемые «с тыла» RGB – проекторами. По заявлениям экспертов, они обеспечивают в 2 раза большую яркость, в 2 раза больший контраст и в 3 раза лучшую энергоэффективность, чем дисплеи на светоизлучающих диодах.

Развитие этого сегмента индустрии развлечений вызвало ряд слияний и поглощений компаний, ориентированных на соответствующий сектор лазерного рынка. Хотя продажи струйных лазерных принтеров растут, объёмы продаж собственно лазеров для этих устройств снижаются – из-за опережающего падения цены на эти лазеры.

Тем не менее, производители активно – и не безуспешно – ищут новые методы использования лазерной техники для печати как на бумаге, так и на таких материалах как текстиль, пластики и органика. В частности, успешным оказалось использование для печати ультракоротких лазерных импульсов.

Разнообразие выпускаемых продуктов и их упаковок потребовало коммерчески доступных систем печати для производственных (упаковочных) линий, причём эти системы должны быть скоростными и не нуждаться в специальных расходных материалах типа чернил, которые используются в традиционных струйных принтерах. Нужные системы были предложены – на основе лазеров, генерирующих ультракороткие импульсы, и полигональных сканаторов луча. Такие системы обеспечивают быструю печать на самых разных материалах – пластик, бумага, металл и др.

Использование в этом применении лазеры учитываются в данном обзоре в сегменте лазерных маркеров (сектор лазеров для обработки материалов), рост их продаж отмечается во всём мире и свидетельствует о всё более широком распространении лазерных технологий.

Общий объём продаж лазеров в секторе «развлечения, дисплеи, печать» вырос в 2016 году до 268 млн долл. в год, и на 2017 год

прогнозируется рост ещё на 19% – до 319 млн долл., – в основном, за счёт увеличения числа «лазерных» кинотеатров. В этом секторе лазерного рынка появилось в последнее время несколько новых применений лазерного луча, которые могут обеспечить быстрый и существенный рост продаж. Это, например, проецирование символа велосипеда для предупреждения автомобилистов на неосвещённой дороге о наличии на ней велосипедистов, использование дронов с осветительной аппаратурой и лазерной локацией для обеспечения оптимального освещения при съёмках фильмов, лазерные системы отпугивания крыс и других животных, вредящих посевам и садам.



Динамика объема продаж лазеров для развлечения, дисплеев и печати

Круг возможных применений лазерных источников излучения постоянно расширяется, в соответствии с этим растет и лазерный рынок.

Контрольные вопросы

- 1- На чем базируются лазерные технологии?
- 2- Перечислите основные технологические области применения лазеров.
- 3- Перечислите основные перспективные области применения лазеров.
- 4- Какие формы микроструктур образуются при многократном воздействии лазерных импульсов?
- 5- В рамках какого приближения можно оценить скорость атомов при лазерной абляции поверхности?
- 6- Как зависит время воздействия от глубины проплава при лазерной сварке?
- 7- Как определяется коэффициент температуропроводности?
- 8- Как зависит глубина проплава от мощности лазерного излучения?
- 9- Какие эффекты возникают при лазерной полировке стекла?
- 10- Опишите элементы оптической линии связи.
- 11- В каких областях медицины используются лазерные технологии?

12- Какие сферы лазерных технологий наиболее успешно развиваются в настоящее время?

Использованная литература:

1. В.Hitz, J.J.Ewing, J.Hecht. Introduction to Laser Technology. – N.Y.: IEEE Press, 2012.
2. D.L. Elliott. Ultraviolet Laser Technology and Applications. - N.Y.: Academic Press Inc., 2014
3. А.Г.Григорьянц. Основы лазерной обработки материалов. - М.: Машиностроение, 1989.
4. В.П.Вейко, А.А.Петров. Введение в лазерные технологии. - Санкт-Петербург, СПбГУ, 2009.
5. Handbook of Laser Technology and Application / Ed. С.Е.Webb. – Bristol: IOP Publishing, Ltd., 2004. - V.I-III.
6. Справочник по лазерной технике/ под ред. А.П.Напартовича. – М., Энергоатомиздат, 1991.
7. А.Г.Григорьянц, И.Н.Шиганов. Оборудование и технология лазерной обработки материалов. – М.: Высшая школа, 1990.
8. С.И.Анисимов, Я.И.Имас, Г.С.Романов, Ю.В.Ходько. Действие излучения большой мощности на металлы - М.: Наука, 1980
9. Григорьянц А.Г., Сафонов А.Н. Лазерная техника и технология. В 7 кн. - М. Высшая школа, 1987 - 1988.
10. Промышленное применение лазеров/ под ред. Г.Кебнера. - М.: Машиностроение, 1988
11. G.Saxby. Practical Holography. - Bristol: IOP Publishing, Ltd., 2004.
12. U.Schnars, W.Jueptner. Digital Holography. – Berlin: Springer, 2005.
13. Клышко Д.Н. Физические основы квантовой электроники. – М., «Наука», 1986.
14. Быковский Ю.Л., Неволин В.Н., Фоминский В.Ю. Ионная и лазерная имплантация металлических материалов. – М.: Энергоатомиздат, 1991.
15. Handbook of Laser Material Processing / Ed. J.F.Ready. – N.Y.: Magnola Publishing, Inc., 2001
16. Применения лазеров/под ред. Тычинского В.П.- М.: Мир, 1984
17. Физическая энциклопедия, т.1-5. - М. Большая российская энциклопедия. (www.phys-encyclopedia.net)
18. Справочник по лазерам. / под ред. А.М.Прохорова. Т.1,2.– М., Советское радио. 1978.
19. Ганеев Р. Лазер одамлар хизматида. Тошкент, “Фан”, 1990.
20. Процессы лазерной сварки и термообработки / В.М. Андрияхин. – М.: Наука, 1988.
21. R.A.Ganeev, S.R.Kamalov, I.A.Kulagin, A.V.Zinoviev, V.I.Redkorechev, A.I.Ryasnyansky, R.I.Tugushev, T.Usmanov. "An automated set-up for investigation of nonlinear-optical characteristics of various materials by the

- Z-scan method". Instruments and Experimental Technique, V.45, No 6, P.810-815 (2002).
- 22.I.A.Kulagin, R.A.Ganeev, R.I.Tugushev, A.I.Ryasnyansky, T.Usmanov. "Analysis of third-order nonlinear susceptibilities of quadratic nonlinear optical crystals". J. Opt. Soc. Am. B, V.23, .No.1, P.75-80 (2006)
- 23.D. Bailey, E. Wright. Practical Fiber Optics, Elsvier, 2005. pp. 320
- 24.В.П. Вейко Новые направления лазерной микро- и нанотехноогии // <http://books.ifmo.ru/book/vip/22.pdf>
- 25.Современные лазерные технологии для строительства // <http://www.prin.ru/resource/doc/doc172.pdf>
- 26.Laserinfo // http://www.laserinfo.ru/index.php?option=com_frontpage&Itemid=1
- 27.Precision manufacturing // <http://lmas.berkeley.edu/me220/Lecture-2-07.pdf>
- 28.Hugh power laser welding of thick construction of steels // http://www.ltu.se/polopoly_fs/1.4473!d55d7650.pdf

II. МАТЕРИАЛЫ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

На практических занятиях у слушателей закрепляются изученные теоретические основы измерительной техники, решаются практические задачи. Полученные знания и навыки подкрепляются по учебникам и учебным пособиям, лекционным материалам, научным статьям и тезисам пользоваться раздаточным материалом.

1-практическое занятие:

Физические процессы лазерной обработки

Цель занятия: Ознакомление со способом расчета пороговой плотности мощности испарения металла с поверхности под действием импульсного и непрерывного излучения.

Используя данные таблицы 1.1, рассчитать пороги испарения поверхности алюминия, меди, вольфрама и железа:

- а) под действием импульсного лазерного излучения длительностью 250 пс и построить зависимости от длительности импульса, используя программную среду Matlab;
- б) под действием непрерывного лазерного излучения с радиусом пучка 25 мкм и построить зависимости от радиуса пучка, используя среду Matlab.

2-практическое занятие:

Формирование тонкопленочной топологии

Цель занятия: Ознакомление со способом расчета плотности частиц вблизи поверхности, плотности потока, температуры и скорости частиц при воздействии мощного лазерного излучения.

Используя данные физических таблиц, при плотности мощности лазерного излучения 10^7 Вт/см² для железа, меди, алюминия и молибдена рассчитать:

- а) плотность частиц вблизи поверхности,
- б) плотность потока,
- в) температуру
- г) скорость частиц.

