



КОМПЛЕКС ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ПОЛИТИКИ
И ИМУЩЕСТВЕННО-ЗЕМЕЛЬНЫХ ОТНОШЕНИЙ
ПРАВИТЕЛЬСТВА МОСКВЫ



ДЕПАРТАМЕНТ ИНВЕСТИЦИОННОЙ
И ПРОМЫШЛЕННОЙ ПОЛИТИКИ
ГОРОДА МОСКВЫ

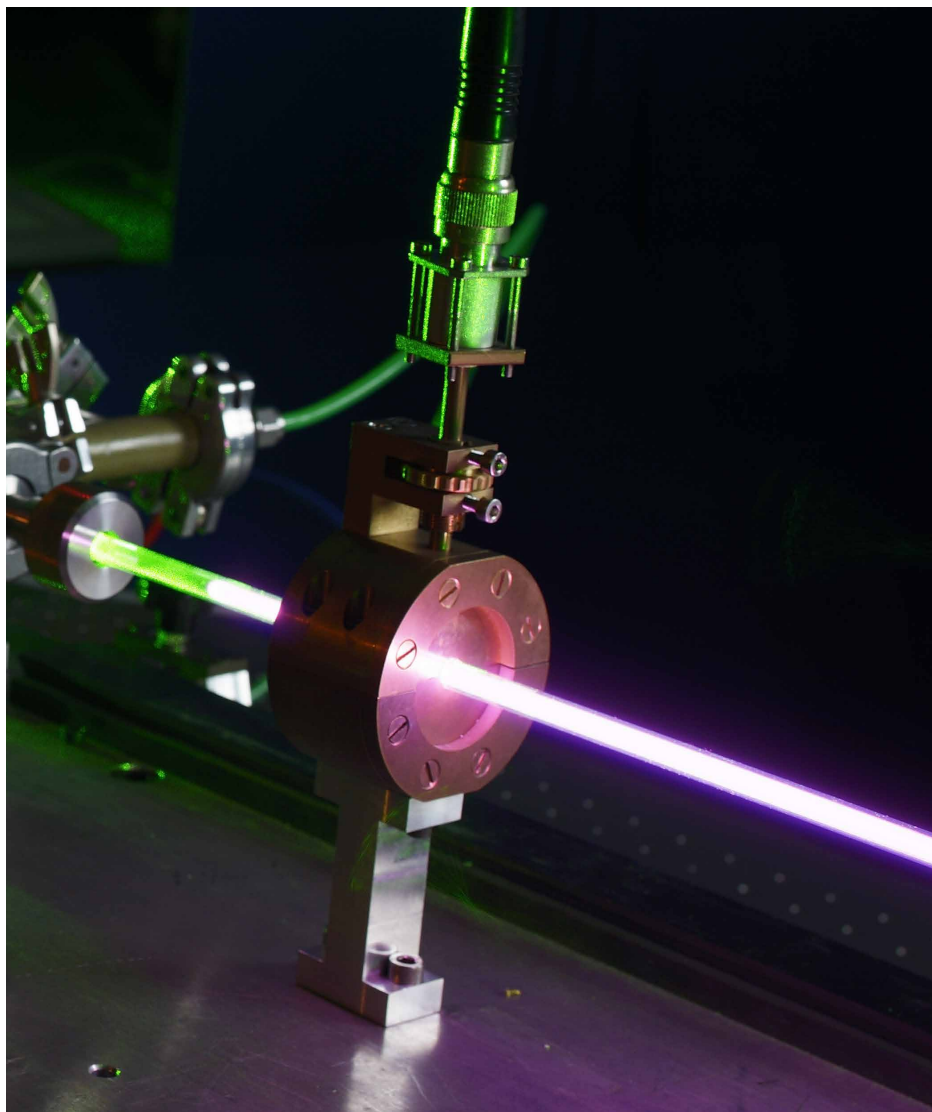
АПР

АГЕНТСТВО
ПРОМЫШЛЕННОГО
РАЗВИТИЯ МОСКВЫ

Лазерные технологии, технологии оптики и фотоники

2020

СОДЕРЖАНИЕ



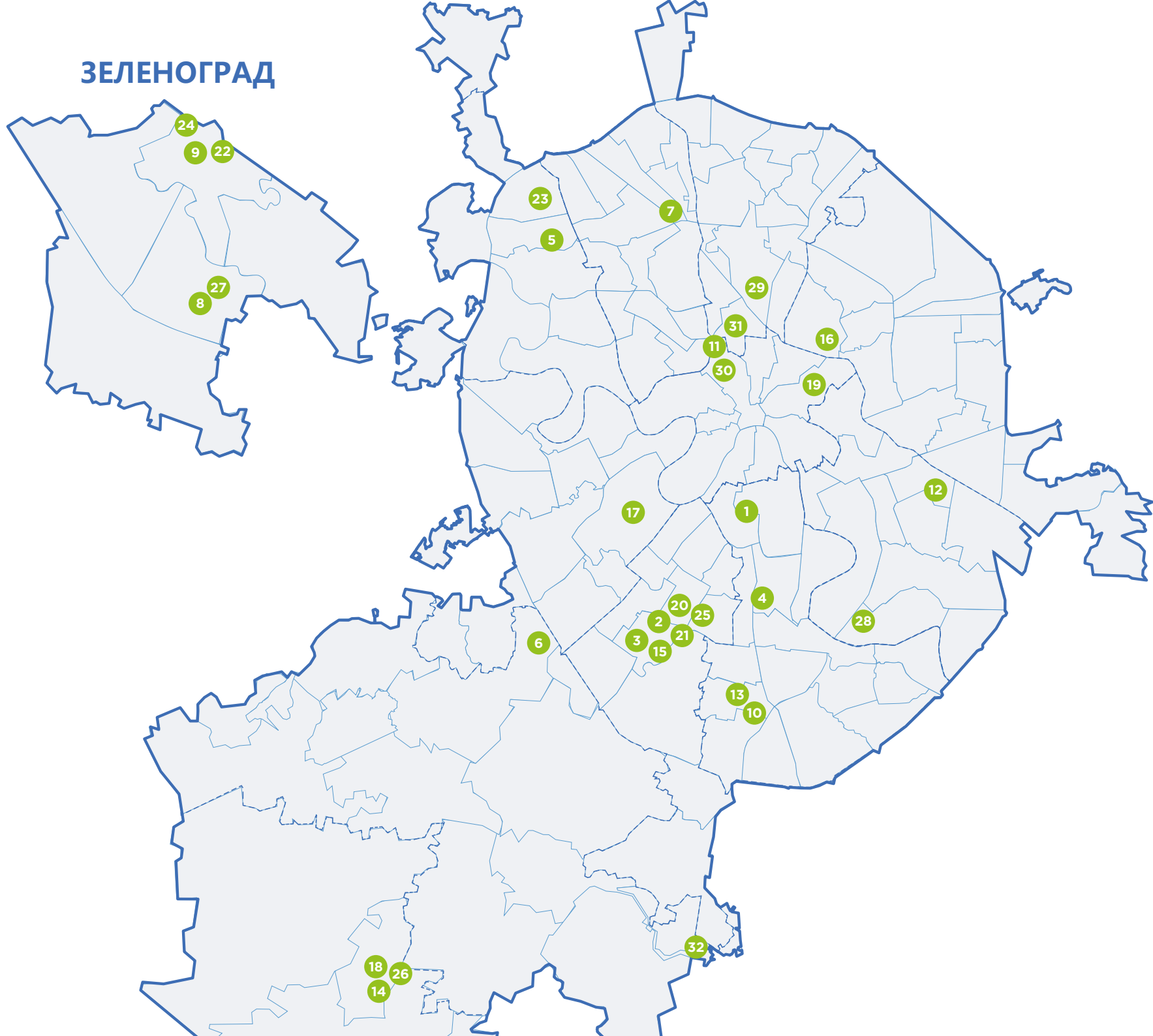
МОСКОВСКИЕ КОМПАНИИ	4
ГЛОССАРИЙ.....	6
ВВЕДЕНИЕ.....	10
ИСТОРИЯ.....	12
НОРМАТИВНЫЕ ДОКУМЕНТЫ	18
Классы лазерной опасности	19
КЛАССИФИКАЦИЯ ЛАЗЕРОВ	20
Виды лазеров	20
Параметры и характеристики лазеров.....	23
Длины волн лазеров различных типов	24
ОСНОВНЫЕ ПРОЦЕССЫ РАБОТЫ ЛАЗЕРА	28
Пространственные характеристики лазерного пучка.....	30
Поглощение света и преобразование энергии света в тепло.....	30
Режимы работы лазеров	31
Основные физические процессы лазерных технологий.....	31
ОСНОВНЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ И КОНСТРУКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ЛАЗЕРОВ.....	32
Устройства управления лазерным излучением	34
Параметры и характеристики устройств управления лазерным излучением	37
Оптические преобразователи пучка лазерного излучения	38
Основные особенности технологических лазеров	39

Характеристики качества излучения технологических лазеров.....	42	Нефтегазовая промышленность.....	93
Основные особенности воздействия лазерного излучения на твёрдые среды...42		Солнечная энергетика.....	94
Физические процессы, возникающие на поверхности твёрдых тел при лазерном нагреве.....	43	Ядерная энергетика.....	94
Физика лазерного формирования тонкоплёночной топологии.....	44	ОПТИЧЕСКИЙ ГИРОСКОП.....	95
ЛАЗЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ.....	45	ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ.....	99
Критерии выбора материала для лазера.....	46	Энергетические оптические системы.....	100
Виды лазерных материалов.....	46	Основные пространственно–геометрические модели лазерных источников ...	100
ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НАИБОЛЕЕ ПОПУЛЯРНЫХ ВИДОВ ЛАЗЕРОВ.....	47	Особенности фокусирующей техники.....	101
Области наиболее активного использования фотоники.....	48	Сканирующие системы А-типа для лазерной обработки.....	101
Перспективные области применения лазеров.....	48	Сканирующие системы Б-типа для лазерной обработки.....	102
Области применения основных видов лазеров.....	49	Проекционные схемы для лазерной обработки.....	102
Обработка материалов.....	50	Комбинированные оптические методы.....	103
Микрообработка.....	62	Волоконно-оптические системы доставки лазерного излучения (ВОС).....	104
Инновации и наука.....	74	ПРИМЕНЕНИЕ ФОТОНИКИ.....	105
Производство медицинского оборудования.....	82	Развитие радиофотоники в России.....	107
Медицинские процедуры.....	83	РЫНОК ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ФОТОНИКИ.....	108
Телекоммуникации.....	88	Мировой рынок лазерных технологий и фотоники.....	109
Сельское хозяйство и природопользование.....	90	Российский рынок лазерных технологий и фотоники.....	118
Автомобильная промышленность.....	90	ОСНОВНЫЕ ПРОИЗВОДИТЕЛИ ЛАЗЕРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ..	120
Бытовая техника и электроника.....	91	Московские производители.....	120
Авиационно-космическая промышленность.....	92	Российские производители.....	120
Полупроводниковая промышленность.....	92	Иностранные производители на российском рынке.....	121
Тяжёлая промышленность.....	93	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	122

МОСКОВСКИЕ КОМПАНИИ

1. ООО «КОМПАНИЯ «АЗИМУТ ФОТНИКС»
2. ООО «АТЕКО ЛАЗЕР»
3. ООО «ЕВРОЛЭЙЗ»
4. ООО «ЛАЗЕР МАСТЕР ГРУПП»
5. ООО «РЕЗЕРВ НК»
6. ООО «ЛАЗЕРТРЕК»
7. ООО «ЛАЗЕРФОРМ»
8. ООО НПЦ «ЛАЗЕРЫ И АППАРАТУРА ТМ»
9. ООО «ЛАТИКОМ»
10. ООО «МАРКИРУЮЩИЕ ИДЕНТИФИКАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСНЫЕ СИСТЕМЫ»
11. ООО «МОСКОВСКИЙ ЦЕНТР ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ»
12. ООО «СПЕЦОПТОПРОДУКЦИЯ»
13. ОАО «ШВАБЕ-ФОТОСИСТЕМЫ» (АО «МОСКОВСКИЙ ЗАВОД «САФИР»)
14. ООО «АВЕСТА-ПРОЕКТ»
15. АО «НОВАЯ ЛАЗЕРНАЯ ТЕХНИКА»
16. ООО «ЛАМЕТ»
17. МЛЦ МГУ – МЕЖДУНАРОДНЫЙ УЧЕБНО-НАУЧНЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ ЦЕНТР МОСКОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА ИМЕНИ М. В. ЛОМОНОСОВА
18. АО ГНЦ РФ «ТРИНИТИ»
19. МГТУ ИМ. Н. Э. БАУМАНА
20. ООО НПФ «ЛАЗЕР-КОМПАКТ»
21. ОАО «НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ «ПОЛЮС» ИМ. М. Ф. СТЕЛЬМАХА»
22. ООО «ОКБ «БУЛАТ»
23. ООО «НПЦ «АЛЬФА»
24. НПО «КВАНТРОН»
25. ООО «ИННОВАЦИОННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ «НЦВО-ФОТНИКА»
26. ООО «ОПТОСИСТЕМЫ»
27. ООО «ПВЦ ЛАЗЕРЫ И ТЕХНОЛОГИИ»
28. НПО «ТЕТА ЛАЗЕР»
29. ЦК СПА
30. ЦЛТ-ТРАНСМАШ – ЦЕНТР ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ОАО МТЗ «ТРАНСМАШ»
31. ФГУП «НПО «ТЕХНОМАШ»
32. АО «ПЛАКАРТ»

ЗЕЛЕНОГРАД



ГЛОССАРИЙ

Активатор	Примесь, введенная в вещество для образования центров люминесценции.
Акустооптический эффект	Изменение некоторых оптических параметров вещества под действием акустических ультразвуковых колебаний.
Биофотоника	Раздел фотоники, связанный с изучением и практическим использованием взаимодействия фотонов с биологическими объектами; сюда же обычно относят биомедицинские использования лазерного излучения.
Видимое излучение или свет	Оптическое излучение, которое может непосредственно вызывать зрительное ощущение. Не существует точных пределов спектрального диапазона видимого излучения, так как они зависят от мощности достигающего сетчатки ¹ излучения и чувствительности глаза наблюдателя. За нижний предел принимают диапазон от 360 до 400 нм, а за верхний предел – 760 и 830 нм.
Время жизни уровня энергии	Время, в течение которого населенность данного уровня энергии убывает в раз.
Время релаксации	Время, в течение которого первоначальное отклонение значения какого-либо параметра квантовой системы от равновесного уменьшается в раз.
Вынужденное излучение	Когерентное электромагнитное излучение, возникающее при вынужденных переходах, совпадающее по направлению, частоте, фазе и поляризации с вынуждающим излучением.
Вынужденное комбинационное рассеяние	Когерентное рассеяние высокоинтенсивного оптического излучения в нелинейной среде, при котором частота рассеянного излучения выражается формулой:

$$\nu = \nu_0 \pm n\nu_m$$

где:

ν - частота рассеянного излучения;

ν_0 - частота падающего излучения;

ν_m - частота собственных колебаний рассеивающей молекулы;

n - целое число, а вероятность рассеяния пропорциональна квадрату интенсивности

Добротность резонатора	Отношение энергии электромагнитного поля, запасенной в резонаторе, к энергии, теряемой за один период колебаний.
Инверсия населенностей	Неравновесное состояние квантовой системы, при котором населенность верхнего уровня энергии превышает населенность нижнего.
Индукцированный переход	Квантовый переход под действием внешнего электромагнитного поля.
Инфракрасное излучение	Оптическое излучение, у которого длины волн больше длин волн видимого излучения. Для инфракрасного излучения диапазон между 780 нм и 1 мм подразделяют на поддиапазоны: ИК-А (780-1400 нм), ИК-В (1,4-3 мкм), ИК-С (от 3 мкм до 1 мм).
Квантовая проволока	Объект нитеобразной формы с поперечными размерами, удовлетворяющими условию размерного квантования. Потенциальная энергия электрона в таком объекте ниже, чем за его пределами, и за счёт малых поперечных размеров (как правило, 1-10 нм) движение электрона ограничено в двух измерениях. Движение вдоль оси нити остается свободным, в то время как движение в других направлениях квантуется, и его энергия может принимать лишь дискретные значения.
Квантовая система	Отдельные частицы вещества или совокупности частиц, процессы в которых подчиняются законам квантовой механики.
Квантовая точка	Нанообъект, линейные размеры которого по трём измерениям близки длине волны электрона в материале данного нанообъекта и внутри которого потенциальная энергия электрона ниже, чем за его пределами, при этом движение электрона ограничено во всех трёх измерениях.
Квантовая электроника	Раздел фотоники, связанный с изучением и практическим применением методов усиления и генерации электромагнитного излучения, основанных на использовании явления вынужденного излучения в неравновесных квантовых системах.
Квантовая яма	Тонкий плоский слой полупроводникового материала (как правило, толщиной 1-10 нм), внутри которого потенциальная энергия электрона ниже, чем за его пределами, таким образом, движение электрона ограничено в одном измерении. Движение в направлении, перпендикулярном к плоскости квантовой ямы, квантуется, и его энергия может принимать лишь некоторые дискретные значения, называемые уровнями размерного квантования.

Квантовые кристаллы²	Кристаллы, характеризующиеся большой амплитудой нулевых колебаний атомов (колебаний вблизи $T = 0\text{ K}$), сравнимой с кратчайшим межатомным расстоянием, вследствие чего они обладают необычными физическими свойствами, объяснимыми только в рамках квантовой теории.
Квантовый переход	Скачкообразный переход квантовой системы из одного состояния в другое, связанный с изменением ее энергии.
Лазер	Генератор когерентного электромагнитного излучения в оптическом диапазоне, основанный на использовании индуцированных переходов. Под оптическим диапазоном понимается диапазон длин волн от 10 ⁻⁹ до 10 ⁻³ м.
Лазерная биостимуляция	Активизация естественных физиологических процессов в биологических тканях под воздействием лазерного излучения
Лазерное излучение	Электромагнитное излучение, испускаемое лазером в оптическом диапазоне длин волн.
Лазерные уровни энергии	Уровни энергии, используемые при генерации или усилении лазерного излучения.
Лазерный переход	Индукцированный переход между уровнями энергии или зонами.
Лазерный пинцет	Устройство для удержания нано- и микрочастиц вблизи фокуса специально сформированного лазерного луча, использующееся для целенаправленного перемещения таких частиц.
Линейный поляризатор	Оптический элемент или устройство, выходное излучение которого линейно поляризовано независимо от состояния поляризации входного излучения.
Магнитооптический эффект	Изменение некоторых оптических параметров вещества под действием магнитного поля.
Мода	Собственное колебание электромагнитного поля в оптическом резонаторе, характеризующееся определенной частотой и особенностью распределения поля в резонаторе.
Нанолазер	Устройство, генерирующее или усиливающее поверхностные плазмоны.

Нанотехнология	Применение научных знаний для изучения, проектирования, производства и управления строением ³ материальных объектов преимущественно в нанодиапазоне с использованием зависящих от размера и структуры свойств этих объектов или присущих им явлений, которые могут отсутствовать у отдельных атомов и молекул или аналогичных макрообъектов.
Нанопотоника	Раздел фотоники, связанный с изучением и практическим применением физических явлений, возникающих при взаимодействии фотонов с объектами нанометровых размеров, в т.ч. с созданием устройств, в которых для генерации или поглощения света используют наноструктуры.
Нанoeлектроника	Раздел электроники, изучающий методы проектирования и изготовления функциональных электронных устройств, компоненты которых имеют размеры в нанодиапазоне.
Направление поляризации	Направленность электрического вектора электромагнитной волны.
Населенность уровня энергии	Отношение числа частиц в единице объема на данном уровне энергии к его статистическому весу.
Оптический пробой	Нарушение структуры материала под действием лазерного излучения.
Оптическое излучение	Электромагнитное излучение с длинами волн, лежащими в пределах между областью перехода к рентгеновским лучам и областью перехода к радиоволнам.
Оптогенетика	Новая область нейробиологии, объединяющая оптические и генетические методы исследования нейронных связей (реакций, цепей) у интактных ⁴ млекопитающих и других животных на высоких скоростях (единицей измерения являются миллисекунды), что необходимо для понимания процессов обработки информации мозгом.
Ось оптического резонатора	Геометрическое место точек, соответствующее экстремальному значению оптической длины пути для совокупности лучей, связанных с различными модами оптического резонатора.
Параметры Стокса	Совокупность четырёх вещественных величин, которая полностью описывает состояние поляризации монохроматического или квазимонохроматического излучения.
Плазмон	Квазичастица, отвечающая квантованию плазменных колебаний, которые представляют собой коллективные колебания плотности заряда свободного электронного газа.

Плазмонный резонанс	Возбуждение поверхностного плазмона на его резонансной частоте внешней электромагнитной волной. В случае наноразмерных металлических структур называется локализованным плазмонным резонансом.
Плоскость поляризации	Плоскость, содержащая вектор электрического поля и направление распространения электромагнитного излучения.
Поляризация	Ограничение колебаний электрического вектора определенными направлениями. Это фундаментальное свойство оптического излучения трактуют, исходя из концепции наличия поперечной волны электромагнитного поля, т.е. что колебания совершаются перпендикулярно к направлению её распространения. Обычно эти колебания рассматривают применительно к электрическому вектору.
Поляритон	Составная квазичастица, возникающая при взаимодействии фотонов и элементарных возбуждений среды.
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.
Пучок лазерного излучения	Лазерное излучение, заключённое в телесном угле.
Релаксация	Процесс перехода квантовой системы из неравновесного состояния в равновесное.
Сверхлюминесценция	Вынужденное излучение, возникающее в процессе усиления излучения в лазерной активной среде.
Сечение пучка лазерного излучения	Минимальная площадь той части поперечного сечения пучка лазерного излучения, через которую проходит заданная доля энергии или мощности лазерного излучения.
Состояние поляризации	Отнесение поляризованного излучения к какому-либо типу: линейно поляризованному, хаотически поляризованному, с круговой (циркулярной) или эллиптической поляризацией, неполяризованному.
Спонтанное излучение	Излучение, возникающее в результате спонтанных переходов.

Спонтанный переход	Самопроизвольный переход, не зависящий от внешнего воздействия.
Ультрафиолетовое излучение	Оптическое излучение, у которого длины волн меньше длин волн видимого излучения. Для ультрафиолетового излучения диапазон между 100 и 400 нм подразделяют на поддиапазоны: УФ-А (315-400 нм), УФ-В (280-315 нм), УФ-С (100-280 нм).
Уровень энергии	Одно из возможных дискретных значений энергии квантовой системы.
Фотодиссоциация	Распад молекулы на атомы и радикалы при поглощении оптического излучения.
Фотоника	Область науки и техники, занимающаяся фундаментальными и прикладными исследованиями оптического излучения, а также созданием на их базе устройств различного назначения.
Частота лазерного перехода	Частота излучения, возникающего при вынужденном переходе между лазерными уровнями энергии.
Электрооптический эффект	Изменение некоторых оптических параметров вещества под воздействием электрического поля.
Энергетическая зона	Ряд уровней энергии, расширенных под действием внешних или внутренних полей таким образом, что эти уровни перекрываются.
Энергия излучения	Энергия, переносимая электромагнитными волнами.
Фотосенсибилизатор	Природное или искусственно синтезированное вещество, способное поглощать свет и индуцировать химические реакции, которые в его отсутствие не происходят.
Фотодинамическая терапия	Метод терапии злокачественных опухолей, основанный на введении в организм фотосенсибилизаторов, локализующихся преимущественно в опухоли, и воздействии света с определенной длиной волны.
Оптическая сенсорика	Раздел фотоники, связанный с разработкой принципов, методов и устройств диагностики с использованием оптического излучения.
Волоконно-оптическая сенсорика	Раздел оптической сенсорики, целью которого является разработка новых принципов и методов диагностики с использованием волоконно-оптических компонентов.

Оптоэлектроника или фотозлектроника	Область науки и техники, изучающая эффекты взаимодействия между электромагнитными волнами оптического диапазона и электронами вещества и охватывающая проблемы создания оптоэлектронных приборов, в которых эти эффекты используются для получения, обработки, передачи, хранения и отображения информации.
Кремниевая фотоника	Раздел фотоники, в рамках которой исследуются возможности создания фотонных интегральных схем на одном кристалле кремния.
Оптическая информатика	Раздел фотоники, связанный с созданием технологий передачи, приема, обработки, хранения и отображения информации с помощью потока фотонов.
Радиофотоника	Раздел оптоинформатики, решающий проблемы обработки СВЧ-сигналов с помощью оптических процессов, а также проблемы передачи, приема и обработки информации путем совместного использования электромагнитных волн оптического и СВЧ-диапазонов, и построения на такой основе специфических элементов, приборов и систем.
Оптическая связь	Способ передачи информации, использующий в качестве носителя информационного сигнала электромагнитное излучение оптического диапазона.
Квантовые коммуникации	Раздел оптической связи, связанный с изучением и практическим применением методов передачи информации фотонами, находящимися в неклассических (квантовых) состояниях.
Лазерные информационные системы	Информационные системы, в которых для переноса и/или обработки информации используется лазерное излучение.
Бюджет мощности оптической системы связи	Разность между отношением сигнал-шум на приёмнике оптической системы связи (в дБ) и требуемым для её работы отношением сигнал-шум (в дБ).
Интрадинный приём сигнала	Детектирование оптического сигнала в когерентных сетях связи, заключающееся в смешивании сигнала с опорным излучением, при условии, что несущая частота опорного излучения отличается от несущей частоты сигнала на величину, меньшую полосы сигнала.
Дисперсия волоконно-оптической линии связи	Различие временных задержек компонентов оптического сигнала в волоконно-оптической линии связи, обусловленное различием их групповых скоростей, вызывающее искажение формы и длительности информационных сигналов.

Квантовая криптография	Система защиты передаваемой по сети оптической связи информации, в которой используются квантовые свойства частиц, находящихся в неклассических состояниях.
Когерентное детектирование	Принцип детектирования оптических сигналов, заключающийся в том, что оптический сигнал смешивается с опорным излучением (ОИ) и суммарное излучение поступает на несколько фотодиодов, преобразующих его в электрический сигнал биений.
Когерентные системы связи	Системы связи, использующие когерентное детектирование.
Когерентный оптический приёмник с цифровой обработкой сигналов	Когерентный оптический приёмник, в котором амплитудная и фазовая информация, переносимая оптическим сигналом, преобразуется в электрическую форму, оцифровывается и обрабатывается для компенсации рассинхронизации частот и фаз источника опорного излучения и несущей оптического сигнала, для компенсации хроматической и поляризационной модовой дисперсии, для синхронизации и фазовой диверсификации, а также для декодирования цифровой информации.
Компенсация дисперсии	Восстановление формы и длительности информационных сигналов путем компенсации задержек компонент оптического сигнала в волоконно-оптической линии связи с дисперсией.
Электронная компенсация дисперсии	Компенсация дисперсии, осуществляемая в приёмнике путём обработки детектированного электрического сигнала.

1. Ретина или сетчатка (от лат. *retína*) – внутренняя оболочка глаза, являющаяся периферическим отделом зрительного анализатора; содержит фоторецепторные клетки, обеспечивающие восприятие и преобразование электромагнитного излучения видимой части спектра в нервные импульсы, а также обеспечивает их первичную обработку.

2. Производство и управление строением включают в себя синтез материалов.

3. Из известных на Земле веществ только изотопы гелия ^3He и ^4He при давлениях свыше $3 \times 10^4 \text{ Па}$ образуют квантовые кристаллы. Квантовые эффекты наблюдаются также у кристаллов Ne (неон) и в меньшей степени у кристаллов других инертных газов. В недрах нейтронных звезд, возможно, существуют квантовые кристаллы, состоящие из нейтронов.

4. Интактные млекопитающие (от лат. *intactus* – нетронутый) – это лабораторные животные, не подвергавшиеся каким-либо экспериментальным воздействиям.

ВВЕДЕНИЕ

Лазерные технологии базируются на трёх китах – лазерах, оптике и взаимодействии излучения с веществом.

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

- Какие свойства взаимодействия лазерного излучения с веществом должны быть выбраны – резонансные/нерезонансные, поглощение/рассеяние, фото/термопоглощение, нагревание, закалка, плавление, размягчение, испарение, разложение, коагуляция¹ и т.д.
- Какой тип лазерного источника использовать – длина волны, режим операции – непрерывный/импульсно-частотный, мощность, продолжительность импульса, поперечное распределение энергии в пучке, когерентность, монохроматичность, поляризация, и т.д.
- Какие требования к поперечной и продольной форме пучка, оптикомеханическим и оптоэлектронным системам следует предъявить.

1. Коагуляция (лат. coagulatio – свёртывание, сгущение, укрупнение) – объединение мелких диспергированных частиц в большие по размеру агрегаты.



Понятие «фотоника» появилось в конце XX века и быстро вошло в повседневную жизнь. Это оптоволоконные линии связи, увеличившие скорость передачи данных в десятки тысяч раз, это плоские экраны телевизоров и компьютерных мониторов, это смартфоны и многое другое.

Фотоника как отдельная отрасль высоких технологий сложилась в последнее десятилетие в результате бурного развития работ по созданию и практическому освоению разнообразных методов, технологий и аппаратуры, использующих передачу энергии и/или информации потоком фотонов, и появлению массового спроса на соответствующее оборудование. Эти работы явились естественным продолжением многочисленных исследований по лазерам и взаимодействию лазерных пучков с веществом, которые широким фронтом велись в мире во 2-й половине XX века. В ходе этих исследований были накоплены новые

знания о световых пучках, возможностях управления их характеристиками и преобразования их энергии в другие виды энергии, получили мощное развитие такие научно-технические направления как квантовая электроника, нелинейная оптика, волоконная оптика, квантовая оптика, физика и техника лазерной плазмы, передача информации по лазерному лучу, лазерноиндуцированные термомеханические процессы, лазерная химия и многие другие, были разработаны разнообразные источники световых пучков. Термин «фотоника» объединил все эти научно-технические направления.

В России насчитывается около 850 таких организаций, в т.ч. более 80 академических институтов и научных центров (РАН и РАМН), около 150 ВУЗов и научно-технических центров при ВУЗах, около 100 отраслевых НИИ, КБ и НПО, около 60 производственных объединений и крупных предприятий, более 120 медицинских учреждений и не менее 320 малых предприятий. По территории страны они распределены весьма неравномерно. Центрами

максимальной концентрации организаций и предприятий отрасли являются Москва, С.Петербург, Московская область, Новосибирск и Поволжье.

Средние темпы роста объёмов производства фотоники в ЕС в последние 5 лет составляют 8% - несмотря на рецессию экономики – а годовой объём производства продукции фотоники достиг в 2011 г. 60 млрд. евро. В этой отрасли в Евросоюзе работают около 400 тыс. чел, больше всего – в Германии, Великобритании, Франции, Нидерландах, Италии и Швейцарии. От технологий фотоники непосредственно зависит 25% всей европейской экономики и 10% всех работающих (около 30 млн. рабочих мест).

В США фотоника признана технологией первостепенной необходимости для страны («essential for our nation»), в ее развитие вкладываются весьма значительные средства (например, только на НИОКР в 2010 г. – около 540 млн. долл. через агентство DARPA и 960 млн. долл. – в виде

грантов Национального института здоровья), что позволяет США сохранять лидирующие позиции в этой отрасли – и в плане научных исследований, и на рынке.

В Китае действует специальная государственная целевая программа, приведшая к созданию за 12 лет около 5 тыс. предприятий лазерно-оптической специализации и росту объема производства продукции фотоники в КНР в среднем на 25 – 30% в год в 2000-2012гг. Главными направлениями развития фотоники здесь являются телекоммуникации и информатика (в частности, на Китай приходится сегодня 60% мирового объема производства оптоволокон), медицинские технологии (80% всех медицинских учреждений КНР с числом пациентов более 200 уже имеют специальные отделения или участки лазерной диагностики и/или лечения), новые производственные технологии. Кроме того, в Китае очень мощно развивается оборонная фотоника.

К числу стран, целенаправленно и весьма активно развивающих свою фотонику, относятся также Япония, Южная Корея, Тайвань, Турция, Канада, Мексика, Малайзия.

Лазерная техника играет центральную роль в происходящих в последнее время в мире изменениях технологического уклада, которые связаны с резким повышением гибкости и мобильности производства, энергоэффективностью, снижением издержек и, одновременно, выходом на новый уровень качества продукции. Степень развития и темпы освоения лазерных технологий в любой стране однозначно отражают мощь, статус и технологическое положение данной страны на мировом рынке.

При этом потенциалом, позволяющим разрабатывать и производить современные лазерные технологические системы, обладает не более десятка стран. К их числу относится и Россия.

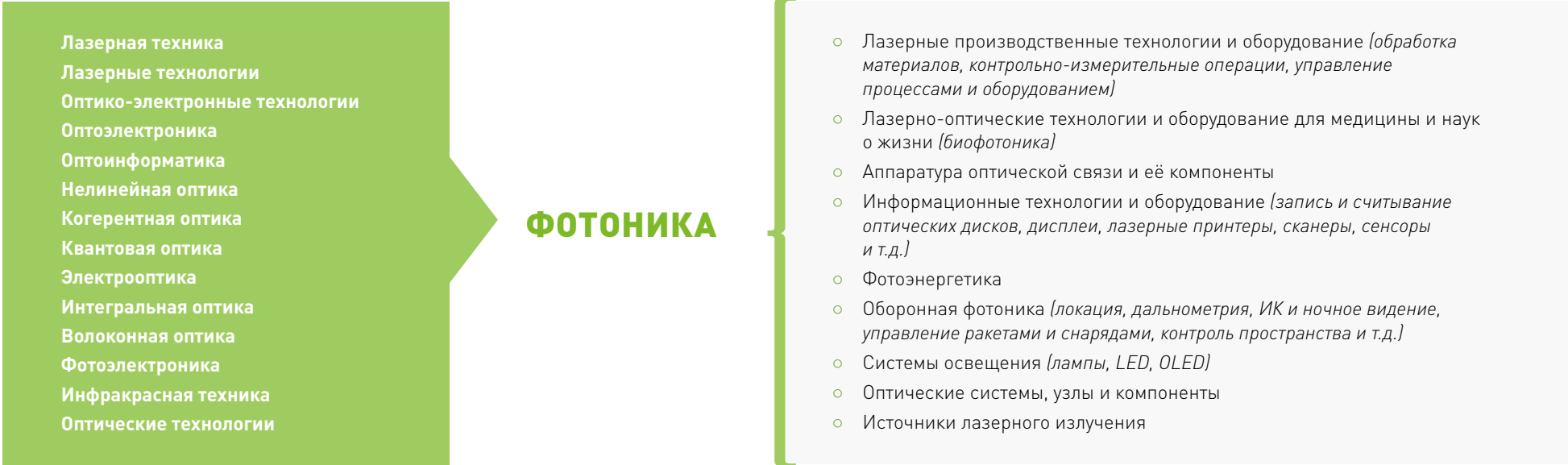


Рисунок 1 – Объединение термином «фотоника» разнообразных научно-технических направлений

1917

А. Эйнштейн представляет концепцию вынужденного излучения

1920

И. Франк и Ф. Райхе подтвердили существование метастабильных состояний в возбужденном состоянии

1927

Поль Дирак создает квантовую теорию вынужденного излучения

1928

Р. Ладенбург и Г. Копферман исследовали отрицательную дисперсию света в газовом разряде (в неоне)

1940

В. А. Фабрикант исследовал отрицательное поглощение света

1962

Д. Уайт и Дж. Риджен создали He-Ne лазер с длиной волны 632,8 нм
Р. Холл и другие; Н. Г. Басов и другие изобрели полупроводниковые лазеры на арсениде галлия ($\lambda = 840$ нм, $\lambda = 710$ нм)

добротности
П. А. Франкен получил генерацию второй гармоники (удвоение частоты) в рубиновом лазере с помощью кристалла кварца

Э. Снитцер получил стимулированную эмиссию на Nd^{3+} : стекле ($\lambda = 1,062$ мкм)
Д. Полани создал химический лазер на экзотермических газовых реакциях
Р. В. Геллварт предложил генерацию мощных лазерных импульсов с помощью модуляции

1961

А. Г. Фокс и Т. Ли; Г. Д. Бойд и Дж. П. Гордон создали теорию оптических резонаторов со сферическими зеркалами
П. П. Сорокин и М. Дж. Стевенсон, В. Кайзер и другие получили стимулированную эмиссию на Sm^{2+} : CaF_2 -кристалле ($\lambda = 708$ нм)

1960

Т. Майман создал первый лазер на кристалле рубина (Cr^{3+} : Al_2O_3) ($\lambda = 694,3$ нм)
А. Джаван, В. Беннет и Д. Ериот построили гелий-неоновый лазер ($\lambda = 1,15$ мкм)
П. Сорокин и М. Стевенсон получили стимулированную эмиссию на U^{3+} : CaF_2 -кристалле ($\lambda = 2,5$ мкм и $\lambda = 2,6$ мкм)
Ф. Г. Хоутерманс предложил эксимер как лазерную среду

1963

Д. Кляйнман и П. Кислюк построили первый рефлектор Фабри-Перо для селекции мод в лазерном резонаторе
Н. Бломберген и другие выдвинули теорию распространения волн в нелинейных средах (удвоение частоты, параметрические процессы, стимулированный эффект Рамана, многофононная ионизация и другие)

Л. Джонсон и другие представили первые перестраиваемые лазеры на переходных металлах, например Ni^{2+} : MgF_2 ($\lambda = 1,62$ мкм ... 1,8 мкм)
Ф. Дилл, В. Говард и другие получили непрерывную стимулированную эмиссию в GaAs диодах при температуре от 2К до 77К ($\lambda = 840$ нм)
Н. Г. Басов и А. Н. Ораевский предложили идею тепловой накачки

Г. Херд создал первый азотный лазер
Г. Кромер, Ж. И. Алферов и Р. Ф. Казаринов предложили двойные гетероструктуры для лазерных диодов
Р. Нойман предложил возбуждать твердотельные среды с помощью лазерных диодов
М. Коупланд применил GaAs диод как оптический усилитель

1964

Дж. Гойзик и другие получили стимулированное излучение на длине волны 1,064 мкм в Nd:YAG-лазере (Nd^{3+} : $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$)
К. Пател построил первые лазеры на CO_2 -газе
Л. Харгроу, Р. Рорк и М. Поллак получили режим синхронизации мод в He-Ne лазере с продолжительностью импульса 600 пс
В. Бриджес реализовал

аргон-ионный лазер ($\lambda = 488$ нм, $\lambda = 514$ нм), ксеноновый и криптоновый лазер
Г. Гэбби создал 337-мкм-НСN-лазер, первый эффективный субмиллиметровый лазер
Р. Кайес и Т. Квист построили первый твердотельный лазер с накачкой лазерными диодами (U^{3+} : CaF_2 -кристалл возбуждался GaAs-диодами) с рабочей температурой 4,2 К

ИСТОРИЯ

1947

У. Лэмб и Р. Резерфорд впервые демонстрируют вынужденное излучение. Оливер Селфридж написал статью «Глаза и уши компьютера» о машинном зрении.

1950

К. М. Пурселл и Р. Ф. Паунд получили вынужденное излучение во фториде лития при быстром переключении магнитного поля (инвертированный спин). А. Кастлер (Нобелевская премия по физике 1966 года) предлагает метод оптической накачки среды для создания в ней инверсной

1951

населённости. Реализован на практике в 1952 году Бросселем, Кастлером и Винтером^[5]. До создания квантового генератора оставался один шаг: ввести в среду положительную обратную связь, то есть поместить эту среду в резонатор^[4]. В. А. Фабрикант, Ф. А. Бугаева и М. М. Вудинский провели эксперименты по усилению электромагнитного излучения в газах. Ч. Таунс исследовал возможности создания генератора субмиллиметрового диапазона. Ц. С. ван Гиел, Г. Г. Хопкинс и Н. С. Капани изготовили первое оптическое волокно.

1952

Дж. Вебер разработал теорию микроволновых резонаторов, шумов и чувствительности усилителей.

1959

Г. Гулд вводит термин «лазер» и представляет чертежи оптического мазера (лазера) в американское патентное бюро. Н. Г. Басов делает теоретическое обоснование полупроводникового лазера.

1958

Л. Шавлов и Ч. Таунс проводят расчеты мазеров для видимого и инфракрасного диапазонов.

1956

Н. Бломберген разработал теорию трёхуровневого твердотельного лазера.

1954

Н. Г. Басов, А. М. Прохоров; Ч. Таунс, В. Гордон; Дж. Цайгер, К. Шимода, Т. Ванг создали независимо друг от друга первый мазер на молекулах аммиака. Н. С. Капани ввел термин «волоконная оптика».

1953

Дж. фон Нейман разработал теорию фотонного усиления.

1965

П. Кафалас, Б. Соффер и П. Свирокин реализовали пассивную модуляцию добротности с помощью насыщенного поглотителя.

1966

Дж. Каспер и Дж. Пиментал изобрели химический лазер на HCl , импульсный с оптическим инициированием ($\lambda = 3,5$ мкм). Б. Фритц и Е. Менке создали первый лазер на центрах окраски в KCl: Li / Fe -кристалле ($\lambda = 2,7$ мкм). Дж. Жордмейн и Р. Миллер создали первый параметрический осциллятор на LiNbO_3 -кристалле.

1967

В. К. Конюхов, О. М. Прохоров; Р. Кантровитц и другие реализовали первый газодинамический CO_2 -лазер. П. П. Сорокин и Дж. Р. Ланкард построили первый импульсный лазер на красителях с накачкой лазером на рубине ($\lambda = 756$ нм).

В. Сильфаст, Г. Фовлс реализуют первый лазер на парах металлов Zn / Cd -лазер. В. Т. Уолтер построил первый лазер на парах меди ($\lambda = 510,6$ нм и $\lambda = 578,2$ нм).

Ф. К. Кнойбюль и другие реализовали волноводный газовый лазер на HCN -молекулах ($\lambda = 337$ мкм). Т. Ф. Дойтч, К. Л. Компа и Г. С. Пиментель построили первый фтороводородный (HF) лазер.

1968

Ж. И. Алферов и другие создали полупроводниковый лазер на двойной гетероструктуре с генерацией в импульсном режиме
М. Росс реализовал первый Nd:YAG-лазер с накачкой лазерными диодами
В. Т. Уолтер построил первый лазер на парах золота ($\lambda = 637,8$ нм)

1969

В. Б. Тифанни и другие построили первый киловаттный CO₂-лазер
Т. А. Кул и Р. Р. Тефенс создали чисто химический лазер на HCl непрерывного действия

1970

О. Петерсон и другие получили непрерывное излучение на родамине 6G
Н. Г. Басов и другие построили первый эксимерный лазер на He⁺₂
Т. Чанг и Т. Бриджес построили 496-мкм-CH₃F-лазер
Ж. И. Алферов и другие построили первые лазерные диоды на двойных гетероструктурах

1971

с непрерывной генерацией при комнатной температуре
И. Хаяши, М. Паниш на другие построили лазерные диоды с непрерывной генерацией при комнатной температуре
Л. Эсаки и Р. Тсу получили первые квантовые волновые структуры

Х. Когельник и С. Шанк изобрели лазер на красителях с распределенной обратной связью

1989

С. Пейн и другие построили первый Cr: LiCaF-лазер с перестройкой длины волны в диапазоне 780 нм и 920 нм

1988

С. Пейн и другие построили первый Cr: LiCaF-лазер с перестройкой длины волны в диапазоне 720 нм и 840 нм

1987

Д. Пейн открыл эрбиевый усилитель с рабочей длиной волны 1,55 мкм (Erbium Doped Fiber Amplifier)

1985

Д. Мэттьюс и другие открыли рентгеновский лазер с 15 нм излучением
Т. Кейн и Р. Бэйр создали монолитный кольцевой YAG-лазер с диодной накачкой

1983

Л. Молленауер, Р. Стоулен построил первый лазер на солитонах

1991

М. Гаазе и другие получили кратковременную генерацию с голубовато-зелёного лазерного диода на базе селенида цинка

1962

Г. Гриин, Г. Ляйзинг и другие создали первый органический полимерный светодиод с голубым излучением

1994

К. Ан и другие открыли первый лазер на одном атоме ($\lambda = 791$ нм)

1995

М. Андерсон и другие; К. Дэвис и другие впервые наблюдают конденсат Бозе-Эйнштейна в атомарных газах

1996

С. Накамура создал первые эффективные голубые лазерные диоды на базе нитрида галлия
Р. Френд построил полимерный лазер с оптической накачкой

ИСТОРИЯ

1973

М. Накамура и А. Яров создали первый DFB полупроводниковый лазер

1974

Г. Маровский использовал кольцевой резонатор для предотвращения «spatial hole burning»-эффекта
А. И. Гудзенко и С. И. Яковенко предложили реактор-лазер

1975

Т. Генш, А. Шавлов, Д. Винеланд и Г. Демельт предложили охлаждения атомных пучков с помощью лазеров

1976

Дж. Гсиех построил непрерывные InGaAsP-лазерные диоды ($\lambda = 1,25$ мкм)

1977

Дж. Мадейс и другие создали первый лазер на свободных электронах

1982

П. Моултон построил первый титан-сапфировый лазер ($Ti_3+ : Al_2O_3$) с перестройкой длин волн излучения между 670 нм и 1079 нм

1981

Ф. Кояма и другие построили GaInAsP / InP-лазерные диоды с распределенным отражателем Брэгга (Distributed Bragg Reflector)

1980

Л. Молленауер, Р. Стоулен, Дж. Гордон впервые наблюдали солитоны в оптических волокнах
Ц. Бор получил короткие импульсы с помощью лазера на красителях

1979

Е. Аффолтер и Ф. Кнойбюль построили газовый лазер с распределенной обратной связью (DFB)
Х. Сода и другие создали первые поверхностно-излучающие лазерные диоды (Vertical Cavity Surface Emitting Lasers)

1978

Дж. Валлинг построил твердотельный лазер на александрите ($BeAl_2O_4 : Cr_3^{+}$) с непрерывной перестройкой в диапазоне 710–820 нм
В. Мак Дермотт, Н. Пчелкин и другие создали чисто химический лазер на электронных переходах в йоде ($\lambda = 1,315$ мкм)

1999

В. Кеттерле и другие; К. Моцума и другие открыли первый атомный лазер – когерентное усиление материальных волн при прохождении атомного резервуара

2000

Ученые ГОИ им. С.И. Вавилова выдвинули идею преобразования солнечной энергии с помощью фуллерен-кислород-йодного лазера (ФОИЛ)

2003

Ученые ГОИ им. С.И. Вавилова разработали фуллерен-кислород-йодный лазер с оптической накачкой и с накачкой имитатором солнечного излучения со следующими характеристиками: пиковая мощность 40 кВт, средняя

мощность излучения 30 Вт, частота повторения импульсов 30 Гц
Разработана конструкция фуллерен-кислород-йодного лазера с разделенными областями накачки и генерации, которая использует проток кислорода через пористую фуллереновую поверхность,

– возможный прототип лазера для преобразования солнечной энергии
Группа исследователей из НАСА создала опытный образец самолёта, который использует лазерное излучение для полёта

2004

Разработан первый кремниевый рамановский лазер

2006

Группа исследователей из Калифорнийского университета создали первый гибридный кремниевый лазер с электрическим питанием, использующим стандарт процессы производства кремния

2007

Группа исследователей из Калифорнийского университета создали первый кремниевый лазер с эмалировкой с синхронизацией мод, обеспечивающего новый способ интеграции оптических и электронных функций на одном кристалле и позволяющего создавать новые типы интегральных микросхем

2009

Компания Intel представила технологию Light Peak, которая позволяет отправлять и получать 10 миллиардов бит данных в секунду
Международная команда учёных представила компактные, многолучевые и многоволновые лазеры, излучающие в инфракрасном

диапазоне высоконаправленные пучки с одинаковой длиной волны около 8 мкм
Корпорация Northrop Grumman объявила о создании твердотельного электрического лазера мощностью около 100 кВт

2018

Работы по разработке техники манипулирования наноразмерами для управления случайными лазерами, что приближает их практическое применение

В России представили лазерный комплекс «Пересвет», предназначенный для решения задач противоракетной обороны и поражения орбитальных аппаратов противника с оптической мощностью 200-400 киловатт и до 1 МВт

длина волны, намного короче, чем УФ-лазеры с длиной волны 193 нм
Исследователи из Университета Кардиффа, Университетского колледжа Лондона и Университета Шеффилда представили лазеры с квантовыми точками на кремнии

представил технологию EUV (экстремальной ультрафиолетовой) литографии, в которой инфракрасный CO2-лазер запускает концентрированный импульс света с длиной волны 13,5 нм в микроскопической капле расплавленного олова. Эта технология и соответствующая ей

2016

Новосибирские и московские физики «скрестили» случайную генерацию и висмутовые волоконные световоды – получился случайный волоконный лазер на основе висмутового активного световода
Производитель инструментов для полупроводниковой литографии ASML

2019

Исследователи Массачусетского технологического института разработали способ использования лазеров для распознавания шёпота, используя тулиевый лазер с длиной волны 1,9 мкм для возбуждения молекул воды возле микрофона, который передавал звуковой сигнал, который звучит почти так же громко, как и обычный разговор

ИСТОРИЯ

2010

Учёные из Констанцкого университета создали одночастотный импульс света длительностью 4,3 фс при длине волны 1,5 мкм из волоконного лазера, легированного эрбием
Национальная администрация по ядерной безопасности США представила лазер с энергией более 1 МДж

Исследователи Северо-Западного университета (США) сообщили о прорыве в эффективности квантово-каскадного лазера (тип полупроводникового лазера), достигнув 53% по сравнению с предыдущим показателями в 40%

Учёные из университета Инсбрука в Австрии продемонстрировали одноатомный лазер с пороговым поведением и без него, настраивая силу связи атома со световым полем

2011

Исследователи из ETH Zürich (часть Швейцарского федерального технологического института) разработали лазер с поверхностным излучением с вертикальной внешней полостью (VECSEL), который работал в среднем ИК-диапазоне около 5 мкм

Исследователи Гарвардского университета продемонстрировали живой лазер. Они генетически сконструировали клетки, чтобы произвести новый материал – зелёный флуоресцентный белок (GFP), вещество,

2015

Учёные Техасского университета сообщили о разработке случайного рамановского лазера, импульс которого длился несколько наносекунд и имел спектральную ширину около 0,1 нм

2014

Российские учёные Ю. Резунков и А. Шмидт сообщили, что ракеты могут получить импульс от лазеров. Лазер ударяется о поверхность и создает плазменный шлейф, который генерирует тягу при выходе

2013

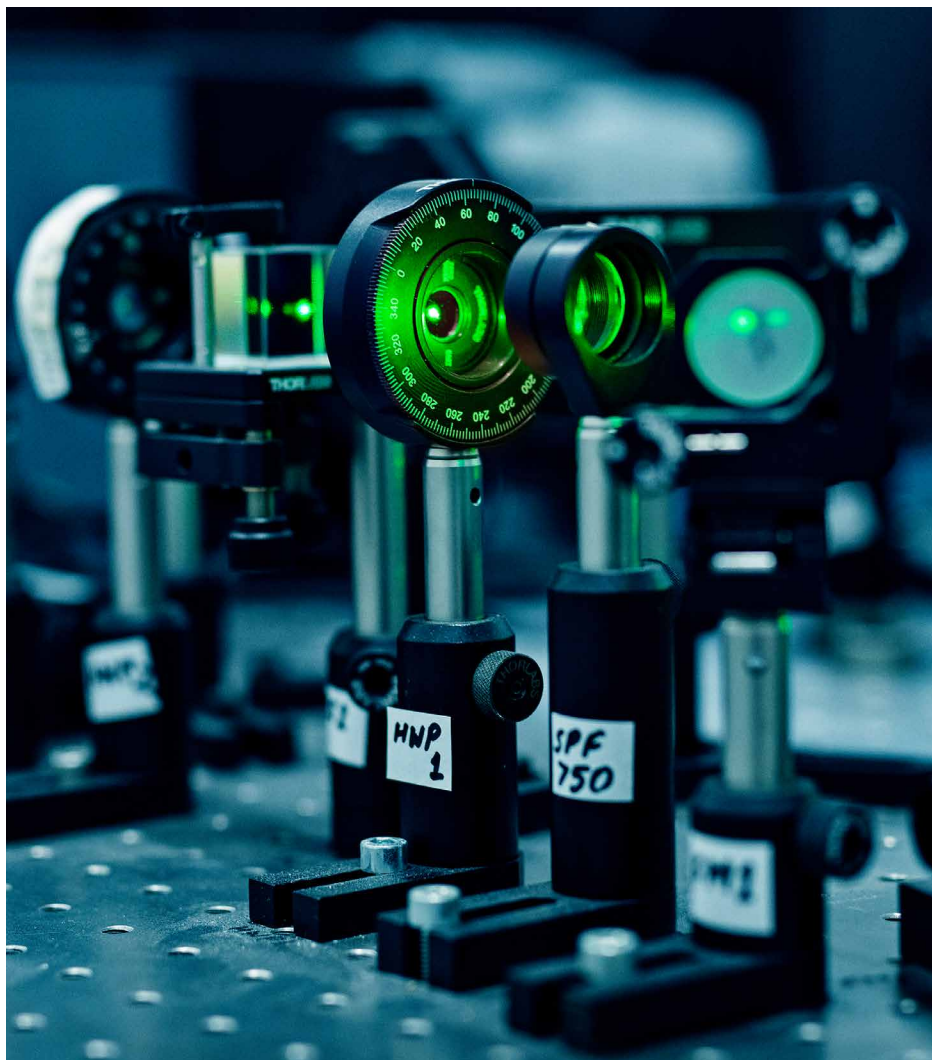
Команда специалистов из Технического университета Мюнхена, продемонстрировала лазерные нанопроволоки комнатной температуры, которые излучают свет в ближнем ИК-диапазоне и построены в конфигурации ядро-оболочка

2012

Команда Йельского университета создала случайный лазер, в котором оптическая обратная связь обеспечивается с помощью рассеяния частиц

которое делает медуз биолюминесцентными. Затем они поместили ячейку диаметром от 15 до 20 мкм в оптический резонатор и накачали ячейку импульсами синего света.

НОРМАТИВНЫЕ ДОКУМЕНТЫ

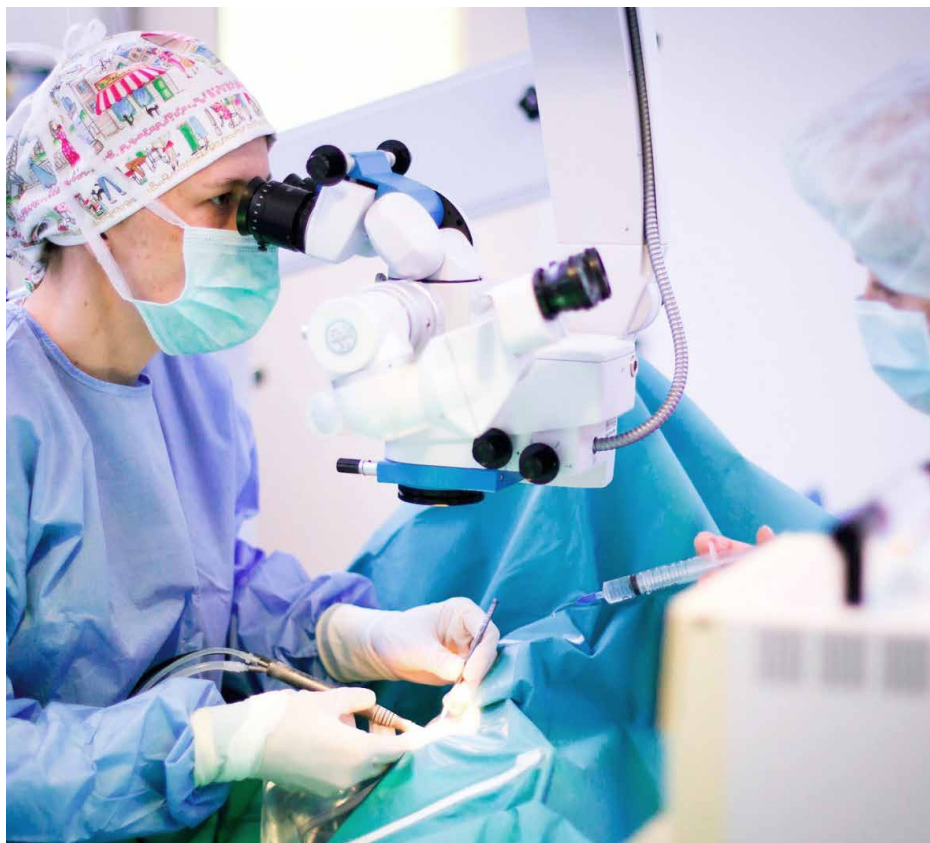


Информацию об обеспечении безопасности при работе с лазерами и лазерными системами можно получить в следующих документах:

1. **СанПиН 2.2.4.3359-16**
Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах.
2. **СанПиН 5804-91**
Санитарные нормы и правила устройства и эксплуатации лазеров.
3. **ГОСТ IEC 60825-1-2013**
Безопасность лазерной аппаратуры. Часть 1. Классификация оборудования, требования и руководство для потребителей.
4. **ГОСТ IEC 60825-2-2013**
Безопасность лазерной аппаратуры. Часть 2. Безопасность волоконно-оптических систем связи.
5. **ГОСТ EN 12626-2006**
Безопасность металлообрабатывающих станков. Станки для лазерной обработки.
6. **ГОСТ 31581-2012**
Лазерная безопасность. Общие требования безопасности при разработке и эксплуатации лазерных изделий.
7. **ГОСТ 12.4.308-2016**
Средства индивидуальной защиты глаз.
8. **ГОСТ Р 54840-2011 /IEC/TR 60825-14:2004**
Безопасность лазерной аппаратуры. Часть 14. Руководство пользователя.
9. **ANSI B11.21-2006 (R2012)**
American National Standard for Machines. Safety Requirements for Machine Tools Using a Laser for Processing Materials.
10. **ANSI Z136.1-2014**
American National Standard for Safe Use of Lasers.
11. **ANSI Z136.8-2012**
American National Standard for Safe Use of Lasers in Research, Development, or Testing.
12. **Американский лазерный институт**
(Laser Institute of America, LIA), <http://www.laserinstitute.org/>.

