Лекция 4

Введение в специальность

И.М. Белоусова

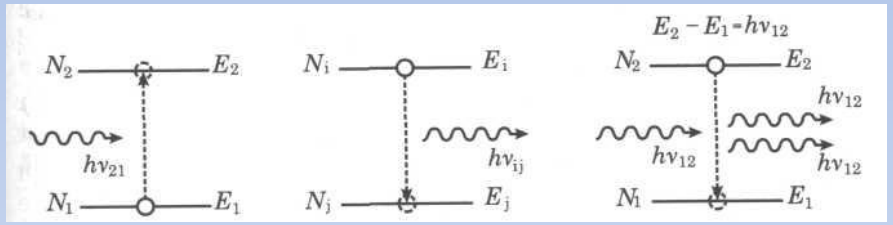
Санкт-Петербург
2011

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

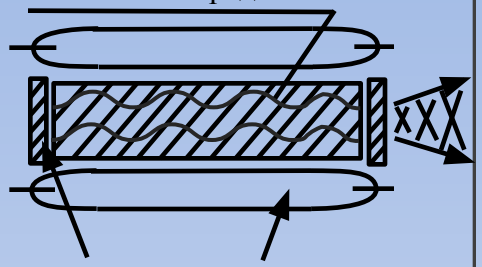
$$N_2 = N_1 exp[-(E_2-E_1)/kT]$$

В обычных условиях $N_2 << N_1$

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

Структурная схема лазера. Первые лазеры.

Основные элементы лазера



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

Первый лазер США Маймана (1960 г.)

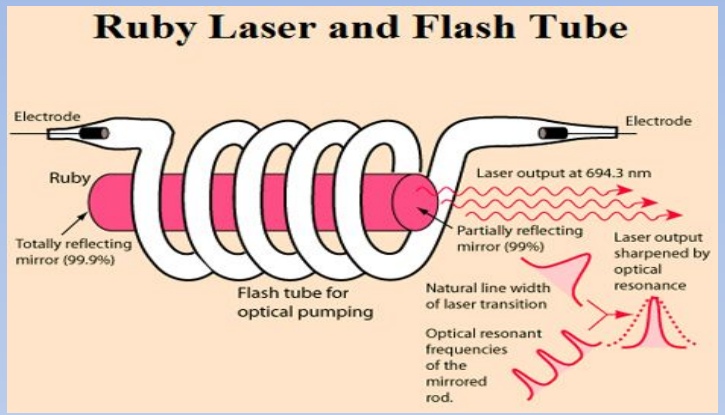
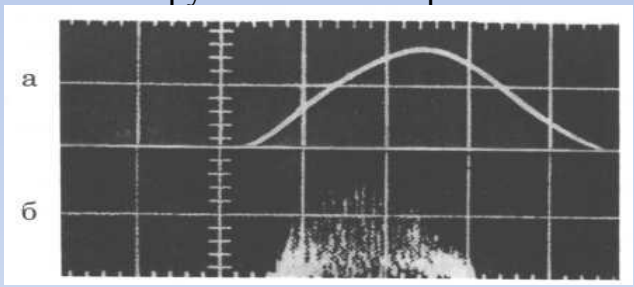


Схема рубинового лазера

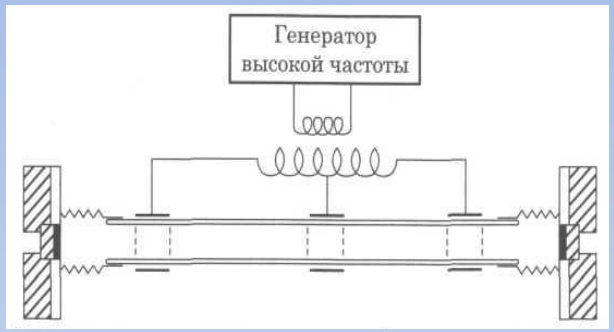


Осциллограмма излучения рубинового лазера (0.5 мс/дел). а) до порога; б) после порога

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

λ=694,3 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***

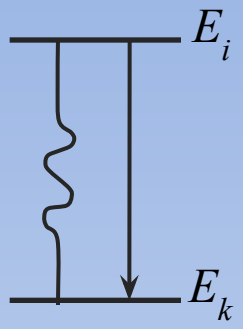
Накачка - СВЧ-разряд (***30 МГц***)

