

ЛЕКЦИЯ № 3

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ
ФИЗИЧЕСКОЙ ОПТИКИ. ЯВЛЕНИЯ
ДИФРАКЦИИ, ДИСПЕРСИИ,
ИНТЕРФЕРЕНЦИИ. ЛАЗЕРНЫЕ
ИСТОЧНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ

- ▶ Оптика - это раздел физики, изучающий свойства и физическую природу света, его распространение в различных средах и взаимодействие с веществом, а также способы генерации и регистрации света.
- ▶ Термин оптика происходит от греческого слова "optike" – наука о зрительных восприятиях, а само это слово происходит от греческого "optos" – видимый, зримый.
- ▶ Оптическое излучение или свет представляет собой электромагнитные волны. Поэтому оптика – это часть общего учения об электромагнитном поле, которая называется электродинамикой. Под светом в настоящее время понимают не только видимое излучение, но и примыкающие к нему широкие области инфракрасного (ИК) и ультрафиолетового (УФ) излучения.

- ▶ В таком понимании оптический спектр
- ▶ занимает диапазон от границы ИК излучения $\lambda = 2 \text{ мм}$ ($\nu = 1,5 \times 10^{11} \text{ Гц}$) до коротковолновой границы УФ $\lambda = 10^{-6} \text{ см}$ ($\nu = 3 \times 10^{16} \text{ Гц}$). Выделение указанной области обусловлено не столько близостью соответствующих участков спектра, но и, главным образом, сходством методов и приборов, применяемых для ее исследования и разработанных исторически, в основном, при изучении видимого света (линзы, зеркала, призмы, дифракционные решетки, интерференционные приборы и т.д.). Собственно видимое излучение занимает диапазон $\lambda = 400 - 760 \text{ нм}$, УФ - $\lambda = 10 - 400 \text{ нм}$, ИК - $\lambda = 760 \text{ нм} - 2 \text{ мм}$. Указанные границы достаточно условны.

- ▶ Современная оптика подразделяется на:
- ▶ • геометрическую оптику, которая, не рассматривая вопроса о природе света, исходит из эмпирических законов его распространения и использует представление о распространяющихся независимо друг от друга световых лучах, преломляющихся и отражающихся на границе сред с разными оптическими свойствами и прямолинейных в оптически однородных средах. Наиболее важное значение геометрическая оптика имеет для расчета и конструирования оптических приборов.
- ▶ Физическую оптику, которая рассматривает проблемы, связанные с природой света и световых явлений. Совокупность явлений, в которых проявляется волновая природа света, изучается в разделе физической оптики, называемый волновой оптикой, в рамках которой объясняются такие явления как дифракция, интерференция и поляризация света, распространение света в анизотропных средах и т.п. Ее основанием служат уравнения Максвелла. Свойства среды при это характеризуются диэлектрической ϵ и магнитной μ проницаемостями, которые в общем случае зависят от частоты света и ее волнового вектора (частотная и пространственная дисперсия). Эти величины однозначно определяют показатель преломления среды $n = \sqrt{\epsilon\mu}$. Феноменологически волновая оптика объясняет все законы геометрической оптики и границы ее применимости. В отличие от геометрической оптики, она позволяет рассматривать процессы распространения света и тогда, когда размеры систем, формирующих и рассеивающих световые пучки, меньше длины волны.

- ▶ . Оптика - одна из самых древнейших наук, тесно связанная с потребностями практики. Она восходит к самым древним цивилизациям. Например, прямолинейное распространение света было известно в Месопотамии (5 тыс. лет до н.э.) и использовалось еще в древнем Египте при строительных работах. Пифагор (6 век до н.э.) высказал мысль, что тела видны благодаря испускаемым ими частицами. Аристотель (5 век до н.э.) считал, что свет есть возбуждение среды, находящейся между объектом и глазом. Он также занимался атмосферной оптикой, а радугу объяснял отражением света каплями воды. Школа Платона сформулировала два важнейших закона геометрической оптики - прямолинейность лучей света и равенство углов падения и отражения. Евклид (3 век до н.э.) в своих трактатах рассматривал возникновение изображений при отражении от зеркал.

