НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ФИЗИЧЕСКИХ ПРИНЦИПОВ СТРОЕНИЯ И РАБОТЫ ГАЗОВЫХ ЛАЗЕРОВ

С.З.ЗАЙНАБИДИНОВ, Р.М.ХАБИБУЛИН

Мақолада газ лазерларининг тузилиши ва ишлаш тамойилларининг айрим ўзига хос хусусиятлари, аввалдан белгиланган лазер нурланишлари параметрларини олиш учун фаол муҳит таркиби, дамлаш тизими тузилиши ва оптик резонаторда кечадиган жараёнларга қўйиладиган талаблар келтирилган. Газ лазерлари самарадорлигини ошириш ва техникаларини такомиллаштириш имкониятлари кўриб чикилган.

***Калит сўзлар**: лазер, яримўтказгич, спектр, эксимер лазерлар, мажбурий нурланиш, ўз-ўзидан нурланиш, қутбланиш, инверс тўлдирилиш, дамлаш.*

В статье приведены физические основы устройства и работы газовых лазеров, требования к составу активной среды, строению системы накачки, процессам в оптическом резонаторе, для получения световых пучков с необходимыми параметрами. Рассмотрены возможности усовершенствования техники и повышения эффективности работы газовых лазеров.

***Ключевые слова**: лазер, полупроводник, спектр, эксимерные лазеры, вынужденное излучение, спонтанное излучение, поляризация, инверсия населённостей, накачка.*

This article is devoted to the study of peculiarities of gas lasers. It contains materials concerning the physical basis of its structure, principles of work of gas lasers, requirements of the components of active environment, the structure of system of pumping as well as processes of optical resonators of lasers to obtain bunches of light of necessary parameters. The author tries to define the possibilities of improving technologies as well as increasing the effectiveness of work of gas lasers.

***Key words:** laser, semiconductor, spectrum, eximer lasers, stimulated emission, spontaneous emission, polarization, pumping.*

Одно из ведущих мест, среди быстро развивающихся направлений современной физики и техники, занимают проблемы лазерной физики и лазерных технологий, появившиеся в середине XX века как новое направление в мировой науке.

Благодаря высоким достижениям науки и техники лазеров, разработаны различные виды – полупроводниковых, твердотельных и газовых лазеров, применяемых почти во всех сферах человеческой деятельности.

Один из основных видов — газовые лазеры перекрывают почти весь спектральный диапазон излучения — от вакуумного ультрафиолета до дальнего инфракрасного и субмиллиметрового. Мощность их излучения в непрерывном режиме достигает сотен киловатт, энергия в импульсе — десятков килоджоулей, а импульсная мощность — десятков тераватт.

Основой успеха в разработке и создании этого класса лазеров послужило детальное изучение элементарных процессов физики атомных и молекулярных столкновений. В свою очередь бурное развитие лазерной техники резко ускорило исследования в этой области физики. Интенсивному экспериментальному и теоретическому анализу были подвергнуты процессы колебательной, вращательной и *V—T*-релаксации, процессы прилипания, ион-ионной и электрон-ионной рекомбинации, а также процессы электронного возбуждения атомных и молекулярных уровней. Новый этап начался в исследованиях кинетики химических реакций. За последние десять лет развернулись работы по изучению кинетики молекулярных объектов, до этого вообще не известных науке, — эксимерных и эксиплексных молекул. Известно, что эксимерные лазеры в настоящее время являются перспективным направлением как благодаря возможности создания перестраиваемых источников излучения в ультрафиолетовой и видимой областях спектра, так и в связи с тем, что эти системы могут потенциально обеспечивать высокий К.П.Д.

В связи с этим в данной статье рассматриваются состояние исследований физики газовых лазеров, достижения технологии в этой сфере и перспективы их дальнейшего развития.

Принцип действия

Физической основой работы лазера служит явление вынужденного (индуцированного) излучения. Суть явления состоит в том, что возбуждённый атом способен излучать 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.

Вероятность того, что случайный фотон вызовет индуцированное излучение возбуждённого атома, в точности равняется вероятности поглощения этого фотона атомом, находящимся в невозбуждённом состоянии. 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.).

Первоисточником генерации фотонов 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, 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.

