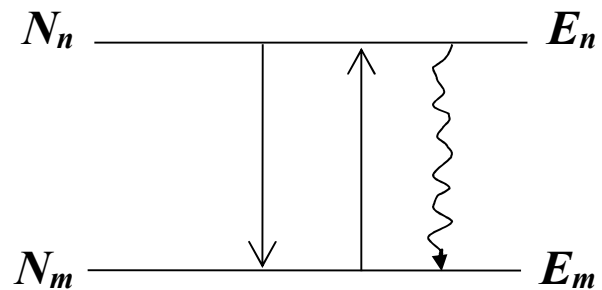


# Физика оптического излучения.

## Основы физики лазеров.

### LASER – Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

Рассмотрим квантовую двухуровневую систему. Пусть существуют два уровня в атоме, причем  $N_n$  - число атомов на уровне  $n$ , а  $N_m$  - на уровне  $m$ . В такой системе возможны следующие переходы:



1. Переходы, индуцированные светом:  
- при переходе «вверх» происходит поглощение;

- при переходе «вниз» происходит излучение;

2. Спонтанные переходы происходят с излучением. Спонтанные переходы – чисто квантовый эффект, он отсутствует в классической теории. Такие переходы происходят без внешнего воздействия.

3. Безизлучательные релаксационные переходы (потери энергии без излучения).

Рассмотрим свойства индуцированных переходов:

1. Вероятность индуцированных переходов отлична от нуля только для внешнего поля резонансной частоты:  $\hbar\nu = E_n - E_m$ .

2. Кванты электромагнитного поля тождественны квантам, вызвавшим этот переход.

3. Вероятность индуцированных переходов пропорциональна спектральной объемной плотности энергии вызвавшего их излучения:

$$W_{nm}^{ind} = B_{nm} \varepsilon(\nu)$$

$$W_{mn}^{ind} = B_{mn} \varepsilon(\nu)$$

#### Вывод формулы Планка по Эйнштейну.

$$N_m = N_0 e^{-\frac{E_m}{kT}}$$

$$N_n = N_0 e^{-\frac{E_n}{kT}}$$

**1. Спонтанные переходы.** Система стремится к минимуму. Вероятность спонтанного перехода одной частицы  $A_{mn}$  - коэффициент Эйнштейна.  $W_{mn} = A_{mn}$  не зависит от внешних условий.

$$W_{mn} = \frac{1}{t_{сп}}$$

где  $t_{сп}$  - время высвечивания.

$\Delta E t_{сп} \gg h$ , где  $\Delta E$  - естественная ширина линии.

Мощность спонтанного излучения:  $P_{mn}^{sp} = h\nu A_{mn} N_m$ .

Спонтанные переходы невозможны в классике, они происходят без воздействия внешних сил. Со временем система переходит в невозбужденное состояние.

## 2. Вынужденное (индуцированное) поглощение.

$$P_{nm}^{ind} = h\nu B_{nm} \varepsilon(\nu_{mn}) N_n,$$

где  $B_{nm} \varepsilon(\nu_{mn})$  - вероятность поглощения одной частицей.

## 3. Вынужденное излучение.

$$P_{mn}^{ind} = h\nu B_{mn} \varepsilon(\nu_{mn}) N_m;$$

При условии термодинамического равновесия получаем аналог абсолютно черного тела. В этом случае  $\varepsilon(\nu_{mn}) \Rightarrow u(\nu_{mn})$ .

$$u = \frac{\frac{A_{mn}}{B_{mn}}}{\frac{B_{nm}}{B_{mn}} e^{h\nu/kT} - 1};$$

Сравнивая с формулой Планка, получим:

$$1. \frac{A_{mn}}{B_{mn}} = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} h\nu$$

$$2. B_{nm} = B_{mn};$$

Рассмотрим мощность излучения:

$$P_{изл} = P_{mn}^{cn} + P_{mn}^{ind}$$

$$P_{изл} = h\nu N_m (B_{mn} \varepsilon + A_{mn}) = h\nu N_m B_{mn} \left( \varepsilon + \frac{8\pi\nu^2}{c^3} h\nu \right),$$

т.е. излучение отсутствует, если нет одного из компонентов (либо индуцированного, либо спонтанного).