Построить соответствующие зависимости от плотности мощности, используя программную среду Matlab.

3-практическое занятие:

Модели лазерной обработки

Цель занятия: Ознакомление со способом расчета давления отдачи при лазерной обработке поверхности.

При плотности мощности лазерного излучения 10^8 Вт/см² рассчитать давление отдачи при испарении алюминия, меди и железа.

Построить соответствующие зависимости от плотности мощности, используя программную среду Visual Basic.

V. БАНК КЕЙСОВ

«Кейс-стади»

в модуле «Информационно-измерительные техники и системы»



«Кейс-стади» (Case-study)– система обучения, базирующаяся на анализе, решении и обсуждении ситуаций, как смоделированных, так и реальных. Метод «кейс-стади» интегрирует в себе технологии развивающего обучения, включая процедуры индивидуального, группового и коллективного развития, формирования многообразных личностных качеств обучаемых.

Под методом «кейс-стади» понимается активный метод обучения, основанный на организации преподавателем в группе обучающихся обсуждения задания, представляющего собой описание конкретной ситуации с явной или скрытой проблемой.

Особое место в организации дискуссии при обсуждении и анализе кейса принадлежит использованию метода генерации идей, получившего название «мозговой атаки» или «мозгового штурма». В процессе обучения «мозговая атака» выступает в качестве важнейшего средства развития творческой активности участников. «Мозговая атака» включает в себя три фазы.

Первая фаза представляет собой вхождение в психологическую раскованность, отказ от стереотипности, страха показаться смешным и неудачником; достигается созданием благоприятной психологической обстановки и взаимного доверия, когда идеи теряют авторство, становятся общими. Основная задача этой фазы – успокоиться и расковаться.

Вторая фаза – это собственно атака; задача этой фазы – породить поток, лавину идей; «мозговая атака» в этой фазе осуществляется по следующим принципам:

- есть идея– говорю, нет идеи – не молчу;
- поощряется любое ассоциирование, чем более неожиданной покажется идея, тем лучше;
- количество предложенных идей должно быть как можно большим;
- высказанные идеи разрешается заимствовать и как угодно комбинировать, видоизменять и улучшать;
- исключается критика, можно высказывать любые мысли без боязни, что их признают плохими, критикующих лишают слова;
- не имеют никакого значения социальные статусы участников, это абсолютная демократия и одновременно авторитаризм идеи;
- все идеи записываются в протокольный список идей;
- время высказываний – не более 1-2 минут.

Третья фаза представляет собой творческий анализ идей с целью поиска конструктивного решения проблемы по следующим правилам:

- анализировать все идеи без дискриминации какой-либо из них;
- найти место идее в системе и найти систему под идею;
- не умножать сущностей без надобности;
- не должна нарушаться красота и изящество полученного результата;
- должно быть принципиально новое видение («жемчужина в навозе»).

VI. ГЛОССАРИЙ

по модулю «Современные лазерные технологии»

АДАПТИВНАЯ ОПТИКА — раздел оптики, занимающийся разработкой оптических систем с динамическим управлением формой волнового фронта для компенсации случайных возмущений и повышения таким образом предела разрешения наблюдательных приборов, степени концентрации излучения на приёмнике или мишени и т. п.

АКТИВНАЯ СРЕДА — вещество, в котором создана инверсия населённостей энергетических уровней квантовой системы. Активная среда усиливает проходящее через нее резонансное электромагнитное излучение при условии, если коэффициент квантового усиления превышает коэффициент потерь энергии в активных средах.

АКУСТООПТИЧЕСКИЙ ЛАЗЕРНЫЙ ЗАТВОР — лазерный затвор, действие которого основано на использовании акустооптического эффекта.

ВОЛНОВОД — искусственный или естественный канал, способный поддерживать распространяющиеся вдоль него волны, поля которых сосредоточены внутри канала или в примыкающей к нему области.

ВОЛНОВОЙ ФРОНТ — поверхность, на всех точках которой волна имеет в данный момент времени одинаковую фазу.

ГАЗОВЫЙ ЛАЗЕР — лазер с газовым активным элементом.

ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЙ ЛАЗЕР — молекулярный лазер, в котором лазерная активная среда создается при быстром расширении газа.

