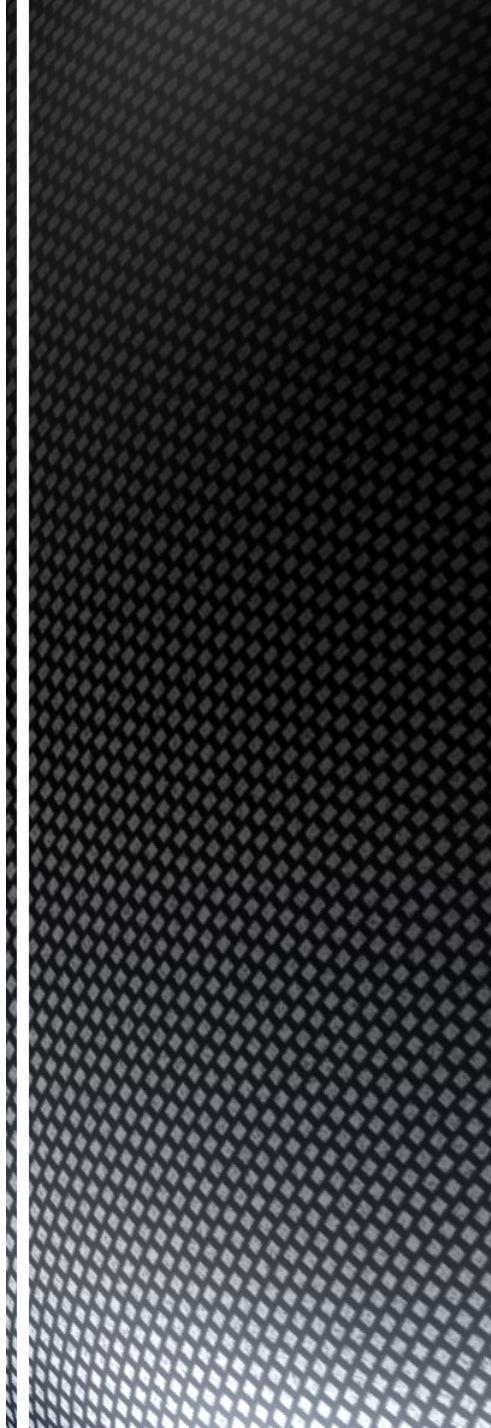


Лазеры

Вербицкой маргариты



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 [энергиюнакачки](#) ([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](#) и заканчивая исследованиями в области [управляемого термоядерного синтеза](#).

Основные даты [История изобретения лазеров](#)

- **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 населённости](#) 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](#) Al₂O₃ 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].

Принцип действия

Физической основой работы лазера служит явление [вынужденного \(индуцированного\) излучения](#)^[8]. Суть явления состоит в том, что возбуждённый [атом](#) (или другая [квантовая система](#)) способен излучить [фотон](#) под действием другого фотона без его поглощения, если [энергия](#) последнего равняется разности энергий [уровней](#) атома до и после излучения. При этом излучённый фотон [когерентен](#) фотону, вызвавшему излучение (является его «точной копией»). Таким образом происходит усиление [света](#). Этим явление отличается от [спонтанного излучения](#), в котором излучаемые фотоны имеют случайные направления распространения, [поляризацию](#) и [фазу](#)^{[9][10]}.

[Гелий-неоновый лазер](#). Светящаяся область в центре — это не лазерный луч, а свечение [электрического разряда](#) в газе, возникающее подобно тому, как это происходит в [неоновых лампах](#). Собственно лазерный луч проецируется на экран справа в виде красной точки.

[Вероятность](#) того, что случайный фотон вызовет индуцированное излучение возбуждённого атома, в точности равняется вероятности поглощения этого фотона атомом, находящимся в невозбуждённом состоянии^[11]. Поэтому для усиления света необходимо, чтобы возбуждённых атомов в среде было больше, чем невозбуждённых (так называемая [инверсия населённостей](#)). В состоянии [термодинамического равновесия](#) это условие не выполняется, поэтому используются различные системы [накачки активной среды](#) лазера ([оптические](#), [электрические](#), [химические](#) и др.)^[12].

