

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»
(СГАУ)

Е. В. Тимченко

Оптика лазеров

Электронное учебное пособие

Работа выполнена по мероприятию блока 1 «Совершенствование образовательной деятельности» Программы развития СГАУ на 2009 – 2018 годы по проекту «Разработка интерактивных дистанционных курсов по дисциплинам «Оптика лазеров», «Когерентная оптика», «Оптимальные и адаптивные системы управления лазерными устройствами»»
Соглашение № 1/22 от 03.06.2013 г.

САМАРА
2013

УДК 535
Т 419

Автор: **Тимченко Елена Владимировна**

Тимченко, Е. В. Оптика лазеров [Электронный ресурс] : электрон. учеб. пособие / Е. В. Тимченко; М-во образования и науки РФ, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т). – Электрон. и граф. дан. (1,81 Мбайт). - Самара, 2013. -1 эл. опт. диск (CD-ROM).

Пособие содержит изложение физических основ работы лазеров. Детально проанализированы оптические резонаторы, а также преобразователи и системы транспортировки лазерного излучения. Рассмотрены критерии стабильности, устойчивости и лучевой прочности лазерной оптики. Подробно описаны свойства и требования к материалам для оптических элементов лазеров.

Рекомендуется бакалаврам радиотехнического факультета направления подготовки 200500.62 «Лазерная техника и лазерные технологии» по дисциплине «Оптика лазеров», изучаемой в четвертом семестре.

Учебное пособие разработано на кафедре лазерных и биотехнических систем.

© Самарский государственный
аэрокосмический университет,
2013

Содержание

Введение.....	5
Лекция №1.....	6
ТЕМА 1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ ЛАЗЕРОВ	6
1.1 Принципы работы лазеров	6
Лекция №2.....	14
1.2 Типы лазеров	14
Лекция №3.....	21
1.3. Основные параметры лазеров. Свойства лазерного излучения. Временная когерентность. Длина когерентности.....	21
Лекция №4.....	28
1.4. Интерференция и дифракция света. Дифракционные приборы. Принцип Гюйгенса-Френеля. Гауссов пучок. Энергетическая эффективность резонатора. Потери излучения в оптической системе.....	28
Лекция №5.....	35
1.5. Поляризация. Фокусировка лазерного излучения.	35
Лекция №6.....	40
ТЕМА 2. АБЕРРАЦИИ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ	40
Лекция №7.....	48
ТЕМА 3. ОПТИЧЕСКИЕ РЕЗОНАТОРЫ	48
3.1 Потери в оптических резонаторах.....	48
3.2. Плоский резонатор	50
Лекция №8.....	54
3.3 Резонаторы со сферическими зеркалами. Устойчивые и неустойчивые резонаторы.	54
3.3.1. Конфокальный резонатор	54
3.3.2. Резонаторы с произвольными сферическими зеркалами.....	56
3.3.3 Неустойчивые резонаторы и селекции поперечных типов колебаний.....	58
Лекция №9.....	61
ТЕМА 4. ЭЛЕМЕНТЫ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ЛАЗЕРОВ	61
4.1. Отражательные элементы.....	61
4.2. Проходные элементы	64
Лекция № 10.....	70
ТЕМА 5. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ЛАЗЕРОВ	70
5.1. Материалы для активных элементов твердотельных лазеров.	70
5.2. Стекла для активных элементов лазеров	73
Лекция № 11.....	79
5.3. Материалы для элементов проходной оптики. Диэлектрические покрытия зеркал и защитные просветляющие покрытия.	79
5.4. Материалы для элементов отражательной оптики.	85
Лекция № 12.....	89
5.5. Оптические цветные стекла.	89
5.6. Материалы для поляризационных элементов.	90
5.7. Материалы для интерференционных покрытий.	93
Лекция № 13.....	98
ТЕМА 6. УСТРОЙСТВА УПРАВЛЕНИЯ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ	98
6.1. Преобразователи лазерного излучения	98
Лекция № 14.....	106
6.2. Системы транспортировки и формирования излучения	106

6.3. Применение фокусаторов излучения	109
Лекция №15.....	113
ТЕМА 7. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОПТОВОЛОКНА ДЛЯ ТРАНСПОРТИРОВКИ ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРОВ. ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ.....	113
Лекция №16.....	120
ТЕМА 8. ОПТИЧЕСКИЕ ДЕТАЛИ И УЗЛЫ. ОХЛАЖДАЕМАЯ ЛАЗЕРНАЯ ОПТИКА.....	120
8.1. Оптические детали и узлы. Крепление оптических деталей.....	120
8.2. Охлаждаемая лазерная оптика	125
Лекция №17.....	127
ТЕМА 9. ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЛАЗЕРОВ.....	127
Список использованных источников	134

Введение

В современной науке, технике, медицине, биологии и других областях человеческой деятельности лазеры находят широчайшее применение. В связи с этим оптике лазерам посвящено довольно большое количество как научных, так и учебных изданий, содержащих обзорную информацию по принципам работы лазеров, преобразователям лазерного излучения и т.д.

Настоящий курс лекций состоит из девяти основных тем: физических основ работы лазеров, абберации оптических систем, оптических резонаторов, элементов оптических систем лазеров, материалов для оптических элементов лазеров, устройств управления лазерным излучением, использование оптоволокна для транспортировки излучения лазеров, волоконно-оптических элементов, оптических деталей и узлов, охлаждаемой лазерной оптики, оптической системы технологических лазеров.

Особое внимание в настоящем курсе уделено принципам работы лазерам, оптическим резонаторам и материалам для оптических элементов лазеров.

Курс рассчитан на бакалавров, проходящих обучение по специальности «Лазерная техника и лазерные технологии» по дисциплине «Оптика лазеров» и слушается на 2 году обучения.

Лекция №1

ТЕМА 1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ ЛАЗЕРОВ

1.1 Принципы работы лазеров

Лазер – источник электромагнитного (оптического) излучения, формируемого путем вынужденного излучения микрочастиц вещества. Термин “лазер” от аббревиатуры LASER, составленной из начальных букв английских слов фразы “Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation”, означает “усиление света в результате вынужденного излучения”. Внутренняя энергия атомов и молекул может принимать ряд фиксированных значений, характерных для данного типа частиц. Переход атома с верхнего уровня на нижний сопровождается излучением фотона, энергия которого равна разности между энергиями атома в верхнем и нижнем состояниях. Если атомы не испытывают какого-либо внешнего воздействия, то они находятся в равновесном состоянии, т. е. их число в верхнем и нижнем энергетических состояниях не изменяется.

В обычном состоянии число атомов, находящихся на возбужденном энергетическом уровне определяется распределением Больцмана:

$$\frac{N_2}{N_1} = \exp \frac{-(E_2 - E_1)}{kT} \quad (1.1)$$

где N_2 – число атомов, находящихся в возбужденном состоянии с энергией E_2 ,

N_1 - число атомов, находящихся в основном состоянии с энергией E_1 ;

k – постоянная Больцмана,

T – температура среды.

Иными словам и таких атомов, находящихся в возбужденном состоянии меньше, чем в основном. Поэтому, вероятность того, что фотон,

распространяющийся в среде вызовет вынужденное излучение также мало по сравнению с вероятностью его поглощения.

Поэтому, электромагнитная волна, проходя через вещество расходует энергию на возбуждение атомов. Интенсивность излучения при этом падает по закону Бугера:

$$I=I_0 \exp(-\alpha x) \quad (1.2)$$

где I_0 – начальная интенсивность, I – интенсивность излучения, прошедшего расстояния x в веществе, α - показатель поглощения света.

Рассмотрим схему энергетических уровней некоторого атома (рис.1.1).

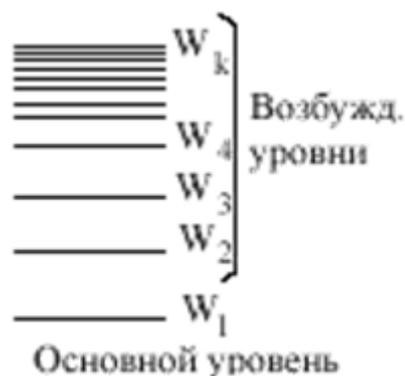


Рисунок 1.1 – Схема энергетических уровней

Если атому, находящемуся на основном уровне W_1 , сообщить энергию, то он может перейти на один из возбужденных уровней (рис.2а). Наоборот, возбужденный атом может самопроизвольно (**спонтанно**) перейти на один из нижележащих уровней, излучив при этом определенную порцию энергии в виде кванта света (рис.2б). Если излучение света происходит при переходе атома с уровня энергии W_m на уровень энергии W_n , то частота излучаемого (или поглощаемого) света $\nu_{mn} = (W_m - W_n)/h$.

Именно такие спонтанные процессы излучения происходят в нагретых телах и светящихся газах. Нагревание или электрический разряд переводят часть атомов в возбужденное состояние; переходя в нижние состояния, они излучают свет. В процессе спонтанных переходов атомы

излучают свет независимо один от другого. Кванты света хаотически испускаются атомами в виде волновых цугов. Цуги не согласованы друг с другом во времени, т.е. имеют различную фазу. Поэтому **спонтанное излучение некогерентно.**

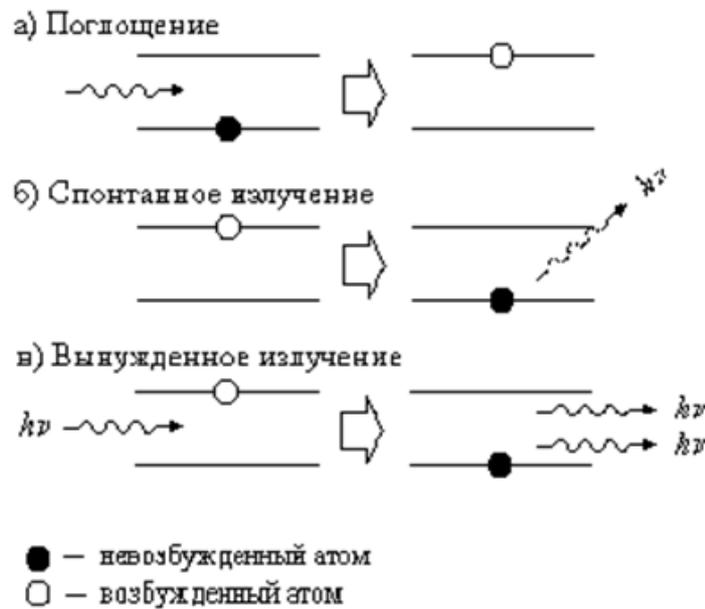


Рисунок 1.2 – Спонтанные и вынужденные переходы

Наряду со спонтанным излучением возбужденного атома существует **вынужденное** (или индуцированное) излучение: возбужденные атомы излучают под действием внешнего быстропеременного электромагнитного поля, например света. При этом оказывается, что под действием внешней электромагнитной волны атом излучает вторичную волну, у которой частота, поляризация, направление распространения и фаза полностью совпадают с параметрами внешней волны, действующей на атом. Происходит как бы копирование внешней волны (рис.2в). Понятие об индуцированном излучении было введено в физику А.Эйнштейном в 1916 г. Явление вынужденного излучения дает возможность управлять излучением атомов с помощью электромагнитных волн и таким путем генерировать и усиливать **когерентный свет.**

Чтобы осуществить это практически, нужно удовлетворить **трём условиям.**

1. **Необходим резонанс** – совпадение частоты падающего света с одной из частот ν_{mn} спектра атома. О выполнении резонансного условия позаботилась сама природа, т.к. спектры излучения одинаковых атомов абсолютно идентичны.

