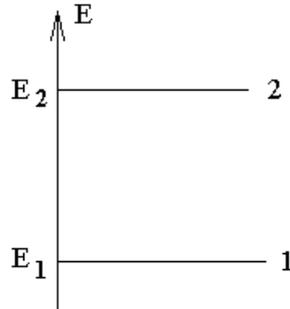


Файл с ответом на вопрос 31 списка вопросов 2012 года.

Факультативно. Понятие о коэффициентах Эйнштейна.

Рассмотрим двухуровневую схему уровней энергии атома. При этом справедливо предполагается, что наличие других уровней энергии ничего не изменяет.



Взаимодействие со светом этих двух уровней энергии описывается тремя процессами. Для каждого из этих процессов частота фотона связана с разностью энергий уровней соотношением

$$E_2 - E_1 = h\nu = \hbar\omega.$$

Первый процесс — спонтанное излучение. В этом процессе происходит ничем не спровоцированное излучение светового кванта с переходом атома с уровня 2 на уровень 1.

Второй процесс — поглощение света. В этом процессе происходит поглощение светового кванта с переходом атома с уровня 1 на уровень 2.

Третий процесс — вынужденное излучение. Это процесс вынужденного светом перехода атома с уровня 2 на уровень 1 с излучением светового кванта.

Обсудим, каковы вероятности этих трех процессов.

Для описания вероятностей Эйнштейн ввел в рассмотрение так называемые коэффициенты Эйнштейна:

$$A_{21}, B_{12}, B_{21}.$$

$A_{21} dt$ — вероятность спонтанного перехода $2 \rightarrow 1$ для одного атома за время dt .

$B_{12} w_\omega dt$ — вероятность перехода $1 \rightarrow 2$ для одного атома за время dt под действием света, где $w_\omega \equiv \frac{dw}{d\omega}$ — спектральная плотность объемной

плотности энергии светового поля на частоте рассматриваемого перехода

$$\omega = \frac{E_2 - E_1}{\hbar}.$$

$B_{21} w_\omega dt$ — вероятность перехода $2 \rightarrow 1$ для одного атома за время dt под действием света.

На основе термодинамических рассуждений, рассматривая тепловое равновесие света и вещества, Эйнштейн показал, что три коэффициента A_{21}, B_{12}, B_{21} должны быть связаны двумя соотношениями:

$$\begin{cases} B_{21} = B_{12} \\ \frac{A_{21}}{B_{21}} = \frac{\hbar\omega^3}{\pi^2 c^2} \end{cases}.$$

Интересно, что вероятность спонтанных переходов равна вероятности вынужденных переходов под действием света, в котором в каждом объеме когерентности содержится половина фотона. Позднее была разработана квантовая теория светового поля, в которой считается, что в пустом пространстве, из которого нельзя поглотить кванты света, тем не менее, в каждом объеме когерентности содержится энергия половины фотона.

Принципы усиления и генерации оптического излучения.

По определению $N_1 \equiv \rho_{11}N$ — заселенность или населенность уровня 1 с энергией E_1 ,

Здесь N — концентрация атомов или молекул, ρ_{11} — вероятность обнаружить атом на уровне E_1 .

Вероятность ρ_{11} имеет два индекса, так как при квантовом описании атомов используется матрица плотности, диагональными элементами которой являются вероятности обнаружить атом на каждом из уровней энергии.

Аналогично

$N_2 \equiv \rho_{22}N$ — заселенность уровня 2, ρ_{22} — вероятность обнаружить атом на уровне 2.

Согласно распределению Больцмана

$\rho_{ii} \sim e^{-\frac{E_i}{k_B T}}$, где k_B — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура.

Тогда в соответствии с распределением Больцмана

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{\rho_{22}}{\rho_{11}} = e^{-\frac{E_2 - E_1}{k_B T}}.$$

В случае термодинамического равновесия при любой температуре T , если $E_2 > E_1$, то $N_2 < N_1$ — заселенность верхнего уровня энергии меньше заселенности нижнего уровня.

Вынужденные переходы снизу вверх и сверху вниз равновероятны $B_{12} = B_{21}$, и количество этих переходов пропорционально заселенностям уровней N_1 и N_2 . Заселенности нижнего уровня больше $N_1 > N_2$, следовательно, вынужденных переходов снизу вверх с поглощением света больше, чем сверху вниз с излучением.

При термодинамическом равновесии среда поглощает свет на переходе между любой парой уровней энергии. Коэффициент поглощения света пропорционален разности заселенностей $\mathfrak{K} \sim (N_1 - N_2)$, если амплитуда света

не изменяется во времени. Здесь коэффициент поглощения по определению входит в зависимость интенсивности света от координаты $I(z) = I_0 e^{-\kappa z}$.

Если же амплитуда света быстро изменяется во времени, то нужно учитывать, что поглощение света на самом деле определяется не разностью заселенностей, а амплитудой и фазой дипольного момента атомов, дипольного момента осциллирующего с оптической частотой и его фазой относительно фазы светового поля.

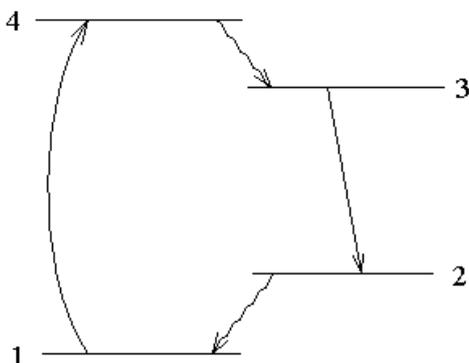
Лазерная усиливающая свет среда всегда находится вне термодинамического равновесия.

