

Лекция 4

Введение в специальность

И.М. Белоусова

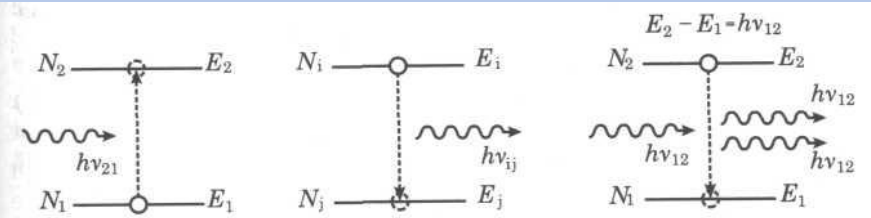
Санкт-Петербург
2011

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

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

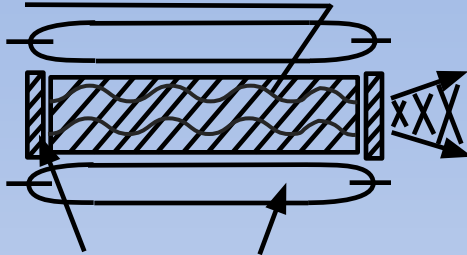
В обычных условиях $N_2 \ll N_1$

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.)

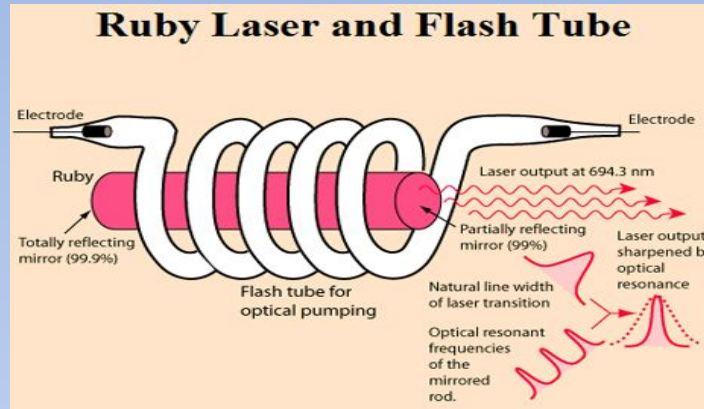
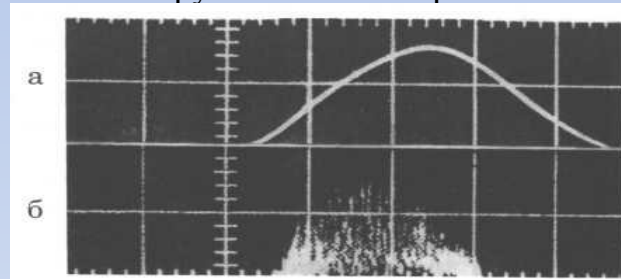


Схема рубинового лазера



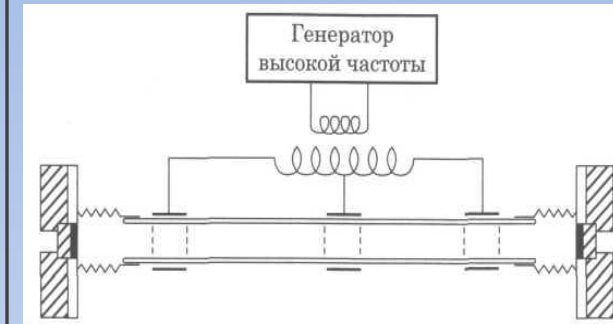
Осциллограмма излучения рубинового лазера (0.5 мс/дел). а) до порога; б) после порога

- 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

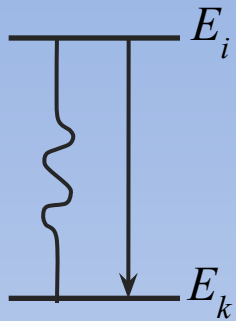
Накачка - СВЧ-разряд (30 МГц)

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

τ_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 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 см³

$Z_{ik}^b = B_{ik} N_i \rho_\nu$ – 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

