

ЛЗ-4. Оптические резонаторы и формирование лазерного излучения (ЛИ). Типы и устойчивость оптического резонатора. Моды резонатора. Селекция мод. Внешние элементы оптического резонатора (линзы, зеркала и пр.).

Основные свойства ЛИ. Энергетические характеристики. Когерентность. Модовая структура и спектр генерации. Пространственная индикатриса ЛИ. Поляризация. Пространственно-временная структура ЛИ. Режимы работы лазера.

Собственные частоты и типы колебаний оптических резонаторов. В оптическом диапазоне волн нецелесообразно иметь резонатор, настроенный на одну единственную частоту, как в радиодиапазоне, поскольку его размеры в этом случае должны иметь порядок длины волны. Размеры оптических резонаторов во много раз больше длины волны генерируемого излучения. В закрытых резонаторах таких размеров могут существовать волны большого числа фиксированных частот. В результате в общем спектре резонансные линии перекрываются и избирательные свойства резонатора практически исчезают.

В открытых резонаторах с отсутствующими боковыми стенками, большая часть собственных колебаний затухает, что приводит к сильному разрежению спектра собственных частот резонатора.

Оптический резонатор представляет собой открытый резонатор, образованный двумя зеркалами. Допустим, что расстояние между зеркалами равно L , а между зеркалами нормально к ним распространяется плоская электромагнитная волна (рис. 6, а).

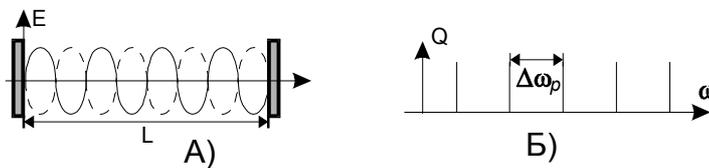


Рис. 6

В результате отражения от зеркал резонатора в пространстве между ними создадутся стоячие волны. В резонаторе могут существовать волны только тех частот, для которых длина резонатора кратна длине стоячей волны:

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

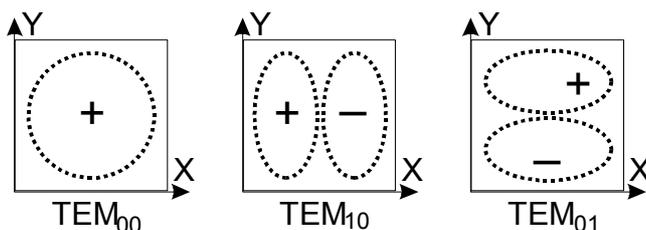
где q - целое число, называемое продольным индексом колебания.

Частота электромагнитной волны, длина которой приведенному выше соотношению, называется собственной частотой оптического резонатора. Собственные частоты оптического резонатора создадут эквидистантный спектр (рис. 6. Б) с частотным сдвигом $\Delta\omega_p = \frac{\pi c}{L}$.

Собственные типы колебаний резонатора с разными индексами q имеют разное распределение поля вдоль оси резонатора (в продольном направлении Z). Собственные типы колебаний могут также отличаться распределением поля в плоскости, перпендикулярной к оси резонатора (в поперечных направлениях x и y). Эти типы колебаний обозначают индексами m и n , под которыми понимают число изменений знака поля вдоль осей x и y . Собственные типы колебаний оптических резонаторов вообще будем обозначать символом TEM_{qmn} .

Типы колебаний, отличающихся индексом q , называют продольными модами резонатора, а типы колебаний, которые отличаются индексами m и n , - поперечными модами.

Значения индексов m и n обычно бывают небольшими (от 0 до 5), а индекс q может изменяться в очень широких пределах (от 10^3 до 10^7). Поэтому индекс q в обозначениях собственных типов колебаний обычно опускают. На рис. 7 показана структура поля низших поперечных мод для плоских прямоугольных зеркал резонатора.

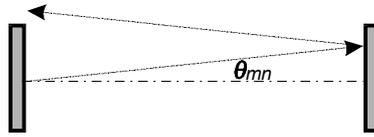


Для моды TEM_{00} характерно отсутствие изменений знака в плоскости, перпендикулярной к оси резонатора. Этот тип колебаний соответствует волне, которая распространяется вдоль оси резонатора.