КЛАССЫ ЛАЗЕРНОЙ ОПАСНОСТИ

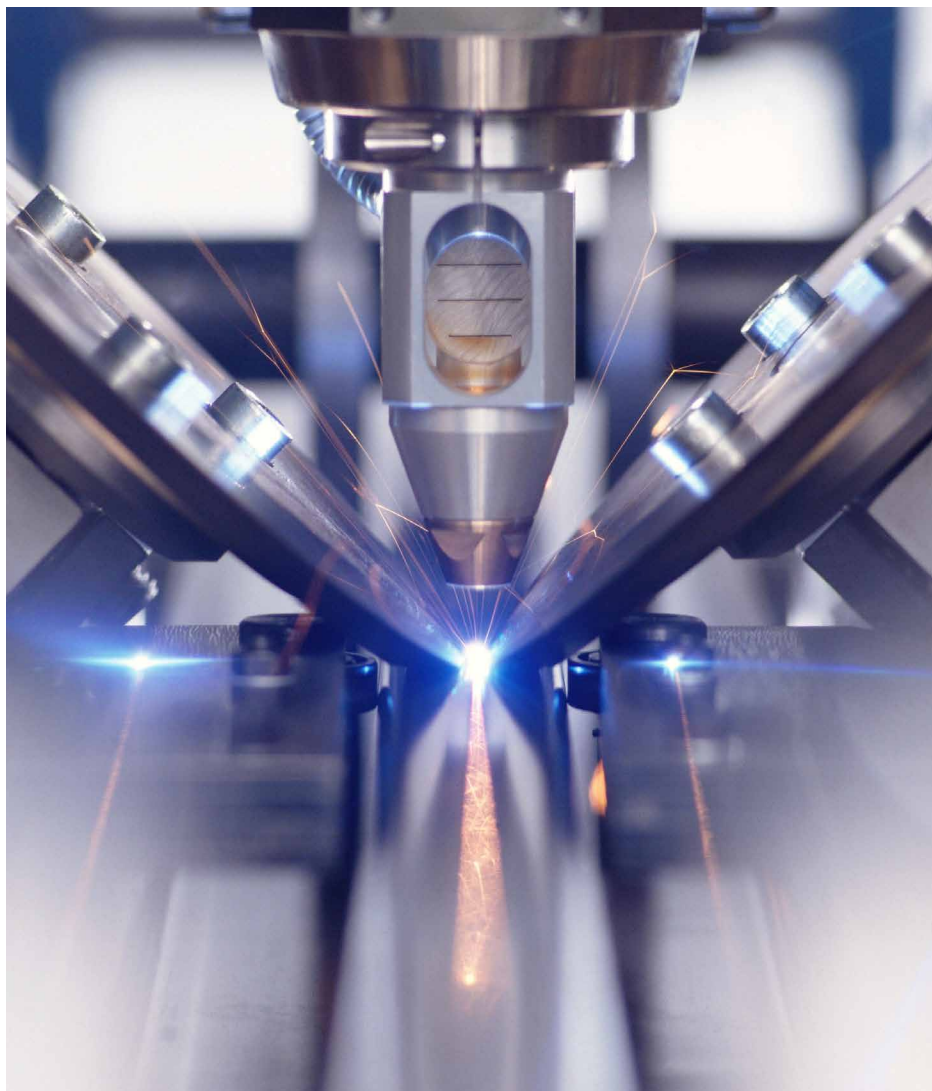
Лазеры подразделяются на 7 классов лазерной опасности, в зависимости от значений параметров генерируемого излучения по СанПиН 2.2.4.3359-16, ГОСТ ИЕС 60825-1-2013 и ГОСТ ИЕС 60825-2-2013. Класс лазерной опасности определяет уровень опасности для здоровья человека со стороны лазерного излучения. Чем выше номер класса, тем больше потенциальная опасность лазера и лазерной системы. На всех лазерах и лазерных системах нанесены предупреждающие и поясняющие знаки с обозначением класса лазерной опасности.



Описание классов лазерной опасности в соответствии с СанПиНом 2.2.4.3359-16:

- КЛАСС 1** | Полностью безопасные лазеры, то есть такие лазеры, выходное прямое излучение которых не представляет опасности для человека при облучении глаз и кожи.
- КЛАСС 1М** | Безопасны, но выходное прямое излучение представляет опасность для глаз человека при наблюдении им лазерного излучения через бинокль, телескоп, микроскоп («усиливающая» оптика). Лазеры излучают в диапазоне длин волн от 302,5 до 4000 нм.
- КЛАСС 2** | Безопасные лазерные изделия, генерирующие только видимое излучение в диапазоне длин волн от 400 до 700 нм мощностью не более 1 мВт. Выходное излучение не представляет опасности для кожи и глаз при времени воздействия до 0,25 с (латентный период мигательного рефлекса).
- КЛАСС 2М** | Безопасны при времени воздействия, не превышающем 0,25 с, однако выходное прямое излучение представляет опасность для глаз человека при использовании «усиливающей» оптики.
- КЛАСС 3R** | Потенциально опасны при непосредственном и длительном наблюдении прямого и диффузно отраженного излучения. У лазеров видимого диапазона мощность непрерывного излучения не должна превышать 5 мВт.
- КЛАСС 3В** | Опасны при прямом воздействии на глаза, диффузно отраженное излучение опасности не представляет. Мощность непрерывного излучения в диапазоне от 315 нм до дальнего инфракрасного диапазона не должна превышать 0,5 Вт. Предел энергии излучения для импульсных лазеров в диапазоне от 400 до 700 нм – 30 мДж/имп.
- Примечание: условия безопасного наблюдения рассеянного излучения для лазеров класса 3В в видимой области: минимальное расстояние для наблюдения между глазом и мишенью, на которую воздействует лазерный луч - 10 см, максимальное время наблюдения - 10 с.*
- КЛАСС 4** | Лазеры, любой вид излучения которых представляет опасность для глаз и кожи при прямом и диффузно отраженным излучением.

КЛАССИФИКАЦИЯ ЛАЗЕРОВ



ВИДЫ ЛАЗЕРОВ

Таблица 1 – Виды лазеров

ВИД ЛАЗЕРА	ОПИСАНИЕ ЛАЗЕРА
Твердотельный лазер (англ. <i>Solid-state laser</i>)	Лазер с твердотельным активным элементом
Газовый лазер (англ. <i>Gas laser</i>)	<p>Лазер с газовым активным элементом.</p> <p>Разновидностями газового лазера являются газодинамические лазеры, химические газовые лазеры и эксимерные лазеры.</p> <p>К достоинствам газовых лазеров можно отнести дешевизну и легкость эксплуатации мощных лазеров, что предопределило их широкое распространение в промышленной резке материалов.</p> <p>Газовый лазер с электрической накачкой состоит из герметичной трубки с газообразным рабочим телом и элементами оптического резонатора. Накачка энергии в активную среду лазера производится с помощью электрических разрядов в газе, получаемых чаще всего с помощью электродов в полости трубки. Электроны, соударяясь с атомами газа, переводят их в возбужденное состояние с последующим излучением фотонов. Благодаря актам вынужденного испускания световые волны, созданные в трубке, усиливаются при прохождении через газовую плазму. Оптический резонатор (два точно выставленных зеркала на торцах трубки) задаёт преимущественное направление излучения. Часть потока фотонов отбирается из лазера через одно из зеркал, сделанное полупрозрачным. Другая часть отражается обратно внутрь лазера для поддержания вынужденного излучения.</p>

ВИД ЛАЗЕРА	ОПИСАНИЕ ЛАЗЕРА
Атомарный лазер (англ. Atomic laser)	Газовый лазер, в котором лазерные переходы происходят между уровнями энергии атомов
Молекулярный лазер (англ. Molecular laser)	Газовый лазер, в котором лазерные переходы происходят между уровнями энергии молекул
Ионный лазер (англ. Ion laser)	Газовый лазер, в котором лазерные переходы происходят между уровнями энергии ионов
Лазер на парах металла/металлоида (англ. Metal vapour laser)	Газовый лазер, в котором лазерная активная среда создается в парах металла/металлоида
Газоразрядный лазер (англ. Gas-discharge laser)	Газовый лазер, в котором лазерная активная среда создается под действием электрического разряда в газе
Газодинамический лазер (англ. Gas-dynamic laser)	Молекулярный лазер, в котором лазерная активная среда создается при быстром расширении газа
Электроионизационный лазер (англ. Electron-beam pumped gas laser/Electron-beam controlled gas laser)	Газоразрядный лазер с высоким давлением газовой смеси, в которой проводимость для обеспечения однородного несамостоятельного разряда создается под действием электронного пучка
Фотодиссоциативный лазер (англ. Photodissociative laser)	Газовый лазер, в котором лазерная активная среда создается в результате фотодиссоциации молекул
Фотоионизационный лазер (англ. Photoionized laser)	Газоразрядный лазер с высоким давлением газовой смеси, в которой проводимость для обеспечения однородного несамостоятельного разряда создается под действием ионизирующего оптического излучения
Химический лазер (англ. Chemical laser)	Газовый лазер, в котором лазерная активная среда создается в результате экзотермических химических реакций
Экимерный лазер (англ. Excimer laser)	Газовый лазер в котором лазерная активная среда в виде неустойчивого соединения ионов создается в газовом разряде при электрической накачке

ВИД ЛАЗЕРА	ОПИСАНИЕ ЛАЗЕРА
Лазер на парах неорганических соединений (англ. Anorganic vapour laser)	Газовый лазер, в котором лазерная активная среда создается в парах неорганических соединений
Лазер на парах органических соединений (англ. Organic vapour laser)	Газовый лазер, в котором лазерная активная среда создается в парах органических соединений
Жидкостный лазер	Лазер с жидкостным активным элементом
Лазер на растворе неорганических соединений	Жидкостный лазер, в котором лазерное вещество находится в виде раствора активатора в неорганическом растворителе
Лазер на растворе органических соединений	Жидкостный лазер, в котором лазерное вещество находится в виде раствора органического соединения. Лазерное вещество может находиться в виде соединений в твердом теле
Лазер с ламповой накачкой (англ. Lamp pumped laser)	
Лазер с лазерной накачкой (англ. Laser pumped laser)	
Полупроводниковый лазер (англ. Semiconductor laser)	Лазер с полупроводниковым активным элементом
Инжекционный лазер (англ. Injection laser)	Полупроводниковый лазер с электрической накачкой
Лазерный диод (англ. Laser diode)	Лазерный активный элемент полупроводникового лазера с электрической накачкой
Решетка лазерных диодов (англ. Array)	Набор лазерных диодов, соединенных по определенной электрической схеме и собранных в единую конструкцию
Кольцевой лазер (англ. Ring laser)	Лазер с кольцевым резонатором
Сверхлюминесцентный лазер (англ. Superradiative laser diode)	Лазер, в котором лазерное излучение возникает вследствие сверхлюминесценции лазерной активной среды в отсутствие оптического резонатора

ВИД ЛАЗЕРА	ОПИСАНИЕ ЛАЗЕРА
Перестраиваемый лазер (англ. <i>Tunable laser</i>)	Лазер, частота излучения которого может быть перестроена
Параметрический лазер (англ. <i>Optical parametric oscillator</i>)	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
Комбинационный лазер	Перестраиваемый лазер, содержащий в излучателе преобразователь частоты, действие которого основано на вынужденном комбинационном рассеянии
Лазер на свободных электронах (англ. <i>Free electron laser</i>)	Лазер, действие которого основано на излучении электронов, колеблющихся под действием внешнего электрического и (или) магнитного поля, и перемещающихся с релятивистской поступательной скоростью в направлении распространения излучения
Технологический лазер	Лазер, предназначенный для использования в технологических процессах
Лазеры непрерывного действия	Одномодовые оптоволоконные лазеры со средней мощностью (до 1 кВт) и $M^2 < 1,1$ идеально подходят для микрообработки из-за их расходимости, близкой к физическому пределу. Превосходное качество луча оптоволоконных лазеров обеспечивает высококачественную резку тонких металлов с узкой шириной реза (<15 мкм). Резка электротехнической стали, трафаретов, скрайбирование керамических материалов и обработка анилоксовых валов - вот некоторые применения лазеров данной серии. Для лазерной обработки более толстых материалов на высоких скоростях требуются волоконные лазеры киловаттного диапазона с более высокой средней мощностью. Многомодовые лазеры являются предпочтительными, а средняя мощность варьируется до десятков киловатт.

ВИД ЛАЗЕРА	ОПИСАНИЕ ЛАЗЕРА
	Широкий диапазон применения данных лазеров включает резку толстых гидроформованных труб, сварку контуров крыши кузова автомобиля, сварку с глубоким проплавлением в судостроительной промышленности и чистую резку толстой нержавеющей стали и многие другие применения.
Лазеры квазинепрерывного действия	Это новый тип оптоволоконных лазеров со средней мощностью от 150 Вт до 2 кВт и пиковой мощностью до 20 кВт. Данные лазеры по основным техническим характеристикам на порядок превосходят классические твердотельные лазеры. Они доступны с целым рядом оптоволоконных лазеров – от одномодовых до маломодовых и набором коллиматоров типа QВН с широким диапазоном фокусных расстояний. Доступны самые разные диаметры сфокусированного пятна. Данные лазеры быстро приходят на смену более старой технологии классических твердотельных лазеров в сверлении, сварке и резке, для использования в медицинских устройствах, таких как кардиостимуляторы.
Импульсные лазеры	Наносекундные импульсные оптоволоконные лазеры малой мощности с модулятором добротности обеспечивают непревзойденную производительность в применении для лазерной маркировки с точки зрения качества, эффективности и гибкости. Сочетание высокого качества луча и пиковой мощности открыло горизонты уникальному применению, например, высокоскоростное сверление отверстий в кремнии. Данные лазеры прекрасно соответствуют большинству требований для маркировки металлов, керамики и почти всех типов пластмассы. Также имеются импульсные лазеры с модулятором добротности и высокой средней мощностью до 4 кВт. Данные лазеры применяются для быстрого удаления краски и покрытий с больших площадей поверхности.

ВИД ЛАЗЕРА	ОПИСАНИЕ ЛАЗЕРА
Лазеры на красителях	<p>В качестве активной среды используются органические красители, обычно в форме жидкого раствора. Они принесли революцию в лазерную спектроскопию и стали родоначальником нового типа лазеров с длительностью импульса менее пикосекунды (Лазеры сверхкоротких импульсов).</p> <p>В качестве накачки сегодня обычно применяют другой лазер, например Nd:YAG с диодной накачкой, или аргоновый лазер. Очень редко можно встретить лазер на красителях с накачкой лампой-вспышкой. Основная особенность лазеров на красителях – очень большая ширина контура усиления. Ниже приведена таблица параметров некоторых лазеров на красителях.</p>

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

Достаточная мощность как в импульсном, так и в непрерывном режиме при различных воздействиях на материал составляет.

Данную величину можно рассматривать в качестве критерия необходимой мощности технологических лазеров.

Время воздействия на материал влияет только на тип операции, а не на величину мощности лазера.

Основные параметры излучения технологических лазеров:

- мощность излучения;
- длина волны излучения;
- длительность воздействия.

Чтобы повысить эффективное время воздействия лазера на материал, необходимо, чтобы плотность потока превышала пороговую энергию импульса.

При оценке эффективности использования коротких импульсов лазерного излучения необходимо понимать, что чем меньше (время воздействия), тем меньше толщина слоя, испарённого при воздействии одного импульса.

ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛАЗЕРОВ

Таблица 2 – Параметры и характеристики лазеров

ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛАЗЕРА	ОПИСАНИЕ ПАРАМЕТРОВ И ХАРАКТЕРИСТИК
Время готовности лазера <i>(англ. Warm-up time)</i>	Время, необходимое для достижения лазером номинальных значений параметров с момента его включения
Порог генерации лазера <i>(англ. Threshold)</i>	Энергия или мощность, поступающая на вход источника питания лазера, при которой коэффициент усиления лазерного активного элемента на частоте генерации равен коэффициенту полных потерь в оптическом резонаторе на той же частоте
Эффективность преобразования частоты лазерного излучения <i>(англ. Conversion efficiency)</i>	Отношение энергии или мощности преобразованного лазерного излучения на выходе преобразователя частоты лазерного излучения к энергии или мощности лазерного излучения на входе преобразователя частоты
Коэффициент полезного действия лазера <i>(англ. Laser efficiency)</i>	Отношение энергии или средней мощности, излучаемой лазером, соответственно к энергии или средней мощности, подводимой к лазеру
Мощность накачки излучателя лазера <i>(англ. Pump power)</i>	Мощность, подводимая к излучателю лазера
Энергия импульса накачки излучателя лазера <i>(англ. Pump energy)</i>	Энергия накачки излучателя лазера за один импульс
Энергетическая характеристика излучателя лазера <i>(англ. Output performance)</i>	Зависимость энергии или мощности лазерного излучения от энергии или мощности накачки

ДЛИНЫ ВОЛН ЛАЗЕРОВ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ

Типы лазеров с четкими линиями излучения приведены в верхней части, в то время как нижняя отображает лазеры, способные излучать в диапазоне длин волн. Высота линий и полос соответствует максимальным энергиям коммерчески доступных лазеров, сплошные линии - непрерывное излучение, пунктир - импульсное. Сплошные зеленые квадраты - мощность одиночного полупроводникового лазера, горизонтальные зеленые линии - увеличение мощности множественных лазеров. Для Ar⁺-Kr⁺

подписаны лишь основные линии, остальные обозначены короткими линиями. Шкала длин волн сочетает линейный и логарифмический масштабы. Цветом выделены различные материалы накачки лазеров (см. описание рисунка, на английском языке). Данные приводятся в соответствии с Handbook of laser wavelengths, при этом в таблице добавлены новые типы лазеров, включая полупроводниковые.

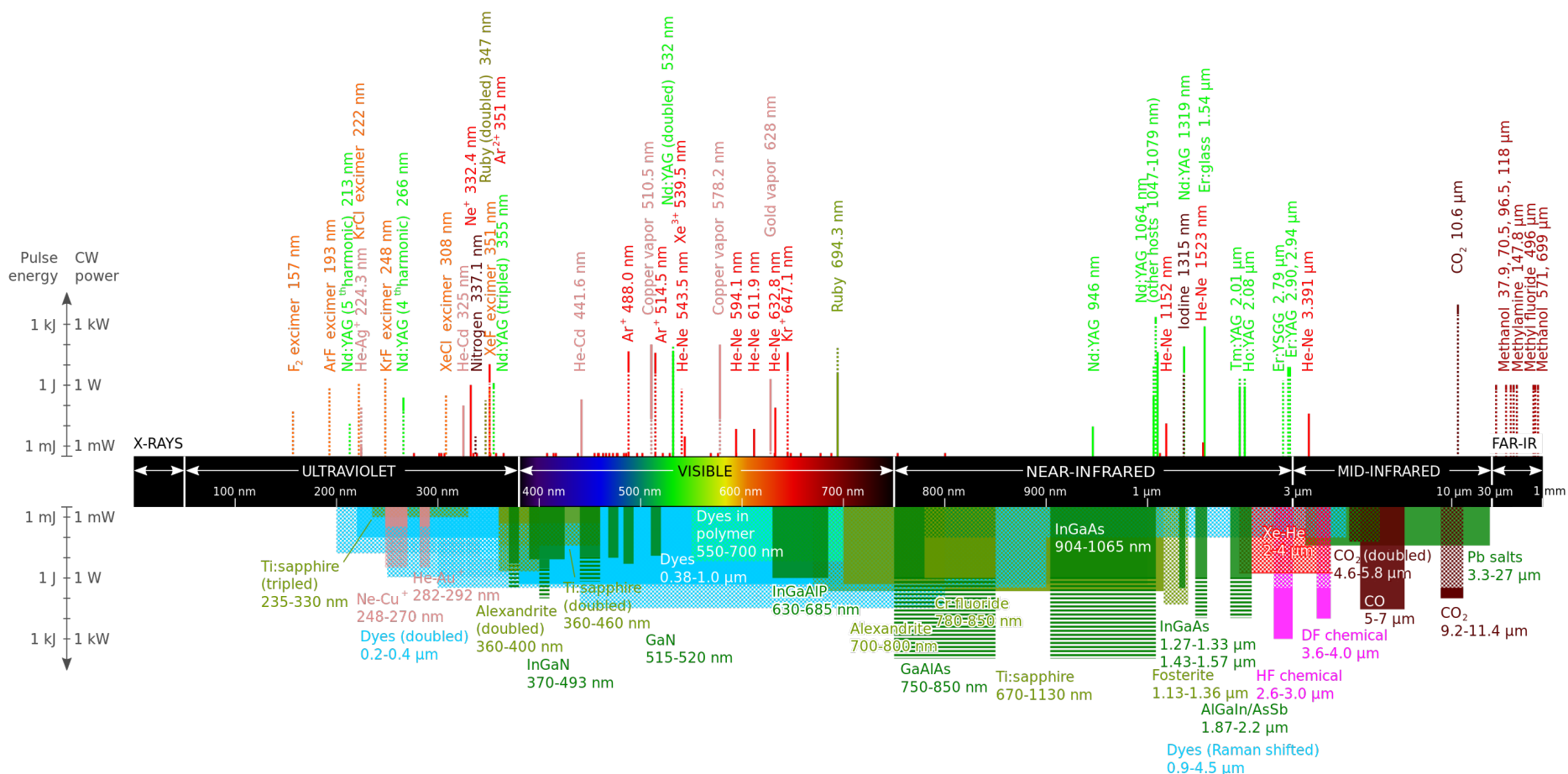


Рисунок 2 – Длины волн различных типов лазеров

Таблица 3 – Технические характеристики газовых лазеров

РАБОЧЕЕ ТЕЛО	ДЛИНА ВОЛНЫ	ИСТОЧНИК НАКАЧКИ	ПРИМЕНЕНИЕ
Гелий-неоновый лазер	632,8 нм (543,5; 593,9; 611,8 нм, 1,1523; 1,52; 3,3913 мкм)	Электрический разряд	Интерферометрия, голография, спектроскопия, считывание штрих-кодов, демонстрация оптических эффектов.
Аргонный лазер	488,0; 514,5 нм, (351; 465,8; 472,7; 528,7 нм)	Электрический разряд	Лечение сетчатки глаза, литография, накачка других лазеров.
Криптоновый лазер	416; 530,9; 568,2; 647,1; 676,4; 752,5; 799,3 нм	Электрический разряд	Научные исследования, в смеси с аргонном лазеры белого света, лазерные шоу.
Ксеноновый лазер	Множество спектральных линий по всему видимому спектру и частично в УФ и ИК областях.	Электрический разряд	Научные исследования.
Азотный лазер	337,1 нм (316; 357 нм)	Электрический разряд	Накачка лазеров на красителях, исследование загрязнения атмосферы, научные исследования, учебные лазеры
Лазер на фтористом водороде	2,7–2,9 мкм (Фтористый водород) 3,6–4,2 мкм (фторид дейтерия)	Химическая реакция горения этилена и трёхфтористого азота (NF ₃), инициируемая электрическим разрядом (импульсный режим)	Способен работать в постоянном режиме в области мегаваттных мощностей и в импульсном режиме в области тераваттных мощностей. Один из самых мощных лазеров. Лазерные вооружения. Лазерный термоядерный синтез (ЛТС).
Химический лазер на кислороде и иоде (COIL)	1,315 мкм	Химическая реакция в пламени синглетного кислорода и иода	Способен работать в постоянном режиме в области мегаваттных мощностей. Также создан и импульсный вариант. Научные исследования, лазерные вооружения. Обработка материалов. Лазерный термоядерный синтез (ЛТС). В перспективе: источник накачки неодимовых лазеров и рентгеновских лазерных систем.
Углекислотный лазер (CO₂)	10,6 мкм, (9,6 мкм)	Поперечный (большие мощности) или продольный (малые мощности) электрический разряд, химическая реакция (DF-CO ₂ лазер)	Обработка материалов (резка, сварка), хирургия.
Лазер на монооксиде углерода (CO)	2,5–4,2 мкм, 4,8–8,3 мкм	Электрический разряд; химическая реакция	Обработка материалов (гравировка, сварка и т. д.), фотоакустическая спектроскопия.
Экимерный лазер	193 нм (ArF), 248 нм (KrF), 308 нм (XeCl), 353 нм (XeF)	Рекомбинация эксимерных молекул при электрическом разряде	Ультрафиолетовая литография в полупроводниковой промышленности, лазерная хирургия, коррекция зрения.

Таблица 4 – Технические характеристики твердотельных лазеров

РАБОЧЕЕ ТЕЛО	ДЛИНА ВОЛНЫ	ИСТОЧНИК НАКАЧКИ	ПРИМЕНЕНИЕ
Рубиновый лазер	694,3 нм	Импульсная лампа	Голография, удаление татуировок.
Алюмо-иттриевые лазеры с легированием неодимом (Nd:YAG)	1,064 мкм, (1,32 мкм)	Импульсная лампа, лазерный диод	Обработка материалов, лазерные дальномеры, лазерные целеуказатели, хирургия, научные исследования, накачка других лазеров. Один из самых распространённых лазеров высокой мощности. Обычно работает в импульсном режиме (доли наносекунд). Нередко используется в сочетании с удвоителем частоты и соответственным изменением длины волны на 532 нм. Известны конструкции с квазинепрерывным режимом излучения.
Лазер на фториде иттрия-лития с легированием неодимом (Nd:YLF)	1,047 мкм 1,053 мкм	Импульсная лампа, лазерный диод	Наиболее часто используются для накачки титан-сапфировых лазеров, используя эффект удвоения частоты в нелинейной оптике.
Лазер на ванадате иттрия (YVO ₄) с легированием неодимом (Nd:YVO)	1,064 мкм	Лазерные диоды	Наиболее часто используются для накачки титан-сапфировых лазеров, используя эффект удвоения частоты в нелинейной оптике.
Лазер на неодимовом стекле (Nd:Glass)	~1,062 мкм (Силикатные стёкла), ~1,054 мкм (Фосфатные стёкла)	Импульсная лампа, Лазерные диоды	Лазеры сверхвысокой мощности (тераватты) и энергии (мегаджоули). Обычно работают в нелинейном режиме утроения частоты до 351 нм в устройствах лазерной плавки. Лазерный термоядерный синтез (ЛТС). Накачка рентгеновских лазеров.
Титан-сапфировый лазер	650–1100 нм	Другой лазер	Спектроскопия, лазерные дальномеры, научные исследования.
Алюмо-иттриевые лазеры с легированием тулием (Tm:YAG)	2,0 мкм	Лазерные диоды	Лазерные радары
Алюмо-иттриевые лазеры с легированием иттербием (Yb:YAG)	1,03 мкм	Импульсная лампа, Лазерные диоды	Обработка материалов, исследование сверхкоротких импульсов, мультифотонная микроскопия, лазерные дальномеры.
Алюмо-иттриевые лазеры с легированием гольмием (Ho:YAG)	2,1 мкм	Лазерные диоды	Медицина
Церий-легированный литий-стронций (или кальций)-алюмо-фторидный лазер (Ce:LiSAF, Ce:LiCAF)	~280-316 нм	Лазер Nd:YAG с учетверением частоты, Эксимерный лазер, лазер на парах ртути.	Исследование атмосферы, лазерные дальномеры, научные разработки.
Лазер на александрите с легированием хромом	Настраивается в диапазоне от 700 до 820 нм	Импульсная лампа, Лазерные диоды. Для непрерывного режима – дуговая ртутная лампа	Дерматология, лазерные дальномеры.
Волоконный лазер с легированием эрбием	1,53-1,56 мкм	Лазерные диоды	Оптические усилители в волоконно-оптических линиях связи, обработка металлов (резка, сварка, гравировка), термораскалывание стекла, медицина, косметология.
Лазеры на фториде кальция, легированном ураном (U:CaF ₂)	2,5 мкм	Импульсная лампа	Первый 4-х уровневый твердотельный лазер, второй работающий тип лазера (после рубинового лазера Маймана), охлаждался жидким гелием, сегодня нигде не используется.
Лазеры на халькогенидах цинка/кадмия, легированных переходными металлами (хромом, железом) (TM ²⁺ :A ^{IV} B ^{VI} , Cr ²⁺ :CdSe, Cr ²⁺ :ZnSe, Fe ²⁺ :ZnSe)	Cr ²⁺ 1,9-3,6 мкм, Fe ²⁺ 4-5.5 мкм	для Cr ²⁺ -легированной активной среды – лазерный диод, эрбиевый или тулиевый волоконные лазеры, для Fe ²⁺ -легированной активной среды – Er:YAG лазер (2,94 мкм)	Твердотельные лазеры с широкой полосой перестройки, генерация фемтосекундных лазерных импульсов

Таблица 5 – Технические характеристики оптоволоконных лазеров

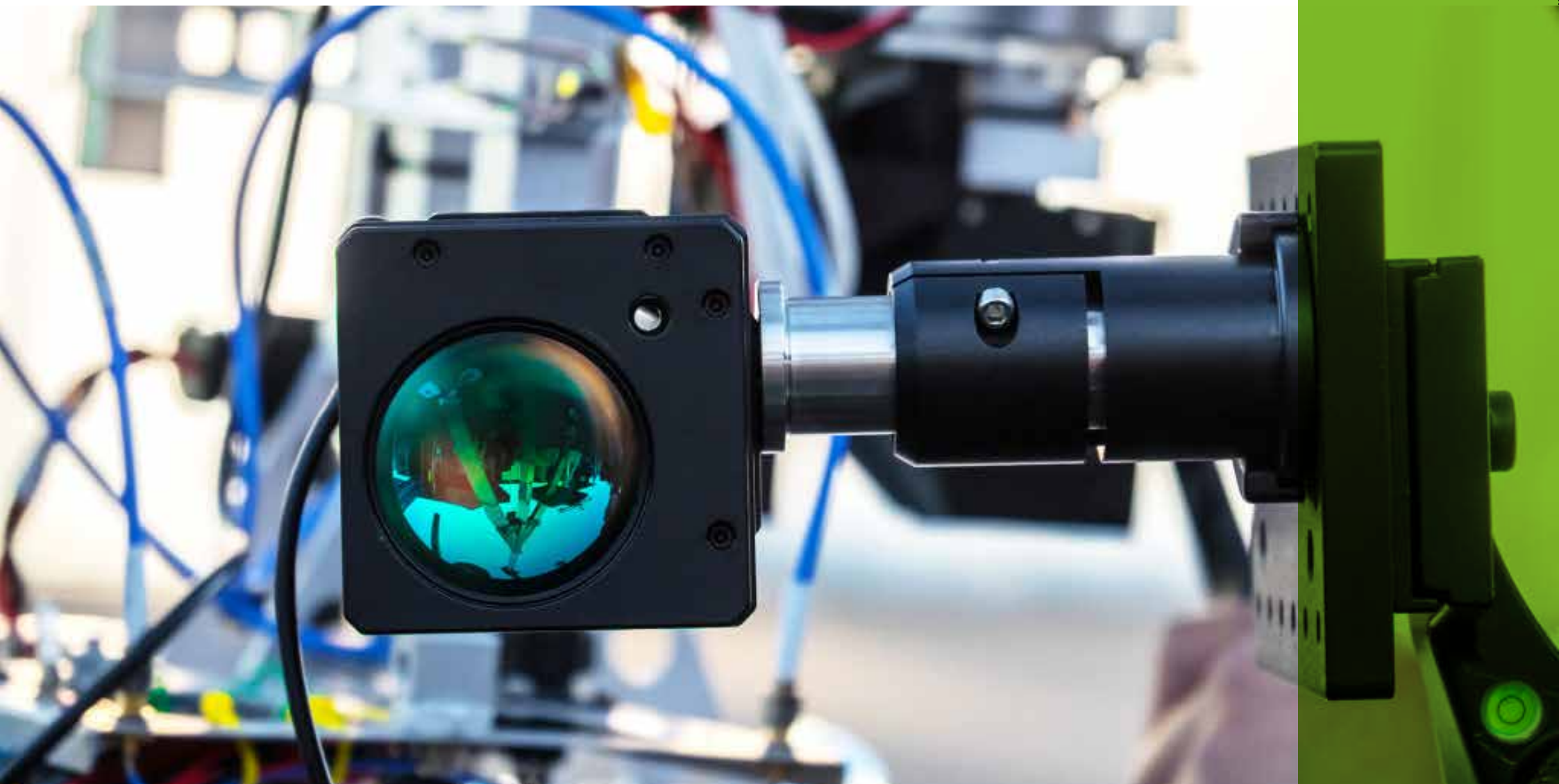
РАБОЧЕЕ ТЕЛО	длина волны	ИСТОЧНИК НАКАЧКИ	ПРИМЕНЕНИЕ
Полупроводниковый лазерный диод	<p>Длина волны зависит от материала и структуры активной области:</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ ближний УФ, фиолетовый, синий – полупроводниковые нитриды Ga, Al; ○ красный, ближний ИК-диапазон – соединения на основе Al, Ga, As; ○ ближний и средний ИК-диапазон – соединения, содержащие In, P, Sb; ○ средний ИК – дальний ИК-диапазон – соли свинца; ○ средний ИК – терагерцовый диапазон – полупроводниковые квантово-каскадные лазеры. 	Электрический ток, оптическая накачка	Телекоммуникации, голография, лазерные целеуказатели, лазерные принтеры, накачка лазеров других типов. AlGaAs-лазеры (алюминий-арсенид-галлиевые), работающие в диапазоне 780 нм используются в проигрывателях компакт-дисков и являются самыми распространёнными в мире.

Таблица 6 – Технические характеристики других типов лазеров

РАБОЧЕЕ ТЕЛО	длина волны	ИСТОЧНИК НАКАЧКИ	ПРИМЕНЕНИЕ
Лазер на свободных электронах	Длина волны рентгеновского лазера варьируется в диапазоне 0,085–6 нм	Пучок релятивистских электронов	Исследования атмосферы, материаловедение, медицина, противоракетная оборона.
Псевдо-никелево-самариевый лазер	Рентгеновское излучение 7,3–15 нм	Излучение в сверхгорячей плазме самария, создаваемое двойными импульсами лазера на неодимовом стекле. [1]	Первый демонстрационный лазер, работающий в области жесткого рентгеновского излучения. Может применяться в микроскопах сверхвысокого разрешения и голографии. Его излучение лежит в «окне прозрачности» воды и позволяет исследовать структуру ДНК, активность вирусов в клетках, действие лекарств.
Лазер на центрах окраски	Длина волны 0,8–4 микрон	Оптическая (лампа вспышка, лазерная), пучок электронов	Спектроскопия, медицина.

Таблица 7 – Технические характеристики лазеров на парах металлов

РАБОЧЕЕ ТЕЛО	длина волны	ИСТОЧНИК НАКАЧКИ	ПРИМЕНЕНИЕ
Гелий-кадмиевый лазер на парах металлов	440 нм, 325 нм	Электрический разряд в смеси паров металла и гелия.	Полиграфия, УФ детекторы валюты, научные исследования.
Гелий-ртутный лазер на парах металлов	567 нм, 615 нм	Электрический разряд в смеси паров металла и гелия.	Археология, научные исследования, учебные лазеры.
Гелий-селеновый лазер на парах металлов	до 24 спектральных полос от красного до УФ	Электрический разряд в смеси паров металла и гелия.	Археология, научные исследования, учебные лазеры.
Лазер на парах меди	510,6 нм, 578,2 нм	Электрический разряд	Дерматология, скоростная фотография, накачка лазеров на красителях.
Лазер на парах золота	627 нм	Электрический разряд	Археология, медицина.



ОСНОВНЫЕ ПРОЦЕССЫ РАБОТЫ ЛАЗЕРА

Таблица 8 – Основные процессы в работе лазера

НАЗВАНИЕ ПРОЦЕССА	ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА
Накачка лазера	Возбуждение лазерного активного элемента, приводящее к возникновению лазерной активной среды
Оптическая накачка	Накачка лазера оптическим излучением
Ламповая накачка	Оптическая накачка излучением лампы накачки
Селективная оптическая накачка	Оптическая накачка излучением, спектр которого совпадает или близок с используемыми для накачки линиями или полосами поглощения лазерного вещества
Лазерная накачка	Оптическая накачка лазерным излучением
Диодная накачка	Оптическая накачка излучением лазерного диода или решетками лазерных диодов
Электрическая накачка	Накачка лазера электрическим током
Электронная накачка	Накачка лазера электронным пучком

НАЗВАНИЕ ПРОЦЕССА	ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА
Ядерная накачка	Накачка лазера нейтронным пучком
Химическая накачка	Накачка, вызываемая химическими реакциями в лазерном веществе
Внешняя модуляция лазерного излучения	Модуляция лазерного излучения с помощью модуляционных устройств, расположенных вне резонатора
Внутренняя модуляция лазерного излучения	Модуляция лазерного излучения, осуществляемая путем изменения параметров лазерного активного элемента или оптического резонатора
Отклонение пучка лазерного излучения	Изменение направления пучка лазерного излучения
Развертка пучка лазерного излучения	Отклонение пучка лазерного излучения по заданному закону
Фокусировка пучка лазерного излучения	Увеличение в заданном пространстве концентрации энергии пучка лазерного излучения с помощью оптических устройств

ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА

Модовая¹ структура излучения

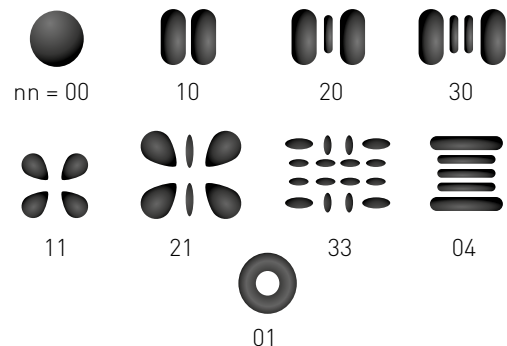


Рисунок 3 – Изображения модовой структуры пучков некоторых низших порядков

ПОГЛОЩЕНИЕ СВЕТА И ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ СВЕТА В ТЕПЛО

Большинство лазерных технологий основаны на тепловом действии излучения.



Рисунок 4 – Принципиальная схема поглощения лазерного излучения

<?>. Мода (в оптике) – это стабильное состояние электромагнитного поля внутри световода, которое определяет траекторию, по которой распространяется свет.

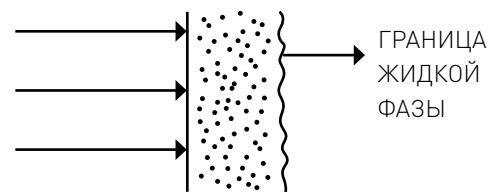


Рисунок 5 – Принципиальная схема нагрева и плавления материала под воздействием лазерного излучения

- Нагрев материала до температуры плавления.
- Плавление после поглощения удельной теплоты плавления.

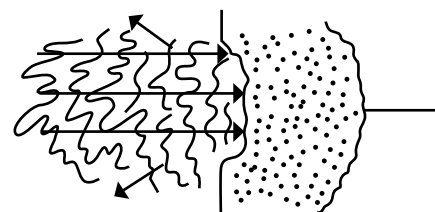


Рисунок 6 – Принципиальная схема испарения материала под воздействием лазерного излучения

- Дальнейший нагрев до температуры испарения (кипения).
- Испарение после поглощения удельной теплоты парообразования.

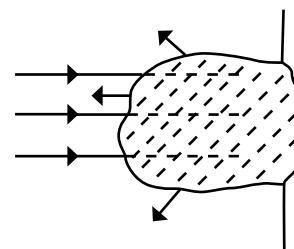


Рисунок 7 – Принципиальная схема образования плазмы в результате воздействия лазерного излучения на материал

- Движение испаряемой поверхности вглубь материала.
- Образование плазмы.

РЕЖИМЫ РАБОТЫ ЛАЗЕРОВ

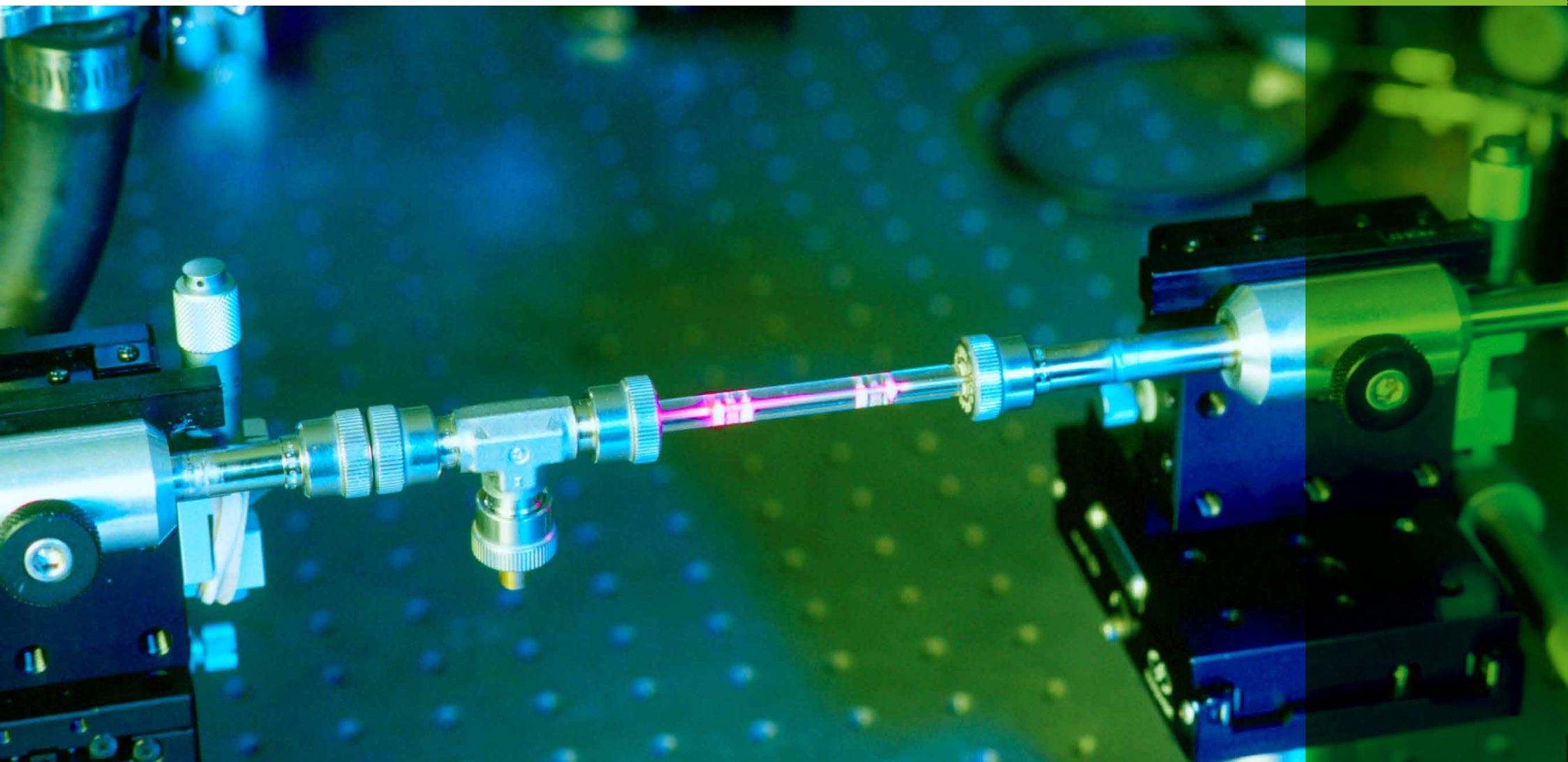
Таблица 9 – Режимы работы лазера

РЕЖИМ РАБОТЫ	ОПИСАНИЕ РЕЖИМА РАБОТЫ
Режим непрерывной генерации лазерного излучения (англ. <i>Continuous-wave operation of laser</i>)	Режим работы лазера, при котором спектральная плотность мощности лазерного излучения на частоте генерации не обращается в нуль при заданном интервале времени, значительно превышающем период колебаний
Режим импульсной генерации лазерного излучения (англ. <i>Pulsed operation of laser/ Pulsed mode of laser</i>)	Режим работы лазера, при котором его энергия излучается в виде импульсов
Режим свободной генерации лазерного излучения (англ. <i>Free laser oscillation</i>)	Режим импульсной генерации лазерного излучения, при котором добротность оптического резонатора не меняется в течение длительности импульсов лазерного излучения
Моноимпульсный режим генерации лазерного излучения (англ. <i>Giant-pulse operation</i>)	Режим модуляции добротности оптического резонатора лазера с импульсной оптической накачкой, при котором за время действия импульса накачки генерируется один импульс лазерного излучения
Режим модуляции добротности резонатора (англ. <i>Q-switched operation</i>)	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 открытия резонатора (англ. <i>Cavity dumped operation</i>)	Режим импульсной генерации лазерного излучения, при котором накопление энергии производится в резонаторе лазера, а ее вывод осуществляется путем быстрого изменения добротности резонатора от максимальной до минимальной
Режим синхронизации мод лазера (англ. <i>Mode-locking operation</i>)	Режим работы лазера, при котором создаются определенные фазовые соотношения между модами

РЕЖИМ РАБОТЫ	ОПИСАНИЕ РЕЖИМА РАБОТЫ
Многомодовый режим генерации лазерного излучения (англ. <i>Multimode operation</i>)	Режим работы лазера, при котором лазерное излучение содержит как продольные, так и поперечные моды в пределах спектра частот данной линии спонтанного излучения
Одномодовый режим генерации лазерного излучения (англ. <i>Single-mode operation</i>)	Режим работы лазера, при котором лазерное излучение содержит только продольные моды в пределах спектра частот данной линии спонтанного излучения
Одночастотный режим генерации лазерного излучения (англ. <i>Single-frequency laser operation</i>)	Режим работы лазера, при котором лазерное излучение содержит только одну продольную моду в пределах спектра частот данной линии спонтанного излучения
Двухчастотный режим генерации лазерного излучения (англ. <i>Two-frequency laser operation</i>)	Режим работы лазера, при котором лазерное излучение содержит две продольные моды в пределах спектра частот данной линии спонтанного излучения

ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

1. Испарение (и абляция в расплавленной фазе) – наиболее популярный процесс, который лежит в основе большинства промышленных технологий любых материалов в микроэлектронике, микромеханике и микрооптике. В настоящее время актуальными остаются проблемы точности и качества.
2. Нагревание до температуры размягчения или плавления с последующим деформированием в вязко-текучей фазе с дополненным механическим воздействием: вытяжкой, вращением и т.п. Применяется для изготовления ближнепольных оптических зондов, медицинского оптического инструментария и т.п.
3. Направленное локальное нагревание, вызывающее появление контролируемого поля напряжений, приводящего к управляемому деформированию листовых материалов – laser forming, причём не только с целью формообразования, но и прецизионной сборки и юстировки микромеханических компонентов.
4. Послойный синтез трёх мерных объектов методом послойного наращивания, в том числе – стереолитография, селективное лазерное спекание и послойная сборка из листовых материалов – laminated object manufacturing.



ОСНОВНЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ И КОНСТРУКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ЛАЗЕРОВ

Таблица 10 – Основные элементы лазера

НАЗВАНИЕ ЭЛЕМЕНТА	ОПИСАНИЕ ЭЛЕМЕНТА
Лазерная активная среда	Среда, обладающая способностью усиления электромагнитного излучения на частоте лазерного перехода
Лазерное вещество	Вещество, в котором в процессе накачки может быть создана лазерная активная среда
Лазерный активный элемент	Основной функциональный элемент излучателя лазера, содержащий лазерное вещество
Устройство управления лазерным излучением	Устройство, изменяющее по заданному закону параметры лазерного излучения под действием управляющего сигнала
Квантрон	Основная функциональная часть излучателя лазера или лазерного усилителя, состоящая из активного элемента, лампы накачки и отражателя, заключенных в общий корпус
Излучатель лазера	Основная функциональная часть лазера, в которой энергия накачки преобразуется в лазерное излучение. Конкретные конструкции излучателей лазера могут содержать оптический резонатор, отдельные элементы системы накачки, преобразования излучения, терморегулирования, автоподстройки, оптические элементы, затворы и др.
Источник питания лазера	Часть лазера, предназначенная для преобразования подводимой к нему электрической энергии к виду, необходимому для функционирования излучателя лазера
Осветитель излучателя лазера	Часть излучателя лазера, предназначенная для оптической накачки лазерного активного элемента, содержащая источники оптического излучения и элементы, формирующие требуемое распределение излучения накачки на лазерных активных элементах
Отражатель осветителя излучателя лазера	Элемент осветителя излучателя лазера, обеспечивающий отражение оптического излучения и формирующий требуемое распределение излучения накачки на лазерном активном элементе

НАЗВАНИЕ ЭЛЕМЕНТА	ОПИСАНИЕ ЭЛЕМЕНТА
Лампа накачки	Электрическая лампа, предназначенная для накачки лазера
Система накачки лазера	Совокупность элементов, предназначенных для преобразования энергии источника накачки и передачи ее к лазерному активному элементу
Оптический резонатор	Система отражающих, преломляющих, фокусирующих и дисперсионных оптических элементов, в пространстве между которыми могут возбуждаться определенные типы колебаний электромагнитного поля оптического диапазона
Кольцевой резонатор	Оптический резонатор, в котором распространение электромагнитных колебаний происходит по замкнутому контуру
Плоский резонатор	Оптический резонатор, образованный плоскими зеркалами
Плоско-сферический резонатор	Оптический резонатор, образованный плоским и сферическим зеркалами, в котором ось сферического зеркала перпендикулярна плоскому
Резонатор со сферическими зеркалами	Оптический резонатор, образованный сферическими зеркалами с общей оптической осью
Отражатель оптического резонатора	Оптическое устройство, предназначенное для отражения лазерного излучения
Зеркало оптического резонатора	Отражатель оптического резонатора, исполненный в виде подложки заданной формы чаще всего с отражающим покрытием
Внешний оптический резонатор	Оптический резонатор, отражатели которого находятся снаружи лазерного активного элемента
Внутренний оптический резонатор	Оптический резонатор, отражатели которого находятся внутри лазерного активного элемента

УСТРОЙСТВА УПРАВЛЕНИЯ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Таблица 11 – Основные устройства управления лазерным излучением

НАИМЕНОВАНИЕ УСТРОЙСТВА	ОПИСАНИЕ УСТРОЙСТВА
Лазерный затвор (англ. <i>Q-switch</i>)	Устройство, предназначенное для обеспечения заданного импульсного режима генерации лазерного излучения посредством изменения добротности оптического резонатора
Электрооптический лазерный затвор (англ. <i>Electrooptical Q-switch</i>)	Лазерный затвор, действие которого основано на использовании электрооптического эффекта
Акустооптический лазерный затвор (англ. <i>Acoustooptical Q-switch</i>)	Лазерный затвор, действие которого основано на использовании акустооптического эффекта
Пассивный лазерный затвор (англ. <i>Passive Q-switch</i>)	Лазерный затвор, действие которого основано на использовании оптических материалов, коэффициент пропускания которых на длине волны лазерного излучения зависит от интенсивности излучения
Оптикомеханический лазерный затвор (англ. <i>Optomechanical Q-switch</i>)	Лазерный затвор, действие которого основано на механическом перемещении оптических элементов резонатора
Плазменный лазерный затвор	Лазерный затвор, действие которого основано на явлении нелинейного отражения лазерного излучения от плазмы, образуемой при оптическом пробое материала
Преобразователь частоты лазерного излучения (англ. <i>Harmonic generator</i>)	Устройство управления лазерным излучением, предназначенное для преобразования частоты лазерного излучения
Непрерывный преобразователь частоты лазерного излучения	Преобразователь частоты лазерного излучения, обеспечивающий непрерывную перестройку частоты лазерного излучения в определенных пределах

НАИМЕНОВАНИЕ УСТРОЙСТВА	ОПИСАНИЕ УСТРОЙСТВА
Спиновый преобразователь частоты лазерного излучения	Непрерывный преобразователь частоты лазерного излучения, действие которого основано на переориентации спина электрона в полупроводниковом кристалле, помещенном в магнитном поле
Дискретный преобразователь частоты лазерного излучения	Преобразователь частоты лазерного излучения, обеспечивающий дискретную перестройку частоты лазерного излучения в определенных пределах
Умножитель частоты лазерного излучения (англ. <i>Frequency doubler/ Frequency tripler</i>)	Дискретный преобразователь частоты лазерного излучения, обеспечивающий получение частот, кратных основной частоте лазерного излучения
Комбинационный преобразователь частоты лазерного излучения	Преобразователь частоты лазерного излучения, действие которого основано на вынужденном комбинационном рассеянии лазерного излучения
Люминесцентный преобразователь частоты лазерного излучения	Преобразователь частоты лазерного излучения, действие которого основано на вынужденном излучении, возникающем в люминесцирующем веществе при лазерной накачке
Волноводный преобразователь частоты лазерного излучения	Преобразователь частоты лазерного излучения, в котором излучение распространяется в оптическом волноводе
Лазерное модуляционное устройство (англ. <i>Modulator</i>)	Устройство управления лазерным излучением, предназначенное для изменения по заданному закону во времени и (или) в пространстве одного или нескольких параметров лазерного излучения или положения пучка лазерного излучения

НАИМЕНОВАНИЕ УСТРОЙСТВА	ОПИСАНИЕ УСТРОЙСТВА
Оптический модулятор (англ. <i>Optical modulator</i>)	Лазерное модуляционное устройство, предназначенное для изменения во времени по заданному закону интенсивности, фазы, частоты или поляризации лазерного излучения
Электрооптический модулятор (англ. <i>Electrooptical modulator</i>)	Оптический модулятор, действие которого основано на использовании электрооптического эффекта
Акустооптический модулятор (англ. <i>Acoustooptical modulator</i>)	Оптический модулятор, действие которого основано на использовании акустооптического эффекта
Магнитооптический модулятор (англ. <i>Magnetooptical modulator</i>)	Оптический модулятор, действие которого основано на использовании магнитооптического эффекта
Оптический модулятор интенсивности (англ. <i>Intensity modulator</i>)	Оптический модулятор, предназначенный для изменения интенсивности лазерного излучения
Оптический модулятор фазы (англ. <i>Phase modulator</i>)	Оптический модулятор, предназначенный для изменения фазы лазерного излучения
Оптический модулятор поляризации (англ. <i>Polarization modulator</i>)	Оптический модулятор, предназначенный для изменения поляризации лазерного излучения
Оптический модулятор частоты (англ. <i>Frequency modulator</i>)	Оптический модулятор, предназначенный для изменения частоты лазерного излучения
Волноводный оптический модулятор (англ. <i>Optical waveguide modulator</i>)	Оптический модулятор, в котором модулируемое лазерное излучение распространяется в оптическом волноводе
Оптический дефлектор (англ. <i>Optical deflector</i>)	Лазерное модуляционное устройство, предназначенное для изменения во времени положения пучка лазерного излучения по заданному закону

НАИМЕНОВАНИЕ УСТРОЙСТВА	ОПИСАНИЕ УСТРОЙСТВА
Волноводный оптический дефлектор (англ. <i>Optical waveguide deflector</i>)	Оптический дефлектор, в котором происходит отклонение пучка лазерного излучения, распространяющегося в оптическом волноводе
Электрооптический дефлектор (англ. <i>Electrooptical deflector</i>)	Оптический дефлектор, действие которого основано на использовании электрооптического эффекта
Акустооптический дефлектор (англ. <i>Acoustooptical deflector</i>)	Оптический дефлектор, действие которого основано на использовании акустооптического эффекта
Магнитооптический дефлектор (англ. <i>Magnetooptical deflector</i>)	Оптический дефлектор, действие которого основано на использовании магнитооптического эффекта
Оптикомеханический дефлектор (англ. <i>Optomechanical deflector</i>)	Оптический дефлектор, действие которого основано на отклонении и (или) перемещении оптических отражающих элементов
Однокоординатный дефлектор (англ. <i>One-axis deflector</i>)	Оптический дефлектор, предназначенный для перемещения пучка лазерного излучения по одной координате
Двухкоординатный дефлектор (англ. <i>Two-axis deflector</i>)	Оптический дефлектор, предназначенный для перемещения пучка лазерного излучения по двум координатам
Дискретный оптический дефлектор (англ. <i>Digital optical deflector</i>)	Оптический дефлектор, осуществляющий перемещение пучка лазерного излучения в заданное фиксированное положение
Непрерывный оптический дефлектор (англ. <i>Optical scanner</i>)	Оптический дефлектор, осуществляющий перемещение пучка лазерного излучения в любое положение в заданном интервале координат