Резонатор (многослойные диэлектрические зеркала ***R ≥ 99%***

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

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

Некоторые вводные понятия



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

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

Соотношение между коэффициентами Эйнштейна

g – степень вырождения уровней

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

τ_i – время жизни частицы в определенном энергетическом состоянии

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

A_{ik} - коэффициент Эйнштейна для спонтанного излучения

Вынужденные переходы происходят под действием внешнего излучения с частотой ν, 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^3

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

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

$$Z_{ik} + Z^b_{ik} = Z_{ki}$$

B_{ki} - коэффициент Эйнштейна , соответствующий поглощению

B_{ik} - коэффициент Эйнштейна , соответствующий вынужденному излучению

Коэффициент усиления

$I = I_0 e^{-kol}$ - *поглощение света, закон Бугера*

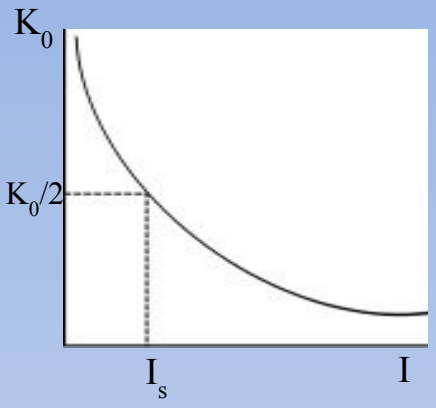
$I = I_0 e^{+kol}$ - *усиление света*

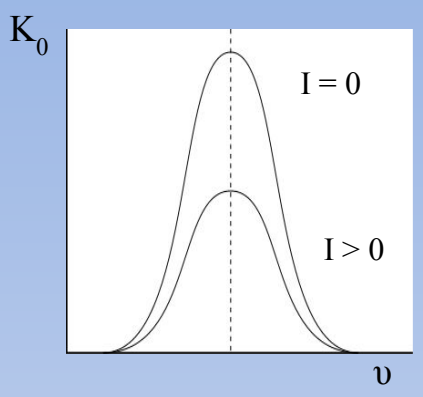
$$K_0 = \frac{h\nu_{ik}}{c\Delta\nu_д}(B_{ki}N_k - B_{ik}N_i) \quad (1)$$

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

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

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



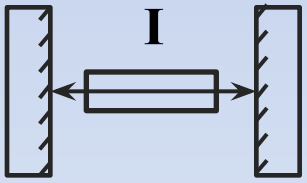


$$I_s = \frac{h\upsilon}{\sigma\tau}$$, где $$\sigma = h\upsilon_{ik}\frac{B_{ki}}{c\Delta\upsilon_л} \quad (5)$$

τ - *время жизни верхнего уровня*

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

Активная среда в резонаторе



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

$K_0^{рез}$ - *насыщенный коэффициент усиления*

I_s - *интенсивность насыщения*

Пример

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

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

$$h\upsilon = 6.6 \cdot 10^{-27}\ (эрг \cdot с) \cdot 6 \cdot 10^{14}\ (\frac{1}{с}) \simeq 4 \cdot 10^{-12} эрг$$

1Вт= 10^7 эрг/с, т.е. $h\upsilon = 4 \cdot 10^{-19}$ Вт·с=$4 \cdot 10^{-19}$ Дж

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

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

Условие генерации - энергетическое

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

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

Из **(4)** $$K_0^{\text{рез}} + K_0^{\text{рез}} \cdot \frac{I}{I_s} = K_0$$

$$K_0^{\text{рез}} \cdot I_s + K_0^{\text{рез}} \cdot I = K_0 I_s s$$

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

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

Пример

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

$$= 4 \cdot 10^3\,(\text{Вт/см}^2) \cdot 10^{-4}\left(\frac{1}{\text{см}}\right) = 0.4\,\text{Вт/см}^3$$