Первоисточником генерации является процесс спонтанного излучения, поэтому для обеспечения преемственности поколений фотонов необходимо существование [положительной обратной связи](#), за счёт которой излучённые фотоны вызывают последующие акты индуцированного излучения. Для этого активная среда лазера помещается в [оптический резонатор](#). В простейшем случае он представляет собой два [зеркала](#), установленных друг напротив друга, одно из которых полупрозрачное — через него луч лазера частично выходит из резонатора. Отражаясь от зеркал, пучок излучения многократно проходит по резонатору, вызывая в нём индуцированные переходы. Излучение может быть как непрерывным, так и импульсным. При этом, используя различные приборы (вращающиеся [призмы](#), [ячейки Керра](#) и др.) для быстрого выключения и включения обратной связи и уменьшения тем самым периода импульсов, возможно создать условия для генерации излучения очень большой мощности (так называемые [гигантские импульсы](#))^[9]. Этот режим работы лазера называют режимом модулированной [добротности](#).

Генерируемое лазером излучение является [монохроматическим](#) (одной или дискретного набора [длин волн](#)), поскольку вероятность излучения фотона определённой длины волны больше, чем близко расположенной, связанной с уширением спектральной линии, а, соответственно, и вероятность индуцированных переходов на этой [частоте](#) тоже имеет максимум. Поэтому постепенно в процессе генерации фотоны данной длины волны будут доминировать над всеми остальными фотонами^[12]. Кроме этого, из-за особого расположения зеркал, в лазерном луче сохраняются лишь те фотоны, которые распространяются в направлении, параллельном [оптической оси](#) резонатора на небольшом расстоянии от неё, остальные фотоны быстро покидают объём резонатора. Таким образом, луч лазера имеет очень малый угол расходимости^[13]. Наконец, луч лазера имеет строго определённую [поляризацию](#). Для этого в резонатор вводят различные [поляризаторы](#), например, ими могут служить плоские стеклянные пластинки, установленные под [углом Брюстера](#) к направлению распространения луча лазера^[14].

Устройство лазера

Устройство лазера [Устройство лазера](#)

На схеме обозначены: 1 — активная среда; 2 — энергия накачки лазера; 3 — непрозрачное [зеркало](#); 4 — полупрозрачное зеркало; 5 — лазерный луч

Все лазеры состоят из трёх основных частей:

- активной (рабочей) среды;
- системы накачки (источник энергии);
- оптического резонатора (может отсутствовать, если лазер работает в режиме усилителя).

Каждая из них обеспечивает для работы лазера выполнение своих определённых функций.

Активная среда

В настоящее время в качестве рабочей среды лазера используются различные [агрегатные состояния](#)

[вещества](#): [твёрдое](#), [жидкое](#), [газообразное](#), [плазма](#)^[15]. В обычном состоянии число атомов, находящихся на возбуждённых энергетических уровнях, определяется [распределением Больцмана](#) здесь N — число атомов, находящихся в возбуждённом состоянии с энергией E , N_0 — число атомов, находящихся в основном состоянии (энергия равна нулю), k — [постоянная Больцмана](#), T — [температура](#) среды. Иными словами, таких атомов, находящихся в возбуждённом состоянии, меньше, чем в основном, поэтому вероятность того, что [фотон](#), распространяясь по среде, вызовет вынужденное излучение, также мала по сравнению с вероятностью его поглощения. Поэтому [электромагнитная волна](#), проходя по веществу, расходует свою энергию на возбуждение атомов. [Интенсивность](#) излучения при этом падает по [закону Бугера](#)^[2]:

здесь I_0 — начальная интенсивность, I — интенсивность излучения, прошедшего расстояние l в веществе, a_1 — [показатель поглощения](#) вещества. Поскольку зависимость [экспоненциальная](#), излучение очень быстро поглощается.

