

# Лекция 4

## *Введение в специальность*

И.М. Белоусова

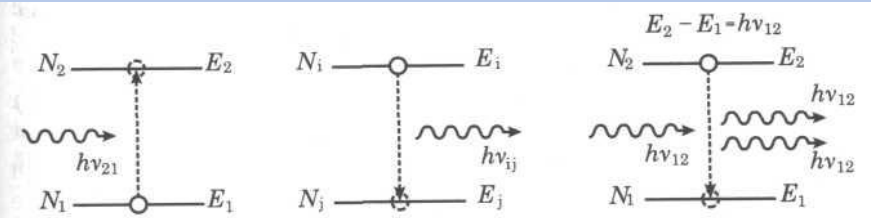
Санкт-Петербург  
2011

# Предпосылки создания лазера

## Основа создания лазеров

Теория поглощения и испускания света атомами, созданная Эйнштейном в 1916 г.

### Взаимодействие фотонов с системой (атомы и молекулы)



поглощение

спонтанное  
излучение

вынужденное  
излучение

Спонтанное излучение – имеет случайный характер: фазы, направление распространения, поляризация световых волн, излучаемых различными атомами, не согласованы друг с другом

Излучение ансамбля частиц – некогерентно

## Вынужденное излучение

Испускаемый фотон не отличим от фотона, который вызвал его появление.

Частота, фаза, направление распространения совпадает с фотоном, вызвавшим его излучение.

### Вынужденное излучение – когерентно

Вместо одного фотона → два, т.е. возможно усиление

### Необходимое условие

Термодинамическое равновесие

Формула Больцмана

$$N_2 = N_1 \exp[-(E_2 - E_1)/kT]$$

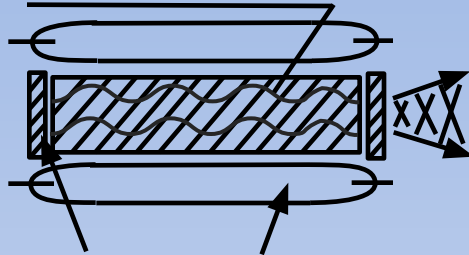
В обычных условиях  $N_2 \ll N_1$

Необходимо создать инверсную населенность уровней, т. е.  $N_2 > N_1$

# Структурная схема лазера. Первые лазеры.

## Основные элементы лазера

1. Активная среда



3. Резонатор 2. Источник накачки

- Активная среда** с инверсной населенностью уровней, в которой происходит вынужденное излучение (атомы, молекулы)
- Источник накачки**, создающий инверсную населенность уровней в активной среде
- Резонатор** – обеспечивает обратную связь и генерацию когерентного излучения

## Первый лазер США Маймана (1960 г.)

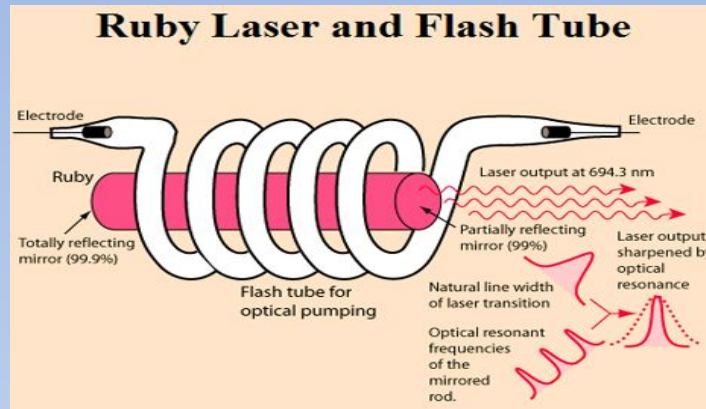
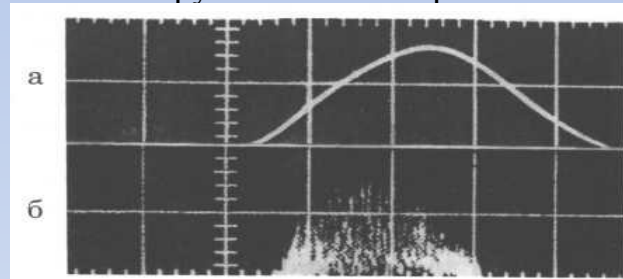


Схема рубинового лазера



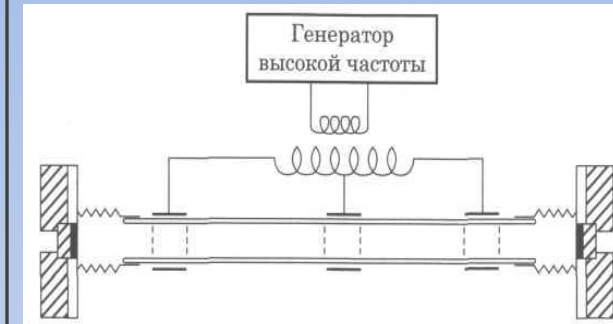
Осциллограмма излучения рубинового лазера (0.5 мс/дел). а) до порога; б) после порога