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

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

l – длина активной среды

r_1, r_2 – коэффициенты отражения зеркал

Оптические резонаторы

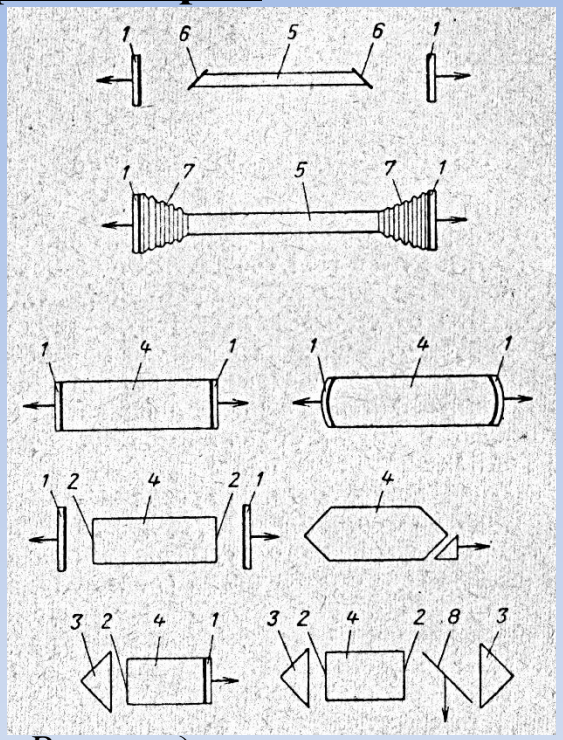
Оптические резонаторы – система двух обращенных друг к другу отражающих поверхностей, между которыми располагается активная среда

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)

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



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

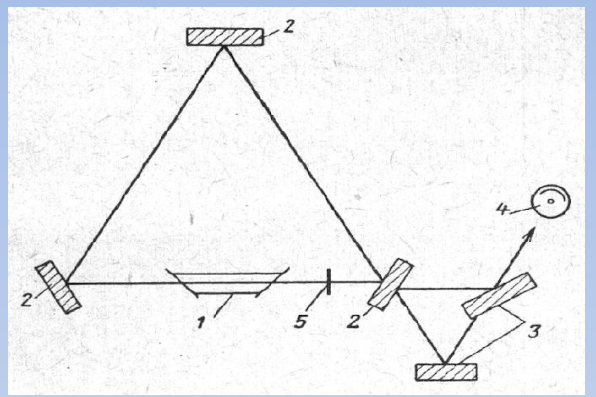


Схема кольцевого ОКГ

Требования к резонаторной оптике

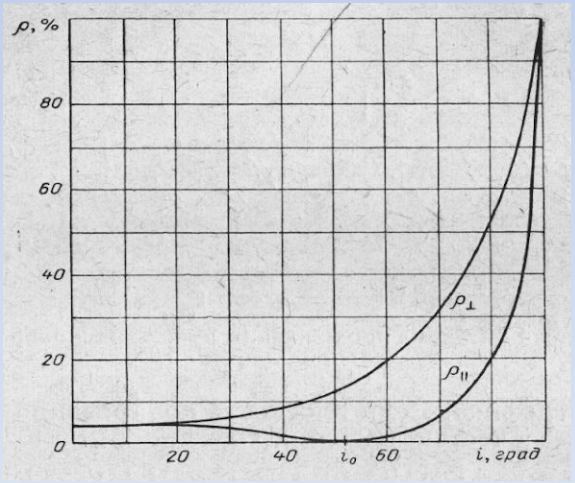
Наиболее простой резонатор состоит из плоских зеркал

- Плоские зеркала резонатора должны юстироваться с высокой точностью. Так, например, для газовых лазеров параллельность зеркал должна быть не хуже ***±1'***! Точность юстировки определяется коэффициентом усиления активной среды.
- Качество обработки поверхности зеркал – высокое (***ΔN≈0.01***)
- Отражающее покрытие, как правило – многослойные диэлектрические покрытия