В том случае, когда число возбуждённых атомов больше, чем невозбуждённых (то есть в состоянии инверсии населённостей), ситуация прямо противоположна. Акты вынужденного излучения преобладают над поглощением, и излучение усиливается по закону^[2]:

$$I_{l_1} = I_{l_0} \exp(a_2 l),$$
 где a_2 — коэффициент квантового усиления. В реальных лазерах усиление происходит до тех пор, пока величина поступающей за счёт вынужденного излучения энергии не станет равной величине энергии, теряемой в резонаторе^[17]. Эти потери связаны с [насыщением](#) метастабильного уровня рабочего вещества, после чего энергия накачки идёт только на его разогрев, а также с наличием множества других факторов (рассеяние на неоднородностях среды, поглощение [примесями](#), неидеальность отражающих зеркал, полезное и нежелательное излучение в окружающую среду и пр.)^[2].

Система накачки

Для создания инверсной населённости среды лазера используются различные механизмы. В [твердотельных лазерах](#) она осуществляется за счёт облучения мощными [газоразрядными лампами-вспышками](#), сфокусированным [солнечным](#) излучением (так называемая оптическая накачка) и излучением других лазеров (в частности, полупроводниковых)^{[9][18]}. При этом возможна работа только в импульсном или импульсно-периодическом режиме, поскольку требуются очень большие [плотности энергии](#) накачки, вызывающие при длительном воздействии сильный разогрев и разрушение стержня рабочего вещества^[19]. В газовых и жидкостных лазерах (см. [гелий-неоновый лазер](#), [лазер на красителях](#)) используется накачка [электрическим разрядом](#). Такие лазеры работают в непрерывном режиме. Накачка [химических лазеров](#) происходит посредством протекания в их активной среде [химических реакций](#). При этом инверсия населённостей возникает либо непосредственно у продуктов реакции, либо у специально введённых примесей с подходящей структурой энергетических уровней. Накачка [полупроводниковых лазеров](#) происходит под действием сильного прямого [тока](#) через [p-n переход](#), а также пучком [электронов](#). Существуют и другие методы накачки (газодинамические, заключающиеся в резком охлаждении предварительно нагретых [газов](#); [фотодиссоциация](#), частный случай химической накачки и др.)^[17]. На рисунке: а — трёхуровневая и б — четырёхуровневая схемы накачки активной среды лазера.

Классическая трёхуровневая система накачки рабочей среды используется, например, в рубиновом лазере. [Рубин](#) представляет собой [кристалл корунда](#) Al_2O_3 , [легированный](#) небольшим количеством [ионов хрома](#) Cr^{3+} , которые и являются источником лазерного излучения. Из-за влияния [электрического поля кристаллической решётки](#) корунда внешний энергетический уровень хрома E_2 расщеплён (см. [эффект Штарка](#)). Именно это делает возможным использование монохроматического излучения в качестве накачки^[9]. При этом атом переходит из основного состояния с энергией E_0 в возбуждённое с энергией около E_2 . В этом состоянии атом может находиться сравнительно недолго (порядка 10^{-8} с), почти сразу происходит безызлучательный переход на уровень E_1 , на котором атом может находиться значительно дольше (до 10^{-3} с), это так называемый [метастабильный уровень](#). Возникает возможность осуществления индуцированного излучения под воздействием других случайных фотонов. Как только атомов, находящихся в метастабильном состоянии становится больше, чем в основном, начинается процесс генерации^{[17][20]}. Следует отметить, что создать инверсию населённостей атомов хрома Cr с помощью накачки непосредственно с уровня E_0 на уровень E_1 нельзя. Это связано с тем, что если поглощение и вынужденное излучение происходят между двумя уровнями, то оба эти процесса протекают с одинаковой скоростью. Поэтому в данном случае накачка может лишь уравнивать населённости двух уровней, чего недостаточно для возникновения генерации^[9]. В некоторых лазерах, например в неодимовом, генерация излучения в котором происходит на ионах [неодима](#) Nd^{3+} , используется четырёхуровневая схема накачки. Здесь между метастабильным E_2 и основным уровнем E_0 имеется промежуточный — рабочий уровень E_1 . Вынужденное излучение происходит при переходе атома между уровнями E_2 и E_1 . Преимущество этой схемы заключается в том, что в данном случае легко выполнить условие инверсной населённости, так как время жизни верхнего рабочего уровня (E_2) на несколько порядков больше времени жизни нижнего уровня (E_1). Это значительно снижает требования к источнику накачки^[17]. Кроме того, подобная схема позволяет создавать мощные лазеры, работающие в непрерывном режиме, что очень важно для некоторых применений^[15]. Однако подобные лазеры обладают существенным недостатком в виде низкого квантового КПД, которое определяется как отношение энергии излученного фотона к энергии поглощенного фотона накачки ($\eta_{\text{квантовое}} = \frac{h\nu_{\text{излучения}}}{h\nu_{\text{накачки}}}$)