## Рассмотрим взаимодействие плоской квазимонохроматической волны с ансамблем квантовых осцилляторов.

$$E = A \cos(\omega_0 t - kz);$$

$$I = \frac{c}{8\pi} A^2; \quad I(\nu) = \varepsilon(\nu)c;$$

$$P = \frac{dw}{dt} = \frac{dwc}{dzc} = \frac{dI}{dZ}$$

$$P_{B3} = h\nu N_m (B_{mn} \varepsilon(\nu_{mn}) + A_{mn}) - h\nu B_{nm} \varepsilon(\nu_{mn}) N_n;$$

Вероятность спонтанного перехода мала, пренебрегая ею получим:

$$\frac{dI}{I} = -h\nu \frac{dZ}{c} (N_n - N_m);$$

$$I = I_0 e^{-\alpha z} \text{ - закон Бугера-Бэра}$$

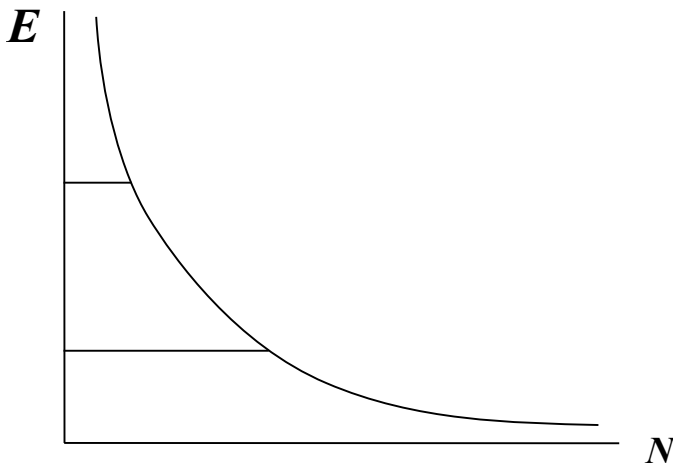
Здесь  $\alpha = \frac{h\nu}{c}(N_n - N_m)$ ;

$\alpha > 0$ ,  $N_n > N_m$  - поглощение; равновесное состояние.

$\alpha < 0$ ,  $N_n < N_m$  - неравновесное состояние.

Усиление света; состояние с инверсной населенностью.

Можно ввести  $\gamma = -\alpha$  - коэффициент усиления.

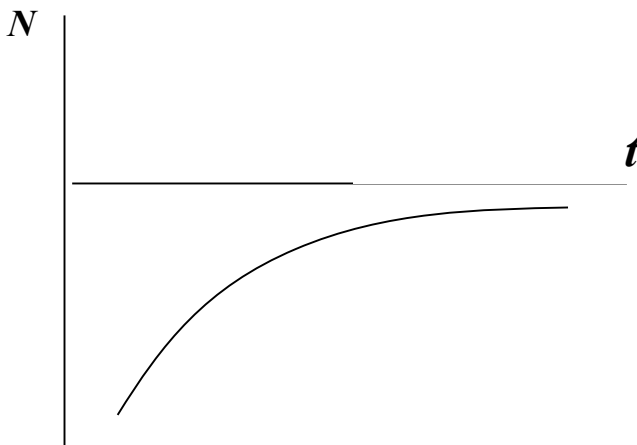


Обычно в двухуровневой системе невозможно достичь состояния с инверсной населенностью. Если мы накачкой перебрасываем электроны с нижнего уровня на верхний, наступает равновесное состояние.

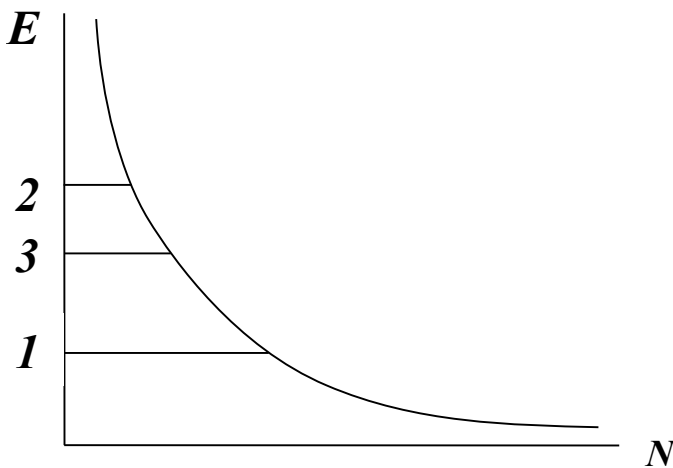
Величина  $N = N_m - N_n$  называется инверсией.