Для этой волны открытый резонатор имеет малый уровень потерь за счет выхода излучения через

открытые боковые стенки. Волна TEM_{00} долго существует в резонаторе, она также сильнее других усиливается в активной среде. Мощность излучения лазера для этой моды больше, чем для других поперечных мод. Поэтому колебания типа TEM_{00} называются основной модой резонатора, а соответствующая ей волна, прошедшая через полупрозрачное зеркало резонатора, - основной модой излучения лазера.

Колебания с индексами $m \neq 0$ и $n \neq 0$ соответствуют волнам, которые распространяются под некоторыми углами к оси резонатора. При больших индексах m или n угол θ_{mn} оказывается настолько большим, что



волна быстро покидает резонатор через его открытые боковые стенки (рис. 8).

Рис. 8.

Зеркала резонатора могут быть как плоскими, так и выпуклыми или вогнутыми. В зависимости от соотношения радиусов кривизны зеркал и расстояния между ними резонатор может быть устойчивым (небольшое отклонение луча от оси не приводит после многих переотражений к неограниченному его удалению от оси) и неустойчивым (в противном случае).

Если расстояние между зеркалами равно L , а их фокальные расстояния - F_1 и F_2 , можно ввести обозначения $g_1 = 1 - L/2F_1$ и $g_2 = 1 - L/2F_2$ для факторов, определяющих устойчивость резонатора. Можно доказать, что при условии

$$0 \leq (1 - L/2F_1) (1 - L/2F_2) \leq 1$$

или $0 \leq g_1 g_2 \leq 1$ резонатор будет устойчивым, а в противоположном случае - нет. Наглядно это может быть изображено в координатах g_1, g_2 (Рис. 8а), где гиперболы $g_1 g_2 = 1$ и оси координат ограничивают

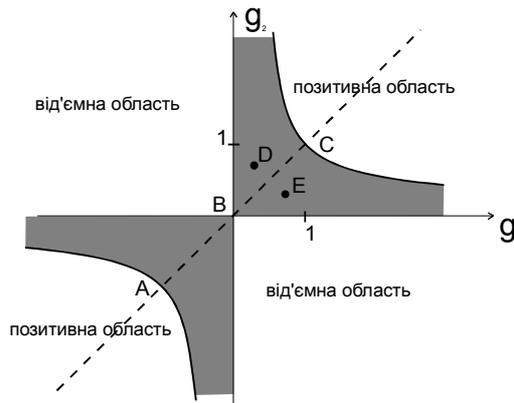


Рис. 8а.

область устойчивости, заштрихованную для наглядности.

Симметричным резонаторам (с зеркалами одинакового радиуса кривизны) соответствует прямая ABC. Точке A ($g_1 = -1, g_2 = -1$) - так называемый концентрический резонатор, у которого центры кривизны зеркал совпадают: $L = 4F = 2R$. Точка B описывает резонатор, в котором фокусы зеркал лежат точно посередине между ними: $L = 2F$, такой резонатор называется конфокальным. Точке C соответствует плоский резонатор ($g_1 = 1, g_2 = 1, F = \infty$). Все эти резонаторы лежат на границе, разделяющей области устойчивости и неустойчивости. В связи с этим в тех случаях, когда желательно сохранить симметрию резонатора, применяют квазиконфокальный резонатор, расстояние между зеркалами которого мало отличается от конфокального:

$$L/2F = 1 \pm \alpha, \quad \alpha \ll 1$$

Даже небольшие значения α , существенно не влияющие на распределение поля в резонаторе по сравнению с конфокальным случаем, делают резонатор устойчивым.

Но наиболее распространенным есть так называемый полуконфокальный резонатор, у которого одно из зеркал плоское ($F_1 = \infty$), и на нем же располагается фокус другого, вогнутого ($F_2 = L$). Этот резонатор устойчивый, значение $g_1 g_2 = 1/2$, на диаграмме устойчивости это соответствует точкам D или E. Плоское зеркало делит конфокальный резонатор напополам, заменяя реальное поле за собой отражением в себе

поля в оставшейся части. Вот почему в полуконфокальном резонаторе создается половина распределения поля, характерного для конфокального. Широкое применение полуконфокального резонатора объясняется удобством конструирования выходных зеркал лазеров в виде плоских, а не сферических частично прозрачных зеркал.