2. Другое условие связано с населенностью различных уровней. Наряду с вынужденным излучением света атомами, находящимися на верхнем уровне W_m , происходит также резонансное поглощение атомами, населяющими нижний уровень W_n . Атом, находящийся на нижнем уровне W_n , поглощает световой квант, переходя при этом на верхний уровень W_m .

Резонансное поглощение препятствует возникновению генерации света.

Будет ли система атомов генерировать свет или нет, зависит от того, каких атомов в веществе больше. Для возникновения генерации необходимо, чтобы число атомов на верхнем уровне N_m было больше числа атомов на нижнем уровне N_n , между которыми происходит переход.

Конечно, можно использовать лишь ту пару уровней, между которыми возможен переход, т.к. не все переходы между любыми двумя уровнями разрешены природой.

В естественных условиях на более высоком уровне при любой температуре меньше частиц, чем на более низком. Поэтому в любом теле, сколь угодно сильно нагретом, поглощение света будет преобладать над излучением при вынужденных переходах.

Для возбуждения генерации когерентного света необходимо принять специальные меры, чтобы из двух выбранных уровней верхний был заселен больше, чем нижний. Состояние вещества, в котором число атомов на одном из уровней с более высокой энергией больше числа атомов на уровне с меньшей энергией, называется **активным** или состоянием с **инверсией** (обращением) населенностей.

Таким образом, для возбуждения генерации когерентного света **необходима инверсия населенностей** для той пары уровней, переход между которыми соответствует частоте генерации.

3. Третья проблема, которую необходимо решить для создания лазера, – это **проблема обратной связи**. Для того, чтобы свет управлял излучением атомов, необходимо, чтобы часть излучаемой световой энергии все время оставалась внутри рабочего вещества, так сказать, на "размножение", вызывая вынужденное излучение света все новыми и новыми атомами. **Это осуществляется с помощью зеркал**. В простейшем случае рабочее вещество помещается между двумя зеркалами одно из которых имеет коэффициент отражения около 99.8%, а второе (выходное) – около 97-98%, что может быть достигнуто только за счет применения диэлектрических покрытий.



Рисунок 1.2. – Оптический резонатор

Световая волна, испущенная в каком-либо месте в результате спонтанного перехода атома, усиливается за счет вынужденного испускания при распространении ее через рабочее вещество. Дойдя до выходного зеркала, свет частично пройдет сквозь него. Эта часть световой энергии излучается лазером во вне и может быть использована. Часть же света, отразившаяся от полупрозрачного выходного зеркала, дает начало новой лавине фотонов. Эта лавина не будет отличаться от предыдущей в силу свойств вынужденного излучения.

При этом, как и в любом резонаторе, условие резонанса выполняется только у тех волн, для которых на двойном оптическом пути внутри резонатора укладывается целое число длин волн. Наиболее благоприятные условия складываются для волн, распространяющихся вдоль оси резонатора, что и обеспечивает чрезвычайно высокую направленность излучения лазера.

Выполнение описанных условий еще недостаточно для генерации лазера. Для того, чтобы возникла генерация света, усиление в активном веществе должно быть достаточно большим. Оно должно превышать некоторое значение, называемое **пороговым**. Действительно, пусть часть светового потока, падающего на выходное зеркало, отразилась назад. Усиление на двойном расстоянии между зеркалами (один проход) должно быть таким, чтобы на выходное зеркало вернулась световая энергия, не меньшая, чем в предыдущий раз. Только тогда световая волна начнет нарастать от прохода к проходу. Если же этого нет, то в течение второго прохода выходного зеркала достигнет меньшая энергия, чем в предыдущий момент, в течение третьего – еще меньшая и т.д. Процесс ослабления будет продолжаться до тех пор, пока световой поток не затухнет полностью. Ясно, что чем меньше коэффициент отражения выходного зеркала, тем большим пороговым усилением должно обладать рабочее вещество. Таким образом, в списке источников потерь зеркала стоят на первом месте.

Таким образом, система, находящаяся в термодинамическом равновесии, не может усиливать электромагнитное излучение. Для получения усиления необходимо создать в среде инверсию населенностей, для чего нужно вывести систему из состояния равновесия, т. е. возбудить. Естественно, что не любое возбуждение и не в каждом веществе приведет к инверсии населенностей. Среду, в которой при определенных условиях может быть создана инверсия населенностей, называют лазерной (или

мазерной) активной средой, а соответствующий рабочий элемент усилителя — активным элементом. Уровни энергии, между которыми может быть создана инверсия населенностей, называют рабочими лазерными уровнями энергии. Процесс возбуждения активной среды (активного вещества) с целью получения инверсии населенностей называют накачкой, а источник этого возбуждения — источником накачки.

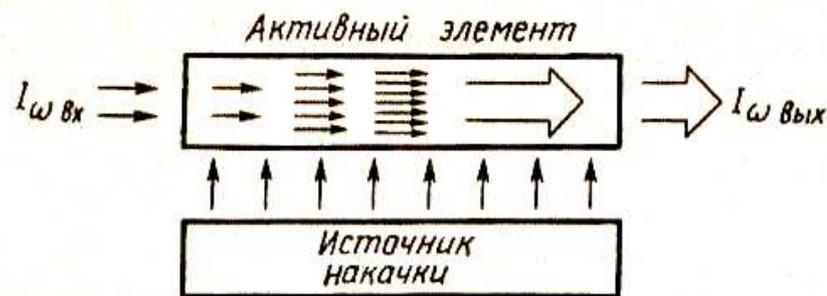


Рисунок 1.3 - Общая схема квантового усилителя

Источник накачки создает в активном элементе инверсию населенностей между рабочими уровнями E_m и E_n . Входной сигнал $I_{\omega_{вх}}$ на частоте $\omega = (E_m - E_n)/h$, проходя через активный элемент, усиливается за счет процессов индуцированного испускания, так что на выходе получается усиленный сигнал $I_{\omega_{вых}}$. Коэффициент усиления усилителя, равный отношению $I_{\omega_{вых}} / I_{\omega_{вх}}$ экспоненциально возрастает согласно (1.2) в соответствии с длиной активного элемента и степенью инверсии, которая определяется числом активных частиц в единице объема вещества и интенсивностью накачки.

Если в активном элементе усилителя (см. рис. 1.3) создана большая степень инверсии AN и показатель усиления велик, то по достижении некоторого критического значения AN усилитель может превратиться в генератор: вдоль оси активного элемента будет генерироваться так называемое усиленное спонтанное излучение. Но легче всего усилитель превратить в генератор, введя положительную обратную связь. В лазерах

эту функцию выполняют оптические резонаторы: активный элемент размещают между двумя строго параллельными друг другу зеркалами, как показано на рис. 1.2. Плоская электромагнитная волна, распространяющаяся в направлении, перпендикулярном зеркалам резонатора, будет поочередно отражаться от них, усиливаясь при каждом последующем прохождении через активную среду. Одно из зеркал делают полупрозрачным для вывода лазерного излучения. Изменяя коэффициент-отражения этого зеркала, можно изменять величину обратной связи.

Лекция №2

1.2 Типы лазеров

В качестве активной среды (рабочего тела) в современных лазерах используются твердые, жидкие и газообразные вещества. Из многих способов создания инверсной заселенности наиболее универсальны оптическая и газоразрядная (с помощью электрического разряда в активной среде) накачки.

Активной средой в твердотельных лазерах служат диэлектрические кристаллы или специальные стекла. Примером такого лазера является лазер на рубине, который генерирует излучение темно-красного цвета с длиной волны около 0,69 мкм. Различные стекла для лазеров активируют редкоземельными элементами. Генерируемое излучение у лазеров на стеклах может быть разной длины волны, в частности, 1,06 мкм для лазера на стекле с Nd^{3+} . Для твердотельных лазеров применяют исключительно оптическую накачку, например, в виде излучения газоразрядных ламп или ламп накаливания. В настоящее время диэлектрические лазеры реализованы примерно на 300 кристаллах и на десятках типов стекол. К кристаллическим относятся лазеры на окиси алюминия с ионами хрома (рубин), вольфрамате кальция с ионами неодима, иттриево-алюминиевом гранате с ионами неодима и др. К стеклянным относятся ОКГ на боратных, силикатных и фосфатных стеклах, активированные ионами неодима, гольмия, иттербия, эрбия, тулия и др.

Разновидностью диэлектрических лазеров с полупроводниковой накачкой являются волоконные лазеры, накачиваемые полупроводниковыми лазерами. Сердцевина волокна активируется ионами редкоземельных элементов. Лазеры на основе кварцевого волокна, легированного иттербием, сегодня излучают мощность 5 кВт в не-

прерывном режиме. Как правило, волоконные лазеры работают в конфигурации «задающий генератор — мощный волоконный усилитель». Использование такой схемы становится возможным благодаря очень высокому (до 50...60 дБ) коэффициенту усиления волоконного усилителя мощности. Отечественный иттербиевый импульсный волоконный лазер YLP-1/100/20 работает на длине волны 1,06 мкм, излучая импульсы пиковой мощностью до 10 кВт. Частота повторения импульсов 20... 100 кГц, длительность импульсов 60...120 нс. Номинальная энергия импульса 0,5 мДж.

В жидкостных лазерах активную среду составляют растворы органических красителей или специальные жидкости, активированные ионами редкоземельных элементов. Для жидкостных лазеров применяют непрерывную или импульсную оптическую накачку. Существуют три основные группы активных сред жидкостных лазеров: растворы органических красителей (полиментов, ксантенов и др.) в воде, ацетоне, толуоле и других растворителях; растворы неорганических соединений редкоземельных элементов (например, неодима в растворах оксихлорида фосфата или селена); растворы металлоорганических соединений (редкоземельные хелаты). Основные отличия жидкостных лазеров — отсутствие ограничений на форму и объем активного вещества, простота теплоотвода, отсутствие дефектов, характерных для твердотельных лазеров. Главное преимущество жидкостных лазеров на основе молекул органических красителей — плавная перестройка частоты излучения в диапазоне, значительно превосходящем диапазоны перестройки других лазеров.

Наиболее распространенным органическим красителем в лазерах является представитель класса ксантенов — родамин 6G. Спектр поглощения этого красителя около 0,1 мкм на половине интенсивности с максимумом на длине волны 0,51 мкм. Примерно такой же ширины линия

излучения с максимумом около 0,58...0,59 мкм. Используя резонатор с полосой пропускания на несколько порядков уже линии излучения (дифракционная решетка обеспечивает полосу меньше 10 мкм), можно плавно перестраивать частоту в полосе 0,5...0,7 мкм. Набор из 10... 12 красителей позволяет перекрыть диапазон 0,3... 1,2 мкм.

Большую группу газовых лазеров составляют газоразрядные лазеры, в которых активной средой является разреженный газ (давление 1...30 Торр), а накачка осуществляется электрическим разрядом, тлеющим или дуговым, который создается постоянным током или переменным током высокой частоты. Основное отличие газовой фазы от твердой и жидкой фаз вещества заключается в низкой плотности. Поэтому энергетический спектр возбужденных атомов, молекул, ионов испытывает слабое воздействие соседних частиц. Это обуславливает узкие спектральные линии газов. Низкая плотность газа обеспечивает и их высокую оптическую однородность. По этим причинам излучение газовых лазеров характеризуется максимальной когерентностью (временной и пространственной).



Рисунок 2.1 - Классификация газовых ОКГ

Низкая плотность является также ограничением мощности излучения (правда, самое мощное излучение в непрерывном режиме на сегодняшний день у газовых лазеров). Существует несколько типов газовых лазеров (рис. 2.1).

