

ОПТИЧЕСКИЕ РЕЗОНАТОРЫ

Часть 1

План лекции

1. Открытые оптические резонаторы

- **Добротность резонатора.**
- **Потери на зеркалах.**
- **Дифракционные потери. Число Френеля.**
- **Потери при разъюстировке.**
- **Виды оптических резонаторов.**
- **Устойчивость резонатора.**

Открытые оптические резонаторы

Назначение резонатора в лазере состоит в создании положительной оптической обратной связи, т. е. условий для превращения оптического квантового усилителя в оптический квантовый генератор.

Открытым оптическим резонатором называют систему из двух обращенных друг к другу отражающих поверхностей, между которыми располагается активное (рабочее) вещество лазера.

Отражающие поверхности могут представлять собой зеркала различной формы (плоские, сферические, параболические), грани призм полного внутреннего отражения или границы раздела сред с различными показателями прелом-

ления. Расстояние между отражающими поверхностями определяется в основном усилительными свойствами используемой в качестве рабочего вещества среды и может колебаться от долей миллиметра у полупроводниковых лазеров до нескольких метров, например, у газовых лазеров.



Использование в оптическом диапазоне спектра *объемного резонатора* обычных размеров $L \gg \lambda$ оказывается неприемлемым, так как резонатор практически теряет свои селективные свойства: число собственных типов колебаний в замкнутой резонаторной полости объема V приходящихся на частотный интервал $\Delta\omega$

$$N = \frac{\omega^2 V}{\pi^2 c^3} \Delta\omega.$$

при переходе от $\lambda = 1$ см к $\lambda = 1$ мкм увеличивается в 10^8 раз.

Объемный резонатор с размерами порядка рабочей длины волны (как в радиодиапазоне) в оптической области должен иметь микронные размеры. Такой резонатор заключает в себе активную среду очень малого объема с низким коэффициентом усиления, и добротность резонатора должна быть очень высокой (например, как у полупроводниковых лазеров с вертикальным резонатором на основе многослойных диэлектрических зеркал).

Самым простым видом открытого резонатора является система из двух плоских зеркал, обращенных друг к другу отражающими поверхностями (*резонатор Фабри – Перо*). Для вывода излучения из резонатора отражающие поверхности делаются либо частично отражающими, либо одна полностью, а вторая частично отражающей.

Обычно отражающие поверхности зеркал создаются с помощью покрытий, состоящих из нескольких слоев диэлектрических материалов, число которых может быть более десяти. С помощью многослойных диэлектрических покрытий удастся получить коэффициент отражения более 99 % на рабочей длине волны. Однако у полупроводниковых лазеров коэффициент отражения зеркал резонатора значительно меньше (для GaAs при выходе излучения в воздушную среду он составляет ~ 32 %) и обеспечивается френелевским отражением границы раздела полупроводник – воздух.

Добротность резонатора

Колебательные системы обычно характеризуются добротностью Q . Добротность резонатора можно определить несколькими способами, которые эквивалентны при больших значениях добротности

$$Q = \frac{\omega_m}{\Delta\omega_m}, \quad Q = \frac{2\pi W}{TP_{\text{loss}}} = \omega_m \frac{W}{P_{\text{loss}}} = -\omega_m \frac{W}{dW/dt}.$$

Здесь ω_m – частота моды; $\Delta\omega_m$ – ее спектральная ширина; W – энергия, запасенная в резонаторе; T – период световых колебаний; P_{loss} – энергия, теряемая в секунду (мощность потерь); t – время.

Время жизни фотонов в резонаторе. Запишем закон Бугера в дифференциальной форме:

$$dW = -\alpha W dz = -\alpha W c dt = -\frac{\omega}{Q} W dt.$$

Здесь учтено, что $dz = c dt$, где c – скорость света. Решение уравнения имеет вид

$$W = W_0 \exp(-t/\tau_{\text{ph}})$$

где τ_{ph} – *время жизни фотонов* в резонаторе:

$$\frac{1}{\tau_{\text{ph}}} = c\alpha, \quad Q = \omega\tau_{\text{ph}}$$

Потери в открытом оптическом резонаторе

Принципиально неустранимые

- потери на выход излучения через зеркала,
- геометрические потери
- и дифракционные потери,

Обусловленные несовершенством системы

- потери на поглощение и рассеяние в материале зеркал,
- потери из-за разъюстировки.
- рассеяние на неоднородностях активной среды.
- нерезонансное поглощение.