- Рубиновый стержень  $Al_2O_3 + Cr^{3+}$  (0.05)
- Зеркала резонатора – алюминий, нанесенный на торцы стержня
- Источник накачки: спиральная ксеноновая лампа  $E_{пор} = (CU^2/2) \approx 1$  кДж

$$\lambda = 694,3 \text{ нм}$$

## Первый газовый лазер (1961 г.) (He-Ne)

А. Джаван (США)



Активная среда:

смесь газов  $He+Ne$

Длина разрядной ( $P=5$  тор)

трубки  $L=100$  см

Накачка - СВЧ-разряд (30 МГц)

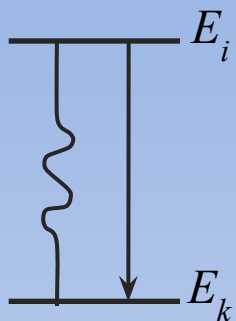
Резонатор (многослойные

диэлектрические зеркала  $R \geq 99\%$

$\lambda_{ген} = 1,15$  мкм (первые опыты)

$\lambda_{ген} = 632,8$  мкм (красный луч)

# Некоторые вводные понятия



$E_i \rightarrow E_k$  – излучение  
 $E_k \rightarrow E_i$  – поглощение  
 $E_i - E_k = h\nu_{ik}$  –  
 излучательный переход

$A_i = 1/\tau_i$  – вероятность перехода – среднее число фотонов, испускаемых одной частицей за 1 секунду

$\tau_i$  – время жизни частицы в определенном энергетическом состоянии

$A_i = \sum A_{ik}$  – излучательный переход

**$A_{ik}$  - коэффициент Эйнштейна для спонтанного излучения**

Вынужденные переходы происходят под действием внешнего излучения с частотой  $\nu$ , удовлетворяющей условию:

$$h\nu_{ik} = E_i - E_k$$

$Z_{ki} = B_{ki} N_k \rho_\nu$  – число поглощенных квантов за 1 с в 1 см<sup>3</sup>

$Z_{ik}^b = B_{ik} N_i \rho_\nu$  – число испущенных квантов под воздействием излучения

$$Z_{ik} = A_{ik} N_i$$

$$Z_{ik} + Z_{ik}^b = Z_{ki}$$

$B_{ki}$  - коэффициент Эйнштейна, соответствующий поглощению

$B_{ik}$  - коэффициент Эйнштейна, соответствующий вынужденному излучению

$$g_k B_{ki} = g_i B_{ik}$$

$$B_{ik} = \frac{g_k}{g_i} B_{ki}$$

$$A_{ik} = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} B_{ik}$$

Соотношение между коэффициентами Эйнштейна

$g$  – степень вырождения уровней

# Коэффициент усиления

$$I = I_0 e^{-kol} \quad - \text{поглощение света, закон Бугера}$$

$$I = I_0 e^{+kol} \quad - \text{усиление света}$$

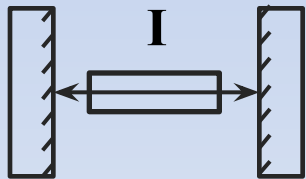
$$K_0 = \frac{h\nu_{ik}}{c\Delta\nu_D} (B_{ki}N_k - B_{ik}N_i) \quad (1)$$

$$B_{ki} = \frac{g_i}{g_k} B_{ik}$$

$$K_0 = -\frac{h\nu_{ik}}{c\Delta\nu_D} B_{ik} \left( N_i - \frac{g_i}{g_k} N_k \right) \quad (2)$$

$$N_i > \frac{g_i}{g_k} N_k \quad \text{условие инверсной населенности} \quad (3)$$

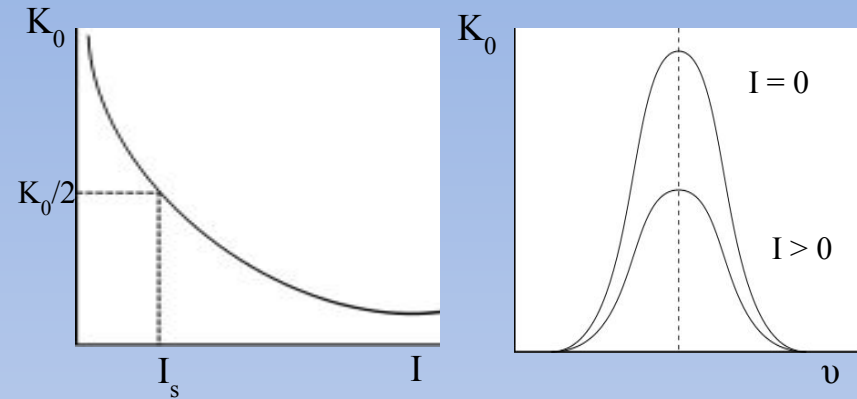
## Активная среда в резонаторе



$$K_0^{\text{рез}} = \frac{K_0}{1 + I/I_s} \quad (4)$$

$$K_0^{\text{рез}} \quad - \text{насыщенный коэффициент усиления}$$

$$I_s \quad - \text{интенсивность насыщения}$$



$$I_s = \frac{h\nu}{\sigma\tau}, \quad \text{где} \quad \sigma = h\nu_{ik} \frac{B_{ki}}{c\Delta\nu_D} \quad (5)$$