ГАЗОРАЗРЯДНЫЙ ЛАЗЕР — газовый лазер, в котором лазерная активная среда создается под действием электрического разряда в газе.

ГАУССОВО (НОРМАЛЬНОЕ) РАСПРЕДЕЛЕНИЕ - вид непрерывного распределения, плотность вероятности которого задается уравнением $y = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$, где μ - центр распределения и σ - среднеквадратичное отклонение.

ГЕНЕРАЦИЯ ГИГАНТСКИХ ИМПУЛЬСОВ — генерация в лазере, возникающая при быстром увеличении добротности резонатора после получения инверсии в активном веществе.

Примечание: импульсы излучения, получаемые в этом режиме, называются гигантскими импульсами.

ГОЛОГРАММА (от греч. holos — весь, полный и gramma — черта, буква, написание) — запись волнового поля на чувствительном материале в виде интерференционной картины, образованной смещением этого волнового поля с опорной волной.

ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ПАМЯТЬ - Трёхмерные голограммы имеют большую информационную ёмкость и ассоциативный характер памяти. В основе этого лежит селективность трёхмерной записи, т. е. способность голограммы взаимодействовать только с теми компонентами восстанавливающего излучения, которые присутствовали на этапе их записи.

ДИФРАКЦИЯ СВЕТА — в узком, но наиболее употребительном смысле — огибание лучами света границы непрозрачных тел (экранов); проникновение света в область геометрической тени. В широком смысле дифракция света — проявление волновых свойств света в предельных условиях перехода от волновой оптики к геометрической.

ДЛИНА ВОЛНЫ — пространственный период волны, т. е. расстояние между двумя ближайшими точками гармонической бегущей волны, находящимися в одинаковой фазе колебаний или удвоенное расстояние между двумя ближайшими узлами или пучностями стоячей волны. Длина волны λ связана с периодом колебания T и фазовой скоростью v_f распространения волны в данном направлении соотношением: $\lambda = v_f T$.

ИЗЛУЧАТЕЛЬ ЛАЗЕРА — основная функциональная часть лазера, в которой энергия накачки преобразуется в лазерное излучение.

ИНЖЕКЦИОННЫЙ ЛАЗЕР — полупроводниковый лазер с электрической накачкой.

ИОННЫЙ ЛАЗЕР — газовый лазер, в котором лазерные переходы происходят между уровнями энергии ионов.

КОЛЛИМАТОР ПУЧКА ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ — оптический преобразователь пучка лазерного излучения для изменения его диаметра и расходимости.

КОЛЛИМАТОР С ДИАФРАГМОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ФИЛЬТРАЦИИ — коллиматор пучка лазерного излучения, внутри которого вблизи минимального сечения пучка лазерного излучения помещена диафрагма пространственной фильтрации.

КОМБИНАЦИОННЫЙ ЛАЗЕР — перестраиваемый лазер, содержащий в излучателе преобразователь частоты, действие которого основано на вынужденном комбинационном рассеянии.

КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРА — отношение энергии или средней мощности, излучаемой лазером, соответственно к энергии или средней мощности, подводимой к лазеру.

ЛАЗЕР — генератор оптического электромагнитного излучения в оптическом диапазоне, основанный на использовании индуцированных переходов.

ЛАЗЕР НА ПАРАХ МЕТАЛЛА (МЕТАЛЛОИДА) — газовый лазер, в котором лазерная активная среда создается в парах металла (металлоида).

ЛАЗЕР НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ — лазер, действие которого основано на излучении электронов, колеблющихся под действием внешнего электрического и (или) магнитного поля, и премещающихся с релятивистской поступательной скоростью в направлении распространения излучения.

ЛАЗЕРНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ — электромагнитное излучение, испускаемое лазером в оптическом диапазоне длин волн.

ЛАЗЕРНЫЙ ДИОД — лазерный активный элемент полупроводникового лазера с электрической накачкой.

МНОГОМОДОВЫЙ РЕЖИМ ГЕНЕРАЦИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ — режим работы лазера, при котором лазерное излучение содержит как продольные, так и поперечные моды в пределах спектра частот данной линии спонтанного излучения.

МОДА — собственное колебание электромагнитного поля в оптическом резонаторе, характеризующееся определенной частотой и особенностью распределения поля в резонаторе.