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

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

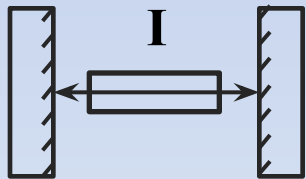
$$K_0 = \frac{h\nu_{ik}}{c\Delta\nu_D} (B_{ki}N_k - B_{ik}N_i) \quad (1)$$

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

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

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

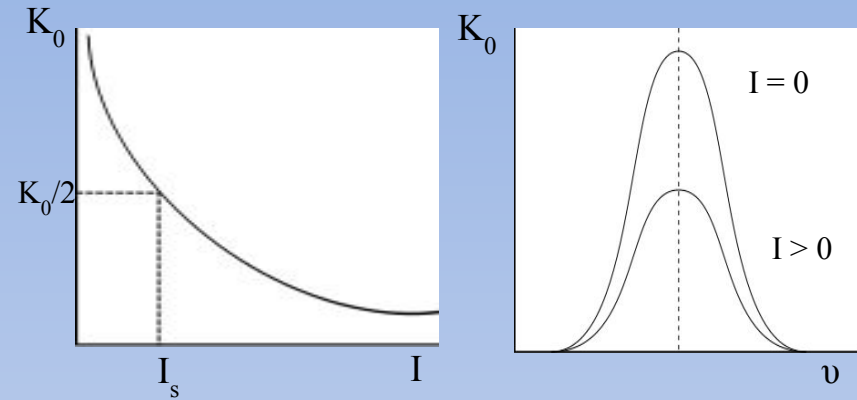
Активная среда в резонаторе



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

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

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



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

τ - время жизни верхнего уровня

B_{ki} - коэффициент Эйнштейна, соответствующий поглощению

Пример

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

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

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

$$1 \text{ Вт} = 10^7 \text{ эрг/с, т.е.}$$

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

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

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

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)

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

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

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

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

Пример

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

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

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

l – длина активной среды

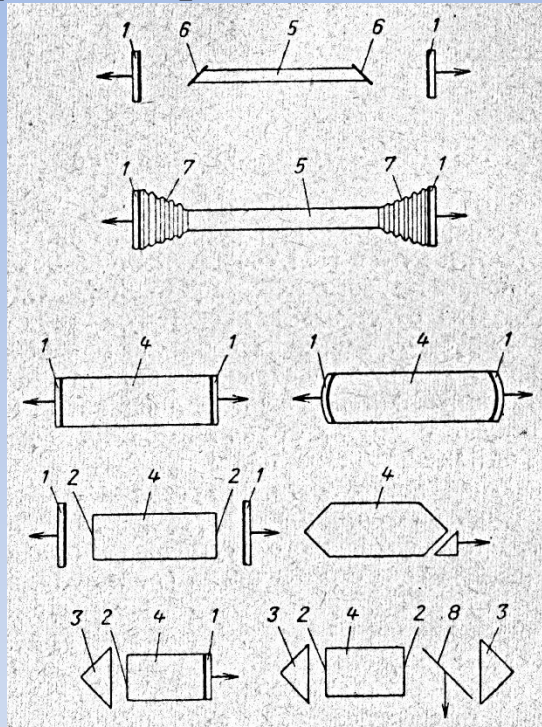
r_1, r_2 – коэффициенты отражения зеркал