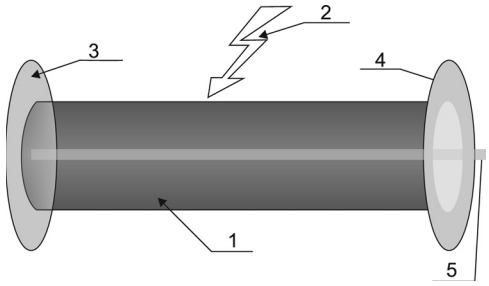
Генерируемое лазером излучение является монохроматическим (одной или дискретного набора длин волн), поскольку вероятность излучения фотона определённой длины волны больше, чем близко расположенной, связанной с уширением спектральной линии, а, соответственно, и вероятность индуцированных переходов на этой частоте тоже имеет максимум. Поэтому постепенно в процессе генерации фотоны данной длины волны будут доминировать над всеми остальными фотонами. 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.

Устройство лазера

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.



На схеме обозначены: **1 — активная среда; 2 — энергия накачки лазера; 3 — непрозрачное зеркало; 4 — полупрозрачное зеркало; 5 — лазерный луч.**

Активная среда

В настоящее время в качестве рабочей среды лазера используются различные агрегатные состояния вещества: твёрдое, жидкое, газообразное, плазма. В обычном состоянии число атомов, находящихся на возбуждённых энергетических уровнях, определяется распределением Больцмана:

$$N = N_0 \exp(-E/kT),$$

здесь N — число атомов, находящихся в возбуждённом состоянии с энергией E, N_0 — число атомов, находящихся в основном состоянии, k — постоянная Больцмана, T — температура среды. Иными словами, таких атомов, находящихся в возбужденном состоянии, меньше, чем в основном, поэтому вероятность того, что фотон, распространяясь по среде, вызовет вынужденное излучение 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:

$$I_l = I_0 \exp(-a_1 l),$$

здесь I_0 — начальная интенсивность, I_l — интенсивность излучения, прошедшего расстояние l в веществе, a_1 — показатель поглощения вещества. Поскольку зависимость экспоненциальная, излучение очень быстро поглощается.

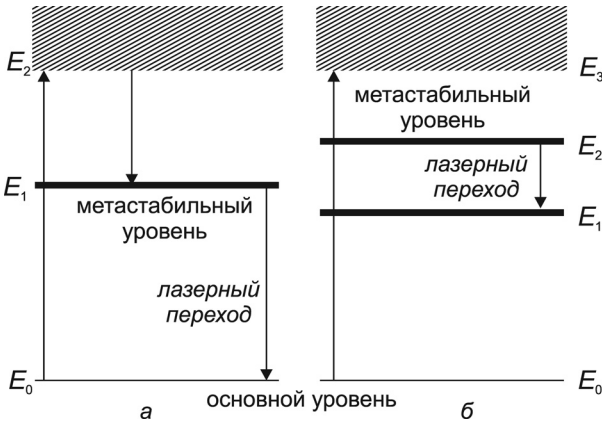
В том случае, когда число возбуждённых атомов больше, чем невозбуждённых (то есть в состоянии инверсии населённостей), ситуация прямо противоположна. Акты вынужденного излучения преобладают над поглощением, и излучение усиливается по закону:

$$I_l = I_0 exp(a_2 l),$$

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. 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.).

Для уменьшения потерь в активной среде, необходимо решить проблемы неоднородностей активной среды, которые приводят к рассеянию излучения. Решением данной проблемы может стать использование в качестве активной среды различных газов и их смесей.

Система накачки



На рисунке: а — трёхуровневая и б — четырёхуровневая схемы накачки активной среды лазера.

Для создания инверсной населённости среды лазера используются различные механизмы. В газовых и жидкостных лазерах 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. Существуют и другие методы накачки (га-

зодинамические, заключающиеся в резком охлаждении предварительно нагретых газов; фотодиссоциация, частный случай химической накачки и др.).

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 населенности, 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. Кроме того, подобная схема позволяет создавать мощные лазеры, работающие в непрерывном режиме, что очень важно для некоторых применений. Однако подобные лазеры обладают существенным недостатком в виде низкого квантового КПД, которое определяется как отношение энергии излученного фотона к энергии поглощенного фотона накачки ($\eta_{квантовое} = h\nu_{излучения}/h\nu_{накачки}$).

Наиболее эффективным способом создания инверсии заселенности для большинства газовых лазеров на текущий момент являются электрический разряд в смеси рабочих газов. Такой разряд, как правило, инициируется импульсом высокого напряжения, приложенного к активному элементу лазера. При этом используются ионные газорязрядные коммутаторы тока – тиратроны.