НАИМЕНОВАНИЕ УСТРОЙСТВА	ОПИСАНИЕ УСТРОЙСТВА
Пространственно-временной оптический модулятор <i>(англ. Spatial-light modulator)</i>	Лазерное модуляционное устройство, предназначенное для изменения во времени по заданному закону пространственного распределения интенсивности, частоты, фазы или поляризации пучка лазерного излучения
Пространственно-временной оптический модулятор с электрическим управлением <i>(англ. Electron-beam addressed spatial light modulator)</i>	Пространственно-временной оптический модулятор, у которого закон изменения во времени пространственного распределения одного из параметров пучка лазерного излучения задается подаваемыми на его входы электрическими сигналами
Пространственно-временной оптический модулятор с оптическим управлением <i>(англ. Optically addressed spatial light modulator)</i>	Пространственно-временной оптический модулятор, у которого закон изменения во времени пространственного распределения одного из параметров пучка лазерного излучения задается подаваемым на его вход управляющим пучком оптического излучения
Перестраиваемый оптический фильтр <i>(англ. Tunable optical filter)</i>	Устройство управления лазерным излучением, предназначенное для выделения или подавления одной или нескольких составляющих спектра лазерного излучения по заданному закону во времени
Акустооптический перестраиваемый фильтр <i>(англ. Acoustooptical tunable filter)</i>	Перестраиваемый оптический фильтр, действие которого основано на использовании акустооптического взаимодействия в оптических анизотропных средах
Электрооптический перестраиваемый фильтр <i>(англ. Electrooptical tunable filter)</i>	Перестраиваемый оптический фильтр, действие которого основано на использовании электрооптического взаимодействия в оптических анизотропных средах

НАИМЕНОВАНИЕ УСТРОЙСТВА	ОПИСАНИЕ УСТРОЙСТВА
Волноводный перестраиваемый оптический фильтр <i>(англ. Waveguide tunable electrooptical filter)</i>	Перестраиваемый оптический фильтр, в котором излучение распространяется в оптическом волноводе



ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ УСТРОЙСТВ УПРАВЛЕНИЯ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Таблица 12 – Параметры и характеристики устройств управления лазерным излучением

ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ УСТРОЙСТВ УПРАВЛЕНИЯ	ОПИСАНИЕ ПАРАМЕТРОВ И ХАРАКТЕРИСТИК	ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ УСТРОЙСТВ УПРАВЛЕНИЯ	ОПИСАНИЕ ПАРАМЕТРОВ И ХАРАКТЕРИСТИК
Фазовая задержка электрооптического модулятора <i>(англ. Electrooptical modulator phase retardation)</i>	Разность фаз на выходе электрооптического модулятора между составляющими электрического вектора электромагнитной волны, параллельными главным или наведенным осям оптического модуляционного элемента	Статическое полуволновое напряжение электрооптического модулятора <i>(англ. Static half-wave voltage)</i>	Минимальное статическое напряжение, подаваемое на электрооптический модулятор и необходимое для изменения его коэффициента пропускания от минимального до максимального, или наоборот, или изменения фазовой задержки на π радиан
Постоянная фазовая задержка электрооптического модулятора <i>(англ. Phase delay constant of optical modulator)</i>	Постоянная во времени фазовая задержка, создаваемая расположенной внутри электрооптического модулятора фазовой пластиной или приложенным к модулятору постоянным напряжением, или неполной компенсацией естественного двулучепреломления оптического модуляционного элемента	Динамическое полуволновое напряжение электрооптического модулятора <i>(англ. Dynamic half-wave voltage)</i>	Минимальное амплитудное напряжение на частоте модуляции, подаваемое на электрооптический модулятор, и необходимое для изменения его коэффициента пропускания от минимального до максимального, или наоборот, или изменения фазовой задержки на π радиан
Статическая характеристика пропускания оптического модулятора интенсивности <i>(англ. Optical transmission characteristic)</i>	Зависимость коэффициента пропускания оптического модулятора интенсивности от величины приложенного к нему управляющего воздействия	Глубина модуляции лазерного излучения <i>(англ. Depth of modulation)</i>	Отношение амплитуды переменной составляющей интенсивности лазерного излучения на выходе оптического модулятора к среднему значению интенсивности
Максимальный (минимальный) коэффициент пропускания оптического модулятора интенсивности <i>(англ. Maximum of optical transmission characteristic)</i>	Коэффициент пропускания оптического модулятора интенсивности в максимуме (минимуме) характеристики пропускания	Частотная характеристика оптического модулятора <i>(англ. Frequency response)</i>	Зависимость глубины модуляции лазерного излучения оптического модулятора от частоты модулирующего сигнала постоянной амплитуды
Коэффициент контрастности оптического модулятора <i>(англ. Contrast ratio/Extinction ratio)</i>	Отношение максимального коэффициента пропускания оптического модулятора к минимальному	Амплитудная характеристика оптического модулятора <i>(англ. Amplitude-depth of modulation response)</i>	Зависимость глубины модуляции лазерного излучения оптического модулятора от амплитуды модулирующего сигнала заданной частоты
		Полоса модулирующих частот оптического модулятора <i>(англ. Bandwidth)</i>	Диапазон частот модуляции управляющего сигнала, в котором глубина модуляции лазерного излучения находится в пределах заданного для оптического модулятора значения
		Разрешающая способность пространственно-временного оптического модулятора <i>(англ. Resolution)</i>	Пространственная частота модуляции лазерного излучения на выходе пространственно-временного оптического модулятора при заданной глубине модуляции

ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ УСТРОЙСТВ УПРАВЛЕНИЯ	ОПИСАНИЕ ПАРАМЕТРОВ И ХАРАКТЕРИСТИК
Частотно-контрастная характеристика пространственно-временного оптического модулятора <i>(англ. Frequency-contrast ratio response)</i>	Зависимость глубины модуляции лазерного излучения от разрешающей способности пространственно-временного модулятора
Число разрешаемых позиций оптического дефлектора <i>(англ. Number of resolvable spots)</i>	Число пучков лазерного излучения, разрешаемых в пространстве при их отклонении от минимального до максимального значения при заданном расстоянии между центрами соседних разрешаемых пучков
Быстродействие оптического дефлектора <i>(англ. Access time)</i>	Время, необходимое для перемещения оптическим дефлектором пучка лазерного излучения из одного заданного положения в другое
Оптический диапазон перестройки перестраиваемого оптического фильтра <i>(англ. Optical tuning range)</i>	Диапазон длин волн лазерного излучения перестраиваемого оптического фильтра, в котором осуществляется выделение или подавление одной или нескольких составляющих спектра по заданному закону во времени
Оптическое разрешение перестраиваемого оптического фильтра <i>(англ. Resolution for slow scan)</i>	Минимальное расстояние между точками линии, огибающей выделяемую или подавляемую составляющую спектра лазерного излучения, соответствующее половине интенсивности излучения в максимуме
Настраечная характеристика перестраиваемого оптического фильтра <i>(англ. Tuning curve/Tuning characteristic)</i>	Зависимость длины волны пропускания перестраиваемого оптического фильтра от амплитуды или частоты управляющего сигнала

ОПТИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПУЧКА ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Таблица 13 – Оптические преобразователи пучка лазерного излучения

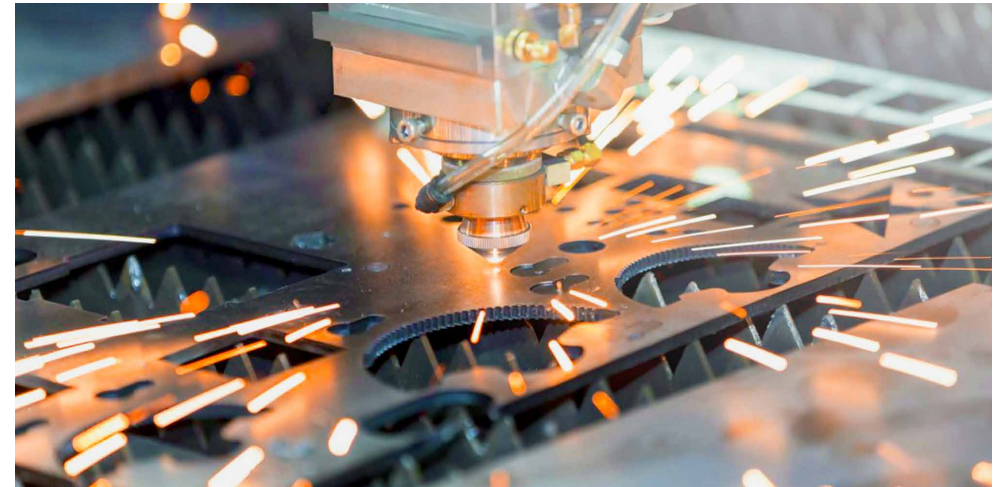
НАИМЕНОВАНИЕ УСТРОЙСТВА	ОПИСАНИЕ УСТРОЙСТВА
Оптический преобразователь пучка лазерного излучения <i>(англ. Optical beam converter)</i>	Оптическое устройство, с помощью которого меняются параметры пучка лазерного излучения
Коллиматор пучка лазерного излучения <i>(англ. Laser beam collimator)</i>	Оптический преобразователь пучка лазерного излучения для изменения его диаметра и расходимости
Коллиматор с диафрагмой пространственной фильтрации <i>(англ. Collimator with spatial filter aperture)</i>	Коллиматор пучка лазерного излучения, внутри которого вблизи минимального сечения пучка лазерного излучения помещена диафрагма пространственной фильтрации
Устройство фокусировки лазерного излучения <i>(англ. Focussing unit)</i>	Оптический преобразователь для уменьшения поперечного сечения и повышения плотности энергии или мощности пучка лазерного излучения в заданном пространстве
Пространственный фильтр лазерного излучения <i>(англ. Laser beam spatial filter)</i>	Оптический преобразователь, изменяющий распределение интенсивности лазерного излучения в пространстве по заданному закону
Диафрагма пространственной фильтрации <i>(англ. Spatial filter aperture)</i>	Пространственный фильтр лазерного излучения, оформленный в виде диафрагмы, чаще всего круглого сечения, для подавления высших поперечных мод

ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЛАЗЕРОВ

Газовые лазеры

Преимущества:

- 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;
- высокая плотность мощности, что наиболее важно в лазерных технологиях обработки металлов;
- наиболее распространены CO_2 -лазеры с непрерывным режимом действия.



Газовые лазеры малой мощности (от 3 до 100 Вт/м):

- для накачки используется волновод;
- одномодовые.

Области применения:

- медицина;
- производство датчиков;
- научные исследования.

Газовые лазеры средней мощности (от 100 до 3 000 Вт/м):

- медленная продольная прокатка до 900 Вт;
- быстрая продольная прокатка > 350 Вт/м;
- одномодовое или «около одномодовое излучение» – порядка двух дифракционных пределов при 1 000 Вт.

Области применения:

- обработка материалов;
- медицина.

Газовые лазеры большой мощности (> 3 кВт/м)

- в коммерческом исполнении – до 25 кВт;
- быстрая продольная прокатка (до 6 000 Вт);
- поперечное возбуждение (> 5 000 Вт);
- многомодовое излучение.

Области применения:

- различные отрасли промышленности;
- оборонно-промышленный комплекс.

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 10–15с);
- совместимость длин волн с оптическим волокном;
- возможность получения генерации в волокнах;
- большая яркость;
- высокая надёжность.

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.

Области применения:

- обработка материалов;
- медицина;
- испытания и измерения под водой;
- научно-исследовательские и опытно-конструкторские разработки.

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 ассиметричная расходимость.



Волоконные лазеры

Представляют собой конструктивную разновидность твердотельных лазеров, генерирующих на стеклянных волокнах твердотельных активных материалов. Однако в связи с развитием методов диодной накачки на данном этапе развития их выделяют 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.

Преимущества:

- высокий КПД – свыше 40%;
- 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;
- 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 накачка диодов электроэнергией с низким напряжением;
- естественная волоконная доставка излучения;
- высокая надёжность и большой ресурс работы (более 1 млн. часов);
- высокая стабильность параметров $\pm 2\%$;
- устойчивость к механическим, тепловым и другим внешним воздействиям, а также к загрязнению окружающей среды;
- высокая пространственная и спектральная яркость;
- малые массогабаритные размеры.

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

Основные характеристики непрерывного режима работы:

1. выходная мощность – до 50 кВт;
2. возможна модуляция выходного излучения с частотой 5 кГц;
3. КПД – 25-30%;
4. выход – волокно 50-200 мкм;
5. качество пучка – $M2 = 2,5-6$ мрад;
6. срок службы > 100 000 часов;
7. габаритные размеры – 86x81x150 см;
8. вес – 100 кг при 10 кВт.

Основные характеристики импульсного режима работы:

1. средняя выходная мощность – до 200 Вт;
2. длительность импульса – 30–100 нс;
3. энергия в импульсе – 0,5–2 мДж;
4. частота следования импульсов – 20–100 кГц;
5. волоконный выход;
6. внешнее цифровое управление;
7. компактность с воздушным охлаждением;
8. коллимированный выходной пучок с $M2 = 1,4-5$;
9. срок службы > 100 000 часов;
10. КПД более 10%.

ХАРАКТЕРИСТИКИ КАЧЕСТВА ИЗЛУЧЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЛАЗЕРОВ

Когерентность лазерного излучения

Когерентность бывает:

ВРЕМЕННАЯ;

Для излучения из одной и той же точки при наличии разности длин оптического хода.

Определяет монохроматичность.

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ;

При рассмотрении фазовых свойств излучения из разных точек поперечного сечения пучка.

Определяет направленность излучения.

Монохроматичность лазерного излучения

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

Поляризация⁷ лазерного излучения

Поляризацией в общем случае называется нарушение симметрии векторов напряжённости электрического и магнитного полей в поперечной световой волне. Поляризация, в частности, характеризует ориентацию вектора электрического поля в электромагнитной волне.

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

- лазерная резка толстых металлических материалов и сверление глубоких отверстий, когда имеют место многократные отражения от стенок (т.к. угол Брюстера¹ металлов $\varphi \sim \pi/2$, то излучение с S-поляризацией меньше поглощается при отражении и достигнет большей глубины);
- резка тонких плёнок и слоёв в зависимости от направления перемещения пучка при его различной поляризации.

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

7. Поляризация. 8. Угол Брюстера

ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ТВЁРДЫЕ СРЕДЫ

- Высокая плотность фотонов
- Многофотонные процессы с плотностью фотонов до и более.
- Высокое давление света
- Высокая напряжённость электрического поля
- Высокая плотность мощности



ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, ВОЗНИКАЮЩИЕ НА ПОВЕРХНОСТИ ТВЁРДЫХ ТЕЛ ПРИ ЛАЗЕРНОМ НАГРЕВЕ

Эмиссионные процессы:

- десорбция газа;
- термоэлектронная эмиссия;
- термоионная эмиссия;
- эмиссия нейтральных атомов;
- тепловое излучение/пирозлектрические измерения.

Структурные процессы:

- рекристаллизация;
- структурные изменения в Fe–C сплавах (закалка сталей);
- размягчение стекла и структурные изменения;
- аморфизация (формирование линзового растра) и кристаллизация стеклокерамики;
- аморфизация тонких металлических плёнок;
- взаимная диффузия нагретых слоёв (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 твёрдом теле и в воздухе;
- генерация ультразвука (дефектоскопия);
- оптический пробой в прозрачных диэлектриках.



Рисунок 8 – Пример аморфизации (формирования линзового растра) пластины ситалла⁹ СТ-50-1

Физические переходы:

- плавление;
- испарение;
- воспламенение и горение;
- детонация активных и взрывопассивных сред.

⁹ Ситалл – стеклокристаллические материалы, полученные объёмной кристаллизацией стёкол и состоящие из одной или нескольких кристаллических фаз, равномерно распределённых в стекловидной фазе. Разработаны советским физикохимиком И. И. Китайгородским. Материалы, подобные ситаллам, за рубежом называют пирокерамом, девитрокерамом, стеклокерамом.

ФИЗИКА ЛАЗЕРНОГО ФОРМИРОВАНИЯ ТОНКОПЛЁНОЧНОЙ ТОПОЛОГИИ

Удаление плёнок (испарение, абляция)

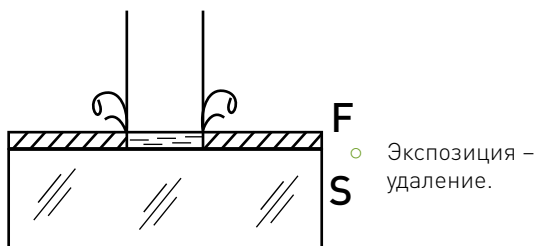


Рисунок 9 – Принципиальная схема лазерного удаления плёнок с поверхности материала

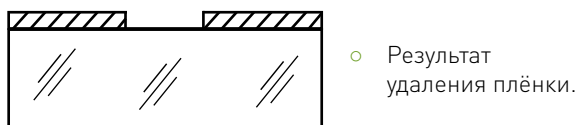


Рисунок 10 – Результат лазерного удаления плёнки – отверстие в ней

Локальное лазерное осаждение

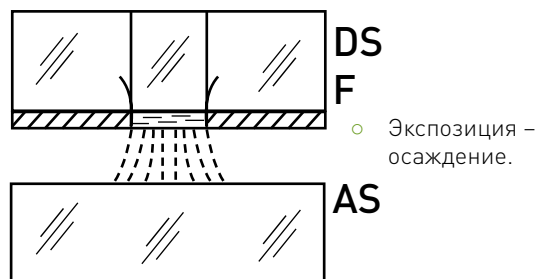


Рисунок 11 – Принципиальная схема локального лазерного осаждения одного материала на поверхность другого материала

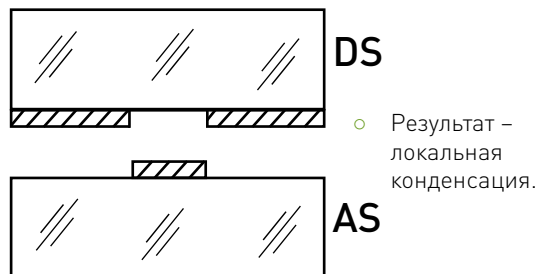


Рисунок 12 – Результат локального лазерного осаждения – локальная конденсация

Локальное окисление – селективное травление

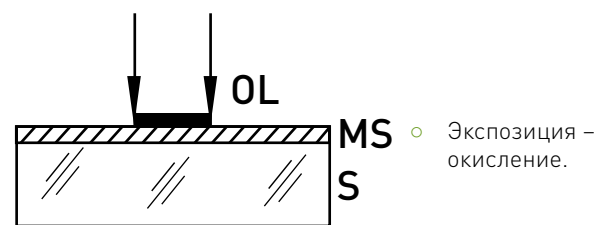


Рисунок 13 – Принципиальная схема локального лазерного окисления

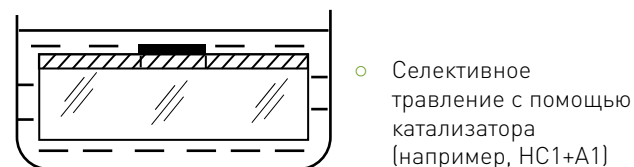
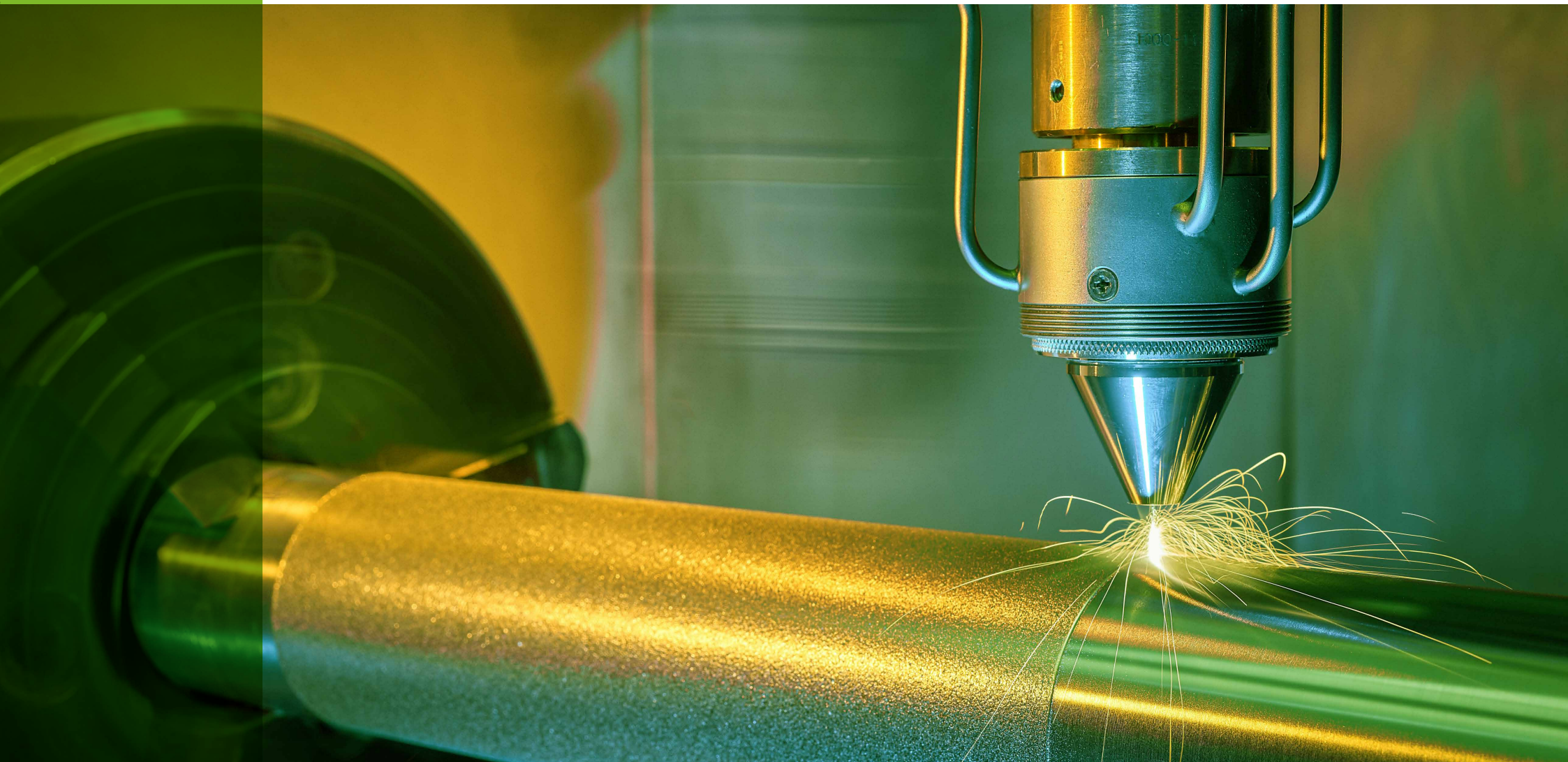


Рисунок 14 – Принципиальная схема лазерного травления с помощью катализатора



Рисунок 15 – Результат локального лазерного окисления и травления – плёночный элемент на поверхности материала



3

ЛАЗЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Лазерные материалы – вещества, которые используются в лазерах как активные среды. Лазерные материалы во многом определяют характеристики лазера: в первую очередь, длину волны его излучения и мощность, а также длительность импульса (для импульсных лазеров).

В первом лазере, созданном в 1960 году, активной средой был кристалл рубина – твёрдого раствора Cr_{203} в Al_2O_3 .

В первых лазерах использовали также смесь неона и гелия (1960), силикатное стекло с примесью ионов неодима (1961), арсенид галлия (1962). Уже к 1973 году было известно около 200 различных лазерных материалов.

КРИТЕРИИ ВЫБОРА МАТЕРИАЛА ДЛЯ ЛАЗЕРА

Чтобы материал можно было использовать для генерации и управления излучением лазера, он должен обладать следующими свойствами:

- набор энергетических уровней (или зон), позволяющих воспринимать подводимую извне энергию для переброса электронов и с максимальным выходом преобразовывать её в электромагнитное излучение;
- высокая оптическая однородность;
- высокая теплопроводность;
- низкий коэффициент термического расширения;
- постоянство состава и свойств в условиях работы;
- для твёрдых материалов – высокая прочность, пригодность к механической обработке.

ВИДЫ ЛАЗЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Лазерные материалы отличаются большим разнообразием:



ТВЁРДЫЕ:

- кристаллы;
- стёкла (аморфные);
- полупроводниковые материалы.



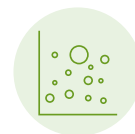
ЖИДКИЕ:

- растворы органических красителей;



ГАЗООБРАЗНЫЕ:

- газы и их смеси;
- пары металлов.



ПЛАЗМЕННЫЕ:

- возбужденная плазма в парах металлов, например, в цезии.



4

ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НАИБОЛЕЕ
ПОПУЛЯРНЫХ ВИДОВ ЛАЗЕРОВ

Применение лазерных технологий в машиностроении очень разнообразно. Это сварка, термоупрочнение, легирование и наплавка, резка, раскрой материалов, маркировка и гравировка, прецизионная микросварка электронных компонентов, функциональная подгонка компонент микроэлектроники, микрорезка, прошивка и реструктурирование материалов радио- и микроэлектроники, медицинской техники (полупроводников, кристаллов, керамики и биоорганики), структурирование тонкопленочных изделий.

Лазерно-оптические методы бесконтактных измерений и диагностики, техническое зрение играют очень большую роль в организации современных автоматизированных производств. С помощью лазеров в ряде направлений достигнуты такие технические и экономические результаты, которые нельзя реализовать другими средствами. Во многих случаях лучевые технологии не имеют конкурентов.

Впечатляющий прогресс, достигнутый в производстве современных электронных и радиоэлектронных приборов, устройств и компонентов за последние 10-15 лет в значительной степени связан с активным внедрением лазерных технологий. В цикле производства практически любого современного электронного прибора (от МЭМС-устройств до сотовых телефонов, дисплеев, фотоэлектронных устройств или, например, навигационных приборов) в настоящее время используется от 3 до 15 лазерных операций, начиная с уже ставших традиционными маркировки, подгонки и микросварки до новейших технологий лазерной микрообработки при производстве электронной компонентной базы, микроэлектромеханических устройств и СВЧ-компонент.

ОБЛАСТИ НАИБОЛЕЕ АКТИВНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФОТониКИ



обработка материалов в промышленности;



бесконтактные измерения и диагностика (техническое зрение);



запись, хранение, обработка и передача информации, связь;



диагностика и лечение заболеваний человека и животных;



задание направлений и управление движением;



визуализация информации, дисплеи, световые шоу;



скрытая маркировка документов и изделий;



распознавание изображений;



биостимуляция в растениеводстве и животноводстве;



дистанционное зондирование, картографирование рельефов;



энергетика;



исследовательское оборудование для естественных наук;



обеспечение безопасности людей и объектов;



военные применения.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ОБЛАСТИ 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-заражённых объектов.



Строительство:

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



Экология:

- 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.



Научные исследования:

- различные области естественных наук и наук о человеке.

ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ОСНОВНЫХ ВИДОВ ЛАЗЕРОВ





СО2-ЛАЗЕРЫ

-  обработка материалов;
-  медицина;
-  научные исследования;
-  оборонная промышленность;
-  лазерная маркировка;
-  измерения;
-  дефектоскопия;
-  трёхмерное моделирование;
-  реставрация.




НА ПАРАХ МЕТАЛЛОВ (CU)

-  научные исследования;
-  микроскопия;
-  обработка материалов;
-  микротехнологии*;
-  химические технологии**;
-  трёхмерное моделирование.





ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ ЛАЗЕРЫ (YAG, ND)

-  обработка материалов;
-  датчики;
-  спектроскопия;
-  научные исследования;
-  оборонная промышленность;
-  лазерная маркировка;
-  измерения;
-  дефектоскопия;
-  трёхмерное моделирование;
-  реставрация.








НА КРАСИТЕЛЯХ

-  спектроскопия;
-  научные исследования;
-  трёхмерное моделирование.








ВОЛОКОННЫЕ ЛАЗЕРЫ

-  оптическая связь;
-  медицина;
-  дистанционные измерения, экологический мониторинг;
-  промышленность;
-  оптическая локация, навигация, дальнометрия, батиметрия;
-  трёхмерное моделирование;
-  реставрация.






ЭКСИМЕРНЫЕ ЛАЗЕРЫ

-  микротехнологии*;
-  литография;
-  медицина;
-  научные исследования;
-  измерения;
-  дефектоскопия;
-  трёхмерное моделирование.















ИОННЫЕ ЛАЗЕРЫ (AR)

-  печать;
-  датчики;
-  развлечения;
-  обработка материалов;
-  полиграфия;
-  научные исследования;
-  измерения;
-  дефектоскопия.

НЕ-НЕ-ЛАЗЕРЫ

-  сканирование;
-  измерения;
-  датчики;
-  юстировка;
-  голография;
-  научные исследования;
-  дефектоскопия.

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ЛАЗЕРЫ

-  оптическая связь;
-  хранение информации;
-  печать;
-  сканеры;
-  юстировка;
-  датчики;
-  научные исследования;
-  медицина;
-  звукозапись, видеозапись и воспроизведение;
-  измерения;
-  дефектоскопия;
-  оптическая локация, навигация, дальнометрия, батиметрия;
-  полиграфия;
-  трёхмерное моделирование.

*Микроэлектроника, обработка плёнок, нанесение плёночных слоёв, литография, подстройка параметров, интегральная оптика, микрооптика, микромеханика микрохимия и др.

** Разделение изотопов, катализ и т.д.

ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ

Лазеры являются наиболее многофункциональными и универсальными средствами обработки материалов. Они отличаются высоким уровнем долговременной надёжности и удобства в использовании. Преимущества над традиционной обработкой сделали их крайне востребованными для резки, сверления, сварки, твёрдой и мягкой пайки, маркировки, гравировки, плакирования, агломерирования и обработки поверхностей.

Резка

Лазерная резка осуществляется за счет нагрева материала с помощью сфокусированного лазерного луча. Так как материал при этом плавится, его следует оперативно удалять с помощью струи газа или испарения, что и приводит к разделению материалов.

Методика лазерной резки

При резке выплавлением лазерный луч соосно соединен с инертным газом, таким как азот или аргон. Тепло, выделяемое лазерным лучом, создает расплавленный слой, который выбрасывается вниз через пропилен посредством сжатого газа, выходящего из сопла. Резку выплавлением можно использовать для мягких сталей толщиной до 25 мм.

Огневая резка, также называемая реактивной, использует лазерный луч в комбинации с газообразным кислородом или воздухом для нагрева подложки до температуры ее воспламенения. В то время как производимое лазерным лучом тепло растапливает поверхность, газ вступает в экзотермическую реакцию с подложкой и создает дополнительный источник нагрева для формирования оксидного слоя или шлака. Когда газовая струя выбрасывает шлак с нижней поверхности подложки, появляется вырезанный пропилен. Огневая резка часто используется для резки, легированной стали, например, малоуглеродистой, с толщиной до 40 мм на относительно высокой скорости обработки.

Сублимация или испарительная резка обычно заключается в нагревании слоя до точки испарения. Этот метод резки обычно используется для материалов с низкой температурой испарения, например, полимеров, дерева и органических материалов.

Волоконные лазеры имеют динамический рабочий диапазон мощностей, позволяющий фокусировать луч и сохранять его позицию даже при изменении мощности лазера. Кроме того, широкий диапазон размеров пятен луча можно получить за счет изменения конфигурации оптической системы. Эти особенности позволяют пользователю выбирать подходящую плотность мощности для резки различных материалов и толщин. Волоконные лазеры производства компании IPG представляют собой идеальную технологию для использования лазерной резки для различных целей.

Типы металлов:

- нержавеющие стали;
- углеродистые стали;
- золото;
- серебро;
- алюминий;
- инструментальные стали;
- никелевые сплавы;
- латунь;
- медь;
- титан.

Резка тонколистового металла

Каждая технология резки разрабатывается в соответствии с типом материала и его толщиной, включая скорость резки, качество кромок и ширину реза. Эти требования определяют параметры лазера, например, длину волны, мощность и качество луча.



Рисунок 16 – Пример детали, полученной с помощью лазерной резки из тонколистовой заготовки



Рисунок 17 – Пример деталей, полученных с помощью лазерной резки из трубных заготовок

Одномодовые волоконные лазеры производства IPG как в непрерывном режиме, так и при модуляции фаз лучше всего подходят для резки тонких металлов (толщиной менее 1 мм) из-за их способности фокусироваться на самых маленьких из размеров пятен лазера. Высокие плотности мощности, связанные с маленькими пятнами и отличными свойствами луча, позволяют производить резку любой сложной формы на высокой скорости. Области применения – это сердечно-сосудистое стентирование, резка по трафаретам для нанесения припоя, резка тонкой меди, необходимая для производства аккумуляторов. Во многих случаях резка сопровождается высокоскоростной гальванизацией.

Квазинепрерывные волоконные лазеры с оптимизированными импульсами также обладают уникальными свойствами резки тонких материалов. Резка в импульсном режиме обеспечивает минимальное количество продуктов сгорания, минимальную зону теплового воздействия, что очень критично для многих процессов резки, например, для обработки миниатюрных деталей.

Маломощный циклический процесс резки использует высокоимпульсную энергию для резки тонко- и толстостенных материалов, а также материалов с высокой отражательной способностью при гораздо более низкой средней мощности. Резка с помощью оптического импульсного квантового генератора (импульсный лазер) используется для керамики и прецизионных металлов. Высокомощные квазинепрерывные лазеры импульсной мощностью 2 кВт и средней мощностью 20 кВт сейчас позволяют резать как тонкие, так и толстые материалы одним и тем же лазером. Эти лазеры являются рабочим инструментом при выполнении сверления в авиакосмической промышленности, где используются материалы толщиной >25 мм.

Производительность процесса обработки волоконными лазерами значительно выше, чем углекислотными лазерами при одинаковой выходной мощности, на одном материале и его толщине. Кроме того, потребление энергии значительно ниже, чем у углекислотного лазера, примерно 9% преобразование электрической

энергии в оптическую у углекислотного лазера против >45% у волоконного лазера (лазеры серии YLS-ECO имеют КПД преобразования электрической энергии в оптическую более 50%). Благодаря простоте применения и практически отсутствию технического обслуживания, волоконные лазеры компании IPG – это идеальное решение для резки металлов. Волоконные лазеры быстро вытесняют углекислотные в установках резки различных материалов. Эти системы оборудованы волоконными лазерами от 2 кВт до 6 кВт, что позволяет резать как тонколистовой металл, так и толстолистовой на одном станке. К тому же из-за высокого поглощения рабочей длины волны лазеры позволяют резать бронзу, алюминий и медь с высокой скоростью.

Резка толстолистового металла

Высококватинепрерывные лазеры могут использоваться для резки тонких и толстых листов для различных применений. Большая глубина резкости и малый размер пятна создают узкие прорезы и прямую цепь (стену) даже с толстыми материалами. Ширина реза и отсутствие ограничения – существенное преимущество перед альтернативными методами резки металла. Традиционно использование мощного многомодового лазера – это вырезание отверстий для клепки в сплавах алюминия и титана в авиакосмической промышленности, а также для резки стальных листов, а также в судостроительной промышленности.

Волоконные лазеры могут быть установлены в автоматах для трехмерной резки. Эти системы обеспечивают надежный и эффективный метод резки толстых и тонких металлических листов, тем самым сокращая потребление энергии и время обработки. Режущая головка IPG, встроенная в систему, имеет дистанционное управление и возможность линейного перемещения. Типичные области применения – это трехмерная резка гидравлических труб и элементов кузова в автомобильной промышленности. Эти новейшие системы имеют дополнительную возможность разрезать плиты, чтобы придать им большую гибкость.



Рисунок 18 – Резка толстолистового металла

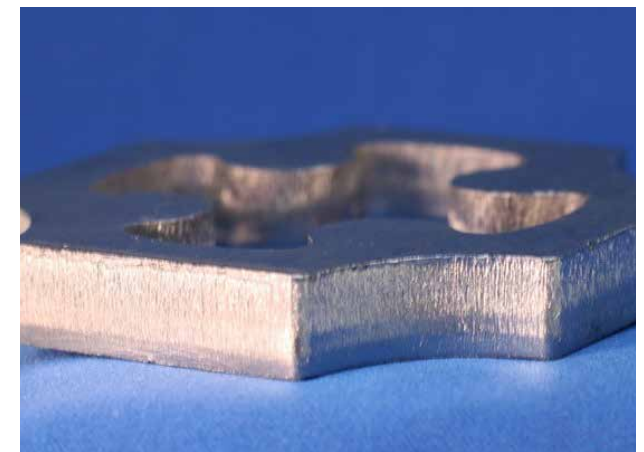


Рисунок 19 – Пример детали, полученной с помощью лазерной резки из толстолистовой заготовки

Сверление

Преимущества лазерного сверления включают бесконтактную обработку, низкое тепловложение в материал, гибкость при сверлении широкого ряда материала, точность и повторяемость.

Лазерное сверление стало широко используемым технологическим решением во многих отраслях промышленности. Основное преимущество лазерного сверления заключается в том, что это бесконтактный процесс, а, следовательно, механический износ сверлильного оборудования не является проблемой. Другие преимущества заключаются в гибкости сверления почти любого материала, способности одновременно изменять размер отверстий, форму и угол наклона, низкое тепловложение в основной материал и точное повторение размеров отверстий. Кроме того, лазер может просверливать отверстия небольших диаметров, что невозможно при использовании обычной технологии сверления. Волоконно-лазерная технология позволяет просверливать отверстия на площади до 10 мкм.

Традиционные технологии, используемые в сверлении, – это ударное сверление отверстий и кольцевое сверление. Ударное сверление – это процесс, где множественные импульсы используются для сверления отверстия для достижения желаемого результата. Оперативное сверление – это несколько ударных операций сверления, когда запрограммированная для обработки поверхность перемещается с большой скоростью относительно лазерного луча, и лазер постоянно генерирует импульсы для создания отверстий. Кольцевое сверление – это процесс, позволяющий вырезать отверстия с большим диаметром или сложной конусной формой. Конусность отверстий можно точно контролировать в процессе кольцевого сверления. Лазеры можно легко переключить со сверления конусных отверстий на ударное оперативное сверление для создания множества отверстий разного диаметра в одной заготовке.

Преимущества лазерного сверления были признаны много лет назад и в аэрокосмической промышленности. Сегодня волоконные лазеры квазинепрерывного действия быстро вытесняют старые технологии, базирующиеся

на использовании классических твердотельных лазеров в сверлении больших отверстий (0,2–1 мм). Такие отверстия можно делать в многочисленных аэрокосмических элементах, например, в сопловом направляющем аппарате, лопастях, охлаждающих кольцах и камерах сгорания. Квазинепрерывные волоконные лазеры обладают уникальной комбинацией высокой пиковой мощности и высокой импульсной энергией, что делает их идеальными для использований, когда требуются импульсы в пределах миллисекунды. Гибкие квазинепрерывные волоконные лазеры можно также быстро перенастроить на непрерывную работу для резки больших деталей.

В микроэлектронике применяется лазерное сверление для многих целей, например, для сверления алюминий-керамических оснований. Для сверления отверстий с малым диаметром (менее 10 мкм) требуется высокая скорость до несколько тысяч отверстий в секунду. В этом случае волоконные лазеры с высокой пиковой мощностью и лазерным затвором или волоконные лазеры с быстрым изменением импульсов используются с частотой повторения импульсов до 1 МГц и длиной импульса менее 1,5 нс.

Высокомощные волоконные лазеры сейчас также используются для бурения пород и нефтегазовой промышленности. Высокие пиковые мощности и импульсы также используются для сверления тонких металлов.

Типы металлов:

- нержавеющие стали;
- углеродистые стали;
- золото;
- серебро;
- алюминий;
- инструментальные стали;
- никелевые сплавы;
- латунь;
- медь;
- титан.



Рисунок 20 – Пример детали, полученной с помощью лазерного сверления



Рисунок 21 – Пример детали, полученной с помощью лазерного сверления

Маркировка и гравировка

Возрастающая потребность в отслеживании продукции или материалов, радиоэлектронной защите или идентификации продукта обуславливает необходимость в быстром процессе нанесения несмываемой маркировки.

Лазерная технология является наиболее универсальным решением для маркировки, так как позволяет маркировать и гравировать материалы без контакта с поверхностью или использования чернил, или пигментов.

Для каждого процесса маркировки всегда необходимо учитывать следующие особенности: тип материала, цвет и обработка поверхности. Эти требования (а также факторы воздействия на окружающую среду) определяют методы маркировки или гравировки.

Методы маркировки и гравировки

Лазерная гравировка или выпаривание – это бесконтактный процесс абляции материала посредством комбинации выпаривания и выброса плавки с целью достижения высококачественного результата и регулируемой глубины до 0,5 мм. Лазерная гравировка – это малозатратная технология, применяемая для промышленных, автомобильных и аэрокосмических компонентов. Универсальность программного обеспечения лазерной маркировки позволяет создание детализированных топологических чертежей, текстов или графики. Преимущества перед механическим процессом: существенное сокращение времени обработки и расходов на наладку, гравировка мелких деталей, а также возможность осуществлять гравировку на искривленных поверхностях.

Удаление поверхностного слоя схоже с гравировкой выпариванием. Это технология, при которой лазер удаляет поверхностный слой подложки. Этот метод позволяет получить прекрасный контраст без вреда для расположенной ниже подложки. Метод лазерной маркировки хорошо подходит для покрытий, в том числе лакокрасочных, и других видов обработки поверхности. Удаление поверхностного слоя обычно используется для маркировки анодированного алюминия, металлов с покрытием, пленок и фольги.

Тёмная маркировка – это широко известная технология маркировки металлов, обычно нержавеющей стали, заключающаяся в наложении покрытия из темного диоксида кремния без чрезмерного плавления или повреждения поверхности. Эта техника, зачастую ошибочно называемая маркировкой отжигом, обладает существенными преимуществами при маркировке поверхностей с низким уровнем шероховатости. Технология может использоваться для создания цвета и сложных узоров на подложке. Так как материал не удаляется, процесс маркировки не влияет ни на основную функцию подложки, ни на коррозионную устойчивость металлов, таких как нержавеющая сталь.

Колоризация, или лазерная маркировка полимеров, зачастую основывается на ряде разнообразных лазерно-индуцированных механизмов, таких как карбонизация и вспенивание. Карбонизация (термохимический процесс) производит маркировку в темных цветах. Вспенивание – частичная деградация, которая создает пузырьки газа внутри материала, рассеивает свет и производит маркировку в светлых цветах. Смешивание полимеров с присадками может улучшить маркировку, увеличив абсорбцию и незначительно изменив химический состав маркировочной метки.

Маркировка металла

Благодаря хорошим поглощающим свойствам большинства металлов в ближней ИК области спектра волоконные лазеры эффективно используются для лазерной маркировки. Качество луча, компактная конструкция и бесперебойная работа, отсутствие необходимости технического обслуживания волоконных лазеров с оптическим затвором и непрерывных лазеров эффективно применяются для многих областей промышленности и подходят для большинства требований к маркировке.

Волоконные лазеры с оптическим затвором с энергией импульса до 10 мДж и средней мощностью до 200 Вт обеспечивают высокую пиковую мощность и наносекундные импульсы, которые можно использовать для маркировки большинства материалов. Высокая пиковая мощность

позволяет маркировать отражающие материалы, например, золото и алюминий. В качестве примера может служить нанесение маркировки на ювелирные изделия, высокопрочные шестерни и автомобильные детали.

Одномодовые непрерывные волоконные лазеры соответствуют основным требованиям по маркировке металлов. Непрерывный выход важен, когда требуется быстрая, чистая, неинтрузивная маркировка.



Рисунок 22 – Пример лазерной гравировки

Типы металлов:

- нержавеющие стали;
- углеродистые стали;
- золото;
- серебро;
- алюминий;
- инструментальные стали;
- никелевые сплавы;
- латунь;
- медь;
- титан.

Маркировка полимеров

Процесс маркировки полимеров сильно зависит от основного материала, примесей и других составных элементов, образующих полимеры. Это означает, что маркировка полимеров может изменяться от партии к партии, может наноситься на другие места. В результате для процесса необходимы уникальные параметры для каждого назначения.

Качество луча, контрастность маркировки и скорость обработки лазеров с оптическим затвором с длиной волны в 1064 нм компании IPG предназначено для разнообразных применений и соответствует большинству требований по маркировке. Волоконные лазеры с оптическим затвором и обычным импульсом в 1 мДж обеспечивают достаточную пиковую мощность для маркировки многих полимерных материалов. Высокая плотность мощности позволяет маркировать полимеры, например, нейлоны и уретаны. Лазеры с изменяемой длиной импульса также предоставляют дополнительный уровень контроля, который может потребоваться для некоторых особо чувствительных материалов, например, маркировка поликарбоната под его поверхностью. Оба типа лазеров также хорошо подходят для маркировки легированных добавками пластмасс для достижения хорошего качества и контрастности.

Зелёные и УФ наносекундные импульсные лазеры также используются для маркировки определенных специфических полимеров, для которых требуется минимальный нагрев. Их самое известное применение – это использование УФ-лазеров для маркировки полимеров, легированных диоксидом титана (белые), где необходимо нанести маркировку серого цвета.

Типы полимеров:

- поликарбонат;
- термопластик;
- уретан;
- нейлон;
- полипропилен;
- полиэтилен(HDPE/LDPE);
- ABS.



Рисунок 23 – Пример лазерной гравировки изделия из металла

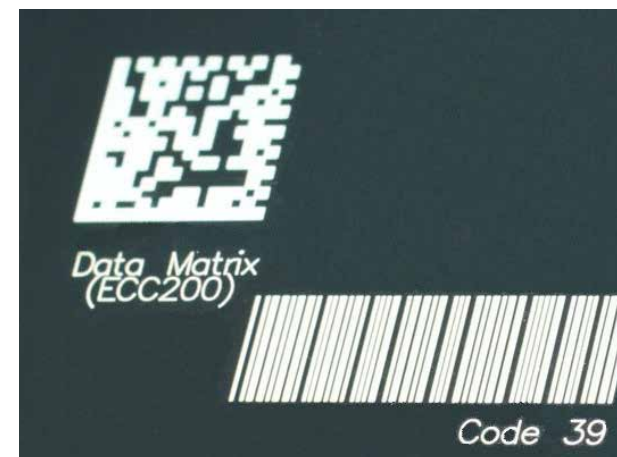
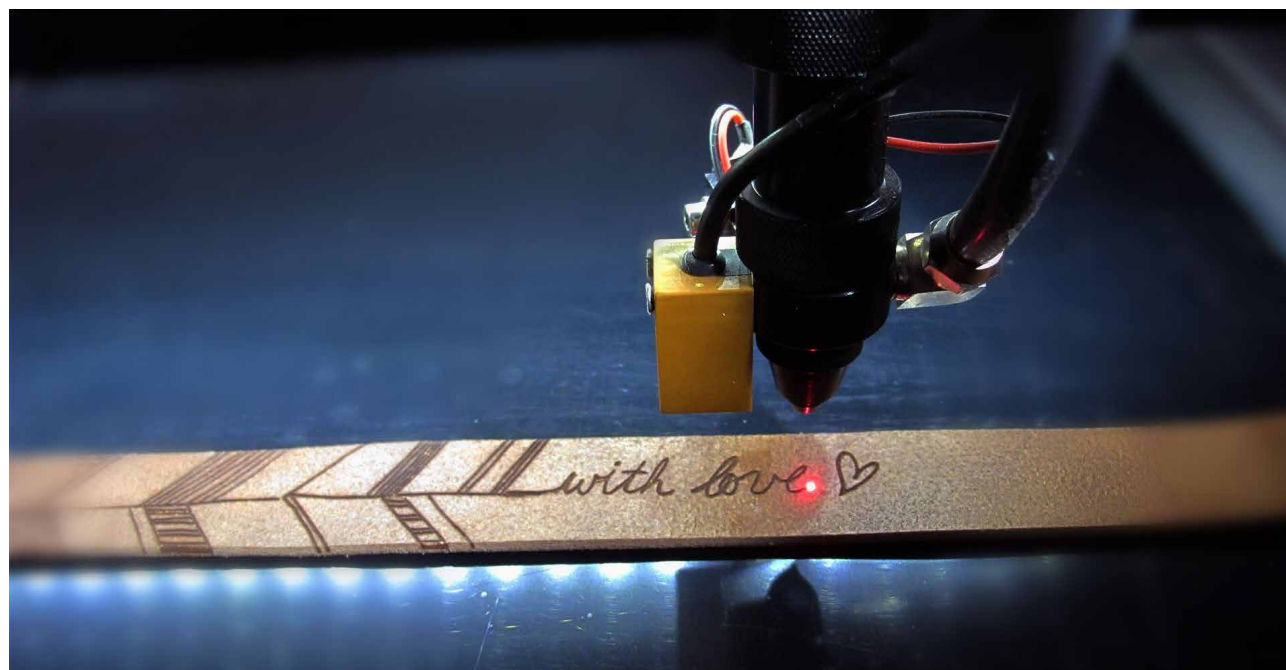


Рисунок 24 – Пример лазерной гравировки изделия из полимера



Лазерная сварка

Предлагает экономичную и бесконтактную альтернативу сварке широкого ряда металлов практически в любой отрасли промышленности в случаях, когда необходима высокая скорость обработки, сложные и комплексные сварные конструкции или многослойные швы.

Химический состав материала, конструкция изделия и напряженное состояние – это только несколько факторов, определяющих способ соединения. Лазерная сварка часто является идеальным решением соединения металлов, для которых требуется высокая скорость обработки, низкое тепловложение, низкие поводки и остаточные напряжения.

Методы сварки металла

Гибридная сварка сочетает лазерную сварку с другими сварочными технологиями, чаще всего с дуговой сваркой плавящимся электродом в инертном газе (MIG).

Кондуктивная сварка схожа с точечной контактной сваркой, однако позволяет перемещение лазерного луча после появления плавильного «болота». Этот метод может использоваться как модулируемые, так и импульсные лазеры для создания герметичного по своей структуре сварного шва. Глубина провара шва обычно составляет менее 2 мм.

Лазерная точечная сварка – это бесконтактная технология, использующая лазер для создания одиночной сварочной точки для связки металлов. Когда лазер сфокусирован, подложка поглощает свет, который расплавляет металл. Расплавленный металл течет, затвердевает и создает маленькую сварочную точку. Весь процесс занимает несколько миллисекунд и может быть повторен в зависимости от толщины материала и требуемой прочности соединения.

Сварка с глубоким проплавлением требует высочайшей плотности энергии для создания лазерного сварного шва. Сфокусированный лазерный луч расплавляет и выпаривает подложку. Давление пара смещает расплавленный металл и создает глубокое и узкое сквозное проплавление. По мере перемещения лазерного луча расплавленный металл обтекает сквозное проплавление и затвердевает, образуя на своем пути глубокий узкий шов.

Типы металлов:

- нержавеющие стали;
- углеродистые стали;
- золото;
- серебро;
- алюминий;
- инструментальные стали;
- никелевые сплавы;
- латунь;
- медь;
- титан.

Сварка тонкого металла

Лазерная сварка зачастую является идеальным решением соединения металлов, для которых требуется высокая скорость обработки, низкое тепловложение, зона измененной структуры металла и минимальные поводки. За счет хорошего качества пучка волоконных лазеров киловаттного класса в диапазоне от средней до высокой мощности представлен широкий спектр механизмов для лазерной сварки от узкой разделки с высоким соотношением ее сторон до сварки малых толщин. Эрбиевые непрерывные волоконные лазеры с низкой и средней мощностью (до 1 кВт) используются для сварки разнообразных тонких листовых материалов толщиной до 1,5 мм на высокой скорости.

Эрбиевые непрерывные волоконные лазеры с низкой и средней мощностью возможно фокусировать в маленькие пятна с помощью гальваносканеров и технологических линз с большим фокусным расстоянием, что обеспечивает удаленную лазерную сварку. Существует много преимуществ использования технологических линз с большим фокусным расстоянием и большой степенью центрирования, поскольку это значительно увеличивает рабочую зону. Например, отдельные сварочные станции, оборудованные волоконными лазерами, могут полностью сваривать дверную панель.



Рисунок 25 – Пример лазерной кондуктивной сварки



Рисунок 26 – Пример лазерной точечной сварки



Рисунок 27 – Пример лазерной сварки глубоким проплавлением

При использовании роботов швы внахлест могут выполняться на всем корпусе автомобиля. Другие области применения: герметичная сварка аккумуляторных батарей и герметичных уплотнений.

Волоконные лазеры квазинепрерывного излучения с модуляцией добротности обеспечивают возможность импульсной лазерной сварки с высокой пиковой и низкой средней мощностью для работы в условиях низкого подвода тепла. Доставка импульса через волокно обеспечивает легкую интеграцию в обычные прямые оптические сварочные или гальванометрические головки. Для типичной точечной сварки могут использоваться любые из вышеназванных прямых оптических головок для сварки медицинского оборудования, например, кардиостимуляторов. Способ доставки излучения на основе гальванометра можно использовать для высокоскоростной точечной сварки корпусов мобильных телефонов и планшетов, бритвенных лезвий или подкапотных автомобильных компонентов.

Сварка толстого металла

Волоконные лазеры сейчас широко используются в сварке разнообразных тонких материалов. Длина волны 1070 нм в ближнем инфракрасном диапазоне спектра имеет определенные преимущества над существующей технологией на базе углекислотных лазеров из-за более низкой отражательной способности металлов на этой длине волны. Это особенно актуально для металлов с высокой отражательной способностью, например, алюминия и меди, где высокоомощные волоконные лазеры используются для сварки до 15 мм – ранее такую толщину невозможно было достичь при использовании других типов лазеров. Для использования волоконных лазеров с высокой средней мощностью и относительно небольшими размерами пятна для сварки толстых металлов требуется использовать способ, известный как сварка с проплавлением в узкую разделку. Узкая разделка обеспечивает глубокое проплавление и качественный шов на высокой скорости. Это означает меньшую чувствительность к положению фокуса, которая значительно

повышает легкость, с которой высокое качество сварных швов может быть достигнуто. Другие примеры волоконной лазерной сварки толстых металлов включают глубокопроникающую сварку толстой стали для судов и трубопроводов.

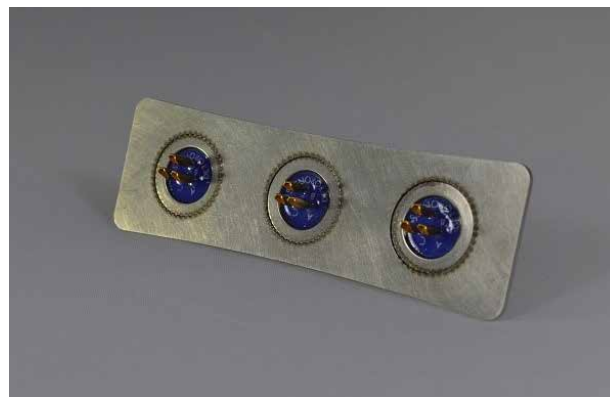


Рисунок 28 – Пример детали, полученной лазерной сваркой тонколистового металла

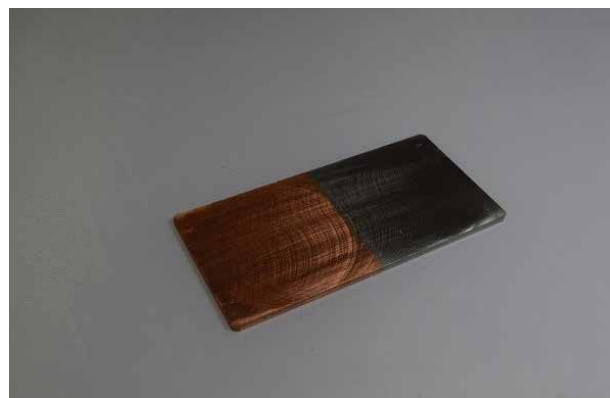


Рисунок 29 – Пример детали, полученной лазерной сваркой двух разных тонколистовых металлов

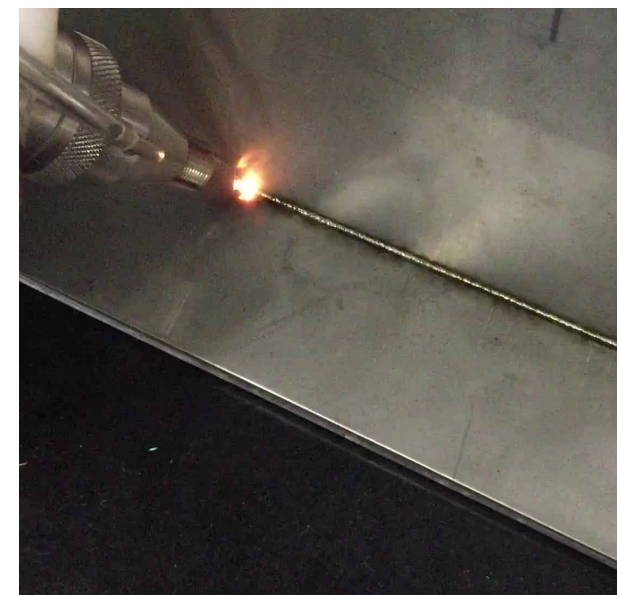


Рисунок 30 – Пример лазерной сварки толстого металла



Рисунок 31 – Пример детали, полученной с помощью лазерной сварки толстого металла

Лазерная сварка полимерных материалов

Данный способ сварки может успешно конкурировать с ультразвуковой сваркой, когда требуется технологическая гибкость и точный бесконтактный процесс без сварки вспышкой. В этих случаях данная технология обеспечивает надёжные и экономически эффективные решения для соединения ряда термически свариваемых полимерных материалов.

Данная технология использует волоконный лазер, что исключает потребность в поглощающем слое и позволяет соединять чистые полимеры. Тулиевые волоконные лазеры компании генерируют лазерный луч с более длинной волной, которая более эффективно поглощается при прохождении структуры полимера, что обеспечивает управляемое плавление и контроль глубины проплава. Подобная новая разработка, называемая сквозной лазерной сваркой (СЛС), – это высокоточный бесконтактный процесс для сварки прозрачных полимеров. Этот процесс весьма подходит для типа из прозрачного полимерного компонента, широко используемого в производстве медицинских приборов, где более темные полимеры или добавки нежелательны. Процесс также используется для двустенных контейнеров для жидкостей для легкой промышленности. Последние разработки показали, что эта длина волны имеет много преимуществ, включая более быстрое время обработки по сравнению с лазером 1 мкм и гораздо более широкий спектр цветов свариваемых полимеров. Кроме того, усилие зажима ниже, и во многих случаях нет необходимости использовать пропускающие зажимные пластины.