- ▶ В средние века хорошо были известны эмпирические
- ▶ правила построения изображений, даваемых линзами, начало развиваться искусство
- ▶ изготовления линз. В XIII веке были изобретены очки, около 1590 г. - двухлинзовый микроскоп (З.Янсен). В 1609 г. Галилей построил первый телескоп, с помощью
- ▶ которого сделал ряд астрономических открытий. Точные законы преломления света были экспериментально установлены лишь около 1620 г. (В.Снелль, Р.Декарт).
- ▶ Декарт в 1637 г. опубликовал свою знаменитую "Диоптрику". Около 1660 г. был
- ▶ сформулирован П.Ферма принцип Ферма. Этим был завершен фундамент построения геометрической оптики
- ▶ Дальнейшее развитие оптики связано с открытием явлений дифракции (1665 г.,
- ▶ Ф.Гримальди) и интерференции света, и двойного лучепреломления (1669 г.,
- ▶ Э.Бартолини), которое не поддавалось истолкованию в рамках геометрической
- ▶ оптики, а также с работами И.Ньютона, Р.Гука и Х.Гюйгенса.

- ▶ И.Ньютон (1643-1727) обращал большое внимание на периодичность световых явлений и допускал возможность интерференции, но отдавал предпочтение корпускулярной концепции света, согласно которой свет - это поток частиц, действующий на эфир, введенный Декартом (механическая среда - переносчик света) и вызывающих в нем колебания. Движением световых частиц через эфир переменной плотности (из-за колебаний) и их взаимодействием с материальными телами по Ньютону обусловлены отражение и преломление света, цвета тонких пленок, дифракция света и его дисперсия. Ньютон подробно изучил эти явления.
- ▶ Гримальди и Гука, исходя из аналогии между акустическими и оптическими явлениями. Он считал, что световое возбуждение - это импульсы упругих колебаний эфира, распространяющиеся с большой, но конечной скоростью. Заметим, что
- ▶ И.Кеплер и Декарт считали скорость света бесконечной, Гук и Ньютон - конечной.
- ▶ Первое экспериментальное измерение скорости света произвел О.Ремер. Огромным вкладом Гюйгенса в оптику является установление им принципа, согласно которому
- ▶ каждая точка фронта волнового возбуждения может рассматриваться как источник вторичных сферических волн, огибающая которых представляет собой фронт
- ▶ реальной распространяющейся волны в последующие моменты времени (принцип
- ▶ Гюйгенса-Френеля). Опираясь на этот принцип, Гюйгенс объяснил законы отражения и преломления света.

- ▶ Причем из его теории следовало правильное выражение
- ▶ для показателей преломления: $n_{21} = v_1/v_2$, где $v_{1,2}$ - скорости света в первой и во
- ▶ второй среде. Он также объяснил двойное лучепреломление. Однако, сформулировав
- ▶ фундаментальный принцип, Гюйгенс не разработал последовательной волновой теории, которая могла бы противостоять воззрениям Ньютона. Поэтому корпускулярная теория истечения света сохранила свое господствующее положение до начала XIX
- ▶ века. Победа волновой оптики связана с работами Т.Юнга и О.Френеля. Юнг ввел
- ▶ принцип интерференции (1801) и на этой основе объяснил цвета тонких пленок.
- ▶ Френель, используя принцип Гюйгенса, дал удовлетворительное волновое объяснение прямолинейности распространения света и многочисленным дифракционным
- ▶ явлениям. В опытах Френеля и Д.Араго было установлено, что волны, поляризованные перпендикулярно друг другу, не интерферируют. Это позволило Юнгу и
- ▶ независимо от него Френелю высказать важную идею о поперечности световых
- ▶ колебаний, исходя из которой последний построил теорию кристалло-оптических
- ▶ явлений.
- ▶ Т.о. все известные к тому времени оптические явления получили волновую интерпретацию.

