



ЛАЗЕР

Авторы: И. А. Щербаков

ЛАЗЕР, источник когерентного электромагнитного излучения высокой направленности, способный осуществлять предельно возможную концентрацию энергии излучения в пространстве, времени и спектральном диапазоне. Слово «лазер» является аббревиатурой английского словосочетания: «Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation», что означает «усиление света вынужденным излучением». Первоначально термин «лазер» применялся только к оптическому излучению (свету), ныне генерация лазерного излучения получена в диапазоне длин волн от микроволнового до мягкого рентгеновского. Лазерное излучение возникает как результат преобразования различных видов энергии (световой, электрической, химической и др.). Начало новому научному направлению – [квантовой электронике](#), в т. ч. [лазерной физике](#), было положено работами А. М. [Прохорова](#), Н. Г. [Басова](#) в СССР и Ч. Х. [Таунса](#) в США (1954–55), которые в 1964 были удостоены Нобелевской премии.

Принцип работы лазера

Л. включает два необходимых элемента: [активную среду](#), приведённую в неравновесное состояние внешним источником энергии, и [резонатор](#). Активная среда представляет собой вещество, находящееся в неравновесном состоянии и способное усиливать проходящее через него резонансное электромагнитное излучение, частота которого соответствует разности энергий двух квантовых энергетических уровней частиц среды. Переход частицы с более высокого на более низкий уровень энергии может быть излучательным или безызлучательным. Испускание фотона, т. е. излучение, может быть как самопроизвольным (спонтанное испускание), так и под действием электромагнитного излучения (индуцированное, или вынужденное, испускание). При спонтанном испускании частота фотона произвольна в пределах контура спектральной линии, ширина которой определяется шириной энергетических

уровней, участвующих в переходе. Произвольны также направление распространения излучения и его фаза. При вынужденном излучении испущенные фотоны полностью тождественны фотонам, воздействующим на частицы среды, т. е. происходит усиление падающей электромагнитной волны. Если воздействующая волна монохроматична, то вынужденное испускание также будет монохроматичным, имеющим ту же частоту, то же направление распространения и ту же поляризацию.

Если частица находится в нижнем энергетическом состоянии, то под действием внешней электромагнитной волны может происходить резонансное поглощение, сопровождающееся переходом частицы в верхнее энергетическое состояние. При резонансном поглощении энергия воздействующей волны уменьшается, а при индуцированном испускании увеличивается. Вероятность резонансного поглощения точно равна вероятности индуцированного испускания. Поэтому будет ли преобладать в реальной среде процесс вынужденного испускания или резонансного поглощения, зависит от соотношения населённостей верхнего и нижнего энергетических уровней. Преобладание вынужденного испускания, необходимое для работы Л., возможно при большей населённости верхнего состояния по сравнению с нижним при учёте их статистических весов (инверсная населённость). [Инверсия населённостей](#) в среде может быть достигнута при подводе к ней энергии или при использовании энергии, запасённой в среде заранее. Процесс создания неравновесной среды называется [накачкой](#). Способы накачки могут быть самыми разными: внешнее электромагнитное излучение, инжекция носителей заряда, химические реакции, электрический разряд, быстрое охлаждение и др. Принципиальным вопросом является создание инверсной населённости для получения генерации в коротковолновой и, в частности, видимой области спектра, где преобладает спонтанное излучение, препятствующее образованию инверсии. В ноябре 1954 Н. Г. Басов и А. М. Прохоров предложили метод создания инверсной населённости посредством воздействия на рабочие частицы внешним электромагнитным излучением резонансной частоты. Этот метод, названный впоследствии трёхуровневым, оказался универсальным. Он позволяет при выполнении соответствующих требований достигать инверсной населённости в любых многоуровневых системах, независимо от величины энергии кванта.

Второй неотъемлемой частью Л. является резонатор – устройство, осуществляющее положительную обратную связь, т. е. возвращающее часть выходящего излучения в активную среду и обеспечивающее переход возможного процесса усиления электромагнитного излучения в процесс его генерации.