Традиционный способ лазерной сварки полимеров называется лазерной сваркой со сквозной подачей. В этом случае лазеры с длиной волны 1 мкм используются для сварки двух термопластичных компонентов; один из компонентов соединения должен передавать луч, а другой должен поглощать его. Для этого необходимо использовать либо темный компонент или специальную дорогостоящую краску или пигмент для поглощающего слоя. Диодные лазеры с прямой подачей по волокну с воздушным охлаждением со средней мощностью

до 200 Вт для этого процесса. Многомодовые волоконные лазеры непрерывного излучения со средней мощностью до 200 Вт для полимерной сварки.

Оба эти процесса могут использоваться для различных термопластичных материалов, но зависят от их совместности по химическому составу и одинакового диапазона плавления. Для этих процессов требуется средняя мощность 100–200 Вт для получения требуемых скоростей с хорошей прочностью сварного шва.

Типы полимеров:

- поликарбонат;
- термопластик;
- уретан;
- нейлон;
- полипропилен;
- полиэтилен(HDPE/LDPE);
- ABS.

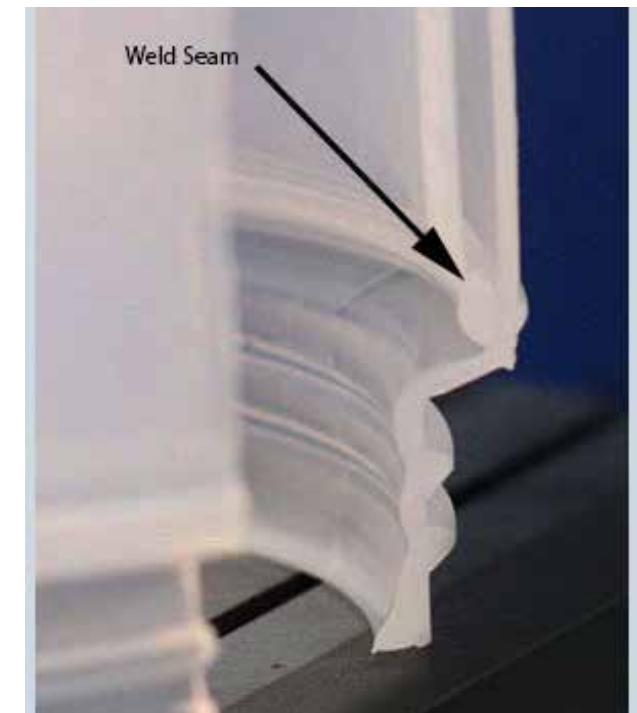


Рисунок 32 – Пример части детали, полученной с помощью лазерной сварки полимеров



Рисунок 33 – Пример детали, полученной лазерной сваркой разных полимеров

Лазерная пайка

Представляет собой процесс по соединению металлов, при котором присадочный материал соединяется с разнородными материалами. В зависимости от того, какие материалы подложек и последующие присадочные материалы используются, эти процессы применяют лазер для плавления присадочного металла в рамках контролируемого и дистанционного процесса. Лазерная пайка используется на обработанных компонентах в различных областях промышленности, таких как автомобильная, лёгкая и электронная.

Для компонентов, которые нельзя соединить с помощью обычных сварочных процессов, в качестве альтернативы может использоваться пайка твердым припоем. Пайка твердым припоем – это процесс соединения металлов, в котором присадочный металл, например, медь или цинк, имеют температуру плавления выше 425 °С, но ниже температуры плавления металлической подложки. Поскольку лазеры нагревают поверхности и расплавляют припой, промежуток между подложками действует как капилляр, чтобы припой протекал и сцеплял подложки. Высокомощные волоконные лазеры являются идеальным решением для пайки твердым припоем, применяемой в автомобильной и тяжелой транспортной промышленности.

Типы металлов:

- нержавеющие стали;
- углеродистые стали;
- золото;
- серебро;
- алюминий;
- инструментальные стали;
- никелевые сплавы;
- латунь;
- медь;
- титан.

Лазерная плакировка

Лазерная плакировка является аддитивным процессом, при котором материал вплавляется в основной металл. Данный процесс часто используется в тяжёлом машиностроении для построения новой поверхности, восстановления изношенной поверхности или улучшения функциональности изделия.

Лазерная плакировка – это процесс, при котором на поверхность наносится металлическое покрытие с помощью частичного использования лазера в виде источника тепла. Процесс часто используется для создания защитного покрытия для повышения функциональности, а также восстановления поврежденных и изношенных поверхностей. Лазерная плакировка увеличивает срок службы оборудования и техники, если их детали защищены от коррозии, износа и вредного воздействия. Например, на производствах строительного оборудования данная технология используется для повышения износостойкости и обеспечения длительного срока службы.

Обычно покрытие наносится на подложку с помощью лазера, например, высокомощного многомодового волоконного лазера, который расплавляет металлический порошок. Защитные покрытия, например из карбида вольфрама, сплава никеля или кобальта, могут использоваться на подложках из стали и нержавеющей стали. В данном процессе создается сильная металлургическая связь с минимальным разбавлением основного материала для повышения устойчивости к коррозии, истиранию и износу.

Преимущества лазерной наплавки:

- плотное покрытие с гладкой однородной поверхностью;
- низкие остаточные напряжения и деформации;
- улучшение свойств материала (т.е. коррозия, износ и окисление);
- меньшее время обработки.

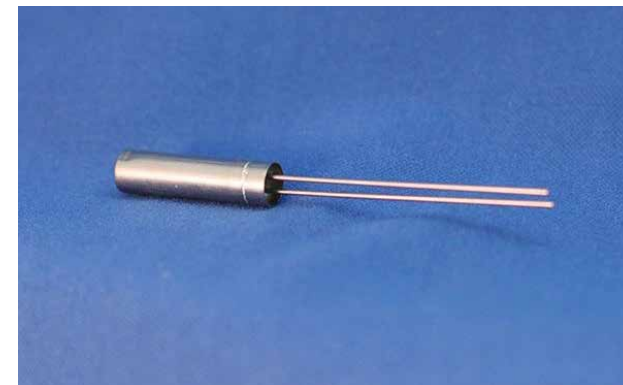


Рисунок 34 - Пример детали, полученной лазерной пайкой разных металлов



Рисунок 35 – Пример изделия, полученного с помощью лазерной плакировки

Аддитивное производство

Процессы аддитивного производства позволяют строить трёхмерные компоненты посредством использования лазера для нагрева и плавки порошкового материала.

Первоначально разработанное в качестве способа быстрой проверки концепции на ранних этапах проектирования аддитивное производство в настоящее время стало использоваться для изготовления полностью функциональных изделий или их частей.

Аддитивные производственные процессы в настоящее время разработаны для совершенно новой индустрии – создания 3D объектов путем добавления отдельных слоёв материала. В этих процессах используются все новинки и усовершенствования в сфере увеличения вычислительной мощности, управления технологическими процессами и перемещениями, необходимыми для нанесения разнообразных материалов на высокой скорости. В рамках аддитивного производства можно выделить два вида процессов, где используются лазеры компании IPG: лазерное напыление материалов и селективное лазерное плавление. Другая лазерная технология, стереолитография, использует лазеры с более короткой длиной волны для локальной фотополимеризации жидкости. Термин «3D печать» изначально относился к другому безлазерному процессу, известному как послойное наложение расплавленной полимерной нити на неподвижное основание, но этот термин недавно стал популярным и сейчас иногда используется во всех отраслях промышленности.

Селективное лазерное плавление или близкое к нему лазерное спекание порошковых компонентов отличается только тем, что при селективном лазерном плавлении порошок плавится, а при лазерном спекании он сплавляется. Следовательно, при селективном лазерном плавлении получают плотные металлические детали с улучшенными механическими свойствами. Одномодовые волоконные лазеры в диапазоне от нескольких сотен ватт до 1 кВт используются в этом процессе.

Ещё одна технология, использующая волоконные лазеры, – это лазерное напыление материалов. В этом случае порошок подается соосно через сопло в сфокусированное

лазерное пятно, посредством чего могут производиться полностью сплошные функциональные металлические компоненты.

Еще одна технология, использующая волоконные лазеры, – это лазерное напыление материалов. В этом случае порошок подается соосно через сопло в сфокусированное лазерное пятно, посредством чего могут производиться полностью сплошные функциональные металлические компоненты.

Так как материалы и процессы совершенствуются, аддитивные производственные процессы могут создавать полностью функциональные формы или сократить время процесса формирования функциональных компонентов непосредственно из данных САПР. Из-за того, что создание больших компонентов по аддитивной технологии может занять несколько часов, стабильность и надежность волоконных лазеров была основным фактором развития этих лазерных технологий. Подобным образом, наличие волоконных лазеров компании IPG с выходной мощностью в несколько тысяч ватт крайне важно для разработки систем и процессов с более быстрым созданием покрытия или оседанием порошка. Уже принято считать, что использование высокомоощных волоконных лазеров приводит к сокращению затрат и времени производства больших и нестандартных компонентов.

Типы материалов:

- полимеры;
- хром-кобальт-молибденовые сплавы;
- алюминий;
- титановые сплавы;
- нержавеющая сталь;
- инструментальная сталь.

Аддитивные технологии являются важнейшей частью цикла разработки продуктов в автомобильной, аэрокосмической индустриях, а также в сфере производства потребительских товаров. Эти технологии важны



Рисунок 36 – Пример детали, полученной с помощью лазерных аддитивных технологий

для быстрого прототипирования сложных компонентов, а также для производства таких индивидуализированных изделий, как зубные или ортопедические имплантанты. Несмотря на то, что технология существует не первый день, недавние наработки в сфере металлических порошков и улучшенная эффективность систем позволили произвести полноценные пресс-формы и компоненты с использованием избирательного лазерного спекания (SLS). Волоконные лазеры сыграли важную роль в процессе внедрения данной технологии, благодаря экономичности и простоте использования. Одномодовые и многомодовые лазеры серии YLR мощностью до 2кВт имеют широкое применение в различных областях, где применяются аддитивные технологии.

Из-за того, что создание больших компонентов с помощью аддитивных технологий может занимать довольно продолжительное время, стабильность и надёжность волоконных лазеров явилась основным фактором развития этих лазерных техник. Волоконные лазеры с выходной мощностью в несколько тысяч ватт позволяют разрабатывать более высокопроизводительные технологические процессы.

Удаление покрытий

Лазерные технологии позволяют получить ценный инструмент в ряде процессов на производстве, которые требуют удаление части поверхности или её модификации. Они позволяют удалять покрытия, начиная от лакокрасочных и до алюминиево-кремниевого.

Лазеры предоставляют бюджетную и контролируруемую альтернативу традиционным процессам.

Лазерное удаление покрытия – это процесс, посредством которого лазерная энергия фокусируется и поглощается поверхностью, что приводит к испарению покрытия с минимальным воздействием на нижележащую подложку. Эта технология может применяться для различных материалов, включая металлы, пластики, композиты и стекло. Несколько новых сортов пресс-закаленной стали (PHS) были разработаны для подготовленной к окраске структуре (BIW) в автомобильной промышленности, которые сочетают желаемые свойства прочности и пластичности. До сборки компонентов из пресс-закаленной стали PHS, алюминиево-кремниевое покрытие следует удалить, чтобы обеспечить лучшую сварку поверхности. Высокомощные импульсные лазеры компании IPG успешно удаляют покрытие, не влияя на механические свойства сварных соединений.

Удаление покрытия также используется в тяжелых отраслях промышленности, таких как аэрокосмическая и судостроение, что является экономически эффективной и экологически чистой альтернативой традиционным абразивным и химическим процессам. Поскольку лазеры в процессе удаления покрытия работают, не касаясь поверхности, то не нужна дополнительная среда, которая удаляет отходы.

Интегрированные системы для абляции, включая систему удаления микронных материалов, ручное лазерное устройство очистки и аблятивную систему удаления покрытия.

Типы применения:

- снятие краски;
- удаление загрязнений;
- очистка фасадов зданий;
- подготовка поверхности;
- очистка формы;
- реставрация художественных изделий.



Рисунок 37 – Пример удаления покрытия с изделия с помощью лазера

Лазерная термическая обработка

Лазеры являются превосходным источником тепла для упрочнения металлических компонентов для предотвращения износа поверхности при сохранении физико-химических свойств основного материала, исключая необходимость использования закалочной среды.

Лазерная термообработка, также известная как лазерное поверхностное упрочнение, представляет собой процесс модификации поверхности, используемый для увеличения износостойкости или продления срока службы элементов, начиная от бытовых приборов до деталей для сборки автомобилей и оборудования для тяжелой промышленности, и транспорта. Лазерное упрочнение (закалка) чаще всего используется для стальных и чугунных материалов. Лазеры преобразуют целевые области на металлических деталях путем контролируемого местного нагрева при сохранении металлургических свойств основного материала.

Поглощение зависит от типа материала, содержания углерода, микроструктуры, состояния поверхности, размера и геометрии и, как правило, ограничивается поверхностным слоем. Глубина упрочнения (закалки) от 0,2–3,0 мм. Нагретую область можно контролировать с помощью оптики, формирующей луч. В результате лазерная термообработка обеспечивает производителям точный и контролируемый процесс изменения их оснастки и оборудования для повышения износостойкости.

Типичные скорости процесса находятся в диапазоне от 10 до 150 см в минуту. Глубина упрочнения (закалки) будет уменьшаться по мере увеличения скорости. Достижимая глубина будет зависеть от состава сплава. Типичная ширина значений прохода, достигаемая с помощью легкодоступного оборудования, составляет от 0,5 мм до 5 см. Большие или меньшие значения возможны при использовании специализированных установок.

Выбор режима работы лазера для упрочнения (закалки) во многом зависит от самой детали. Для упрочнения (закалки) требуются непрерывные лазеры, например, для закалки токопроводящей дорожки (печатного проводника) во многих промышленных инструментах. Для некоторых сложных деталей требуются импульсные

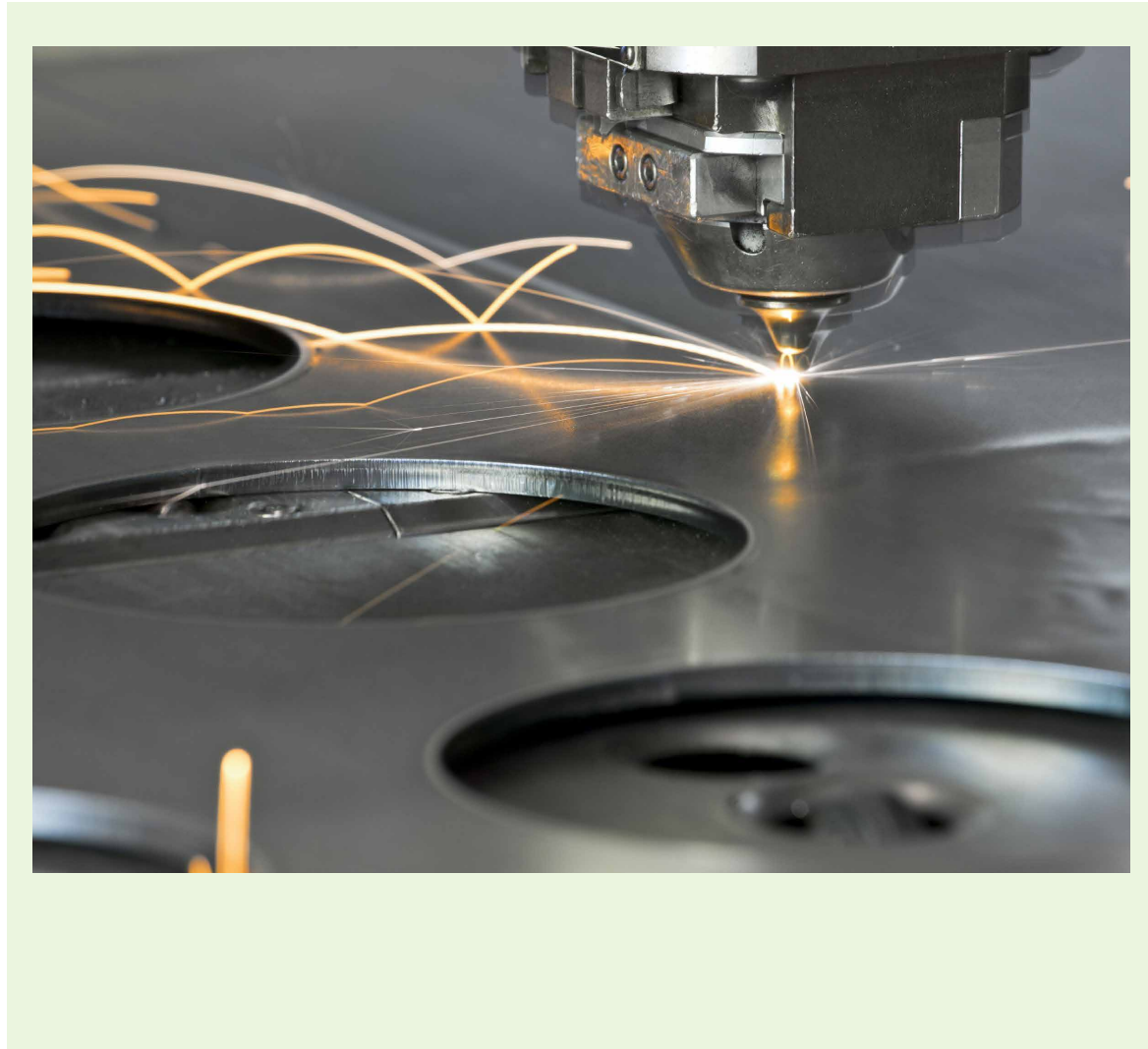
лазеры, например, YLPN Mega импульсные иттербиевые импульсные лазеры.

Большинство лазеров с ближней ИК областью спектра можно использовать для упрочнения (заковки) различных металлов и сплавов, а основным параметром для отверждения материала до желаемой глубины и твердости является мощность лазера. Материалы на основе железа легко поглощают длину волны 1 микрон, исключая необходимость предварительного нанесения покрытий на абсорбирующие части, как при использовании CO₂ лазеров.

Диодные лазеры и высокомощные волоконные лазеры компании IPG используются для тепловой обработки. Их преимущества заключаются в более высокой выходной мощности, гибкости доставки луча по оптоволокну, компактном размере, высокой надежности за счет горячего резервирования и более высокой степени преобразования электрической энергии в оптическую, превышающие эти показатели у диодных лазеров киловаттного класса.



Рисунок 38 – Поперечное сечение вала, упрочнённого (закалённого) с помощью лазера



МИКРООБРАБОТКА

Лазерная микрообработка, являясь быстрорастущим рынком, вытесняет традиционные процессы и открывает новые области применения, революционизировала микроэлектронику, производство медицинских приборов, полупроводниковую и другие отрасли промышленности.

Лазеры позволяют создавать микродетали с высокой степенью точности и повторяемости практически в любом материале.

Микрообрезка

При резке всегда необходимо учитывать точность реза, минимизацию отходов материала в процессе резания, а также сведение к минимуму повреждения из-за нагрева; и все это при достижении максимально возможной скорости обработки.

«Высокое качество реза» – это субъективный параметр, который зависит от назначения и определяет выбор лазерной системы и конфигурацию системы микрообработки.

Для некоторых областей применения «фиксированный луч» используется с деталью, перемещающейся под лучом, чтобы создать желаемый образец обработки. Этапы обработки деталей могут иметь различные оси движения, согласованные с пуском лазера для выполнения очень сложных моделей обработки.

Стандартная точность позиционирования составляет более 3 микрон при рабочем ходе 150 мм, скорость линейного перемещения составляет 1 м/с.

Гальванометрические сканеры обычно используются в тех областях, в которых важнее скорость перемещения луча по детали. Обычно точность позиционирования, достигнутая за счет гальванометров, не очень высока, как при линейном перемещении, однако преимущества использования гальванометров и их контроллера продолжают повышать точность и повторяемость. Обычные скорости перемещения луча составляют 1–5 м/с с короткими остановками. Квазинепрерывные и сверхбыстрые пико- и фемтосекундные волоконные лазеры производства IPG обычно используются в обработке миниатюрных

деталей. Полная система может быть оборудована рабочими станциями НИОКР для двойного лазера и полуавтоматической и полностью автоматической системами.

Резка сапфиров

Резка сапфиров используется в области производства мобильных устройств. Обычно сапфиры используются для крышек дисплея, линз фотокамер и датчиков открытия затвора. Толщина сапфира составляет от 1,1 мм до 3,0 мм.

Лазеры: квазинепрерывные одномодовые волоконные лазеры, многомодовые квазинепрерывные лазеры, 10-пикосекундные импульсные лазеры.

Резка металла

Резка металлических пластин, включая медные, медно-вольфрамовые, молибденовые и из нержавеющей стали, осуществляется на пластины и тонкие пленки с помощью технологии IPG. Доставка луча можно оптимизировать от стандартно сфокусированных лучей до лучей особой формы с целью обеспечения оптимизации пропускной способности и качества. Далее показана резка медных пластин для разделения пластин на кристаллы.

Лазеры: квазинепрерывные одномодовые волоконные лазеры, многомодовые квазинепрерывные лазеры, 10-пикосекундные импульсные лазеры.



Рисунок 39 – Пример детали, полученной с помощью лазерной микрообработкой

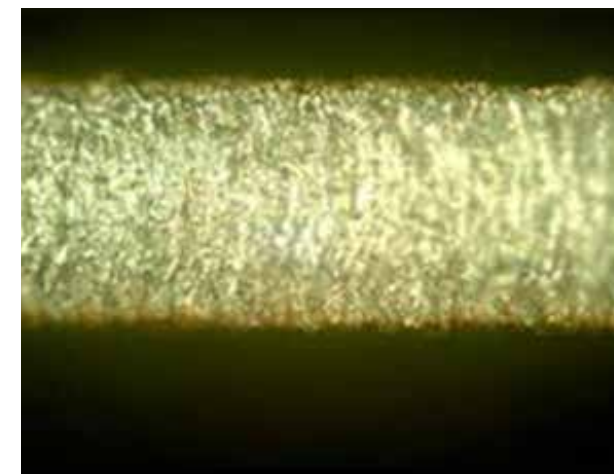


Рисунок 40 – Срез части металлической детали, полученный лазерной микрообработкой

Резка керамики

Лазеры позволяют производить резку абляционных материалов и термическую резку керамики и скрайбирование материалов толщиной до 1 мм с субмикронной точностью размещения и размеров.

Лазеры: квазинепрерывные одномодовые волоконные лазеры, многомодовые квазинепрерывные лазеры, 10-пикосекундные импульсные лазеры.

Резка полимера

Позволяет разделять и формировать рельеф полимерных плёнок. От типа лазера зависит тип обработки: сканирование, обработка с большим видимым полем для сокращения теплового воздействия на чувствительные материалы при увеличении пропускной способности и качества.

Лазеры: 10-пикосекундные импульсные лазеры, наносекундные импульсные лазеры с зеленым излучением, ультрафиолетовые наносекундные импульсные лазеры.

Резка силикона

Существуют технологии резки пластин малого диаметра из больших пластин, а также резки силиконовых плёнок (шаблонов) или сокращения габаритов фотоэлементов. Толщина материала до 1 мм.

Лазеры: квазинепрерывные одномодовые волоконные лазеры, многомодовые квазинепрерывные лазеры, 10-пикосекундные импульсные лазеры.

Резка алмазов

Лазеры: ультрафиолетовые наносекундные импульсные лазеры, наносекундные импульсные лазеры с зеленым излучением, 150-пикосекундные импульсные лазеры, 10-пикосекундные импульсные лазеры.

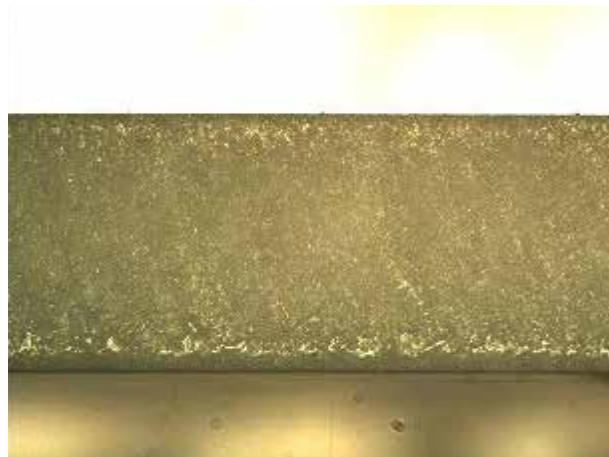


Рисунок 41 – Прецизионные канавки в керамическом цилиндре, полученные с помощью лазерной микрообработки

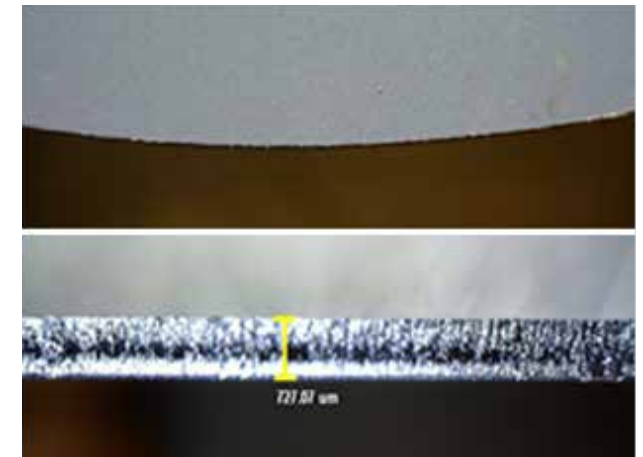


Рисунок 43 – Показано сокращение габаритных размеров (700 мкм), вид сверху и сбоку.

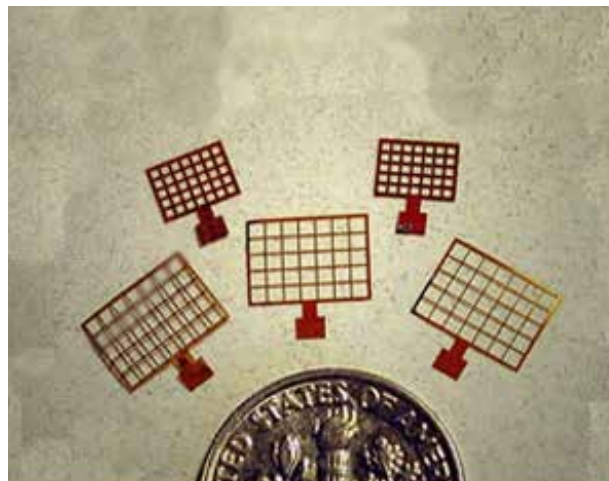


Рисунок 42 – Пример деталей, полученных с помощью лазерной резки полимеров

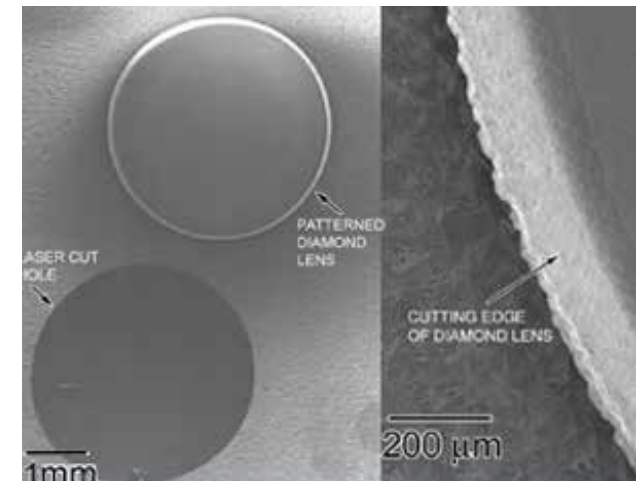


Рисунок 44 – Пример отверстия, полученного с помощью лазерной резки алмазов

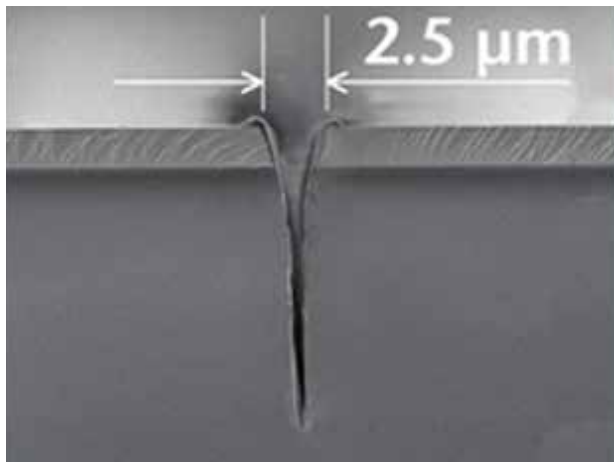


Рисунок 45 – Пример лазерного скрайбирования сапфиров

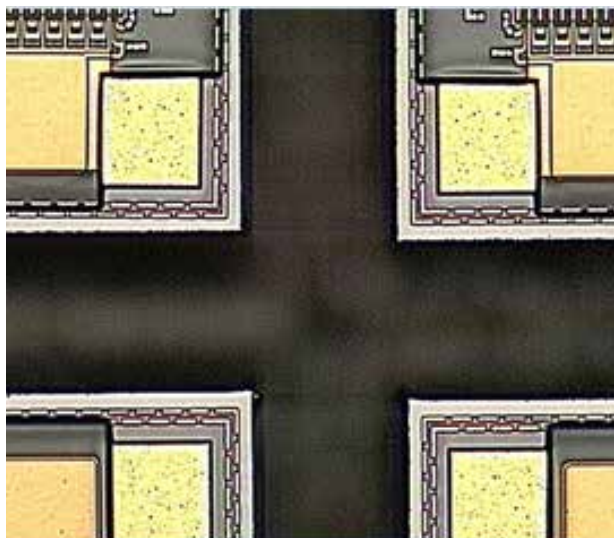


Рисунок 46 – Пример лазерного скрайбирования пластин из арсенида галлия и фосфата галлия

Скрайбирование

Скрайбирование – это термин, используемый в полупроводниковой промышленности для описания технологии разделения полупроводниковых пластин на кристаллы, посредством которой пластина или подложка разрезается только частично за один цикл обработки, а затем делится на кристаллы за счет разлома по намеченной линии. В этом отношении, скрайбирование отличается от раскроя, где пластина полностью разрезается на одной стадии процесса. Скрайбирование применяется во многих полупроводниковых технологиях, в частности используется при производстве светодиодов и в других отраслях промышленности, которые характеризуются относительно небольшими пластинами, имеющими узкие надрезы для разделения на кристаллы.

Более плотный, узкий и чистый надрез за счёт применения УФ лазеров для расщепления пластин на кристаллы, а также их большее количество, за счёт меньшего количества поврежденных кристаллов, чем при обычных способах скрайбирования пилой.

С помощью систем скрайбирования возможно реализовать высокоточные производственные процессы, доказывающие результаты оптимизации и предлагающие пользователям гибкость настройки параметров процесса в ответ на конкретные потребности использования.

Системы, используемые в лазерном скрайбировании, можно настроить на ручную или полностью автоматическую подачу и обработку с большей пропускной способностью без участия человека.

Скрайбирование сапфиров

Скрайбирование сапфиров выполняется для пластин в производстве светодиодов. Лазеры обеспечивают более рациональное использование мощности, сокращают тепловое воздействие, что увеличивает производительность. Данный пример показывает скрайбирование сапфира для светодиодного прибора с шириной реза 2,5 мкм.

Лазеры: 10-пикосекундные лазеры.

Скрайбирование пластин из арсенида галлия и фосфата галлия

Пропускная способность (производительность) одной системы лазерного скрайбирования может заменить и превысить возможности нескольких вместе взятых традиционных инструментов. Показано скрайбирование фосфата галлия со скоростью 300 мм/с на глубину 30 мкм, что считается достаточно глубоким, чтобы разделить пластины примерно до толщины 250 мкм. Скорость скрайбирования УФ лазерами пластин составляет до 6 минут по сравнению с 2 часами работы алмазным режущим инструментом.

Лазеры: 10-пикосекундные импульсные лазеры, наносекундные импульсные лазеры с зеленым излучением, ультрафиолетовые наносекундные импульсные лазеры.

Скрайбирование карбида кремния

Технологии скрайбирования включают в себя разрушение сложных форм, собственных внутренних материалов заготовки, которое ведет к образованию малого количества отходов и очень легкому разлому, и отделению кристаллов. На рисунке показано скрайбирование карбида кремния толщиной 100 мкм со скоростью 300 мм/с.

Лазеры: 10-пикосекундные импульсные лазеры, наносекундные импульсные лазеры с зеленым излучением, ультрафиолетовые наносекундные импульсные лазеры.



Рисунок 47 – Пример лазерного скрайбирования пластин карбида кремния

Трёхмерная микрообработка

УФ-лазеры являются оптимальными для задачи структурирования большой области и 3D-микрообработки. Усовершенствованные технологии обеспечивают однородное и четко очерченное распределение плотности потока энергии.

Это приводит к точному контролю объема материала, удаляемого за один импульс, обеспечивая обработку с высоким разрешением и отличное качество поверхности.

Микрообработка полимеров

Гальванометрическое сканирование в сочетании с высокоскоростным импульсным лазером позволяет получать геометрию сложных форм. Микрожидкостный канал, на рисунке 48, обрабатывается как поликарбонатный компонент.

Лазеры: ультрафиолетовые наносекундные импульсные лазеры, наносекундные импульсные лазеры с зеленым излучением, 10-пикосекундные импульсные лазеры.

Микрофрезерование керамики

Лазеры позволяют выполнять тепловое микрофрезерование керамики, резку и скрайбирование материалов толщиной до 1 мм с субмикронной точностью размещения и размеров. На рисунке 49 представлены протенциозные канавки в керамическом цилиндре.

Лазеры: ультрафиолетовые наносекундные импульсные лазеры, наносекундные импульсные лазеры с зеленым излучением, 150-пикосекундные импульсные лазеры, 10-пикосекундные импульсные лазеры.

Микрофрезерование металла

Лазеры: ультрафиолетовые наносекундные импульсные лазеры, наносекундные импульсные лазеры с зеленым излучением, 150-пикосекундные импульсные лазеры, 10-пикосекундные импульсные лазеры.

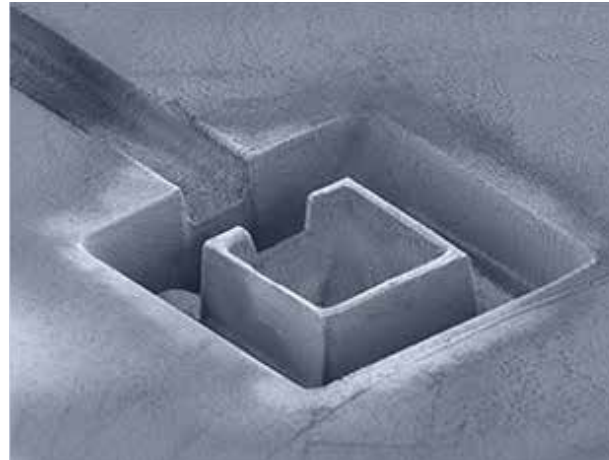


Рисунок 48 – Пример лазерной микрообработки полимеров

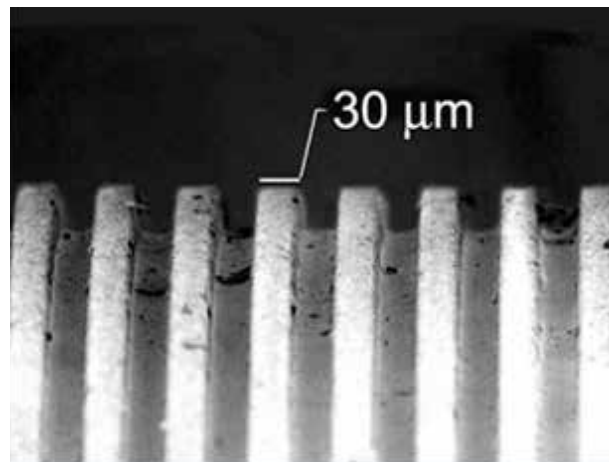


Рисунок 49 – Пример лазерной микрообработки керамики

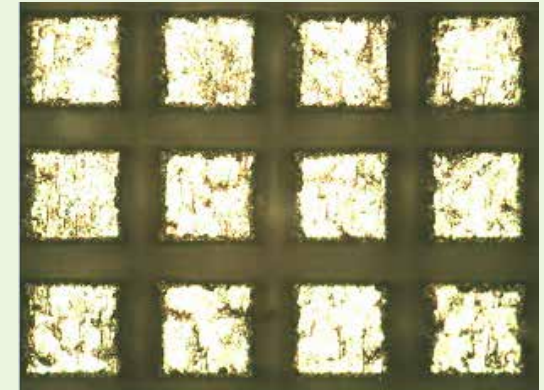


Рисунок 50 – Пример обработки канавок ~ 30 мкм шириной и глубиной на молибденовой пластине с помощью пикосекундного лазера

Сверление микроотверстий

Микросверлением получают как сквозные, так и несквозные отверстия, кроме того, оно также может потребоваться для формирования вертикальных боковых стенок или конусообразных боковых стенок, в зависимости от применения. Диаметры отверстий можно уменьшить до 2 микрон без нарушения субмикронной точности размещения. Скорость сверления составляет до 1000 отверстий в секунду.

У каждого материала есть свои особенности: от тепловой аффектации и до лазерной связи. Подобные устройства могут использоваться в качестве высокоскоростных и полностью автоматизированных производственных решений.

Существует повышенный интерес к лазерному изготовлению изменяемой формы и малого размера (<100 микрон) с регулируемой или нулевой конусностью, на большом разнообразии материалов, и охватывающих широкий диапазон толщин до нескольких миллиметров. Требования к качеству и производительности продолжают ужесточаться, выдвигаются более жесткие допуски к характеристикам размеров и позиционирования.

Сверление керамики

Высокоскоростные системы сверления керамики оптимизированы для сверления микроотверстий (обычно диаметр <100 мкм) в керамических материалах из оксида алюминия, нитрида алюминия и аналогичных для упаковки электронных устройств и использования в интер-позерах.

Сверлильная головка по керамике подходит для суб-100 мкм отверстий, которые трудно воплотить с помощью традиционных CO₂-лазеров, при обеспечении минимального размера отверстия вплоть до <10 микрон и максимальной скорости сверления >1000 отверстий в секунду.

Лазеры: квазинепрерывные одномодовые волоконные лазеры, многомодовые квазинепрерывные лазеры, 10-пикосекундные импульсные лазеры.

Сверление металла

Слепые и сквозные отверстия в нержавеющей стали, латуни, молибдене и сплавах.

Кольцеобразные и непостоянные формы.

Уменьшение выходных отверстий до диаметра 5 микрон.

Лазеры: квазинепрерывные одномодовые волоконные лазеры, многомодовые квазинепрерывные лазеры, 10-пикосекундные импульсные лазеры.

Сверление термоотверждающегося пластика

Сквозные и слепые отверстия в термоотверждающемся пластике. Минимальный топологический диаметр отверстия до 2 микрон. Обычно используется УФ обработка с большим полем обзора подачи луча для сверления

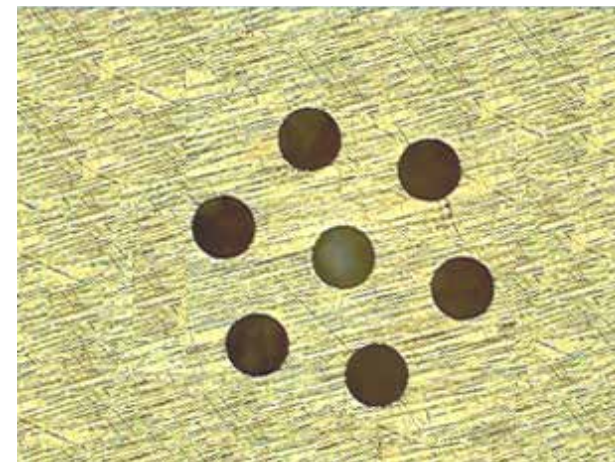


Рисунок 52 – Семь отверстий 100 мкм в молибдене толщиной 100 мкм

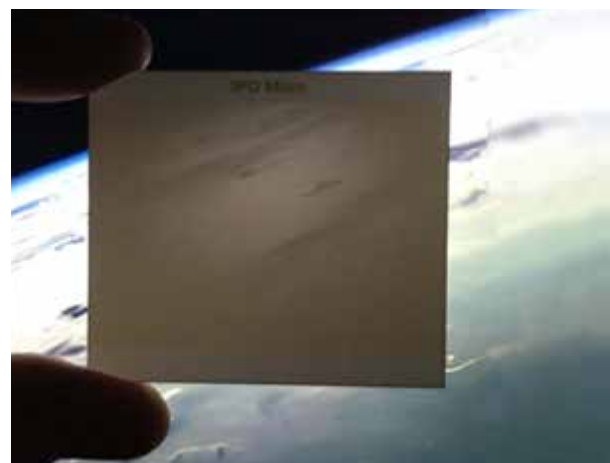


Рисунок 51 – Показаны 20 000 отверстий, просверленных в пластине толщиной 380 мкм.

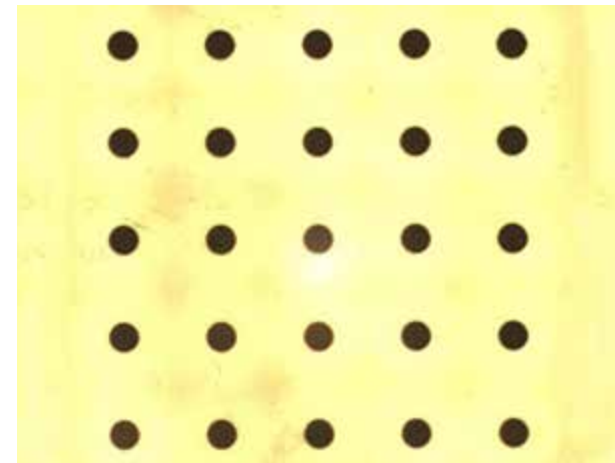


Рисунок 53 – Решётка из отверстий диаметром 30 мкм на 1 мм сополимере акрилонитрила бутадиена и стирола.

множества отверстий для обеспечения высокой производительности.

Лазеры: 10-пикосекундные импульсные лазеры, наносекундные импульсные лазеры с зеленым излучением, ультрафиолетовые наносекундные импульсные лазеры.

Сверление зондовой платы из нитрида кремния

Лазерное изготовление отверстий с переменной формой и малого размера (<100 микрон), с регулируемой или нулевой конусностью, на разнообразных материалах. Лазерные системы микрообработки используют технологии подачи луча для высокоскоростного сверления, при которой создаются микроотверстия менее чем за 1 секунду в материале толщиной менее 250 мкм и менее чем за 2 секунды в нитриде кремния толщиной 380 мкм.

Лазеры: 10-пикосекундные лазеры, ультрафиолетовые наносекундные импульсные лазеры.

Сверление стекла

Лазеры с высокой скоростью повторения и короткой длиной волны идеальны для микросверления стекла. Эти лазеры в сочетании с претенциозным микрообработывающим комплексом обеспечивают правильную круглую форму отверстий, минимальную конусность, отсутствие трещин и минимальное раздробление.

Лазеры: квазинепрерывные одномодовые волоконные лазеры, многомодовые квазинепрерывные лазеры, 10-пикосекундные импульсные лазеры.

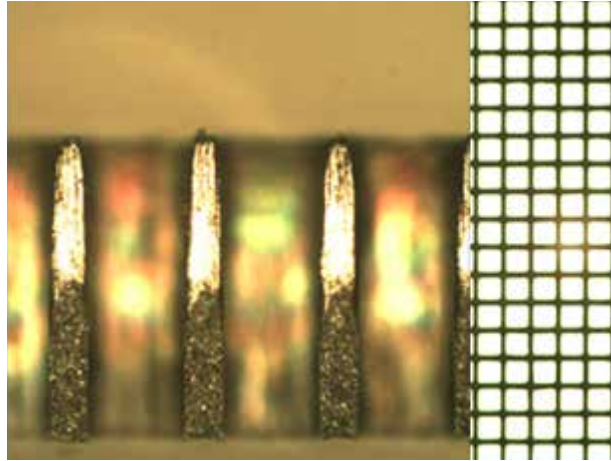


Рисунок 54 – Отверстия размером 65 x 65 мкм с боковыми стенками 10 мкм в нитриде кремния толщиной 200 мкм

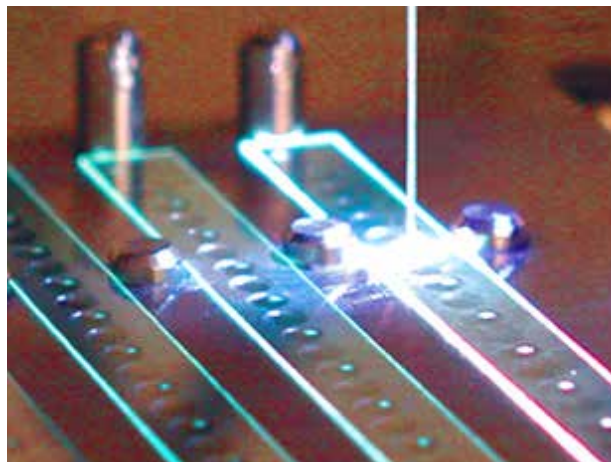


Рисунок 55 - Сверление отверстий диаметром 1 мкм в стекле



Обработка глухих отверстий

Глухие отверстия представляют собой выемки различной формы и глубины, которые не проходят деталь насквозь. Важность обработки глухих отверстий возрастает с ростом популярности технологий трёхмерной упаковки из полупроводниковых материалов.

Лазеры обеспечивают обработку глухих отверстий высокой степени точности с высоким аспектовым отношением, высоким качеством кромок, контролируемой глубиной, а также создание конических и квадратных отверстий с высокой повторяемостью.

Лазерные технологии позволяют обрабатывать отверстия с большим относительным удлинением конуса в материалах толщиной до 2 мм.

Это обеспечивает обработку с чрезвычайно точным контролем глубины, поскольку процесс удаления импульс за импульсом, слой за слоем может использоваться для обработки детали с субмикронным контролем глубины.

Сверление глухих отверстий в стекле

Из-за склонности к растрескиванию при тепловой нагрузке и прозрачности стекло является трудным материалом для лазерного высокоточного сверления. Большое количество глухих и сквозных отверстий микронного масштаба может обрабатываться с субмикронным контролем глубины в материалах с толщиной до 500 мкм.

Лазеры: 10-пикосекундные лазеры, ультрафиолетовые наносекундные импульсные лазеры.

Сверление глухих отверстий в полимере

Массивы простых или сложных топологических элементов шаблона можно спроецировать на мишень, а затем экспонировать для получения трехмерных топологических элементов разных размеров и форм. Некоторые топологические элементы могут экспонироваться одним импульсом, а поля экспонирования могут двигаться поэтапно по детали для получения более кучного расположения.

Лазеры: 10-пикосекундные импульсные лазеры, наносекундные импульсные лазеры с зеленым излучением, ультрафиолетовые наносекундные импульсные лазеры.

Структурирование высокоплотных топографических элементов с помощью УФ абляционных систем

Когда большое количество материала нужно обработать УФ излучением, общая мощность лазера является ключевым фактором пропускной способности (производительности). Этот процесс эффективен, если луч лазера имеет форму, позволяющую охватить массив большой площади. Минимальный размер топографического элемента в данном процессе может составлять 2 мкм.

Лазеры: 10-пикосекундные импульсные лазеры, наносекундные импульсные лазеры с зеленым излучением, ультрафиолетовые наносекундные импульсные лазеры.

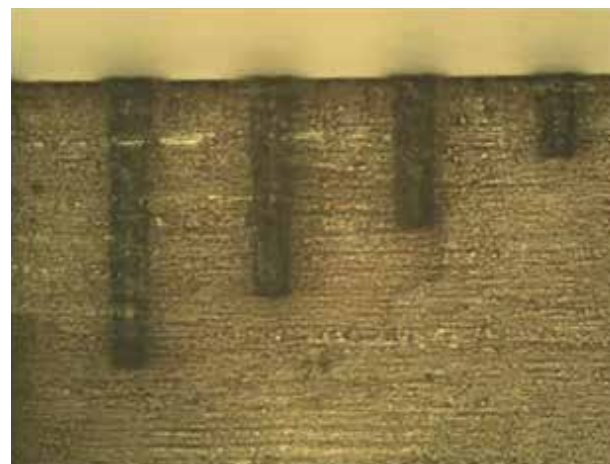


Рисунок 56 – Глухие отверстия диаметром 50 мкм и глубиной 400 мкм в стекле

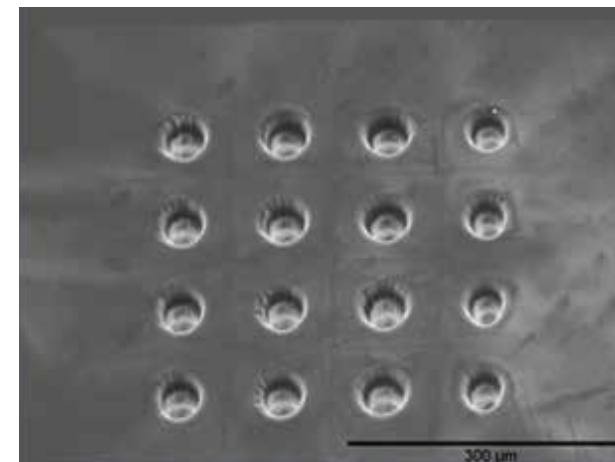


Рисунок 57 – Отверстия диаметром 25 микрон в диске из нейлона

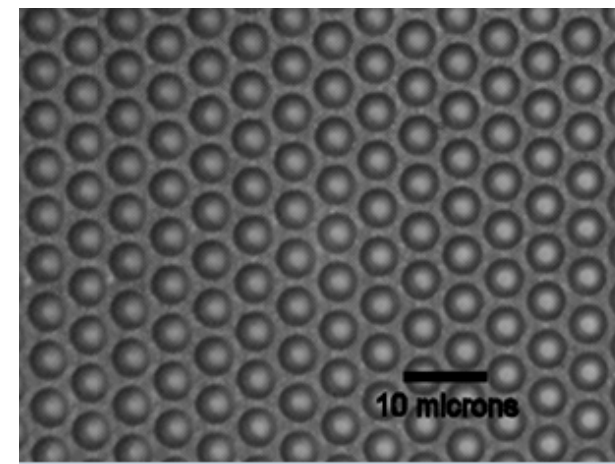


Рисунок 58 – Решётка из параллельных больших отверстий в полимере. На площади 50 x 50 мкм расположено 400 отверстий диаметром 4 мкм

Избирательное удаление материала

При компоновке и избирательном удалении материала используется абляция для очистки и удаления одного типа материала из основного материала/материала подложки, например, избирательное удаление или компоновка металлических плёнок или удаление изоляции, или очередного покрытия из электронных компонентов. За счёт точного контроля энергии импульса, частоты повторения импульсов и удельной энергии достигается точное значение и становится возможным избежать причинения вреда основному материалу.

В микроэлектронике, медицинских приборах, автомобильной и аэрокосмической промышленности актуальной задачей является создание проводящих дорожек микросхем или снятие изоляции. Тонкие покрытия материалов, как правило полимеры, используются для обеспечения электрической изоляции, и защиты от окружающей среды в передовых технологических устройствах. Эти защитные материалы, как правило, наносятся равномерным слоем. Недавно стали доступны лазерные системы, предлагающие быстрые, эффективные и высокоточные альтернативные методы, обеспечивающие высокое качество очистки.

Аналогичным образом, тонкие покрытия проводящих материалов, как правило золота, сплавов и пленки из оксида индия и олова, используются для обеспечения электрических соединений. Выборочное удаление этих пленок для обеспечения электрической изоляции или определения конкретной траектории схемы является обычным для производственного процесса. Лазерные системы – это не только быстрый и эффективный метод производства, они обеспечивают гибкость в изменении формы шаблона и схемотехники с помощью простого внесения изменений в программу обработки, устраняя необходимость в медленных и дорогостоящих изменениях маски и набора инструментов.

В обоих случаях избежание каких-либо повреждений подложки при удалении верхнего материала является критическим требованием. Поскольку материалы ведут себя по-разному при различных параметрах лазера (длина волны, энергия импульса, длительность импульса,

плотности энергии, частота повторения и т.д.), требуется тщательный выбор типа лазера и условий эксплуатации.

Удаление полимерной оплётки с жилы провода

Маломощные лазерные источники используются для выборочного удаления покрытия с массивного материала. В тех случаях, когда покрытие охлаждается путем абляции при более низкой плотности, чем у основного материала, повреждение массивного материала исключается.

Лазеры: ультрафиолетовые наносекундные импульсные лазеры, наносекундные импульсные лазеры с зеленым излучением, 10-пикосекундные импульсные лазеры.

Удаление парилена с печатных плат

Пареленовое и другие конформные покрытия легко удаляются с электронных плат и других компонентов без повреждения тонких прокладок проводов или топографических элементов. Доступна настройка более чем на 5 мкм как с ручной, так и с полностью автоматизированной загрузкой.

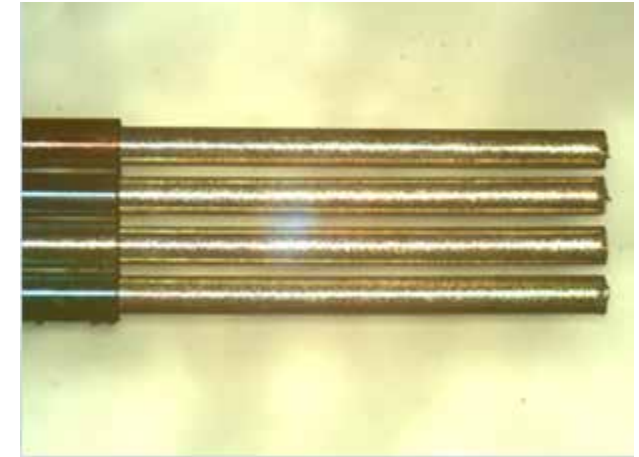


Рисунок 59 – Пример удаления полимерной оплётки с жилы провода

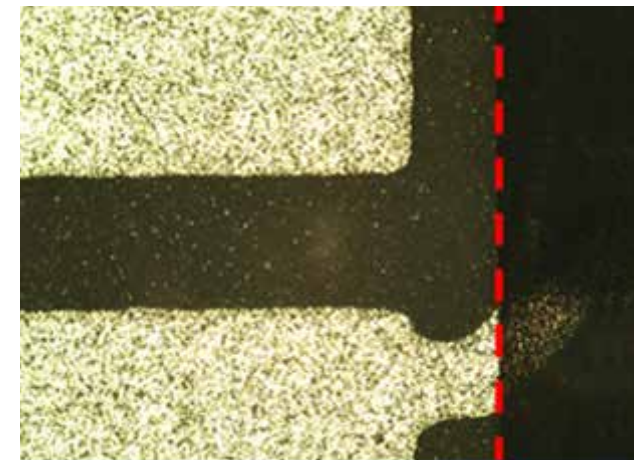


Рисунок 60 – Пример удаления парилена с печатных плат. показано слева от пунктирной линии

Удаление теллурида кадмия из стеклянной панели солнечной батареи

Выборочное удаление материала в сочетании с технологией процесса лазерной литографии слоев с многослойной подложки, например, тонкой пленки из теллурида кадмия со стекла/солнечных панелей с подложками из оксида индия и олова.

Точная настройка гравировки до <20 мкм

Лазеры: 150-пикосекундные лазеры.

Нанесение золота на полиэтиленовый терефталат

Высококачественное лазерное прямое нанесение толстого золотого проводника толщиной 50 нм по указанным траекториям на подложку из полиэтиленового терефталата. Длина импульса и плотность энергии, оптимизированные для удаления металла без повреждения нижележащего полимера.

Лазеры: ультрафиолетовые наносекундные импульсные лазеры, 1 мкм наносекундные импульсные лазеры с зеленым излучением, 10-пикосекундные импульсные лазеры.

Плётка для нанесения металлов на стекло

Нанесение тонких пленок.

Минимальные размеры топографических элементов обычно составляют 2 микрона.

Лазеры: ультрафиолетовые наносекундные импульсные лазеры, 1 мкм наносекундные импульсные лазеры, 150-пикосекундные импульсные лазеры.

Нанесение оксида индия и олова

Максимальные размеры топографических элементов обычно составляют <10 микрон.

Лазеры: ультрафиолетовые наносекундные импульсные лазеры, 1 мкм наносекундные импульсные лазеры, 150-пикосекундные импульсные лазеры.