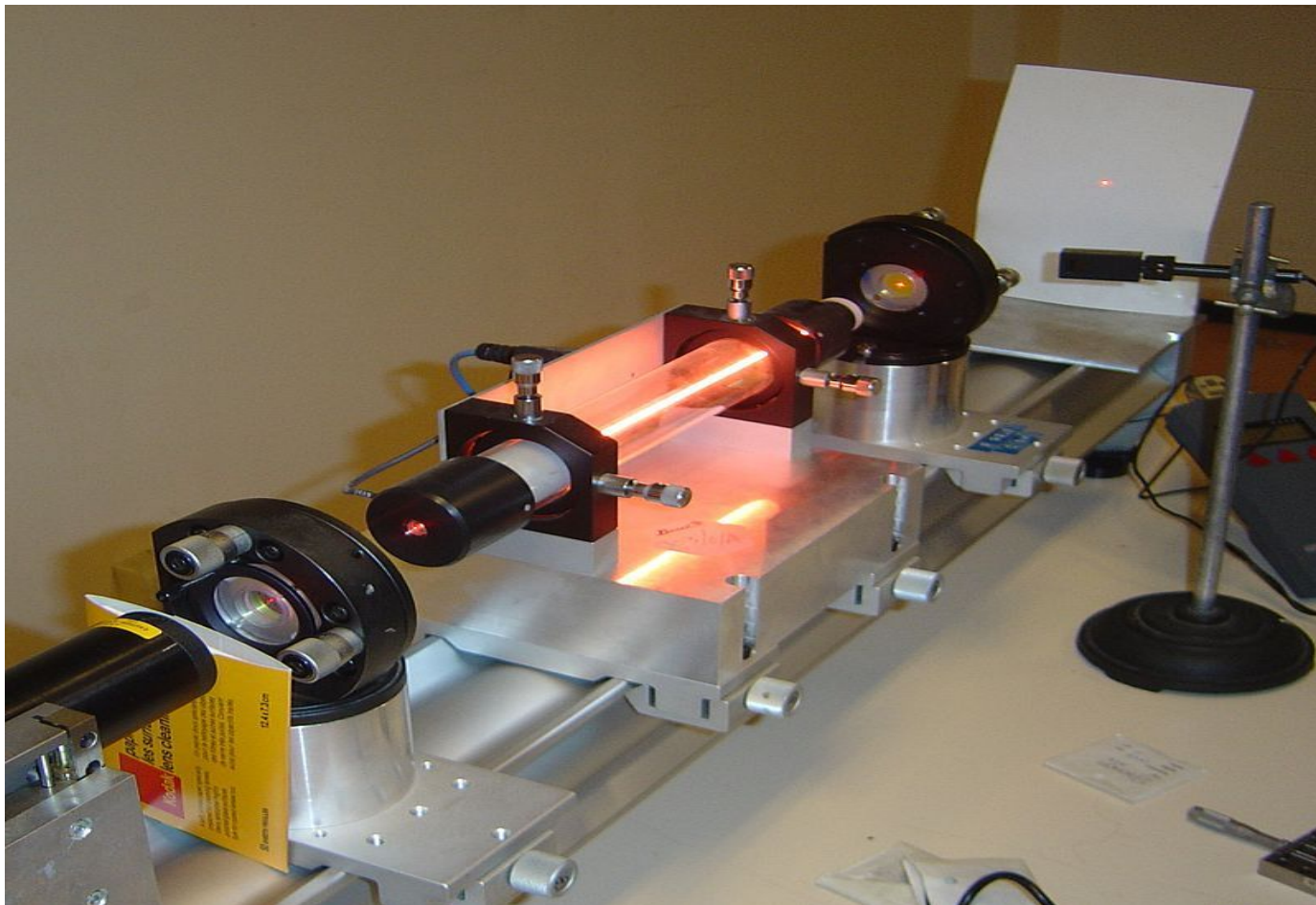
- ▶ Электромагнитная теория света стала отправным пунктом при создании теории
- ▶ относительности. Данные оптических опытов с движущимися средами наблюдателями относительно источника излучения противоречили теоретическим представлениям того времени. Юнг (1804) для объяснения аберрации (искажения изображения)
- ▶ неподвижного, неувлекаемого Землей эфира. Френель (1818), напротив, для независимости показателя преломления тел от движения (наблюдения Араго), необходимо
- ▶ чтобы тела частично увлекали эфир. Этот вывод был подкреплён опытом Физо.
- ▶ Электродинамика движущихся сред, развитая Лоренцем (1896) в рамках электронной теории, также приводила к частичному увлечению эфира. Классический опыт
- ▶ Майкельсона (1881), а также опыт Майкельсона-Морли (1887) не обнаружили такого увлечения (эфирного ветра). Этот и ряд других опытов, противоречивших представлениям о среде-переносчике электромагнитных колебаний нашли объяснение в
- ▶ созданной А.Эйнштейном специальной (частной) теории относительности (1905),
- ▶ приведшей к кардинальному пересмотру классической физики и устранению необходимости в эфире и других гипотетических сред-переносчиках света.