Оптический резонатор

В ширину [спектральной линии](#), изображённой на рисунке зелёным цветом, укладывается три [собственных частоты резонатора](#). В этом случае генерируемое лазером излучение будет [трехмодовым](#). Для фиолетовой линии излучение будет чисто [монохроматическим](#). Зеркала лазера не только обеспечивают существование положительной обратной связи, но и работают как резонатор, поддерживая одни генерируемые лазером [моды](#), соответствующие [стоячим волнам](#) данного резонатора^[21], и подавляя другие^[16]. Если на [оптической длине](#) L резонатора укладывается целое число полуволн n :

$$2L = n\lambda$$
, то такие волны, проходя по резонатору, не меняют своей фазы и вследствие [интерференции](#) усиливают друг друга. Все остальные волны с близко расположенными частотами постепенно гасят друг друга. Таким образом, спектр [собственных частот](#) оптического резонатора определяется соотношением:

$$\nu_n = \frac{c}{2L}n$$
, здесь c — [скорость света в вакууме](#). Интервалы между соседними частотами резонатора одинаковы и равны:

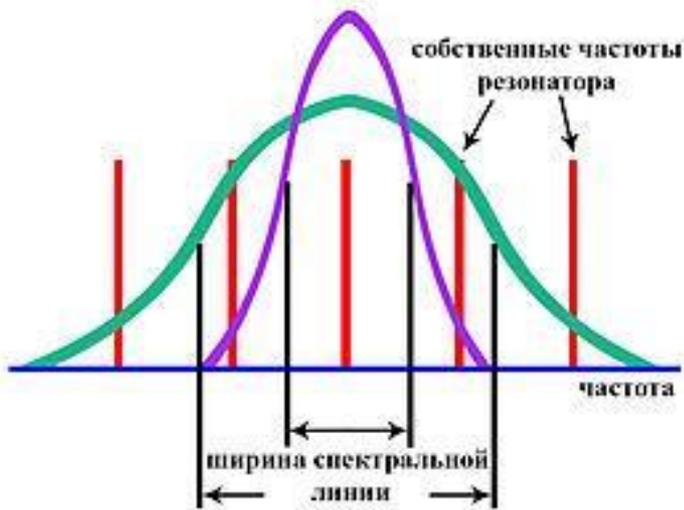
$$\Delta\nu_r = \frac{c}{2L}$$
. Линии в [спектре излучения](#) в силу различных причин ([доплеровское уширение](#), внешние [электрические](#) и [магнитное](#) поля, [квантовомеханические](#) эффекты и др.) всегда имеют конечную ширину $\Delta\nu_{\{}}$.

Поэтому могут возникать ситуации, когда на ширину [спектральной линии](#) (в лазерной технике применяется термин «полоса усиления») укладывается несколько собственных частот резонатора. В этом случае излучение лазера будет [многомодовым](#)^[22]. Синхронизация этих мод позволяет добиться того, чтобы излучение представляло собой последовательность коротких и мощных импульсов. Если же $\Delta\nu_{\{}} < \Delta\nu_r$, то в излучении лазера будет присутствовать только одна частота, в данном случае резонансные свойства системы зеркал слабо выражены на фоне резонансных свойств спектральной линии^[12].