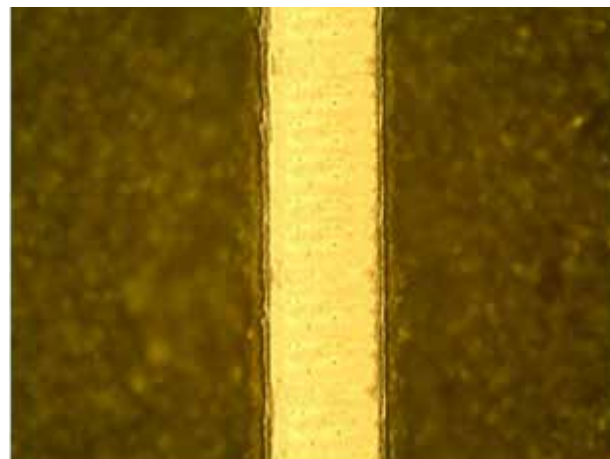


Рисунок 61 – Пример удаления теллурида кадмия из стеклянной панели солнечной батареи

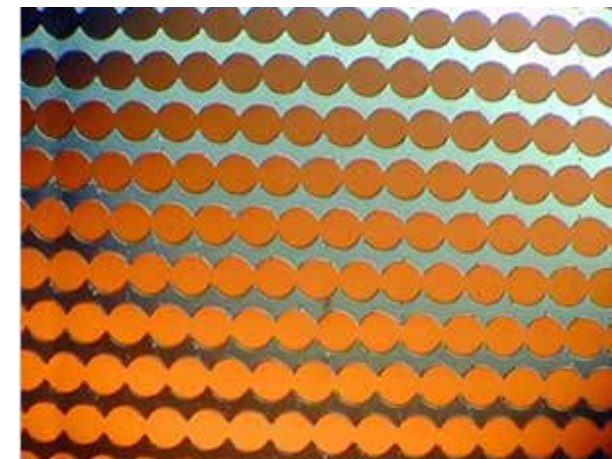


Рисунок 63 - Пример лазерного нанесения золота на стекло

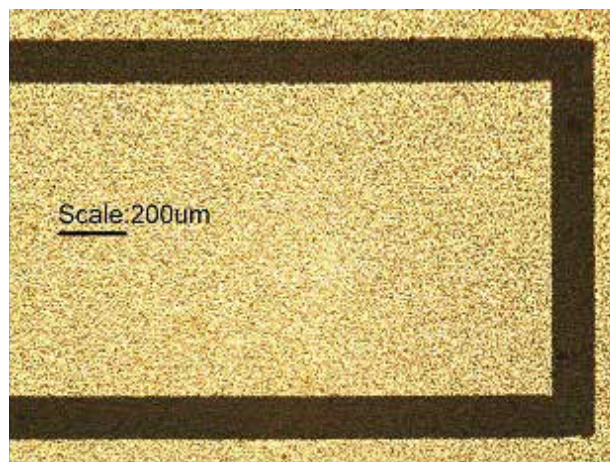


Рисунок 62 – Пример нанесения золота на полиэтиленовый терефталат

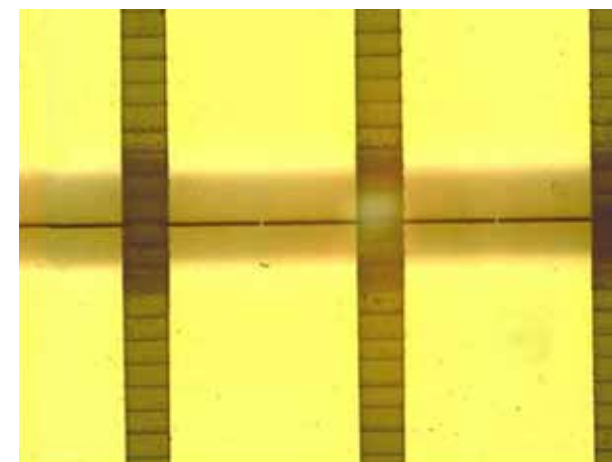


Рисунок 64 – Пример лазерного нанесения металлической плёнки и оксида индия и олова на подложку из полиэтиленового терефталата: ширина линии <7 микрон

Лазерная обратная литография

Позволяет избирательно удалять один материал из другого с использованием процесса, в ходе которого лазер проходит через прозрачный основной материал и соединяется со вторым материалом.

Широко используется в производстве LED для разделения полупроводника GaN от полупроводниковой пластины, а также применяется в других процессах, где задействованы прозрачные и поглощающие плёнки, таких как разделение полимеров из стекла в функции Flex Display и технологии AMOLED.

Основная концепция обратной лазерной литографии – различие в поглощении излучения лазера слоем, обычно располагаемом на подложке, слой за слоем. Для светодиодов, например, эпитаксиальный слой нитрида галлия имеет ширину запрещенной зоны около 3,3 эВ, тогда как энергия запрещенной зоны сапфира – 9,9 эВ. Коротковолновое излучение лазера проходит через сапфир, разрушает (оплавляет) связи при вступлении в контакт с нитридом галлия, посредством чего высвобождаются два материала. Для получения обратной литографии важны качество и контроль луча. В компании IPG инновационные методы доставки луча используются для достижения высокой скорости, высокопродуктивных производственных процессов.

Поднятие лазера

Лазерный источник света проецируется через прозрачный материал и поглощается в смежном материале на задней стороне, например, нитрид галлия на сапфире. Изолированная плазма на связях ведет к отрыву или разделению материалов.

Лазерная обратная литография полимера на стекле

Нанесение структур электронных устройств на основе 3D пластин и панелей с активно-матричным дисплеем на полимерной основе, например, AMOLED, для смартфонов (полимерная объединительная плата).

Лазеры: УФ наносекундные импульсные лазеры.

Монолитная улучшенная обратная лазерная литография на нитриде галлия

Фотоны с более короткой длиной волны/высокоэнергетичные фотоны лучше поглощаются, что ведет к небольшой оптической глубине проникновения в определенных материалах, например, нитриде галлия.

УФ-импульсы можно использовать для разделения тонкопленочных полупроводниковых материалов, если требуется минимальная глубина проникновения тепла.

Лазеры: УФ наносекундные импульсные лазеры.

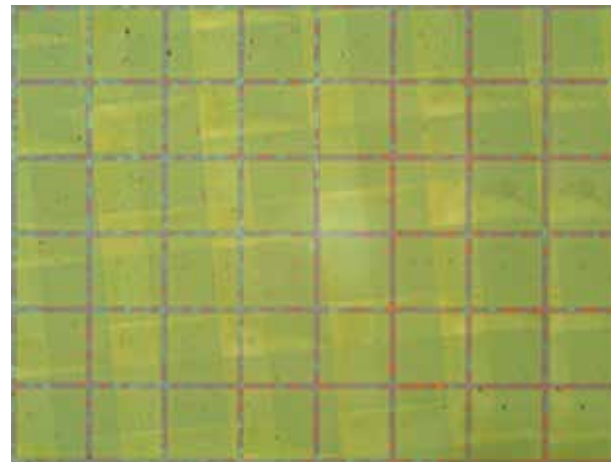


Рисунок 65 – Пример экспонированной пластины после облучения лазером

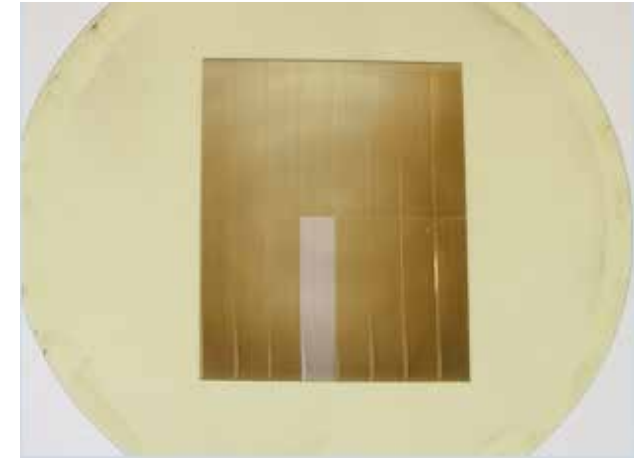


Рисунок 66 – Пример разделения полиамида толщиной 16 мкм с помощью сканирующего лазера

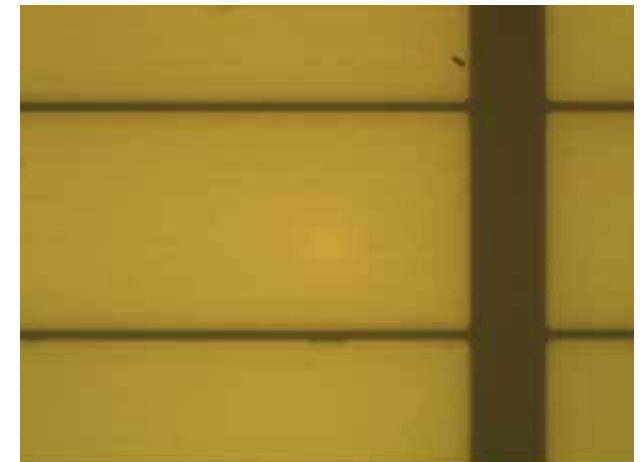


Рисунок 67 – Пример обратной лазерной литографии

Отжиг

Лазерное облучение при контролируемых условиях позволяет увеличить или снизить шероховатость поверхности материала, произвести нагрев локальной или крупной области поверхности, или активацию легирующей примесью. Особое применение включает добавление кремния и карбида кремния, отжиг кремния и формирование резистивной связи.

Два важных свойства лазеров в области нагрева:

- количество приложенной энергии можно очень точно контролировать, и, как правило, она ограничивается ближе к поверхности материала;
- точка нанесения этого тепла может быть определена до нескольких микрон.

Ультрамелкая маркировка

Используется в производстве для идентификации, нумерации деталей и присвоения порядковых номеров, начиная с буквенно-цифрового знака и до штрих кодов и матриц данных / матричных кодов.

При выборе лазерной маркировки учитывается длина волн лазера и импульсные характеристики для подходящего контраста при применении и предварительная механическая обработка.

Новые материалы и требования к ультрамелкой маркировке заменяют традиционные лазерные технологии, где проблемы на микроуровне заключаются в качестве маркировки и высоком уровне читаемости.

Технология ультрамелкой маркировки хорошо подходит для обработки трудно маркируемых материалов, включая полимеры, прозрачные материалы, например, стекло и алмаз, а также полупроводниковые материалы, в том

числе кремний и эпоксидный формовочный компаунд. На эти материалы можно очень качественно наносить маркировку с кодами данных размером до 50 × 50 мкм.

Современные рабочие станции лазерной обработки доступны в конфигурациях, оптимизированных для высокоточной микромаркировки. Для производственных операций, где маркировка или сериализация требуется одновременно, как еще один шаг микрообработки, двоякая лазерная система оснащается модулем лазерной маркировки или другим лазером, и комбинации сканирования могут быть весьма эффективными решениями.

Микродвухмерный матричный штрихкод или 2D-код

Двухмерные матричные штрихкоды или 2D-коды размером 300 × 300 мкм можно наносить на разнообразные материалы быстро с помощью передовой технологии лазерной обработки. Это обеспечивает идентификацию и сериализацию для оперативного контроля и защиты от подделок.

Лазеры: ультрафиолетовые наносекундные импульсные лазеры, наносекундные импульсные лазеры с зеленым излучением, 150-пикосекундные импульсные лазеры, 10-пикосекундные импульсные лазеры.



Рисунок 68 – Пример микродвухмерный матричный штрихкод или 2D-код

Сериализация кристаллов (штамп с серией)

Оборудование, совмещенное с системой обработки пластин и автоматизированной системой технического видения, может использоваться для штампа сериализации в полупроводниковой промышленности. УФ лазеры с короткой продолжительностью импульса совместимы с большинством материалов, используемых для упаковки полупроводников.

Маркировка стекла

Высокоточная маркировка стекла с шириной линии <10 мкм генерируются с минимальными отходами. Оптические системы с высоким разрешением и процесс с использованием коротких длин волн не создают микротрещины при нанесении постоянного знака, который не поддается химической очистке.

Лазеры: УФ наносекундные импульсные лазеры, 10-пикосекундные лазеры.

Маркировка стекла под поверхность

Возможность безосколочной маркировки стекла – подповерхностная маркировка в очень прозрачных материалах устраняет опасения образования осколков.

Лазеры: ультрафиолетовые наносекундные импульсные лазеры, наносекундные импульсные лазеры с зеленым излучением, 10-пикосекундные импульсные лазеры.

Высокоскоростная маркировка

Прямой способ нанесения надписи работает на высокой скорости сканирования на больших площадях для различных прозрачных материалов. Система использует сканирование гальванометром или модуль лазерной маркировки для процесса лазерной маркировки с высокой пропускной способностью.

Лазеры: ультрафиолетовые наносекундные импульсные лазеры, наносекундные импульсные лазеры с зеленым излучением, 150-пикосекундные импульсные лазеры, 10-пикосекундные импульсные лазеры.

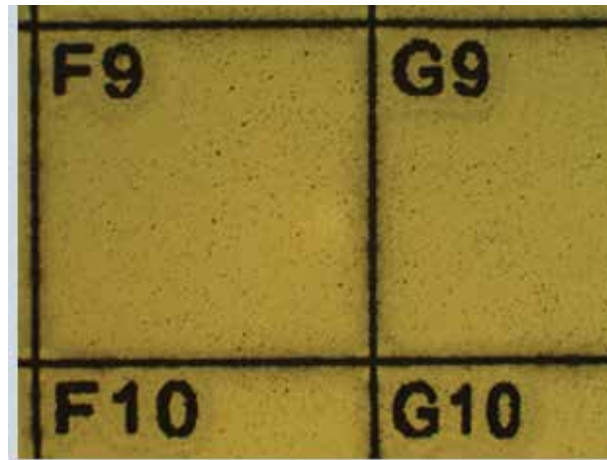


Рисунок 69 – Пример буквенно-цифровой маркировки в виде штампа размером 1 мм x 1 мм на пластине

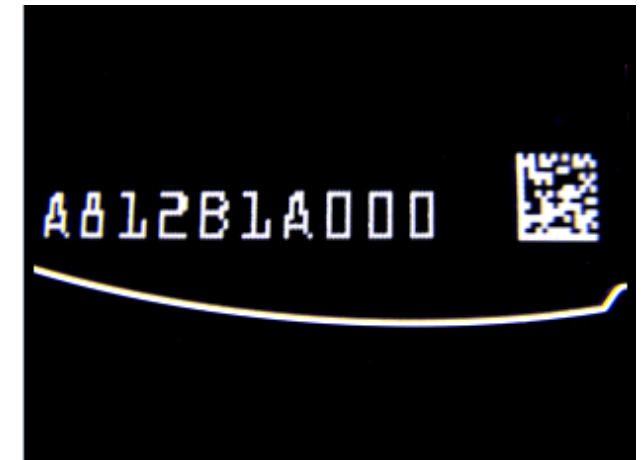


Рисунок 71 – Пример маркировки стекла под поверхность

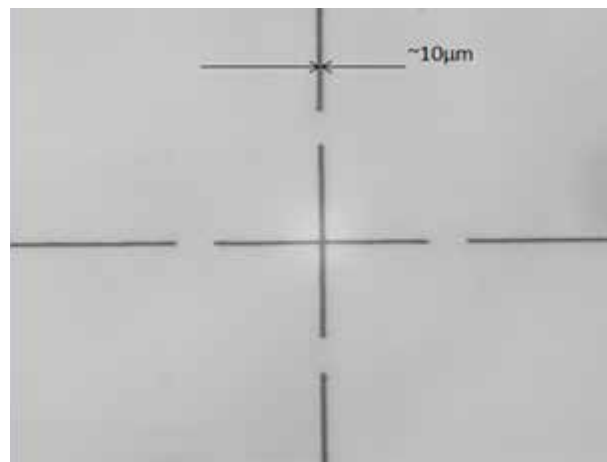


Рисунок 70 – Пример маркировки стекла настройки визира на ультрачистом стекле

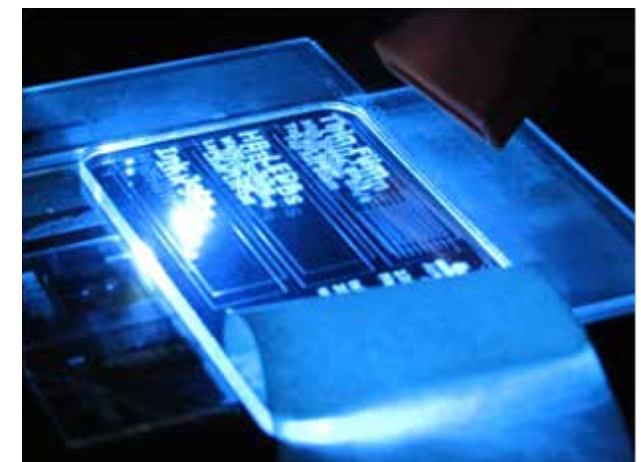


Рисунок 72 – Пример высокоскоростной маркировки

ИННОВАЦИИ И НАУКА

С момента своего появления лазеры использовались в самых передовых исследованиях в области физики, астрономии, химии, биологии, машиностроения и многих других. Ученые и инженеры постоянно нуждаются в новых возможностях своих лазерных генераторов, что, в свою очередь, мотивирует разработчиков лазеров разрабатывать новые, более продвинутое технологии: от экспериментов с гребенкой частоты до вызывания молнии в грозовых тучах, от геномики до генерирования сигналов терагерцевого диапазона.

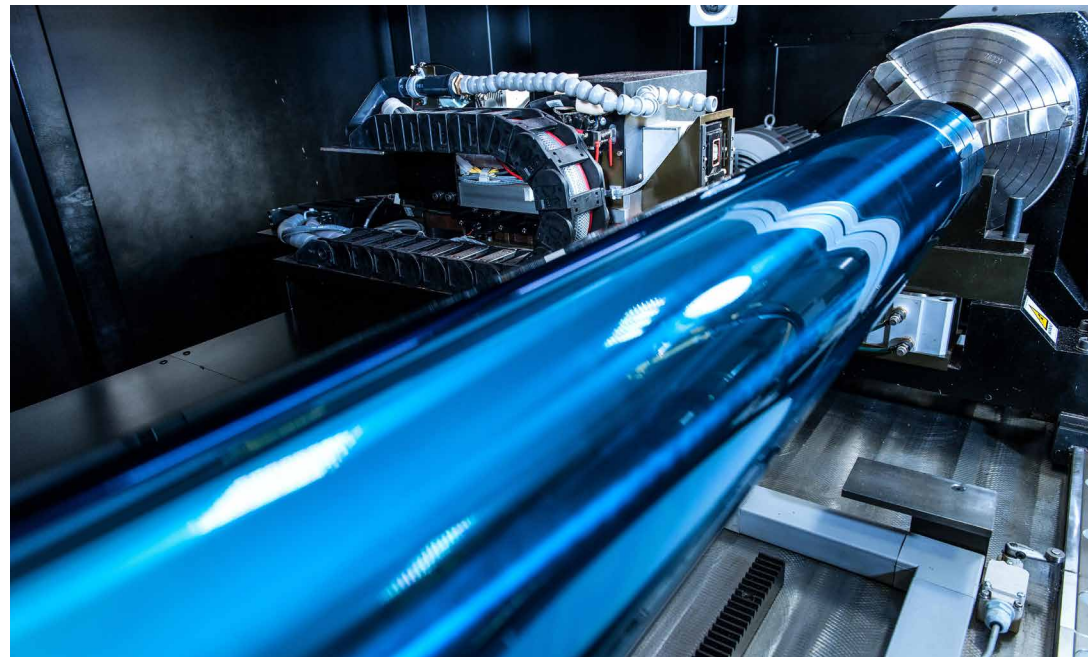
В атомной оптике учёные используют линейно-поляризованные волоконные лазеры с целью захвата атомов для многих исследований – от интерферометрии до определения характеристик материала.

Только исследователи могут визуализировать надмолекулярные структуры за пределами барьера дифракции, используя флуоресцентный белок. Этим инноваторам необходимы волоконные лазеры со значительной энергией импульса, чтобы получить разрешение порядка десятков нанометров. Лазеры непрерывного излучения и рамановские лазеры видимого спектра обеспечивают интенсивный свет на дискретной длине волны в спектральном диапазоне, критичном для уменьшения возбуждения флуоресцентных маркеров, в особенности наиболее используемых флуоресцентных белков. Они также характеризуются достаточно высокой частотой повторения импульсов для быстрого получения изображения.

Мощные зелёные лазеры непрерывного излучения и импульсные лазеры используются при визуальном изучении потоков и характеристики частиц, а также фотоакустического измерения гемоглобина.

Одночастотные лазеры непрерывного излучения и волоконные усилители применяются в экспериментах с интерферометрией/голографией и в спектроскопии, где требуются высокомоощные источники с узкой линией генерации.

Твердотельные волоконные лазеры с рамановской накачкой средней инфракрасной (ИК) области спектра предназначены для множества научных и инновационных применений, таких как многофотонное изображение биомолекул, сверхбыстрая нестационарная абсорбционная спектроскопия методом накачки-зондирования, дистанционное изучение химических веществ, изображение передатчика подсвета с помощью ЛИДАР и средней ИК области спектра. Многие исследователи применяют надежные диодные лазеры и волоконные лазеры непрерывного излучения для накачки собственных оптических приборов, включая лазеры на красителях и оптические параметрические генераторы средней ИК области спектра.



Применение:

- формирование изображений;
- спектроскопия;
- голография;
- ультразвук;
- оптическая накачка;
- дистанционное измерение;
- интерферометрия;
- оптический захват;
- изготовление и разделение пластин на кристаллы;
- локальный отжиг деталей и активация легирующей примеси.

Лазерные шоу и проекторы

Цифровое кино с использованием лазера и лазерные шоу представляют собой наиболее развивающиеся сегменты в киноиндустрии. Чистота цвета и высокая степень яркости обуславливают выбор лазера в качестве технологии освещения в активно развивающейся киноиндустрии с использованием проекторов.

Волоконные лазеры, работающие в видимом спектре, представляют ещё одно преимущество, заключающееся в высокой надёжности, компактности и эффективности источников света, способных обеспечить световое шоу или использоваться в киноиндустрии. Компактность и энергоэффективность лазеров, а также отсутствие нужды в использовании мощных систем охлаждения системы позволяют кинотеатрам и арт-площадкам использовать их вместо устаревших проекторных ламп.

Благодаря впечатляющей чистоте цвета и повышенной яркости излучения лазеры стали излюбленной технологией активно растущей индустрии проекционных экранов. Цифровая кинематография с лазерной проекцией и лазерные шоу – это самые стремительно растущие сегменты индустрии воспроизведения изображений. Волоконные лазеры, работающие в видимом спектре, представляют и еще одно преимущество, заключающееся в высокой надежности, компактности и эффективности источников света, способных обеспечить световое шоу или использоваться в киноиндустрии.

Применение:

- световые шоу;
- спортивные события;
- цифровое кино;
- художественные инсталляции;
- развлечения;
- лазерные указки.

Оптическая накачка

Лазеры с оптической накачкой используются в исследовательских лабораториях различных университетов при разработке собственных лазерных систем и оптических приборов.

Диодные лазеры используются для накачки твердотельных лазеров с диодной накачкой и волоконных лазеров. Они обладают высокой яркостью, очень надежны в работе, компактны.

Эрбиевые непрерывные волоконные лазеры бывают с разной длиной волны от 266 нм до 2 микрон. Они обладают прекрасным пучком с интенсивностью, распределенной по закону Гаусса, и с разной поляризацией и шириной излучения.

Рамановские лазеры ИК-диапазона 1480 нм используются для накачки волоконных лазеров на иттрий-алюминиевом гранате.

Линейно поляризованный низкочастотный рассеивающий эрбиевый непрерывный волоконный лазер на алюмо-иттриевом гранате и YAR-LP-SF усилители используются для накачки оптического параметрического генератора среднего ИК-диапазона с постоянной длиной волны.

Оптические параметрические генераторы среднего ИК-диапазона в диапазоне 1,9–3,5 мкм и 3,5–6 мкм используются для накачки выходных переменных сигналов до 5–20 мкм.

Спектроскопия

Лазерная спектроскопия представляет собой широкую область исследования взаимодействия вещества и лазера, как функции лазерных волн. Она используется для исследования свойств вещества во всех масштабах – от элементарных частиц до звёзд.

Рамановская спектроскопия

Эффект Рамана – это неэластичный, легкий процесс рассеяния, он обеспечивает неразрушающую технологию, посредством которой колебательная «идентифицирующая область» молекулы анализируемого вещества измеряется после фотовозбуждения и последующего изменения ее молекулярной поляризации. С момента открытия в 1928 году данный эффект стал известен благодаря своей научной универсальности и стал применяться в искусстве, археологии, бионауках, аналитической химии, физике твердого тела, жидкостей и их взаимодействии, наноматериалах, фазовых переходах, фармацевтических исследованиях, а также в судебно-медицинской экспертизе. Так, например, спектроскопия комбинационного рассеяния света получила широкое применение в качестве инструмента в биофармацевтической промышленности, где требуется идентификация фармацевтических ингредиентов, в полупроводниковой промышленности, где может быть исследована чистота пластин, а также в судебно-медицинской экспертизе, где требуется отслеживать появление взрывчатых веществ.

В спектроскопии комбинационного рассеяния света лазеры с различной длиной волны могут использоваться для инициирования процесса возбуждения конкретной молекулы. Несмотря на то, что подавляющее большинство этих возбужденных молекул рассеивают свет как упругое рэлеевское рассеяние той же энергии, немногие из них будут испытывать изменения возбуждения в процессе релаксации до основного состояния электрона, что приводит к сдвигу энергии рассеянного света, который характеризуется энергией в режиме возбуждения. Это и есть эффект Рамана. Подобные лазеры могут также использоваться для возбуждения плазмонных субстратов, как это происходит при резонансной спектроскопии усиленного поверхностью комбинационного рассеяния.

Рамановская спектроскопия широко используется в разных отраслях промышленности: производство полупроводников и суперпроводников, фармацевтика, медицина, оптические связи, научные исследования.

Спектроскопия накачки-зондирования

В рамках лабораторных исследований обычная лазерная спектроскопия изучает ультраскоростную шкалу времени на основе концепции спектроскопии накачки-зондирования. Для этой общей установки необходимы два отдельных оптических импульса (фемтосекундные или пикосекундные): один для возбуждения («накачки») анализируемого образца, а другой для исследования («зонд») девозбуждения образца, оба из которых должны перекрываются как в пространстве, так и времени. Оптическая линия задержки может эффективно удлинить путь приема пробного импульса и, таким образом, временно задерживает его относительно импульса накачки. По мере того как импульс накачки возбуждает молекулу, все более и более задержанный зондирующий импульс контролирует распад возбужденных электронов. Исходя из этого можно получить и проанализировать динамические данные со временем разрешения для изучаемого образца. Спектроскопия накачки-зондирования используется в основном для мониторинга восстановления насыщающихся поглотителей после фотоиндуцированного возбуждения, для измерения временных характеристик химических реакций или передачи энергии

от одной молекулы к другой. Эта информация используется для дальнейшего проектирования, синтеза и внедрения изученных материалов, включая, фотокатализ, фотоэлектрохимию и фотоэлектрические устройства. Основные отрасли промышленности и научных исследований, использующие технологию спектроскопии накачки-зондирования, – это аэрокосмическая промышленность, металлургия, биофотоника, микроскопия и медицина. Эффективность материалов для фотоэлементов можно определить с помощью методов спектроскопии накачки-зондирования посредством мониторинга динамики восстановления критического возбуждения или посредством эффективности восстановления носителя заряда в разбавленных водой материалах для производства чистого водородного топлива.

Изучение динамики посредством спектроскопии накачки-зондирования позволяет более глубоко и фундаментально понять свойства конкретного материала. Для динамических измерений она дает информацию, которая дополняет стационарные измерения.

Внутрирезонаторная спектроскопия

Внутрирезонаторная спектроскопия резонаторов – это оптический способ, посредством которого можно выполнить измерение оптического возбуждения материалов, которое как рассеивает, так и поглощает свет. Данный метод нашел широкое применение в исследовании газовой фазы, где газообразные образцы могут измеряться в частях на триллион. В подобном эксперименте лазер используется для освещения оптического резонатора; при резонансе с определенным типом колебания, интенсивность лазерного излучения накапливается из-за конструктивной интерференции. Как только лазер отключается, измеряется интенсивность экспоненциального затухания света. Это применение особенно полезно для экологического мониторинга, контроля выбросов и биофармацевтических процессов из-за присущей методу высокой чувствительности. Измерение выбросов парниковых газов помогло обеспечить создание все более и более «зеленых» технологий, начиная от автомобильных двигателей до установок для химической переработки.

Внутрирезонаторная спектроскопия основывается на поглощении света газообразными материалами, что обусловлено тем, что различные газы поглощаются на разных длинах волн.

Микроскопия

При лазерной микроскопии лазер используется в качестве источника освещения. В некоторых случаях детекторы измеряют передаваемый, отражаемый или рассеянный свет при падающих волнах.

Лазерная микроскопия широко применяется в разработке материалов и исследований их свойств, в биологии и биомедицинской научно-клинической области.

К подобным лазерам относятся линейно поляризованные непрерывные волоконные лазеры с диодной накачкой, композиционные волоконные лазеры видимой области спектра и ближним ИК, а также гибридные лазеры со средним диапазоном ИК. Эти уникальные системы обеспечивают интенсивное излучение и длины волн



в ближнем спектре ИК, среднем ИК диапазоне и видимом спектре, необходимые для возбуждения флуоресцентных маркеров, в частности, флуоресцентных белков. Мультифотонная микроскопия используется преимущественно в области биологических наук и тканевой инженерии. Дальнепольная визуализация быстро развивается, и микроскописты требуют все больше новых возможностей от лазеров. Ученые уже визуализируют живые нетронутые организмы за пределами дифракционного барьера, используя флуоресцентные белки.



Рисунок 73 – Пример использования лазерной микроскопии в научных исследованиях

Голография и интерферометрия

В интерферометрии структура изображения, возникающая в результате наложения двух электромагнитных волн, измеряется для получения полезной информации о самих волнах или о материале, с которым одна или обе волны взаимодействуют.

Голография – это способ трехмерного изображения, создаваемого и реконструируемого с помощью лазерного источника света. Этот способ особенно популярен в самых разных применениях и на многих рынках, от интерференционной микроскопии до обработки и хранения данных, от антиконтрафактных мер при валютных операциях, использовании кредитных карт, а также документов, удостоверяющих личность, до проекционных дисплеев в искусстве и индустрии развлечений. Обычное двумерное изображение может также использовать усовершенствованные голографические технологии

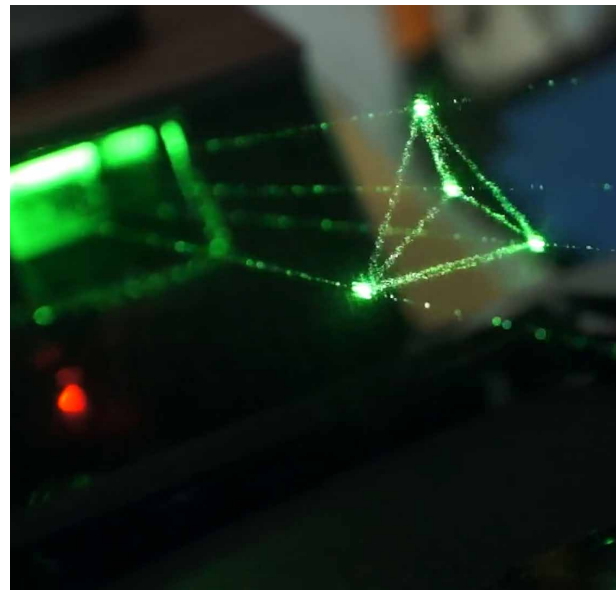


Рисунок 74 – Пример лазерной голографии

для визуализации проектов зданий или проектов продуктов.

Для голографии требуется один источник света в качестве освещения объекта и его отпечатка.

Одночастотные лазеры обеспечивают большую мощность в компактном исполнении по сравнению с обычными твердотельными или ионно-газовыми источниками. Более высокая мощность лазеров быстрее генерирует голографические изображения.

Интерферометрия

От спектроскопии до дистанционного зондирования, от механической и оптической метрологии до океанографии и сейсмологии, от квантовой механики до ядерной физики и физики плазмы – диапазон применения интерферометрии чрезвычайно широк. Эти лазеры бывают двух категорий:

- одночастотные непрерывные лазеры, например, волоконные лазеры с выходной мощностью 1–100 Вт и гибридные лазеры с накачкой волокна;
- ультрабыстродействующие лазеры с синхронизацией мод со средним диапазоном ИК.

Одним из примеров выполнения интерференционного измерения, используемого для неразрушающего определения характеристик материалов в машиностроении, является ширография, метод похожий на голографическую интерферометрию. Он широко используется в производстве и разработках аэрокосмической промышленности, лопастях несущего винта, автомобилестроении, а также при создании и тестировании материалов. Ширография использует когерентный свет для неразрушающего контроля материалов, измерения деформации и анализа вибрации. Преимуществом ширографии является высокая пропускная площадь, бесконтактный опрос, относительная чувствительность к экологическим нарушениям и хорошие характеристики соплоустов.

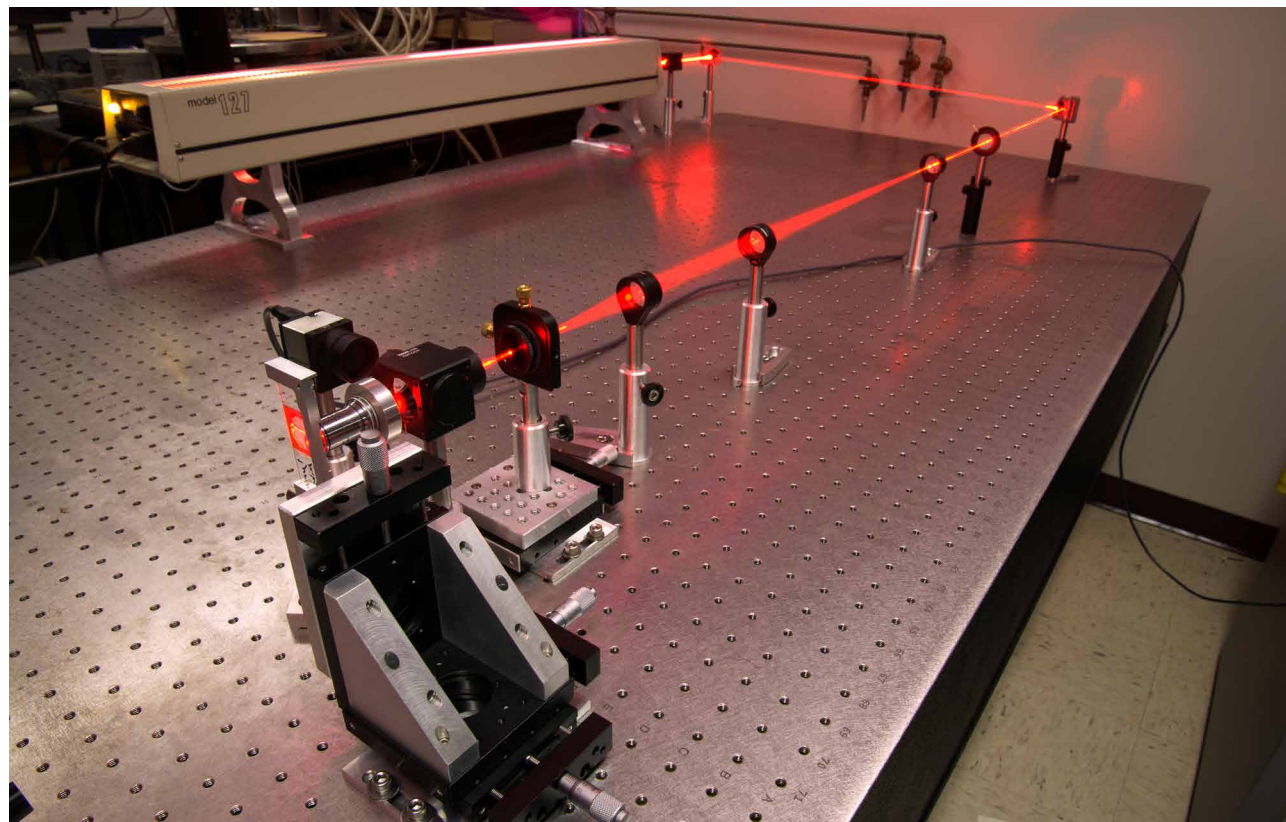
Оптические пинцеты

Оптический пинцет формируется, когда один лазерный пучок узко направлен на место с расходимостью, близкой к расходимости, определяемой дифракционным пределом. Лазер вызывает колебания диполей в диэлектрических частицах, а взаимодействие этих диполей с неоднородным электрическим полем лазера приводит к возникновению захватывающей градиентной силы.

Оптический захват или пинцет – это инструмент, посредством которого пиконьютоновое усилие оказывает давление на микроскопические диэлектрические объекты и используется для физического удержания, манипулирования и/или удаления определенного материала с помощью высокосфокусированных лазерных лучей. При основном применении в биорисследованиях диэлектрические объекты притягиваются сильным электрическим полем в область наиболее сильного электрического поля, которая расположена на перетяжке луча. Как только частица захвачена в перетяжку луча, ее можно переместить на другое место, как будто с помощью пинцета.

Благодаря способности перемещать частицы на субмикронные расстояния оптические захваты используются для изучения одиночных молекул, которые были притянуты к диэлектрической частице. Например, биологические исследования свойств ДНК и связанных с ними белков значительно продвинулись в связи с появлением оптического захвата и пинцета. Для зондирования исследуемых биомолекул многие из оптических захватов используют непрерывно-волновые лазеры с фундаментальной длиной волны 1 мкм. Эти одночастотные линейные поляризованные лазеры имеют важное значение, поскольку многие биологические образцы, водные по природе, имеют низкий коэффициент поглощения на этой длине волны, которая сводит к минимуму повреждения биологического материала. Используются также и другие длины волн, например, зеленая (0,51–0,55 мкм) и ближнее ИК (1,15–1,8 мкм).

Несмотря на то что TEM₀₀ пучок с интенсивностью, распределенной по закону Гаусса, является самым стандартным выбором, другие режимы лазерных лучей



также используются, включая пучок Эрмита-Гаусса, пучок Лаггера-Гаусса и пучок Бесселя. Лазеры хорошо подходят для применения в оптических ловушках из-за режима луча со значениями M² близкими к единице, а также высокой степени стабильности позиционирования.



Визуализация потока

Технология измерения скорости частиц по их образу (PIV) получила популярность в инжиниринге и в механике жидкостей и газов, начиная с авиакосмических аэродинамических труб и заканчивая образованием вихрей искусственного клапана сердца. Данная технология используется для измерения мгновенных скоростей и других свойств жидкостей и газов. Жидкость с маленькими прослеживаемыми частицами, следующими динамике жидкости и газа, подсвечивается лазером с целью сделать частицы заметными. Камера делает серию снимков, на основе которых рассчитывается скорость и направление частиц.

Способность визуализировать поток и улавливать мгновенные измерения скорости в жидкостях является отличительной чертой лазерной анемометрии по изображениям частиц (PIV). В обычной установке так называемые «трассирующие» частицы имплантируются в жидкость и (если частицы достаточно малы) затем будут испытывать обычную динамику потока. Способность отслеживать частицы с помощью лазерной подсветки позволяет отслеживать их с целью определения поля скоростей (т.е. скорость и направление) исследуемого потока. Лазерная анемометрия по изображениям частиц уникальна тем, что она может применяться очень широко: от макро- до микроскопических частиц. Таким образом, лазерная анемометрия по изображениям частиц может использоваться во многих отраслях промышленности, включая аэрокосмическую для изучения гидродинамики потока воздуха над крыльями самолетов; сельское хозяйство для исследования образцов семян рассредоточения цветущих растений; медицину для моделирования тока крови в сердечных клапанах, для создания конструкций имплантантов и медицинских приборов.

Как импульсные, так и непрерывные лазеры можно использовать для получения данных лазерной анемометрии по изображениям частиц. Наносекундные импульсные лазеры, синхронизированные с камерой, используются из-за их способности генерировать высокую мощность в видимом диапазоне с сопутствующими

короткими импульсами. В некоторых случаях выходная мощность лазера формируется в виде светового ножа с использованием цилиндрических линз. Большинство обычно используемых лазеров дают излучение на фундаментальной длине волны 1 микрон или ее зеленый свет второй гармоники. Зеленый импульсный лазер, такой как лазер GLPN, часто используется, т.к. виден невооруженным глазом и является экономически эффективным.

Обычная разрешающая способность по времени может варьироваться от сотен пикосекунд до миллисекунды, в зависимости от исследуемой системы и типа информации.

Благодаря возможности настройки длин волн излучения, продолжительности импульса или мощностей лазера для конкретной системы получается действительно уникальное решение для исследований с помощью лазерной анемометрии по изображениям частиц.



Рисунок 75 – Пример лазерной визуализации потока

Характеризация частиц

Применяется в медицинской диагностике и научных исследованиях. Позволяет выявлять нарушения в клетках, а также позволяет упростить анализ данных исследований или клинических испытаний.

В процессе «проточной цитометрии» используются источники света с различной длиной волн для подсвечивания клеток, помещённых в жидкость.

Характеризация частиц широко применяется в медицинской диагностике и научных исследованиях. Она используется для выявления нарушений в клетках, а также облегчает анализ данных при проведении исследований или клинических испытаний. Процесс, известный также как проточная цитометрия, использует источники света с различными длинами волн, чтобы облучать клетки, взвешенные в потоке жидкости. Облученные клетки позволяют ученым выделять биомаркеры для анализа, дифференцировать не отвечающие общим требованиям клеточные аномалии, подсчитывать или распределять клетки по специфическим характеристикам. Во всех этих приложениях проверка достоверности и совершенствование методов определения характеристик требуют надежные и адаптируемые источники света.

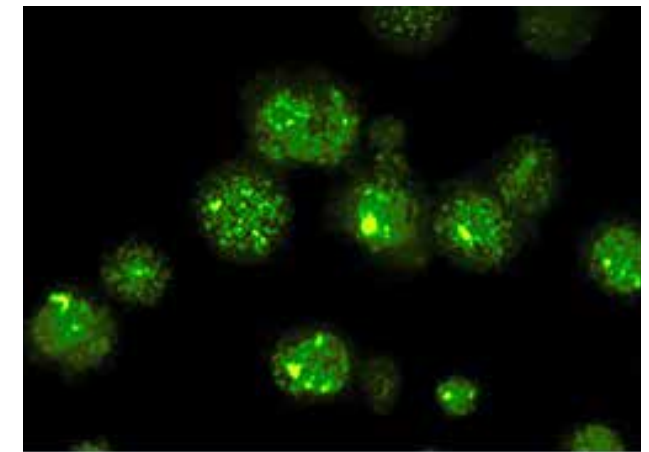


Рисунок 76 – Пример подсвечивания клеток

Дистанционное зондирование

Основное направление использования фотоники в навигации и геодезии – это космические технологии, навигация спутников и других космических носителей, геодезические измерения, осуществляемые с таких носителей. Важнейшей задачей для этих работ является точная временная привязка проводимых измерений и сеансов связи, требующая синхронизации шкал времени часов, используемых в системе навигации или геодезической съемки на земле и на космическом носителе.

В мировой и отечественной практике лазерные технологии синхронизации шкал времени с использованием среднеорбитальных и геостационарных спутников находятся сегодня в стадии разработки и космических экспериментов.

Впервые использование лазерных средств синхронизации на основе сравнения одно- и двухпутевых дальностей между наземным пунктом и космическим аппаратом было предложено для глобальной навигационной системы «Ураган» (современное название - ГЛОНАСС) в 1981 году. Первый успешный эксперимент по лазерной синхронизации разнесённых наземных пунктов (лунными лазерными локационными станциями во Франции и в США) был осуществлён Европейским космическим агентством в 1992-1993 гг. с использованием геостационарного спутника LASSO, была показана возможность достижения сличения шкал. В 2008 – 2013 гг. была выполнена экспериментальная отработка лазерной синхронизации и дальнометрии методом встречного измерения псевдодальностей.

Лидар (лазерные локаторы ИК диапазона) – это дистанционное зондирование, которое использует источник света для освещения объекта и сложную сеть датчиков для анализа отраженного объектом излучения или рассеянного объектом света. Эта технология адаптирована к размерам материала, от микроскопических частиц до больших массивов суши, а также к плотности материала, от атмосферных газов до сложных соединений.

Лидар использует лазерный источник для подсвечивания предмета и современную сенсорную технологию для анализа отражённой радиации или света,

рассеянного от предмета. Данная технология легко адаптируется под микроскопические частицы, крупные массы, газы и сложные соединения.

Импульсные лазеры в LIDAR:

- Геоология: лидар используется для обнаружения тонких изменений в топографические элементах, например, разломов, движения ледников, эрозии береговой линии и вулканической активности. Системы лидар могут базироваться на борту самолета, спутнике или устанавливаться стационарно и выдерживать любые погодные условия.
- Метеорология: дистанционное зондирование используется для профилирования облачных моделей или скорости ветра, предсказания погодных условий, вычисления атмосферных компонентов для расчета температуры, давления воздуха и влажности. Атмосферные измерения также обеспечивают важную информацию для экологического мониторинга выбросов парниковых газов путем измерения концентрации углерода.

Доплеровский лазерный локатор измеряет частоту обратнорассеянного света от самого источника света. Этот сдвиг по частоте (также известный как доплеровский сдвиг) обеспечивает необходимую информацию для проведения исследований и развития возобновляемых источников энергии (например, скорость ветра, турбулентность и угол ветра или солнечная интенсивность). Авиакосмическая промышленность использует дальнометрные системы лазерных радаров для измерения отраженного лазерного импульса с целью определения места расположения объекта и расстояния до него.

В автомобилестроении машины оснащают системами лазерных радаров, чтобы получать информацию о препятствиях и определять безопасный маршрут для желаемого места назначения.

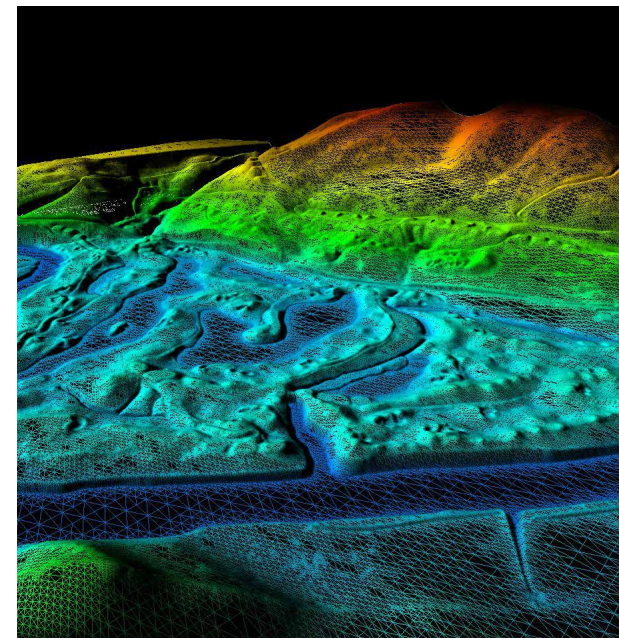


Рисунок 77 – Пример лазерного дистанционного зондирования

Ультразвуковая акустика

Лазеры используются в ультразвуковой акустике для генерирования и распознавания ультразвуковых волн. Ультразвуковые волны используются при неразрушающем контроле материалов, например, композитных материалов, применяемых в авиакосмической и других отраслях промышленности. Ультразвуковые волны, возникающие при взаимодействии с материалом, распознаются оптически благодаря использованию лазера с помощью метода интерферометрия Фабри-Перо.

Лазерная ультразвуковая технология – это метод, в котором импульсный лазер используется не только для генерации ультразвуковых волн, но и для их обнаружения. Обычно ультразвук, создаваемый лазером, используется

для исследования дефектов в композитных материалах в аэрокосмической промышленности, хотя присущая ультразвуку, создаваемому лазером, красота делает его пригодным для использования в любой отрасли, где требуются подобные измерения. Главный физический принцип прост: так как лазерный импульс ударяет поверхность исследуемого материала, возникает внезапное, локализованное и мгновенное тепловое расширение. Если мощность лазера достаточно высока, чтобы вызвать кипение материала, ультразвук генерируется посредством возвратного механизма из расширяющегося материала. При еще более высоких мощностях лазера, когда материал полностью охлажден, образуется плазма, расширение которой в значительной степени способствует генерации ультразвука.

После генерации ультразвуковых волн с помощью лазеров происходит обнаружение, чаще всего с помощью лазерной технологии. Так как ультразвуковая волна обнаруживается оптически, общие методы заключаются в интерферометрии или в схемы обнаружения Фабри-Перо. Большинство методов используют непрерывные или длительные импульсы (десятки мкс), хотя и более короткие импульсы также нашли применение. Принцип относительно тот же: так как ультразвуковые волны генерируют изменение показателя преломления окружающего воздуха, падающие лазерные импульсы будут немного отклоняться и, таким образом, изменять курс. Это обнаруженное изменение преобразуется в электрический сигнал. На более высоких частотах схема обнаружения несколько отличается, поскольку способ основан на обнаружении движения поверхности образца. Так как теоретический предел обнаружения определяется фоновой частотой (много порядков меньше, чем частота фотона), чувствительность лазерного ультразвука достаточно высока.

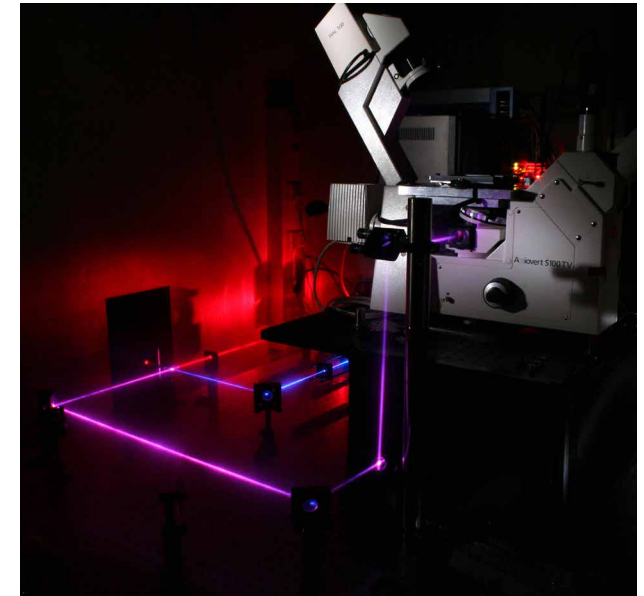
Научное приборостроение

Среди исследовательских методик на основе фотоники наибольшим разнообразием отличаются спектрально-оптические методы. Эти методы наиболее развиты и наиболее универсальны не только в фотонике, но и во всей современной физике и технике, поскольку оптические спектры излучения, поглощения, рассеяния веществ непосредственно отражают строение и энергетическую структуру веществ. Эти методы в основном бесконтактны и позволяют получить информацию независимо о различных частях объекта, в том числе о его внутренней структуре. Многие из них являются неразрушающими беспроботборными методами, позволяющими проводить экспресс-анализ и мониторинг *in situ* и даже *in vivo*.

В настоящее время широко используются три основных типа оптических спектральных устройств:

- приборы на пространственном разложении спектральных компонент (с помощью дифракционных решеток и призм);
- приборы на селективной модуляции отдельных спектральных компонент (с помощью интерферометров, растров и др.);
- приборы на перестраиваемых оптических фильтрах (с помощью акустооптических, жидкокристаллических и др. фильтров, наборов светофильтров).

Появляются новые – устройства, основанные на современных технологиях, такие как статические дифракционные спектрометры и статические фурье-спектрометры, спектрометры на динамических решетках.



ПРОИЗВОДСТВО МЕДИЦИНСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Лазерная маркировка посредством импульсных волоконных лазеров гарантирует производителям оборудования устойчивую к коррозии быструю технологию для уникальной идентификации хирургических инструментов из нержавеющей стали и катетеров из композитных полимеров. Полимерные связи, полученные с помощью лазерной сварки тулиевым волоконным лазером, демонстрируют отличную прочность на растяжение без необходимости использования адгезивов или грунтовок.

Лазерная сварка может применяться для кардиостимуляторов, имплантируемых устройств, герметизации, точечной сварки, сварки титана и нитинола, эндоскопических инструментов, сильфонов, диафрагм, сварки медицинских труб, батарей, гипотрубок, хирургических устройств, стоматологических инструментов.

Лазерная маркировка/гравировка применяется для: костных винтов, кардиостимуляторов, имплантируемых устройств, медицинских приспособлений и инструментов, хирургических устройств, лезвий скальпеля, проводочных проводников катетера, маркеров, одноразовых изделий, эндоскопических и стоматологических инструментов, штрихкодов, двухмерных матричных штрихкодов, нестирающихся отметок.

Лазерная резка применяется для медицинских приспособлений и инструментов, медицинских трубок, стентов, лезвий скальпеля, проводочных проводников катетера, гипотрубок, бритв, катетеров, стоматологических и эндоскопических инструментов, медицинских датчиков, тонкопленочных и одноразовых датчиков.

Лазерное сверление применяется для: микрофлюидных датчиков, электрофореза – пэтч-кламп, тонкопленочных и одноразовых датчиков.

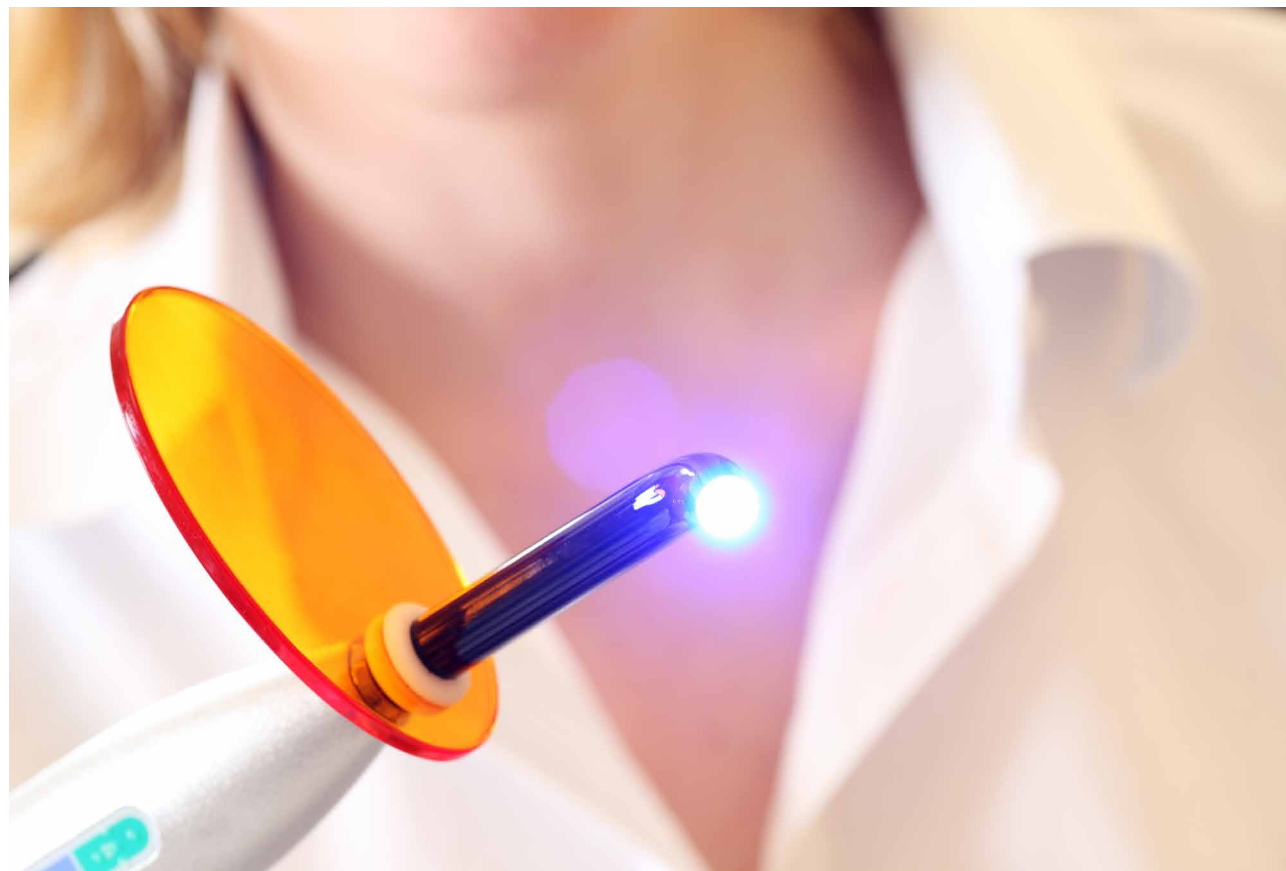


Рисунок 78 – Применение лазеров в стоматологии

Применение:

- сварка полимеров;
- сварка металлов;
- обработка поверхности;
- резка полимеров;
- резка металлов;
- уникальная маркировка продуктов;
- микросверление полимеров;
- сверление металлов.

МЕДИЦИНСКИЕ ПРОЦЕДУРЫ

Медицинское сообщество демонстрирует растущий спрос на лазеры в сфере диагностики, терапии и хирургии. В косметической/терапевтической дерматологии, от омоложения кожи (стимулирование выработки коллагена) до лечения сосудов, кожи, волос, удаления жира и татуировок – технология волоконных лазеров улучшает результаты лечения, снижает его стоимость, увеличивает его скорость и сокращает период восстановления. От урологии до офтальмологии – сфере хирургии необходимы лазерные решения с точно контролируемыми параметрами и отличным качеством лучей. В стоматологии лазеры применяются для регенерации костной ткани и десен, операций на мягких/твердых тканях и корневых каналах, быстрого отбеливания и обезболивания.

Для проведения медицинских процедур доступен широкий спектр лазерных генераторов для интеграции в медицинские устройства, включая диодные лазеры, иттербиевые лазеры около 1 мкм, эрбиевые лазеры около 1,5 мкм, тулиевые волоконные лазеры дальнего излучения около 2 мкм, иттербиевые и тулиевые волоконные лазеры квазинепрерывного излучения, зеленые и наносекундные импульсные зеленые лазеры непрерывного излучения, гибридные лазеры с оптоволоконной накачкой со средней ИК областью спектра, лазеры с рамановской накачкой (в инфракрасном и видимом диапазоне) и пико- и фемтосекундные импульсные лазеры на 1 и 1,5 мкм.