- ▶ Электромагнитная природа света. Вопрос о природе света представляет собой одну из центральных проблем физической оптики. Многие крупные открытия в области физики так или иначе связаны с попытками понять, что такое свет. Во второй половине XIX века Максвелл предсказал существование электромагнитного поля и доказал, что свет - это электромагнитные волны, распространяющиеся со скоростью примерно 300 000 км/с.
- ▶ За это время точность измерений величины c возросла от $\Delta c/c = 0.3$ до
- ▶ $\Delta c/c \approx 3 \times 10^{-9}$. Лазерная физика и техника открыли совершенно новые возможности. Наиболее точное определение c , выполненное в лазерных экспериментах в 90-х годах прошлого столетия, дало значение $c = 299\,792\,456,2$ м/с.

- ▶ Лазер (от англ. laser, акроним от light amplification by stimulated emission of radiation «усиление света посредством вынужденного излучения»), или оптический квантовый генератор – это устройство, преобразующее энергию накачки (световую, электрическую, тепловую, химическую и др.) в энергию когерентного, монохроматического, поляризованного и узконаправленного потока излучения.
- ▶ Физической основой работы лазера служит квантовомеханическое явление вынужденного (индуцированного) излучения. Излучение лазера может быть непрерывным, с постоянной мощностью, или импульсным, достигающим предельно больших пиковых мощностей. В некоторых схемах рабочий элемент лазера используется в качестве оптического усилителя для излучения от другого источника. Существует большое количество видов лазеров, использующих в качестве рабочей среды все агрегатные состояния вещества. Некоторые типы лазеров, например, лазеры на растворах красителей или полихроматические твердотельные лазеры, могут генерировать целый набор частот (мод оптического резонатора) в широком спектральном диапазоне. Габариты лазеров разнятся от микроскопических для ряда полупроводниковых лазеров до размеров футбольного поля для некоторых лазеров на неодимовом стекле. Уникальные свойства излучения лазеров позволили использовать их в различных отраслях науки и техники, а также в быту, начиная с чтения и записи компакт-дисков, штрих-кодов и заканчивая