К недостаткам тиратронов можно отнести:

• малый ресурс (в лучшем случае единицы тысяч часов работы),

• невозможность работы при высоких значениях частот повторения импульсов вследствие высокой вероятности загорания постоянного дугового разряда,

• деградацию характеристик в течение срока службы,

• нестабильность задержки между подачей импульса управления и переходом в проводящее состояние,

• невозможность управлять выключением тиратрона.

Разработка и создание долговечных, надежных и эффективных систем накачки лазеров с использованием современной твердотельной элементной базы поможет избежать указанных недостатков и является актуальным направлением исследований.

Оптический резонатор

Зеркала лазера не только обеспечивают существование положительной обратной связи, но и работают как резонатор, поддерживая одни генерируемые лазером моды, соответствующие стоячим волнам данного резонатора, и подавляя другие. 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, близко расположенные волны, 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, квантовомеханическое эффекты и др.) всегда имеют определённую ширину $\Delta\nu_l$. Поэтому могут возникать ситуации, когда на ширину спектральной линии укладывается несколько собственных частот резонатора. В этом случае излучение лазера будет многомодовым. Синхронизация этих мод позволяет добиться того, чтобы излучение представляло собой последовательность коротких и мощных импульсов. Если же $\Delta\nu_l < \nu_r$, то в излучении лазера будет присутствовать только одна частота, в данном случае резонансные свойства системы зеркал слабо выражены на фоне резонансных свойств спектральной линии.

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:

$$2L\cos\varphi = n\lambda$$

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.

Одной из основных проблем в области лазеров с рентгеновским и гамма излучением является прозрачность большинства материалов для высокоэнергетического излучения. Решение этой задачи может быть найдено благодаря эффекту полного внутреннего отражения света на границе двух сред с различным коэффициентом преломления и создание на его основе резонаторов особой конструкции.

Газовые лазеры

Разнообразие газовых лазеров основано на явлении усиления света. Активная среда таких лазеров представляет собой либо отдельные атомы или молекулы, либо смесь различных веществ в зависимости от функциональности системы. Инверсия населённости, как предпосылка для усиления через вынужденное излучение в основном достигается путём накачки газа электрическим разрядом, но существуют газовые лазеры, в которых используется накачка химическими реакциями, устройствами оптической накачки и Рамановскими лазерами. В течение работы газ часто находится в состоянии плазмы, содержащей значительные концентрации электрических заряженных частиц.

Большинство газовых лазеров излучают с высоким качеством пучка, близким к дифракционному пределу, что связано с тем, что газовая среда обладает малыми оптическими искажениями, несмотря на значительные градиенты температур. Для их работы обычно требуется высокое напряжение, часто с высокой электрической мощностью. Некоторые высокомощные газовые лазеры используют системы для быстрой циркуляции газа (принудительная конвекция, быстрое течение).

Существует много разных видов газовых лазеров, работающих в различных режимах относительно длины волны и мощности излучения.

Газовые лазеры могут быть сгруппированы в соответствии с характером активной лазерной среды:

- Нейтральная активная атомная лазерная среда газа включает гелий-неоновые лазеры и лазеры на парах меди.
- Ионные лазеры используют свободные ионы; например, гелий-кадмиевый лазер, лазер на ионах аргона и криптона. Как правило, ионные лазеры способны генерировать короткие длины волн, но с умеренной эффективностью мощности.
- Молекулярные газовые лазеры используют молекулы газа. Примерами являются лазер на углекислом газе и лазеры на окиси углерода, лазеры на азоте и эксимерные лазеры.

Литература и интернет ресурсы:

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.4. Оптика. – М.: Наука, 1985.
2. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. 3-е изд. – М.: Мир, 1976.
3. Ораевский А.Н. Лазер // Физическая энциклопедия. Т. 2. – М.: «Советская энциклопедия», 1988.
4. Редкин Ю.Н. Физика атома, твёрдого тела и атомного ядра. Ч.5. Курс общей физики. – Киров: Вят ГГУ, 2006.
5. www.rp-photonics.ru
6. www.laser-portal.ru
7. ru.wikipedia.org

Андижон давлат университети,
2013 йил 10 апрелда қабул қилинган
(Тақризчи: проф. И.Н.Каримов)