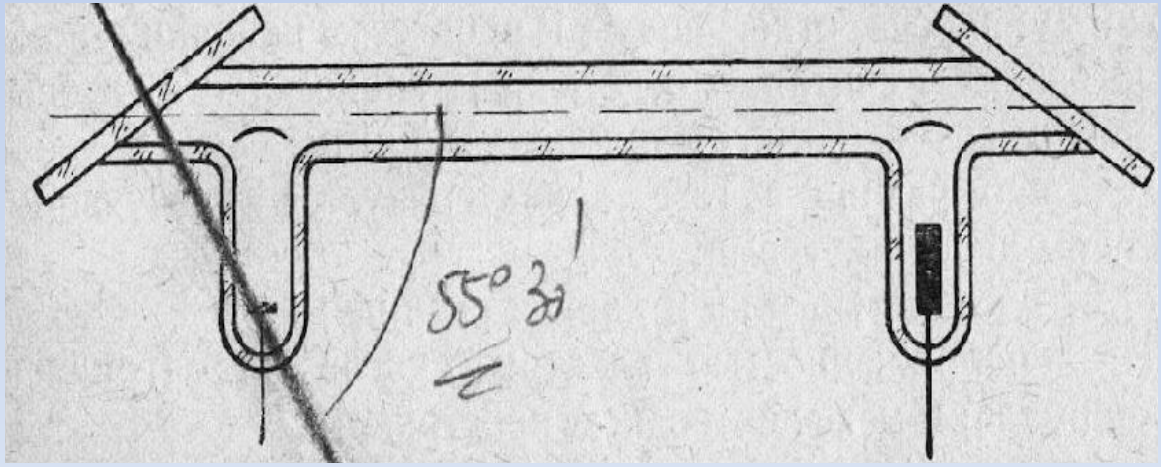
  $R_1 \sim 1$, R_2 – обеспечивает вывод излучения из резонатора. Величина пропускания зависит от коэффициента усиления среды.
- Усиление должно скомпенсировать потери в резонаторе.

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, укладывающихся на длине резонатора

Теория открытых резонаторов ***Л. А. Вайнштейн***

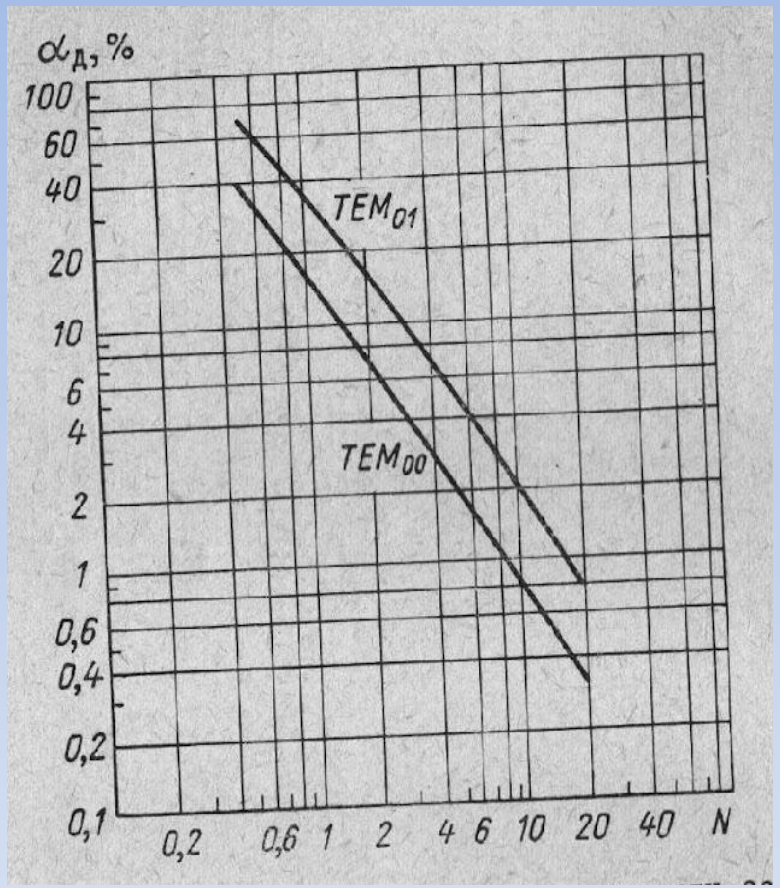
Теория на основе принципа Гюйгенса-Френеля развита ***Фоксом и Ли***