В химических лазерах возбужденные частицы (атомов или молекул) являются продуктами химических реакций. Большинство лазеров этого типа могут быть названы химическими лишь с точки зрения образования соответствующих молекул, так как для протекания реакции необходима энергия извне. Поэтому многие химические лазеры могут быть отнесены к газоразрядным, газодинамическим или лазерам с оптической накачкой. Для газовых лазеров на основе химических реакций использовались разные молекулы: HF, HCl, HBr, HCN, CO, NO, CN и др.

Среди газовых ОКГ наиболее распространены газоразрядные (ГРЛ). У них ярче всего проявляются уникальные свойства индуцированного излучения. Рассмотрим их подробнее, но сначала отметим, что их принято подразделять либо по виду активной среды (рис. 2.2, вверху), либо по типу возбуждения (рис. 2.2, внизу). Предлагается и несколько иная классификация ГРЛ (рис. 2.3). Обе классификации хорошо дополняют друг друга, позволяя понять при изучении следующих разделов книги место каждого ОКГ в общей структуре. Фактически ГРЛ подразделяются на автономные и неавтономные (привязанные к вакуумной системе) приборы (рис. 2.3). При этом отпаянные молекулярные лазеры не показаны.



Рисунок 2.2 - Классификация газоразрядных лазеров (ГРЛ)

Каждая классификация условна. Увеличение их числа позволяет понять это лучше. При этом понятнее становится и общая картина.

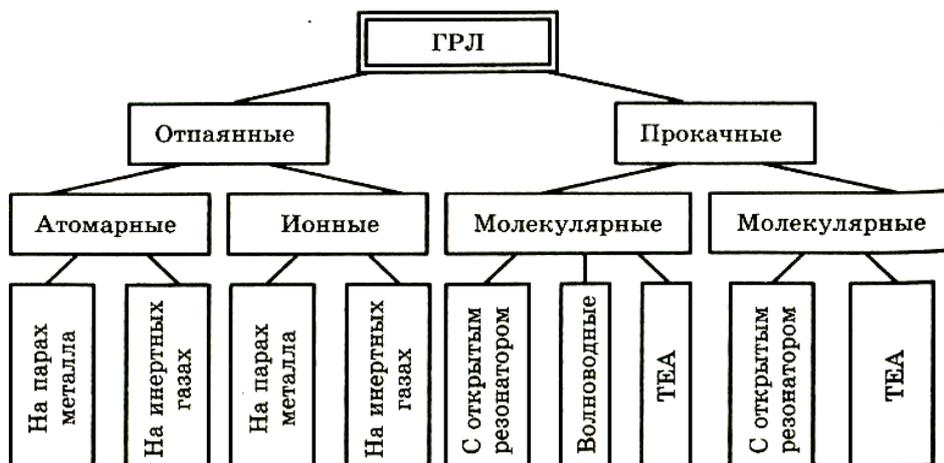


Рисунок 2.3 - Комплексная классификация ГРЛ

Существует несколько типов газоразрядных лазеров. В ионных лазерах излучение получают за счет переходов электронов между энергетическими уровнями ионов. Например, в аргоновом лазере используют дуговой разряд постоянного тока. Лазеры на атомных переходах генерируют излучение за счет переходов электронов между энергетическими уровнями атомов. Для накачки гелий-неонового лазера, работающего на смеси гелия и неона под давлением около 1 Торр, служит тлеющий разряд, создаваемый постоянным током. Лазеры этого типа еще недавно были наиболее распространенными в мире. Они наиболее изучены, весьма надежны, монохроматичны (достигнута ширина линии меньше 0,1 Гц), отличаются малыми габаритами, весом и низкой ценой (по указанным параметрам с ними успешно конкурируют лишь лазерные диоды). Гелий-неоновые ОКГ работают в диапазоне от 0,54 до 133 мкм более чем на 200 переходах неона. Диапазон мощности излучения самой распространенной линии генерации с длиной волны 0,63 мкм от 0,1 мВт до 0,4 Вт.

К газоразрядным относятся также молекулярные лазеры, в которых излучение возникает в результате переходов электронов между энергетическими уровнями молекул. Если атомарные лазеры характеризуются низкой мощностью и низким КПД (порядка 10⁻⁴), то

молекулярные ГРЛ отличаются большой мощностью (десятки киловатт в непрерывном режиме) и самым высоким КПД (десятки процентов). Причем мощность и КПД этих лазеров не зависят от диаметра активного элемента, как в случае атомарных. Лазеры на углекислом газе и окиси углерода работают на колебательно-вращательных переходах в основном электронном состоянии. Механизмы колебательного возбуждения молекул в обоих лазерах подобны, но механизмы создания инверсии населенностей существенно различаются. Эти отличия связаны с особенностями трех- и двухатомных молекул. Эти лазеры имеют широкий диапазон частот, соответствующий длинам волн от 0,2 до 50 мкм. Наиболее распространены молекулярные лазеры на диоксиде углерода (СО₂-лазеры), в которых для накачки применяют тлеющий разряд постоянного тока или высокочастотный. Лазер на диоксиде углерода генерирует излучение с длиной волны 10,6 мкм.

Разновидностью СО₂-лазеров являются газодинамические. В них инверсная населенность, необходимая для генерации лазерного излучения, достигается за счет расширения в рабочей камере газа, предварительно нагретого при давлении до $(2...3) \cdot 10^6$ Па.

К молекулярным лазерам относятся эксимерные, у которых рабочей средой является инертный газ, либо его соединение с хлором или фтором. В таких лазерах накачка осуществляется не электрическим разрядом, а потоком так называемых быстрых электронов.

При повышении давления газа и применении накачки с помощью ионизирующего излучения в сочетании с внешним электрическим полем получают более высокие мощности излучения. Ионизирующим излучением служит поток быстрых электронов либо ультрафиолетовое излучение. Такие лазеры называют электроионизационными.

В химических лазерах используют возбужденные за счет энергии химических реакций молекулы газа. Применяют смеси химически

активных газов (фтор, хлор, водород, хлористый водород и др.). Особый тип лазера – плазменный лазер. В нем активной средой служит высокоионизированная плазма паров щелочноземельных металлов.

В полупроводниковых лазерах когерентное излучение генерируется вследствие перехода электронов с нижнего края зоны проводимости на верхний край валентной зоны. Накачка электронным пучком бывает поперечной или продольной. При поперечной накачке две противоположные грани полупроводникового кристалла отполированы и играют роль зеркал оптического резонатора. При продольной накачке применяются внешние зеркала, значительно улучшается охлаждение полупроводника. В ОКГ этого типа активным элементом является полупроводниковый кристалл. Накачка может осуществляться инжекцией электронов в область р-п-перехода, электронным пучком, оптической накачкой и пробоем в электрическом поле (стримерные). Полупроводниковые ОКГ отличаются от других приборов малыми габаритами, низкими электрическим напряжением и стоимостью, высоким КПД. Наиболее распространенными являются инжекционные лазеры, которые обычно называют лазерными диодами. Инверсия населенности достигается пропусканием тока через диод. В качестве рабочего вещества в лазерных диодах используются полупроводниковые соединения A₃B₅ (GaAs, InP, InAs и др.), A₂B₆ (ZnS, ZnSe, CdS и т. д.), A₄B₆ (PbS, PbSe и др.). Наиболее распространены GaAs-диоды. Диоды на основе гомоструктур работают при температуре жидкого азота на длинах волн 0,85...0,86 мкм при мощности непрерывного излучения больше 10 Вт. При гелиевых температурах получена генерация и на 0,84 мкм. Диоды на основе гетероструктур работают при комнатной температуре на длинах волн 0,78...0,92 мкм. На более коротких волнах могут работать лазерные диоды на AlGaAs.

Лекция №3

1.3. Основные параметры лазеров. Свойства лазерного излучения. Временная когерентность. Длина когерентности.

Мощность излучения P_Q является основной характеристикой излучения непрерывных лазеров. Для импульсных и импульсно-периодических лазеров основными энергетическими характеристиками излучения являются энергия лазерного импульса ε_u , его длительность τ_u , частота следования импульсов f_u , а также средняя \bar{P} и средняя в импульсе \bar{P}_u мощности излучения.

Важным энергетическим параметром является КПД лазера. Общий энергетический КПД лазера η , определяемый как отношение выходной мощности или энергии излучения к потребляемой, можно представить в виде выражения:

$$\eta = \eta_{кв} \eta_{в} \eta_{р} \eta_{с.о.}, \quad (3.1)$$

где $\eta_{кв}$ – квантовый КПД; $\eta_{в}$ – КПД возбуждения; $\eta_{р}$ – КПД резонатора; $\eta_{с.о.}$ – КПД систем обслуживания.

В оптическом резонаторе существует определенный набор типов колебаний.

Свет в резонаторе многократно отражается от зеркал. Отраженные лучи интерферируют, что приводит к тому, что только определенные распределения полей на определенных частотах будут сохраняться в резонаторе, излучение на других частотах или с другим распределением будет подавлено за счет интерференции или быстро покинет резонатор. Распределения, которые повторяются при одном полном проходе резонатора являются наиболее стабильными и называются собственными модами или модами резонатора. Моды оптического резонатора подразделяют на две группы: продольные, отличающиеся частотой, и

поперечные, которые отличаются как частотой, так и распределением поля в сечении пучка. Обычно основная поперечная мода представляет собой гауссовский пучок.

Спектр, линия активной среды и моды оптического резонатора

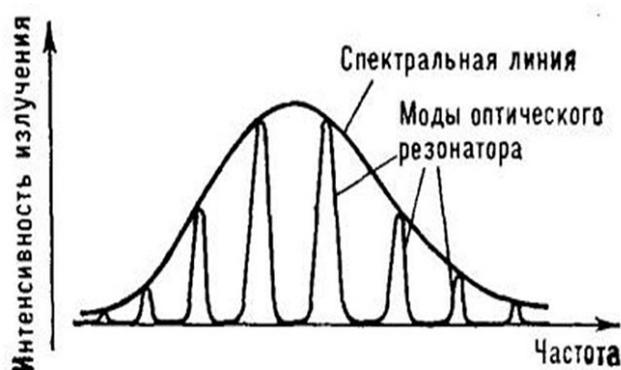


Рисунок 3.1. – Зависимость интенсивности излучения активной среды от частоты. Моды оптического резонатора

Специфической особенностью оптического резонатора газового лазера является то, что он имеет открытую структуру, состоящую из двух зеркал с большим коэффициентом отражения. Активное вещество возбуждается так, чтобы оно могло передавать энергию в моды резонатора, частоты которых лежат внутри линии индуцированного перехода. Поле излучения моды возрастает по интенсивности, вызывая рост вынужденного испускания квантов энергии. Это происходит до тех пор, пока интенсивность поля излучения не достигнет насыщения.

Моды классифицируют на продольные и поперечные. Продольные моды обозначают числом узлов, укладываемых вдоль оси резонатора между зеркалами, поперечные моды – числом узлов в плоскости зеркала.