Неустойчивые резонаторы подразделяются на два класса – отрицательной и положительной области соответственно знаку g_1g_2 . На диаграмме устойчивости положительная область расположена в первом и третьем квадрантах снаружи гиперболы $g_1g_2 = 1$, а отрицательная – во втором и четвертом квадрантах.

В устойчивых резонаторах, где формирование моды в результате многократных отражений волны от зеркал рассматривается соответственно законам дифракции, моды низшего порядка имеют незначительные потери. Гауссово поперечное распределение ограничивает размер пятна моды, так что за край зеркала дифрагирует очень малая доля энергии. Наличие гауссового распределения определяется фокусирующим действием зеркал в конфигурации устойчивого сферического резонатора. В неустойчивом резонаторе такая фокусировка отсутствует и свет не концентрируется вблизи оси резонатора. Это позволяет достаточно глубоко анализировать неустойчивые резонаторы методами геометрической оптики. Большим преимуществом неустойчивых резонаторов является возможность управления величиной энергии, выводимой из него и достижением оптимальной связи резонатора с пространством, недостатком – относительно большие потери для мод низших порядков и, как следствие, потребность в средах с большим коэффициентом усиления.

Простейший резонатор лазера представляет собою два почти плоских зеркала, установленных параллельно одно другому, между которыми размещают активную среду. Резонатор с почти плоскими зеркалами лежит близко к границе областей устойчивости и неустойчивости. Это означает, что потери энергии в резонаторе очень чувствительны к его разъюстировке. Непараллельность зеркал порядка нескольких минут или секунд для разных лазеров может привести к срыву генерации.

Формирование спектра излучения лазера. Спектр генерации лазера определяется наложением спектральной линии усиления активной среды и спектра собственных частот резонатора. Спектральная линия усиления $\beta(\omega)$ описывает зависимость показателя усиления активной среды от частоты или длины волны излучения. В реальных активных средах спектральная линия имеет близкую к гауссовой форму (рис. 9, а).

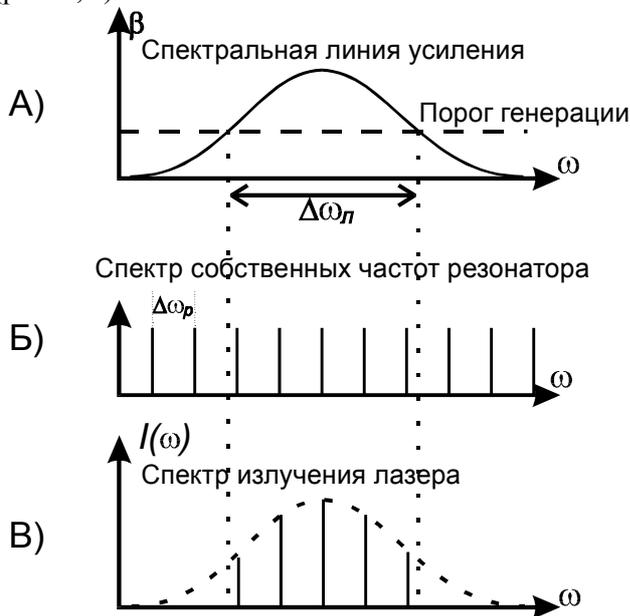


Рис.9



Рис.10

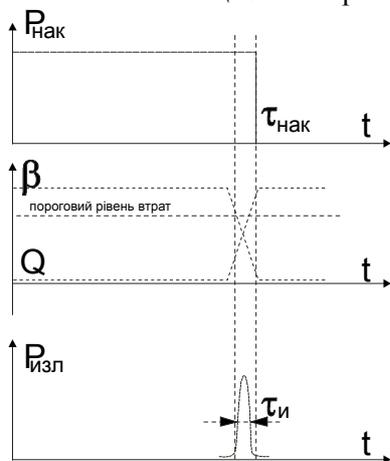
В пределах ширины спектральной линии обычно может разместиться большое число собственных частот резонатора (рис. 9, б), однако лазер генерирует только те частоты, для которых показатель усиления активной среды превышает показатель потерь (рис. 9, в). Ширина спектра излучения лазера определяется шириной спектральной линии $\Delta\omega_L$ на уровне потерь, а число генерируемых частот - отношением ширины спектральной линии к частотному сдвигу между соседними продольными модами:

$$N = \frac{\Delta\omega_l}{\Delta\omega_p}$$

Селекция продольных мод (уменьшение их количества для снижения ширины линии излучения лазера) может проводиться путем внесения дисперсионных элементов в резонатор (призм, дифракционных решеток и т. п.) для внесения дополнительных потерь, а также применением сложного резонатора с некратными длинами составляющих его частей. При некоторых способах модуляции добротности (см. ниже) также возможно сужение спектра генерации.

Режимы генерации лазера. Лазеры могут работать в режимах свободной либо управляемой генерации (рис. 10).

При свободной генерации добротность резонатора Q во время работы лазера не изменяется со временем. При постоянном уровне накачки в зависимости от соотношения показателя усиления активной среды и показателя потерь лазер может работать в режиме стационарной или нестационарной (релаксационной) генерации. В режиме стационарной генерации мощность излучения лазера остается постоянной в течение всего времени накачки, а в релаксационном режиме она флуктуирует. В некоторых лазерах наблюдаются многократные срывы и возникновения генерации за время одного импульса накачки. Релаксационный режим генерации такого типа называется "пичковым". Он характерен для



свободной генерации твердотельных лазеров при некоторых уровнях накачки.

В лазерах свободной генерации энергия накачки практически без задержки во времени превращается в энергию лазерного излучения. Длительность импульса излучения лазера приблизительно равна длительности импульса накачки. Поэтому пиковая мощность излучения лазеров в режиме свободной генерации невелика и не превышает мощности накачки.

Пиковую мощность излучения лазера можно значительно увеличить, при накоплении энергии накачки в активной среде и излучении ее за очень короткий промежуток времени. Для этого необходимо управлять генерацией лазера, принудительно изменяя потери в его резонаторе (модулируя его добротность).

Рис. 11

Наиболее часто применяется режим "гигантских" импульсов, для получения которого добротность резонатора модулируют следующим образом. Перед импульсом накачки закрывают одно из зеркал резонатора специальным оптическим затвором. Добротность резонатора при этом остается очень низкой на протяжении практически всего импульса накачки. В это время генерация лазера невозможна, и поглощение энергии накачки в активной среде приводит к монотонному возрастанию инверсной заселенности рабочих уровней. В конце импульса накачки затвор открывается, добротность резонатора резко возрастает, показатель усиления активной среды оказывается значительно больше показателя потерь (рис. 11). Лазер излучает короткий и мощный ("гигантский") импульс длительностью порядка времени обхода светом резонатора, или 10 - 100 нс.

Затвор может открываться благодаря подаче сигнала извне (электрооптический или акустооптический, в этом случае затвор называется активным), или самим лазерным излучением, что свободно растет в условиях незначительного превышения усиления над потерями (пассивный затвор). Пассивные затворы чаще всего представляют собой насыщающийся поглотитель (кристалл с центрами окраски или раствор специального красителя). В зависимости от времени релаксации поглощающих частиц, применение пассивного затвора может вызывать или сужение линии генерации, или, наоборот, приводить к режиму синхронизации мод. Этот последний достигается, если добротность резонатора модулировать частотой, равной разнице частот продольных мод. При этом импульс генерации разбивается на последовательность сверхкоротких импульсов, отделенных один от другого периодами обхода светом резонатора и имеют длительности, меньшие этого времени в N раз, где N - число продольных мод, попадающих в линию усиления (реально - порядка 1 пс).

Направленность излучения лазера. Из рассмотрения собственных типов колебаний оптического резонатора становится понятным, что наименьшую угловую расходимость лазерное излучение имеет в так называемом одномодовом режиме, когда генерируется только одна основная поперечная мода TEM_{00} . Для получения этого режима генерации необходимо подавить поперечные моды высших порядков. Это достигается введением в резонатор диафрагмы, область прозрачности которой соответствует максимуму в распределении поля основной моды в некотором сечении резонатора. Во многих типах лазеров подавить высшие поперечные моды можно путем расстройки резонатора

(нарушения параллельности его зеркал). Усиление активной среды для высших поперечных мод меньше, чем для основной моды. Поэтому с увеличением потерь в резонаторе при его разъюстировке уменьшается число поперечных мод, для которых выполняется условие самовозбуждения лазера.