Моды резонатора обозначаются

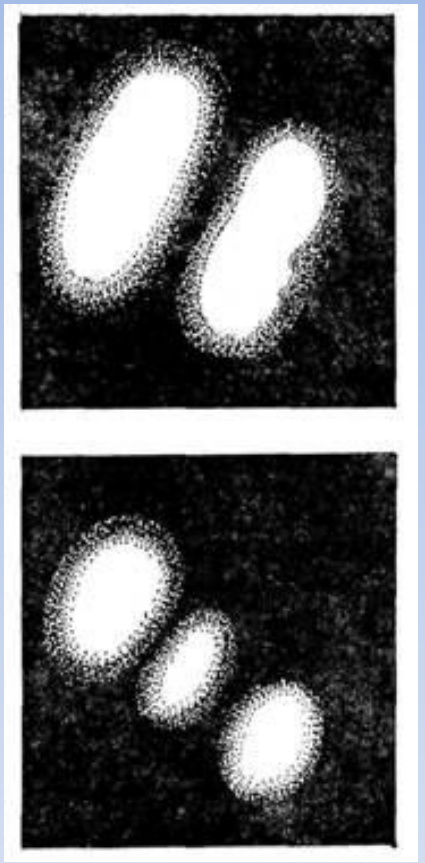
$$TEM_{mnq}$$

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**

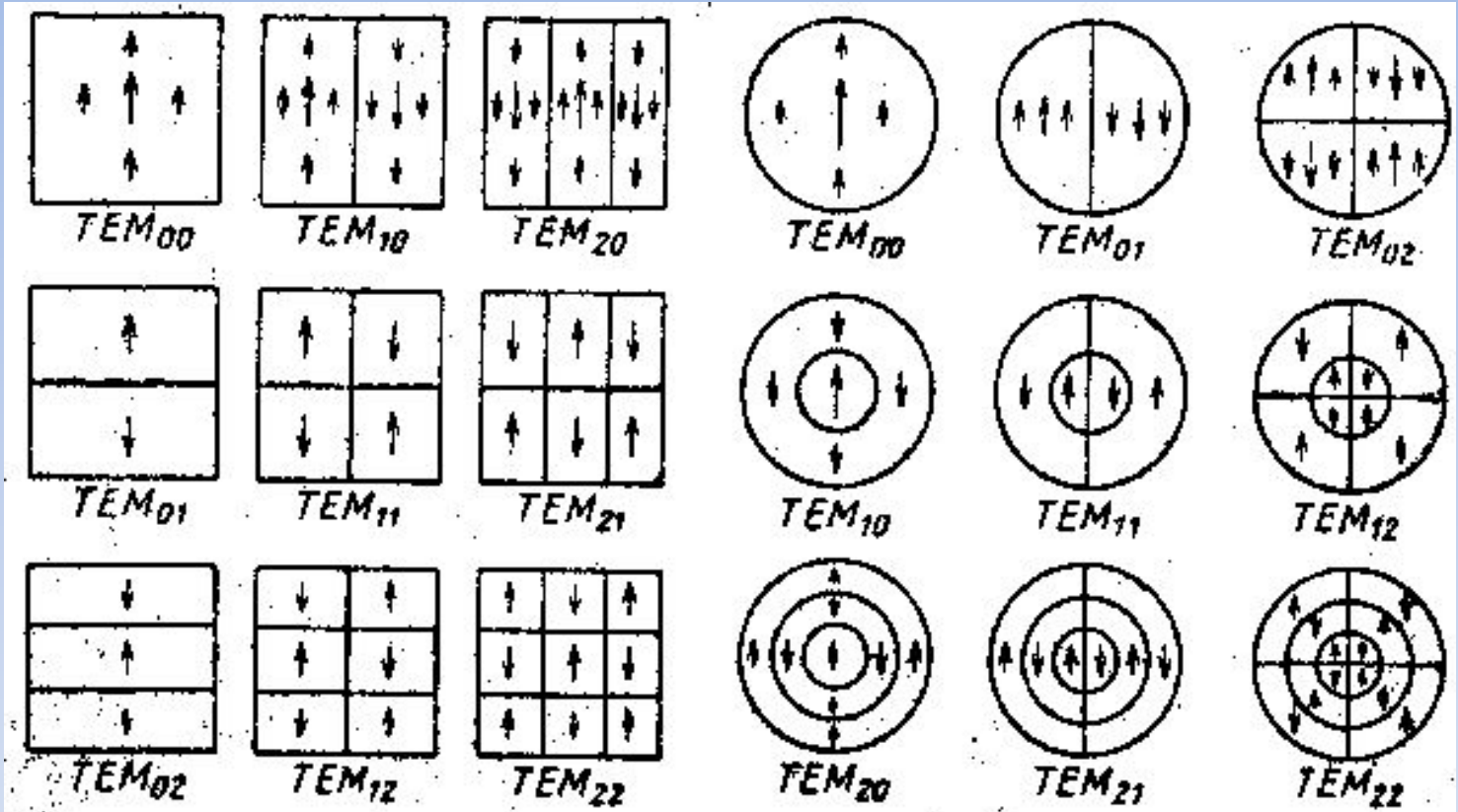


Зависимость потерь мощности за один проход волны от числа Френеля ***N*** для круглых плоских зеркал



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, ***λ*** – длина волны излучения

Например, ***a = 0.5 см***, ***L= 100 см***, ***λ = 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***)

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

Расчеты выполнены **Фоксом и Ли**

Угловая расходимость зависит от модового состава

Для TEM_{00} моды

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

Для конфокального резонатора

$$Q = 2\sqrt{\frac{ln2}{\pi}}\sqrt{\frac{\lambda}{b}} = 0.939\sqrt{\frac{\lambda}{b}}$$