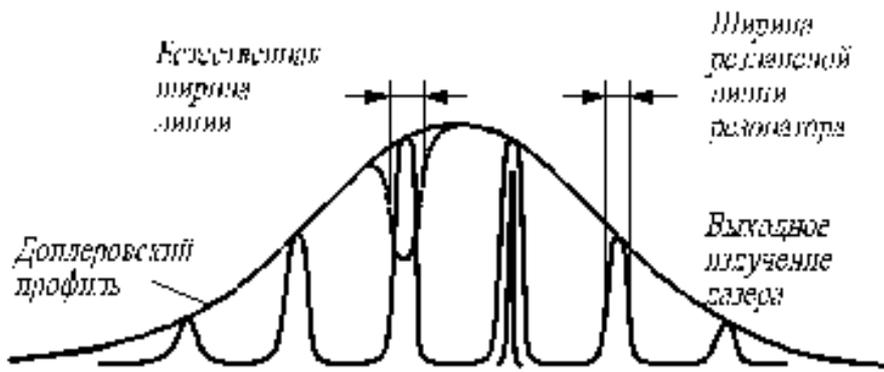


Рисунок 3.2 - Профили спектральных линий различных типов колебаний лазерного резонатора

Конфигурации мод в пятне приведены на рис. 3.3. Подобные картины наблюдаются в плоскости, перпендикулярной оси лазерного луча. Поперечные электромагнитные моды обозначают как TEM_{mnq} . Число изменений направления поля на наблюдаемой картине обозначается буквой m вдоль оси x и буквой n вдоль оси y ; плоскость поляризации проходит через ось y . Излучение во всех модах поляризовано в одном направлении.



Рисунок 3.3 - Конфигурации поперечных мод и их обозначения.

Таким образом, для открытого резонатора существует несколько устойчивых мод и представляют собой различные конфигурации поля на поверхности зеркал резонатора.

Продольное распределение поля описывается модовым числом q , которое соответствует различным продольным модам колебаний. Число q

определяет наличие узлов поля вдоль оси резонатора между зеркалами, удовлетворяющее условию:

$$q\lambda/2 = L_p \quad (3.2)$$

Колебания, соответствующие различным продольным модам, имеют одинаковое поперечное распределение интенсивности излучения на выходе из резонатора и отличаются лишь частотами этого излучения. Поперечная структура поля характеризуется наличием узлов электрического поля по радиусу и углу и описывается числами m и n .

Взаимосвязь оптического резонатора и активной среды осуществляет передачу энергии от активной среды в моды резонатора. Процесс передачи поставляет в резонатор энергию, формирующую излучение, которое по фазе и амплитуде скоррелировано с полем излучения резонатора. Модовый состав излучения зависит так же от показателя преломления среды пропускания.

Способность лазеров излучать в узком диапазоне длин волн характеризует монохроматичность лазерного излучения ($\Delta\nu/\nu_0$). Ширина спектра излучения лазера определяется числом линий, на которых происходит генерация. Контур линии усиления активной среды совпадает с контуром линии испускания (люминесценции). Поэтому в пределах линии усиления могут разместиться одна или несколько собственных частот резонатора, отстоящих друг от друга на величину:

$$\delta\nu_p = c/2L_p, \quad (3.3)$$

где c – скорость света в среде.

Когерентность лазерных пучков. Излучение лазера когерентно, т. е. связанные с ним колебания электромагнитного поля имеют постоянный во времени сдвиг фазы для двух произвольных точек. Колебания называют когерентными, если разность их фаз остается постоянной во времени и при

сложении колебаний определяет амплитуду суммарного колебания. Выделяют временную и пространственную когерентность.

Пространственная когерентность – когерентность колебаний, которые совершаются в один и тот же момент времени в разных точках плоскости, перпендикулярных направлению распространения волны.

Временная когерентность характеризует сохранение взаимной когерентности при временном отставании одного из таких лучей по отношению к другому. При этом мерой временной когерентности служит время когерентности – это максимально возможное время отставания одного луча по отношению к другому, при котором их взаимная когерентность сохраняется. Временная когерентность определяется степенью монохроматичности.

На рисунке справа показана разница между пространственной и временной когерентностью.

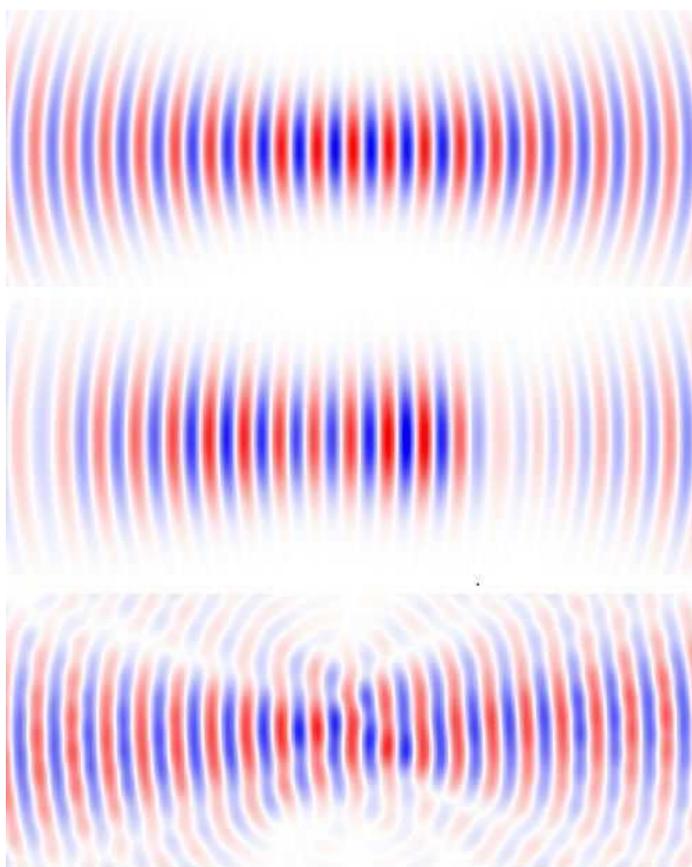


Рисунок 3.4 - Когерентность

На верхнем рисунке показан монохроматический гауссов пучок, демонстрирующий идеальную пространственную и временную когерентность.

На среднем рисунке показан пучок с высокой пространственной когерентностью, но с маленькой временной когерентностью. Волновые фронты образованные выше, и качество пучка по-прежнему очень высоки, но амплитуда и фаза луча изменяется вдоль направления распространения.

На нижнем рисунке показан лазерный луч с плохой пространственной когерентностью, но с высокой временной когерентностью. Волновые фронты деформируются, и это приводит к высокой расходимости пучка и низкому качеству луча. С другой стороны, пучок монохроматичен, так что расстояние между деформированными фронтами остается постоянным. Такой пучок может быть получен при прохождении излучения одночастотного лазера через оптически неоднородные материалы.

Когерентность пучка со временем уменьшается вследствие оптической неоднородности среды, а также несовершенства оптических элементов лазерных систем. Однако даже при их отсутствии время и область существования когерентности лазерного излучения будут ограничены из-за неизбежного уширения линии генерации. Колебания электромагнитных волн представляют в виде уравнения:

$$E(r, t) = E_0(r) \cos(2\pi\nu t + \varphi(r, t)) \quad (4)$$

Изменение относительной фазы $\varphi(r, t)$ синхронных в момент времени $t=0$ колебаний с частотами, отличающимися на $\Delta\nu_l$, будет возрастать и со временем станет равным 2π через время $\tau_{\text{ког}} = 1/\Delta\nu_l$.

Время когерентности $\tau_{\text{ког}}$ – это характерное время, в течение которого возможный сдвиг фазы лежащих в пределах ширины линии излучения колебаний достигнет максимальной величины.

Длина когерентности $L_{\text{ког}}$ – расстояние, на которое за это время распространится излучение, составляет величину:

$$L_{\text{ког}} = c\tau_{\text{ког}} = c / \Delta\nu_{\text{л}}. \quad (5)$$

Когерентность излучения важна для термической лазерной технологии. Во-первых, взаимодействие когерентного излучения с поверхностью сопровождается образованием различных поверхностных электромагнитных волн, которые используются для создания периодических поверхностных структур. Во-вторых, в многолучевых лазерных системах когерентность излучения непосредственно влияет на его предельную интенсивность, а следовательно, и технологические возможности лазера.

Лекция №4

1.4. Интерференция и дифракция света. Дифракционные приборы. Принцип Гюйгенса-Френеля. Гауссов пучок. Энергетическая эффективность резонатора. Потери излучения в оптической системе.

Интерференция света – явление взаимного усиления или ослабления света при наложении двух волн, имеющих одинаковые частоты колебаний. Интерференция возникает, когда два когерентных источника, т. е. испускающие однородные лучи с постоянной разностью фаз, расположены близко друг от друга. Такими источниками являются, например, два зеркальных изображения одного источника света.

Интерференция возникает также при разделении первоначального луча на два пучка при прохождении через тонкую пленку, например, наносимую на поверхность линз у просветленных объективов. Луч света, проходя через пленку толщиной d , отразится дважды – от внутренней и наружной ее поверхности. Отраженные лучи будут иметь постоянную разность фаз, равную удвоенной толщине пленки, и будут интерферировать. Полное гашение лучей произойдет при $d = \frac{\lambda}{4}$, где λ – длина волны. Лучи соседних участков спектра по обе стороны от λ интерферируют не полностью и ослабляются, отчего пленка приобретает окраску.

Интерференция от двух монохроматических источников одинаковой частоты. Изобразим два точечных источника S_1 и S_2 , излучающих монохроматические световые волны одинаковой частоты ω (рисунок 4.1). Проанализируем, от чего зависит интенсивность света в точке пространства, удаленной от первого источника на расстояние r_1 , а от второго – на r_2 .

Пусть векторы E_1 и E_2 световых волн колеблются в одной плоскости, тогда:

$$E(r, t) = E_1(r_1, t) + E_2(r_2, t). \quad (4.1)$$

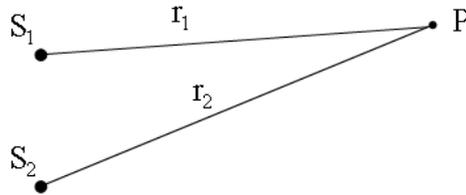


Рисунок 4.1 – Интерференция от двух монохроматических источников одинаковой частоты

Так как $r_1 = \text{const}$, $r_2 = \text{const}$, то в точке наблюдения каждая световая волна возбуждает свое гармоническое колебание:

$$\begin{aligned} E_1(r_1, t) &= E_{1m} \cos(\omega t - k_1 r_1 + \alpha_1), \\ E_2(r_2, t) &= E_{2m} \cos(\omega t - k_2 r_2 + \alpha_2). \end{aligned} \quad (4.2)$$

Амплитуда результирующего колебания при сложении колебаний одинаковой частоты и одинакового направления:

$$E^2 = E_1^2 + E_2^2 + 2E_1 E_2 \cos[(k_2 r_2 + \alpha_2) - (k_1 r_1 + \alpha_1)]. \quad (4.3)$$

Интенсивность найдем, усреднив это выражение по времени:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \langle \cos \delta \rangle \quad (4.4)$$

здесь $\delta = (k_2 r_2 + \alpha_2) - (k_1 r_1 + \alpha_1)$ – разность фаз колебаний, возбуждаемых в точке наблюдения источниками S_1 и S_2 .

Некогерентные волны. Если $\langle \cos \delta \rangle = 0$, то $I = I_1 + I_2$ – интенсивности складываются. Такая ситуация наблюдается, если S_1 и S_2 – независимые источники, для них α_1 и α_2 у разных цугов разные, длительность цуга $\sim 10^{-8}$ с. При усреднении по промежутку времени $\sim 10^{-1}$ с

(время, характеризующее инерционность человеческого глаза) $\langle \cos \delta \rangle = 0$.

Такие волны называют некогерентными.

Когерентные волны получают, разделив волну от одного источника на две части, которые будут когерентны ($\alpha_1 = \alpha_2$, в пределах каждого цуга).