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

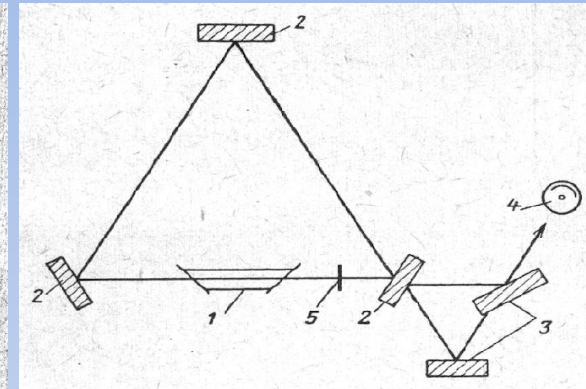


Схема кольцевого ОКГ

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

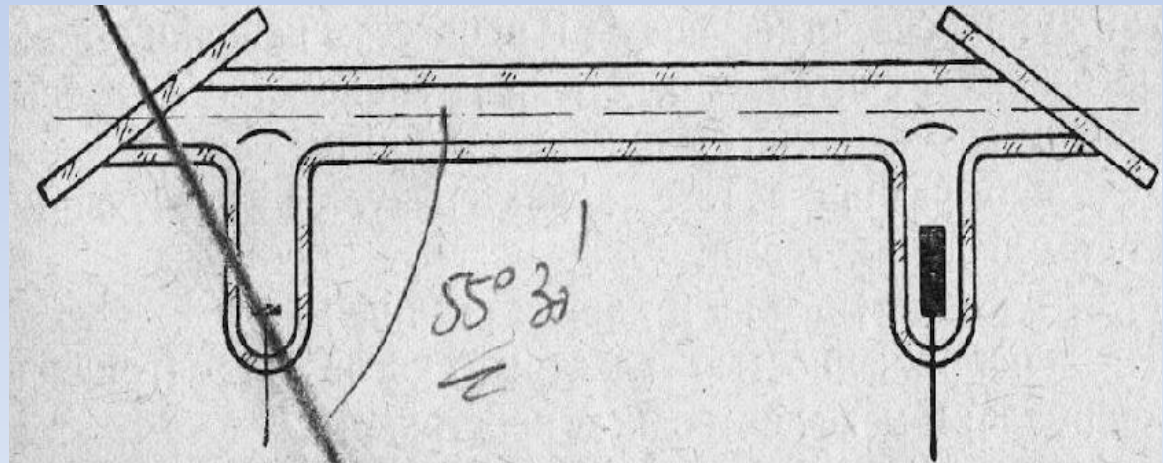
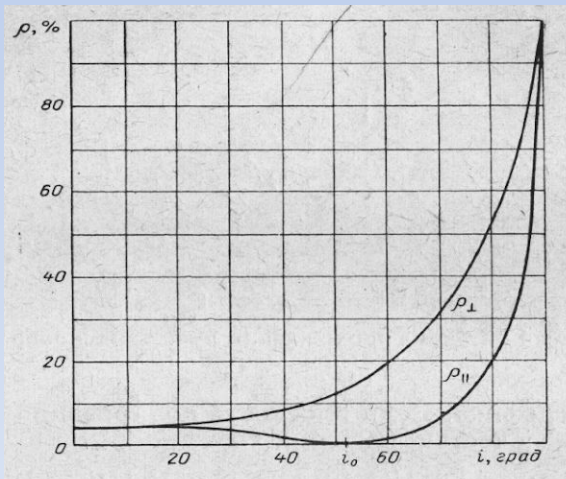
Требования к резонаторной оптике

