

Основные представления об излучении света атомами и молекулами

Тема 11 лекция 24

Условие усиления света оптическими системами. Зависимость населенности энергетических уровней от плотности вынужденного излучения. Инверсная населенность уровней.

Лазеры. Принципиальная схема лазера. Порог генерации. Условия стационарной генерации. Режимы работы лазеров. Непрерывные и импульсные лазеры, лазеры с модулированной добротностью.

Управление параметрами лазерного излучения. Свойства лазерного излучения. Классификация лазеров по роду активной среды. Применение лазеров.

В экспериментальных условиях нельзя измерить отдельно мощность поглощения или мощность вынужденного испускания. На опыте определяется только их разность

$$W_{\text{погл}} = (B_{12}n_1 - B_{21}n_2)uh\nu$$

если система находится в состоянии, при котором число частиц на уровне 2 может стать больше, чем число частиц на уровне 1, то **мощность поглощения становится отрицательной**

$$B_{12}n_1 < B_{21}n_2$$

такая среда не будет поглощать, а будет выделять световую энергию и усилит падающую на нее радиацию $W_{\text{ус}} = -W_{\text{погл}}$. Мощность усиления:

$$W_{\text{погл}} = (B_{12}n_1 - B_{21}n_2)uh\nu$$

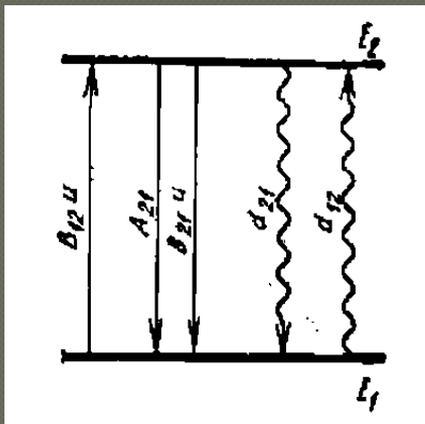
коэффициент поглощения

$$k_{12}^{\text{погл}} = \frac{W_{\text{погл}}}{cu} = \frac{h\nu}{c} (B_{12}n_1 - B_{21}n_2) = \frac{B_{12}h\nu}{c} (n_1 - n_2)$$

Если населенность верхнего уровня превышает населенность нижнего уровня осуществляется так называемое **инверсное** распределение частиц по уровням энергии

$$n_2 > n_1$$

Среда с инверсной заселенностью энергетических уровней называется **активной**



Вероятности переходов в двухуровневой системе

При наличии в среде термодинамического равновесия

$$\frac{d_{12}}{d_{21}} = \exp\left(\frac{E_2 - E_1}{kT}\right)$$

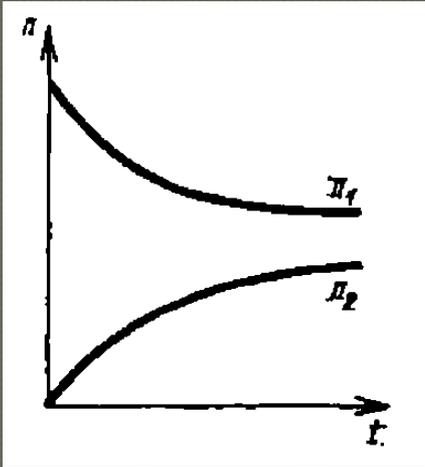
Для электронных уровней $E_2 - E_1 \gg kT$ поэтому

$d_{12} \ll d_{21}$ Число неоптических переходов $1 \rightarrow 2$ и $2 \rightarrow 1$ за время dt равно $d_{12} n_1 dt$ и $d_{21} n_2 dt$