- ▶ 1916 год: А. Эйнштейн предсказывает существование явления вынужденного излучения – физической основы работы любого лазера[1].
- ▶ Строгое теоретическое обоснование в рамках квантовой механики это явление получило в работах П. Дирака в 1927–1930 гг.[2][3]
- ▶ 1928 год: экспериментальное подтверждение Р. Ладенбургом и Г. Копферманном существования вынужденного излучения.[4]
- ▶ В 1940 г. В. Фабрикантом и Ф. Бутаевой была предсказана возможность использования вынужденного излучения среды с инверсией населённостей для усиления электромагнитного излучения[4].
- ▶ 1950 год: А. Кастлер (Нобелевская премия по физике 1966 года) предлагает метод оптической накачки среды для создания в ней инверсной 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].
- ▶ 1954 год: первый микроволновый генератор – мазер на аммиаке (Ч. Таунс, Басов Н. Г. и Прохоров А. М. – Нобелевская премия по физике 1964 года). Роль обратной связи играл объёмный резонатор, размеры которого были порядка 12,6 мм (длина волны, излучаемой при переходе аммиака с возбуждённого колебательного уровня на основной)[4]. Для усиления электромагнитного излучения оптического диапазона необходимо было создать объёмный резонатор, размеры которого были бы порядка микрона. Из-за связанных с этим технологических трудностей многие учёные в то время считали, что создать генератор видимого излучения невозможно[6].
- ▶ 1960 год: 16 мая Т. Мейман продемонстрировал работу первого оптического квантового генератора – лазера[7]. В качестве активной среды использовался кристалл искусственного рубина (оксид алюминия Al_2O_3 с небольшой примесью хрома Cr), а вместо объёмного резонатора служил резонатор Фабри – Перо, образованный серебряными зеркальными покрытиями, нанесёнными на торцы кристалла. Этот лазер работал в импульсном режиме на длине волны 694,3 нм[4]. В декабре того же года был создан гелий-неоновый лазер, излучающий в непрерывном режиме (А. Джаван, У. Беннет, Д. Хэрриот). Изначально лазер работал в инфракрасном диапазоне, затем был модифицирован для излучения видимого красного света с длиной волны 632,8 нм[6].
- ▶ Физика лазеров и по сей день интенсивно развивается. С момента изобретения лазера почти каждый год появлялись всё новые его виды, приспособленные для различных целей[6]. В 1961 г. был создан лазер на неодимовом стекле, а в течение следующих пяти лет были разработаны лазерные диоды, лазеры на красителях, лазеры на диоксиде углерода, химические лазеры. В 1963 г. Ж. Алфёров и Г. Кремер (Нобелевская премия по физике 2000 г.) разработали теорию полупроводниковых гетероструктур, на основе которых были созданы многие лазеры[4]

Гелий-неоновый лазер



Классификация лазеров

- **Твердотельные лазеры** на люминесцирующих твёрдых средах (диэлектрические кристаллы и стёкла). В качестве активаторов обычно используются ионы редкоземельных элементов или ионы группы железа Fe. Накачка оптическая и от полупроводниковых лазеров, осуществляется по трёх- или четырёхуровневой схеме. Современные твердотельные лазеры способны работать в импульсном, непрерывном и квазинепрерывном режимах.
- **Полупроводниковые лазеры**. Формально также являются твердотельными, но традиционно выделяются в отдельную группу, поскольку имеют иной механизм накачки (инжекция избыточных носителей заряда через p-n переход или гетеропереход, электрический пробой в сильном поле, бомбардировка быстрыми электронами), а квантовые переходы происходят между разрешёнными энергетическими зонами, а не между дискретными уровнями энергии. Полупроводниковые лазеры – наиболее употребительный в быту вид лазеров. Кроме этого, применяются в спектроскопии, в системах накачки других лазеров, а также в медицине (см. фотодинамическая терапия).
- **Вертикально-излучающие лазеры** (VCSEL) – «Поверхностно-излучающий лазер с вертикальным резонатором» – разновидность диодного полупроводникового лазера, излучающего свет в направлении, перпендикулярном поверхности кристалла, в отличие от обычных лазерных диодов, излучающих в плоскости, параллельной поверхности пластин.
- **Лазеры на красителях**. Тип лазеров, использующий в качестве активной среды раствор флюоресцирующих с образованием широких спектров органических красителей. Лазерные переходы осуществляются между различными колебательными подуровнями первого возбуждённого и основного синглетных электронных состояний. Накачка оптическая, могут работать в непрерывном и импульсном режимах. Основной особенностью является возможность перестройки длины волны излучения в широком диапазоне. Применяются в спектроскопических исследованиях.
- **Газовые лазеры** – лазеры, активной средой которых является смесь газов и паров. Отличаются высокой мощностью, монохроматичностью, а также узкой направленностью излучения. Работают в непрерывном и импульсном режимах. В зависимости от системы накачки газовые лазеры разделяют на газоразрядные лазеры, газовые лазеры с оптическим возбуждением и возбуждением заряженными частицами (например, лазеры с ядерной накачкой, в начале 80-х проводились испытания систем противоракетной обороны на их основе, однако без особого успеха), газодинамические и химические лазеры. По типу лазерных переходов различают газовые лазеры на атомных переходах, ионные лазеры, молекулярные лазеры на электронных, колебательных и вращательных переходах молекул и эксимерные лазеры.
- **Газодинамические лазеры** – газовые лазеры с тепловой накачкой, инверсия населённостей в которых создаётся между возбуждёнными колебательно-вращательными уровнями гетероядерных молекул путём адиабатического расширения движущейся с высокой скоростью газовой смеси (чаще N_2+CO_2+He или $N_2+CO_2+H_2O$, рабочее вещество – CO₂).

