

Лазер

Темы кодификатора ЕГЭ: лазер.

Лазер (оптический квантовый генератор) — выдающееся достижение физики XX века. Уникальные свойства лазерного луча находят применение в самых разнообразных сферах — от мощных промышленных агрегатов до мелкой бытовой техники.

Слово *laser* образовано первыми буквами фразы *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*. Дословный перевод таков: «усиление света с помощью вынужденной эмиссии излучения». В русском языке используется более короткий термин *вынужденное излучение* или *индуцированное излучение* (слово «эмиссия» опускается). Явление индуцированного излучения, которое мы сейчас обсудим, составляет физическую основу действия любого лазера.

Индуцированное излучение

Рассмотрим два энергетических состояния атома: основное состояние с энергией E_1 и возбуждённое состояние с энергией $E_2 > E_1$. Переходя из возбуждённого состояния в основное, атом излучает фотон с энергией $h\nu = E_2 - E_1$.

Если возбуждённый атом предоставлен сам себе, то он переходит в основное состояние самопроизвольно. Момент перехода предсказать невозможно, и потому излучение в этом случае называется *спонтанным*. Спонтанное излучение различных атомов является некогерентным, поскольку атомы излучают совершенно независимо друг от друга.

Оказывается, однако, что атом можно *заставить* излучить фотон, *вынудив* соскок электрона с верхнего уровня на нижний. Это произойдёт под действием внешнего электромагнитного поля, частота которого совпадает с частотой перехода $\nu = (E_2 - E_1)/h$. Эффект аналогичен явлению резонанса при вынужденных колебаниях; в качестве вынуждающей силы выступает при этом электромагнитное поле. Излучение атома, вызванное внешним электромагнитным полем, называется *вынужденным* или *индуцированным*¹ (рис. 1).

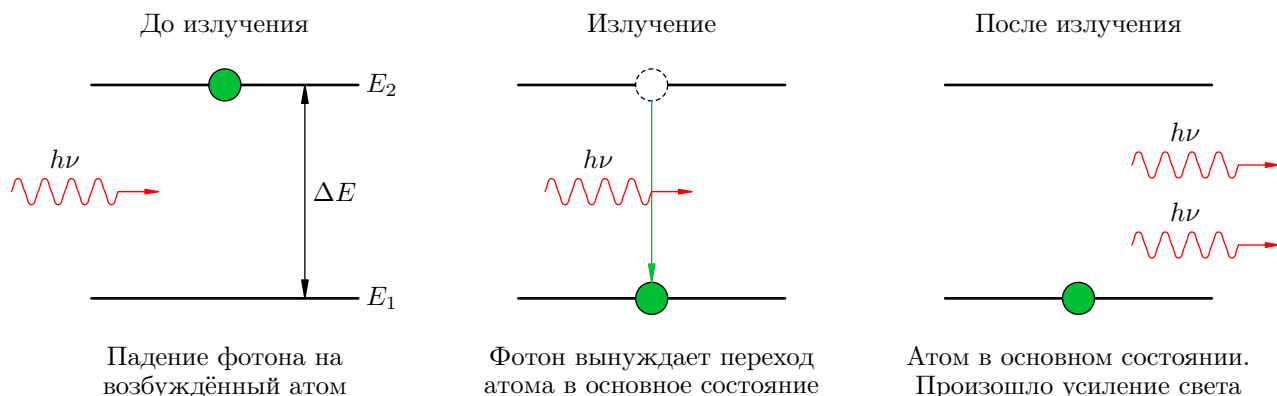


Рис. 1. Индуцированное излучение: $h\nu = \Delta E = E_2 - E_1$

Левая часть рисунка соответствует начальной ситуации, когда на возбуждённый атом, находящийся в состоянии с энергией E_2 , падает фотон, энергия $h\nu$ которого в точности равна разности $\Delta E = E_2 - E_1$ энергий возбуждённого и основного состояний.

¹Возможность индуцированного излучения света атомами предсказал А. Эйнштейн в 1916 году.

Средняя часть рисунка показывает вынужденный переход атома в основное состояние: под воздействием падающего фотона электрон соскакивает с верхнего уровня на нижний.

В правой части рисунка мы видим результат этого соскока. Падающий фотон никуда не делся, а атом, перейдя в основное состояние, излучил ещё один фотон, *тождественный падающему фотону*. Таким образом, вместо одного падающего фотона «на входе» возникло два фотона-близнеца «на выходе».

Итак, в результате индуцированного излучения атом испускает монохроматическую волну, совпадающую с падающей волной по частоте и фазе. Эти две волны, интерферируя, *усиливают друг друга!* Именно этот эффект усиления света используется в лазере.

Инверсная населённость

Для усиления света, проходящего через некоторую среду, одного только индуцированного излучения атомов среды недостаточно. Нужно ещё создать *инверсную населённость* энергетических уровней атомов. Давайте разберёмся, что это такое.