Тогда $\langle \cos \delta \rangle = \cos \delta = \text{const}$, при фиксированных r_1 и r_2 , следовательно:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta \quad (4.5)$$

Дифракция волны (от лат. *diffractus* – разломанный, переломанный) – явление отклонения распространения волны от законов геометрической оптики. Первоначально это понятие относилось только к огибанию волной препятствия, но в современном, более широком толковании, с дифракцией связывают весьма широкий круг явлений, возникающих при распространении волн в неоднородных средах.

Дифракция волны наблюдается независимо от природы волны и может проявляться:

- в преобразовании ее пространственной структуры. В одних случаях такое преобразование можно рассматривать как «огибание» волной препятствия, в других случаях – как расширение угла распространения или отклонение волнового пучка в определенном направлении;
- в разложении волны по ее частотному спектру;
- в преобразовании поляризации волны;
- в изменении фазовой структуры волны.

Дифракционные эффекты зависят от соотношения между длиной волны и характерным размером неоднородностей среды либо неоднородностей структуры самой волны. Наиболее сильно они проявляются при размерах неоднородностей сравнимых с длиной волны.

При размерах неоднородностей существенно превышающих длину волны (на 3–4 порядка и более), явлением дифракции, как правило, можно пренебречь. В последнем случае распространение волны с высокой степенью точности описывается законами геометрической оптики. С другой стороны, если размер неоднородностей среды много меньше длины волны, вместо дифракции говорят о рассеянии волны.

Дифракционная решетка как спектральный прибор. Дифракционная решетка – оптический прибор, представляющий собой совокупность большого числа регулярно расположенных штрихов (щелей, выступов), нанесенных на некоторую поверхность. Решетка способна разлагать свет в спектр. Положение узких главных максимумов зависит от длины волны λ . Это позволяет использовать решетку в качестве спектрального прибора. Для работы могут быть использованы дифракционные максимумы различных порядков (кроме $m=0$). Качество решетки как спектрального прибора может быть охарактеризовано рядом параметров. К ним относятся угловая дисперсия, дисперсионная область и разрешающая способность.

Принцип Гюйгенса-Френеля. Строгое решение любой дифракционной задачи для световых волн сводится к нахождению решения уравнений Максвелла с соответствующими граничными условиями. В оптике большое значение имеет приближенное решение дифракционных задач, основанное на принципе Гюйгенса-Френеля:

1. Каждая точка, до которой доходит волна, служит источником вторичных сферических волн, огибающая которых дает положение волнового фронта в следующий момент времени (Х. Гюйгенс, 1678 г.).

2. Амплитуда результирующей волны в любой точке пространства может быть найдена как результат интерференции всех вторичных волн, с учетом их фаз и амплитуд (О. Френель, 1818 г.).

Математическая формулировка принципа Гюйгенса-Френеля. Пусть S – волновая поверхность, не закрытая препятствием, P – точка

наблюдения (рисунок 2). Тогда элемент поверхности dS возбudit в точке P колебание:

$$dE = k(\varphi) \frac{a_0 dS}{r} \cos(\omega t - kr + \alpha_0). \quad (4.6)$$

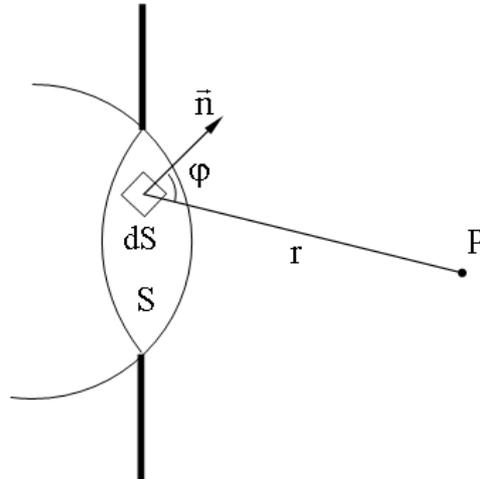


Рисунок 4.2 – Сферическая волна

Результирующее колебание:

$$E = \int_S dE = \int_S k(\varphi) \frac{a_0}{r} \cos(\omega t - kr + \alpha_0) dS. \quad (4.7)$$

Здесь $k(\varphi)$ определяет зависимость амплитуды dE от угла между нормалью к площадке dS и направлением на точку P . Множитель a_0 дает амплитуду светового колебания в области dS . Величины ω и k – круговая частота и волновое число сферической волны, распространяющейся от элемента dS .

При транспортировке излучения на большие расстояния и концентрации энергии пучка на малых площадях наиболее важным показателем качества излучения являются его пространственные характеристики: распределение интенсивности в лазерном пучке и расходимость.

Распределение интенсивности излучения на выходной апертуре лазера определяется типом используемого резонатора и модовым

составом. В случае одномодовой генерации лазера с устойчивым резонатором на основной моде TEM_{00q} это распределение описывается кривой, близкой к распределению Гаусса:

$$I(\omega) = I_0 \exp(-2\omega^2 / \omega_G^2), \quad (4.8)$$

где I_0 – интенсивность на оси пучка; ω_G – условный радиус выходящего гауссова пучка; ω – расстояние, на котором интенсивность излучения снижается в e^2 раз. Величина I_0 связана с полной мощностью излучения лазера P_Q и радиусом пучка соотношением:

$$P_Q = 2\pi \int_0^{\infty} I(\omega) \omega d\omega = \pi \omega_G^2 I_0 / 2. \quad (4.9)$$

В случае многомодовой генерации распределение интенсивности по выходной апертуре лазера будет определяться модовым составом и распределением энергии излучения между модами.

Потери в оптических системах обусловлены поглощением и рассеянием в оптических элементах, отражением (френелевским) от их поверхностей, а также потерями в оптических элементах, выполняющих особые функции (светофильтрах, спектральных светоделителях, защитных стеклах и др.).

Потери на отражение от преломляющих поверхностей определяются коэффициентом отражения:

$$R = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\sin^2(i - i')}{\sin^2(i + i')} + \frac{\text{tg}^2(i - i')}{\text{tg}^2(i + i')} \right), \quad (4.10)$$

углы i и i' связаны законом преломления $n \cdot \sin i = n' \cdot \sin i'$. Наибольшие потери происходят на поверхности раздела, когда одна из сред является воздухом, и наименьшие, когда смежные среды имеют близкие значения показателей преломления. Это имеет место в сменных линзах.

В реальных оптических системах углы падения редко превышают 45° .

Наиболее интересен частный случай $i = i'$, что соответствует нормальному падению излучения на поверхность материала. Тогда:

$$R = \left(\frac{n' - n}{n' + n} \right)^2. \quad (4.11)$$

Коэффициент отражения для зеркальных систем можно определить экспериментально и теоретически. Для $\lambda > 4$ мкм коэффициент отражения металлических покрытий можно рассчитать исходя из формулы Друде:

$$R = 1 - 0,365 \cdot \sqrt{\frac{\rho_m}{\lambda}}. \quad (4.12)$$

где ρ_m – удельное сопротивление, Ом·м⁻¹, а λ – длина волны, мкм. Для других длин волн R можно определить через оптические свойства металлов.

Показателем пропускания t называется отношение величины потока Φ прошедшего через слой к начальной величине потока Φ_0 :

$$t = \frac{\Phi}{\Phi_0}. \quad (4.13)$$

Общий показатель пропускания системы равен произведению показателей пропускания отдельных оптических элементов:

$$t_{\text{системы}} = t_1 \cdot t_2 \cdot t_3 \cdot \dots \quad (4.14)$$

Для уменьшения потерь излучения применяют просветляющие покрытия.

Потери на поглощение в различных материалах имеют различную величину и характеризуются коэффициентом поглощения. Если путь излучения в среде равен l , то коэффициент поглощения будет равен:

$$a = \frac{1 - t}{l}, \quad (4.15)$$

где l – толщина материала, через который проходит излучение.

Лекция №5

1.5. Поляризация. Фокусировка лазерного излучения.

Поляризация лазерного излучения характеризует ориентации вектора электрического поля в электромагнитной волне. Поляризация является одним из свойств оптического излучения, состоящим в неравноправии различных направлений в плоскости, перпендикулярной направлению распространения световой волны. Если свет не поляризован, то вектор мгновенного электрического поля в любой фиксированной точке может хаотически принимать любую ориентацию в плоскости, перпендикулярной направлению распространения. Линейная плоская поляризация имеет место в том случае, когда в каждой точке светового пучка вектор электрического поля E колеблется вдоль одной линии в плоскости, перпендикулярной направлению распространения. Для получения линейно поляризованного излучения в резонатор лазера вводят селективирующий элемент, позволяющий обеспечить различный уровень внутрирезонаторных потерь для электромагнитных колебаний с различными поляризациями. Круговая поляризация имеет место, если амплитуды двух поляризационных составляющих равны, а разность фаз составляет $\pi/2$ или $3\pi/2$. Заданное направление поляризации выделяют с помощью различных поляризаторов - устройств, обладающих неодинаковым пропусканием излучения с различной поляризацией.

Лазерные пучки с различными направлениями поляризации имеют разные коэффициенты отражения в диапазоне углов падения излучения φ_1 . При падении излучения под углом Брюстера φ_B , удовлетворяющего условию $\operatorname{tg} \varphi_B = n$, где n - показатель преломления среды, коэффициент отражения для р-поляризации становится равным нулю, т.к. $\sin \varphi_1 / \sin \varphi_2 = n$. При угле Брюстера отраженный и преломленный лучи перпендикулярны друг другу.

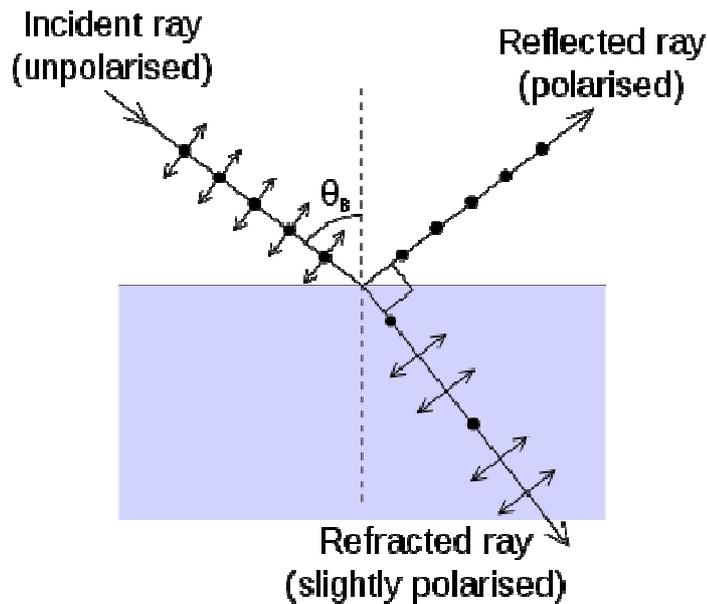


Рисунок 5.1 - Иллюстрация поляризации отражённого света, падающего на границу раздела сред под углом Брюстера

Закон Брюстера записывается в виде:

$$\operatorname{tg} \theta_{Br} = n_{21},$$

где $n_{21} = n_2/n_1$ — показатель преломления второй среды относительно первой, а θ_{Br} — угол падения (угол Брюстера).

При падении света на одну пластинку под углом Брюстера интенсивность отражённого линейно поляризованного света очень мала (для границы воздух-стекло — около 4 % от интенсивности падающего луча).

В качестве селектирующего элемента в газовых лазерах используются пластины ограничивающие объем активной среды и расположенные под углом Брюстера к оптической оси резонатора. Расположенную под углом Брюстера пластинку используют и для выделения необходимой поляризации в неполяризованном пучке.