Классификация лазеров

- **Эксимерные лазеры** – разновидность газовых лазеров, работающих на энергетических переходах **эксимерных молекул** (**димерах благородных газов**, а также их **моногалогенидов**), способных существовать лишь некоторое время в возбуждённом состоянии. Накачка осуществляется пропусканием через газовую смесь пучка электронов, под действием которых атомы переходят в возбуждённое состояние с образованием эксимеров, фактически представляющих собой среду с **инверсией населённостей**. Эксимерные лазеры отличаются высокими энергетическими характеристиками, малым разбросом длины волны генерации и возможности её плавной перестройки в широком диапазоне.
- **Химические лазеры** – разновидность лазеров, источником энергии для которых служат **химические реакции** между компонентами рабочей среды (смеси газов). Лазерные переходы происходят между возбуждёнными колебательно-вращательными и основными уровнями составных молекул продуктов реакции. Для осуществления химических реакций в среде необходимо постоянное присутствие **свободных радикалов**, для чего используются различные способы воздействия на молекулы для их диссоциации. Отличаются широким спектром генерации в ближней **ИК-области**, большой мощностью непрерывного и импульсного излучения.
- **Лазеры на свободных электронах** – лазеры, активной средой которых является поток свободных **электронов**, колеблющихся во внешнем **электромагнитном поле** (за счёт чего осуществляется излучение) и распространяющихся с **релятивистской** скоростью в направлении излучения. Основной особенностью является возможность плавной широкодиапазонной перестройки частоты генерации. Различают **убитроны** и **скаттроны**, накачка первых осуществляется в пространственно-периодическом статическом поле **ондулятора**, вторых – мощным полем электромагнитной волны. Существуют также лазеры на циклотронном резонансе и **строфотроны**, основанные на тормозном излучении электронов, а также **флиматроны**, использующие эффект **черенковского** и **переходного излучения**. Поскольку каждый электрон излучает до 10^8 фотонов, лазеры на свободных электронах являются, по сути, классическими приборами и описываются законами **классической электродинамики**.
- **Квантовые каскадные лазеры** – полупроводниковые лазеры, которые излучают в среднем и дальнем **инфракрасном диапазоне**. В отличие от обычных полупроводниковых лазеров, которые излучают посредством вынужденных переходов между разрешёнными **электронными** и **дырочными** уровнями, разделёнными **запрещённой зоной полупроводника**, излучение квантовых каскадных лазеров возникает при переходе электронов между слоями **гетероструктуры** полупроводника и состоит из двух типов лучей, причём вторичный луч обладает весьма необычными свойствами и не требует больших затрат энергии.
- **Волоконный лазер** – лазер, **резонатор** которого построен на базе **оптического волокна**, внутри которого полностью или частично генерируется излучение. При полностью волоконной реализации такой лазер называется цельноволоконным, при комбинированном использовании волоконных и других элементов в конструкции лазера он называется волоконно-дискретным или гибридным.