МОДУЛЯЦИЯ ДОБРОТНОСТИ — быстрое изменение добротности резонатора лазера.

МОЛЕКУЛЯРНЫЙ ЛАЗЕР — газовый лазер, в котором лазерные переходы происходят между уровнями энергии молекул.

МОНОИМПУЛЬСНЫЙ РЕЖИМ ГЕНЕРАЦИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ — режим модуляции добротности оптического резонатора

лазера с импульсной оптической накачкой, при котором за время действия импульса накачки генерируется один импульс лазерного излучения.

НЕЛИНЕЙНАЯ ОПТИКА — раздел оптики, связанный с изучением и применением явлений, обусловленных линейным откликом вещества на световое поле

НЕЛИНЕЙНЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ — процессы в колебательных и волновых системах, не удовлетворяющие суперпозиции принципу. Нелинейные колебания или волны в общем случае взаимодействуют между собой, а их характеристики (частота, форма колебаний, скорость распространения, вид профиля волн и др.) зависят от амплитуды. Нелинейные колебания и волны в системах различной физической природы имеют общие черты, проявляющиеся в единстве их математического описания.

ОБРАЩЕНИЕ ВОЛНОВОГО ФРОНТА — автоматическое формирование с помощью различных физических механизмов и схемных решений т. н. обращённого пучка, в той или иной мере соответствующего обращённой во времени картине распространения падающего (входного) пучка.

ОДНОМОДОВЫЙ РЕЖИМ ГЕНЕРАЦИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ — режим работы лазера, при котором лазерное излучение содержит только продольные моды в пределах спектра частот данной линии спонтанного излучения.

ОДНОЧАСТОТНЫЙ РЕЖИМ ГЕНЕРАЦИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ — режим работы лазера, при котором лазерное излучение содержит только одну продольную моду в пределах спектра частот данной линии спонтанного излучения.

ОПТИКОМЕХАНИЧЕСКИЙ ЛАЗЕРНЫЙ ЗАТВОР — лазерный затвор, действие которого основано на механическом перемещении оптических элементов резонатора.

ОПТИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ПУЧКА ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ — оптическое устройство, с помощью которого меняются параметры пучка лазерного излучения.

ОПТИЧЕСКИЙ РЕЗОНАТОР — совокупность нескольких отражающих элементов, образующих открытый резонатор.

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ ЛАЗЕР — перестраиваемый лазер с плавной перестройкой частоты излучения, содержащий в излучателе непрерывный преобразователь частоты на основе нелинейного оптического материала, в

котором осуществляется параметрическое возбуждение электромагнитных колебаний оптического диапазона.

ПАССИВНЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ ЗАТВОР — лазерный затвор, действие которого основано на использовании оптических материалов, коэффициент пропускания которых на длине волны лазерного излучения зависит от интенсивности излучения.

ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЙ ЛАЗЕР — лазер, частота излучения которого может быть перестроена.

ПИЧКИ ГЕНЕРАЦИИ — кратковременные импульсы генерации, появляющиеся при свободной генерации во время импульса накачки.

ПИЧКОВЫЙ РЕЖИМ — режим генерации, при котором существуют пички генерации.

ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНАЯ ПЛАСТИНКА — слой однородной прозрачной среды с показателем преломления n , ограниченный параллельными плоскостями на расстоянии d друг от друга.

ПОГЛОЩЕНИЕ ВОЛН — превращение энергии волны в другие виды энергии в результате её взаимодействия с другими волнами или со средой, в которой она распространяется, или с телами, которые расположены на пути её распространения. В зависимости от природы волн и свойств среды механизм поглощения волн может быть различным (например, при поглощении звука и поглощении света), но во всех случаях поглощение волн приводит к ослаблению интенсивности волны.

ПОГЛОЩЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТ — отношение потока излучения, поглощённого данным телом, к потоку излучения, упавшему на это тело. Если падающий поток имеет широкий спектр, указанное отношение характеризует т. н. интегральный коэффициент преломления; если же диапазон частот падающего света узок, то говорят о монохроматическом коэффициенте поглощения — поглощательной способности тела.

ПОГЛОЩЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЬ (A_x) — величина, обратная расстоянию, на котором поток монохроматического излучения длины волны, образующий параллельный пучок, ослабляется в результате поглощения в веществе в e (натуральный показатель поглощения) или в 10 (десятичный показатель поглощения) раз.