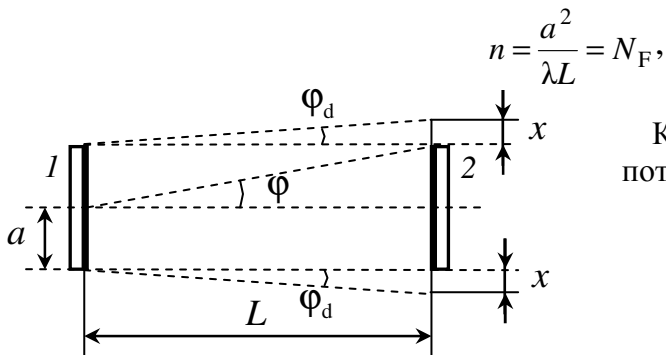
Потери на зеркалах. Поскольку часть генерируемого в среде излучения необходимо вывести из резонатора, применяемые зеркала (по крайней мере одно из них) делаются полупрозрачными. Если коэффициенты отражения зеркал по интенсивности равны R_1 и R_2 , то коэффициент полезных потерь на выход излучения из резонатора в расчете на единицу длины будет задаваться формулой

$$\alpha_e = \frac{1}{2L} \ln \left(\frac{1}{R_1 R_2} \right).$$

Потери, описываемые коэффициентом α_e , называются также *внешними* или *полезными* потерями.

Геометрические потери. Если луч распространяется внутри резонатора не строго нормально поверхностям зеркал, то после определенного числа отражений он достигнет краев зеркал и покинет резонатор.

Дифракционные потери. Рассмотрим резонатор, образованный двумя плоскопараллельными круглыми зеркалами радиусом a . Пусть на зеркало 2 падает параллельный пучок излучения с длиной волны λ . Пучок отражается от зеркала и одновременно дифрагирует в угол порядка $\varphi_d \approx \lambda/a$. Числом Френеля для данного резонатора называется число проходов между зеркалами, когда итоговая расходимость пучка достигнет угла выхода излучения за края зеркал $\varphi = a/L$:



К расчету дифракционных потерь в открытом оптическом резонаторе:

1, 2 – зеркала резонатора

Коэффициент дифракционных потерь на единицу длины α_d .

Если падающую на зеркала волну считать плоской и однородной, то доля мощности, теряемая при однократной дифракции на зеркале, будет равна отношению площади кольца шириной x к площади зеркала. Поскольку $x = (\lambda/a)L$, будем иметь

$$\frac{P_0 - P}{P_0} = \frac{2\pi a x}{\pi a^2} = \frac{2x}{a} = \frac{2\lambda L}{a^2} = \frac{2}{N_F}.$$

С другой стороны, по закону Бугера, при распределенных потерях

$$P = P_0 \exp(-\alpha_d L).$$

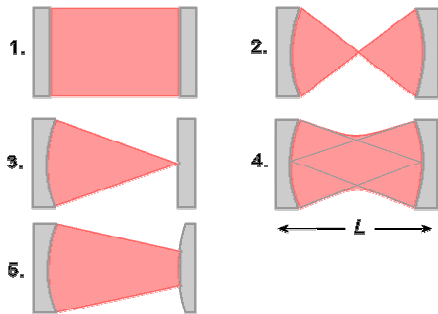
Получаем

$$\alpha_d = \frac{1}{L} \ln \left(\frac{N_F}{N_F - 2} \right) = \frac{1}{L} \ln \left(\frac{a^2 - \lambda L}{a^2 - 2\lambda L} \right).$$

Рассеяние на неоднородностях активной среды. Если резонатор заполнен активной средой, то возникают дополнительные источники потерь. При прохождении излучения через активную среду часть излучения рассеивается на неоднородностях и посторонних включениях, а также ослабляется в результате нерезонансного поглощения.

Под ***нерезонансным поглощением*** понимают поглощение, связанное с оптическими переходами между уровнями, не являющимися рабочими для данной среды. Сюда же могут быть отнесены потери, связанные с частичным рассеянием и поглощением энергии в зеркалах.

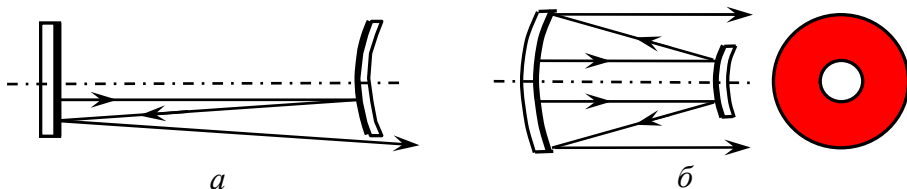
Виды оптических резонаторов:



1. плоско-параллельный;
 $r_1, r_2 \rightarrow \infty$
2. концентрический
(сферический)
 $r_1 = r_2 = r = L/2;$
3. полусферический;
4. конфокальный
 $r_1 = r_2 = r = L;$
5. выпукло-вогнутый

Устойчивость резонатора

Резонатор называется *неустойчивым*, если произвольный световой луч, последовательно отражаясь от двух зеркал, удаляется на неограниченно большое расстояние от оси резонатора. Резонатор, в котором луч после многократных отражений остается в пределах ограниченной области, называется *устойчивым*.



Схемы неустойчивых резонаторов

С учетом волновых свойств, мода будет устойчива, если фаза волны на поверхности зеркал одинакова, что достигается, если радиус кривизны фазовых фронтов на поверхности зеркал совпадает с радиусом кривизны самих зеркал.