Применение лазера

- ▶ С момента своего изобретения лазеры зарекомендовали себя как «готовые решения ещё неизвестных проблем». В силу уникальных свойств излучения лазеров, они широко применяются во многих отраслях науки и техники, а также в быту (проигрыватели [компакт-дисков](#), [лазерные принтеры](#), считыватели [штрихкодов](#), [лазерные указки](#) и пр.). Легко достижимая высокая плотность энергии излучения позволяет производить локальную термическую обработку и связанную с ней механическую обработку ([резку](#), [сварку](#), [пайку](#), [гравировку](#)). Точный контроль зоны нагрева позволяет сваривать материалы, которые сварить обычными способами (к примеру, [керамику](#) и [металл](#)). Луч лазера может быть сфокусирован в точку диаметром порядка [микрона](#), что позволяет использовать его в [микроэлектронике](#) для прецизионной механической обработки материалов (резка полупроводниковых кристаллов, сверление особо тонких отверстий в [печатных платах](#)). Широкое применение получила также лазерная [маркировка](#) и [художественная гравировка](#) изделий из различных материалов (в том числе объёмная гравировка прозрачных материалов). Лазеры используются для получения поверхностных покрытий материалов (лазерное [легирование](#), лазерная [наплавка](#), [вакуумно-лазерное напыление](#)) с целью повышения их [износостойкости](#). При лазерной обработке материалов на них не оказывается [механическое](#) воздействие, зона нагрева мала, поэтому возникают лишь незначительные термические [деформации](#). Кроме того, весь технологический процесс может быть полностью автоматизирован. Лазерная обработка потому характеризуется высокой точностью и производительностью.
- ▶ Лазеры применяются в [голографии](#) для создания самих голограмм и получения голографического объёмного изображения. Некоторые лазеры, например, [лазеры на красителях](#), способны генерировать [монохроматический свет](#) практически любой длины волны, при этом импульсы излучения могут достигать 10^{-16} с, и, следовательно, огромных [мощностей](#) (так называемые [гигантские импульсы](#)). Эти свойства используются в [спектроскопии](#), а также при изучении [нелинейных оптических эффектов](#). С использованием лазера удалось измерить расстояние до Луны с точностью до нескольких сантиметров. [Лазерная локация](#) космических объектов уточнила значения ряда фундаментальных астрономических постоянных и способствовала уточнению параметров [космической навигации](#), расширила представления о строении [атмосферы](#) и поверхности планет [Солнечной системы](#). В астрономических [телескопах](#), снабжённых [адаптивной оптической системой](#) коррекции атмосферных искажений, лазер применяют для создания искусственных опорных звезд в верхних слоях атмосферы.
- ▶ Применение лазеров в метрологии и измерительной технике не ограничивается измерением расстояний. Лазеры находят здесь разнообразнейшее применение: для измерения времени, давления, температуры, скорости потоков жидкостей и газов, угловой скорости ([лазерный гироскоп](#)), концентрации веществ, оптической плотности, разнообразных оптических параметров и характеристик, в виброметрии и др.
- ▶ В медицине лазеры применяются как [бескровные скальпели](#), используются при лечении [офтальмологических](#) заболеваний ([катаракта](#), [отслоение сетчатки](#), [лазерная коррекция зрения](#) и др.). Широкое применение получили также в [косметологии](#) (лазерная [эпиляция](#), лечение сосудистых и пигментных дефектов кожи, лазерный [пилинг](#), удаление [татуировок](#) и [пигментных пятен](#)).
- ▶ В настоящее время бурно развивается так называемая [лазерная связь](#). Известно, что чем выше [несущая частота канала связи](#), тем больше его [пропускная способность](#). Поэтому [радиосвязь](#) стремится переходить на всё более короткие длины волн. Длина [световой волны](#) в среднем на шесть порядков меньше длины волны [радиодиапазона](#), поэтому посредством лазерного излучения возможна передача гораздо большего объёма [информации](#). Лазерная связь осуществляется как по открытым, так и по закрытым световодным структурам, например, по [оптическому волокну](#). Свет за счёт явления [полного внутреннего отражения](#) может распространяться по нему на большие расстояния, практически не ослабевая.
- ▶ Для изучения взаимодействия лазерного излучения с веществом и получения управляемого термоядерного синтеза строят [большие лазерные комплексы](#), мощность которых может превосходить 1 ПВт.