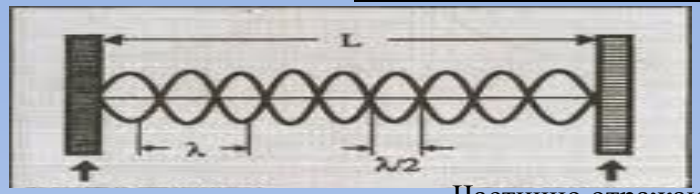
b - расстояние между зеркалами

Селекция поперечных мод

- улучшение угловой расходимости

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

Резонансные условия генерации



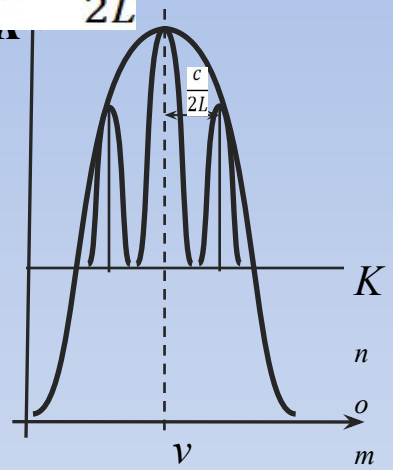
Полностью отражающее зеркало

Частично отражающее зеркало

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

$$\Delta\nu_{\text{Д}} = 2\nu_0\sqrt{\frac{2KT\ln 2}{Mc^2}}$$

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 $= \frac{c}{2L}\cdot\frac{K_{\text{пот}}}{\pi} \sim 1\text{МГц}$

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

Джаван получил пассивным методом в 1962 г.:

$\Delta\upsilon_{\text{ген}}$=2 Гц

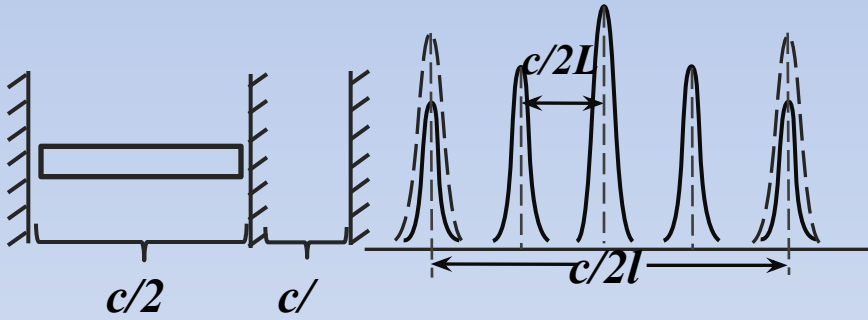
Реально **10÷100 КГц:***вибрация, ΔT, неоднородность активной среды*