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ЛАЗЕР — лазер с полупроводниковым активным элементом.

ПОПЕРЕЧНАЯ МОДА — мода, характеризуемая числом узлов поля, расположенных в направлении каждой из обеих поперечных координат, отражающих геометрию оптического резонатора.

ПРОДОЛЬНАЯ МОДА — мода, характеризуемая числом узлов поля, расположенных в направлении продольной оси оптического резонатора.

ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ ФИЛЬТР ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ — оптический преобразователь, изменяющий распределение интенсивности лазерного излучения в пространстве по заданному закону.

ПУЧОК ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ — лазерное излучение, заключенное в телесном угле.

РЕЖИМ ИМПУЛЬСНОЙ ГЕНЕРАЦИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ — режим работы лазера, при котором его энергия излучается в виде импульсов.

РЕЖИМ МОДУЛЯЦИИ ДОБРОТНОСТИ РЕЗОНАТОРА — режим импульсной генерации лазерного излучения, при котором накопление энергии производится в лазерной активной среде, а ее вывод осуществляется путем быстрого изменения добротности резонатора от минимальной до максимальной.

РЕЖИМ НЕПРЕРЫВНОЙ ГЕНЕРАЦИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ — режим работы лазера, при котором спектральная плотность мощности лазерного излучения на частоте генерации не обращается в нуль при заданном интервале времени.

РЕЖИМ СВОБОДНОЙ ГЕНЕРАЦИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ — режим импульсной генерации лазерного излучения, при котором добротность оптического резонатора не меняется в течение длительности импульсов лазерного излучения.

ТВЕРДОТЕЛЬНЫЙ ЛАЗЕР — лазер с твердотельным активным элементом.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ЛАЗЕР — лазер, предназначенный для использования в технологических процессах.

УГЛОВАЯ ШИРИНА ПУЧКА ИЗЛУЧЕНИЯ — плоский или телесный угол, характеризующий направленность излучения.

УСТРОЙСТВО ФОКУСИРОВКИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ — оптический преобразователь для уменьшения поперечного сечения и

повышения плотности энергии или мощности пучка лазерного излучения в заданном пространстве.

ЭЛЕКТРОИОНИЗАЦИОННЫЙ ЛАЗЕР — газоразрядный лазер с высоким давлением газовой смеси, в которой проводимость для обеспечения однородного несамостоятельного разряда создается под действием электронного пучка.

ФОТОДИССОЦИАТИВНЫЙ ЛАЗЕР — газовый лазер, в котором лазерная активная среда создается в результате фотодиссоциации молекул.

ФОТОИОНИЗАЦИОННЫЙ ЛАЗЕР — газоразрядный лазер с высоким давлением газовой смеси, в которой проводимость для обеспечения однородного несамостоятельного разряда создается под действием ионизирующего оптического излучения.

ХИМИЧЕСКИЙ ЛАЗЕР — газовый лазер, в котором лазерная активная среда создается в результате экзотермических химических реакций.

ЭКСИМЕРНЫЙ ЛАЗЕР — газовый лазер, в котором лазерная активная среда в виде неустойчивого соединения ионов создается в газовом разряде при электрической накачке.

ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЙ ЛАЗЕРНЫЙ ЗАТВОР — лазерный затвор, действие которого основано на использовании электрооптического эффекта.

VII. СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

I. Ўзбекистон Республикаси Президентининг асарлари

1. Каримов И.А. Ўзбекистон мустақилликка эришиш остонасида. - Т.:“Ўзбекистон”, 2011.
2. Мирзиёев Ш.М. Буюк келажагимизни мард ва олижаноб ҳалқимиз билан бирга курамиз. – Т.: “Ўзбекистон”. 2017. – 488 б.
3. Мирзиёев Ш.М. Миллий тараққиёт йўлимизни қатъият билан давом эттириб, янги босқичга кўтарамиз – Т.: “Ўзбекистон”. 2017. – 592 б.