В коротковолновом радиодиапазоне обычно применяются резонаторы, размеры которых сравнимы или меньше длины возбуждаемых в них волн. Достаточно долго считали, что для оптического диапазона, где длина волны порядка 1 мкм, такой резонатор изготовить невозможно, и при существовавшем уровне технологии это соответствовало действительности. Ныне уровень технологии позволяет это сделать. В 1958 А. М. Прохоров предложил использовать т. н. открытые резонаторы. Размеры такого резонатора много больше длины волны возбуждаемых в нём электромагнитных колебаний, а резонансные свойства сохраняются, даже если его размеры во много (до 10^6 и более) раз превышают длину волны возбуждаемых электромагнитных колебаний вплоть до 10^6 раз и более. Простейший открытый резонатор состоит из двух отражающих поверхностей (зеркал), которые находятся на расстоянии, значительно превышающем длину волны излучения. Такая пара зеркал использовалась ранее в оптике в качестве интерферометра Фабри – Перо, но совершенно для других целей. Обычно диаметр зеркала также много больше длины волны. В активной среде, помещённой в резонатор, запасается энергия в виде электронного, колебательного или электронно-колебательного возбуждения. В результате вынужденного излучения энергия извлекается из среды и оказывается в резонаторе в форме электромагнитного поля, которое излучается в окружающее пространство, выходя через одно частично прозрачное зеркало резонатора.

Обратная связь может быть реализована непосредственно в активной среде – т. н. распределённая обратная связь. Она возникает в активной среде, оптическая плотность которой периодически меняется в пространстве. Отражение возникает при переходе волны от одного участка к другому, отличающемуся оптической плотностью. Коэффициент отражения при одном переходе мал, но т. к. переходов может быть много, общий коэффициент отражения оказывается достаточно большим.

С развитием нанотехнологий в кон. 1980-х гг. стало возможным изготовление

эффективных микрорезонаторов с размерами порядка оптической длины волны. Л. с такими резонаторами (см. [Микролазер](#)) обладают существенными достоинствами: малыми потерями, высокой квантовой эффективностью излучения и очень низкими порогами генерации. На практике широко применяются полупроводниковые Л. с вертикальным резонатором. Разработаны микрорезонаторные Л., использующие полупроводниковые наноструктуры (например, квантовые точки) в качестве активных элементов ([лазер на квантовых точках](#)), и ожидается появление промышленных технологий их изготовления. Такие миниатюрные источники света найдут применение в биологии, медицине, оптических линиях связи, оптических и квантовых компьютерах и др.

Существует много различных схем сочетания системы зеркал с активной средой, но во всех случаях условие возникновения генерации (условие самовозбуждения) общее: усиление излучения за один проход в системе зеркал и через активную среду должно превышать все потери энергии в резонаторе за этот проход. В общий баланс должны быть включены потери энергии на собственно полезное лазерное излучение, выходящее в окружающее пространство, и паразитные потери энергии на рассеяние света, его поглощение и т. п.

Историческая справка

Л. появились в нач. 1960-х гг. Днём рождения Л. следует считать 16 мая 1960. Эта дата стоит в рабочей тетради американского учёного Т. [Меймана](#). Его результат был опубликован в августе 1960. В созданном им приборе содержались все необходимые и достаточные компоненты для получения генерации оптического когерентного излучения: среда с инверсной населённостью (синтетический кристалл рубина), трёхуровневая схема оптической накачки и открытый резонатор. В СССР Л. на кристаллах рубина был запущен 18 сентября 1961. в Физическом институте им. П. Н. Лебедева АН СССР М. Д. Галаниным, А. М. Леонтовичем и З. А. Чижиковой. Этому историческому событию предшествовали глубокие теоретические и экспериментальные исследования. Усиление и генерация когерентных электромагнитных колебаний были реализованы в радиодиапазоне задолго до появления Л. с помощью устройств, размеры которых малы по сравнению с длиной

волны излучения. Однако разработанные и применённые для этого методы не могли быть перенесены в оптический диапазон.

В 1917 А. [Эйнштейн](#) обобщил понятие вынужденного излучения для квантовомеханической системы. Он постулировал, что возбуждённая частица может излучать не только спонтанно, но и под воздействием взаимодействующего с ней кванта внешнего электромагнитного поля. Это определило новое уникальное свойство когерентного излучения – полную идентичность воздействующего и излучённого квантов.

Тогда же А. Эйнштейном была установлена связь между поглощением и индуцированным излучением, что позволило определять характеристики этих процессов из экспериментальных спектроскопических данных. Но он рассмотрел равновесный случай, тогда как лазерный эффект является принципиально неравновесным. Оптики в то время считали вынужденное излучение красивой, но бесполезной абстракцией, т. к. в обычных условиях плотность энергии света мала и пропорциональная ей вероятность индуцированного излучения также мала. Тем не менее, работа А. Эйнштейна явилась первым кирпичиком в фундаменте будущей науки – [квантовой электроники](#).

Некоторые указания на то, что в сильно возбуждённом газе имеет место «отрицательное поглощение», т. е. усиление излучения, содержатся в работе немецкого физика Р. Ладенбурга (1928). Однако твёрдая уверенность в необходимости жёсткого равновесия излучения со средой не позволила должным образом отнестись к этому явлению.