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

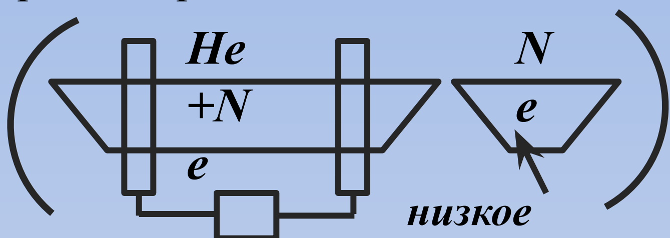
$\frac{\Delta\nu}{\nu} = 10^{-12}$ $\nu = 10^{14}\text{Гц}$ $\Delta\nu = 10^{14}\cdot 10^{-12} = 10^2\ 1/\text{с}$

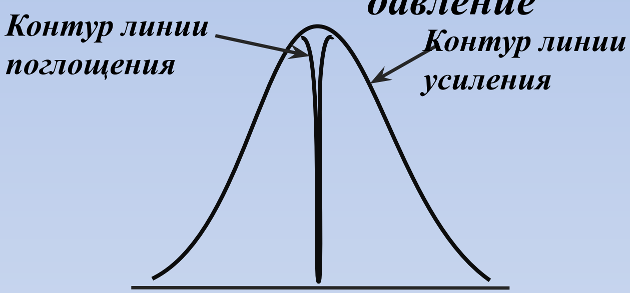
Длина когерентности

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

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:

⇒ Ne ⇐

$$(w_0+kv)+(w_0-kv)=2w_0$$

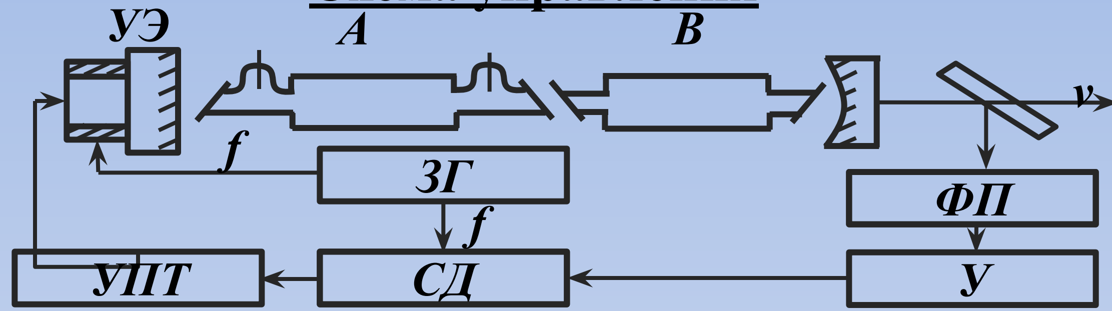
Узкие резонансы с шириной

$10^{-9}\div10^{-10}$

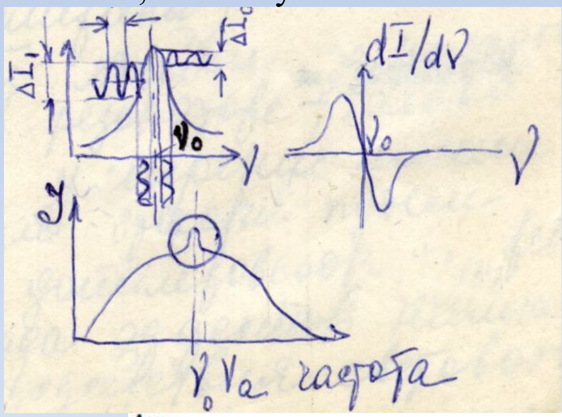
В **He-Ne** лазере для **λ 6328Å** для стабилизации частоты используют линии поглощения электронно-колебательного спектра $^{127}I_2$ *и* $^{129}I_2$

Для **λ 3.39 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$_2$ λ 6328 Å Δν/ν=10^{-12}

He-Ne/CH$_4$ λ 3.39 мкм Δν/ν=10^{-15}

Временная когерентность излучения лазера :

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

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = 10^{-12} \quad \nu = 10^{14}\text{Гц} \quad \Delta\nu = 10^{14}\cdot10^{-12} = 10^2\ 1/\text{c}$$

Длина когерентности излучения лазера :

$$L=\Delta\tau\cdot c=3\cdot10^{10}\text{см/с}\cdot10^{-2}\ \text{c}=3\cdot10^{8}\ \text{см}=3\cdot10^{6}\ \text{м}=3000\ \text{км}$$