Поляризация лазерного пучка может существенно влиять на эффективность технологических процессов, в которых важную роль играет отражение излучения. Например, при вырезании сложных фигур

целесообразно, чтобы излучение имело круговую поляризацию, обеспечивающую одинаковую ширину и глубину реза в разных направлениях.

Фокусировка лазерного излучения. Основным техническим проблемам, возникающим при создании линзовых систем формирования излучения, являются: выбор модовой структуры и геометрии сфокусированного пучка; выбор фокусирующей линзы; локализация фокуса пучка относительно поверхности материала.

Выбор модовой структуры и геометрии сфокусированного пучка осуществляется подбором формы пучка, зависящей от типа лазера, схемы резонатора, режима накачки, использования внутрирезонаторных диафрагм. Необходимость острой фокусировки требуется для проведения технологических процессов лазерной резки и сварки. Для реализации технологических процессов лазерной поверхностной обработки допустимы многомодовые пучки.

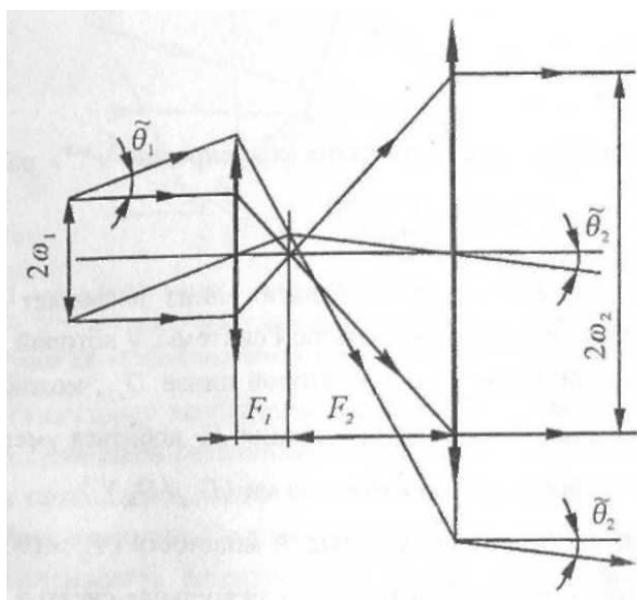


Рисунок 5.2 - Уменьшение расходимости лазерного излучения при увеличении размера пучка

Выбор линзы осложняется наличием aberrаций. Суммарный радиус пятна фокусировки определяется выражением:

$$r_z = r_d + r_a = \tilde{\theta} \cdot F + a_{\min} F \left(\frac{D_a}{F} \right)^3,$$

где r_d - радиус, обусловленный дифракцией; r_a - радиус, обусловленный сферической аберрацией; θ и D_a - угловая расходимость и диаметр фокусируемого пучка;

$a_{\min} = n/256 \cdot (4n-1)/(2+n) \cdot (n^2-1)$ - минимальное значение аберрационного коэффициента линзы, имеющее место при отношении радиусов кривизны передней задней поверхности линзы:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{2n^2 - n - 4}{n(2+n)}.$$

На расстоянии F_{opt} радиус пятна фокусировки $r^{\min} F$ равен:

$$F_{\text{opt}} = \left(\frac{2a_{\min}}{\tilde{\theta}} \right)^{1/3} D_a$$

Минимизируя r_{\square} , находим оптимальное значение фокусного расстояния F_{opt} , определяемое выражением:

$$r^{\min}_F = \frac{3}{2} \tilde{\theta} \cdot F_{\text{opt}} = \frac{3}{243} \cdot \sqrt[3]{a_{\min} \cdot \tilde{\theta}^2 \cdot D_a}$$

Применение систем из нескольких линз позволяет снизить влияние аберраций. Для двухлинзовой системы, у которой диаметр пучка на первой линзе D_{a1} , а на второй линзе D_{a2} , можно подбором оптимального фокусного расстояния F_2 добиться уменьшения радиуса пятна фокусировки в отношении $(D_{a2}/D_{a1})^{1/3}$.

При фокусировке пучков большой мощности ($P_Q > 10^3$ Вт) используют отражательную оптику. Отражательная система, состоящая из вогнутого и поворотного плоского зеркал применяется при малых углах схождения пучка, т.е. больших фокусных расстояниях. Небольшие углы наклона ($< 10^\circ$) фокусирующего зеркала, позволяют снизить астигматизм.

Для фокусировки пучков технологических лазеров применяются внеосевые объективы Кассегрена (рисунок 4).

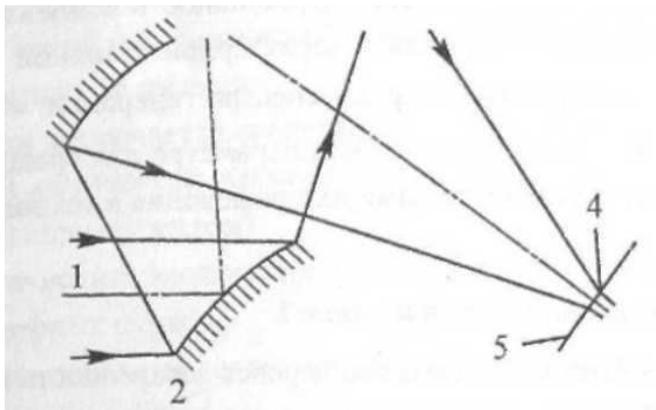


Рисунок 5.3 - Схема внеосевого фокусирующего объектива Кассегрена

1 - входящий пучок; 2 -- выпуклое зеркало; 3 - вогнутое зеркало; 4 - пятно фокусировки; 5 - фокальная плоскость.

Лекция №6

ТЕМА 2. АБЕРРАЦИИ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Аберрации (от лат. aberratio - уклонение, удаление) - искажения изображений, даваемых реальными оптическими системами, заключающиеся в том, что оптические изображения неточно соответствуют предмету, оказываются размыты (монокроматическая геометрическая аберрация оптической системы) или окрашены (хроматическая аберрация оптической системы). В большинстве случаев аберрации обоих типов проявляются одновременно.

В приосевой, так называемой параксиальной, области оптическая система близка к идеальной, т. е. точка изображается точкой, прямая линия - прямой и плоскость - плоскостью. Но при конечной ширине пучков и конечном удалении точки-источника от оптической оси нарушаются правила параксиальной оптики: лучи, испускаемые точкой предмета, пересекаются не в одной точке плоскости изображений, а образуют кружок рассеяния, т. е. изображение искажается - возникают аберрации.

2.1. Сферическая аберрация

Сферическую аберрацию принято рассматривать для пучка лучей, выходящего из точки предмета, расположенной на оптической оси. Однако, сферическая аберрация имеет место и для других пучков лучей, выходящих из точек предмета, удаленных от оптической оси, но в таких случаях она рассматривается как составная часть аберраций всего наклонного пучка лучей. Причём, хотя эта аберрация и называется сферической, она характерна не только для сферических поверхностей.

В результате сферической аберрации цилиндрический пучок лучей, после преломления линзой (в пространстве изображений) получает вид не конуса, а некоторой воронкообразной фигуры, наружная поверхность которой, вблизи узкого места, называется каустической поверхностью.

При этом изображение точки имеет вид диска с неоднородным распределением освещённости, а форма каустической кривой позволяет судить о характере распределения освещённости. В общем случае, фигура рассеяния, при наличии сферической aberrации, представляет собой систему концентрических окружностей с радиусами пропорциональными третьей степени координат на входном (или выходном) зрачке.

Сферическая aberrация линзы (системы линз) объясняется тем, что её преломляющие поверхности встречают отдельные лучи сколько-нибудь широкого пучка под различными углами. Вследствие чего, более удалённые от оптической оси лучи преломляются сильнее, нежели нулевые лучи, и образуют свои точки схода удалённые от фокальной плоскости.

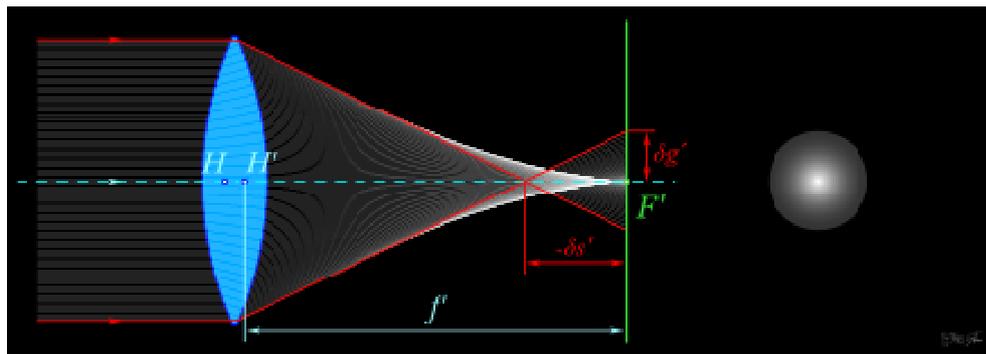


Рисунок 6.1 - Схема сферической aberrации: H, H' — положения главных плоскостей; F' — задняя фокальная плоскость; f' — заднее фокусное расстояние; $-\delta s'$ — продольная сферическая aberrация; $\delta g'$ — поперечная сфериче

Как и другие aberrации, сферическая aberrация зависит от кривизны поверхностей и оптической силы линзы. Поэтому применение оптических стёкол с высокими показателями преломления позволяют уменьшить сферическую aberrацию, посредством увеличения радиусов поверхностей линзы при сохранении её оптической силы.

Уменьшение влияния сферической aberrации

1. диафрагмированием;
2. с помощью дефокусировки.

К тому же, для линз с разной кривизной поверхностей будет иметь значение ориентация линзы относительно хода светового луча. Так, например, сферическая aberrация для плоско-выпуклой линзы, обращенной навстречу лучу своей плоской поверхностью, будет иметь величину бóльшую, нежели для той же линзы, но встречающей луч своей выпуклой поверхностью. Таким образом, выбор отношения кривизны первой поверхности линзы, к её второй поверхности, так же, будет одним из средств уменьшающих сферическую aberrацию.

Заметное влияние на сферическую aberrацию оказывает диафрагмирование объектива (или иной оптической системы), так как при этом отсекаются краевые лучи широкого пучка. Очевидно, что этот способ непригоден для оптических систем, требующих высокой светосилы.

В отдельных случаях небольшая величина сферической aberrации может быть исправлена за счёт некоторой дефокусировки объектива. При этом плоскость изображения смещается к, так называемой, «плоскости лучшей установки», находящейся, как правило, посередине, между пересечением осевых и крайних лучей, и не совпадающей с самым узким местом пересечения всех лучей широкого пучка (дискон наименьшего рассеяния). Это несовпадение объясняется распределением световой энергии в диске наименьшего рассеяния, образующей максимумы освещённости не только в центре, но и на краю. То есть, можно сказать, что «диск» представляет из себя яркое кольцо с центральной точкой. Поэтому, разрешение оптической системы, в плоскости совпадающей с с диском наименьшего рассеяния, будет ниже, несмотря на меньшую величину поперечной сферической aberrации. Пригодность этого метода зависит от величины сферической aberrации, и характера распределения освещённости в диске рассеяния.

Достаточно успешно сферическая aberrация исправляется при помощи комбинации из положительной и отрицательной линз. Причём, если линзы не склеиваются, то, кроме кривизны поверхностей компонентов, на величину сферической aberrации будет влиять и величина воздушного зазора (даже в том случае, если поверхности, ограничивающие этот воздушный промежуток, имеют одинаковую кривизну). При этом способе коррекции, как правило исправляются и хроматические aberrации.