В 1938 российский физик В. А. Фабрикант с сотрудниками экспериментально обнаружил усиление света в неравновесной среде (газовом разряде) и сформулировал условие усиления света атомной системой. Это явилось очередным шагом на пути создания лазера.

Реальная концепция Л. появилась лишь в результате развития и слияния квантовых представлений в оптике и волновых представлений в радиофизике. Решающую роль в объединении результатов оптики и радиофизики сыграла радиоспектроскопия,

изучающая спектры атомов, молекул и ионов в диапазоне частот 10^{10} – 10^{11} Гц.

Основные принципы работы Л. были сформулированы и реализованы первоначально в микроволновом диапазоне при создании мазеров, где, в отличие от оптического диапазона, в условиях термодинамического равновесия возбуждённые уровни сильно населены, а спонтанное излучение слабое. Важно также, что радиофизики отчётливо осознавали решающее значение обратной связи при переходе от усилителя к генератору. Эта фундаментальная идея была реализована при создании молекулярного генератора (мазера) Дж. Гордоном, Г. Цайгером, Ч. Х. Таунсом в США (1954) и Н. Г. Басовым и А. М. Прохоровым в СССР (1955). В качестве активной среды использовался пучок молекул аммиака, инверсная населённость достигалась электростатической пространственной сортировкой, обратная связь обеспечивалась объёмным резонатором.

Для перенесения реализованных в радиодиапазоне возможностей в оптический диапазон необходимо было обеспечить преобладание вынужденного излучения над спонтанным (т. е. разработать эффективные методы создания инверсной населённости) и обеспечить эффективную обратную связь для оптической длины волны излучения.

Для создания инверсной населённости Н. Г. Басов и А. М. Прохоров предложили использовать метод электромагнитной накачки, известный как трёхуровневая схема накачки (1955). Н. Бломберген предложил применить этот метод для создания мазеров-усилителей на парамагнитных кристаллах (1956). Суть этого метода сводится к тому, что к двум рабочим уровням Л. добавляется третий, вспомогательный, расположенный выше верхнего лазерного уровня, в который осуществляется накачка с последующей релаксацией на верхний лазерный уровень. В такой схеме для достижения инверсии на нижнем лазерном уровне должно быть менее половины всех рабочих частиц. Для этого требуется достаточно мощная накачка. Снять это жёсткое условие можно за счёт четвёртого вспомогательного уровня, лежащего выше уровня, из которого осуществляется поглощение и который является в данном случае нижним лазерным уровнем, незаселённым термически при рабочей температуре лазера.

Хотя предложение Басова и Прохорова относилось к молекулярным пучкам, оно

оказалось универсальным, пригодным для любых атомных систем.

Принципиальным шагом при создании Л. было также предложение А. М. Прохорова использовать открытый резонатор, который один в то время мог обеспечить эффективную обратную связь в оптическом диапазоне спектра (1958).

Высказанные идеи были реализованы Т. Мейманом (США) в 1960 при создании первого в мире Л., в котором в качестве активной среды использовался синтетический кристалл рубина, к этому времени подробно изученный и успешно применявшийся в качестве активной среды мазеров. В кон. 1960 А. Джаван и др. (США) осуществили запуск [газоразрядного лазера](#) на смеси гелия и неона. Это были первые два Л., излучающие в красной области спектра, после чего началось лавинообразное развитие [лазерной физики](#).

Типы лазеров

Общепризнанной системы классификации Л. нет, но часто Л. разделяют по типу используемой в них активной среды. При этом также принимаются во внимание способ накачки, длина волны излучения и некоторые другие характеристики. Можно выделить следующие основные типы Л.: твердотельные лазеры, полупроводниковые, волоконные, газовые, химические, жидкостные, лазеры на свободных электронах, лазеры с ядерной накачкой, рентгеновские лазеры, гамма-лазеры (пока не реализованы).

Твердотельные лазеры

Активной средой этих Л. является твёрдое тело, представляющее собой систему, состоящую из основной матрицы и внедрённых в неё активирующих элементов, на квантовых переходах которых и осуществляется генерация. В качестве основной матрицы используются различные диэлектрические кристаллы, стекло, прозрачная керамика или полимеры (см. [Лазерные материалы](#)). В качестве активирующих примесей наиболее часто применяются ионы переходных элементов, особенно ионы Nd, Cr, Ti и др. Накачка [твердотельных лазеров](#) осуществляется оптическим излучением, источником которого являются специальные газоразрядные лампы,

работающие как в импульсном, так и в непрерывном режиме и помещённые вместе с активным элементом в закрытую отражающую полость. Всё большее значение приобретает технология накачки диодными Л., изменившая возможности твердотельных Л.: повысились их КПД, надёжность, снизились массогабаритные показатели и при этом была сохранена простота конструкции. Оптическая накачка осуществляется по трёхуровневой схеме или по более сложным схемам. Примером классической трёхуровневой схемы накачки является накачка кристаллов рубина, где лазерный переход осуществляется между инверсно населённым возбуждённым уровнем и основным состоянием, которое всегда заселено. Использование активной среды, имеющей четвёртый уровень, расположенный между возбуждённым и основным состояниями, который может иметь пренебрежимо малую заселённость, существенно упрощает достижение инверсии и снижает порог генерации. Примером такой четырёхуровневой схемы генерации является [неодимовый лазер](#).