Применение:

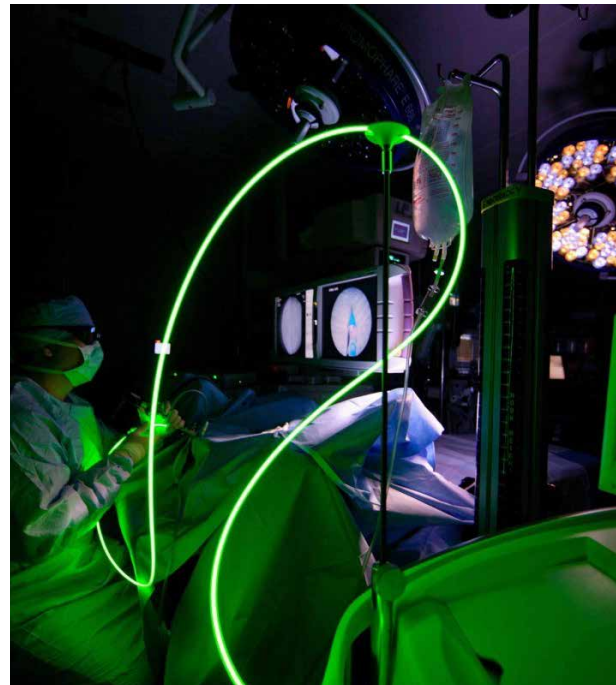
- урология;
- гинекология;
- флебология;
- проктология;
- дерматология;
- травматология;
- оториноларингология;
- офтальмология;
- нейрохирургия;
- получение изображений.
- хирургия;
- стоматология;

Урология

В основе лежат лазеры на тулий- и эрбий-активированных волокнах. Излучение с длиной волны 1,94 мкм с выходной мощностью до 120 Вт позволяет эффективно осуществлять испарение мягких тканей и дробление камней мочевыводящих путей, а наличие вспомогательного излучения с длиной волны 1,55 мкм с выходной мощностью до 15 Вт позволяет обеспечить регулируемый гомеостаз при проведении хирургических вмешательств. Оба этих излучения выводятся через одно рабочее волокно и могут независимо регулироваться по мощности.

Такое сочетание длин волн позволяет с помощью одного комплекса проводить два вида операций:

- лазерную тулиевую энуклеацию/вапоризацию аденомы простаты;
- лазерную литотрипсию «в пыль».



Флебология

Использование волновых аппаратов позволяет удалять венозные сетки и телеангиоэктазии.

Одной из актуальных проблем во флебологии является проблема варикозного расширения вен нижних конечностей, снижающего качество жизни начиная с эстетических проблем и до тяжелой инвалидизации при развитии осложнений и трофических расстройств. В настоящее время наиболее эффективным методом лечения этого вида патологии является эндовенозная лазерная коагуляция (ЭВЛК).

Другой проблемой флебологии являются различные проявления сосудистой патологии кожи, к которым относятся:

- телеангиэктазии;
- капиллярные ангиодисплазии, винные пятна и т.д.;
- кавернозные гемангиомы.

Эти виды патологии обычно не наносят вреда здоровью человека, но представляют эстетическую проблему как для мужчин, так и для женщин.

С помощью чрескожной лазерной коагуляции (ЧЛК) наиболее просто лечатся телеангиэктазии (развитая капиллярная сетка) и другие неглубоко залегающие скопления крови.

При лечении сосудистых мальформаций, например, на пальце – данное образование может быть практически бескровно удалено с помощью лазерного излучения. Важно отметить, что использование подобной технологии при локализации на лице может привести к неудовлетворительному косметическому эффекту. В этом случае наиболее эффективной оказывается интерстициальная лазерная термотерапия, основанная на прогреве патологической области как чрескожно, так и изнутри, путем введения световода лазера.

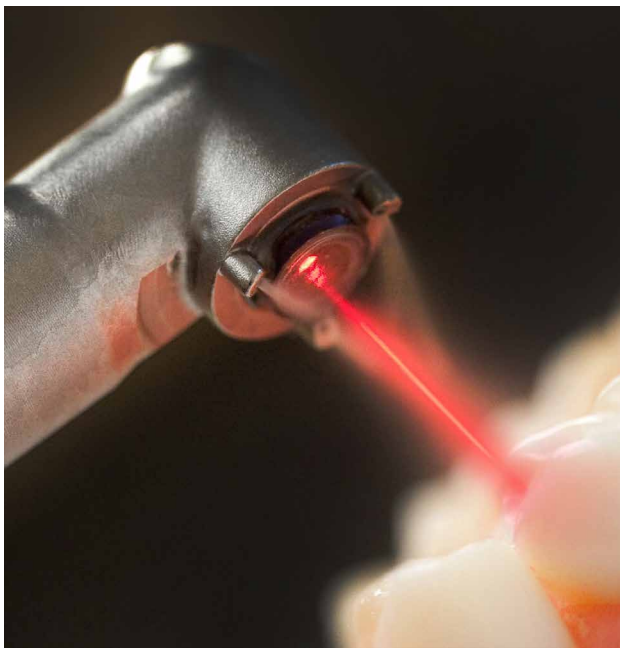
Стоматология

Лазеры стали использоваться в стоматологии с начала 1990-х годов для лечения кариеса зубов, заболеваний дёсен, при биопсиях, удалении очага поражения, отбеливания зубов и др.

Максимальное поглощение энергии лазера гемоглобином и оксидом гемоглобина способствует отличному гемостазу. В то же время степень поглощения энергии лазера водой остается достаточно высокой, что в свою очередь обеспечивает эффективные разрезы тканей.

Используются лазерные аппараты с длинами волн 0,97 и 1,94 мкм.

На сегодняшний день лазерные аппараты являются неотъемлемой частью практически каждой стоматологической клиники. Лазерное излучение имеет широкий спектр применения на слизистой полости рта, его использование дает очень хороший и прогнозируемый результат в лечении.



Оториноларингология

Выполнение simultанных эндоскопических операций стало возможным благодаря тому, что операции с применением лазерного излучения протекают бескровно и с малыми отёками. Малая болезненность лазерного воздействия позволяет использовать минимальную анестезию, а точное дозированное воздействие позволяет изменять форму хряща без повреждения покровных тканей.

Прежде всего, следует отметить, что врач получает возможность очень точных воздействий на оперируемую зону. Хороший гемостаз позволяет сохранять сухим операционное поле, а эндоскопическая и видеоэндоскопическая техника позволяют врачу осуществлять более точные манипуляции. Возможность осуществления точных, строго дозированных воздействий, позволяет разработать берегающие орган операции, например, вместо удаления аденоидов ограничится частичным удалением соединительной ткани, сформировать в аденоидах каналы для оттока жидкости, тем самым сохранить этот орган, играющий важную роль в обеспечении иммунитета.

Большинство манипуляций при лечении осуществляется при эндоскопическом наблюдении, при котором используется лазер с длиной волны рабочего излучения 0,97 мкм и максимальной выходной мощностью 20 Вт. При проведении части процедур лазерной термопластики хрящей дополнительно используется лазер с длиной волны 1,56 мкм, что позволяет оптимизировать операцию.

Опыт использования лазерных технологий в медицинских учреждениях показал реальную возможность улучшения качества лечения и уменьшения дискомфорта пациента при одновременном сокращении послеоперационного периода и сроков лечения. Можно расширить области хирургических вмешательств, выполняемых амбулаторно или в стационаре одного дня, а также сократить время пребывания в условиях больничного дискомфорта.

Нейрохирургия

Малоинвазивные пункционные методы лазерного воздействия являются эффективным методом лечения грыж межпозвоноковых дисков и болевых синдромов в нервных узлах и окончаниях. Благодаря этому может осуществляться лечение болевого фасет-синдрома и невралгии тройничного нерва. По сравнению с использованием альтернативных методов процесс лечения оказывается более простым, менее продолжительным, а процесс реабилитации занимает не более нескольких дней.

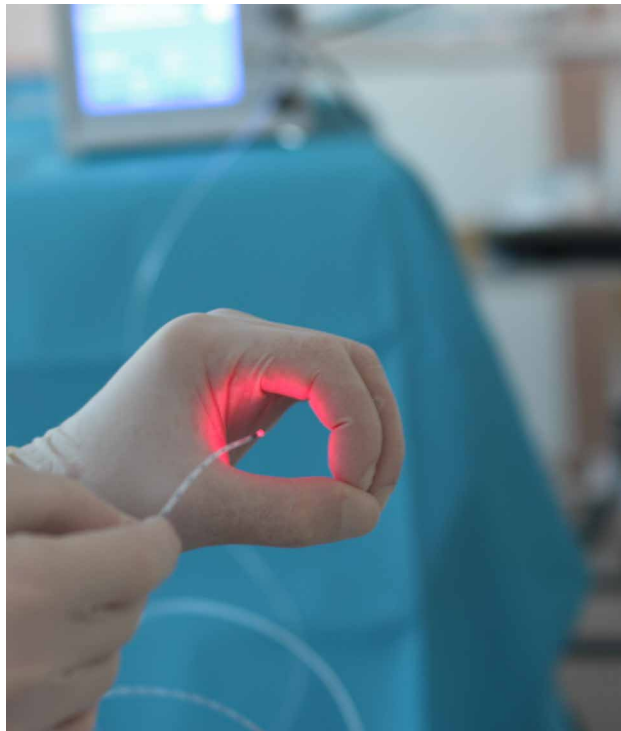
Остеохондроз – заболевания межпозвоноковых дисков, лежащее на стыке вертебологии и нейрохирургии. Лечение патологии межпозвоноковых дисков с применением лазерного излучения может осуществляться малоинвазивными пункционными методами в условиях дневного стационара. Пункционная лазерная термопластика (ПЛТ), используемая для лечения заболеваний межпозвоноковых дисков, за последние годы приобрела широкую популярность среди нейрохирургов и ортопедов всего мира. Для этих операций используется лазерное излучение с длинами волн 0,97 и 1,56 мкм. Особенностью метода является формирование нескольких каналов в диске через один прокол за счет использования специально изогнутых игл. При воздействии лазерного излучения на межпозвоноковые диски отмечена стимуляция процесса регенерации хряща, которая улучшает результаты лечения.

Малоинвазивные пункционные методы лазерного воздействия оказываются весьма эффективным методом лечения болевых синдромов в суставах (включая суставы позвоночного столба) и нервных узлах.

Хирургия

Преимущества использования лазеров в хирургии в том, что высокая интенсивность излучения позволяет резать материал и свёртывать кровь одновременно. В ходе исследований было продемонстрировано, что при лазерной хирургии удаляется намного меньше материала, чем при традиционных процедурах, и пациент быстрее идёт на поправку.

Существует широкий спектр применений лазеров как в общей хирургии, так и в её узких специализациях. В зависимости от типа лазера, длины волны и системы подачи энергии – лазеры все чаще заменяют те или иные хирургические инструменты. Лазерное оборудование успешно применяется совместно с современной эндоскопической техникой и пункционными методиками.



Кардиология

Аппараты на волоконных и полупроводниковых лазерах с успехом используются вместо громоздких и менее надёжных углекислотных аппаратов для лечения ишемической болезни сердца методом трансмиокардиальной лазерной реваскуляризации. Создание каналов с помощью лазерного излучения 1,55 мкм в миокарде позволяет улучшить его кровоснабжение, а также добиться эндотелизации стенок образованных каналов по типу «толстостенных» сосудов.

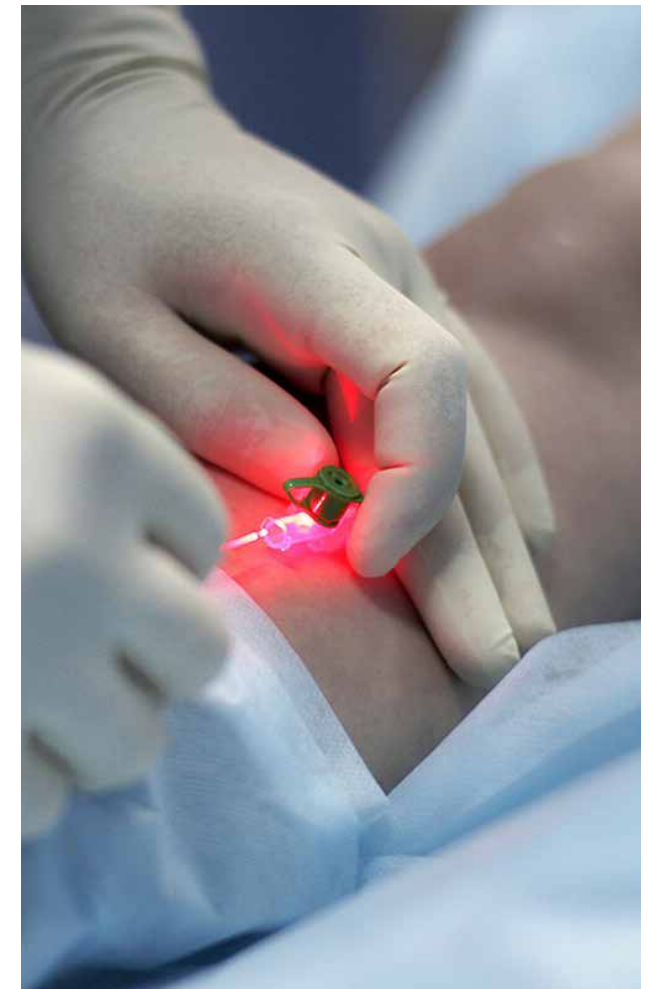
В настоящее время можно утверждать, что лазеры уверенно вошли в клиническую практику лечения ишемической болезни сердца методом лазерной реваскуляризации миокарда (ЛРМ). Как правило, операции ЛРМ сочетаются с аортокоронарным шунтированием (АКШ). Импульсное воздействие на сердце, во избежание фибрилляции, требует его синхронизации с ритмами сердца.

Для успешного осуществления реваскуляризации требуется достаточно быстрое (за время порядка 1 секунды) формирование в миокарде канала с минимальными термическими повреждениями стенок. Это может быть выполнено при работе непрерывным или импульсно-периодическим излучением при контактной работе световодом. Использование для формирования каналов излучения полупроводникового лазера с длиной волны 0,97 мкм позволяет сформировать канал с минимальным термическим поражением стенок. При зарастании канала, происходит процесс образования новых сосудов, прорастающих в окружающую ткань миокарда.

По мнению многих врачей, предпочтительнее – не зарастание лазерных каналов в миокарде, даже с неоваскулогенезом, а трансформация этих каналов в сосуды. В экспериментах на собаках гистологические исследования среза лазерного канала через 34 и 48 суток после операции показали сохранение просвета лазерных каналов и формирование стенок каналов по типу «толстостенных» сосудов с эндотелизацией.

В настоящее время операции лазерной трансмиокардиальной реваскуляризации осуществляются, как правило, на открытом сердце. Однако, использование для этих целей лазерного излучения, подаваемого по световоду

и трехмерных систем навигации, позволяющих точно определять положение рабочего конца световода в теле человека, создало предпосылки для осуществления таких операций менее инвазивно, вводя световод внутрь сердца по артерии.



Дерматология

Техники шлифовки и омоложения кожи связаны с доставкой и поглощением воды среднего ИК-диапазона для нагрева и разглаживания материала или с незначительным действием светового излучения, стимулирующего заживление ран. В дерматологии существует множество медицинских и косметических процедур, где лазерные технологии нашли свое применение. Например, для удаления морщин, лечения поврежденной солнцем коже, удаление пигментных пятен и послеугревых рубцов, растяжек после беременности. При этом используются как аблятивные, так и неаблятивные техники.

При использовании лазерного излучения диапазона 1,4 – 1,6 мкм происходит сокращение волокон коллагена и эластина, запускаются процессы, вызывающие подтяжку ткани и исчезновения морщин. На сегодняшний день наиболее популярны фракционные методики, использующие воздействие лазерного излучения на заданные участки биоткани.

Гинекология

Применение хирургических лазерных аппаратов в амбулаторных условиях позволяет эффективно лечить гинекологические заболевания, а хорошее сочетание режущих и коагулирующих свойств лазера позволяют успешно его применять при хирургических вмешательствах. При этом срок реабилитации сокращается в 2,5 раза по сравнению с традиционными методами лечения. Лазерные аппараты с длиной волны 0,97 мкм в гинекологии позволяют повысить эффективность лечения, уменьшить вероятность осложнений и рецидивов, снизить болевые ощущения пациента и сократить время его нетрудоспособности.

В гинекологии перспективным направлением является использование хирургических лазеров. В оперативной гинекологии полупроводниковые лазерные аппараты могут быть использованы при выполнении различных операций. Их использование позволяет при надежной коагуляции обеспечить меньшую область теплового повреждения прилежащих тканей по сравнению с крио, электрическими и ВЧ способами рассечения.

Проктология

В проктологии используется лазерное излучение с длиной волны 1,94 мкм.

На сегодняшний день применение лазерных аппаратов в такой деликатной области медицины, как проктология, является незаменимым. Он успешно используется в лечении проктологических заболеваний. Лазерное излучение подается при помощи гибкого волокна. При необходимости лазер можно использовать эндоскопически. Пациент гораздо легче переносит лечение при использовании лазерного излучения по сравнению с традиционными хирургическими методиками. Использование аппарата обеспечивает хорошую коагуляцию, снижает количество послеоперационных отеков, дискомфортных ощущений.

Лазеры для проктологии можно использовать амбулаторно, применяя выходную мощность излучения 5-10 Вт. Для более серьезных вмешательств, осуществляемых в стационарных условиях, используются аппараты с выходной мощностью 20-30 Вт.



Травматология

Высокая мощность излучения с длиной волны 0,97 мкм позволяет создать высокоэффективные методики лечения остеомиелита, не срастающихся переломов и других подобных травм, основанные на перфорации костей лазерным излучением, а также при эндоскопическом лечении суставов поверхностей.

Лазерные аппараты с успехом используются для реализации технологий малоинвазивного хирургического лечения заболеваний опорно-двигательного аппарата. Высокая мощность излучения (до 30 Вт) с длиной волны 0,97 мкм на выходе тонкого рабочего световода позволила создать высокоэффективные методики лечения остеомиелита, не срастающихся переломов и других аналогичных заболеваний, основанных на перфорации костей лазерным излучением. По этой методике с помощью лазерного излучения, передаваемого через кварцевый световод со специальным термостойким покрытием, в костной ткани через кожу и мышцы в зоне воспаления перфорируется несколько отверстий. Не извлекая световод, производится термотерапия костномозгового канала на пониженной мощности. Никаких дополнительных разрезов, дренирования мягких тканей и костномозгового канала не производится.



Офтальмология

Лазерная хирургия может успешно вылечить многие типы заболеваний глаз, предотвратить потерю зрения или улучшить его. При фиторефракционной кератэктомии и лазерной кератопластике используется лазер для скульптурирования роговицы и уменьшения или устранения необходимости в ношении очков или контактных линз.

Исторически сложилось так, что офтальмология стала первой в медицине областью, где лазеры нашли своё применение. 50 лет использования лазеров в офтальмологии показали эффективные и безопасные результаты лечения различных заболеваний глаз. Как и в других областях медицины, можно выделить хирургические воздействия на глаза, терапевтические и диагностику с использованием лазерного излучения, которая позволяет достаточно точно ставить диагноз.

Применение лазера для коррекции зрения или лечения дегенеративных заболеваний определяет оптимальный тип лазера, длину волны лазерного излучения и длину импульса.



Визуализация

Биомедицинские изображения широко применяются как в естественных, так и в искусственных условиях, начиная от биомедицинских исследований и заканчивая фармацевтической индустрией и клинической средой. Они позволяют получить изображения большего разрешения, более быструю обработку, селективное возбуждение хромофора. Лазеры всё больше используются при неинвазивной биомедицинской и цифровой диагностике.

Лазеры имеют ряд преимуществ по сравнению с обычными источниками света, используемыми в оптической визуализации:

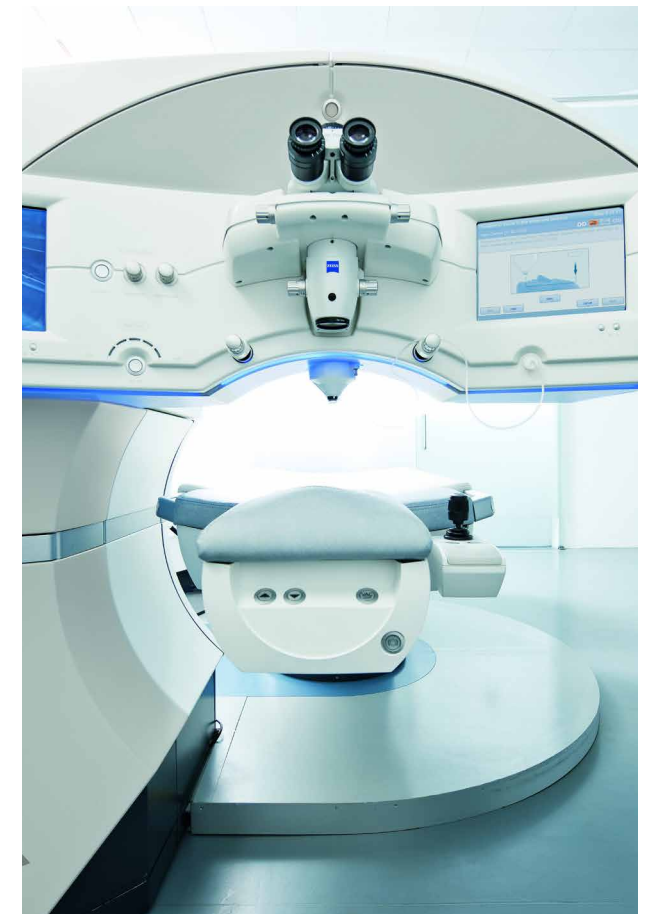
- доступность высоких мощностей на длинах волн от УФ до среднего ИК диапазона;
- возможность перестройки длины волны излучения, позволяющая выборочно воздействовать на разные хромофоры;
- высокое качество колиммированного выходного пучка обеспечивает изображение с высокой разрешающей способностью по спектру;
- высокая частота следования импульсов позволяет быстро получать изображение;
- возможность генерации ультракоротких импульсов, подходящих для наблюдения молекулярной и субклеточной изменений.

Лазеры играют все более важную роль в ранней диагностике и лечении рака, благодаря более высокой степени разрешения, быстрой передаче визуализации и времени ее обработки.

Волоконные и гибридные лазеры с волоконной накачкой с излучением в ближнем и среднем ИК диапазонах, которые идеально подходят для использования в диагностике и обработке изображений, в том числе для визуализации с помощью одно- или многофотонной флуоресцентной микроскопии, микроскопии широкого поля, оптической когерентной томографии (ОКТ), флуоресцентной молекулярной томографии (ФМТ) и пр.

Ультраскоростные фемтосекундные лазеры 50-150fs Cr:Zn/Se для получения излучения в диапазоне от ближнего до среднего ИК, без использования сложных параметрических генераторов с накачкой Ti:Sa лазером.

Волоконные лазеры также используются для накачки непрерывных оптических параметрических генераторов, обеспечивая широкий диапазон перестройки излучения от видимого до среднего ИК диапазона.



ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

Информационные системы (ИС) на основе фотоники предназначены для приема и обработки информации в оптическом диапазоне волн. В частности, к ним относятся лазерные, оптические и оптоэлектронные системы обнаружения объектов и получения информации о них по отраженному излучению (лидарные и локационные или лидарные системы).

В последние годы в связи с бурным развитием новых материалов, соответствующей элементной базы и новых производственных технологий ИС начали эффективно применяться в различных отраслях науки, техники и промышленности, в том числе в экологическом мониторинге, для контроля транспортных средств и управления транспортом, в строительстве, военном деле и многих других областях. При этом необходимо отметить, что в ближайшей перспективе значительно увеличится область применения дистанционных измерительных приборов на основе фотоники.

Использование лазерных технологий позволяет снизить энергопотребление, увеличить пропускную способность электронно-оптических компонентов и модулей, уменьшить занимаемое пространство на микросхеме для интеграции в микросхему новых элементов, а также уменьшить размеры самой микросхемы.

Широкополосный доступ

Технология эрбиевых волоконных усилителей, широко применяемая для построения волоконно-оптических сетей, в том числе сетей широкополосного доступа (ШПД), – лучшее техническое и экономическое решение, т.к. обеспечивает высокий (до нескольких Вт) уровень мощности выходного оптического сигнала, который может быть распределён по большому количеству портов, а при каскадном подключении возможно построить предельно большие сети с практически неограниченным количеством абонентов. С помощью данной технологии можно предоставить каждому пользователю высокоскоростной информационный поток, включающий в себя аналоговое и цифровое телевизионное вещание, высокоскоростной интернет-доступ, телефонию и многие другие информационные сервисы с использованием телекоммуникационных сетей любой архитектуры, в том числе в семействе пассивных оптических сетей: PON, EPON, GPON, XGPON.

Эрбиевые волоконные усилители (EDFA) обеспечивают прямое (без регенерации) усиление модулированного оптического сигнала и его распределение по многим направлениям наиболее оптимальным и экономичным способом, а применяемая дополнительно технология спектрального уплотнения оптических несущих (CWDM, DWDM) позволяет обслуживать максимальное количество абонентов и предоставлять им различные информационные сервисы.

Одним из преимуществ эрбиевых оптических усилителей является многомодовая накачка, которая обеспечивает предельно высокую эффективность и низкий шум-фактор благодаря использованию лазерных модулей накачки и усилительных блоков.

Технологии широкополосного доступа, например, «Волокно до абонента» (FTTP), открывают для конечного пользователя целый мир услуг, приближая точку доставки широкополосного оптического сигнала к дому или месту работы. Лазерные усилители, легированные эрбием (EDFA), поддерживают разнообразные архитектуры оптических сетей, использующиеся на рынке телекоммуникаций.

Плотное спектральное мультиплексирование (DWDM) в оптических сетях связи – это лучшая комбинация технологий для большинства телекоммуникационных операторов, позволяющая им удовлетворять растущий спрос на широкополосные услуги, увеличить срок эксплуатации имеющегося оптического волокна и сократить операционные и капитальные затраты благодаря увеличению пропускной способности сетей.

Волоконные лазеры с рамановской накачкой позволяют операторам сетей превзойти ранее достигнутую предельную дальность безусилительной передачи в DWDM – сетях в 350 километров.

На данный момент волоконные усилители применяются в открытых оптических системах связи, как наземного, так и спутникового базирования. Лазерные усилители позволяют пользователям передавать оптические сигналы с использованием сильно сфокусированного лазерного излучения без влияния или с минимальным влиянием неблагоприятных погодных условий или иных временных помех.

Применение:

- широкополосный доступ FTTH/FTTP;
- масштабируемые городские оптические сети «Metro DWDM»;
- сверхдальние магистральные линии связи DWDM.

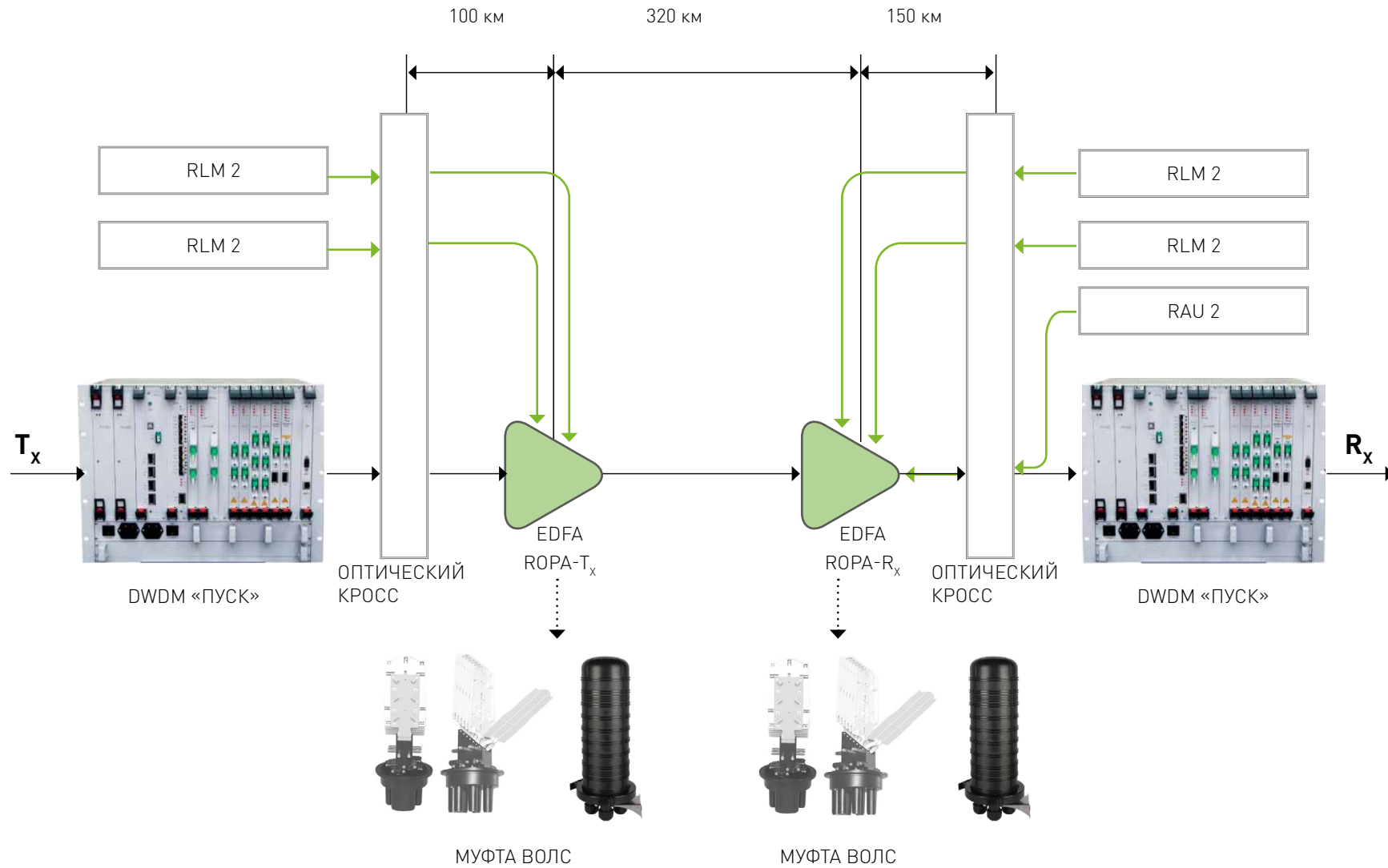


Рисунок 79 – Принципиальная схема одноканальной однопролётной передачи сигнала

СЕЛЬСКОЕ ХОЗЯЙСТВО И ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

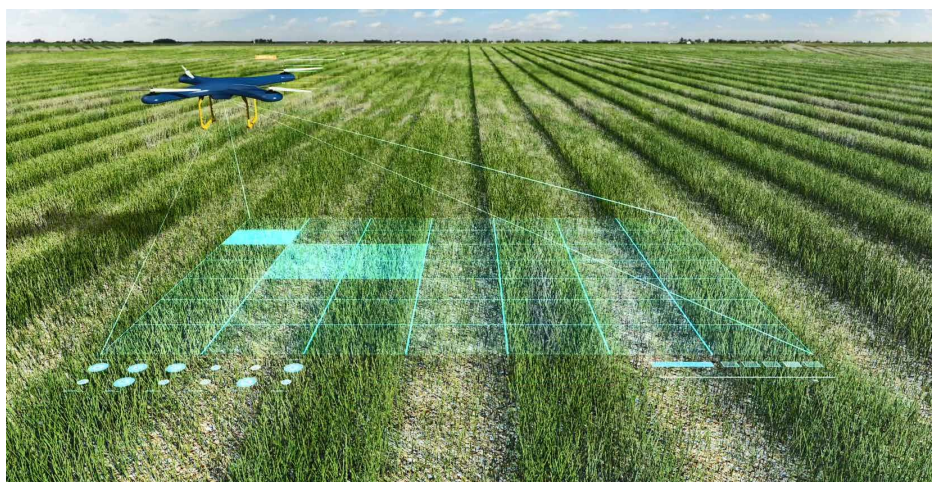
В России и за рубежом накоплен большой опыт применения лазерных технологий, которые позволяют повысить объём и качество сельскохозяйственной продукции, сократить применение пестицидов и трансгенных растений, снизить производственные затраты. В основе таких технологий лежит фоторегуляторное действие когерентного света, позволяющее более полно и эффективно использовать генетический потенциал сельскохозяйственных растений и животных. Лазерные технологии относятся к экологически безопасным, энергосберегающим и могут широко использоваться в органическом земледелии при производстве экологически чистых продуктов питания, спрос на которые постоянно возрастает.

Лазерная ветеринария – экологически чистый, высокоэффективный, безмедикаментозный, безболезненный метод лечения широкого круга заболеваний.

Перспективной темой является разработка лазерных и видеодигитальных систем бонитировки экстерьера животных с дистанционной регистрацией биофизиологических параметров животных для идентификации и управления продуктивностью стада.

В сельскохозяйственном производстве используются технологии лазерной нивелировки и планировки полей с повышенной производительностью и точностью планировки, они особенно важны при мелиорации.

Широко внедряются методы лазерного восстановления и упрочнения деталей сельхозтехники, которые эффективны и быстро окупаются при внедрении.



АВТОМОБИЛЬНАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

Экономическая эффективность высокопроизводительных волоконных лазеров позволяет активно применять их в автомобильной промышленности. Высокое качество луча позволяет осуществлять дистанционную сварку и высокоскоростную лазерную резку. Низкие эксплуатационные расходы обеспечиваются высоким КПД, компактными размерами и низкими затратами на сервисное обслуживание.

По мере того, как новые облегченные конструкции автомобилей выходят на передний план, лазеры становятся все более востребованными на современных высокоавтоматизированных гибких производственных линиях.

Лазеры легки в интеграции и эксплуатации, многофункциональны и высоконадежны. Твердая пайка трифокальным лазером замещает традиционные методы твердой пайки, при этом ускоряя процесс, минимизируя термическое воздействие и уменьшая необходимость ручной очистки деталей.

Лазеры используются в сочетании с режущими, сварочными и сканирующими головками, а также оптическими переключателями, затворами и разъемами для предоставления уникальных технологий с учетом потребностей каждого клиента.

Применение:

- сварка металлов;
- сварка полимеров;
- маркировка;
- резка;
- твердая пайка;
- удаление покрытий;
- сверление;
- пайка.

Лазерная сварка может применяться для компонентов подушек безопасности, топливных инжекторов, датчиков давления, топливных баков, аккумуляторов, каркасов сидений, панелей дверей, соленоидов, деталей кузова, шестерней, компонентов трансмиссии и АБС, фланцев, передних и задних фар, деталей выхлопной системы, высокоскоростной дистанционной сварки, сварки алюминия, сварки полимеров.

Лазерная маркировка/гравировка могут применяться для табличек с VIN номером автомобиля, радиокнопок, топливных инжекторов, компонентов подушек безопасности, датчиков давления, соленоидов, деталей АБС и выхлопной систем, переключателей, клапанов рециркуляции отработавших газов (EGR), брелоков для ключей, реле, блоков предохранителей и информационных блоков, коннекторов, фитингов, высокоэффективных гоночных комплектующих, штрихкодов, двумерных матричных штрихкодов, этикеток.

Лазерная резка может применяться для панелей кузова, деталей выхлопной системы, гидроформованных деталей, резки труб, высокопрочной стали, элементов конструкции, стали горячей штамповки, двумерных плоских листов, деталей батареи и рамы, бамперов, приборных панелей.

Лазерная твердая пайка может применяться для крышки багажника, крыши, боковин, задних откидных дверей.

БЫТОВАЯ ТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Лазеры с высоким уровнем импульсной энергии, высокой пиковой мощностью и частотой повторения позволяют проводить микрообработку с очень высокой точностью.

В сфере производства бытовой техники лазеры хорошо зарекомендовали себя благодаря уникальной комбинации надежности, универсальности, эффективности, высокой мощности, качеству луча, компактности и экономичности. Для большинства применений в сфере бытовой техники требуется сфокусированный луч лазера, подаваемый импульсами, с высокими повторяемостью и частотой следования, для максимальной производительности и точности.

При производстве крупных бытовых приборов лазеры осуществляют резку листовых деталей и панелей корпусов, сварку труб и профиля, а системы многокоординатной сварки применяются для многих деталей, таких как насосы, фильтры, стойки.

Маркировочные модули могут использоваться как отдельно, так и в комплексе с другим оборудованием, для нанесения на детали серийных номеров во время производственного процесса.

На рынке карманных устройств лазеры осуществляют резку, сварку и сверление корпусов и подложек, включая керамику, карбид кремния и алмазы. Квазинепрерывные лазеры используются при сварке батарей, корпусов и кожухов проводников и компонентов.

На уровне электронных компонентов лазеры используются для обработки керамических корпусов, формирования структуры гибких плат, а также обработки изоляционных и защитных покрытий; все фазы применяются в интеграции усовершенствованных электронных блоков.

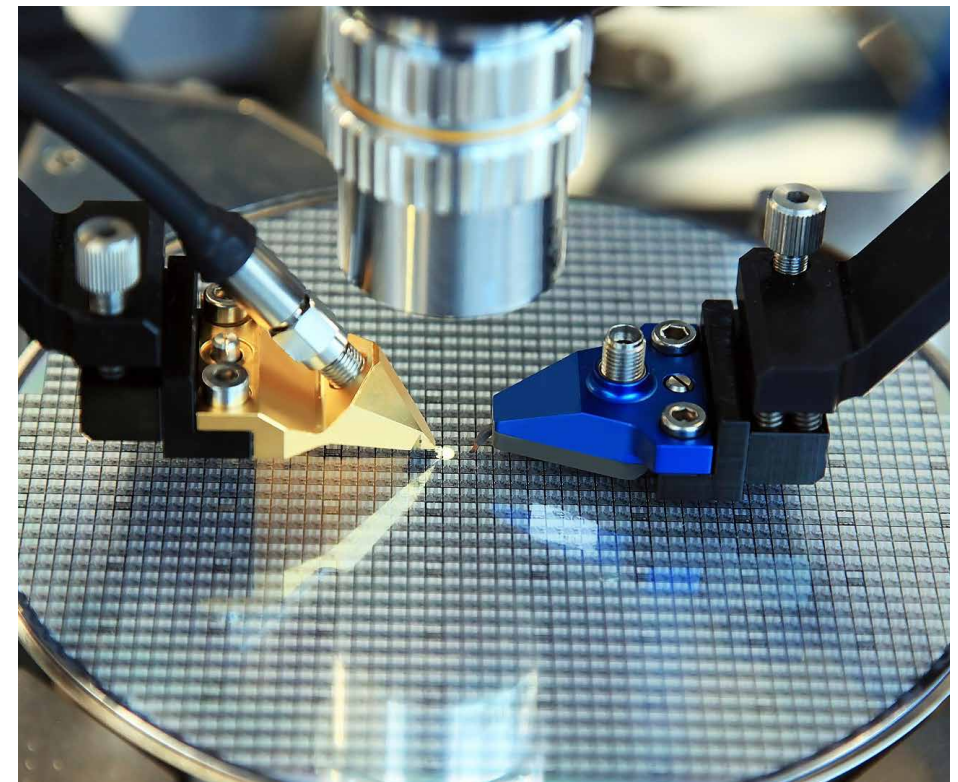
Применение:

- нарезание пластин на кристаллы;
- скрайбирование сапфира;
- сверление микроотверстий;
- формирование рисунка на фоторезисте;
- лазерное прямое формирование рисунка;
- лазерная обратная литография;
- контроль пластин;
- отжиг;
- скрайбирование диэлектриков с пониженной диэлектрической проницаемостью;
- присоединение проволочных выводов из золота/меди.

Лазерная сварка применяется для мобильных телефонов, цифровых камер, MP3-плееров, батарей, светодиодного освещения, конденсаторов, реле, корпусов.

Лазерная маркировка/гравировка применяются для клавиатур, сотовых телефонов, компьютерных мышек и мониторов, телевизионных пультов, планшетов, MP3-плееров, хромированных частей, устройств управления системами кондиционирования, автоматических выключателей, печатных плат, электрических бритв, фенов, блоков питания, картриджей для принтеров, брелоков для ключей, слуховых аппаратов, штрихкодов, двухмерных матричных штрихкодов.

Лазерная резка применяется для монтажных плат, конденсаторов, резисторов, пластин роторов и статоров электромоторов, компьютерных корпусов, электрических бытовых приборов, защитных кожухов, корпусов, сотовых телефонов, планшетов.



АВИАЦИОННО-КОСМИЧЕСКАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

Применение лазеров в авиационно-космической промышленности продолжает расширяться благодаря высокой потребности в увеличении топливной эффективности. Лазеры – это крайне важная технология для сварки высокопрочной стали, твердой пайки металлических компонентов из крупных листов и резки волокнистонаполненных полимерных материалов в целях уменьшения веса. Кроме того, лазерные технологии применяются во многих производственных процессах авиационного двигателестроения. Каждый двигатель оснащен лопатками просверленными, обрезанными, наплавленными или произведенными по аддитивной технологии с помощью лазеров.

Лазерные технологии используются в многочисленных производственных процессах аэрокосмической промышленности. В их число входят лазерные сварочные клещи – идеальный инструмент для лазерной точечной сварки, роботизированные установки лазерной сварки и сверления (крупных и мелких деталей соответственно).

Применение:

- сварка металла;
- маркировка;
- резка;
- твердая и мягкая пайка;
- сварка полимеров;
- удаление покрытий;
- сверление;
- плакировка.



ПОЛУПРОВОДНИКОВАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

Изготовители оборудования, а также крупные производители чипов и дисплеев, постоянно совершенствуют современное оборудование и процессы, чтобы при меньших затратах добиться лучшей функциональности чипов и дисплеев, компактности, а также снижения расхода энергии. Передовые производители оборудования интегрируют лазеры для таких важнейших отраслей применения, как литография и сверхкороткий отжиг, чтобы обеспечить высочайшую скорость обработки и контроль производственных дефектов, что дает значительно более высокую производительность.

Лазеры применяются для отжига, контроля производственных дефектов, лазерного отделения (LLO), разделения полупроводниковых пластин на кристаллы и упаковки. При отжиге лазеры являются уникальным средством создания локализованного нагрева, достигаемого с помощью точного контроля глубины проникновения и высокоточного позиционирования, что позволяет подвергать нужные структуры термообработке без влияния на термочувствительные материалы. Сочетание выбора лазерного источника, высокоточных подвижных столиков и систем визуальной корректировки предоставляет пользователям единого поставщика оборудования для самых сложных задач отжига. Для резки полупроводниковых пластин на кристаллы лазеры обеспечивают прочностные характеристики кристаллов, сопоставимые с методами механического пиления, а также более высокое качество резки и большую пропускную способность.

Применение:

- нарезание пластин на кристаллы;
- скрайбирование сапфира;
- сверление микроотверстий;
- формирование рисунка на фоторезисте;
- лазерное прямое формирование рисунка;
- лазерная обратная литография;
- контроль пластин;
- отжиг;
- скрайбирование диэлектриков с пониженной диэлектрической проницаемостью;
- присоединение проволочных выводов из золота/меди.

ТЯЖЁЛАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

Лазеры широко применяются в тяжелой промышленности – от сварки локомотивных поршней до сооружения готовых мостовых структур. Лазеры легко интегрируются в технологические системы, которые обеспечивают выполнение требуемой задачи.

От сварки длиннейших железнодорожных путей для скоростных поездов до сварки нефтегазовых трубопроводов с помощью гусеничных машин в труднодоступной местности. Они изменяют привычные методы выполнения технологических процессов в тяжелой промышленности.

Роботизированные установки для резки, сварки и наплавки, а также сварочные клещи для широкого ряда промышленных применений.

Пример отраслей применения:

- кораблестроительная промышленность: Сварка листов, подготовка поверхностей и удаление краски;
- железнодорожная промышленность: сварка вагонов, производство локомотивных двигателей (полностью интегрированные системы), сварка железнодорожных путей;
- индустрия тяжелой промышленной и сельскохозяйственной техники: сварка крановых стрел, наплавка рабочих органов землеройно-транспортных машин после износа и поломок;
- индустрия энергоснабжения: наплавка и ремонт турбинных лопастей и шеек вала;
- строительная индустрия: удаление бетона (удаление поверхностного слоя), сверление бетона, сварка металлических балок;
- производство габаритных металлоконструкций: мосты, полностью сваренные лазером.

Применение:

- сварка металла;
- сверление;
- твёрдая пайка;
- удаление покрытий;
- резка;
- плакировка.

НЕФТЕГАЗОВАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

Волоконные лазеры и лазерные системы применяются для орбитальной и продольной сварки труб, для наплавки и закалки в сфере производства бурильного оборудования. Надёжная и неприхотливая конструкция лазерных комплексов подходит для эксплуатации «в поле».

Лазеры играют важнейшую роль в нефтегазовой отрасли и в производстве оборудования для нее. Системы орбитальной и продольной сварки труб представляют собой уникальные решения, результатом применения которых становится существенное снижение издержек и рост производительности. Лазеры высокой мощности, установленные на гибкие роботизированные производственные установки, позволяют производить многокоординатную резку, сварку или наплавку.

Применение:

- лазерное сверление;
- сварка труб;
- плакирование;
- изучение скважин;
- ремонт труб;
- демонтаж.



Рисунок 80 – Пример трубопровода

СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Солнечная энергия – это один из наиболее впечатляющих возобновляемых источников энергии. По мере развития этой отрасли, использование волоконных лазеров становится жизненно необходимым, для увеличения эффективности фотоэлектрических элементов, увеличения производительности и объемов производства. Сегодня две фотоэлектрические технологии борются за доминирование на рынке: кристаллический кремний (с-Si) и тонкая пленка – множество слоев полупроводниковых материалов, наложенных на одну базовую подложку. Волоконные лазеры, такие как инфракрасные импульсные наносекундные YLPN, зеленые GLPN и ультрафиолетовые импульсные лазеры ULPN, снижают издержки фотоэлектрического производства, так как лазерные технологические процессы значительно более эффективны, точны и быстры по сравнению с традиционными, благодаря высокому КПД, отличному качеству луча и быстрым импульсам с высокой частотой повторения.

Применение:

- прокладка швов;
- формирование изображения на тонкой плёнке;
- удаление кромки;
- микросверление;
- маркировка пластин;
- скрайбирование.



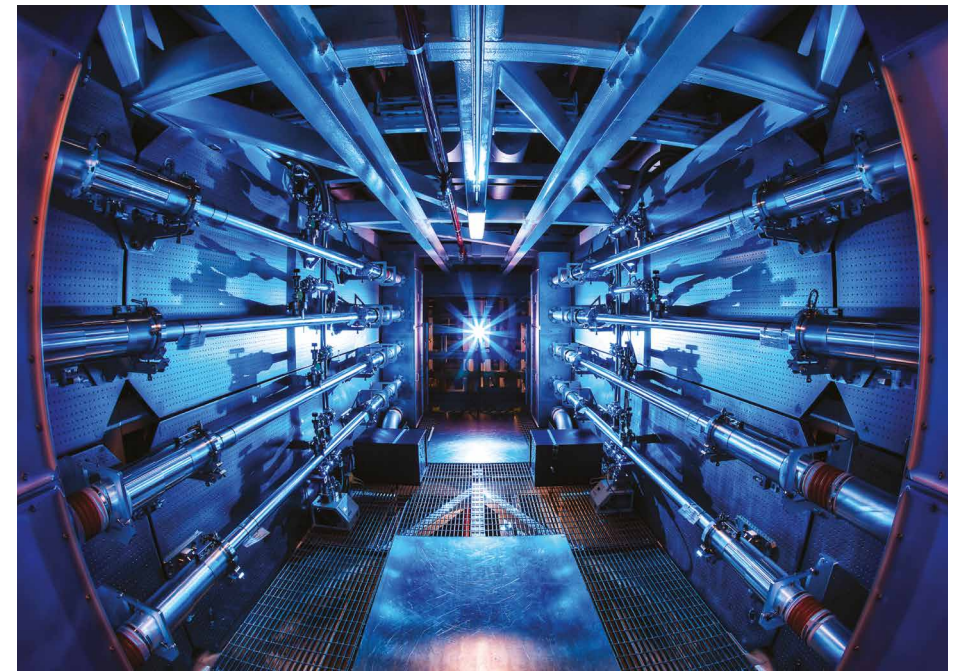
Рисунок 81 – Пример солнечной панели, изготовленной с помощью лазера

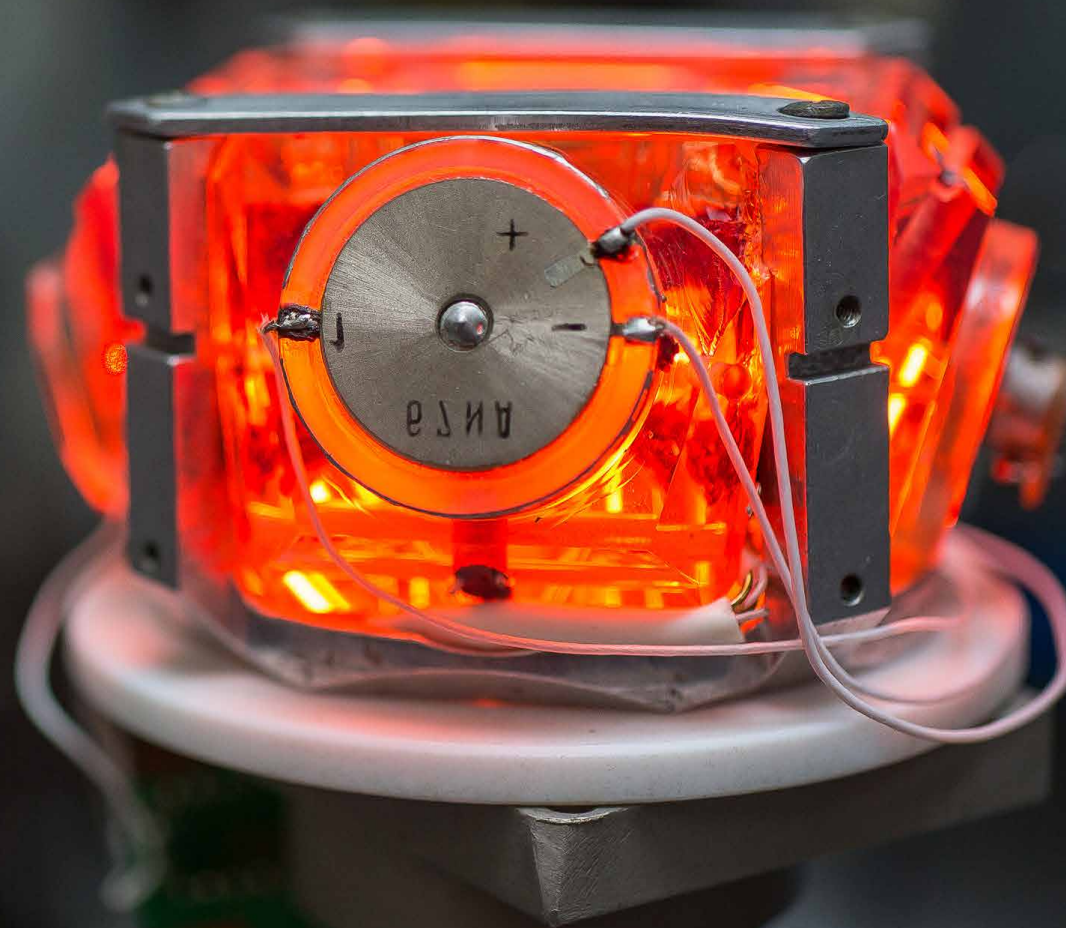
ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Лазеры позволяют безопасно выводить из эксплуатации ядерные установки даже в удалённых и труднодоступных участках.

Волоконные лазеры как инструменты для резки и обработки металлов различных классов и толщин широко признаны как экономичные с точки зрения затрат и времени, что особенно важно при выводе ядерных объектов из эксплуатации.

Традиционные методы – абразивная или автогенная резка – ограничены в своих возможностях, что ведёт к сильному увеличению времени вывода ядерных объектов из эксплуатации. Сильно загрязненные среды затрудняют процесс с точки зрения доступа к ним и работы в них, о каком бы периоде времени ни шла речь, к тому же возникают риски для здоровья и безопасности. Волоконные лазеры предоставляют возможность доставлять необходимую лазерную энергию безопасно и эффективно во время лазерной резки или абляции, а также возможность уменьшения загрязнённых поверхностей и размеров компонентов для безопасного и практичного хранения.





5

ОПТИЧЕСКИЙ ГИРОСКОП

Гироскопы – это устройства, которые помогают транспортным средствам, беспилотникам, а также носимым портативным электронным устройствам определять свою ориентацию в трехмерном пространстве.

Современные мобильные телефоны оснащаются микроэлектромеханическими датчиками (MEMS), которые измеряют изменения сил, действующих на две одинаковые массы, колеблющиеся и движущиеся в противоположных направлениях.

Развитие элементной базы волоконной и интегральной оптики в последние десятилетия привело к появлению нового типа инерциальных датчиков угловых перемещений – волоконным оптическим гироскопам.

Волоконный оптический гироскоп (ВОГ) – это оптико-электронный прибор, создание которого стало возможным лишь с развитием и совершенствованием элементной базы квантовой электроники. Прибор измеряет угловую скорость и углы поворота объекта, на котором он установлен. Принцип действия таких гироскопов основан на вихревом (вращательном) эффекте Саньяка*.

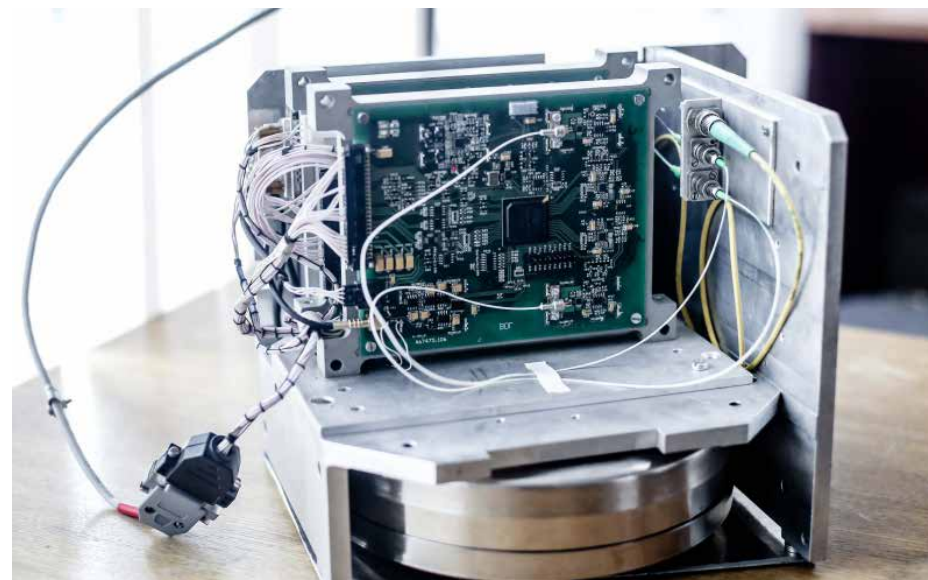


Рисунок 82 – Пример волоконно-оптического гироскопа

Оптические гироскопы имеют потенциал применения в качестве чувствительного элемента вращения в инерциальных системах навигации, управления и стабилизации, а в ряде случаев может полностью заменить сложные и дорогостоящие электромеханические (роторные) гироскопы и трехосные гиростабилизированные платформы.

Разработка высокочувствительных оптических гироскопов базируется на одномодовом диэлектрическом световоде с малым затуханием, что определяет их уникальные свойства:

- потенциально высокую чувствительность (точность) прибора, которая уже сейчас на экспериментальных макетах 0,1 град/ч и менее;
- малые габариты и массу конструкции, благодаря возможности создания ВОГ полностью на интегральных оптических схемах;
- невысокую стоимость производства и конструирования при массовом изготовлении и относительную простоту технологии;



Рисунок 83 – Самый маленький в мире оптический гироскоп

* Эффект Саньяка, названный в честь французского физика Жоржа Саньяка, является оптическим явлением, опирающемся на теорию общей относительности Эйнштейна. Физический смысл эффекта заключается в том, что луч света разделяется на две части, которые движутся в противоположных направлениях по кругу, а затем встречаются на том же детекторе света. Т.к. свет движется с постоянной скоростью, то вращение устройства, а вместе с ним и путь, по которому проходит свет, приводит к тому, что один из двух лучей попадает на детектор раньше другого. При наличии петли на каждой оси ориентации этот фазовый сдвиг, известный как эффект Саньяка, можно использовать для расчета ориентации в пространстве.

- ничтожное потребление энергии, что имеет немаловажное значение при использовании ВОГ на борту;
- большой динамический диапазон измеряемых угловых скоростей (в частности, например, одним прибором можно измерять скорость поворота от 1град/ч до 300град/с);
- отсутствие вращающихся механических элементов (роторов) и подшипников, что повышает надежность и удешевляет их производство;
- практически мгновенную готовность к работе, поскольку не затрачивается время на раскрутку ротора;
- нечувствительность к большим линейным ускорениям и, следовательно, работоспособность в условиях высоких механических перегрузок;
- высокую помехоустойчивость, низкую чувствительность к мощным внешним электромагнитным воздействиям благодаря диэлектрической природе волокна;
- слабую подверженность проникающей гамма-нейтронной радиации, особенно в диапазоне 1,3мкм.

Волоконный оптический гироскоп может быть применен в качестве жестко закрепленного на корпусе носителя чувствительного элемента (датчика) вращения в инерциальных системах управления и стабилизации.

Механические гироскопы имеют так называемые гиromеханические ошибки, которые особенно сильно проявляются при маневрировании носителя (самолета, ракеты, космического аппарата). Эти ошибки еще более значительны если инерциальная система управления конструируется с жестко закрепленными или «подвешенными» датчиками непосредственно к телу носителя.