2.2 Кома

Коматическая aberrация или Кома (от др.-греч. κόμη — волосы) — проявляется в том, что каждый участок оптической системы, удалённый от её оси на расстояние d (кольцевая зона), даёт изображение светящейся точки в виде кольца, радиус которого тем больше, чем больше d ; может рассматриваться как сферическая aberrация лучей, проходящих не через оптическую ось системы. Центры колец не совпадают, в результате чего их наложение, то есть изображение точки, даваемое системой в целом, принимает вид несимметричного пятна рассеяния. Размеры этого пятна пропорциональны квадрату угловой апертуры системы и удалению точки-объекта от оси оптической системы.

Кома очень велика в параболических рефлекторах и является основным фактором, ограничивающим их поле зрения. В сложных оптических системах кому обычно исправляют совместно со сферической aberrацией подбором линз. Оптические системы с исправленными коматической и сферической aberrацией называются апланатами. Если при изготовлении системы допущена децентрировка одной из поверхностей, то кома искажает изображения и тех точек, которые расположены на оси оптической системы.

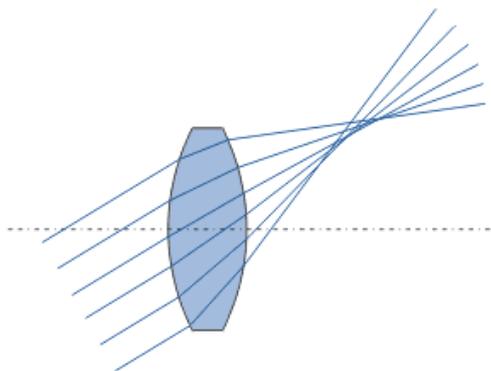


Рисунок 6.2 - Схема образования комы: лучи, приходящие под углом к оптической оси собираются не в одной точке

2.3 Астигматизм

Астигматизм — абберация, при которой изображение точки, находящейся вне оси, и образуемое узким пучком лучей, представляет собой два отрезка прямой, расположенных перпендикулярно друг другу на разных расстояниях от плоскости безабберационного фокуса (плоскости Гаусса). Астигматизм обусловлен неодинаковой кривизной оптической поверхности в разных плоскостях сечения и проявляется в том, что волновой фронт деформируется при прохождении оптической системы, и фокус светового пучка в разных сечениях оказывается в разных точках. Фигура рассеяния представляет собой семейство эллипсов с равномерным распределением освещённости. Существуют две плоскости - меридиональная и перпендикулярная ей сагиттальная, в которых эллипсы превращаются в прямые отрезки. Центры кривизны в обоих сечениях называются фокусами, а расстояние между ними является мерой астигматизма.

Астигматизм возникает вследствие того, что лучи наклонного пучка имеют различные точки сходимости — точки меридионального или сагиттального фокусов бесконечно тонкого наклонного пучка.

Астигматизм объясняется зависимостью углов преломления лучей пучка от углов их падения. Так как отдельные лучи наклонного пучка падают на преломляющую поверхность под разными углами, то и преломляются на разные углы, пересекаясь на разном же расстоянии от преломляющей поверхности. Причём, можно найти такое положение для поверхности изображения, когда все лучи пучка расположенные в одной из плоскостей (меридиональной или сагиттальной) пересекутся на этой поверхности. Таким образом, астигматический пучок формирует изображение точки в виде двух астигматических фокальных линий, на соответствующих фокальных поверхностях, которые имеют форму поверхностей вращения кривых с различными параметрами, и касаются одна другой в точке оси системы.

Если положения этих поверхностей, для некоторой точки поля, не совпадают, то говорят о наличии астигматизма, понимая под этим астигматическую разность меридионального и сагиттального фокусов.

При этом, если меридиональные фокусы располагаются ближе к поверхности преломления, нежели сагиттальные, то говорят о положительном астигматизме, а если дальше, то об отрицательном. В случае совпадения фокальных поверхностей астигматическая разность равна нулю, астигматический пучок вырождается в гомоцентрический, фигура рассеяния переходит в точку, а кривизна результирующей поверхности будет определять кривизну поля изображения

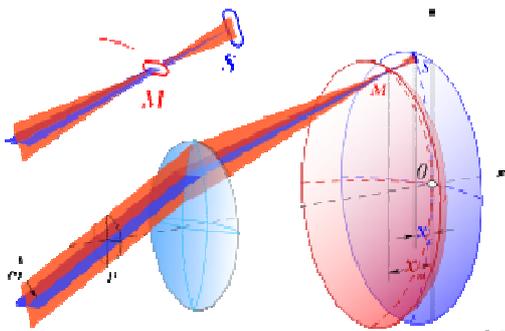


Рисунок 6.3 - Астигматизм наклонного пучка лучей.
M — меридиональная фокальная поверхность,
S — сагиттальная фокальная поверхность.

2.4 Дисторсия

Дисторсия (от лат. *distorsio*, *distortio* — искривление) — абберация оптических систем, при которой линейное увеличение изменяется по полнозрению. При этом нарушается подобие между объектом и его изображением.

Исправляется подбором линз и других элементов оптической системы при её разработке. Если присутствует в цифровом изображении, может быть исправлена программно.

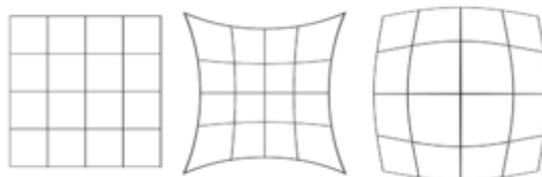


Рисунок 6.4 - Идеальное без дисторсии, с «подушкой» и «бочкой».

Прямые линии изображаются кривыми, кроме тех, которые лежат в одной плоскости с оптической осью. Например, изображение квадрата, центр которого пересекает оптическая ось, имеет вид подушки (подушкообразная дисторсия, подушка) при положительной дисторсии, и вид бочки (бочкообразная дисторсия, бочка) при отрицательной (см. рис.). В отдельных случаях искажения формы могут иметь и более сложный вид.

Дисторсия зависит также и от длины волны, что даёт побочный эффект, сходный с хроматизмом увеличения, и может считаться хроматической абберацией. Поэтому, строго говоря, дисторсия снижает разрешающую способность, хотя влияние этого обычно невелико.

В зрительных трубах и биноклях дисторсия может быть уничтожена практически полностью.

Дверные глазки, которые представляют собой широкоугольные зрительные трубы, намеренно изготавливаются с очень большой бочкообразной дисторсией, чтобы можно было, сохраняя широкий угол зрения, рассмотреть при большом увеличении лицо по центру.

2.5 Хроматическая aberrация

Хроматическая aberrация (от греч. chroma - цвет) - одна из осн. aberrаций оптич. систем, обусловленная зависимостью показателя преломления прозрачных сред от длины волны света

Хроматическая aberrация — паразитная дисперсия света, проходящего через оптическую систему (фотографический объектив, бинокль, микроскоп, телескоп и т. д.). При этом белый свет разлагается на составляющие его цветные лучи, в результате чего изображения предмета в разных цветах не совпадают в пространстве изображений.

Хроматическая aberrация ведёт к снижению чёткости изображения, а иногда также и к появлению на нём цветных контуров, полос, пятен, которые у предмета отсутствуют.

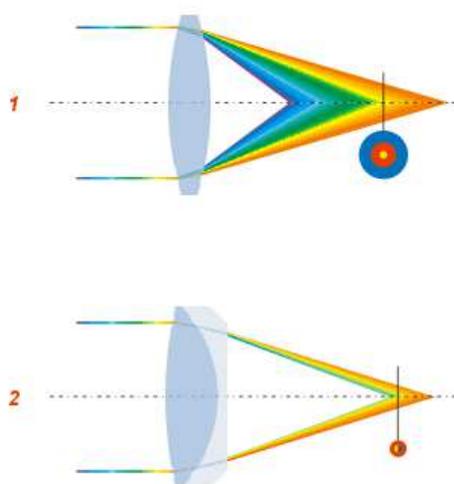


Рисунок 6.5 - Хроматизм положения (1) и его уменьшение с помощью ахроматической линзы (2)

Лекция №7

ТЕМА 3. ОПТИЧЕСКИЕ РЕЗОНАТОРЫ

3.1 Потери в оптических резонаторах.

Важнейшим элементом квантовых генераторов радио- и оптического диапазонов является резонатор (см. общую схему рис. 7.1). За счет многократного отражения в резонаторе достигается наиболее полное взаимодействие электромагнитного излучения с активной средой. Обеспечивая положительную обратную связь, резонатор существенно влияет на свойства генерируемого активной средой излучения, определяя, в частности, его диаграмму направленности и спектральный состав.

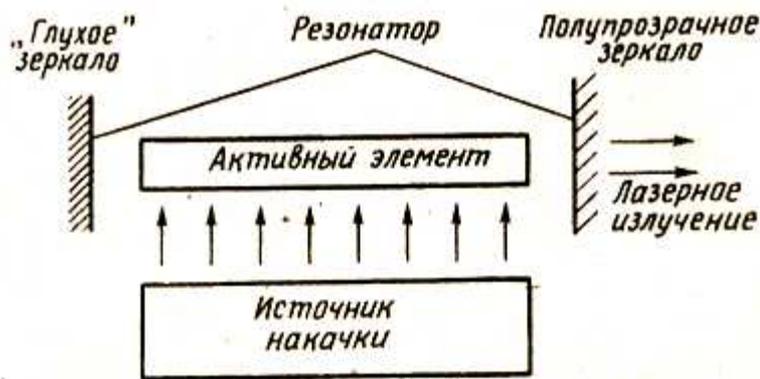


Рисунок 7.1. – Общая схема лазера

Резонатор применяют в качестве устройства, позволяющего формировать стоячую электромагнитную волну и получать высокую интенсивность излучения, которая необходима для эффективного протекания процессов вынужденного излучения возбужденных частиц рабочего тела лазера. В ИК- и видимом диапазоне длина волны излучения много меньше характерных размеров резонатора.

Простейшим электромагнитным резонатором, применяемым в радиодиапазоне до частот несколько десятков мегагерц, является колебательный контур. С увеличением частоты размеры контура становятся соизмеримыми с длиной волны, что приводит к резкому возрастанию излучения из контура, и он теряет свои резонансные свойства.

Поэтому в СВЧ-радиодиапазоне при частотах порядка $10^9 \dots 10^{11}$ Гц ($\lambda \approx 0,3 \dots 30$ см) применяют объемный резонатор — колебательную систему, представляющую собой полость с проводящими стенками, внутри которой могут возбуждаться электромагнитные колебания. В объемном резонаторе могут возбуждаться колебания только определенных длин волн и определенной структуры, образующие стоячую волну. Частоты этих колебаний называются *резонансными* или *собственными частотами резонатора*, а колебания — *собственными колебаниями резонатора* или *модами*. Таким образом мода — это собственный тип колебаний резонатора.