Разветвлённая схема электронных и электронно-колебательных состояний редкоземельных элементов даёт возможность использовать более сложные схемы оптической накачки и создать т. н. антистоксовы Л., длина волны излучения которых меньше длины волны излучения накачки. В недалёком будущем диодная накачка полностью заменит накачку газоразрядными лампами.

Лазеры на стёклах



Рис. 1. Лазерная установка на стекле с неодимом для исследования в области термоядерного синтеза.

В них в большинстве случаев применяются силикатные или фосфатные стёкла, активированные ионами Nd^{3+} или, реже, Er^{3+} (см. [Лазерные стёкла](#)). Обычная длина волны генерации ионов Nd^{3+} $\lambda_r \approx 1,06$ мкм, хотя возможна генерация и на других переходах в области $\lambda_r \approx 1,32$ и $0,9$ мкм. Ионы Er^{3+} в стёклах обеспечивают генерацию в безопасной для глаз области $\lambda_r \approx 1,5$ мкм. Л. работают в импульсном режиме. Длительность импульса

генерации может быть от 10^{-12} с (режим синхронизации мод) до 10^{-2} с (режим свободной генерации). Многоканальные многокаскадные лазерные системы на активных элементах из неодимового стекла имеют выходную энергию до 1 МДж при длительности импульса ок. 3 нс. Такие Л. используются в экспериментах по лазерному термоядерному синтезу (рис. 1).

Лазеры на кристаллах

Эффект генерации излучения обнаружен на большом числе активированных кристаллов (ок. 300), однако в реально применяемых Л. используются лишь некоторые. Исторически первым был лазер на кристаллах рубина. Накачка этого Л. осуществляется импульсными лампами, длина волны генерации 694,3 нм. Широко используются Л. на кристаллах иттрий-алюминиевого граната, фторидов и ванадатов, легированных ионами неодима и другими редкоземельными ионами. Эти Л. работают как с ламповой, так и с диодной накачкой в импульсном и непрерывном режимах в диапазоне длин волн от 0,9 до 3 мкм. Генерация гармоник излучения этих Л. позволяет продвинуться в коротковолновую область спектра, вплоть до ультрафиолетовой. В области $\lambda \approx 280\text{--}316$ нм непосредственно получена генерация на ионах церия. В непрерывном и импульсно-периодическом режимах мощность некоторых твердотельных Л. может достигать величин более 10^4 Вт.

Достаточно широко применяются Л. на кристаллах с центрами окраски (см. [Лазер на центрах окраски](#)). Такие Л. характеризуются сравнительно большой спектральной шириной линии люминесценции, что позволяет перестраивать их частоту (например, Л. на кристаллах фторидов).

В особый класс следует выделить перестраиваемые твердотельные Л. на основе кристаллов александрита, легированного ионами хрома, и лейкосапфира, легированного ионами титана. В отличие от кристаллов рубина, где лазерный переход в ионах хрома является электронным, в кристалле александрита генерация осуществляется на электронно-колебательном переходе. При этом наибольшая эффективность генерации достигается при температурах выше комнатной. Особенностью этих кристаллов является широкая полоса люминесценции, что даёт

возможность использовать их для создания Л., перестраиваемых по частоте в широком спектральном диапазоне, и для генерации очень коротких световых импульсов. Так, Л. на кристалле лейкосапфира с титаном может излучать импульсы длительностью примерно один период колебания электромагнитного поля. Для оптического диапазона это единицы фемтосекунд. В мощных лазерных системах на основе этого кристалла достигается пиковая мощность порядка 10^{15} Вт. При фокусировке такого излучения в фокальном пятне получена плотность мощности излучения ок. 10^{22} Вт/см². Эксперименты с подобными сверхсильными полями должны привести к открытию новых квантовых электродинамических явлений, к возможности лазерного возбуждения ядер и к другим, трудно предсказуемым новым результатам. Методы нелинейной оптики позволяют достичь ещё более коротких импульсов (аттосекундные импульсы). Оказывается возможным реализовать одновременную генерацию большого числа гармоник основного излучения, при синхронизации фаз которых возникают импульсы с длительностью много меньше периода световых колебаний основного излучения.