При "накачке"  $N \rightarrow 0$ .

Среда просветляется, но состояния с инверсной населенностью в двухуровневой системе не наступает.



Применяются трехуровневые схемы.

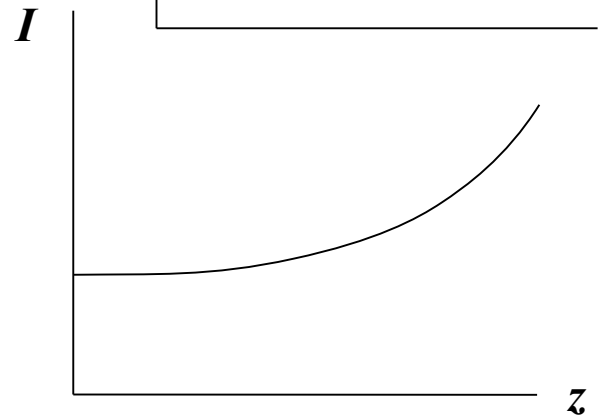
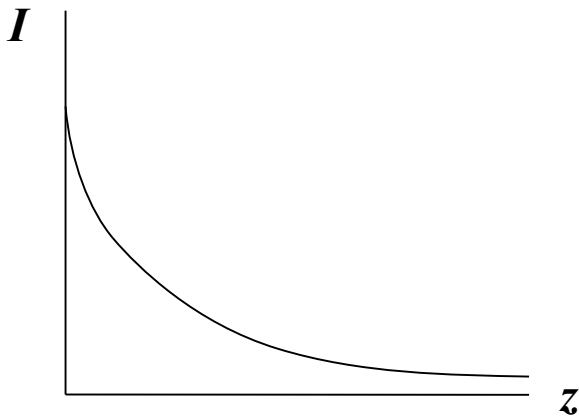
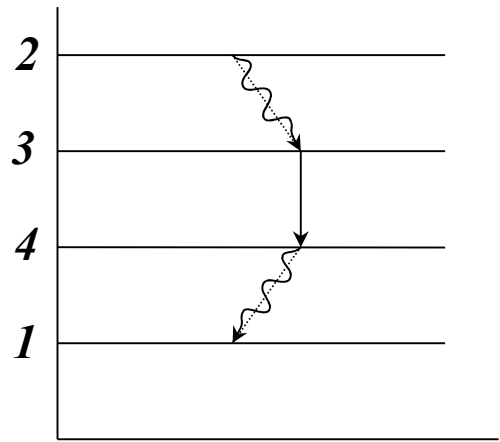


В этом случае инверсная населенность между уровнями 2 и 3. Недостаток: переходы происходят на занятый уровень 3,  $N_2 - N_3$  мало, коэффициент усиления недостаточен.

Можно создать четырехуровневую схему.  
 Уровень 4 имеет малое время жизни.  
 Вероятность заселения уровня 3 велика.  
 Уровень освобождается безизлучательно.

Среда, усиливающая свет, называется активной средой.

В обычных средах при прохождении света через нее происходит поглощение по закону Бугера. В активных средах свет усиливается.



Для того, чтобы усилитель превратился в генератор необходим резонатор, обеспечивающий положительную обратную связь. Рассмотрим простейший лазерный резонатор типа Фабри-Перо.



Условия усиления света.

Коэффициенты отражения зеркал  $R_1$  и  $R_2$ .  
 Расстояние  $L$ .

Уравнение плоской волны:

$$E = A \exp(\gamma z / 2) \exp(-i(\omega t - kz));$$

$$E = A \exp(-i(\omega t));$$

$$E = A \exp(\gamma L / 2) \exp(-i(\omega t - kL));$$

$$E = AR_1R_2 \exp(\gamma 2L / 2) \exp(-i(\omega t - k2L));$$

Амплитудное условие:  $R_1R_2 \exp(\gamma 2L / 2) > 1$ .

Фазовое условие - волны должны приходить в фазе:  $2L \frac{2\pi}{\lambda} = 2\pi q$ ;

т.е.:

$$\lambda_q = \frac{2L}{q}$$