Таким образом, полное изменение числа частиц на уровне 2 за время dt

$$dn_2 = B_{12} u (n_1 - n_2) - A_{21} n_2 + d_{21} n_2 dt$$

Населенность уровней при стационарном режиме:



$$n_1^{ст} = \frac{A_{21} + B_{12}u + d_{21}}{A_{21} + 2B_{12}u + d_{12} + d_{21}} n$$

$$n_2^{ст} = \frac{B_{12}u + d_{12}}{A_{21} + 2B_{12}u + d_{12} + d_{21}} n$$

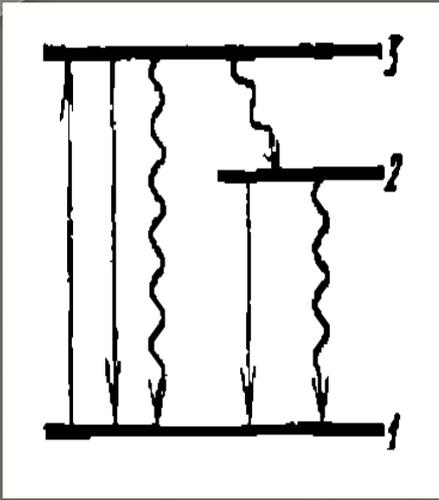
Зависимость населенностей
уровней от времени

$$k_{12}^{погл} = \frac{k_{12}^0}{1 + a_{12}u}$$

k_{12}^0 коэффициент поглощения при отсутствии возбуждения $n_1 = n_2$

a_{12} параметр нелинейности, определяемый всеми вероятностями перехода. Он характеризует нелинейность взаимодействия частиц с внешним излучением, обусловленную насыщением распределения частиц по уровням.

Особенностью процесса оптического возбуждения двухуровневой системы является невозможность перевести в возбужденное состояние более половины частиц и, следовательно, невозможность создать инверсную заселенность уровней.



Переходы между уровнями в трехуровневой системе при возбуждении в канале $1 \rightarrow 3$

$$P_{ij} = A_{ij} + B_{ij} (u + u_{v,T}) + d_{ij}$$

$$P_{ji} = B_{ji} (u + u_{v,T}) + d_{ji}$$

P_{ij} P_{ji} суммарные вероятности оптических и неоптических переходов с верхнего уровня i на нижний уровень j и обратно

Уравнения баланса для трехуровневой системы

$$\left. \begin{aligned} n_1 &= \left(\frac{h\nu}{\Delta} \right) \left[P_{21} (P_{31} + P_{32}) + P_{31} P_{23} \right] \\ n_2 &= \left(\frac{h\nu}{\Delta} \right) \left[P_{12} (P_{31} + P_{32}) + P_{32} P_{13} \right] \\ n_3 &= \left(\frac{h\nu}{\Delta} \right) \left[P_{23} (P_{12} + P_{13}) + P_{21} P_{13} \right] \end{aligned} \right\} \quad (11.2.1)$$

Δ сумма всех членов уравнений, стоящих в квадратных скобках

В канале $1 \rightarrow 3$ $h\nu_{ij} \gg kT$

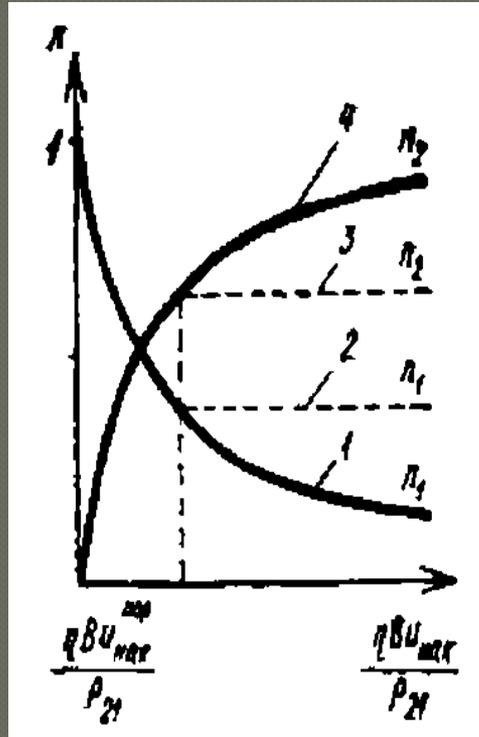
Следовательно, влияние теплового излучения можно не учитывать, будем считать, что

$$P_{32} \gg P_{31} \quad P_{31} \gg P_{21}$$

Тогда формулы (11.2.1) становятся проще:

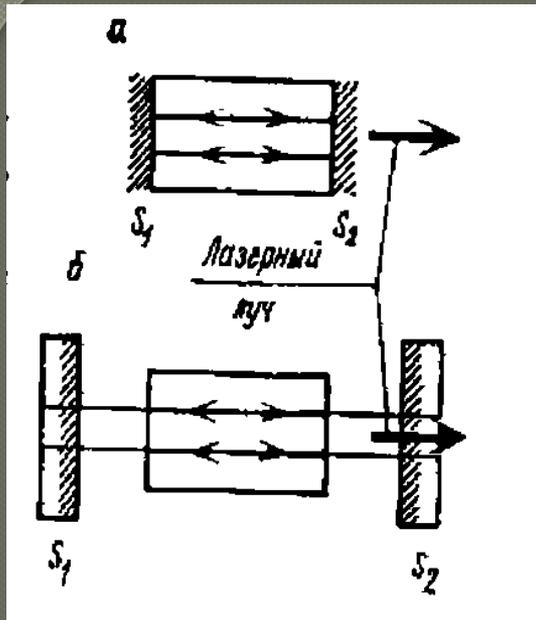
$$\left. \begin{aligned} n_1 &= n \frac{P_{21}}{P_{21} + \eta B u_{\text{нак}}} \\ n_2 &= n \frac{\eta B u_{\text{нак}}}{P_{21} + \eta B u_{\text{нак}}} \\ n_3 &= n_2 \left(\frac{P_{21}}{P_{32}} \right) \ll n_2 \end{aligned} \right\}$$

где $\eta = \frac{P_{32}}{P_{31} + P_{32}}$; $B u_{\text{нак}} = B_{13} u$



Зависимость населенностей уровней 1 и 2 трехуровневой системы от интенсивности накачки в канале $1 \rightarrow 3$: 1, 4 – без резонатора, 2, 3 – с резонатором

Для того, чтобы активное вещество превратить в генератор световых колебаний, необходимо, чтобы часть испускаемого света все время находилась в зоне активного вещества и вызывала вынужденное испускание все новых и новых частиц, т.е. надо осуществить обратную связь. Для этого активное вещество помещают между двумя параллельными зеркалами.



Оптические резонаторы: а – зеркала S_1 и S_2 нанесены на торцы стержня, б – зеркала S_1 и S_2 выносные

$$k_{nom} = \frac{1}{l} \ln \sqrt{\frac{1}{R_1 R_2}} + \rho \quad (11.2.2)$$

Коэффициент характеризует потери в расчете на единицу активного стержня

l - длина активного стержня,

R_1, R_2 - коэффициенты отражения зеркал резонатора,

ρ - коэффициент вредных потерь

Первое слагаемое в (11.2.2) характеризует полезные, а второе – вредные потери.

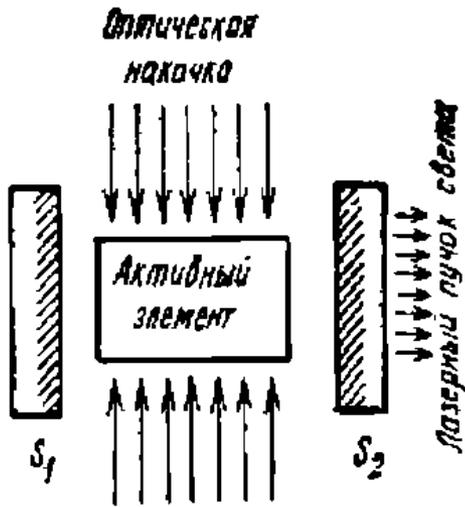
Выражение для плотности генерируемого излучения:

$$u_{21} = \frac{k_{21}^0 - k_{nom}}{\alpha}$$

$$W_{ген} = \frac{cls}{\alpha} \left(k_{21}^0 - k_{ном} \right) \quad (11.2.3)$$

Формула (11.2.3) характеризует полную энергию, генерируемую внутри стержня. Населенности уровней 1 и 2 генерирующей трехуровневой системы не зависят от интенсивности накачки.

$$n_1 = \frac{n}{2} \left(1 - \frac{k_{ном}}{x} \right) \quad n_2 = \frac{n}{2} \left(1 + \frac{k_{ном}}{x} \right)$$



Принципиальная схема оптического квантового генератора с оптической накачкой

Основную роль в сужении линии излучения лазера играет оптический резонатор. Особенность оптических резонаторов заключается в том, что их размеры значительно больше длины волны, в результате чего возможно одновременное возбуждение большого числа собственных колебаний. Такие колебания называют *модами* резонатора..

. Мода определяет конфигурацию стоячей волны электромагнитного поля в резонаторе.

Можно представить себе как суперпозицию двух плоских электромагнитных волн, распространяющихся в противоположных направлениях вдоль оси резонатора.

Длина резонатора L должна быть равной целому числу полуволн, т.е.

$$L = m \left(\frac{\lambda}{2} \right), \text{ где } m = 1, 2, \dots$$

Такое условие необходимо для того, чтобы на обоих зеркалах электрическое поле электромагнитной стоячей волны было равным нулю. Поэтому резонансные частоты равны

$$\nu_m = m \frac{c}{2L}$$

Разность частот, соответствующих двум последовательным модам, равна

$$\Delta \nu = \frac{c}{2L}$$

Эти две моды отличаются одна от другой распределением поля вдоль оси резонатора (т.е. в продольном направлении). Поэтому такие моды называют *продольными*. Кроме продольных мод в резонаторе осуществляются и поперечные моды, которые дают распределение поля в плоскости, перпендикулярной к оси резонатора.

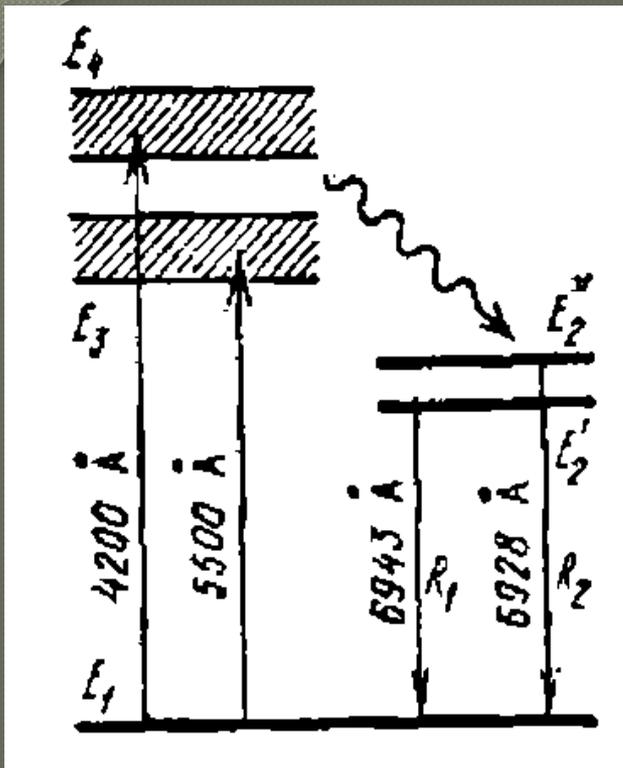


Диаграмма энергетических уровней
 иона Cr^{3+} в рубине