$\tau$  - время жизни верхнего уровня

$B_{ki}$  - коэффициент Эйнштейна, соответствующий поглощению

## Пример

Видимая область спектра:  $\lambda = 5 \cdot 10^{-4} \text{ см}$

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \cdot 10^{10}}{0.5 \cdot 10^{-4}} = 6 \cdot 10^{14} \text{ 1/с}$$

$$h\nu = 6.6 \cdot 10^{-27} \text{ (эрг} \cdot \text{с)} \cdot 6 \cdot 10^{14} \left(\frac{1}{\text{с}}\right) \approx 4 \cdot 10^{-12} \text{ эрг}$$

1Вт =  $10^7$  эрг/с, т.е.

$$h\nu = 4 \cdot 10^{-19} \text{ Вт} \cdot \text{с} = 4 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$$

если  $\sigma = 10^{-16} \text{ см}^2$   $\tau = 10^{-6} \text{ с}$ , тогда

$$I_s = \frac{4 \cdot 10^{-19} \text{ Вт} \cdot \text{с}}{10^{-16} \text{ см}^2 \cdot 10^{-6} \text{ с}} = 4 \cdot 10^3 \text{ Вт/см}^2 \sim 4 \text{ кВт/см}^2$$

# Условие генерации - энергетическое

$$K_0^{\text{рез}} = K^{\text{пот}} \quad (6)$$

$$K^{\text{пот}} = K_{\text{пр}} + \rho_{\text{дисс}} \quad (7)$$

Из (4)

$$K_0^{\text{рез}} + K_0^{\text{рез}} \cdot \frac{l}{I_s} = K_0$$

$$K_0^{\text{рез}} \cdot I_s + K_0^{\text{рез}} \cdot l = K_0 I_s$$
$$I = I_s \cdot \frac{K_0 - K_0^{\text{рез}}}{K_0^{\text{рез}}} = I_s \cdot \frac{K_0 - K^{\text{пот}}}{K^{\text{пот}}}$$

$P = I \cdot K_{\text{пр}}$  – мощность в стационарном режиме

## Пример

$$P = I_s \cdot \frac{K_0 - K^{\text{пот}}}{K^{\text{пот}}} \cdot K_{\text{пр}} = 4 \cdot 10^3 \text{ (Вт/см}^2\text{)} \cdot \frac{10^{-3} - 0.5 \cdot 10^{-3}}{0.5 \cdot 10^{-3}} \cdot 10^{-4} \left( \frac{1}{\text{см}} \right)$$
$$= 4 \cdot 10^3 \text{ (Вт/см}^2\text{)} \cdot 10^{-4} \left( \frac{1}{\text{см}} \right) = 0.4 \text{ Вт/см}^3$$

$$K_{\text{пр}} = \frac{1}{e} \ln \frac{1}{\sqrt{r_1 \cdot r_2}}$$

$$(r_1 \cdot r_2)_{\text{ОПТ}} = e^{-2l \sqrt{K_0 \rho_{\text{дисс}} - \rho_{\text{дисс}}}}$$

$l$  – длина активной среды

$r_1, r_2$  – коэффициенты отражения зеркал

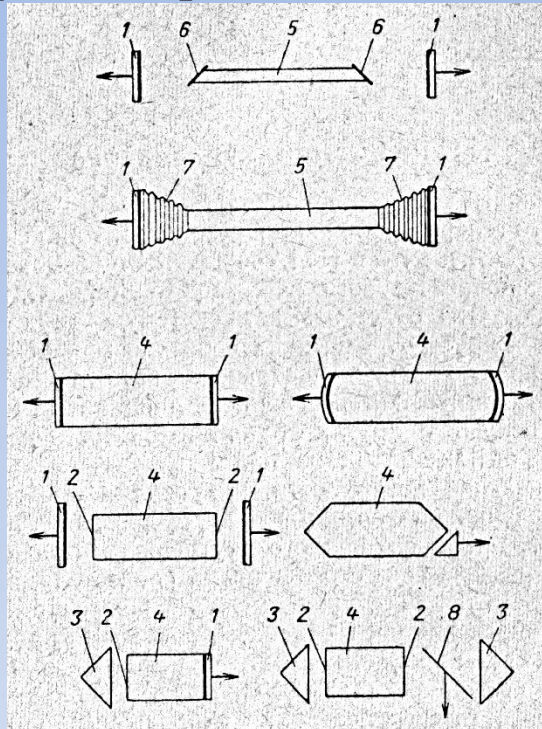


# Оптические резонаторы

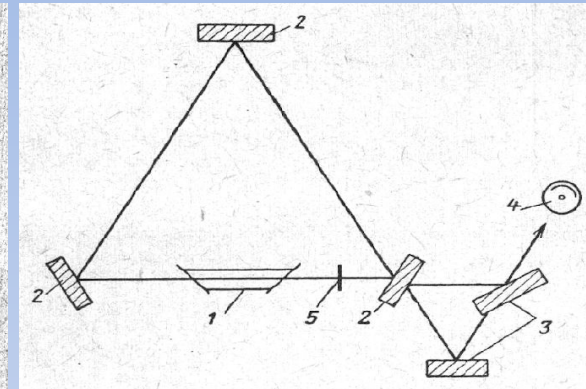
Оптические резонаторы – система двух обращенных друг к другу отражающих поверхностей, между которыми располагается активная среда. Резонатор лазера ограничен лишь двумя поверхностями и открыт с других сторон, поэтому он называется открытым резонатором