II. Норматив-ҳуқуқий ҳужжатлар

4. Ўзбекистон Республикасининг Конституцияси. – Т.: Ўзбекистон, 2019.
5. Ўзбекистон Республикасининг “Таълим тўғрисида”ги Қонуни.
6. Ўзбекистон Республикасининг “Коррупцияга қарши курашиш тўғрисида”ги Қонуни.
7. Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2015 йил 12 июндаги “Олий таълим муасасаларининг раҳбар ва педагог кадрларини қайта тайёрлаш ва малакасини ошириш тизимини янада такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида” ги ПФ-4732-сонли Фармони.
8. Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги “Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида”ги 4947-сонли Фармони.
9. Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2018 йил 3 февралдаги “Хотин-қизларни қўллаб-қувватлаш ва оила институтини мустаҳкамлаш соҳасидаги фаолиятни тубдан такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида”ги ПФ-5325-сонли Фармони.
10. Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2019 йил 17 июндаги “2019-2023 йилларда Мирзо Улуғбек номидаги Ўзбекистон Миллий университетида талаб юқори бўлган малакали кадрлар тайёрлаш тизимини тубдан такомиллаштириш ва илмий салоҳиятини ривожлантириш чора-тадбирлари тўғрисида”ги ПҚ-4358-сонли Қарори.
11. Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2019 йил 11 июлдаги «Олий ва ўрта махсус таълим тизимида бошқарувнинг янги тамойилларини жорий этиш чора-тадбирлари тўғрисида»ги ПҚ-4391- сонли Қарори.
12. Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2019 йил 11 июлдаги «Олий ва ўрта махсус таълим соҳасида бошқарувни ислоҳ қилиш чора-тадбирлари тўғрисида»ги ПФ-5763-сон фармони.

13. Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2019 йил 27 августдаги “Олий таълим муассасалари раҳбар ва педагог кадрларининг узлуксиз малакасини ошириш тизимини жорий этиш тўғрисида”ги ПФ-5789-сонли фармони.

14. Ўзбекистон Республикаси Президентининг “2019-2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини инновацион ривожлантириш стратегиясини тасдиқлаш тўғрисида”ги 2018 йил 21 сентябрдаги ПФ-5544-сонли Фармони.

15. Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2019 йил 27 майдаги “Ўзбекистон Республикасида коррупцияга қарши курашиш тизимини янада такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида”ги ПФ-5729-сон Фармони.

16. Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 2 февралдаги “Коррупцияга қарши курашиш тўғрисида”ги Ўзбекистон Республикаси Қонунининг қоидаларини амалга ошириш чора-тадбирлари тўғрисида”ги ПҚ-2752-сонли қарори.

17. Ўзбекистон Республикаси Президентининг “Олий таълим тизимини янада ривожлантириш чора-тадбирлари тўғрисида”ги 2017 йил 20 апрелдаги ПҚ-2909-сонли қарори.

18. Ўзбекистон Республикаси Президентининг “Олий маълумотли мутахассислар тайёрлаш сифатини оширишда иқтисодиёт соҳалари ва тармоқларининг иштирокини янада кенгайтириш чора-тадбирлари тўғрисида”ги 2017 йил 27 июлдаги ПҚ-3151-сонли қарори.

19. Ўзбекистон Республикаси Президентининг “Нодавлат таълим хизматлари кўрсатиш фаолиятини янада ривожлантириш чора-тадбирлари тўғрисида”ги 2017 йил 15 сентябрдаги ПҚ-3276-сонли қарори.

20. Ўзбекистон Республикаси Президентининг “Олий таълим муассасаларида таълим сифатини ошириш ва уларнинг мамлакатда амалга оширилаётган кенг қамровли ислохотларда фаол иштирокини таъминлаш бўйича қўшимча чора-тадбирлар тўғрисида”ги 2018 йил 5 июндаги ПҚ-3775-сонли қарори.

21. Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамасининг 2012 йил 26 сентябрдаги “Олий таълим муассасалари педагог кадрларини қайта тайёрлаш ва уларнинг малакасини ошириш тизимини янада такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида”ги 278-сонли Қарори.

Основная литература

22. В.Hitz, J.J.Ewing, J.Hecht. Introduction to Laser Technology. – N.Y.: IEEE Press, 2012.