Когда свет идёт через вещество, возникают два противоположных эффекта.

1. Свет поглощается атомами среды, находящимися в основном состоянии. Эти атомы переходят в возбуждённое состояние.
2. Свет усиливается за счёт индуцированного излучения возбуждённых атомов. Испуская фотоны, эти атомы возвращаются в основное состояние.

Возникает вопрос: какой эффект перевешивает?

В обычных условиях большинство атомов вещества находятся в основном состоянии, меньшая их часть — в возбуждённом. В таком случае мы имеем *нормальную населённость* энергетических уровней (рис. 2, слева).

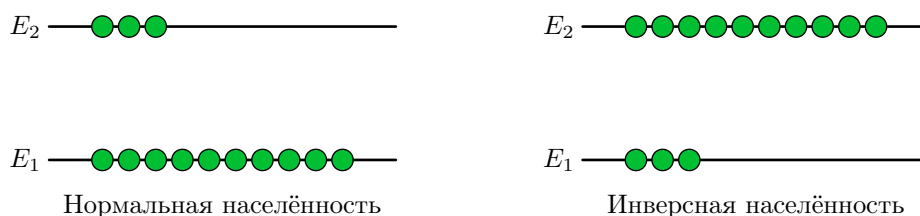


Рис. 2. Два типа населённости уровней

Если свет проходит через среду с нормальной населённостью, то большая часть атомов поглощает свет; индуцированное излучение создаётся малым количеством атомов. В результате число фотонов уменьшается со временем, и световой поток ослабляется.

Можно, однако, создать условия, когда большинство атомов среды находится в возбуждённом состоянии. В таком случае населённость уровней называется *инверсной* (рис. 2, справа).

Если свет подходящей частоты распространяется в среде с инверсной населённостью, то фотоны чаще налетают на возбуждённые атомы, чем на невозбуждённые, так что индуцированное излучение фотонов преобладает над их поглощением. По мере прохождения света количество фотонов нарастает, и свет усиливается.

Как же создать в среде инверсную населённость? Нельзя ли просто направить на вещество мощный поток света и освещать до тех пор, пока больше половины атомов не перейдёт в возбуждённое состояние?

Добиться этого и в самом деле можно, но проблема состоит в том, что двумя энергетическими уровнями тут не обойдёшься. Действительно, поглощая фотоны, атомы будут переходить из основного состояния E_1 в возбуждённое состояние E_2 ; но те же самые фотоны падающего

света будут вынуждать и обратные переходы с уровня E_2 на уровень E_1 , сопровождающиеся индуцированным излучением. Следовательно, число возбуждённых атомов с энергией E_2 не может превысить числа атомов в основном состоянии E_1 .

Трёхуровневая система рубина

Классической схемой создания в среде инверсной населённости является система из *трёх* энергетических уровней E_1 , E_2 и E_3 , в которой состояние E_1 является основным, состояние E_3 — «короткоживущим», а состояние E_2 — «долгоживущим». Такие уровни имеются в кристаллах рубина.

Работа трёхуровневой системы показана на рис. 3. В начальной ситуации большинство атомов находится в основном состоянии E_1 .

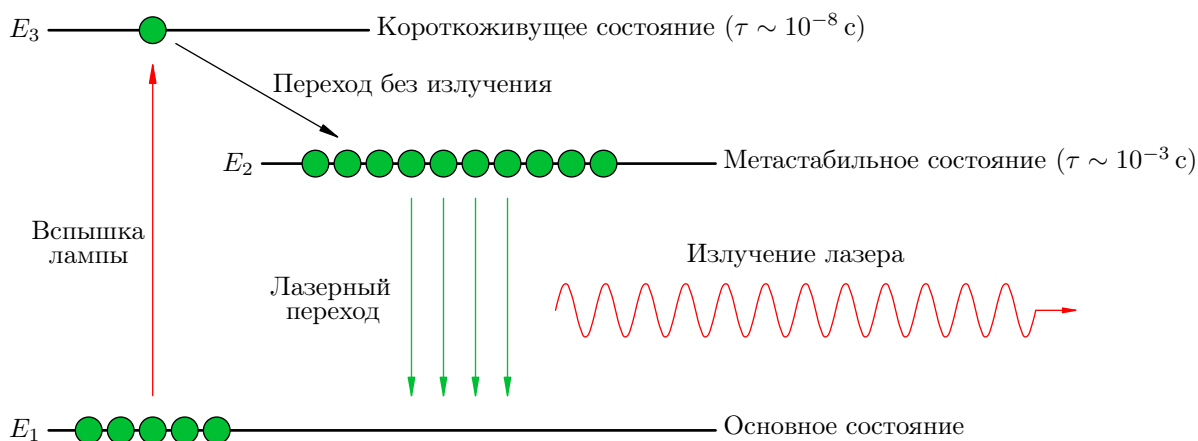


Рис. 3. Инверсная населённость в трёхуровневой системе

Мощная вспышка лампы переводит большую часть атомов среды в возбуждённое состояние с энергией E_3 . Но электроны атомов не задерживаются на этом энергетическом уровне. Состояние E_3 обладает малым *временем жизни* τ , равным примерно 10^{-8} с; по истечении данного промежутка времени электроны соскакивают с уровня E_3 вниз — но не назад на уровень E_1 , а на промежуточный уровень E_2 .