## Назначение резонатора

- Обеспечить многократное прохождение света через активную среду – увеличение эффективности усиления
- Обеспечить направленность излучения лазера (селекция угловых типов колебаний)
- Обеспечить монохроматичность и когерентность излучения лазера (селекция спектра)



*Разновидности активных резонаторов:* 1 – зеркало резонатора; 2 – полированная поверхность; 3- призма полного внутреннего отражения; 4 – активное твердое вещество; 5 – трубка с газовой смесью; 6 – окно Брюстера; 7 – сильфон; 8 – полупрозрачное зеркало



*Схема кольцевого ОКГ*

Отражающие поверхности могут представлять собой зеркала различной формы (плоские, сферические, параболические); границы призм полного внутреннего отражения, дифракционные решетки

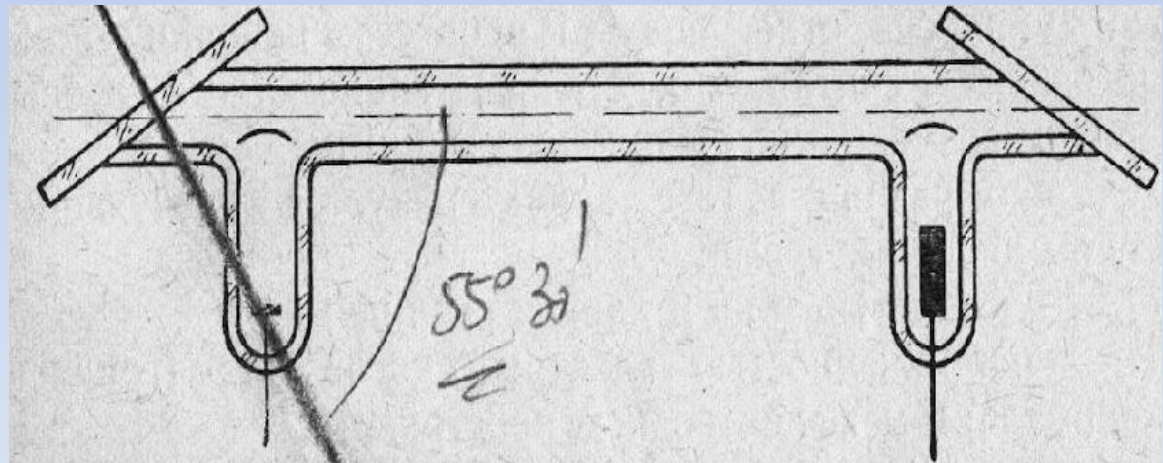
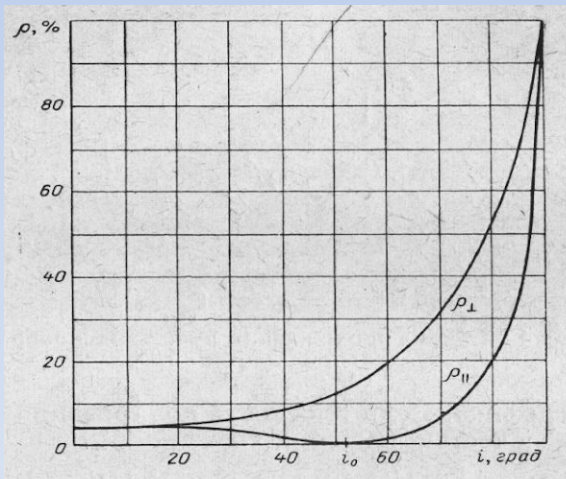
# Требования к резонаторной оптике

Наиболее простой резонатор состоит из плоских зеркал

- Плоские зеркала резонатора должны юстироваться с высокой точностью. Так, например, для газовых лазеров параллельность зеркал должна быть не хуже  $\pm 1''$ . Точность юстировки определяется коэффициентом усиления активной среды.
- Качество обработки поверхности зеркал – высокое ( $\Delta N \approx 0.01$ )
- Отражающее покрытие, как правило – многослойные диэлектрические покрытия  $R_1 \sim 1$ ,  $R_2$  – обеспечивает вывод излучения из резонатора. Величина пропускания зависит от коэффициента усиления среды.
- Усиление должно компенсировать потери в резонаторе.