23. D.L. Elliott. Ultraviolet Laser Technology and Applications. - N.Y.: Academic Press Inc., 2014
24. А.Г. Григорьянц. Основы лазерной обработки материалов. - М.: Машиностроение, 1989.
25. В.П. Вейко, А.А. Петров. Введение в лазерные технологии. - Санкт-Петербург, СПбГУ, 2009.
26. Handbook of Laser Technology and Application / Ed. C.E. Webb. – Bristol: IOP Publishing, Ltd., 2004. - V.I-III.
27. Справочник по лазерной технике/ под ред. А.П. Напартовича. – М., Энергоатомиздат, 1991.
28. А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов. Оборудование и технология лазерной обработки материалов. – М.: Высшая школа, 1990.
29. С.И. Анисимов, Я.И. Имас, Г.С. Романов, Ю.В. Ходько. Действие излучения большой мощности на металлы - М.: Наука, 1980
30. Григорьянц А.Г., Сафонов А.Н. Лазерная техника и технология. В 7 кн. - М. Высшая школа, 1987 - 1988.
31. Промышленное применение лазеров/ под ред. Г. Кебнера. - М.: Машиностроение, 1988
32. G.Saxby. Practical Holography. - Bristol: IOP Publishing, Ltd., 2004.
33. U.Schnars, W.Jueptner. Digital Holography. – Berlin: Springer, 2005.
34. Клышко Д.Н. Физические основы квантовой электроники. – М., «Наука», 1986.
35. Быковский Ю.Л., Неволин В.Н., Фоминский В.Ю. Ионная и лазерная имплантация металлических материалов. – М.: Энергоатомиздат, 1991.
36. Handbook of Laser Material Processing / Ed. J.F. Ready. – N.Y.: Magnola Publishing, Inc., 2001
37. Применения лазеров/под ред. Тычинского В.П.- М.: Мир, 1984
38. Физическая энциклопедия, т.1-5. - М. Большая российская энциклопедия. (www.phys-encyclopedia.net)
39. Справочник по лазерам. / под ред. А.М. Прохорова. Т.1,2.– М., Советское радио. 1978.
40. Ганеев Р. Лазер одамлар хизматида. Тошкент, “Фан”, 1990.
41. Процессы лазерной сварки и термообработки / В.М. Андрияхин. – М.: Наука, 1988.
42. R.A.Ganeev, S.R.Kamalov, I.A.Kulagin, A.V.Zinoviev, V.I.Redkorechev, A.I.Ryasnyansky, R.I.Tugushev, T.Usmanov. "An automated set-up for investigation of nonlinear-optical characteristics of various materials by the Z-scan method". Instruments and Experimental Technique, V.45, No 6, P.810-815 (2002).
43. Гренишин С.Г., Березин Н.П., Виноградов К.М. и др. Терминологический словарь по оптике. Оптический журнал. 1996, Т.63, № 8. с.76-94.
44. Гренишин С.Г., Макушенко А.М. Перечень оптических терминов и понятий. Дополнение 1. Оптический журнал. - 1998. - Т 65, № 6, с. 90-106.
45. Квантовая электроника. Терминология. М.: Наука, 1976.

46. I.A.Kulagin, R.A.Ganeev, R.I.Tugushev, A.I.Ryasnyansky, T.Usmanov. "Analysis of third-order nonlinear susceptibilities of quadratic nonlinear optical crystals". J. Opt. Soc. Am. B, V.23, .No.1, P.75-80 (2006)
47. D. Bailey, E. Wright. Practical Fiber Optics, Elsivier, 2005. pp. 320

Интернет ресурсы

48. В.П. Вейко Новые направления лазерной микро- и нанотехноогии // <http://books.ifmo.ru/book/vip/22.pdf>
49. Современные лазерные технологии для строительства // <http://www.prin.ru/resource/doc/doc172.pdf>
50. Laserinfo // http://www.laserinfo.ru/index.php?option=com_frontpage&Itemid=1
51. Precision manufacturing // <http://imas.berkeley.edu/me220/Lecture-2-07.pdf>
52. Hugh power laser welding of thick construction of steels // http://www.ltu.se/polopoly_fs/1.4473!d55d7650.pdf
53. Ўзбекистон Республикаси Президентининг Матбуот маркази сайти: www.press-service.uz
54. Ўзбекистон Республикаси Давлат Ҳокимияти портали: www.gov.uz
55. Axborot-kommunikatsiya texnologiyalari izohli lug'ati, 2004, UNDP DDI: www.lugat.uz, www.glossary.uz
56. Infocom.uz электрон журнали: www.infocom.uz
57. www.press-uz.info
58. www.ziyonet.uz
59. www.edu.uz