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 –

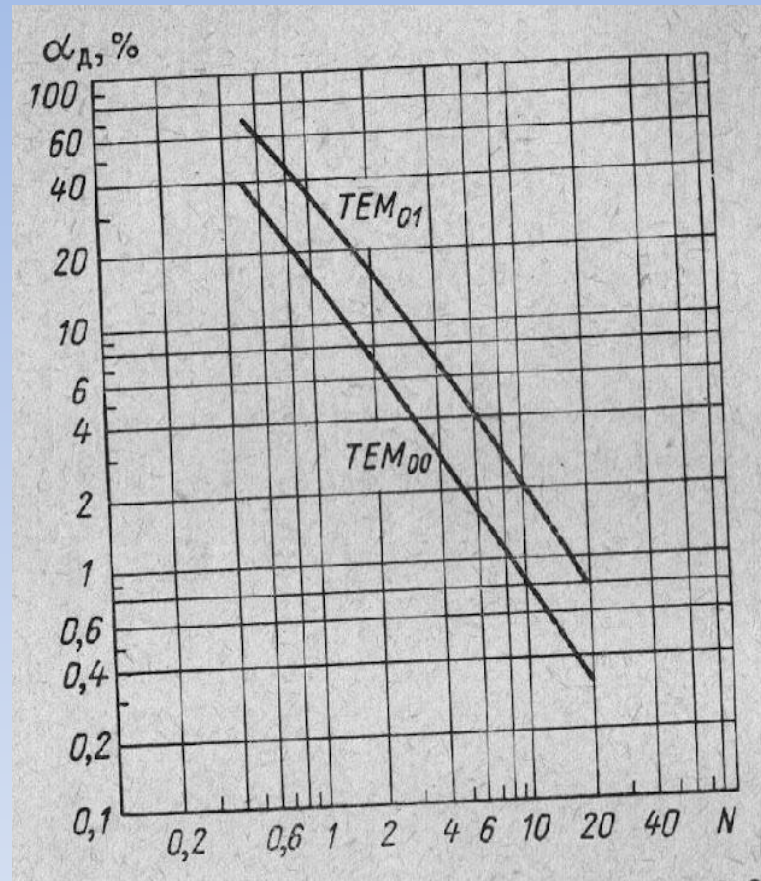
поперечные моды

q – равно числу полуволн,

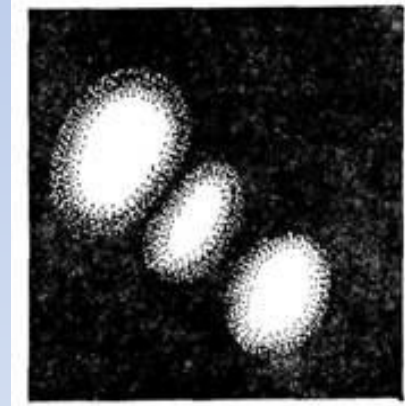
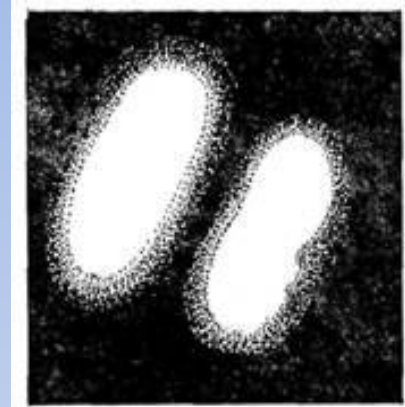
укладывающихся на длине

