

Оптоэлектронные и квантовые приборы и устройства

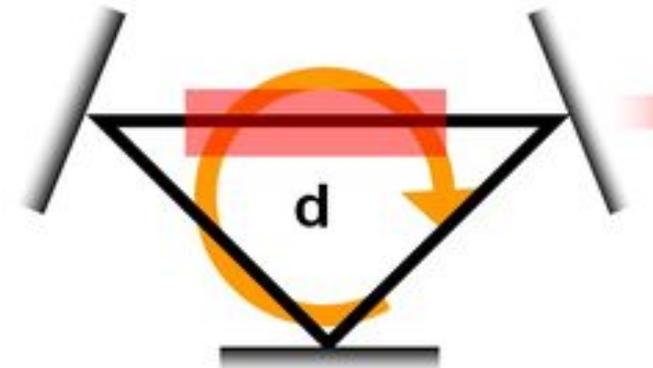
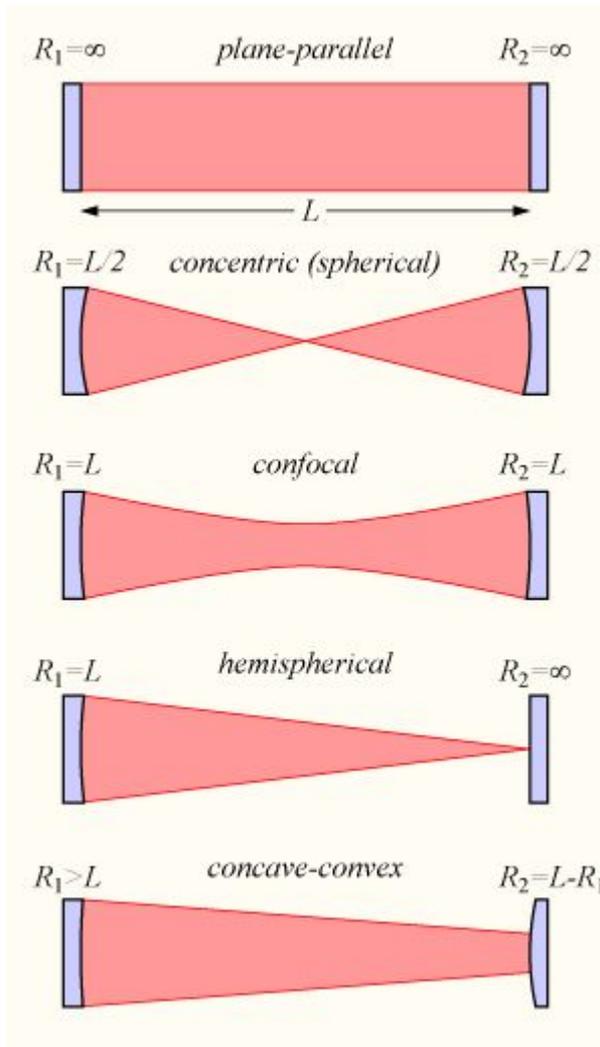
Лекция 7:

Добротность открытых оптических резонаторов

В.М. Шандаров

Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники

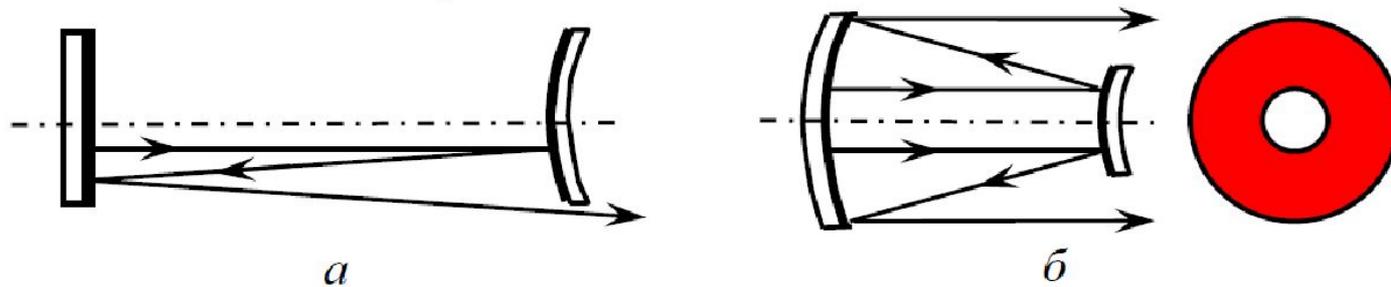
Типы открытых резонаторов



Устойчивость резонатора

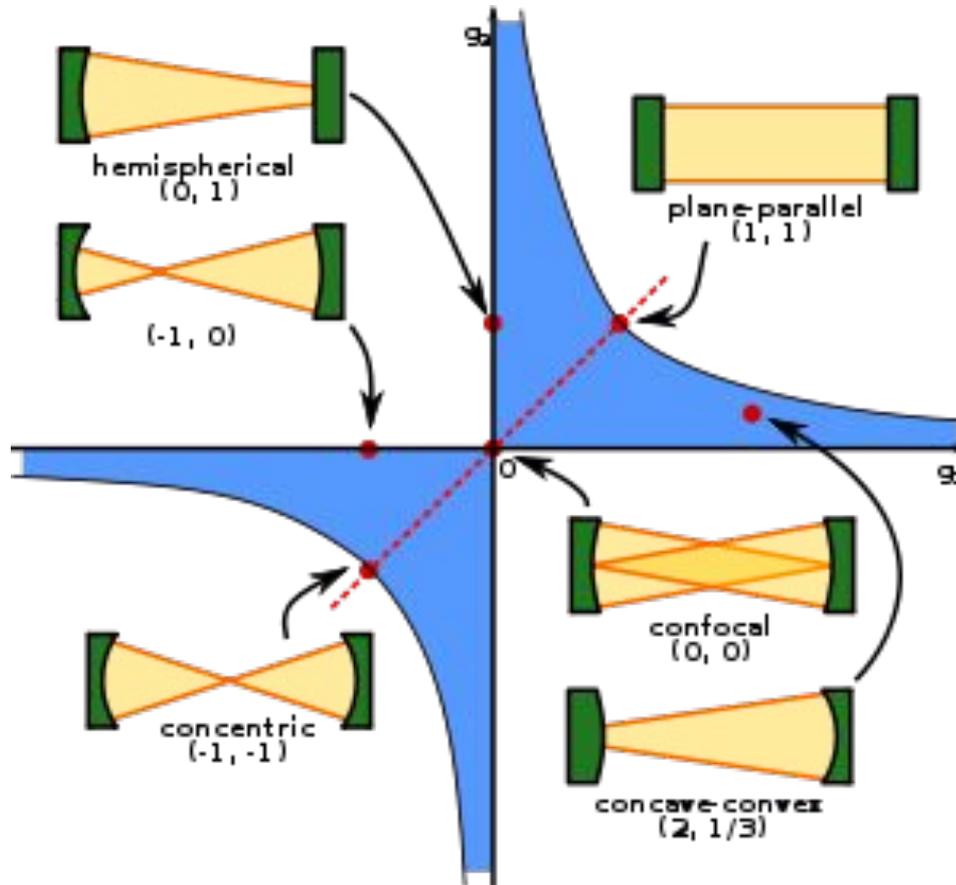
Устойчивость резонатора

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

Типы открытых резонаторов



$$0 < g_1 g_2 < 1$$

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

Добротность типов колебаний открытого резонатора

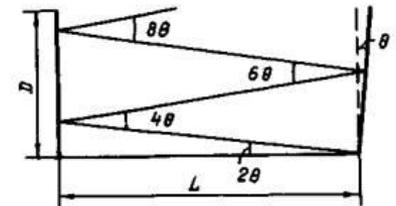
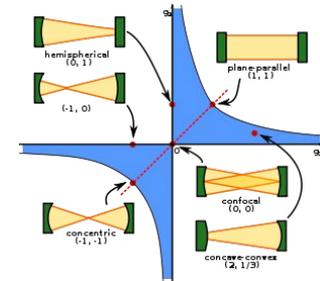
Добротность резонаторов для данного типа колебаний определяется в общем виде как отношение запасенной в нем энергии к энергии потерь за период, умноженное на 2π :

$$Q = 2\pi \frac{\text{запасенная энергия}}{\text{энергия потерь за период}}$$

Добротность типов колебаний открытого резонатора

В открытых резонаторах запасенная энергия убывает за счет:

- потерь на излучение, определяемых конечным значением коэффициента прозрачности зеркал;
- точности юстировки, т.е. установки параллельности зеркал в резонаторе с плоскопараллельными зеркалами или расстояния между зеркалами и совмещения оптических осей зеркал - в резонаторах со сферическими зеркалами;
- дифракционных потерь, т.е. потерь обусловленных конечным значением размеров зеркал.