Для ликвидации потерь, например, на френелевское отражение на границе двух сред – границу (окна, стенки кристалла) располагают **под углом Брюстера**

В резонаторе устанавливается поляризация с наименьшими потерями



Зависимость коэффициента отражения на пластинке от угла падения для различной ориентации плоскости поляризации падающего излучения

Вид газовой кюветы в ОКГ с внешним расположением зеркал



# Моды резонатора

Мода резонатора характеризуется определенной конфигурацией электромагнитного поля на поверхности зеркал и определенным числом полуволн, укладываемых на длине резонатора

Теория открытых резонаторов

*Л. А. Вайнштейн*

Теория на основе принципа

Гюйгенса-Френеля развита

*Фоксом и Ли*

Моды резонатора обозначаются

$TEM_{mnp}$

$m$  и  $n$  – целые числа, равные 0,

1, 2.. – обозначают число

изменений знака поля на

поверхности зеркал -

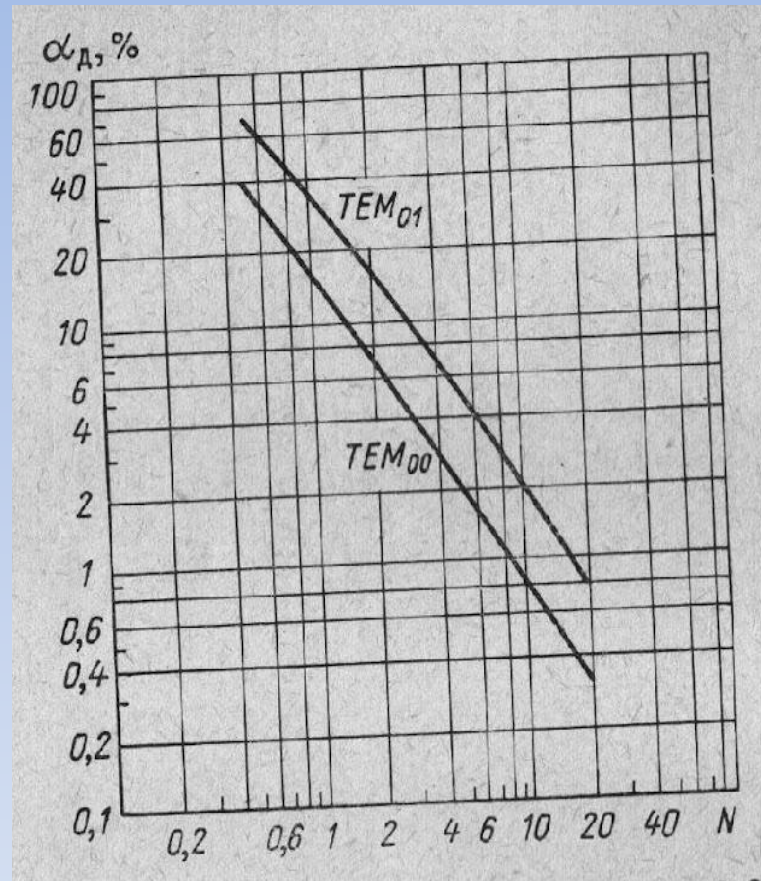
поперечные моды

$q$  – равно числу полуволн,

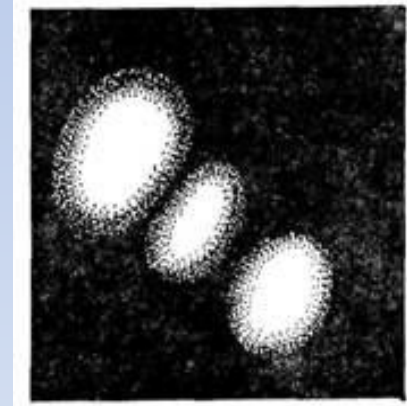
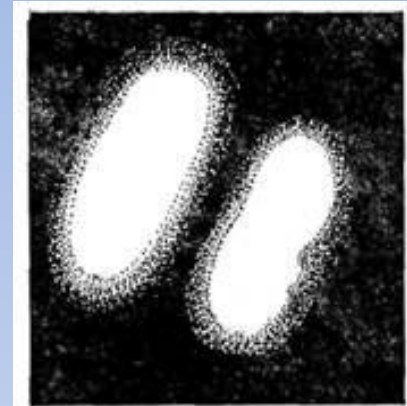
укладывающихся на длине