При более строгом расчёте необходимо учитывать, что усиливаются волны, распространяющиеся не только параллельно оптической оси резонатора но и под малым углом φ к ней. Условие усиления тогда принимает вид^[16]:

$$2L \cos \varphi = n\lambda$$
. Это приводит к тому, что [интенсивность](#) пучка лучей лазера различна в разных точках [плоскости](#),

перпендикулярной этому пучку. Здесь наблюдается система светлых пятен, разделённых тёмными узловыми линиями. Для устранения этих нежелательных эффектов используют различные [диафрагмы](#), рассеивающие нити, а также применяют различные схемы оптических резонаторов^[23].



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^[18].

• **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^[24]. Кроме этого, применяются в **спектроскопии**, в системах накачки других лазеров, а также в **медицине** (см. **фотодинамическая терапия**).

• **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^[25].

• **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**^[26], в начале 80-х проводились испытания систем противоракетной обороны на их основе^[27], однако без особого успеха^[28]), **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 **экцимерные лазеры**^[29].

• **Газодинамические лазеры** — газовые лазеры с тепловой накачкой, инверсия населённости 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 — CO_2)^[30].

• **Экцимерные лазеры** — разновидность газовых лазеров, работающих на энергетических переходах **экцимерных молекул** (**димерах благородных газов** а также их **моногоалогенидов**), 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 экцимеров, фактически представляющих собой среду с **инверсией населённости**. Экцимерные лазеры отличаются высокими энергетическими характеристиками, малым разбросом длины волны генерации и возможности её плавной перестройки в широком диапазоне^[31].

• **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^[32].

• **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 **флимагроны**, 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**^[33].

- **Квантовые каскадные лазеры** – полупроводниковые лазеры, которые излучают в среднем и дальнем **инфракрасном диапазоне**^[34]. В отличие от обычных полупроводниковых лазеров, которые излучают посредством вынужденных переходов между разрешенными **электронными** и **дырочными** уровнями, разделенными **запрещенной зоной полупроводника**, излучение квантовых каскадных лазеров возникает при переходе электронов между слоями **гетероструктуры** полупроводника и состоит из двух типов лучей, причем вторичный луч обладает весьма необычными свойствами и не требует больших затрат энергии^[35].
- **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.
- **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.
- Другие виды лазеров, развитие принципов которых на данный момент является приоритетной задачей исследований (**рентгеновские лазеры**^[36], **гамма-лазеры**^[37] и др.).

Применение лазеров

Лазерное сопровождение музыкальных представлений (**лазерное шоу**)

С момента своего изобретения лазеры зарекомендовали себя как «готовые решения ещё неизвестных проблем»^[38]. 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 **штрих-кодов**, **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 невозможно 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**)^[39]. Широкое применение получила также лазерная **маркировка** и **художественная гравировка** изделий из различных материалов^[40] (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.

Полупроводниковый лазер, применяемый в узле генерации изображения **принтера** Hewlett-Packard

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**^[41]. 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 по расстояниям. 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.

Сверхкороткие импульсы лазерного излучения используются в [лазерной химии](#) для запуска и анализа [химических реакций](#). Здесь лазерное излучение позволяет обеспечить точную локализацию, дозированность, абсолютную стерильность и высокую скорость ввода энергии в систему^[41]. В настоящее время разрабатываются различные системы лазерного охлаждения^[42], рассматриваются возможности осуществления с помощью лазеров [управляемого термоядерного синтеза](#). Лазеры используются и в военных целях, например, в качестве средств наведения и [прицеливания](#). Рассматриваются варианты создания на основе мощных лазеров боевых систем защиты воздушного, морского и наземного базирования^{[43][44]}.

[Револьвер](#), оснащённый [лазерным целеуказателем](#).

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](#))^[45].

В настоящее время бурно развивается так называемая *лазерная связь*. Известно, что чем выше [несущая частота канала связи](#), тем больше его [пропускная способность](#)^[2]. 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^[46].

Для изучения взаимодействия лазерного излучения с веществом и получения управляемого термоядерного синтеза строят [большие лазерные комплексы](#), мощность которых может превосходить 1 ПВт.

Безопасность лазеров

Любой, даже маломощный лазер, представляет опасность для зрения человека. Лазер часто применяется в быту, на концертах, музыкальных мероприятиях. Зафиксировано множество случаев получения ожогов [сетчатки](#) глаза^[47], что приводило к временной или полной слепоте.