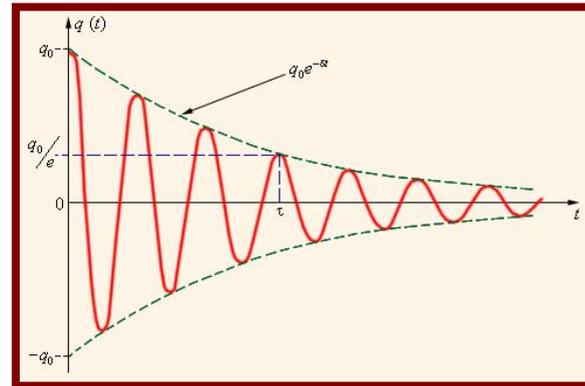


Добротность типов колебаний открытого резонатора

Рассмотрим влияние на добротность резонатора потерь, обусловленных отличием от единицы коэффициента отражения зеркал.

Пусть Q – добротность типа колебаний резонатора; U_{TK} – энергия, запасенная в типе колебаний; а ω – его собственная частота.

$$U_{\text{TK}} = U_{\text{TK}}^0 \cdot \exp\left(-\frac{\omega}{Q}t\right)$$



где U_{TK}^0 – начальная энергия, запасенная в типе колебаний

Добротность типов колебаний открытого резонатора

Величина изменения энергии типа колебаний за время dt :

$$dU_{TK} = -\frac{\omega}{Q} U_{TK}^0 \exp\left(-\frac{\omega}{Q} t\right) dt = -\frac{\omega}{Q} U_{TK} dt$$

Найдем добротность типа колебаний за счет выхода энергии через зеркала с коэффициентом отражения $r_{отр}$ (коэффициент пропускания – $1 - r_{отр}$). Поглощением в зеркалах пренебрегаем. Уменьшение энергии типа колебаний при однократном отражении для волны с энергией $U_{TK}/2$:

$$\Delta U_{TK} = -\frac{U_{TK}}{2} (1 - r_{отр})$$

Добротность типов колебаний открытого резонатора

Эта энергия теряется за время прохода волны через резонатор, период времени

$$\Delta t = \frac{L}{c}$$

и в среднем за единицу времени волна теряет энергию:

$$\Delta U_{\text{отр}} = -\frac{U_{\text{отр}}(1-r_{\text{отр}})}{2\Delta t} = -\frac{U_{\text{отр}}(1-r_{\text{отр}}) \cdot c}{2L}$$

Мода (тип колебаний) образуется двумя волнами, бегущими навстречу, поэтому энергия, теряемая типом колебаний в единицу времени, в два раза больше:

$$\Delta U_{\text{МК}} = -\frac{U_{\text{МК}}(1-r_{\text{отр}})}{L} \cdot c$$

Добротность типов колебаний открытого резонатора

А энергия, теряемая типом колебания за время dt :

$$dU_{TK} = -\frac{U_{TK} (1 - r_{отр})}{L} \cdot c \cdot dt$$

Сравним это соотношение с полученным из общего определения добротности:

$$dU_{\omega} = -\frac{\omega}{Q} \cdot U_{\omega} \cdot dt = -\frac{U_{\omega} (1 - r_{\omega})}{L} \cdot c \cdot dt$$

Добротность типов колебаний открытого резонатора

Отсюда получим:

$$Q = \frac{\omega L}{(1 - r_{\text{отр}})c} = \frac{2\pi \cdot L}{\lambda(1 - r_{\text{отр}})}$$

Пример:

$L=30$ см: $\lambda=0,6$ мкм: $r_{\text{отр}}=0,9$

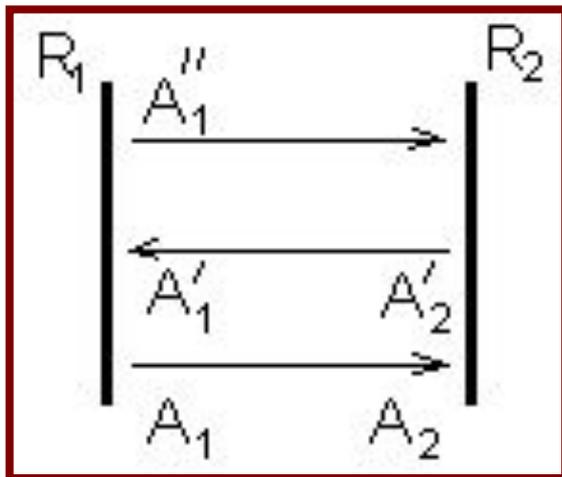
Подставляя эти параметры в выражение для Q , получим:

$$Q = \frac{2\pi \cdot 30}{0,6 \cdot 10^{-4} \cdot 0,1} \approx 3 \cdot 10^7$$

Это существенно выше, чем добротность объемных резонаторов в радиодиапазоне.