Перспектива использования дешевого оптического датчика вращения, который способен работать без гиromеханических ошибок в инерциальной системе управления, – еще одна причина особого интереса к оптическому гироскопу.

Первые конструкции волоконного оптического гироскопа тесно связаны с разработкой кольцевого лазерного гироскопа (КЛГ), в котором чувствительным контуром является кольцевой самовозбуждающийся резонатор с активной газовой средой и отражающими зеркалами, в то время как в ВОГ пассивный многовитковый диэлектрический световодный контур возбуждается «внешним» источником светового излучения. Эти особенности определяют преимущества ВОГ по сравнению с КЛГ:

- ВОГ отсутствует синхронизация противоположно бегущих типов колебаний вблизи нулевого значения угловой скорости вращения, что позволяет измерять очень малые угловые скорости, без необходимости конструировать сложные в настройке устройства смещения нулевой точки;
- эффект Саньяка, на котором основан принцип работы прибора, проявляется на несколько порядков сильнее из-за малых потерь в оптическом волокне и большой длины волокна;

- конструкция ВОГ целиком выполняется в виде твердого тела (в перспективе полностью на интегральных оптических схемах), что облегчает эксплуатацию и повышает надежность по сравнению с КЛГ;
- ВОГ измеряет скорость вращения, в то время как КЛГ фиксирует приращение скорости;
- конфигурация ВОГ позволяет «чувствовать» реверс направления вращения.

Эти свойства ВОГ позволяют создать простые высокоточные конструкции полностью на дешевых твердых интегральных оптических схемах при массовом производстве.

При разработке ВОГ ученые и инженеры сталкиваются с рядом трудностей:

1 | Технология производства элементов ВОГ. В настоящее время мало подходящего одномодового волокна, сохраняющего направление поляризации; производство светоделителей, поляризаторов, фазовых и частотных модуляторов, пространственных фильтров, интегральных оптических схем находится на начальной стадии развития. Число разработанных специально для ВОГ излучателей и фотодетекторов ограничено.

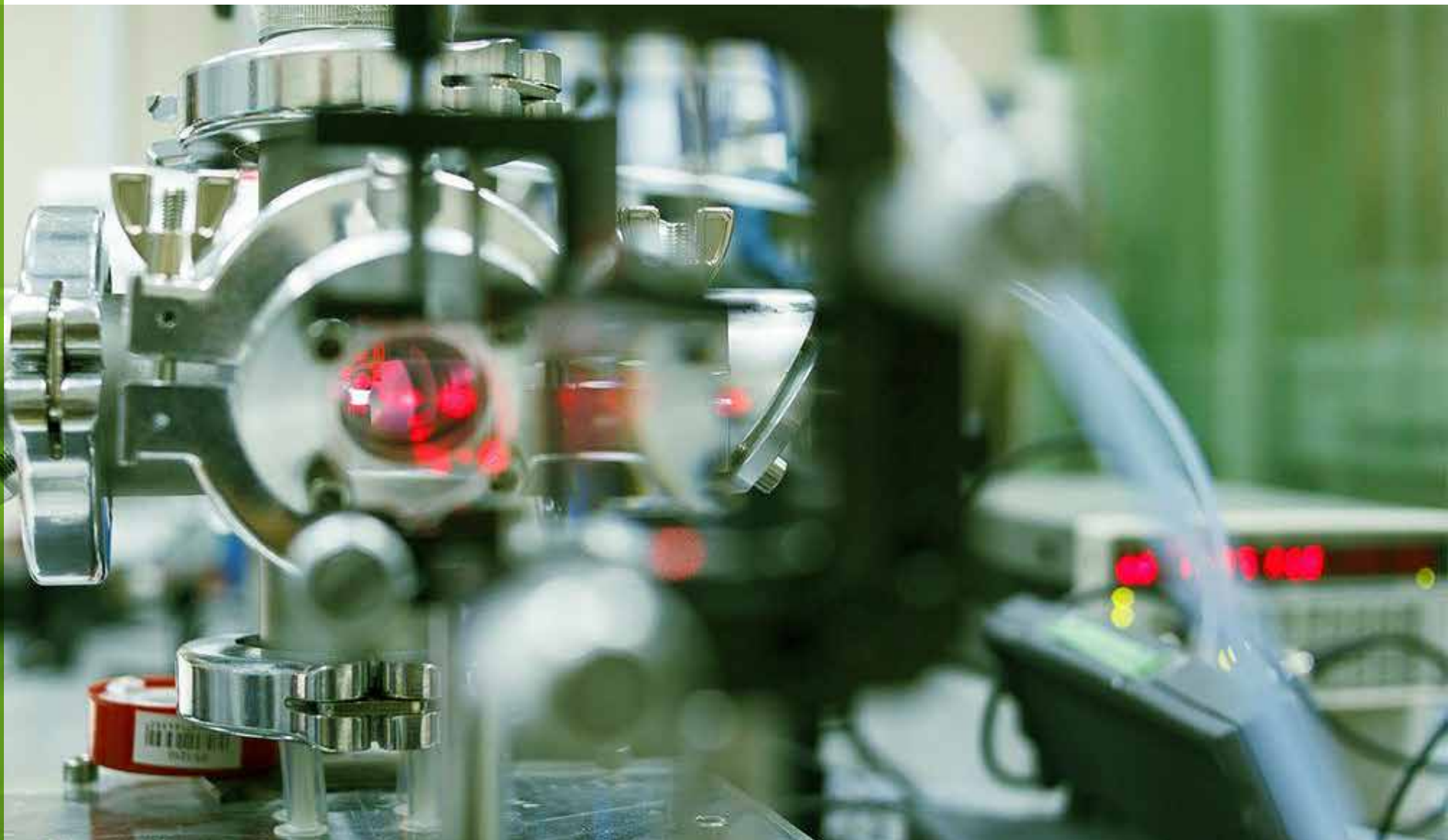
2 | При кажущейся простоте прибора и высокой чувствительности его к угловой скорости вращения он в то же время чрезвычайно чувствителен к очень малым внешним и внутренним возмущениям и нестабильностям, что приводит к паразитной дрейфам, т. е. к ухудшению точности прибора. К возмущениям относятся температурные градиенты, акустические шумы и вибрации, флуктуации электрических и магнитных полей, оптические нелинейные эффекты флуктуации интенсивности и поляризации излучения, дробовые шумы в фотодетекторе, тепловые шумы в электронных цепях и др.

Несмотря на эти трудности, точность ВОГ уже сейчас близка к требуемой в инерциальных системах управления, т.к. совершенствуется технология производства их элементов.

Новые разработки в области оптических гироскопов позволяют обнаруживать сдвиги фаз в 30 раз меньшие, чем современные оптические гироскопы. Для этого используется новая технология, называемая **«взаимное повышение чувствительности»****.

*** Одинаковому воздействию подвергаются оба луча света внутри гироскопа. Поскольку эффект Саньяка основан на обнаружении разницы между двумя лучами, когда они движутся в противоположных направлениях, он считается невзаимным. Внутри гироскопа свет проходит через миниатюрные оптические волноводы (небольшие каналы, которые несут свет и выполняют ту же функцию, что и провода для электричества). Недостатки оптического пути, которые могут повлиять на лучи (например, тепловые флуктуации или рассеяние света) и любые внешние помехи, будут одинаково влиять на оба луча. Учёным удалось отсеять этот взаимный шум, оставив нетронутыми сигналы от эффекта Саньяка, что улучшает отношение сигнал/шум в системе и позволяет интегрировать оптический гироскоп в микросхему, меньшую, чем зерно риса.*





6

ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Энергетические оптические системы должны обеспечивать:

- 1 | Плотность мощности излучения, достаточную для выполнения заданного типа обработки материала.
- 2 | Максимальное использование энергии лазерного пучка с учётом потерь на диафрагмах (виньетирование¹⁰) и на оптических компонентах (френелевское отражение¹¹ и остаточное поглощение¹²).
- 3 | Точностные параметры, которые позволяют
 - формировать зоны обработки заданной и строго очерченной формы;
 - формировать изображения зоны воздействия с минимальной неровностью края.

10. Виньетирование (фр. vignette – заставка) – явление частичного ограничения (затемнения) наклонных пучков света оправой или диафрагмами оптической системы. Результатом является снижение яркости изображения к краям поля зрения системы.

11. Френелевское отражение – явление, когда свет, распространяющийся в каком-нибудь материале (к примеру, в оптическом волокне), попадает в материал с другой плотностью (к примеру, в воздух). часть световой энергии (до 4%) отражается назад, к источнику света, в то время как остальная световая энергия продолжает распространяться дальше. Резкие изменения плотности материала имеют место на концах волокна, у обрывов волокна и, иногда, у оптоволоконных стыков. Количество отраженного света зависит от величины изменения плотности материала (которая характеризуется показателем преломления – более высокий показатель преломления означает большую плотность), а также от того угла, под которым свет падает на поверхность раздела между двумя материалами.

12. Остаточное (решётчатое) поглощение имеет место тогда, когда свет взаимодействует непосредственно с ионами полупроводника. При этом электронная подсистема остается незадействованной. Иначе получится, что это взаимодействие фотона с фононом (оно квантовано, но линии довольно широкие); $\alpha \sim 10^3 \text{ см}^{-1}$ в резонансе.

ОСНОВНЫЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ЛАЗЕРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

Гауссова модель лазерного источника (одномодовый режим)

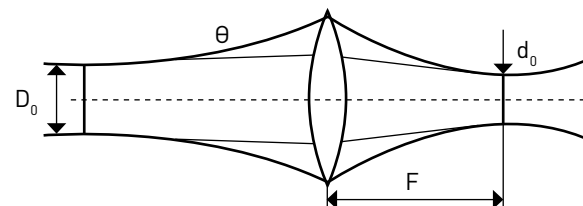


Рисунок 84 – Принципиальная схема гауссовой модели лазерного источника $\theta = \alpha/2$; $d_0 = 2\omega_0$ – фокальное пятно

Телецентрическая модель лазерного источника (многомодовый режим)

Строится на следующих положениях:

- оси всех пучков параллельны оптической оси;
- все направления внутри угла α равноценны.

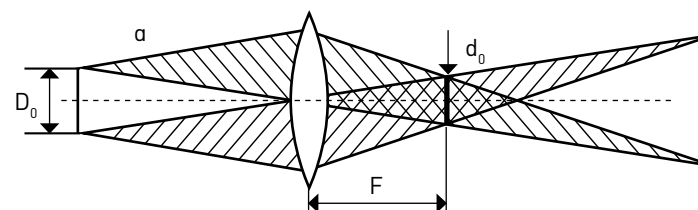


Рисунок 85 – Принципиальная схема телецентрической модели лазерного источника фокальное пятно $d_0 = \alpha F$; глубина резкости $l = 2d_0 F/D_0$; теоретические пределы $d_0 = \lambda F/D_0 \approx \lambda$; $L \approx 2d_0^2/\lambda \approx 2d_0$;

ОСОБЕННОСТИ ФОКУСИРУЮЩЕЙ ТЕХНИКИ

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

Уменьшение размера пятна может быть достигнуто размещением перед объективом телескопического расширителя пучка с увеличением Γ^{13} – снижение расхождения в Γ раз.

К недостаткам фокусирующей техники можно отнести:

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

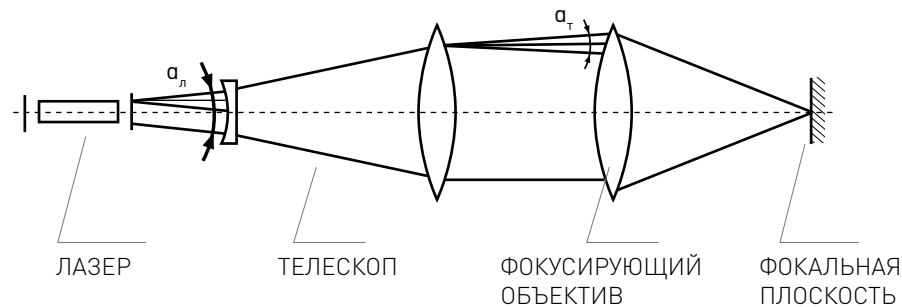


Рисунок 86 – Принципиальная схема уменьшения фокального пятна с помощью телескопической системы

13. Линейное увеличение или увеличение линзы – изображение, получаемое с помощью линзы, обычно отличается своими размерами от предмета. Различие размеров предмета и изображения характеризуют увеличением. Линейным увеличением называют отношение линейного размера изображения к линейному размеру предмета. Линейное увеличение $\Gamma = H/h$, где H – высота изображения; h – высота предмета. Увеличение линзы равно отношению расстояния от изображения до линзы к расстоянию от линзы до предмета $\Gamma = |f|/|d|$, где f – фокусное расстояние, т.е. расстояние от изображения до линзы; d – расстояние от линзы до предмета.

СКАНИРУЮЩИЕ СИСТЕМЫ А-ТИПА ДЛЯ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

Системы А-типа представляют собой системы, в которых поверхность обработки расположена в фокальной плоскости линзы, т.е. сканирование происходит с прямоугольной развёрткой.

Принципиальные схемы сканирующих систем А-типа

Рисунок 87

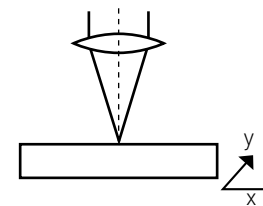


Рисунок 89



Рисунок 88

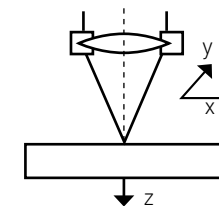


Рисунок 90

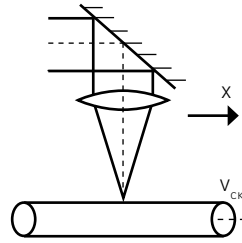


Рисунок 87 – Принципиальная схема двумерного сканирования на координатном столе

Рисунок 88 – Принципиальная схема трёхмерного сканирования – «летающая» оптика для послойного лазерного синтеза

Рисунок 89 – Принципиальная схема шести координатной $(x, y, z, \varphi, \psi, X)$ роботизированной микрообработки, которая осуществляется путём помещения волоконно-оптического кабеля в держатель промышленного манипулятора

Рисунок 90 – Принципиальная схема двумерной развёртки для офсетной печати

Точность сканирующих систем А-типа

Для обеспечения стабильного качества при микрообработке необходимо обеспечивать постоянство мощности лазера P , для чего необходимо постоянство плотности потока мощности и скорости сканирования пучка $V_{ск}$.

Это особенно важно при обработке образцов сложной формы с высокой скоростью, так как в этом случае крайне сложно поддерживать постоянную скорость на прямых линиях и на крутых поворотах. Если $V_{ск}$ изменяется, то трудно поддерживать постоянство мощности лазера при отсутствии контроля мощности непрерывного лазера.

Таким образом, только импульсные лазеры могут обеспечить постоянную плотность потока мощности в обрабатываемой зоне и стабильное качество лазерной микрообработки.

СКАНИРУЮЩИЕ СИСТЕМЫ Б-ТИПА ДЛЯ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

Системы Б-типа представляют собой системы, в которых только центральная точка обрабатываемой поверхности находится в фокальной плоскости линзы, т.е. это сканирующие системы с угловым отклонением пучка.

Принципиальные схемы сканирующих систем Б-типа

Отличительной особенностью систем такого типа является увеличение поля обработки и разрешающей способности или уменьшение диаметра фокального пятна.

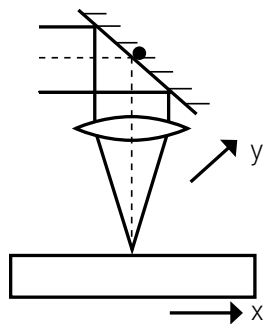


Рисунок 91 – Принципиальная схема сканирующей системы с одномерным угловым отклонением

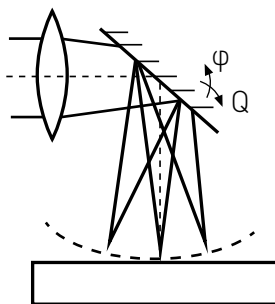


Рисунок 92 – Принципиальная схема двумерной сканирующей системы с внешней линзой

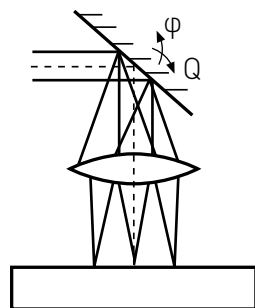


Рисунок 93 – Принципиальная схема двумерной сканирующей системы типа линзы с «плоским полем»

ПРОЕКЦИОННЫЕ СХЕМЫ ДЛЯ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

Микропроеекционный метод

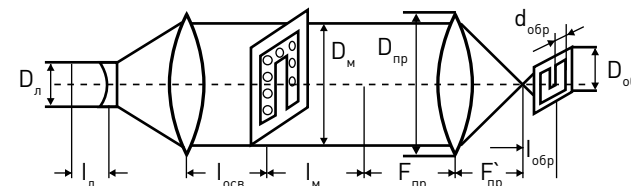


Рисунок 94 – Принципиальная оптическая схема микропроеекционной системы

Контактная или теневая схема

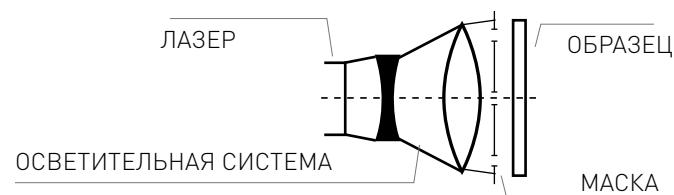


Рисунок 95 – Принципиальная оптическая схема контактных или теневых методов формирования изображения

Активный проекционный метод

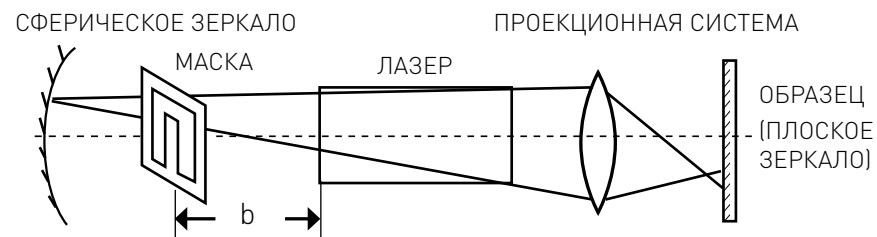
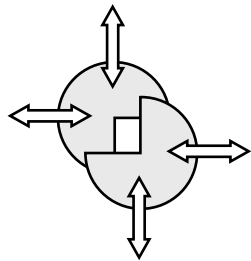


Рисунок 96 – Принципиальная оптическая схема активного проекционного метода

КОМБИНИРОВАННЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

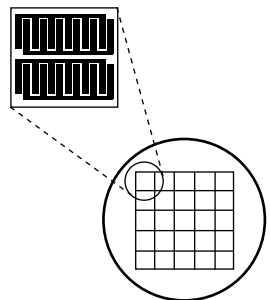
На практике большое распространение получили комбинированные методы формирования изображения, когда элемент изображения строится методом оптической проекции, а поле обработки перекрывается сканированием пучка (например, перемещением стола). К таким методам относятся мультиплицирование изображения и фотонабор,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



Принцип метода синтеза или фотонабора

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

Рисунок 97 – Принципиальная схема метода фотонабора



Метод мультиплицирования или размножения

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

Рисунок 98 – Принципиальная схема метода мультиплицирования или размножения

Проекционно-сканирующий метод

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

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

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

Достоинствами контурно-проекционного метода формирования оптического изображения являются:

- независимость размеров общего поля изображения от разрешающей способности;
- высокая точность рисунка вследствие использования элемента, образующего изображение, прямоугольной формы и равномерности распределения в нём энергии;
- высокая разрешающая способность;
- небольшие потери энергии на маске.

Положение маски в плоскости изображения выходного окна лазера не является единственно возможным. Иной принцип построения осветительных систем – использование телескопа или расположение маски вблизи фокальной плоскости осветительной системы.

Преимуществами таких осветительных систем являются:

- небольшие габаритные размеры;
- более равномерное распределение интенсивности излучения.

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

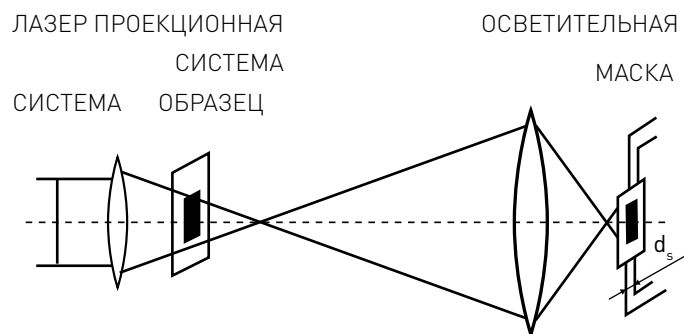


Рисунок 99 – Принципиальная оптическая схема контурно-проекционного метода

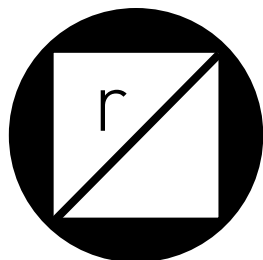


Рисунок 100 – Схема расположения квадратной маски в пучке круглого сечения

Преимущества проекционно-сканирующего метода:

- высокая энергетическая эффективность;
- отсутствие противоречия между разрешающей способностью и полем изображения.

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ДОСТАВКИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ (ВОС)

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

Выходная апертура¹⁴ волокна составляет 0,22. Требуется её согласование с лазером (ввод) и объектом (фокусировка).

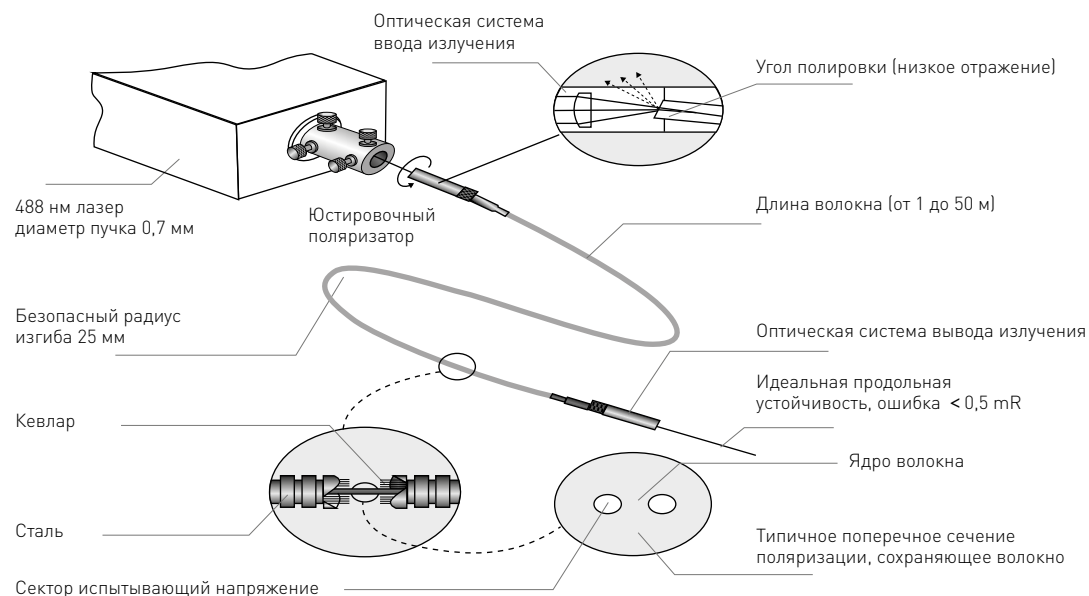
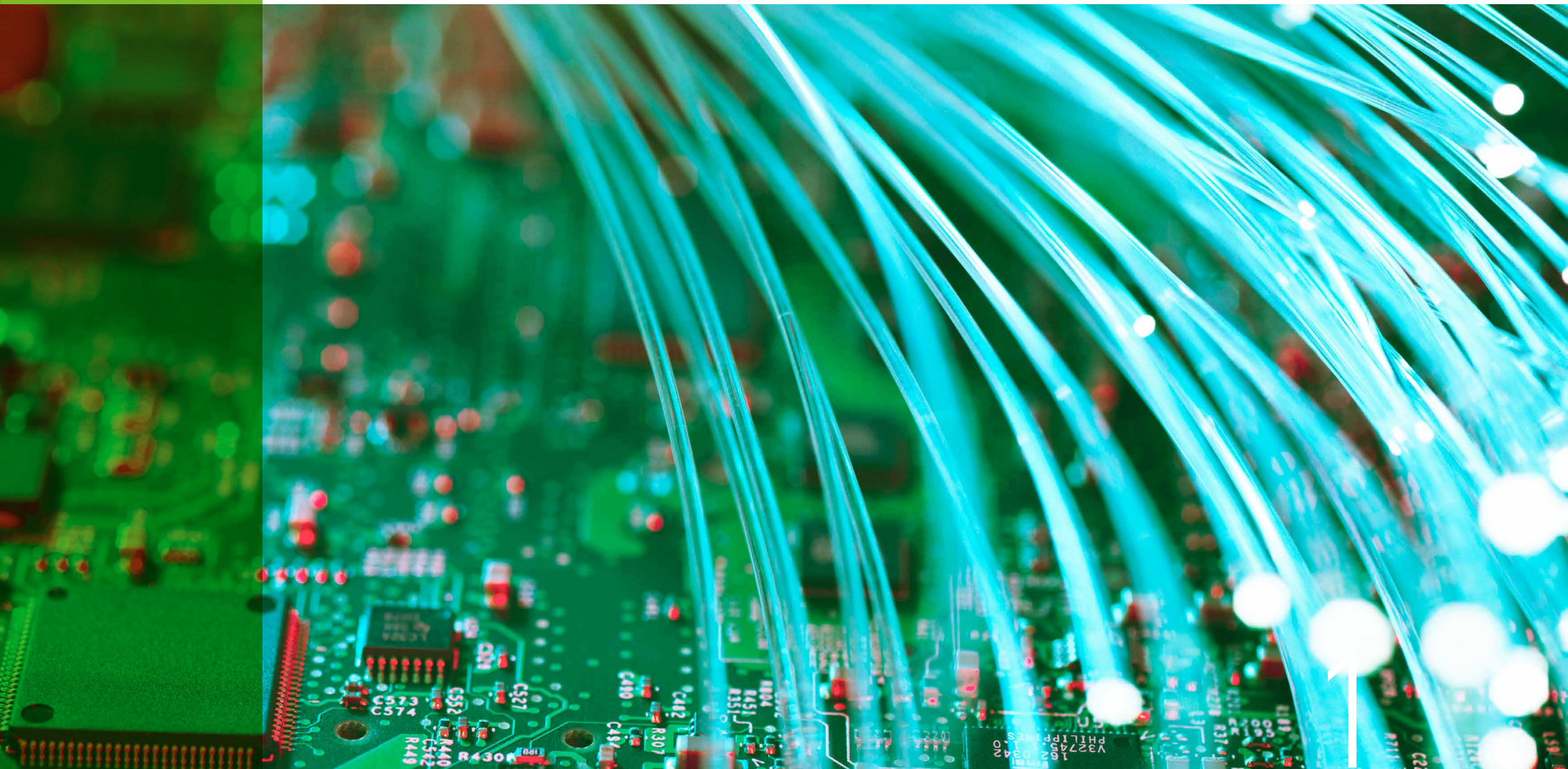


Рисунок 101 – Принципиальная схема волоконно-оптической системы доставки лазерного излучения

14. Апертура (лат. *apertura* – отверстие) в оптике – характеристика оптического прибора, описывающая его способность собирать свет и противостоять дифракционному размытию деталей изображения, т.е. действующее отверстие оптического прибора, определяемое размерами линз или диафрагмами. В зависимости от типа оптической системы эта характеристика может быть линейным или угловым размером. Как правило, среди деталей оптического прибора специально выделяют так называемую апертурную диафрагму, которая сильнее всего ограничивает диаметры световых пучков, проходящих через оптический инструмент. Часто роль такой апертурной диафрагмы выполняет оправка или края одного из оптических элементов (линзы, зеркала, призмы).



7

ПРИМЕНЕНИЕ ФОТОНИКИ

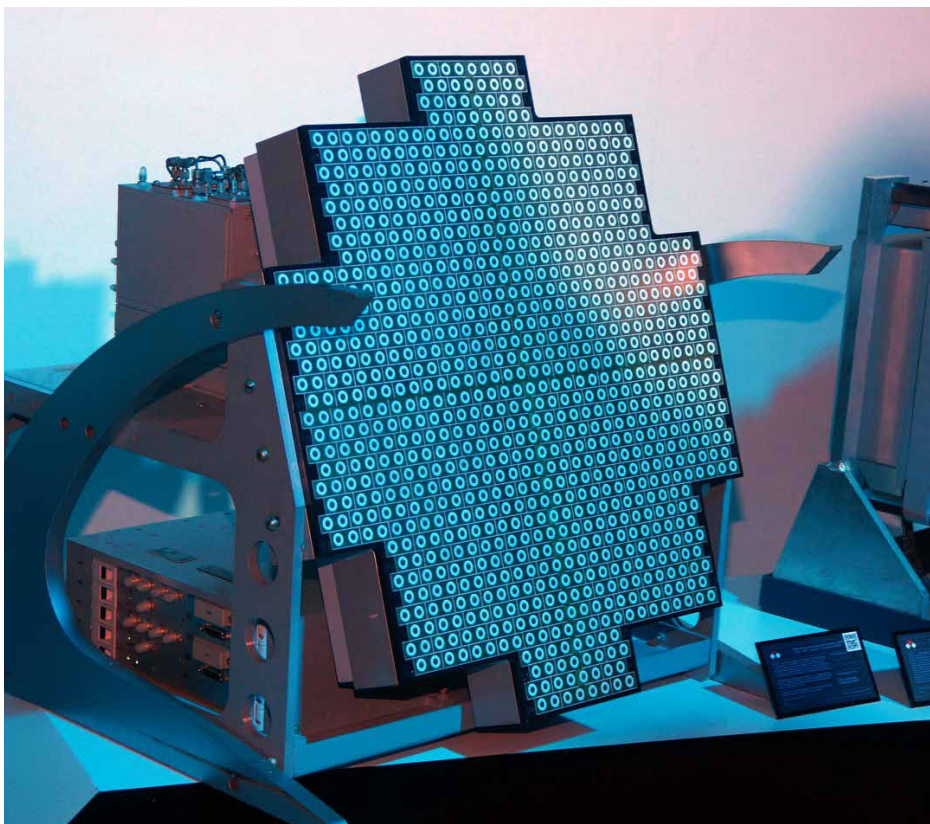


Рисунок 102 – Первый прототип радара на дискретных радиофотонных элементах

Российские учёные внесли фундаментальный вклад в становление фотоники. Подтверждением тому является присвоение Александру Прохорову, Николаю Басову и Жоресу Алферову Нобелевской премии.

На Западе фотоника обозначают термином MWP - microwave photonics, в России по предложению академика РАН Юрия Гуляева принят термин «радиофотоника».

Радиофотоника использует как классические, так и квантовые свойства электромагнитных волн коротковолновых диапазонов, в частности светового, что позволяет преодолеть принципиальные физические ограничения традиционной электроники. В её основе – модуляция лазерного излучения радиосигналом с дальнейшим преобразованием уже в оптическом диапазоне. Радиофотонные методы позволяют улучшить функциональное построение аппаратуры нового поколения, снять многие проблемы электромагнитной совместимости, в тысячу и более раз поднять скорость и объем передачи информации, на порядок снизить вес, габариты и энергопотребление.

Новый этап развития радиофотоники имеет в своем фундаменте технологии фотоники и микроэлектроники. Однако радиофотонные технологии создаются уже на новых физических принципах, требующих прежде всего больших затрат на исследования физических явлений, получения новых знаний, применения нового оборудования и материалов, измерительной техники, повышения квалификации кадров. В совокупности это означает переход промышленности на 6-7-й технологический уклад, что сравнимо с новой промышленной революцией.

Для этого будет необходимо освоить массовый выпуск редкоземельных материалов группы АЗВ5 (арсениды галлия), а также фосфида индия, кремния с различными добавками германия или других присадок. Именно они обеспечивают конвертацию фотонов в электроны, а электронов – в фотоны.

Разработки в области радиофотоники идут по нескольким направлениям. В НИИ дальней радиосвязи собран прототип радиофотонного радара. Это радиолокационная станция (РЛС) X-диапазона с оптическим гетеродином*, который может перестраиваться в широчайшем диапазоне радиоволн – от метровых частот до миллиметровых. Именно способность радиофотонных радаров мгновенно перестраиваться в широчайшем диапазоне частот изменит всю технологию радиолокации, в том числе построение различных комплексов РЛС.

Сейчас все радарные системы – военные и гражданские – работают в строго определенном диапазоне радиочастот, что снижает их функциональные возможности.

В метровом диапазоне хорошо видны даже так называемые самолёты-невидимки, точные их координаты лучше выдают станции сантиметрового и миллиметрового диапазонов. Чем меньше частота, тем точнее измерение. А фотонный радар в длинном частотном диапазоне, сканируя пространство, засечет ту же «невидимку» и, мгновенно перестроившись на низкую частоту, определит ее точные координаты по высоте и дальности.

Применение радиофотонных технологий позволит отображать на экране монитора радиолокатора не просто светящуюся отметку цели, а её реальную конфигурацию. То есть операторы РЛС будут видеть, что именно летит за тысячи километров - ракета, самолет, стая птиц или какое-нибудь космическое тело.

Современные радары создают в зоне своего действия радиоэлектронное излучение, которое, отражаясь от объектов, возвращается и передает сигнал на принимающую аппаратуру. Эта технология не менялась уже много десятилетий. Радиофотонные локаторы работают с использованием оптического тракта обработки сигнала со сверхширокой полосой пропускания, и это позволяет получить целый ряд преимуществ:

- габариты таких радаров меньше существующих;
- надежнее и более устойчивы к электромагнитным излучениям;
- кроме того, у перспективных локаторов повышена разрешающая способность и помехозащищенность;
- позволяют не просто обнаружить цель и определить параметры ее полета, но и составить трехмерный портрет объекта, чтобы определить его тип.

РАЗВИТИЕ РАДИОФОТОНИКИ В РОССИИ

Основными мировыми трендами, задающими вектор развития современных технологий, признаны Big Data и конвергенция фотоники, в том числе и радиофотоники, с компьютерными технологиями и биотехнологиями, т.к. информации становится все больше, а традиционные каналы связи для передачи данных уже крайне перегружены, их пропускных способностей не хватает. Поэтому рынок ставит перед учёными задачи, тесно связанные с фотонными технологиями, первая из которых заключается в интеграции оптических систем в среды для передачи, обработки и хранения информации.

Квантовая технология представляет собой качественно иной способ хранения и обработки информации. Высокий интерес к ней основан на возможности революционного, а не эволюционного скачка в информационных технологиях – например, решения проблемы Big Data. Несмотря на значительное число предложенных теоретических моделей и разработанных экспериментальных макетов, возможность широкого практического использования квантовых технологий остается неопределенной, по крайней мере в ближайшие 10–20 лет.

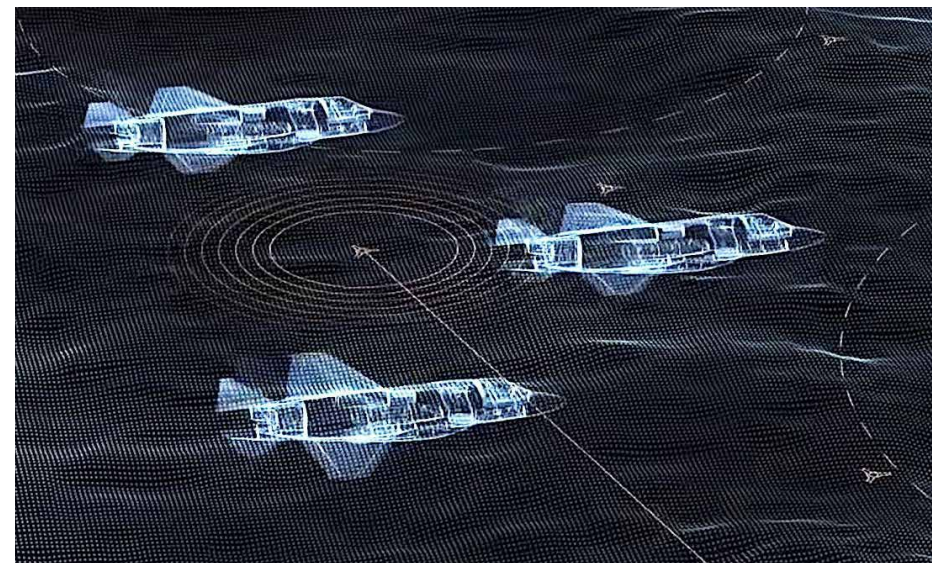


Рисунок 103 – Трёхмерный портрет объекта, полученный с помощью радара на дискретных радиофотонных элементах

В настоящее время переход на технологии, основанные на использовании фотоники, является одним из основных трендов в современных коммуникациях и высокопроизводительных вычислениях. Все задачи, рассматриваемые этим направлением, можно разбить на две тесно связанные категории:

- квантовую коммуникацию;
- квантовые вычисления.

Из всех приложений квантовых технологий на сегодняшний день наиболее развитыми являются технологии квантовых коммуникаций. Применение квантовых эффектов в телекоммуникациях открывает новые возможности по созданию защищенных каналов связи.

Однако системы квантовых коммуникаций еще не окончательно готовы к внедрению в телекоммуникационные сети, поскольку не найдены эффективные решения целого ряда практически важных задач.

В области квантовых вычислений на настоящий момент существует лишь ограниченное число алгоритмов, направленных на решение вычислительно сложных задач. В ближайшие 10 лет ожидается дальнейшее развитие квантовых алгоритмов для обработки большого объема данных, машинного обучения, поиска информации.



РЫНОК ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ФОТОНИКИ

МИРОВОЙ РЫНОК ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ФОТОНИКИ

Мировой рынок фотоники составляет сегодня около 500 миллиардов долларов в год, темпы его ежегодного роста – 7–8%.

Мировым лидером развития радиофотоники являются США. К 2003 году там были получены принципиально новые решения по созданию твердотельных сверхвысоко-частотных и сверхширокополосных оптоэлектронных устройств, и компонентов, в которых большая часть преобразований и обработки сигналов производится в оптическом диапазоне. Исследовательские подразделения корпораций «Нортроп-Грумман», «Локхид-Мартин», «Боинг», «Рейтеон», IBM, а также специализированные фирмы создали не только компонентную базу радиофотоники, но и демонстраторы финальной продукции: РЛС и комплексы радиоэлектронной разведки, радиоэлектронной борьбы, связи, головки самонаведения.

В США радиофотоника патронируется государством и финансируется за счёт сегмента IT Electronics Национальной нанотехнологической инициативы, включающей 15 направлений научно-технического развития. Кроме того, с 2012 года радиофотоника развивается в рамках Национальной инициативы в области фотоники. Для ее реализации в Рочестере в 2015 году был создан головной институт – Интегрированный институт фотоники для инноваций в промышленности.

В Евросоюзе фотоника (с радиофотоникой) признана одной из семи ключевых технологий (key enabling technologies). В Европейской комиссии создано специальное подразделение для координации усилий стран ЕС в части развития фотоники, организована Технологическая платформа ЕС Photonics21. На поддержку программ и проектов, рекомендованных этой платформой (НИОКР и создание необходимой инфраструктуры), ежегодно из бюджета ЕС выделяется около 100 миллионов евро (финансирование фотоники было предусмотрено отдельной строкой в 7-й Рамочной программе Евросоюза и продолжается в рамках Стратегии HORIZON 2020). В результате средние темпы роста объемов производства фотоники в ЕС в последние пять лет составляют 8–10% (несмотря на рецессию экономики), а годовой объем производства продукции фотоники в ЕС еще в 2011 году достиг 62 миллиардов евро. В этой отрасли в Евросоюзе работает около 400 тысяч человек. Больше всего – в Германии, Великобритании, Франции, Нидерландах, Италии и Швейцарии. От технологий фотоники непосредственно зависит 25% всей европейской экономики и 10% всех работающих (около 30 миллионов рабочих мест).

В Китае действует специальная государственная целевая программа, которая за 12 лет привела к созданию около 5000 предприятий лазерно-оптической специализации и к росту объема производства продукции фотоники в среднем на 25–30% в год (в 2012 году – около 63 миллиардов долларов). В результате в 2015 году Китай стал мировым лидером по объему производства фотоники. Главными направлениями развития фотоники там являются телекоммуникации (в частности, на Китай приходится сегодня

60% мирового объема производства оптоволокон), медицинские технологии (80% всех медицинских учреждений КНР с числом пациентов более 200 уже имеют специальные отделения лазерной диагностики и/или лечения), новые производственные технологии. Кроме того, в Китае активно развивается оборонная фотоника.

Об экономическом эффекте, обеспечиваемом фотоникой, можно судить по таким примерам:

- 1 | Внедрение лазерно-оптических технологий ранней диагностики заболеваний и малоинвазивного лечения позволяет заметно сократить продолжительность госпитализации больных, увеличить эффективность лекарственного лечения. Согласно оценкам японских экспертов, это сокращает расходы страны на лечение на 20%, годовой экономический эффект в мире – не менее 400 млрд. долл. (затраты на здравоохранение только в США в 2004 г. составили 1,8 трилл. долл., а в Германии – 250 млрд. долл.). Рынок медицинской фотоники в 2010 г. составил 20,4 млрд. долл. и на 2015 прогнозируется около 40 млрд. долл.
- 2 | На освещение сегодня тратится 10-15% всего мирового производства электроэнергии, в денежном выражении – около 325 млрд. долл. В ближайшие 20 лет этот объём должен увеличиться вдвое – если не будут приняты радикальные меры, не произойдёт переход к новым системам освещения. Освоение светодиодной техники, которая к 2015 г. должна иметь эффективность около 150 лм/Вт, позволит снизить энергозатраты на освещение не менее, чем на 30%, а к 2025 г. – на 50%. Эти оценки сделаны без учёта затрат на борьбу с загрязнениями, обусловленными производством электроэнергии и утилизацией массово используемых сегодня светильников, учёт таких затрат ещё более повышает экономическую эффективность освоения современной фотоники в освещении.
- 3 | В микроэлектронике производство чипов без технологий фотоники (литография, контроль поверхностных слоёв и структуры поверхности и др.) практически невозможно, и роль этих технологий растёт с уменьшением минимального размера элемента на чипе. Согласно данным 2000 – 2005 г.г., выпуск производственного оборудования фотоники на 1 млн. долл. обеспечивает производство инновационной продукции для конечного пользователя на 1 млрд. долл. (мобильные телефоны, цифровые камеры, автомобили с кузовом из алюминиевых сплавов и т.д.).

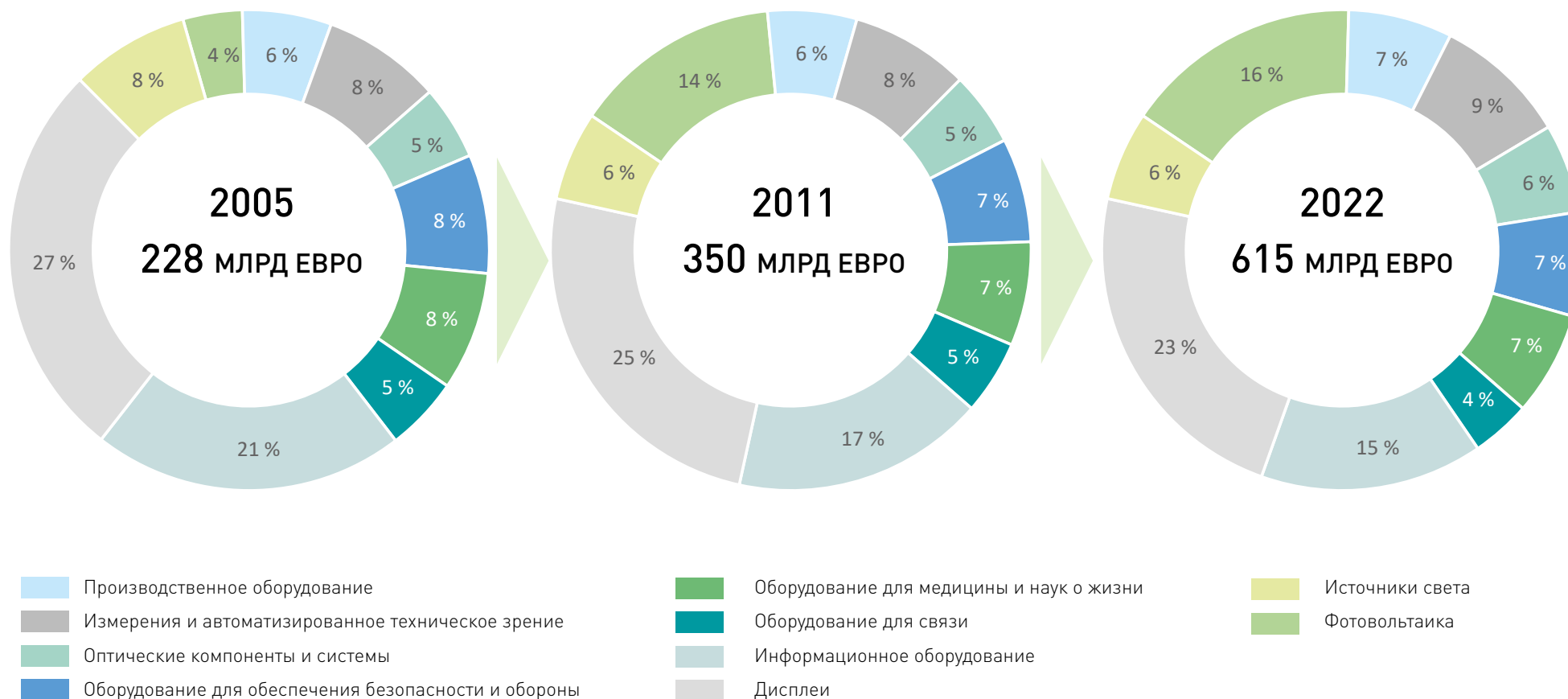


Рисунок 104 – Динамика роста рынка фотоники и динамика изменения сегментов её применения. Источник: [33]

Мировой рынок фотоники

Методы и технологии, созданные в области фотоники, нашли сегодня широчайшее практическое применение. Мировой рынок фотоники удвоился: 2005 г. – 228 млрд евро, 2011 г. – 350 млрд евро, 2015 г. – 447 млрд евро. На 2022 г. для фотоники в целом прогнозируется объем продаж более 730 млрд долл. Средний темп роста продаж продукции фотоники на мировом рынке в последние 10 лет – 7% в год, в Китае – 20%. Рост вызван как расширением использования уже известных технологий (например, продажи лазерного технологического оборудования (ЛТО) за 2017 г. выросли более чем на 8%), так и появлением новых технологий, очень быстро осваиваемых (например, лидарное управление беспилотным транспортом, прежде всего автомобилями). На освещение сегодня тратится 10-15% всего мирового производства электроэнергии, в денежном выражении – около 325 млрд долл. в год. В ближайшие 20 лет этот объем должен увеличиться вдвое, если не будут приняты радикальные меры, не произойдет переход к новым системам освещения. Освоение светодиодной техники позволяет снизить энергозатраты на освещение не менее чем на 30% уже к 2022 г., а к 2025 г. – на 50%. Общий объем производства продукции фотоники в России за 2017 г. составил более 74 млрд руб. Производителями лазерной, оптической и оптоэлектронной продукции является около 230 организаций. Более 60% таких организаций – малые предприятия. Производством продукции фотоники на российских предприятиях занимаются в общей сложности около 38,5 тыс. чел. Доля экспорта в общем объеме продаж продукции фотоники российского производства составила в 2017 г. 20%.

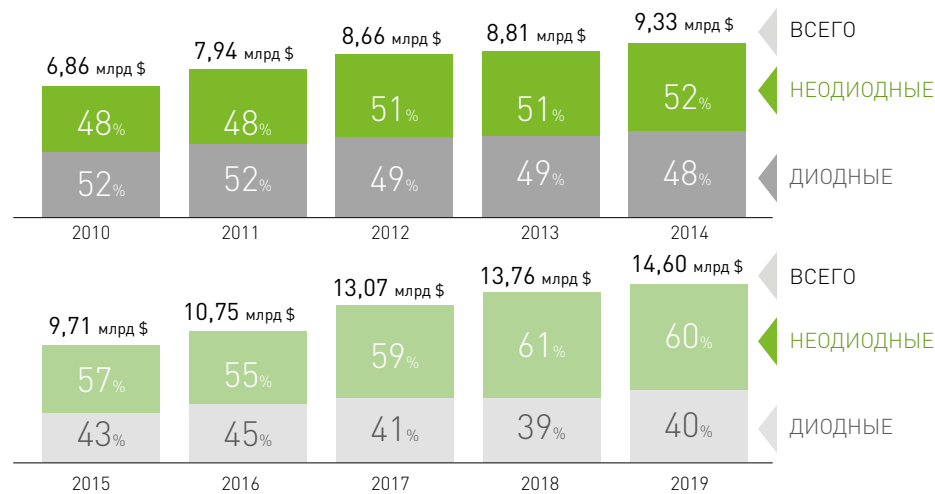


Рисунок 105 – Динамика мирового рынка лазеров в 2010-2019 гг., млрд. долл. США. Источник: [37]

Состояние рынка лазеров

Продажи лазеров за десятилетие удвоились, достигнув в 2018 году 13,76 млрд долл. Объем продаж лазеров в 2019 году ожидается на уровне 14,6 млрд долл. Наибольший скачок продаж был в 2016/2017 годах – с 10,75 до 13,07 млрд долл., который авторами объясняется увеличением спроса на них в бытовой электронике и в промышленности – для обработки материалов, а также в развивающемся секторе лидаров для беспилотного транспорта. Большой риск для производителей лазерной техники представляет рост тарифов. Из-за него отметили снижение продаж в компании Trumpf (4,13 млрд долл. в 2018 г.), где опасаются дальнейшего увеличения пошлин из-за торговой войны между США и Китаем и Брекзита. Спада продаж в 2019 г. из-за роста американских пошлин на товары, произведенные в Китае, ожидают и в компании Coherent, поглотившей в 2017 г. Rofin и сохраняющей позиции одного из лидеров лазерного рынка (1,9 млрд долл. в 2018-м финансовом году). Производителем лазеров с объемом продаж более 1 млрд долл. в год является китайская компания Han's Laser (1,65 млрд долл. в 2017 г.). Здесь тоже ощутили замедление роста продаж. Рост ВВП в США, Великобритании, Франции и Германии за 2017 год составил соответственно 2,2, 1,7, 2,3 и 2,5%, но ясно, что наиболее интересен сегодня для производителей лазерной техники рынок Китая. Китайская экономика перестает быть ориентированной на сталь и бетон, ее драйверами становятся потребительский спрос и передовые технологии. Несмотря на то, что годовой рост ВВП Китая меньше 7%, индустрия фотоники развивается здесь гораздо более высокими темпами.

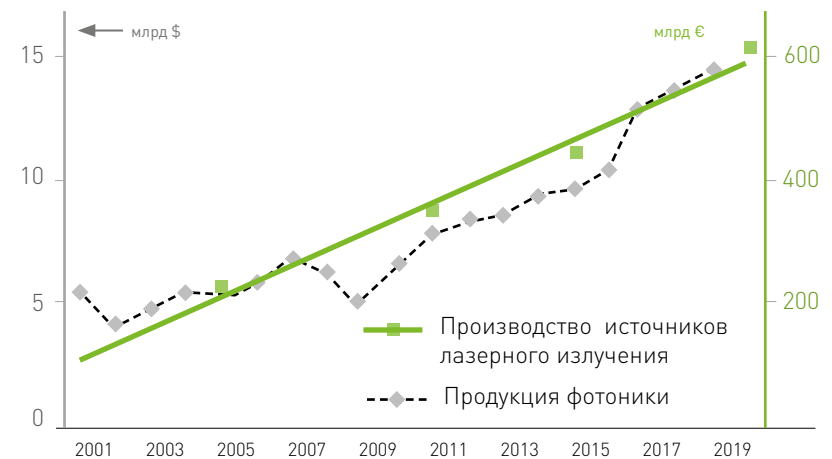


Рисунок 106 – Динамика роста мирового объема производства источников лазерного излучения. Источник: [34]

Сегменты лазерного рынка

Сектор обработки материалов с 2015 года лидирует, обогнав сектор коммуникаций в 2018 году почти в 2 раза. Продажи оборудования для обработки материалов продолжают страдать из-за внешних по отношению к лазерной промышленности причин – пошлин и макроэкономических проблем, давления США на КНР. Несмотря на колебания глобальной экономики, спрос на лазеры для систем телекоммуникаций останется высоким во всем обозримом будущем. По данным аналитиков, глобальный трафик Интернета удваивается каждые 3 года, и со 100 экзабайт в месяц в 2017 г. он по прогнозам вырастет до 200 экзабайт в месяц в 2022-м.

Научно-техническая область, которую называют «лазерами для научных исследований и военных применений», включает в себя наиболее сложные на данный момент передовые с точки зрения достижений физики и техники лазеров источники лазерного излучения, – такие, как генераторы предельно коротких импульсов, перестраиваемые по частоте оптические параметрические генераторы и усилители, источники суперконтинуума, частотных гребенок (комбов) и др. Часто такие источники потом становятся прототипами промышленных лазеров.

По мнению руководителей Фраунгоферовского института прикладной оптики и прецизионного инжиниринга (Йена, ФРГ), в 2019 году будет продолжаться увеличение разнообразия предлагаемых рынку волоконных лазеров. Появление новых активных волокон и схем, например, когерентного суммирования, позволяет расширить диапазон длин волн генерации в таких лазерах и увеличить достигаемые мощности излучения, как в непрерывном, так и в импульсном режимах, сохраняя высокое качество лазерного пучка и наивысший КПД.

Наиболее интересны сегодня так называемые вторичные источники на основе волоконных лазеров, генерирующие излучение в экстремальном ультрафиолете (EUV) или в терагерцовом диапазоне – они открывают возможности новых применений лазеров

Частотные гребенки (комбы) сегодня используются в различных научных исследованиях, включая решение задач спектроскопии, квантовой криптографии, точного измерения времени. Первые генераторы комба уже появились на рынке, и число коммерчески доступных их версий быстро растет, т. к. спрос на них появился и со стороны научных организаций, и в метрологии, и в сенсорике. В мае 2018 г. исследовательская лаборатория ВВС США опубликовала запрос на информацию о прорывных исследованиях в натриевых лазерах-маяках с мощностью

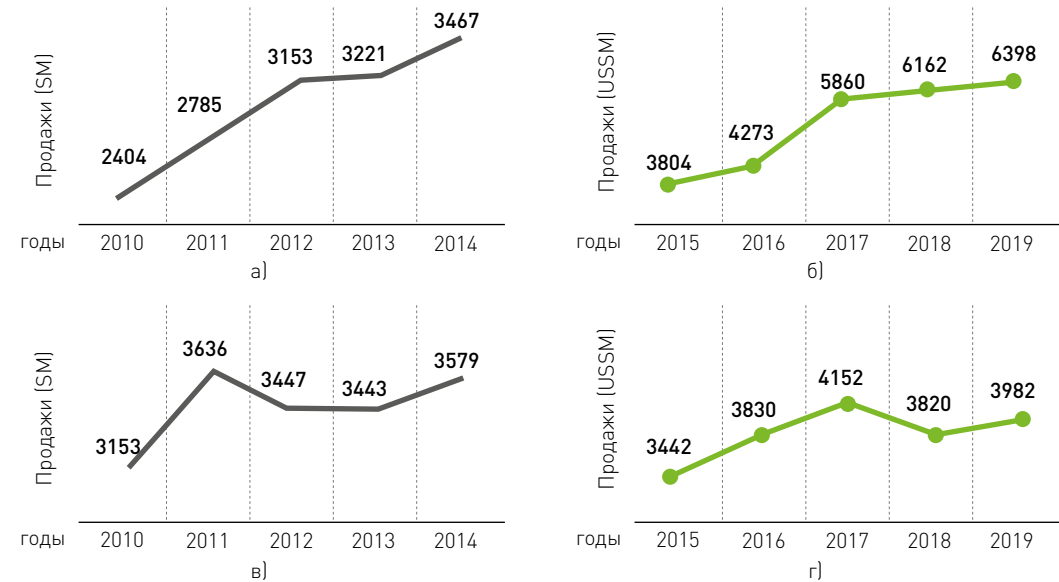
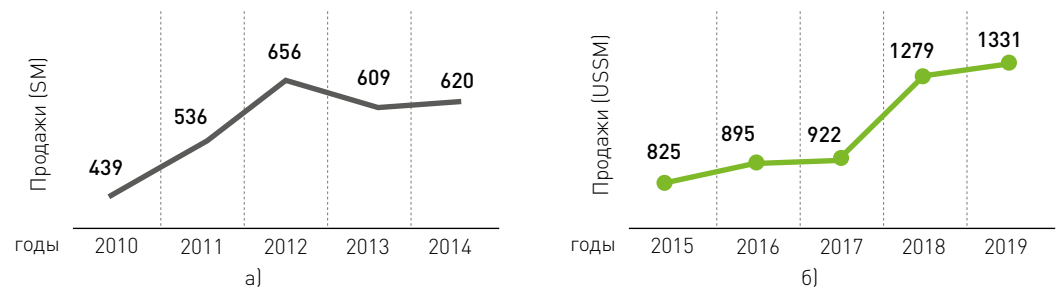


Рисунок 107 – Динамика роста продаж сектора обработки материалов и литографии, млн долл. США: а) и б) 2010-2019 гг., и сектора коммуникаций и оптической памяти: в) и г) 2010-2019 гг. Источник: [36, 37]



Источники: [36, 37]

Рисунок 108 – Динамика роста продаж сектора научных исследований и военных применений, млн долл. США: а) и б) 2010-2019 гг. Источник: [36, 37]

более 50 Вт. С тех пор они увеличили желаемую мощность лазера > 75 Ватт.