Лазеры на керамике и полимерах

В кон. 20 – нач. 21 вв. появилась и успешно развивается технология прозрачной лазерной керамики, активированной трёхвалентными редкоземельными ионами. Лазерная керамика обладает химическим составом, аналогичным кристаллам, но может быть получена в недоступных монокристаллам больших объёмах, что принципиально важно для мощных лазерных систем. Уровень технологии позволяет получать образцы керамики, не уступающие кристаллам по своим оптическим, спектральным, механическим свойствам и мощности генерируемого излучения. Так, например, на керамике состава иттрий-алюминиевого граната с неодимом достигнуты мощности непрерывного излучения в десятки киловатт.

Существуют также твердотельные Л., в которых в качестве активной среды применяется полимер, активированный специальным образом молекулами красителя.

Волоконные лазеры

Идея волоконного лазера была высказана в нач. 1960-х гг. американским учёным Л.

Спитцером и развита до промышленных масштабов российским учёным В. П. Гапонцевым. Широкое применение волоконных Л. оказалось возможным только с реализацией диодной накачки. Активной средой в них служит сердцевина стекловолокна, активированная трёхвалентными ионами редкоземельных элементов. Накачка осуществляется лазерными диодами. Эти Л. по сравнению с традиционными твердотельными Л. обладают такими преимуществами, как эффективный теплоотвод, высокое качество выходного излучения, высокая стабильность, эффективность накачки, компактность и малая масса. Мощность непрерывного излучения достигает десятков киловатт. Волоконные Л. перспективны для применения в технологических процессах, где используется непрерывное лазерное излучение. В качестве активаторов активных сред волоконных Л. наиболее часто применяют ионы Yb, хотя используются также ионы Nd, Er, Ho, Tm. Создан волоконный Л. на ионах висмута, вторая гармоника излучения которого соответствует жёлтой части оптического спектра.

Полупроводниковые лазеры

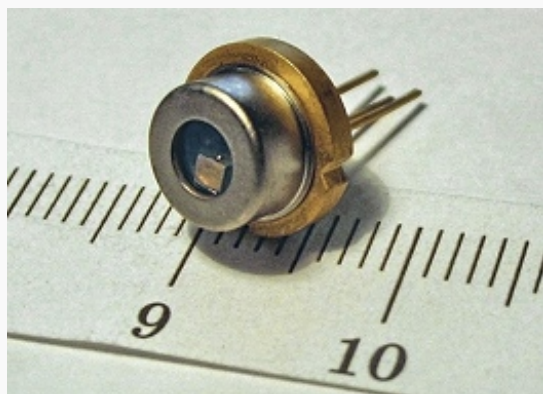


Рис. 2. Компактный полупроводниковый лазер, применяющийся в системах передачи, хранения и считывания информации.

Полупроводниковые Л. имеют наиболее массовое применение. Основополагающую роль в разработке Л. сыграли отечественные учёные. Впервые концепция полупроводникового [инжекционного лазера](#) была выдвинута Н. Г. Басовым, О. Н. [Крохиным](#) и Ю. М. Поповым (1961). Они предложили для возбуждения излучения использовать р–n-переход в полупроводнике при протекании через него электрического тока. Далее физика полупроводниковых Л. интенсивно развивалась. Ж. И. [Алфёров](#) с сотрудниками разработал многослойные [гетероструктуры](#), ставшие

основой современных полупроводниковых Л. – надёжных малогабаритных приборов с различными энергетическими, временными и спектральными характеристиками (см. [Гетеролазер](#)). За разработку быстродействующих опто- и микроэлектронных

устройств на основе гетероструктур Ж. И. Алфёрову и Г. [Крёмеру](#) была присуждена Нобелевская премия (2000). [Полупроводниковые лазеры](#) генерируют в широком диапазоне мощностей (от единиц микроватт до десятков ватт) и перекрывают широкий диапазон длин волн. Наиболее известны Л. на соединениях элементов III группы периодической системы (Al, Ga, In) и V группы (N, P, As, Sb), например Л. на GaN с длиной волны генерации $\lambda_r \approx 0,36$ мкм, а также работающий при комнатной температуре Л. на тройном соединении InGaN с $\lambda_r \approx 0,41$ мкм. Широкое распространение получили работающие при комнатной температуре Л. на GaAs с областью перестройки $\lambda_r = 0,82-0,92$ мкм; известны Л. на тройных соединениях AlGaAs ($\lambda_r = 0,62-0,9$ мкм) и InGaAs ($\lambda_r = 0,9-3,2$ мкм) и на четверных соединениях InGaAsP ($\lambda_r = 0,58-3,0$ мкм). Используются также Л. на соединениях PbS ($\lambda_r = 4,3$ мкм), PbTe ($\lambda_r = 6,5$ мкм), PbSe ($\lambda_r = 8,5$ мкм), а также Л. на тройном соединении PbSSe ($\lambda_r = 4,3-8,5$ мкм). Массовый выпуск полупроводниковых Л. обусловлен их широким применением в волоконных линиях связи, в устройствах записи, считывания и хранения информации в компьютерах (рис. 2) и в бытовой технике, такой как DVD-проигрыватели и домашние кинотеатры.