резонатора – продольные

моды

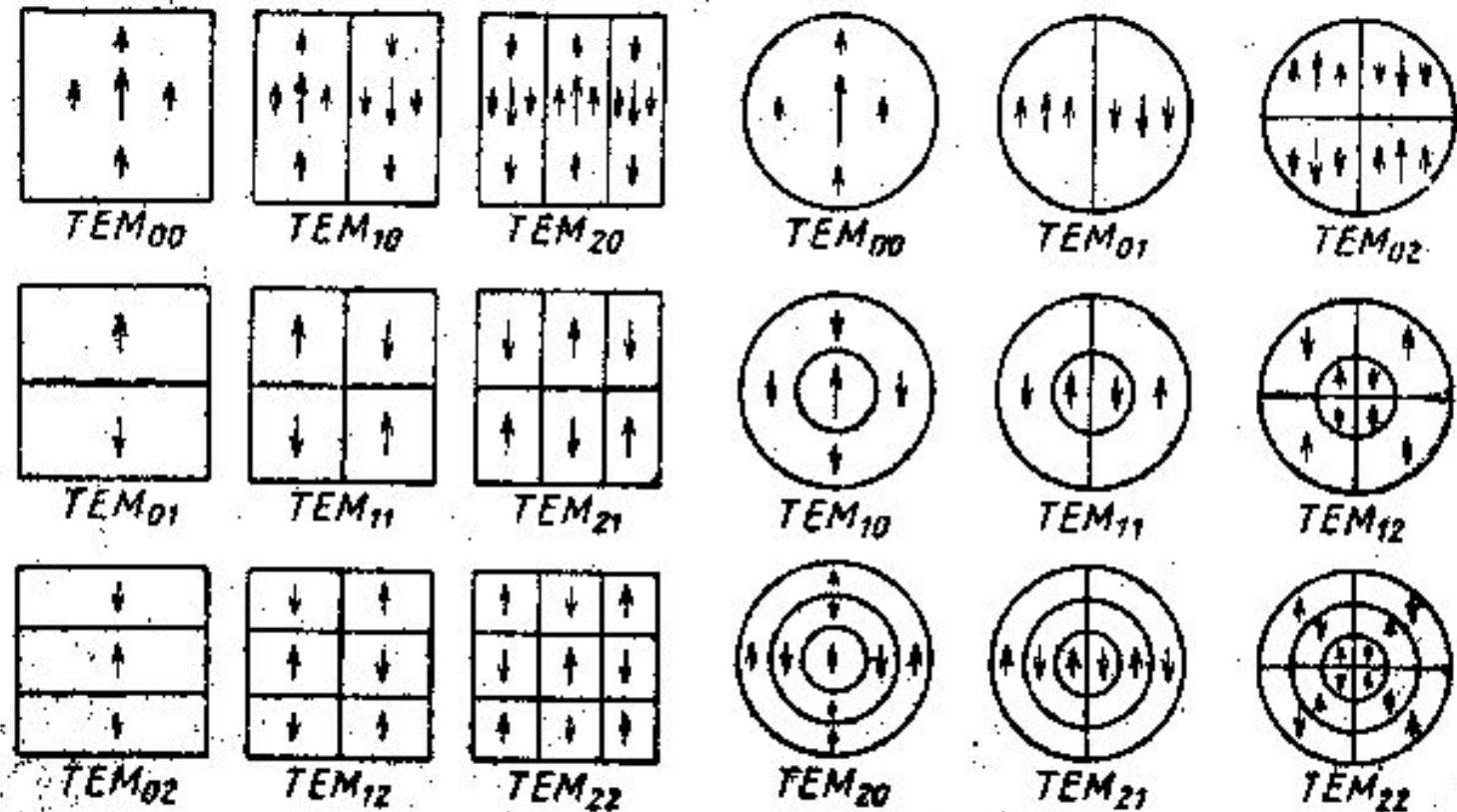


Зависимость потерь мощности за один проход волны от числа Френеля N для круглых плоских зеркал



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, λ – 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 TEM₀₀ моды

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

Для конфокального резонатора

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

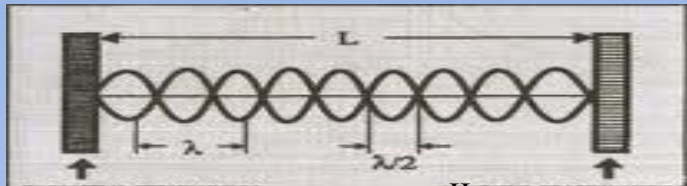
b – расстояние между зеркалами

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

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

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

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

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

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

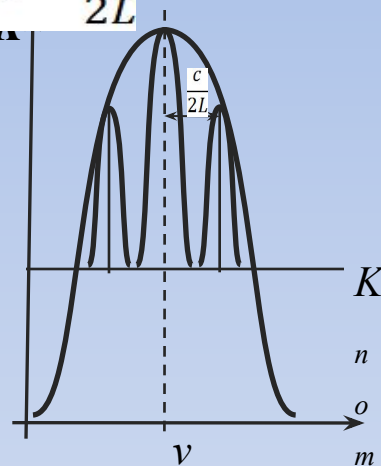
$$\Delta\nu_{\text{рез}} - \text{ширина линии в резонаторе} = \frac{c}{2L} \cdot \frac{K_{\text{пот}}}{\pi} \sim 1 \text{ МГц}$$

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

Джаван получил пассивным методом в 1962 г.:

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

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

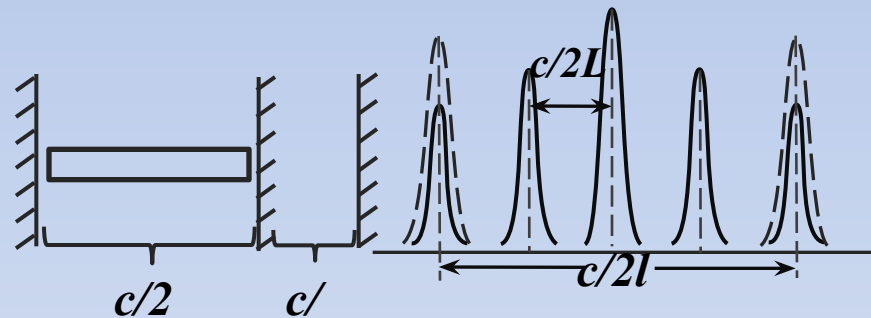


Многочастотный – несколько продольных типов колебаний

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

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

Длина когерентности

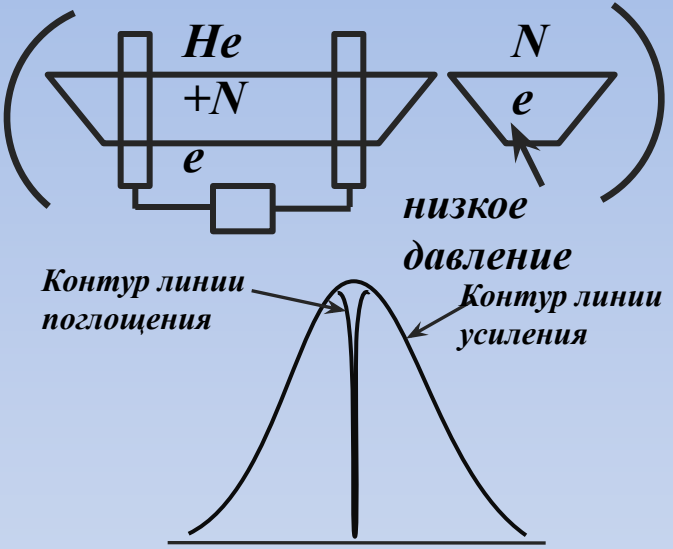
$$L = \Delta\tau \cdot c = 3 \cdot 10^{10} \text{ см/с} \cdot 10^{-2} \text{ с} = 3 \cdot 10^8 \text{ см}$$

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:

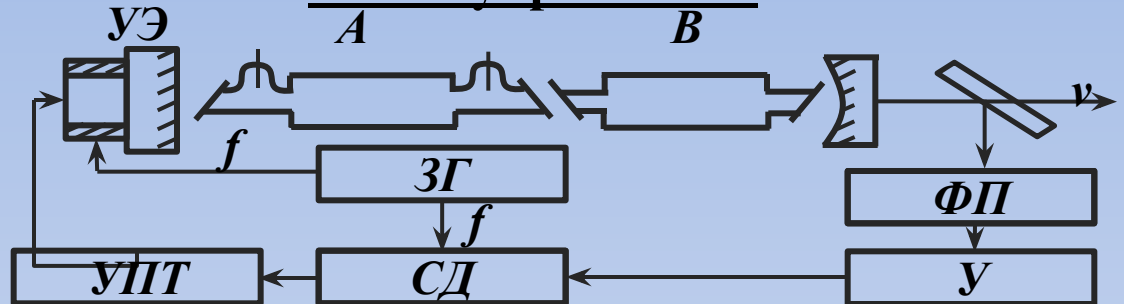
$$\Rightarrow Ne \rightleftharpoons (w_0 + kv) + (w_0 - kv) = 2w_0$$

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

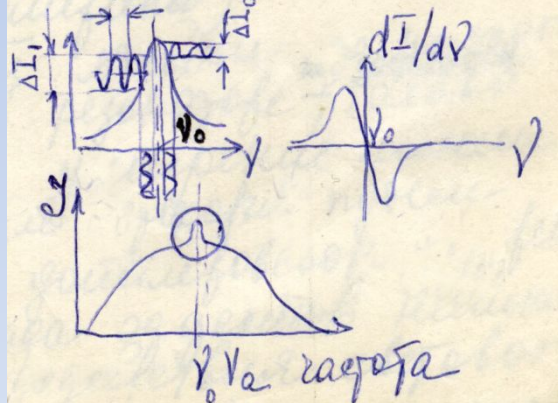
В He-Ne лазере для $\lambda 6328 \text{ \AA}$ для стабилизации частоты используют линии поглощения электронно-колебательного спектра $^{127}I_2$ и $^{129}I_2$

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 :

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