Переход $E_3 \rightarrow E_2$ не сопровождается излучением — энергия этого перехода передаётся тепловым колебаниям кристаллической решётки. Но самое главное заключается в том, что состояние E_2 имеет огромное по атомным масштабам время жизни — порядка 10^{-3} с. Эта величина, как видим, в 100000 раз больше времени жизни состояния E_3 ; по этой причине энергетическое состояние E_2 называется *метаустойчивым*.

Итак, в результате вспышки лампы атомы из основного состояния E_1 транзитом через уровень E_3 переводятся на метаустойчивый уровень E_2 , и благодаря большому времени жизни этого уровня начинают на нём накапливаться. Если переходы $E_1 \rightarrow E_3$ совершаются достаточно быстро, то на уровне E_2 окажется больше половины атомов среды — возникает инверсная населённость данного уровня!

Ну а затем достаточно небольшого числа спонтанных переходов $E_2 \rightarrow E_1$, и излучённые фотоны вызовут лавину таких же, но теперь уже индуцированных *лазерных переходов* $E_2 \rightarrow E_1$. Число фотонов, порождённых лазерными переходами, стремительно нарастает и создаёт импульс лазерного излучения.

Таким образом, луч лазера генерируется в ходе *согласованного* «сброса» многих атомов с уровня E_2 на уровень E_1 . Атомы при этом излучают *синхронно*, «в такт», и волны, излучённые атомами, идентичны друг другу по частоте и фазе. Излучение лазера, будучи результатом

наложения таких идентичных волн, получается *когерентным* — в отличие, например, от некогерентного света электрической лампочки, порождаемого спонтанным излучением различных атомов в случайные моменты времени.

Устройство лазера

В общих чертах схема устройства лазера выглядит следующим образом (рис. 4)².

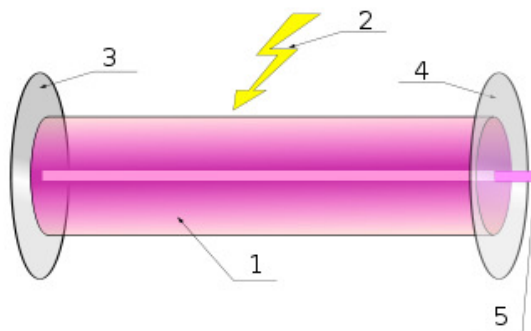


Рис. 4. Устройство лазера

В атомах *активной среды* 1 создаётся инверсная населённость в результате *вспышки* 2. Активной средой может служить, например, кристалл рубина или какое-либо другое подходящее вещество.

На торцах активной среды стоят *непрозрачное зеркало* 3 и *полупрозрачное зеркало* 4. Эти зеркала обеспечивают, как говорят, *обратную связь*. Они нужны для более эффективного усиления *лазерного луча* 5.

А именно, происходит вот что. После вспышки, как мы уже говорили, создаётся инверсная населённость, и достаточно нескольких спонтанно излучённых фотонов при лазерном переходе $E_2 \rightarrow E_1$, чтобы началось их лавинообразное размножение в результате индуцированного излучения. Но при отсутствии зеркал эта лавина не успеет затронуть весьма большое количество возбуждённых атомов — возникший импульс уже покинет пределы активной среды.

Чтобы этого не произошло, световой импульс разумно завернуть назад и погонять некоторое время внутри активной среды, заставляя высвечиваться всё большее и большее количество атомов — и тем самым всё более усиливая лазерный луч. Вот для этого и нужны зеркала на торцах. Одно зеркало, естественно, должно быть полупрозрачным и частично выпускать излучение наружу — мы ведь хотим использовать луч лазера для каких-то целей :-)

Зеркала выполняют ещё одну важную функцию: благодаря им лазерный луч имеет *очень малую расходимость*. Дело в том, что лучи, отклоняющиеся от оси цилиндра, рано или поздно выйдут через боковую цилиндрическую поверхность, а лучи, идущие параллельно оси, будут циркулировать туда-сюда сколько угодно и максимально усиливаться. Вот почему лазерный луч даёт маленькое световое пятно даже на удалённых предметах.

²Изображение с сайта en.wikipedia.org.