Air Force's Starfire Optical Range помогает ученым совершенствовать адаптивную оптику не только для астрономических наблюдений, но и для усиления фокуса мощных лазеров с высоким разрешением для спутниковой визуализации, а также для противоспутникового оружия и релейных зеркальных систем.

Попытка создать лазеры мегаваттного класса для ПРО, предпринятая много лет назад, закончилась закрытием проектов. Сегодня наличие большого разнообразия мощных лазеров (появившихся в результате работ по мощным лазерам для обработки промышленных материалов) позволяет военным снова заниматься лазерным оружием. Так, ВМС США заказали компании Lockheed Martin 65-киловаттный боевой лазер с возможностью наращивания мощности излучения до 150 кВт (проект HELIOS); на армейском полигоне White Sands в Нью-Мексико идут испытания 50-киловаттного мобильного лазера HELMITT, мощность которого к 2022 г. планируется увеличить до 100 кВт, а ВВС США работают над лазерным вооружением самолета. Мировой сенсацией был представленный В. В. Путиным в марте 2018 года российский боевой лазер «Пересвет».

Компании, выполняющие крупные военные заказы на лазерную технику, получили в последние годы миллиардные доходы: Lockheed Martin – 3,8 млрд долл. в 2016-м и 1,9 млрд в 2017-м, Northrop Grumman – 2,2 млрд долл. в 2016-м и 2,015 млрд долл. в 2017-м. Объем продаж компании «Il-VI», изготавливающей высокоэнергетические лазерные системы для военных, составил в 2017 г. 972 млн долл., а в 2018-м – уже 1,159 млрд долл.

Суммарный объем продаж лазеров в сегменте «научные исследования и военные применения» вырос с 439 млн долл. до 922 млн долл. в 2017 г., а затем резко увеличился до 1,279 млрд долл. в 2018-м. На 2019 год прогнозируется 1,331 млрд долл.

2018-й был удачным годом для продаж медицинских лазеров. Большой спрос был на аппаратуру для косметических и дерматологических процедур, особенно в Азии. Расширялось применение этой аппаратуры для удаления татуировок, шрамов и нежелательных волос, осветления кожи. Быстро росли продажи стоматологических лазеров – хотя по абсолютному объему они составляют лишь 6% от общей величины. Развивается применение лазеров в хирургии.

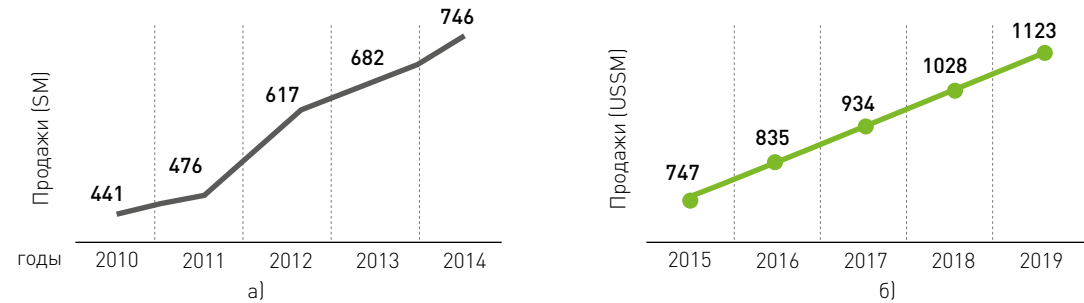


Рисунок 109 – Динамика роста продаж сектора медицинских и эстетических применений, млн долл. США: а) и б) 2010-2019 гг. Источник: [36, 37]

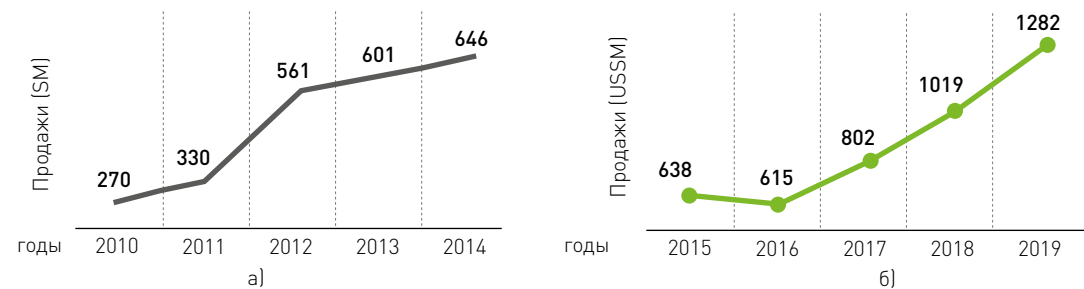


Рисунок 110 – Динамика роста продаж сектора приборов и сенсоров, млн долл. США: а) и б) 2010-2019 гг. Источник: [36, 37]

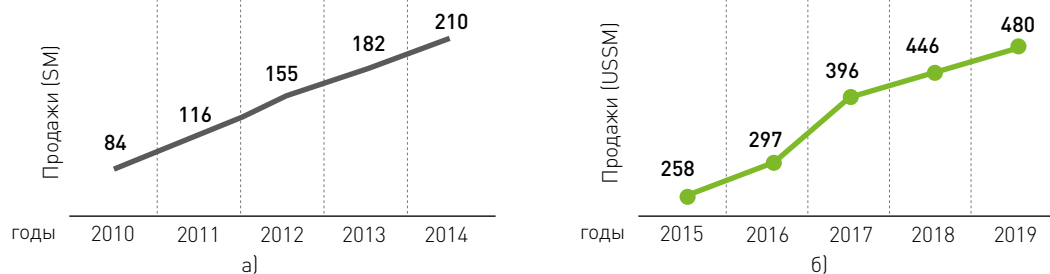


Рисунок 111 – Динамика роста продаж сектора развлечений, дисплеев и печати, млн. долл. США: а) и б) 2010-2019 гг. Источник: [36, 37]

Применение лазерных сенсоров, например, в компьютерных мышках, уже не вызывает особых эмоций. Сегодня имеется большое число гораздо более ярких примеров. Большие перспективы сегодня имеют 3D-сенсоры. Компания Apple уже встраивает их в свои новые айфоны и айпады. Если добавить еще и лидары для автомобильных транспортных средств, то становится понятным, что от этого сегмента лазерного рынка следует ожидать весьма существенного роста.

Есть еще большое количество узких (но требующих многих тысяч лазерных устройств) применений, например, неразрушающий контроль пластиков или композитов на основе углеродных нитей с помощью ТГц-излучения, а также встроенный контроль в непрерывных производственных процессах (измерение толщины слоя, контроль отверждения, расслоения и др.).

Хотя в секторе лазерных принтеров продажи держатся на одном уровне, а в секторе лазерных шоу темпы роста понемногу снижаются после рекордных достижений несколько лет назад, сектор лазерных дисплеев и проекторов только начинает по-настоящему раскрываться. После того, как лазерные источники излучения начали использовать в коммерческих кинопроекторах, выяснилось, что они обеспечивают более высокую яркость, являются энергетически более эффективными и требуют меньших эксплуатационных расходов. Переход от ксеноновых ламп к лазерам в кинотеатрах совпал с периодом бурного строительства новых кинотеатров в Китае, что обеспечило хороший рынок новой технике. Сегодня в Китае коммерческих кинотеатров с цифровым оборудованием уже больше, чем в США. Еще одно перспективное применение лазерных источников – автомобильные фары дальнего света. «Ауди» и «БМВ» такие уже ставят. По-видимому, лазеры в ближайшем будущем заменят светодиоды во многих применениях, относящихся к настоящему сегменту лазерного рынка.

В секторе литографии объем продаж лазеров в 2018 г. составил 1,104 млрд долл., и в 2019 г. был ощутимый рост до 1,237 млрд долл. Продажи лазеров для полупроводниковой промышленности сократились в 2019 г. примерно на 4%, но уже в 2022 г. ожидается рост продаж.

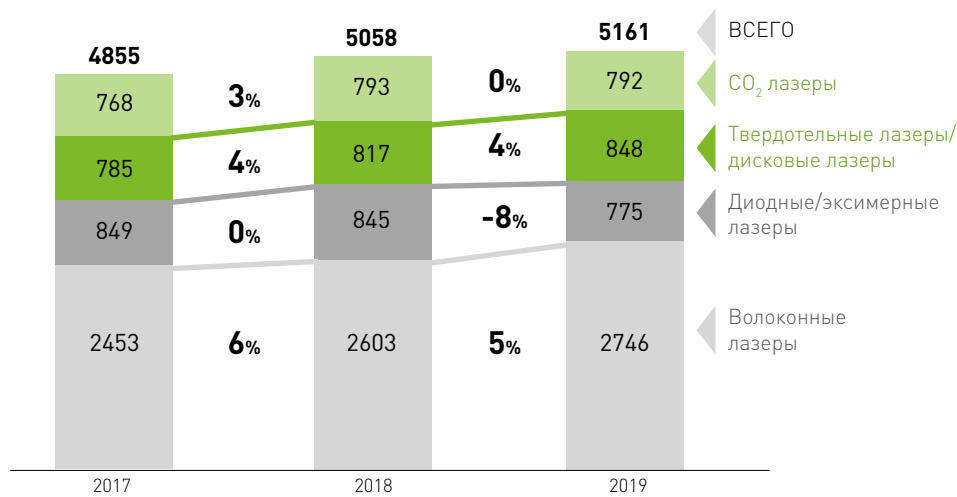


Рисунок 112 – Рынок промышленных лазеров по типам в 2017-2019 гг., млн. долл. США. Источник: [48]

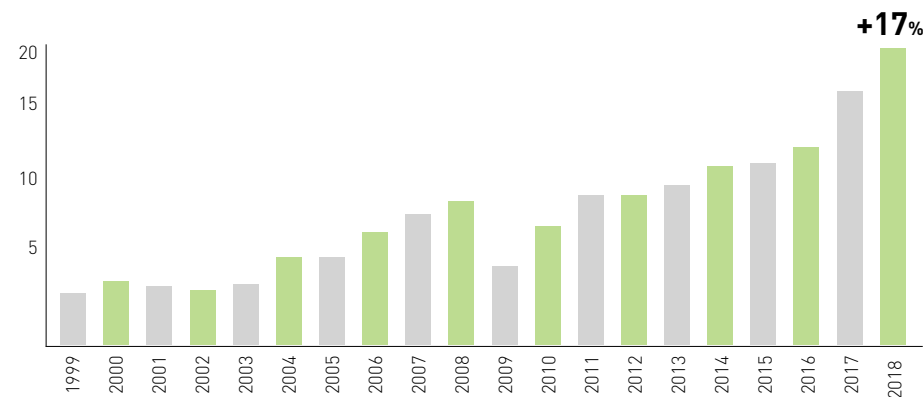


Рисунок 113 - Мировой рынок лазерных систем для обработки материалов в 1999-2018 гг., млрд. долл. США. Источник: [39]

Сектор обработки материалов

В годовых отчетах всех ведущих компаний, формирующих совместными усилиями около 80% сектора обработки материалов лазерного рынка, упоминаются «встречные ветры», мешающие росту и развитию, суммарный объем продаж промышленных лазеров поставил новый рекорд – 5,058–5,1 млрд. долл. США за 2018 г. В 2019 г. продолжился рост этого сектора лазерного рынка на 4%. Лидером продаж остаются мощные волоконные лазеры для резки металла, для которых прогнозируется увеличение сбыта на 4%. Мировой рынок лазерных систем для обработки материалов в 2018 году достиг рекордного объема в 19,8 млрд долл., при росте в 17%. Эксперты отмечают рост спроса в Европе и Китае на лазерные установки для прецизионной обработки металла и для обработки неметаллических материалов, вследствие распространения композитов в авиа- и автомобилестроении, но этот рост (примерно на 5% в 2019 г. по сравнению с 2018-м) вряд ли компенсирует спад в области обработки полупроводников и перенасыщенность рынка лазеров для аддитивных технологий.

Ожидается увеличение продаж УФ-лазеров, которые нашли новое применение в аддитивных технологиях, а также лазеров, генерирующих ультракороткие импульсы, которые все шире применяются для обработки материалов. Лазеры со сверхкороткими импульсами USP применяются для микросверления, при этом оптимизируется распределение плотности мощности лазерного излучения как в поперечном, так и в продольном сечениях лазерного луча. УФ-лазеры все шире применяются для маркировки неметаллов, пластика, кабелей.

На выставке ICALEO компания NUBURU сообщила о производстве синих лазеров мощностью до 500 Вт. для сварки в т. ч. меди, а также для аддитивных технологий, что говорит о большом потенциале их применения в обработке материалов.

На международной торговой ярмарке во Франкфурте в Германии компания Trumfр продемонстрировала систему аддитивного производства TruPrint 5000 с подогревом до 500°C, которая печатает компоненты из высокоуглеродистой стали и сплава титана без трещин и без больших деформаций. Компания также изготовила новый зелёный импульсный лазер, который позволяет печатать компоненты из чистой меди и драгоценных металлов.

Состояние рынка промышленных лазеров

В 2018 г. сказались два глобальных экономических фактора. С одной стороны, правительство Китая продолжало поддержку и создавало финансовые стимулы для активизации развития экспорта промышленных лазерных систем, а с другой стороны, во второй половине года усилились давление и развязанная США торговая война между странами. Китай является одним из крупнейших рынков промышленных лазерных систем. Около трети всех промышленных лазеров (в основном волоконных) были импортированы или произведены внутри Китая для создания нескольких тысяч машин лазерной резки листового металла – для внутреннего рынка или экспорта в ассоциацию стран Юго-Восточной Азии (ASEAN), Индию и все чаще – на западные рынки. Расширение китайского экспорта машин, интегрированного с внутренней IP-технологией и с инвестиционными фондами, затруднялось появившимися проблемами их финансирования. Около трети глобальной промышленной лазерной продукции было экспортировано в Китай Mechanical Engineering Industry Association (VDMA). Немецкий лазерный экспорт в Китай составлял более чем 30%. Несмотря на слабый рынок во второй половине года, 2018 год был еще одним рекордным годом в секторе продажи промышленных лазеров, на уровне \$5 млрд, в основном благодаря волоконным лазерам. Волоконные лазеры (в т. ч. ультрафиолетовые) доминируют на рынке промышленных лазеров начиная с 2013 г., когда их доходы впервые превысили продажи CO₂-лазеров.

В 2018 году волоконные лазеры вышли на уровень более 50% рынка промышленных лазеров. Мощные волоконные лазеры стали экономически более эффективной альтернативой мощным CO₂-лазерам для резки листового металла. Твердотельные лазеры, в том числе мощные дисковые, а также мощные диодные и эксимерные, были в 2018 г. на втором и третьем месте. Твердотельные лазеры сверхкоротких импульсов / Ultrashort-pulse (USP), УФ- и фемтосекундные лазеры пользовались повышенным спросом. В 2019 г. эти лазеры увеличили темпы роста продаж. Продажи эксимерных лазеров имели

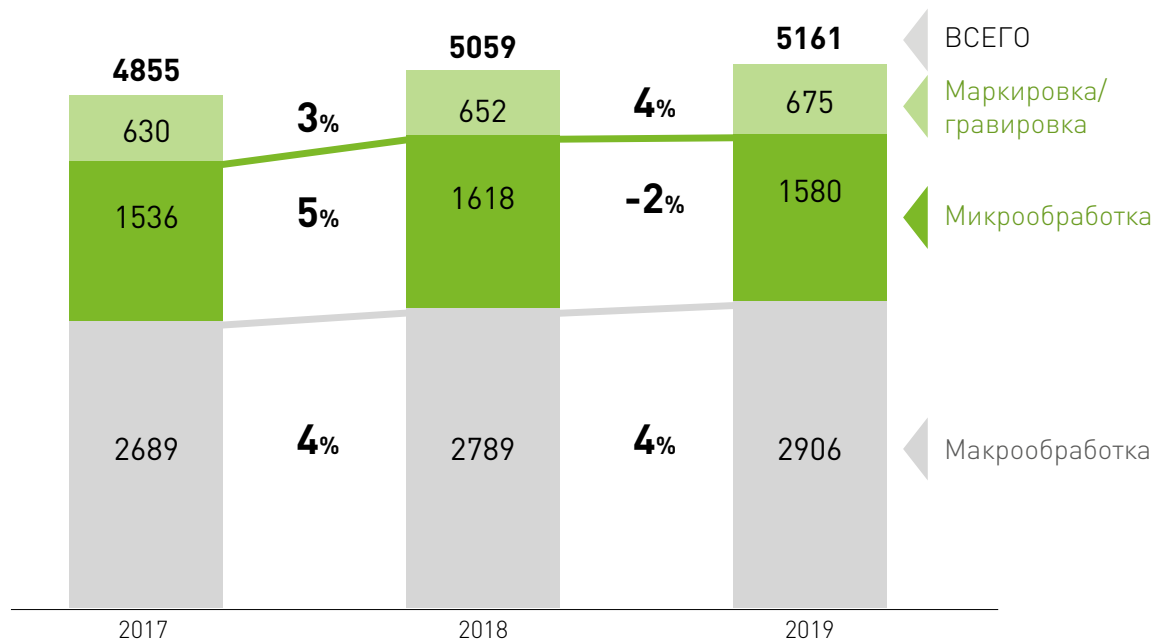
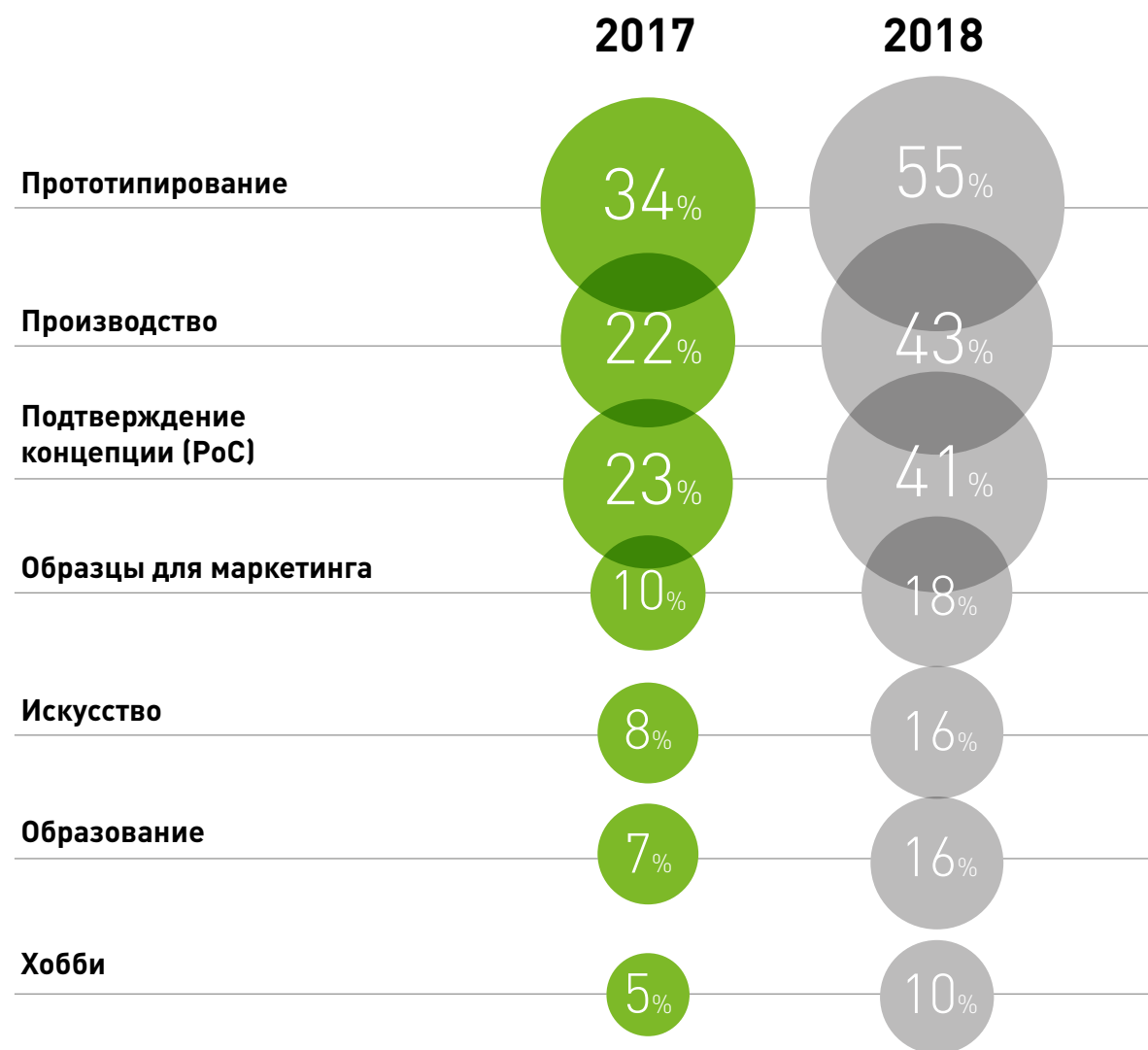


Рисунок 114 – Рынок промышленных лазеров по направлениям применения в 2017-2019 г., млн. долл. США. Источник: [48]

небольшой спад в 2018 г., и эта тенденция продолжилась в 2019. Объем продаж лазеров для макрообработки растет на 4% в год, а продажи для микрообработки в 2019 году немного снизились в связи с уменьшением продаж эксимерных лазеров для обработки кремния. Лазерная маркировка и гравировка являются высокопроизводительными процессами на базе волоконных лазеров, как и резка листового металла, которой занимаются более 200 поставщиков (25% в Китае). УФ-лазерная маркировка является одним из растущих сегментов рынка. Гравировка CO₂-лазерами имеет некоторый спрос, и особенно в швейной промышленности, – в связи с модными тенденциями. Лазерная маркировка и гравировка на малой мощности наиболее сильно сосредоточена

в Азии. В последние два года объемы продаж в секторе маркировки и гравировки были на уровне роста 3-4% в год, и эта тенденция сохранится в ближайшем будущем. В 2019 был рост продаж лазеров для аддитивного производства.

Применение аддитивных технологий в производстве, маркетинге, проектировании, визуализации для клиентов и руководства компаний расширяется с каждым годом. Мировые промышленные эксперты прогнозируют, что 2/3 промышленных лидеров уже сейчас применяют аддитивные технологии в производственных процессах, а к 2030 году 2/3 всей изготавливаемой продукции в мире будет производиться с напечатанными комплектующими.



Макрообработка продолжает оставаться крупнейшим сектором продажи лазеров для промышленности – более 55%, с ростом ~4% в год. Замедление темпов роста для лазерной резки мощными лазерами возникло в 2018 году из-за ужесточения политики США по отношению к Китаю и соответствующего роста тарифов. В Китае было затруднено кредитование для производства и экспорта оборудования. Сектора резки и сварки составляли соответственно 41 и 13%. Сварка – процесс применения конкретных технологий, и ее сертификация может занимать значительное время. Резка и сварка являются особенно чувствительными к условиям капиталовложения в оборудование и быстро реагируют на состояние национальной экономики. Рост продаж лазеров для макрообработки в 2019 г. сохранился на уровне 2018 г. В целом продажи лазеров в 2019 г. были на уровне 2018 г.

Мировой рынок фотоники за последнее десятилетие удвоился, и на 2022 г. прогнозируется объем продаж более чем в 730 млрд долл. США. Средний темп роста продаж – 7% в год. В Китае в последние годы – 20%. Общий объем производства продукции фотоники в России в 2017 г. составил > 74 млрд руб., при доле экспорта – 20%. 2018-й был рекордным годом в секторе продажи промышленных лазеров: на уровне \$5 млрд., в основном благодаря волоконным лазерам. Мировой рынок лазерных систем для обработки материалов в 2018 году достиг рекордного объема в 19,8 млрд долл. Около трети всех промышленных лазеров (в основном волоконных) были импортированы или произведены внутри Китая.

Источник: [25–28]

Рисунок 115 – Цели применения 3D-печати промышленных компаний. Источник: [59]

РОССИЙСКИЙ РЫНОК ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ФОТОНИКИ

Лазерная индустрия – одна из немногих конкурентоспособных областей в промышленности России.

- Российские физики Басов и Прохоров вместе с американским коллегой получили за пионерские работы в области квантовой электроники Нобелевскую премию.
- Штат ведущих мировых лазерных компаний в значительной степени укомплектован российскими специалистами.
- В России имеется целый ряд фирм, производящих самые современные лазерные комплексы.

В России производятся почти все виды лазерно-оптической техники, имеющейся сегодня на мировом рынке. Отечественные производители предлагают:

- свыше 1 тыс. моделей источников лазерного излучения;
- свыше 300 моделей лазерных технологических установок;
- около 310 моделей лазерных медицинских аппаратов и инструментария;
- свыше 1,1 тыс. моделей устройств для оптической связи;
- около 270 моделей лазерной аппаратуры для технических измерений и диагностики.

Объём продаж лазерно-оптической техники российскими производителями за период с 2014 по 2017 гг. рос на 3–4% в год и в 2017 г. достиг уровня около 74 млрд. руб.

Если сравнивать с отечественным станкостроением, то лазерная отрасль производит почти в 2 раза больше в стоимостном выражении. Если с другими странами, то доля России – менее 0,3% от мирового объема продаж фотоники, тогда как у Китая – в 90 раз больше.

Спрос на технологии и оборудование фотоники в реальном секторе отечественной экономики остается невысоким, что обусловлено как общим состоянием экономики, так и отсутствием технических стандартов, необходимых для использования инновационных лазерно-оптических технологий в промышленности, медицине, сельском хозяйстве. Остро не хватает кадров, грамотных пользователей, знающих реальные возможности этих технологий и умеющих их применять на практике.

Фотонику в России сегодня развивают в Ростехе, в Росатоме и в Роскосмосе. Готовится к запуску комплексная научно-техническая программа (КНТП) «Фотоника», разрабатываемая в Минобрнауки, и комплексный план научных исследований (КПНИ) «Фотоника» – в ФАНО и РАН. Но реальная координация усилий по развитию фотоники на межведомственном уровне практически отсутствует. *Источник: [29]*

В российской промышленности соотношение объемов применения различных видов лазерной обработки материалов аналогично ведущим зарубежным странам. Лидер по объему продаж – резка, а по количеству проданных установок – маркировка и гравировка. Их применение носит массовый характер. Применение же лазерной сварки, наплавки, очистки и сверления, аддитивных технологий требует индивидуального подхода, разработки соответствующей технологии, проведения испытаний и исследований, аттестации, поэтому они имеют пока небольшой объем применения, хотя отрабатываются в большинстве лазерных центров и имеют очень хорошие перспективы, подобно промышленным внедрениям в ведущих странах мира: США, Германии, Японии и Китае.

Российские и зарубежные производители, как правило, стараются не афишировать и не озвучивать собственные объемы производства.

В последние годы Россия увеличивает экспорт лазеров, согласно данным ФТС России и ITC Trade Map.: если в 2013 году поставки равнялись 55 млн долл., то в 2016 году достигли 129 млн долл., за 10 месяцев 2017 года экспорт составил 105 млн долл. Одновременно экспорт частей и комплектующих лазеров (включая небольшие объемы другой спецоптики) вырос с 26 млн долл. в 2013 году до 105 млн долл. в 2016 году и 123 млн долл. за 10 месяцев 2017 года. В мировом рейтинге экспортеров лазеров Россия вышла на 6-е место, уступая только Германии (1,44 млрд долл. в 2016 году), США (1,17 млрд долл.), Китаю (0,47 млрд долл.), Великобритании (0,35 млрд долл.) и Японии (0,23 млрд долл.). Номинально сопоставимые с Россией или даже большие объемы имеют Гонконг и Сингапур, однако у них идет увеличение за счет реэкспорта. Основными направлениями экспорта лазеров и их комплектующих из России являются Германия и Китай, в меньшей степени США, Индия, Республика Корея, Белоруссия и другие страны. Экспорт в Германию за 10 месяцев 2017 года составил 107 млн долл. против 79 млн долл. за весь 2016 год.

В импорте Германии Россия занимает примерно 15%, уступая только США. Экспорт в Китай за 10 месяцев 2017 года составил 89 млн долл., что соответствует уровню прошлого года. В импорте Китая Россия занимает 5-е место после Германии, США, Таиланда и Японии с долей примерно 7% [10].

Главным российским экспортером лазеров выступает НТО «ИРЭ-Полус» (г. Фрязино, Московская область), входящее в международную группу IPG Photonics. Как сообщает сама компания, она является основателем и одной из базовых компаний научно-технической группы IPG Photonics Corporation с производствами и научными центрами в России, Германии, США, Италии, а также 14 представительств в разных странах мира. Каждый четвертый лазер в мире выпускается группой IPG Photonics Corporation. *Источник: [26]*

Таблица 15 – Прогноз возможной реализации в России лазерных систем, а также их ориентировочная стоимость

ВИД ОБРАБОТКИ	ВОЗМОЖНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ЛС, ШТ./ГОД	ЁМКОСТЬ РЫНКА/ПОТРЕБНОСТЬ ПРЕДПРИЯТИЙ РОССИИ В ЛС, ШТ./НА 3-5 ЛЕТ	СРЕДНЯЯ ОРИЕНТИРОВОЧНАЯ СТОИМОСТЬ ЕДИНИЦЫ ОБОРУДОВАНИЯ	МОЩНОСТЬ ИЗЛУЧЕНИЯ, ВТ/КВТ
Лазерная резка листов	до 250	до 1000	200-1000 тыс.	500 Вт-25 кВт
3D-лазерная резка	более 20	более 80	300-2000 тыс. €	500 Вт-25 кВт
Лазерная сварка мощными лазерами (≥ 1 кВт)	до 10-20	до 50-100	300-5000 тыс. €	До 30/100 кВт
Лазерная сварка лазерами до 1 кВт	до 50	до 250	1-10 млн. ₽	До 1 кВт
Лазерная наплавка мощными лазерами	до 10-20	до 50-100	300-2500 тыс. €	1-12 кВт
Лазерная маркировка и гравировка	более 500	более 1500	1,5-3 млн. ₽	10-50 Вт
Сверление и другие виды микрообработки	до 100	до 500	1,5-5 млн. ₽	До 500 Вт
Аддитивные технологии по выращиванию металлических изделий	до 20	до 50-100	> 1,5-3 млн. ₽	100-1000 Вт
Аддитивные технологии по выращиванию неметаллических изделий	до 500	1000-2500	0,1-1,5 млн. ₽	До 100 Вт

Примечание 1: к стоимости оборудования, гарантийного ремонта может добавляться стоимость разработки технологии и патентов изготовителя/разработчика/поставщика стоимостью до нескольких миллионов \$, например, при проектах с фирмами мирового уровня, таких как TRUMPF. При этом нижняя цена в диапазоне взята для российского рынка (китайские поставки могут быть еще дешевле), а максимальная цена скорее соответствует европейским и ценам США. Кроме того, если убрать санкции, то должен быть мощный всплеск объемов реализации и, вероятно, изменение цен. Примечание 2: Стоимость зависит от мощности лазерного источника, размеров зоны обработки, наличия вспомогательных систем и др. *Источник: [29]*

ОСНОВНЫЕ ПРОИЗВОДИТЕЛИ ЛАЗЕРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

МОСКОВСКИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛИ

1. ООО «Компания «АЗИМУТ ФОТНИКС»
2. ООО «АТЕКО Лазер»
3. ООО «ЕвроЛэйз»
4. ООО «Лазер Мастер Групп»
5. ООО «РЕЗЕРВ НК»
6. ООО «Лазертрэк»
7. ООО «Лазерформ»
8. ООО НПЦ «Лазеры и аппаратура ТМ»
9. ООО «Латиком»
10. ООО «Маркирующие идентификационные комплексные системы»
11. ООО «Московский центр лазерных технологий»
12. ООО «Спецоптопродукция»
13. ОАО «Швабе-Фотосистемы» (АО «Московский завод «САПФИР»)
14. ООО «Авеста-Проект»
15. АО «Новая лазерная техника»
16. ООО «Ламет»
17. МЛЦ МГУ – Международный учебно-научный лазерный центр Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова
18. АО ГНЦ РФ «ТРИНИТИ»
19. МГТУ им. Н. Э. Баумана
20. ООО НПФ «Лазер-компакт»
21. ОАО «Научно-исследовательский институт «Полюс» им. М. Ф. Стельмаха»

22. ООО «ОКБ «Булат»
23. ООО «НПЦ «Альфа»
24. НПО «Квантрон»
25. ООО «Инновационное предприятие «НЦВО-Фотоника»
26. ООО «Оптосистемы»
27. ООО «ПВЦ Лазеры и технологии»
28. НПО «Тета лазер»
29. ЦК СПА
30. ЦЛТ-ТРАНСМАШ – Центр лазерных технологий ОАО МТЗ «ТРАНСМАШ»
31. ФГУП «НПО «Техномаш»
32. АО «Плакарт»

РОССИЙСКИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛИ

33. «Автогенмаш» (ЛР¹⁵); г. Тверь, ул. Коминтерна, 99;
34. «АО «ЛЛС»», г. С.-Петербург (ОК, УФЛ, ВЛ, ЛМ);
35. «ВОЛО» – ООО «Научно-производственное предприятие волоконно-оптического и лазерного оборудования», С.-Петербург (ППЛ);
36. «ВОСХОД»-КРЛЗ – ОАО «Восход» – Калужский радиоламповый завод», г. Калуга (ППЛ);
37. «Инверсия-Файбер», г. Новосибирск (ВЛ (в т.ч. зеленые), ГЛ, УФЛ);
38. «Лазерные машины», г. Ярославль (ЛГ, ЛМ, ЛР);
39. «Лазерный Технологический Центр», г. Шатура Московской обл. (ЛН, ЛР, ЛС, ЛТупр, СО2Л –до 6–10 кВт);

40. «Лазерный Центр» (СПб) / Trotec (Микрообработка (1 кВт): ЛГ, ЛМ, ЛН, ЛП, ЛР, Лрем, ЛС, ЛСв, ЛТупр);
41. «Научные приборы», СПб (ЛМ, ЛГ, персонализация данных);
42. «Оптоэлектронные технологии», С.-Петербург (ППЛ);
43. «ТехноЛазер», г. Шатура Московской обл. (ЛР, СО2Л (до 8 кВт));
44. «ТехноСкан», «Лазерные системы», г. Новосибирск (ВЛ, ГЛ, ДЛ, КрЛ, Лспдви, ТТЛ, ФВЛ);
45. «Топаз», г. Томск (Микро и макрообработка. Лпм.);
46. «ФТИ-Оптроник», С-Петербург (ДЛ, ОК, ППЛ, ТТЛ, УФЛ);
47. «Центр лазерных технологий» (ЦЛТ), СПб (ЛГ, ЛМ и др. микрообработка);
48. «Юнимаш» («МорСвязьАвтоматика»), является опытным разработчиком и производителем лазерных раскройных комплексов, СПб.
49. «Юнимаш», СПб («МорСвязьАвтоматика») (ЛР);
50. LaserGURU, СПб (ЛГ, ЛМ, ЛР, ЛС, УФЛМ);
51. Stormoff, Красногорск Московской обл. (ФВЛ, ЭЛ для медицины);
52. АО НПП «Исток» им. Шокина, г. Фрязино Московской обл. (ГЛ, ЛПм; СО2Л); ИСЭ СО РАН – Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск (ЛК);
53. АССОЦИАЦИЯ ПП КПО – ООО «Ассоциация потребителей и производителей кузнечнопрессового оборудования», г. Воронеж (ЛР);
54. ВНИИТФ – Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. академика Е. И. Забабахина, г. Снежинск Челябинской обл. (ТТЛ, ППЛ);

15. Примечание: АдТ – аддитивные технологии, АдУ – установка для аддитивных технологий, ВЛ – волоконные лазеры, ГЛ – газовые лазеры, ДискЛ – дисковые лазеры, ДЛ – диодные лазеры, ЛГ – лазерная гравировка / скрайбирование, лазерный гравер, ЛДР – лазерная дистанционная резка, ЛК – лазерные компоненты; ЛКр – лазерные кристаллы; ЛМ – лазерная маркировка/лазерный маркер, ЛН – лазерная наплавка, ЛОМ – лазерная обработка материалов, ЛОч – лазерная очистка, ЛП – лазерная пайка, ЛР – лазерная резка, ЛРем – ремонт прессформ, штампов и др., ЛС – лазерная сварка, ЛСв – лазерное сверление/про- шивка, ЛСи – лазерная система, ЛТК – лазерный технологический комплекс/установка, ЛТупр – лазерное термоупрочнение, ЛФ – лазерное фрезерование, СО2Л – СО2-лазеры, ТТЛ – твердотельные лазеры, УФЛ – ультрафиолетовые лазеры, УФЛМ – ультрафиолетовый лазерный маркер, ЭЛ – эксимерные лазеры.

55. ЗАО «Кантегир», г. Саратов (ППЛ);
56. ЗАО «Лазервариоракурс», г. Рязань (ГЛ);
57. ЗАО «Лазерный Технологический Центр», г. Шатура Московской обл. (ГЛ);
58. ЗАО «Полупроводниковые приборы», С.-Петербург (ТТЛ, ППЛ);
59. ИАиЭ СО РАН – Институт автоматики и электротриетрии СО РАН, г. Новосибирск (ТТЛ);
60. ИАиЭ СО РАН – Институт автоматики и электротриетрии СО РАН, г. Новосибирск (ЛСи; ЛМ);
61. ИЛИСТ / СПбГМТУ, СПб (Макрообработка: АдТ, АдУ, ЛН, ЛР, ЛС, ЛТупр);
62. ИЛФ СО РАН – Институт лазерной физики СО РАН, г. Новосибирск (ТТЛ);
63. Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук (ИТПМ СО РАН), г. Новосибирск (ЛС, АдТ);
64. ИОА СО РАН – Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск (Лпм; КрЛ; ЛСи);
65. ИПЛИТ РАН – Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН, г. Шатура Московской обл. (ЛСи);
66. ИФ НАНБ – Государственное научное учреждение «Институт физики им. Б. И. Степанова Национальной академии наук Белоруссии», Белоруссия, г. Минск (ТТЛ);
67. Конструкторско-технологический институт научного приборостроения Сибирского отделения Российской академии наук (КТИ НП СО РАН), г. Новосибирск (ЛСи, измерения и контроль);
68. ЛИДАРТЕХ – ООО «Лидарные технологии», г. Нижний Новгород (ТТЛ);
69. ЛОМО, С.-Петербург (ТТЛ);
70. Научно-производственное предприятие «Лазерные системы», С.-Петербург;
71. НИ ТГУ (г. Томск) (Лазеры на парах меди, стронция и кальция, ЛР стекла);
72. НИИЭФА – ФГУП «Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д. В. Ефремова», С. Петербург, п/о Металлострой (ГЛ, ТТЛ);
73. НПК «Рапид», г. Воронеж (ЛР (на ВЛ и СО2Л));
74. НПП «Лазерные системы», СПб (ВЛ, ГЛ, ППЛ, ХЛ);
75. НПФ «Прибор-Т», Саратов (Микрообработка: ЛР, ЛСв);
76. НТО «ИРЭ-Полус», г. Фрязино Московской обл. (ВЛ (до 100 кВт), ДЛ, ФВЛ);
77. ОАО «ГОИ им. С.И. Вавилова», С.-Петербург (ТТЛ);
78. ОАО «Плазма», г. Рязань (АдУ, ГЛ (He-Ne; He-Cd, N2), ППЛ, волноводные СО2);
79. ООО «АИБИ», С.-Петербург (ППЛ);
80. ООО «ВЭЛИТ», Московская обл., г. Истра (Лпм);
81. ООО «Квантовая оптика», С.-Петербург (ТТЛ);
82. ООО «МИКРОСЕНСОР ТЕХНОЛОДЖИ», г. С.-Петербург (ППЛ);
83. ООО «Мултитех», г. Нижний Новгород;
84. ООО «Научно-производственная фирма «ДиЛаз», Ленинский район Московской области, п. Мосрентген (ППЛ);
85. ООО «Научно-производственное предприятие «Инжект», г. Саратов (ТТЛ, ППЛ);
86. ООО «Специальные технологии», г. Новосибирск (ГЛ; СО2 Л; ЛСи);
87. ООО «Эльфолум», С.-Петербург;
88. РЛС – ЗАО «Российские лазерные системы», С.-Петербург (щелевые СО2 Л; ЛР);
89. СП «Лазертех», СПб (ЛР (в т.ч. б/у «Хебр», Trumpf), ЛН, ЛС, ЛТупр);
90. Техноскан-лаб, г. Новосибирск (ТТЛ, ВЛ);
91. ФГУП «НПП ИСТОК», г. Фрязино Московской обл. (Лпм; ЛГ, ЛОч, ЛР, ЛСв);
92. Фирма «Лазеры и оптические системы», С.-Петербург (ТТЛ).
8. COHERENT (в т.ч. ROFIN, Германия), США (ВЛ (до 10 кВт), ДЛ, СО2Л, ФВЛ, Лспдви);
9. Datalogic Automation SLR (Datalogic, Италия) (ВЛ, ТТЛ, ЛГ, ЛМ, ЛСк);
10. Durma, Турция (ЛР);
11. Ekspla, Литва (ДЛ, ТТЛ, ФВЛ);
12. Ermaksan, Турция (ЛР);
13. GrosseMARK (бывшая «ЮниЛазер», г. Москва) (ЛГ, ЛМ);
14. HAN`S LASER, Китай (ЛР);
15. JFV, Китай (ЛР);
16. LASERLINE, Германия (ДЛ (до 20-30-60 кВт) Для ЛН, ЛТупр, ЛС);
17. Mazak, Япония (ЛР);
18. Messer, Германия (ЛР);
19. Mitsubishi, Япония (ЛР);
20. P-laser, Бельгия (ЛОч);
21. PrimaPower (PRIMA INDUSTRIE GROUP), Италия (АдТ, АдУ, ВЛ, ГЛ, ЛСв, ЛТК, ЛР, СО2Л – СО2-лазеры);
22. Salvagnini, Италия (ЛР);
23. SharpLase Laser Systems, США (ЛГ, ЛМ);
24. Telesis Tehnologies Inc., США (ТТЛ, ЛГ, ЛМ, УФЛМ);
25. TRUMPF, Германия (ВЛ, ДискЛ, СО2-лазеры, Макрообработка (> 30 кВт) ЛР, ЛС, ЛН, ЛМ, АдУ, и др.);
26. Группа предприятий ARAMIS, Чехия–Россия (ЛР)
27. ЗАО «СОЛАР – Лазерные системы», Белоруссия, г. Минск (ДЛ, ТТЛ, УФЛ, ФВЛ);
28. ИФ НАНБ – Государственное научное учреждение «Институт физики им. Б. И. Степанова Национальной академии наук Белоруссии», Белоруссия, г. Минск (ВЛ, ТТЛ, ЛМ);
29. Научно-производственное республиканское унитарное предприятие «КБТЭМ-ОМО», Белоруссия, г. Минск (ЛСи; ЛК);
30. ОАО «Пеленг», Белоруссия, г. Минск (ТТЛ);
31. ООО «СО Линструментс», Белоруссия, г. Минск (ТТЛ, УФЛ);
32. HGTECH, Китай;
33. HIGHYAG (Германия).

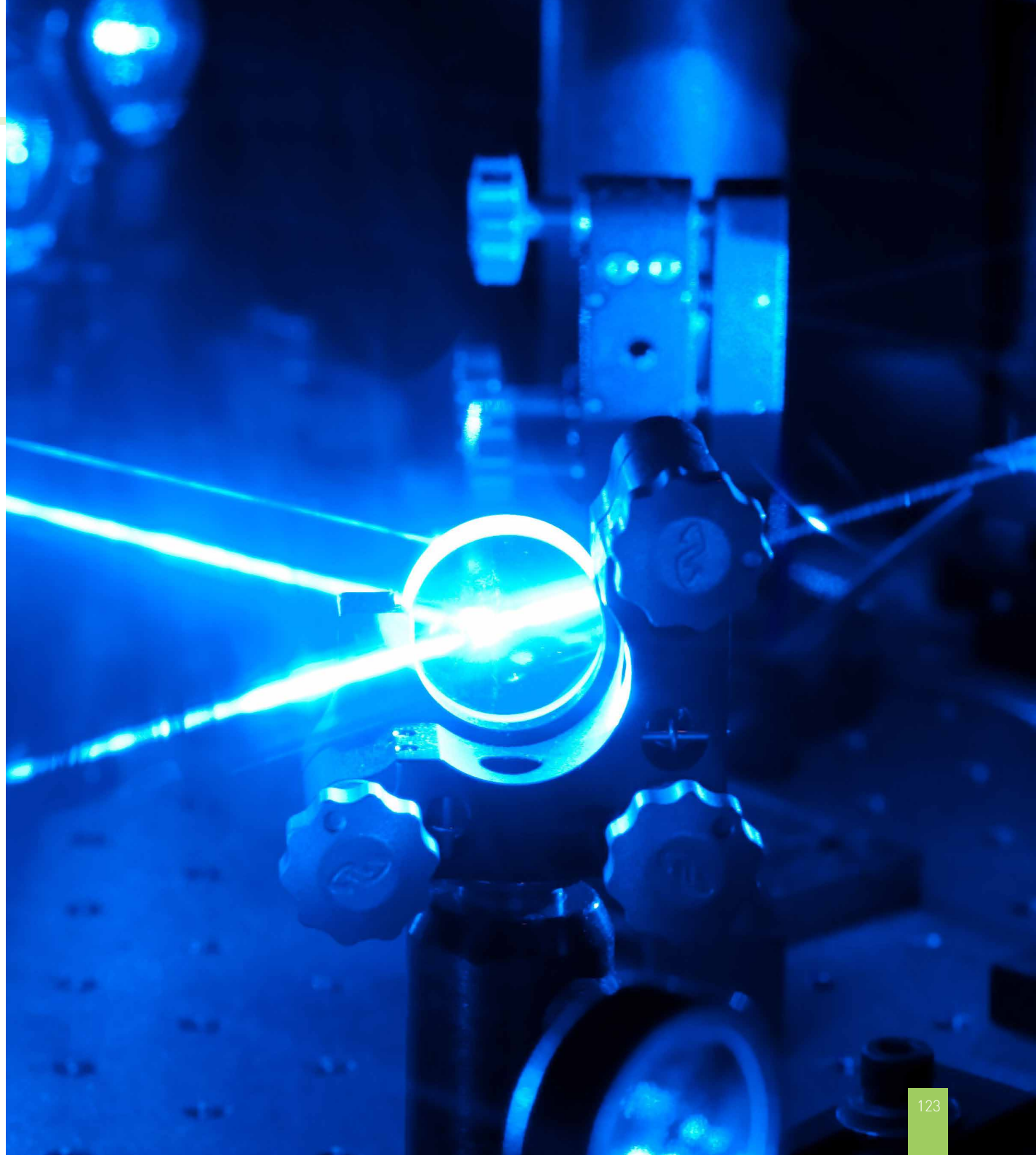
ИНОСТРАННЫЕ ПРОИЗВОДИТЕЛИ НА РОССИЙСКОМ РЫНКЕ

1. «ЛОТИС» ТИИ, Белоруссия – Япония, г. Минск (ДЛ, ТТЛ);
2. «ОПТЕЛА – ОПТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ» (и др.), Болгария (ЛР);
3. «Рухсервомотор», Белоруссия (ЛР, ЛТупр, ЛН)
4. ASI Laser GmbH, Германия (ЛГ, ЛМ);
5. Amada, Япония (ЛР)
6. BODOR (Китай) (ВЛ, ЛР (до 6-12 кВт), ЛГ, ЛМ)
7. Bystronic, Швейцария (ЛР);

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- ГОСТ 15093-90.
- ГОСТ Р ИСО 12005-2013.
- ГОСТ Р 58567-2019.
- ГОСТ Р 55704-2013.
- ГОСТ Р 58568-2019.
- ГОСТ ISO/TS 80004-1-2017.
- ГОСТ Р 57257-2016/ISO/TS 80004-12:2016.
- ГОСТ ISO/TS 80004-6-2016.
- <https://books.ifmo.ru/file/pdf/460.pdf>
- <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9B%D0%B0%D0%B7%D0%B5%D1%80>
- <https://dic.academic.ru/dic.nsf/medic2/17389>
- <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%B5%D1%82%D1%87%D0%B0%D1%82%D0%BA%D0%B0>
- https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%98%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%80%D0%B8%D1%8F_%D0%B8%D0%B7%D0%BE%D0%B1%D1%80%D0%B5%D1%82%D0%B5%D0%B%D0%B8%D1%8F_%D0%BB%D0%B0%D0%B7%D0%B5%D1%80%D0%BE%D0%B2
- http://femto.com.ua/articles/part_1/2324.html
- https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%BE%D0%B4%D1%83%D0%BB%D1%8F%D1%86%D0%B8%D1%8F_%D0%B4%D0%BE%D0%B1%D1%80%D0%BE%D1%82%D0%B%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B8
- http://aco.ifmo.ru/eL_books/basics_optics/glava-7/glava-7-2.html
- <https://ru.wikipedia.org/wiki/Виньетирование>
- http://oplib.ru/energetika/view/1248327_frenelevskoe_otrazhenie
- <https://www.ngpedia.ru/id233398p2.html>
- <http://window.edu.ru/catalog/pdf2txt/884/57884/27945?page=7>
- [D0%BB%D0%B8%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5_%D0%BB%D0%B8%D0%BD%D0%B7%D1%8B](http://edufuture.biz/index.php?title=%D0%A4%D0%BE%D1%80%D0%BC%D1%83%D0%BB%D0%B0_%D1%82%D0%BE%D0%BD%D0%BA%D0%BE%D0%B9_%D0%BB%D0%B8%D0%BD%D0%B7%D1%8B_%D0%A3%D0%B2%D0%B5%D0%BB%D0%B8%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%B7%D1%8B)
- [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BF%D0%B5%D1%80%D1%82%D1%83%D1%80%D0%B0_\(%D0%BE%D0%BF%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B0\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BF%D0%B5%D1%80%D1%82%D1%83%D1%80%D0%B0_(%D0%BE%D0%BF%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B0))
- https://dic.academic.ru/dic.nsf/dic_fwords/5020/%D0%90%D0%9F%D0%95%D0%A0%D0%A2%D0%A3%D0%A0%D0%90
- [https://www.ipgphotonics.com/ru/company#\[lazernaya-bezopasnost\]](https://www.ipgphotonics.com/ru/company#[lazernaya-bezopasnost])
- http://laseris.ru/public/content/analytics/2019_04_20_obzor_1_rhythm_of_machinery_4_2019_str_60_67.pdf
- <https://ritm-magazine.ru/ru/public/ryнок-lazerov-i-lazernyh-tehnologiy-obrabotki-materialov>
- <https://lenasers.ru/news/stati/ryнок-lazerov-v-rossii-i-stranakh-sng/>
- https://www.vlsu.ru/fileadmin/Kadry_dlja_regiona/1/2015_dec/1-2-6_01_2015_Prezentaciya.pdf
- <http://www.ras.ru/news/shownews.aspx?id=89353ab9-19f5-418a-9d10-dd4bfa6ad813&print=1>
- <https://naukatehnika.com/rls-sozdan-3d-radar-novogo-tipa.html>
- <https://rg.ru/2018/04/22/radiofotonika-stanet-drajverom-sovremennoj-radioelektroniki.html>
- Стратегическая программа на 2015- 2025 г. Технологическая платформа «Инновационные лазерные, оптические и оптоэлектронные технологии – фотоника». Москва, 2015 г.
- Ковш И. Б. Фотоника в России: состояние и задачи // Лазер-Информ. 2019. № 4 [643]. С. 1-16.
- Отчетный доклад Президента Лазерной ассоциации И. Б. Ковша // Лазер-Информ. 2018. № 5-6 [620-621]. С. 1-7.
- What goes up ... ANNUAL LASER MARKET REVIEW & FORECAST 2019 / GAIL OVERTON, ALLEN NOGEE, DAVID BELFORTE, JOHN WALLACE, BARBARA GEVERT // Laser Focus World, January 2019. P. 40-45, 47, 49-54, 56-58, 6061, 64-65, www.laserfocusworld.com.
- ПЕРЕВОД: Мировой лазерный рынок в 2018-м и прогноз на 2019-й/Г. Овертон, А. Ноджи, Д. Бельфорте, Б. Геверт // ЛазерИнформ. 2019. № 5 [644]. С. 1-8.
- Lasers forge 21st century innovations. LASER MARKETPLACE 2014 / GAIL OVERTON, ALLEN NOGEE, and CONARD HOLTON // Laser Focus World, January 2014. P. 38-40, 42, 44, 46, 49, 51-54, 56-62. www.laserfocusworld.com.
- Air Force to ask industry for 75-Watt sodium laser to create artificial stars for adaptive optics / John Keller // https://www.militaryaerospace.com/articles/2019/01/sodium-laser-artificial-stars-adaptive-optics.html?cmpid=enl_mae_defense_executive_2019-02-05&pwid=faefc33b-fc7f79fa744508baa2ae2577c1d5af697871251a3c1ab-77b05cd2ce24b36fbd579d3e69c246472c183959bfa392b76b0c46b517d1af9e3ba51ab8&id=324695413&b id=236068117/01/2019
- Мировой рынок систем лазерной обработки материалов достиг рекордных \$ 19,8 млрд / <https://www.lasersystemseurope.com/11/04/2019>
- Laser beam shaping for innovative applications/SAMI LAROU // Industrial Laser Solutions, MARCH/APRIL 2019. P. 22-23. www.industrial-lasers.com.
- Spectrum supplies laser marking system for use in manufacturing Mars lander // Industrial Laser Solutions, MARCH/APRIL 2019. P.10. www.industrial-lasers.com.
- Ultraviolet light-emitting diodes (UVLEDs) for disinfection uses introduced by Opto Diode/https://www.militaryaerospace.com/articles/2019/01/ultraviolet-light-emitting-diodes-disinfection.html?cmpid=enl_mae_weekly_2019-01-09&pw hid=faefc33bfc7f79fa744508baa2ae2577c1d5af697871251a3c1ab77b05cd2ce24b36fbd579d3e69c246472c18183959bfa392b76b0c46b517d1af9e3ba51ab8&id=324695413&b id=234075804/01/2019
- Игнатов А. Г. Рынок лазеров и лазерных технологий обработки материалов // Ритм машиностроения. 2018, № 4. С. 46-52. URL: <http://www.ritm-magazine.ru/ru/magazines/2018/ritm-mashinostroeniya-no-4-2018>
- High-power blue laser improves fabrication throughput/J. M. Pelaprat, R. Fritz, M. Finuf, M. Zediker/Industrial Laser Solutions. 2018. № 1-2. P. 17-20.

-
44. Belforte D. My view. Lasers make it better/Industrial Laser Solutions. 2018. № 1-2. P. 32.
 45. Japan develops blue laser for advanced materials processing/KOJI TOJO, SHINICHIRO MASUNO, RITSUKO HIGASHINO, AND MASAHIRO TSUKAMOTO; Shimadzu Corporation//Industrial Laser Solutions, 2018, September/October, p. 27-31; www.industrial-lasers.com.
 46. NUBURU has invented and is manufacturing the world's first revolutionary high-power blue laser//URL: <http://www.nuburu.net/markets/31/01/2019>
 47. Trumpf demonstrates additive manufacturing with copper and gold//Industrial Laser Solutions, 2019, JANUARY/FEBRUARY. P. 6. www.industrial-lasers.com.
 48. 2018 was another record year, contending with turmoil/DAVID A. BELFORTE//Industrial Laser Solutions, 2019, JANUARY/FEBRUARY. P. 9-11. www.industrial-lasers.com
 49. Рынок 3D печати в России и мире [Аддитивное Производство, АП / Additive Manufacturing, Ам], 2018 // URL: http://json.tv/ict_telecom_analytics_view/rynok-3d-pechati-v-rossii-i-mire-additivnoe-proizvodstvo-ap-additive-manufacturing-am-2018-g-20190117060056
 50. Облачный сервис-провайдер услуг 3D-печати, Франция. https://www.sculpteo.com/media/ebook/State_of_3DP_2018.pdf
 51. <https://lenlasers.ru/news/stati/rynok-lazerov-v-rossii-i-stranakh-sng/>
 52. <https://chic.caltech.edu/spinning-the-light-with-nanophotonic-optical-gyroscope-nog/>
 53. Новиков А.В. Принцип работы волоконно-оптического гироскопа. СГГА, Новосибирск. 2006 г.
 54. <https://chic.caltech.edu/>
 55. <http://sf.ifmo.ru/ru/projects/fog/ru>
 56. https://www.krugosvet.ru/enc/nauka_i_tehnika/fizika/KVANTOVAYA_OPTIKA.html#part-5
 57. <https://www.lia.org/>
 58. J'son & Partners. По материалам RACONTEUR «FUTURE OF MANUFACTURING» от 22.08.2018 г. на основании Отчета Sculpteo, 2018 г.





КОМПЛЕКС ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ПОЛИТИКИ
И ИМУЩЕСТВЕННО-ЗЕМЕЛЬНЫХ ОТНОШЕНИЙ
ПРАВИТЕЛЬСТВА МОСКВЫ



ДЕПАРТАМЕНТ ИНВЕСТИЦИОННОЙ
И ПРОМЫШЛЕННОЙ ПОЛИТИКИ
ГОРОДА МОСКВЫ

АПР

АГЕНТСТВО
ПРОМЫШЛЕННОГО
РАЗВИТИЯ МОСКВЫ

Москва, ЦАО, ул.1905 Года, д.7, стр.1.
8(495) 909-30-69
apr.mos.ru