Когерентность излучения лазера. Монохроматичность и высокая направленность излучения лазера обеспечивают его временную и пространственную когерентность. Временная когерентность лазерного излучения характеризуется длительностью интервала времени, на протяжении которого флуктуации фазы лазерного излучения в некотором сечении Z не превышают π . Время когерентности лазерного излучения обратно пропорционально ширине спектра излучения лазера

$$\tau_{\text{ког}} = \frac{1}{\Delta\omega_{\text{л}}}$$

Расстояние $l_{\text{ког}} = c\tau_{\text{ког}}$ вдоль направления распространения излучения называется длиной когерентности. несколько упрощая, можно считать длиной когерентности пространственную длину цуга волн, испускаемых без разрывов фазы.

Фаза лазерного излучения флуктуирует не только вдоль направления распространения, но и в плоскости, перпендикулярной к нему. Когерентные свойства излучения в этой плоскости можно охарактеризовать радиусом пространственной когерентности, под которым понимают радиус области в некотором сечении Z , в пределах которой флуктуации разности фаз лазерного излучения не превышают π . Угловая расходимость лазерного излучения определяется поперечными размерами излучающей области активной среды. Поэтому пространственная когерентность лазерного излучения сохраняется по всему поперечному сечению лазерного пучка. Радиус пространственной когерентности излучения в сечении на расстоянии Z от излучателя определяется соотношением $R_{\text{ког}} = \theta Z$, где θ - угловая расходимость излучения лазера.

Для интерференционных и голографических измерений используются лазеры с длиной когерентности от единиц см до десятков метров, на оказание термического воздействия сфокусированного излучения ее величина не влияет. Обычные (нелазерные) источники света характеризуются величиной $l \sim \lambda$, т.е. порядка мкм

Управления параметрами лазерного излучения.

Дефлекторы и модуляторы света: механические, электро - и акустооптические. Для управления пространственно-временными характеристиками излучения, полученного от лазера, служат дефлекторы (для изменения направления распространения) и модуляторы (изменение мощности, фазы, поляризации и др.). Простейшими из этих приборов являются механические - в виде вращающихся или колеблющихся зеркал, призм, или пирамид с отражающими свет покрытиями. Приводятся они в движение при помощи разнообразных электродвигателей и, таким образом, позволяют менять направление распространения света в широких пределах как в одном, так и в двух измерениях. Преимуществами механических систем управления являются простота конструкции и изготовления и, таким образом, дешевизна, а также широкий диапазон изменения углов распространения. Основные недостатки – малое быстродействие и невозможность дискретного переключения, низкая надежность.

Электрооптические устройства управления основаны на явлении зависимости показателя преломления некоторых веществ от напряженности электрического поля (т. наз. электрооптический эффект, могущий быть линейным - Поккельса, или квадратичным - Керра). Разнообразные конструкции электрооптических модуляторов и дефлекторов благодаря вызванному электрическим полем изменению показателя преломления среды изменяют поляризацию проходящего сквозь них света и (например, за счет полного внутреннего отражения) - его интенсивность или направление распространения.

В акустооптических устройствах используется зависимость показателя преломления некоторых сред от давления, вследствие чего звуковая стоячая волна в такой среде представляет собой фазовую дифракционную решетку, теоретическая дифракционная эффективность которой может достигать 100%. Изменяя период этой решетки (за счет изменения частоты звука) и ее амплитуду (за счет изменения мощности звука), можно управлять соответственно направлением распространения и интенсивностью дифрагированной волны.

Основное преимущество электрооптических и акустооптических приборов – высокое быстродействие, обусловленное отсутствием механически движущихся частей. Оно ограничено соответственно временем заряда емкости, созданной электродами для электрооптических и временем распространения звука по апертуре для акустооптических приборов, что позволяет использовать их в модуляторах добротности, лазерной локации и в других системах передачи и приема информации. Главные их недостатки - сложность и высокая стоимость изготовления, ограниченные углы отклонения, необходимость в высоковольтных или высокочастотных источниках питания для управления.