резонатора – продольные

моды

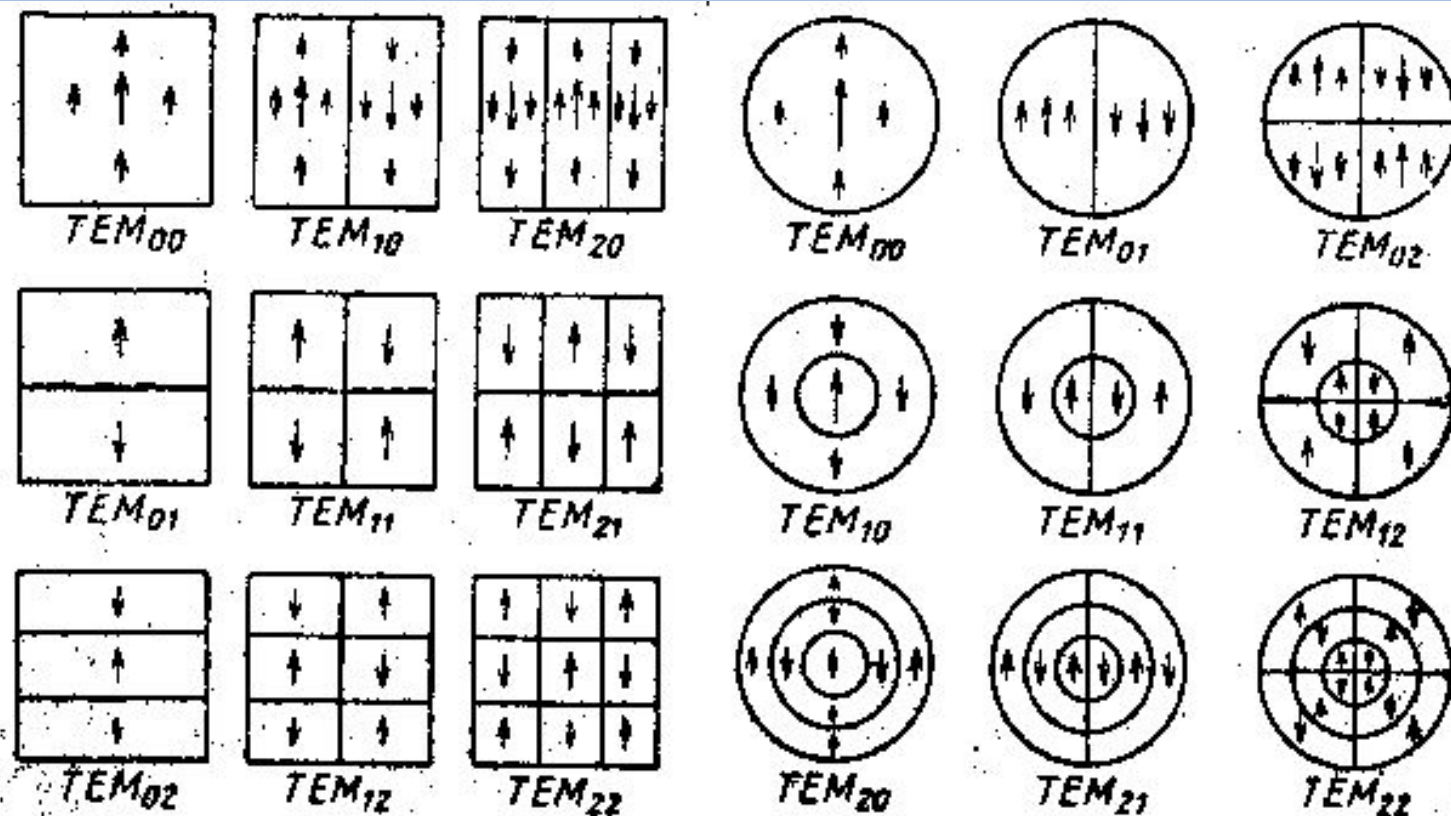


Зависимость потерь мощности за один проход волны от числа Френеля  $N$  для круглых плоских зеркал



Распределение интенсивности в поперечном сечении лазерного пучка в некоторых случаях

# Моды в оптическом резонаторе



Конфигурация поля нормальных типов колебаний для квадратных и круглых зеркал.

# Реализация типов колебаний. Угловая расходимость лазеров

Реализация типов колебаний (мод) зависит от дифракционных потерь на краях зеркал.

Дифракционные потери увеличиваются с ростом индекса моды.

Величина дифракционных потерь зависит от параметра резонатора, который называется

число зон Френеля

$$N = \frac{a^2}{L\lambda},$$

где  $a$  – диаметр амплитуды зеркала резонатора,  $L$  – длина резонатора,  $\lambda$  – длина волны излучения

Например,  $a = 0.5$  см,  $L = 100$  см,  $\lambda = 1.15$  мкм (He-Ne лазер)

$$N = \frac{0.25}{1.15 \cdot 10^{-4} \cdot 100} = 21.7$$

Потери определяются по формуле (приближенной при  $N > 10$ )

$$\alpha_{\text{диф}} = \underbrace{5.23 \cdot 10^{-2} \cdot L^2}_{\text{Например, } 8.86} \cdot n(m+1) \cdot N^{-3/2} = 8.7 \%$$

Например, 8.86

Расчеты выполнены Фоксом и Ли

Угловая расходимость зависит от модового состава

Для TEM<sub>00</sub> моды

$$\varphi = 2.44 \frac{\lambda}{D} \text{ плоский резонатор}$$

Для конфокального резонатора

$$Q = 2 \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} \sqrt{\frac{\lambda}{b}} = 0.939 \sqrt{\frac{\lambda}{b}}$$