Полупроводниковые Л. используются в качестве источников накачки твердотельных Л., что существенно расширило возможность последних и обеспечило им новый качественный уровень.

Газовые лазеры

Газовые Л. имеют много разновидностей. Наибольшую известность получил Л. на нейтральных атомах, в котором в качестве активной среды применяется смесь двух газов – гелия и неона (гелий-неоновый Л.). Генерация происходит на переходах атома Ne на нескольких длинах волн (от 543,5 нм до 3,39 мкм); наиболее часто используется $\lambda_r = 632,8$ нм. Возбуждение активной среды осуществляется непрерывным электрическим разрядом в газе. Выходная мощность излучения до 10 мВт.

К газовым лазерам ИК-диапазона относятся Л. на молекулах CO₂ и CO. Генерация происходит на колебательных переходах молекул в диапазоне $\lambda_r = 10,6$ мкм для CO₂-

лазера и $\lambda_r=5,09-6,66$ мкм для СО-лазера. Эти Л. могут работать в очень широком диапазоне давлений активной среды. Накачка может осуществляться и непрерывным, и импульсным электрическим разрядом. Выходная мощность излучения этих Л. высокого давления в непрерывном режиме достигает нескольких сотен киловатт, а выходная энергия в импульсном режиме – нескольких десятков килоджоулей при длительности импульса <1 мкс.

Типичный представитель ионных Л. – Л. на ионах Ar, переходы в которых возбуждаются непрерывным электрическим разрядом; $\lambda_r=311-568,2$ нм, основные длины волн излучения $\lambda_r=488$ нм и 514,5 нм. Выходная мощность аргонового Л. может достигать нескольких десятков ватт.

Генерация в [эксимерных лазерах](#) происходит при рекомбинации некоторых молекул в импульсном электрическом разряде. Длины волн генерации $\lambda_r=353$ нм для молекулы XeF, $\lambda_r=308$ нм – для XeCl, $\lambda_r=248$ нм – для KrF и $\lambda_r=193$ нм – для ArF. Выходная энергия этих Л. может достигать нескольких джоулей при длительности импульса менее 1 пс.

Генерация Л. на парах металлов осуществляется в импульсном электрическом разряде, происходящем в смеси буферного газа (обычно He) и паров металла (Cd, Hg). На парах Cu и Au генерация может происходить без буферного газа. Длины волн генерации этих Л. от 325 нм до 627 нм. Основной режим работы – импульсно-периодический; пары металла образуются вследствие нагрева разрядной трубки самим разрядом.

Генерация азотного Л. происходит при возбуждении переходов в N_2 импульсным электрическим разрядом; $\lambda_r=337,1$ нм.

Накачка в [газодинамическом лазере](#) осуществляется вследствие неравновесного охлаждения сверхзвукового потока горячего газа после прохождения через сопло. Активная среда – смесь N_2+CO_2+He или $N_2+CO_2+H_2O$. Генерация происходит на колебательном переходе молекулы CO_2 ; $\lambda_r=10,6$ мкм. Газодинамические Л. имеют большую выходную мощность (порядка 100 кВт) и выходную энергию до 20 кДж на 1

кг сгоревшего топлива.

Химические лазеры

Действие этих Л. основано на том, что при некоторых химических реакциях продукты реакции находятся в возбуждённом состоянии. Наиболее известны лазеры на HF ($\lambda_r=2,7-2,9$ мкм), HD ($\lambda_r=3,6-4,2$ мкм), кислородно-иодный Л. ($\lambda_r=1,315$ мкм).

Химические лазеры работают в квазинепрерывном режиме; их выходная мощность может достигать 1 МВт.

Жидкостные лазеры

К жидкостным лазерам относятся Л. на растворах красителей и Л. на жидкостях с ионами Nd. Наиболее известные красители: стильбен ($\lambda_r=390-435$ нм), кумарин 102 ($\lambda_r=460-515$ нм), родамин 6G ($\lambda_r=570-640$ нм). Накачка лазеров на красителях осуществляется с помощью импульсных ламп или излучения другого лазера. Проточные Л. на красителях могут работать в непрерывном режиме.