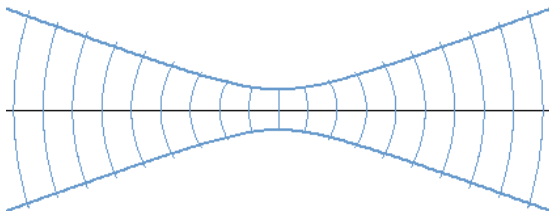


Рис. Фазовые фронты электромагнитного поля основной моды в лазерном резонаторе в приближении гауссова пучка

Гауссов пучек

$$E(r, z) = E_0 \frac{w_0}{w_0(z)} \exp\left(-\frac{r^2}{w_0^2(z)}\right) \exp\left(i \left[kz - \arctan \frac{z}{z_R} + \frac{kr^2}{2R(z)} \right]\right)$$

$$w_0(z) = w_0 \sqrt{1 + \frac{z^2}{z_R^2}} \text{ – радиус луча}$$

$$z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda} \text{ – рэлеевская длина}$$

$$R(z) = z \left(1 + \frac{z_R^2}{z^2}\right) \text{ – радиус кривизны волнового фронта}$$

В устойчивый резонатор можно вписать гауссов пучек, у которого радиусы кривизны фазовых фронтов на поверхности зеркал совпадают с радиусом кривизны самих зеркал.

Для нахождения положений зеркал z_1 и z_2 при заданных радиусах зеркал r_1 и r_2 необходимо решить систему уравнений

$$-r_1 = z_1 \left(1 + \frac{z_R^2}{z_1^2} \right), \quad r_2 = z_2 \left(1 + \frac{z_R^2}{z_2^2} \right), \quad z_2 - z_1 = L$$

где рэлеевская длина z_R также считается неизвестной.

Решение имеет вид:

$$z_R^2 = \frac{L(r_1 - L)(r_2 - L)(r_1 + r_2 - L)}{(r_1 + r_2 - 2L)^2}, \quad z_1 = -\frac{L(r_2 - L)}{(r_1 + r_2 - 2L)}, \quad z_2 = \frac{L(r_1 - L)}{(r_1 + r_2 - 2L)}$$

Для физической реализуемости резонатора величина z_R^2 должна быть положительна. Обозначая $g_1 = 1 - L/r_1$, $g_2 = 1 - L/r_2$ получаем:

$$z_R^2 = L^2 \frac{g_1 g_2 (1 - g_1 g_2)}{(g_1 + g_2 - 2g_1 g_2)^2} > 0.$$

Резонатор будет устойчивым если его параметры удовлетворяют следующим условиям:

$$0 < g_1 g_2 < 1, \quad g_1 = 1 - L/r_1, \quad g_2 = 1 - L/r_2.$$

Здесь r_1 и r_2 – радиусы кривизны, которые полагаются положительными для вогнутых и отрицательными для выпуклых зеркал, L – расстояние между зеркалами.

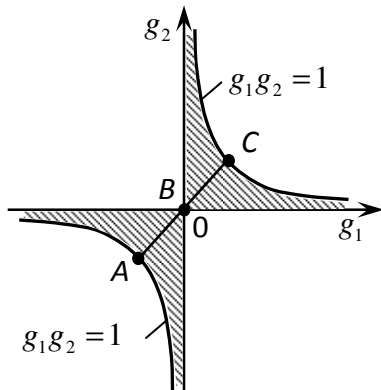


Диаграмма устойчивости резонатора

Прямая AC , образующая с осями координат угол $\pi/4$, соответствует *симметричным* резонаторам ($r_1 = r_2$). Точки A , B и C на границах устойчивости принадлежат *концентрическому* ($r_1 = r_2 = r = L/2$), *конфокальному* ($r_1 = r_2 = r = L$) и *плоскому* ($r_1, r_2 \rightarrow \infty$, L – произвольная) резонаторам соответственно.

Точка в начале системы координат соответствует *конфокальному* резонатору. Из диаграммы видно, что даже небольшие отклонения от *конфокальности* делают резонатор *неустойчивым*, что может привести к резкому увеличению потерь. В связи с этим на практике целесообразно делать резонатор слегка *неконфокальным*.

Достоинства устойчивых резонаторов:

- Малые геометрические потери (малый порог генерации).
- Хорошее качество луча (максимальная интенсивность в центре, малая расходимость излучения).

Недостатки устойчивых резонаторов

- поле концентрируется вблизи оси и не охватывает весь объем активного вещества.
- невозможность использования целиком отражательной оптики.

В лазерах с высоким коэффициентом усиления активной среды и в тех случаях, когда необходимо получить световые пучки высокой мощности или энергии находят практическое применение неустойчивые оптические резонаторы.

Достоинства неустойчивых резонаторов:

- поле не стремится сосредоточиться вблизи оси и, как следствие, в режиме одной поперечной моды можно получить большой модовый объем;
- обеспечивают возможность хорошей селекции поперечных мод;
- возможно использование целиком отражательной оптики (используется в мощных лазерах и ИК-области излучения).

Недостатки неустойчивых резонаторов

- поперечное сечение пучка имеет форму кольца (в центре пучка темное пятно,
- распределение интенсивности в пучке неоднородно и имеет вид нескольких дифракционных колец;
- по сравнению с устойчивым, неустойчивый резонатор более чувствителен к разъюстировке зеркал.