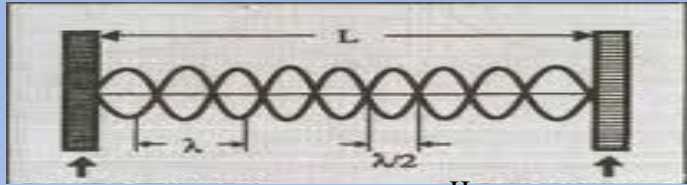
$b$  – расстояние между зеркалами

Селекция поперечных мод

- улучшение угловой расходимости

1. Увеличение длины резонатора
2. Разъюстировка зеркал
3. Дифрагмирование пучка

# Резонансные условия генерации



Полностью отражающее зеркало

Частично отражающее зеркало

$$L = q \frac{\lambda}{2} \quad L = q \frac{c}{2\nu}$$

$$\nu = q \frac{c}{2L} \quad q - \text{целое число}$$

Разность частот в резонаторе:  $\Delta\nu = \frac{c}{2L}$

## Контур линии усиления

### Уширения

#### 1. Естественная ширина линии

$$\Delta\nu_{\text{ест}} = \frac{1}{\tau_i}$$

#### 2. Доплеровская ширина линии

$$\Delta\nu_D = 2\nu_0 \sqrt{\frac{2KT \ln 2}{Mc^2}}$$

где  $T$  – температура газа,  $M$  – масса частиц

#### 3. Столкновительное (лоренцевское) уширение

$$\Delta\nu_{\text{рез}} = \frac{c}{2L} = \frac{3 \cdot 10^{10} \frac{\text{см}}{\text{с}}}{2 \cdot 10^2 \text{см}} = 1.5 \cdot 10^8 \frac{1}{\text{с}} = 150 \text{ МГц}$$

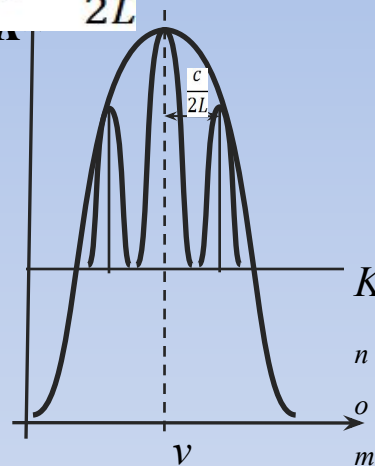
$\Delta\nu_{\text{рез}}$  - ширина линии в резонаторе =  $\frac{c}{2L} \cdot \frac{K_{\text{пот}}}{\pi} \sim 1 \text{ МГц}$

$$\Delta\nu_{\text{ген}} = \frac{8\pi h\nu}{P_{\text{ген}}} (\Delta\nu_{\text{рез}})^2 \sim 10^{-3} \text{ Гц} \quad \frac{\Delta\nu_{\text{ген}}}{\nu} = 10^{-17} \text{ (теория)}$$

Джаван получил пассивным методом в 1962 г.:

$$\Delta\nu_{\text{ген}} = 2 \text{ Гц}$$

Реально  $10 \div 100 \text{ КГц}$ : *вибрация,  $\Delta T$ , неоднородность активной среды*

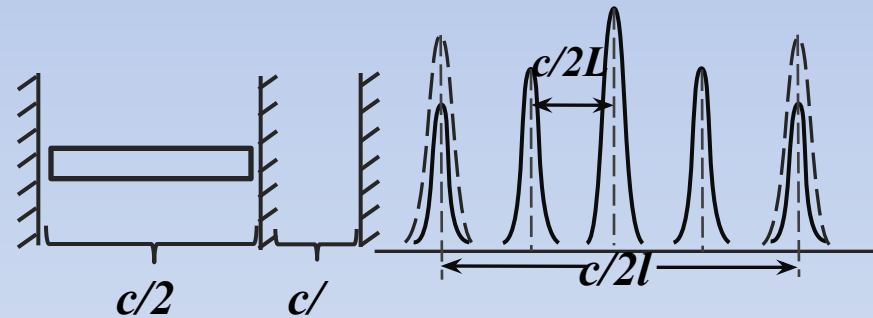


**Многочастотный** – несколько продольных типов колебаний

**Многомодовый** – несколько поперечных типов колебаний

## Достижения одночастотного режима

- Уменьшение мощности – до порога генерации
- Укорочение резонатора
- Трехзеркальный резонатор



## Временная когерентность излучения лазера

$$\Delta\tau \sim \frac{1}{\Delta\nu} \sim \frac{1}{10^2} \sim 10^{-2} \text{ с}$$

Достигнуто

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = 10^{-12} \quad \nu = 10^{14} \text{ Гц} \quad \Delta\nu = 10^{14} \cdot 10^{-12} = 10^2 \text{ 1/с}$$

Длина когерентности

$$L = \Delta\tau \cdot c = 3 \cdot 10^{10} \text{ см/с} \cdot 10^{-2} \text{ с} = 3 \cdot 10^8 \text{ см}$$