Активной средой Л. на жидкостях с ионами Nd является апротонная кислота, в которую введены ионы Nd. По своим характеристикам этот Л. близок к твердотельному Л. с ионами Nd. Однако вследствие больших искажений оптической среды под действием накачки его выходные параметры значительно ниже выходных параметров твердотельных Л.. К нач. 21 в. такие Л. практически не используются.

Лазеры на свободных электронах

Принцип действия этих Л. основан на том, что электрон, движущийся со скоростью, близкой к скорости света, при проходе через ондулятор начинает колебаться в направлении, перпендикулярном направлению движения, и излучать электромагнитную волну в малом телесном угле в направлении движения. Это излучение является когерентным. Его параметры зависят от продольной скорости электрона и шага (периода) ондулятора. Излучение лазера на свободных электронах можно перестраивать в очень широком диапазоне частот – от СВЧ-диапазона до гамма-диапазона. К нач. 21 в. получено излучение в ИК-, видимом и мягком

рентгеновском диапазоне. Хотя эти устройства и называют лазерами, таковыми в строгом смысле слова они не являются, поскольку не содержат дискретных уровней энергии, между которыми достигается инверсия населённостей. Их сходство с Л. носит формальный характер.

Лазеры с ядерной накачкой

В [лазерах с ядерной накачкой](#) инверсия населённостей создаётся в плазме, возникающей при прохождении продуктов ядерных реакций через вещество. Такими продуктами могут быть осколки деления U или Pu в ядерных реакторах. Генерация излучения при накачке продуктами деления реализована на частотах от ближнего УФ-диапазона до ИК-диапазона в газовых активных средах: пара́х металлов с гелием (He–Cd, He–Zn, He–Ca и др.), газовых смесях (Ar–Xe, He–Xe, He–Ar и др.). Наиболее короткая длина волны $\lambda_r=373,7$ нм получена в смеси паров Ca с He.

Рентгеновские лазеры

В качестве активной среды [рентгеновских лазеров](#) используется плотная горячая плазма, создаваемая лазерным излучением мощных Л. оптического диапазона или при мощном электрическом разряде через капилляр. В таких условиях инверсия возникает на переходах многозарядных ионов. Генерация в рентгеновском диапазоне получена на ионах многих химических элементов: на водородоподобных ионах от C^{5+} до Al^{12+} , на литиеподобных ионах от Al^{10+} до Si^{11+} , на неонподобных ионах от Ar^{8+} до Ag^{37+} и на никелеподобных ионах от Eu^{35+} до Au^{51+} . Длины волн генерации составляют 3,6–47 нм. Особенность этого типа Л. состоит в том, что в них не используется резонатор, а для получения генерации достаточно усиления в активной среде на одном проходе.

Гамма-лазеры

В [гамма-лазерах](#) планируется получать генерацию излучения на ядерных переходах. Эта проблема ещё далека от решения.

Применение лазеров

Создание Л. привело к появлению и развитию новых научных направлений в физике,

биологии и медицине, новых технологий и др. Одна из старейших областей физики – оптика – приобрела новый облик, став нелинейной. Если в линейной оптике существует основополагающий принцип суперпозиции, означающий, что распространение электромагнитной волны в материальной среде не влияет на распространение другой электромагнитной волны, то в поле высокоинтенсивного лазерного излучения этот принцип нарушается. При этом возможна генерация оптических гармоник, разностных и суммарных частот, параметрическая генерация перестраиваемого по частоте излучения, [самофокусировка света](#), [обращение волнового фронта](#). В поле лазерного излучения получают квантовые перепутанные и [сжатые состояния](#) электромагнитного поля, которые используются в [квантовой связи](#) и [квантовой теории информации](#).

Возникла и бурно развивается [волоконная оптика](#), которая стала не только новым научным направлением, но и промышленно-технологической отраслью. [Волоконно-оптические линии связи](#) резко изменили процессы передачи информации, многократно увеличив ёмкость каналов связи благодаря использованию высокой несущей частоты, лежащей в оптическом диапазоне. Разделом современной оптики стала [интегральная оптика](#), разрабатывающая принципы и методы интеграции оптических и электронных устройств.

[Лазерная спектроскопия](#), включающая абсорбционную спектроскопию, спектроскопию комбинационного рассеяния света, когерентное антистоксово рассеяние света, спектроскопию насыщения, значительно расширила и обогатила спектроскопические методы исследования вещества и точность спектрального анализа. Основой успеха применения Л. в этой области явились уникальные свойства лазерного излучения, а именно: монохроматичность (чрезвычайно узкая спектральная ширина линии генерации), высокая интенсивность и малая угловая расходимость лазерного излучения, что резко повышает спектральное разрешение в абсорбционной спектроскопии, а в классической спектроскопии комбинационного рассеяния позволяет регистрировать низкие колебательные частоты вещества. Новым чувствительным методом исследования стал метод когерентного антистоксова рассеяния света, позволяющий локально анализировать малые объёмы и малые концентрации исследуемого вещества.