Усиление света — это отрицательное поглощение. Тогда коэффициент усиления $(-\kappa) \sim (N_2 - N_1)$. Среда будет усиливать свет, если заселенность верхнего уровня больше заселенности нижнего уровня $N_2 > N_1$.

Это условие $N_2 > N_1$ противоположно равновесному соотношению заселенностей, поэтому условие $N_2 > N_1$ называется инверсией заселенностей.

При инверсии под действием света переходов $2 \rightarrow 1$ оказывается больше, чем переходов $1 \rightarrow 2$, и среда усиливает свет.

Рассмотрим пример создания инверсии заселенностей в четырехуровневой схеме уровней энергии в газовом разряде.



В плазме газового разряда свободные электроны ускоряются электрическим полем, ударяются о нейтральные атомы газа и, передавая часть энергии атому, переводят его из состояния с уровнем энергии 1 в состояние с уровнем энергии 4. Это так называемая накачка уровня 4 разрядом в газе.

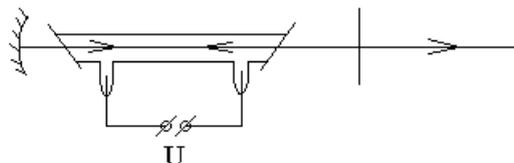
Пусть в результате неупругих столкновений с другими атомами рассматриваемый атом быстро безызлучательно переходит с уровня энергии 4 на уровень 3. Такие переходы весьма вероятны, если кинетическая энергия атомов близка или больше разности энергий уровней 3 и 4.

Далее атом переходит с уровня 3 на уровень 2 с излучением фотона $h\nu = E_3 - E_2$.

Пусть с уровня 2 атомы быстро переходят на уровень 1 в результате неупругих столкновений атомов.

Если переходы $4 \rightarrow 3$ происходят быстро, то атомы накапливаются на уровне 3. Если переходы $2 \rightarrow 1$ происходят быстро, то атомы не накапливаются на уровне 2. В результате между уровнями энергии 2 и 3 возникает инверсия заселенностей $N_3 > N_2$. Инверсия означает усиление света на переходе $3 \rightarrow 2$.

Среда с усиливающим свет переходом используется в лазере для получения генерации света. Генератор из усилителя света получается в результате введения положительной обратной связи. Роль обратной связи для света играют два зеркала резонатора лазера.



Слева на рисунке изображено глухое (непрозрачное) сферическое зеркало, справа — полупрозрачное зеркало. Обратная связь, осуществляемая зеркалами, будет положительной, но не для всех световых длин волн, а только для тех, для которых на удвоенной длине резонатора укладывается целое число длин волн. В этом случае волна проходит резонатор лазера туда и обратно и наступает себе на хвост в той же фазе.

Через правое полупрозрачное зеркало свет выходит из лазера.

Генерация света будет в том случае, если усиление света при двойном проходе резонатора оказывается больше, чем потери на зеркалах резонатора и какие-либо другие возможные потери.

Среды с инверсной заселенностью.

Кроме рассмотренного выше способа создания инвертированной среды в газовом разряде есть целый ряд других сред и способов создания инверсии заселенности.

Любой полупроводниковый диод содержит p-n переход. Контактный слой этого перехода является инвертированной средой, когда через диод протекает электрический ток в прямом направлении.

При протекании тока в объеме полупроводника одновременно присутствуют свободные электроны и дырки. Свободные электроны находятся на дне энергетической зоны проводимости, а дырки — это недостаток электронов на верхних уровнях валентной зоны.

При столкновении с атомами полупроводника свободные электроны очень быстро безызлучательно переходят на нижние свободные уровни зоны проводимости. В результате, эти уровни имеют высокую заселенность N_2 .

Дырки также очень быстро столкновительно релаксируют. В результате, освобождаются от электронов самые верхние уровни энергии валентной зоны. Заселенность этих уровней N_1 оказывается очень малой. Таким образом, образуется сильнейшая инверсия заселенностей между нижними уровнями

более высокой зоны проводимости и верхними уровнями более низкой валентной зоны.

Если противоположные грани полупроводникового диода отполировать, то отражение ими света оказывается достаточным для того, чтобы диод стал лазером. Обычный диод становится инфракрасным лазером.

Другим примером инвертированных сред являются так называемые красители. Эти среды используются в лазерах на красителях.

В лазере на красителе реализована рассмотренная выше 4-х уровневая схема накачки молекул среды (создание инверсии заселенностей). Эти лазеры имеют оптическую накачку, в которой переход с уровня 1 на уровень 4 происходит в результате поглощения света накачки. Для красителей характерна медленная разгрузка уровня 2, переходы с уровня 2 на уровень 1 происходят достаточно редко. В результате, после включения накачки, молекулы скапливаются на уровне 2, и инверсия между уровнями 2 и 3 пропадает.

Лазеры на красителе обычно генерируют свет в импульсном режиме, когда после короткого светового импульса генерации оптическую накачку выключают на время разгрузки уровня 2. Непрерывный режим генерации лазера на красителе создают при помощи непрерывной прокачки красителя через область между зеркалами резонатора лазера. В этом случае в объеме резонатора лазера все время присутствует свежая среда с обедненным уровнем 2.