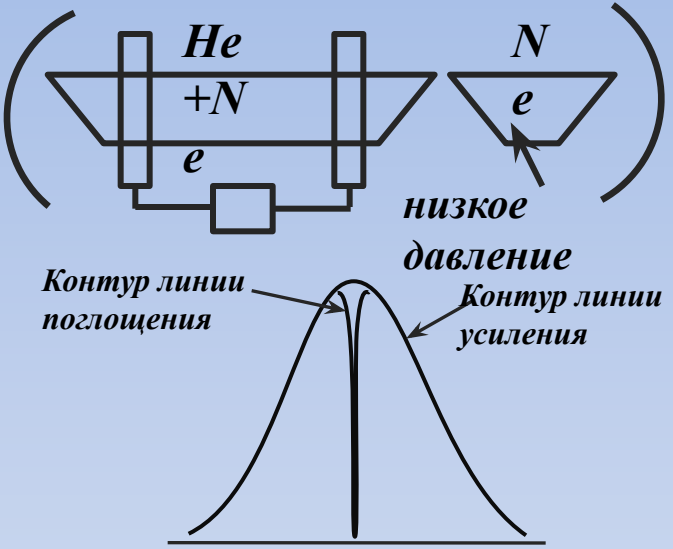


# Стабилизация частоты He-Ne лазера. Когерентность излучения

**Основной метод стабилизации:**

Частоты He-Ne лазеров:

Поглощающая ячейка внутри резонатора



Контур линии поглощения Ne-ячейки равен естественной ширине линии, так как из-за низкого давления нет лоренцевского уширения, а при помещении в резонатор – нелинейный процесс:

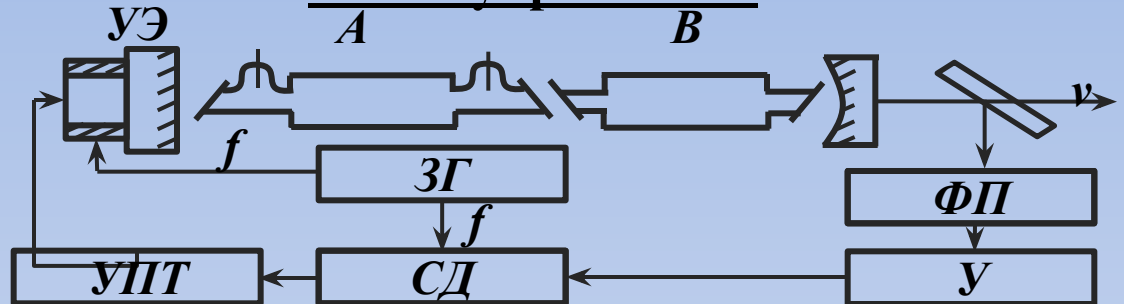
$$\Rightarrow Ne \rightleftharpoons (w_0 + kv) + (w_0 - kv) = 2w_0$$

Узкие резонансы с шириной  
 $10^{-9} \div 10^{-10}$

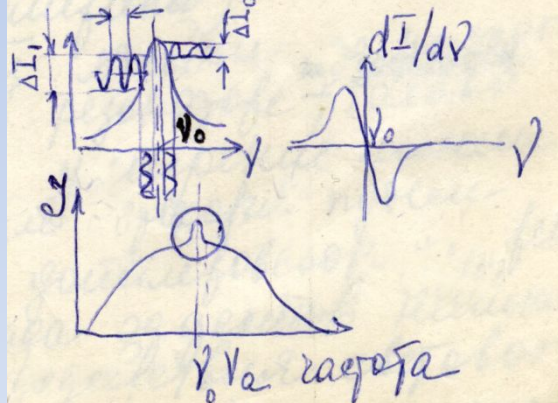
В He-Ne лазере для  $\lambda 6328 \text{ \AA}$  для стабилизации частоты используют линии поглощения электронно-колебательного спектра  $^{127}I_2$  и  $^{129}I_2$

Для  $\lambda 3.39 \text{ мкм}$  – метановые поглощающие ячейки

## Схема управления



А, В – усилительная и поглощающая ячейка; ФП – фотоприемник, У – усилитель, СД – синхронный детектор, ЗГ – генератор звуковой частоты, УПТ – усилитель постоянного тока, УЭ – управляющий элемент



**Достигнута стабильность частоты :**

He-Ne/ $J_2$   $\lambda 6328 \text{ \AA}$   $\Delta\nu/\nu = 10^{-12}$   
He-Ne/ $CH_4$   $\lambda 3.39 \text{ мкм}$   $\Delta\nu/\nu = 10^{-15}$

**Временная когерентность излучения лазера :**

$$\Delta\tau \sim \frac{1}{\Delta\nu} \sim \frac{1}{10^2} \sim 10^{-2} \text{ с}$$

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = 10^{-12} \quad \nu = 10^{14} \text{ Гц} \quad \Delta\nu = 10^{14} \cdot 10^{-12} = 10^2 \text{ 1/с}$$

**Длина когерентности излучения лазера :**

$$L = \Delta\tau \cdot c = 3 \cdot 10^{10} \text{ см/с} \cdot 10^{-2} \text{ с} = 3 \cdot 10^8 \text{ см} = 3 \cdot 10^6 \text{ м} = 3000 \text{ км}$$