Уникальные свойства лазерного излучения позволили использовать его для лазерного разделения изотопов, инициирования химических реакций (см. Лазерная химия). Высокая когерентность лазерного излучения дала также толчок в развитии голографии. С появлением Л. возникло новое научное направление в физике плазмы – физика лазерной плазмы, изучающая проблему лазерного термоядерного синтеза. Лазерная метрология привела к созданию уникальных квантовых стандартов частоты, эталонов времени.

Л. в медицине – самое гуманное применение одного из великих открытий 20 в. Создание Л. привело как к качественному изменению известных разделов медицины, так и к появлению новых. Особо следует отметить применение Л. в офтальмологии, нейрохирургии, урологии. Офтальмологическая лазерная система «Микроскан» для рефракционной хирургии на основе ArF – эксимерного Л. с длиной волны излучения 193 нм – позволяет осуществлять коррекцию близорукости, дальнозоркости и астигматизма. Коррекция зрения на одну диоптрию при частоте повторения импульсов 300 Гц обеспечивается за 5 с. Диапазон рефракционных операций – 14 D/8D. В практику офтальмологии вошли фемтосекундные Л., позволяющие осуществлять микроскопические разрезы внутри роговицы без повреждения её поверхностных слоёв, при этом прецизионность вмешательства обеспечивает отсутствие термического повреждения близлежащих слоёв ткани. Новой областью медицины стал метод флуоресцентной диагностики и фотодинамической терапии. Он заключается во введении в организм человека фотосенсибилизатора, селективно накапливающегося в опухоли, с последующим возбуждением его люминесценции с помощью Л. и установлении таким образом места локализации новообразования. Доступны практически все локализации опухолей как при поверхностном, так и при внутриполостном облучении. Фотодинамическая терапия осуществляется при увеличении мощности Л. При этом за счёт эффекта переноса энергии происходит образование синглетного кислорода (сильного окислителя), что приводит к разрушению опухоли. Оптическая диагностика с помощью Л. начала применяться для навигации нейрохирургических операций, позволяющей повысить полноту удаления опухоли с сохранением окружающих здоровых тканей, улучшить состояние пациентов

в послеоперационный период и предотвратить рецидивы.

С помощью полупроводниковых Л. осуществляется диагностика ранних форм рака слизистой оболочки рта. Полупроводниковые Л. применяются также для анализа состава выдыхаемого воздуха, что также актуально для профилактики и диагностики социально значимых заболеваний.

Разработаны новые лазерные методы лечения мочекаменной болезни, отличающиеся безопасностью воздействия на окружающие камень мягкие ткани, эффективностью при фрагментации камней любой локализации и разного химического состава, высокой скоростью фрагментации, отсутствием термического нагрева, возможностью фрагментации больших коралловидных камней, разрушение которых невозможно другими методами. Такие операции осуществляются с помощью лазерного хирургического комплекса «Лазурит», разработанного в Институте общей физики им. А. М. Прохорова РАН. Этот же комплекс позволяет проводить бескровные онкологические операции на кровенаполненных органах и осуществлять внутритканевую лазерную коагуляцию раковых опухолей.

Лазерная локация, лазерная дальнометрия и лазерная гироскопия (см. [Лазерный гироскоп](#)) широко используются в военном деле, навигации, картографии. [Лазерные технологии](#) вышли за рамки лабораторных исследований и применяются в промышленности для резки и сварки материалов, обработки, очистки и упрочнения поверхности различных конструкций, формирования рельефов поверхностей твёрдых тел. Без Л. немыслимо развитие [нанотехнологий](#).

Образовалось и стало бурно развиваться информационное общество (включающее Интернет), основанное на использовании компьютеров, широкополосных сетей глобальной оптоволоконной, спутниковой связей и Л. различных частотных диапазонов, мощностей и конструктивных особенностей. Широко используются лазерные методы передачи, хранения и обработки информации. В частности, в повседневную жизнь вошли лазерные записывающие устройства, лазерные принтеры и сканеры, музыкальные центры и домашние кинотеатры.

Литература

Лит.: Справочник по лазерам / Под ред. А. М. Прохорова. М., 1978. Т. 1–2; Карлов Н. В. Лекции по квантовой электронике. 2-е изд. М., 1988; Маненков А. А. О роли электронного парамагнитного резонанса в становлении и развитии квантовой электроники: факты и комментарии // Успехи физических наук. 2006. Т. 176. Вып. 6; Звелто О. Принципы лазеров. 4-е изд. СПб., 2008.