Условия самовозбуждения лазера

Условия самовозбуждения лазера, как и любого другого генератора, включают в себя условия баланса фаз и баланса амплитуд (мощностей).



Резонатор заполнен активной средой.

Пусть R_1 и R_2 – комплексные коэффициенты отражения зеркал, а L – его длина.

У зеркала **1** возникает спонтанное излучение, в виде плоской волны A_1 оно распространяется в направлении к зеркалу **2**.

Условия самовозбуждения лазера

У зеркала 2 это поле будет иметь вид:

$$A_2 = A_1 \cdot \exp(\kappa_a \cdot L) \cdot \exp(-\alpha \cdot L) \cdot \exp(-ikL)$$

κ_a - коэффициент усиления; α - коэффициент потерь в активной среде, обусловленных рассеянием света на неоднородностях; k - волновое число

поле отраженной волны A'_2 принимает вид:

$$A'_2 = A_1 \cdot R_2 \cdot (1 - \xi) \exp(\kappa_a \cdot L) \cdot \exp(-\alpha \cdot L) \cdot \exp(-ikL)$$

где ξ - коэффициент, учитывающий дифракционные потери при отражении от зеркала

Условия самовозбуждения лазера

При обратном проходе к зеркалу 1 световое поле снова усиливается и после отражения от него имеет вид:

$$A_1'' = A_1 \cdot R_1 \cdot R_2 (1 - \xi)^2 \exp(2\kappa_a \cdot L) \cdot \exp(-2\alpha \cdot L) \cdot \exp(-2ikL)$$

Для получения стационарных колебаний (или стоячей волны в резонаторе) должно выполняться условие:

$$A_1'' = A_1$$

отсюда получаем:

$$R_1 \cdot R_2 (1 - \xi)^2 \exp(2\kappa_a \cdot L) \cdot \exp(-2\alpha \cdot L) \cdot \exp(-2ikL) = 1$$

Условия самовозбуждения лазера

$$R = |R| \cdot e^{i \cdot \Delta\varphi}$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

$$|R_1| \cdot |R_2| (1 - \xi)^2 \exp(2(\kappa_a - \alpha) \cdot L) \cdot \exp\left(-i\left(\Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2 + 2\frac{2\pi}{\lambda}L\right)\right) = 1$$

Отсюда получим уравнение баланса амплитуд:

$$|R_1| \cdot |R_2| (1 - \xi)^2 \exp(2(\kappa_a - \alpha) \cdot L) = 1$$

и баланса фаз:

$$\Delta\varphi + \Delta\varphi + 2\frac{2\pi}{\lambda}L = 2\pi \cdot m$$

Условия самовозбуждения лазера

Уравнение баланса фаз означает наличие конструктивной интерференции, т.е. положительной обратной связи в резонаторе.

Оно определяет частоту лазерного излучения и выполняется на любой резонансной частоте открытого резонатора.

Следовательно, на каждой из этих частот может быть достигнута генерация, **если выполняется условие баланса амплитуд**.

Условия самовозбуждения лазера

Колебания в резонаторе не будут затухать, если усиление в активной среде компенсирует все потери в резонаторе.
Логарифмируя выражение для баланса амплитуд, получим:

$$|R_1| \cdot |R_2| (1 - \xi)^2 \exp(2(\kappa_a - \alpha) \cdot L) = 1$$

$$\ln(R_1 \cdot R_2 \cdot (1 - \xi)^2) + 2(\kappa_a - \alpha)L = 0$$

$$2\kappa_a \cdot L = 2\alpha L - \ln(R_1 \cdot R_2 \cdot (1 - \xi)^2)$$

$$\kappa_a = \alpha - \frac{1}{2L} \ln(R_1 \cdot R_2 \cdot (1 - \xi)^2)$$

Условия самовозбуждения лазера

$$\kappa_a = \alpha + \frac{1}{L} \ln \sqrt{\frac{1}{R_1 \cdot R_2 \cdot (1 - \xi)^2}}$$

Первое слагаемое справа характеризует потери в активной среде, а второе – потери в зеркалах

Величина слева представляет собой пороговый коэффициент усиления. Генерация возможна, когда

$$\kappa_a > \alpha$$

**Спасибо за
внимание!**