Кроме собственных частот и собственных типов колебаний объемный резонатор, как и любой другой резонатор, характеризуется потерями энергии (например, тепловыми потерями и потерями на излучение в окружающее пространство). Это свойство резонатора характеризует добротность. *Добротность резонатора Q* есть отношение энергии, запасенной в резонаторе к средней энергии, теряемой за $1/2\pi$ часть периода колебаний.

$$Q = 2\pi E_{\text{полн}} / E_{\text{потерь}}(T)$$

где $E_{\text{полн}}$ - полная энергия, запасенная в резонаторе

$E_{\text{потерь}}(T)$ – энергия, теряемая за период

Кроме необходимых потерь на излучение в реальных резонаторах существуют дополнительные потери. Перечислим основные из них:

1. Дифракционные потери. Эти потери связаны с дифракцией электромагнитной волны на зеркалах резонатора, имеющих конечные размеры. Дифракционные потери определяются отношением $a^2 / (\lambda L)$. Чем меньше поперечные размеры a зеркала, тем больше дифракционные потери. Дифракционные потери зависят также от типа колебаний. Они минимальны для аксиальных TE_{m0} -мод и возрастают с увеличением индексов m и n моды. Это используют для селекции неаксиальных мод в резонаторах.

2. Потери на несовершенствах зеркал. Эти потери обусловлены возможным поглощением в зеркалах (что недопустимо), рассеянием на шероховатостях, отклонением геометрии зеркала от заданной и т. д. Для их исключения к зеркалам резонатора предъявляются исключительно высокие требования. В частности, обработка поверхности зеркала должна проводиться с погрешностью $\sim 0,1 \lambda$.

3. Потери на разъюстировку резонатора. Для того чтобы система из двух зеркал обладала резонансными свойствами, необходима очень точная их ориентация относительно друг друга. В частности, в плоском резонаторе отражающие поверхности двух плоских зеркал должны быть строго параллельны друг другу. Для выполнения этого требования зеркала резонатора очень точно настраивают (юстируют). Угол между плоскостями зеркал, называемый углом разъюстировки, в плоском резонаторе не должен превышать нескольких угловых секунд.

4. Потери в активном веществе. Они обусловлены поглощением и рассеянием энергии на различных дефектах в активной среде, заполняющей резонатор.

3.2. Плоский резонатор

Простейший оптический резонатор образуют два плоских зеркала, расположенные строго параллельно друг другу (рис. 7.2). Такой *плоский резонатор*, очевидно, можно рассматривать как открытый резонатор, образованный из прямоугольного объемного резонатора, четыре боковые стенки которого удалены. Прямая OO' , проходящая через центры зеркал перпендикулярно их поверхностям, называется *оптической осью резонатора*. Электромагнитные волны, распространяющиеся вдоль оптической оси, будут отражаться от зеркал и интерферировать между собой. Те из них, для которых выполняется условие резонанса $q\lambda/2 = L$, будут интерферировать на максимум, образуя в резонаторе стоячую волну, как показано на рис. 7.2. За счет многократного прохождения таких волн

резко увеличивается эффективность их взаимодействия с рабочим веществом, помещаемым в резонатор. Волны, распространяющиеся под углом (не слишком малым) к оптической оси, после нескольких отражений выходят из резонатора. Этим и достигается разрежение спектра собственных частот открытого резонатора по сравнению с объемным.

Колебания, распространяющиеся строго вдоль оптической оси резонатора, обладают наивысшей добротностью и называются *аксиальными колебаниями*.

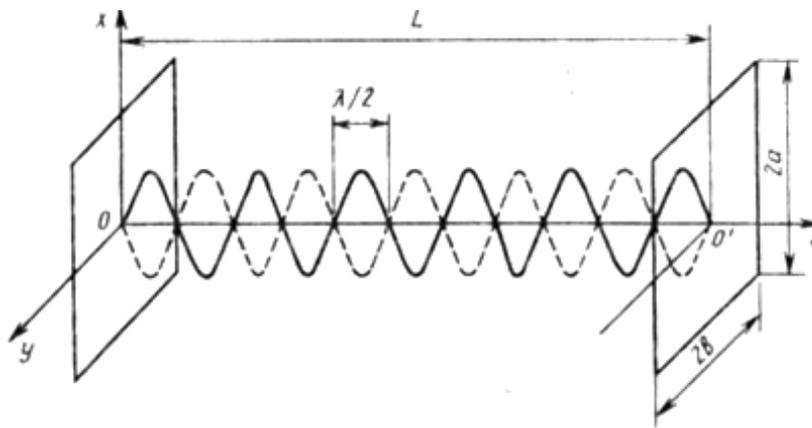


Рисунок 7.2 – Схема оптического резонатора с плоскими прямоугольными зеркалами (интерферометр Фабри-Перо)

Несмотря на столь существенное разрежение спектра собственных частот, частотный интервал между соседними типами колебаний в оптических резонаторах с размерами $L \ll 0,1 \dots 2$ м значительно меньше ширины спектральной линии даже в газах, где ее ширина минимальна по сравнению с другими веществами. Это означает, что в пределах спектральной линии активной лазерной среды обычно укладывается много (от десятков до десятков тысяч) собственных типов колебаний резонатора (рис. 7.3). Поэтому такой резонатор называется *многомодовым* или *много-частотным*. При этом добротность оптического резонатора существенно выше добротности спектральной линии. Спектр собственных частот в системе (активное вещество + резонатор) в оптическом диапазоне (в лазерах), как видно из рис. 7.3, будет определяться собственными

частотами резонатора, лежащими вблизи максимума спектральной линии.

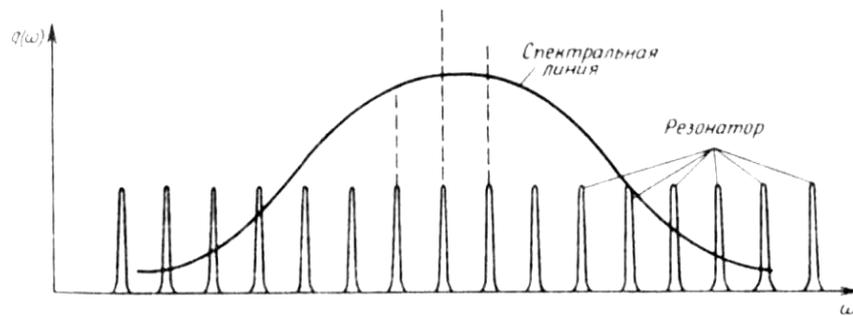


Рисунок 7.3 - Сравнение формы спектральной линии со спектром собственных частот оптического резонатора. Пунктирными линиями обозначены частоты, наиболее благоприятные для развития генерации

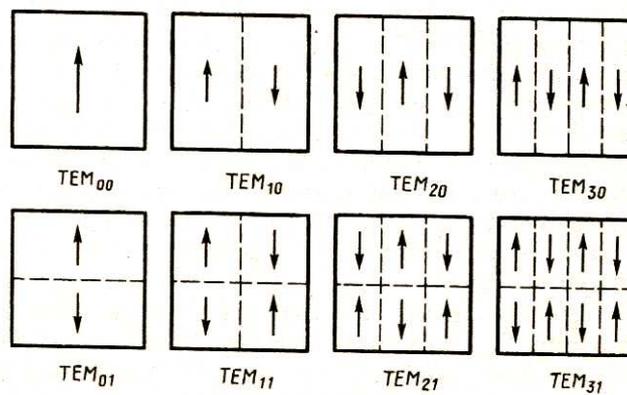


Рисунок 7.4 - Структура поля для некоторых типов колебаний в плоском резонаторе с квадратными зеркалами

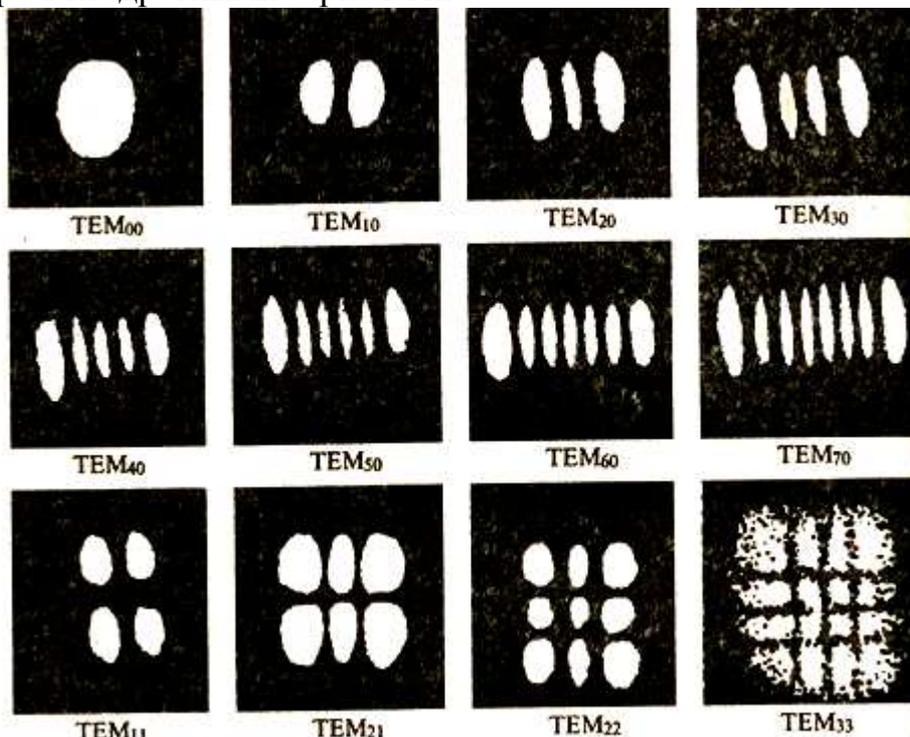


Рисунок 7.5 – Фотографии структуры поля на зеркалах резонатора гелий-неонового лазера

На рис. 7.4 показана структура электрического поля для простейших типов колебаний, а на рис. 7.5 — фотографии структуры светового поля на зеркалах резонатора гелий-неонового лазера. С увеличением индексов m и n амплитуда поля на краях зеркала возрастает. Она минимальная для аксиальных ТЕМ₀₀-колебаний.

Существенным является то, что при выполнении неравенства $a^2/(\lambda L) \ll (L/a)^2$ истинные размеры зеркал и расстояния между ними не имеют значения и единственным важным параметром является число Френеля $N = a^2/(\lambda L)$. С увеличением N амплитуда поля на краях зеркала (а следовательно, и дифракционные потери) уменьшается. Зависимость дифракционных потерь за один проход от N в двойном логарифмическом масштабе представлена на рис. 7.5.

Распределение поля внутри резонатора с плоскими зеркалами в разных сечениях, перпендикулярных оптической оси, изменяется незначительно. Это позволяет достаточно эффективно использовать активный объем рабочего вещества.

Недостатком плоского резонатора, с точки зрения его практического применения, является трудность юстировки: параллельность зеркал друг относительно друга должна быть выдержана с точностью нескольких угловых секунд. Этому недостатка лишены резонаторы со сферическими зеркалами.

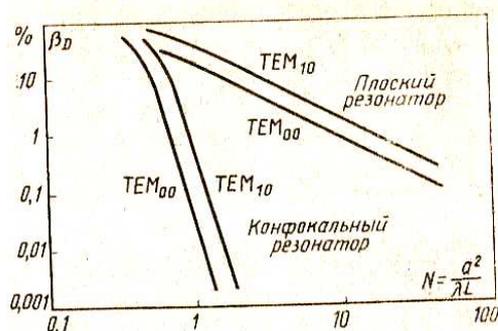


Рисунок 7.5 - Дифракционные потери β_D за один проход для простейших типов колебаний в зависимости от числа Френеля для круглых зеркал плоскопараллельного и конфокального резонаторов

Лекция №8

3.3 Резонаторы со сферическими зеркалами. Устойчивые и неустойчивые резонаторы.

Широкое распространение в лазерной технике получили оптические резонаторы, образованные двумя сферическими или одним сферическим и одним плоским зеркалами представлены на рис. 8.1, а—г.

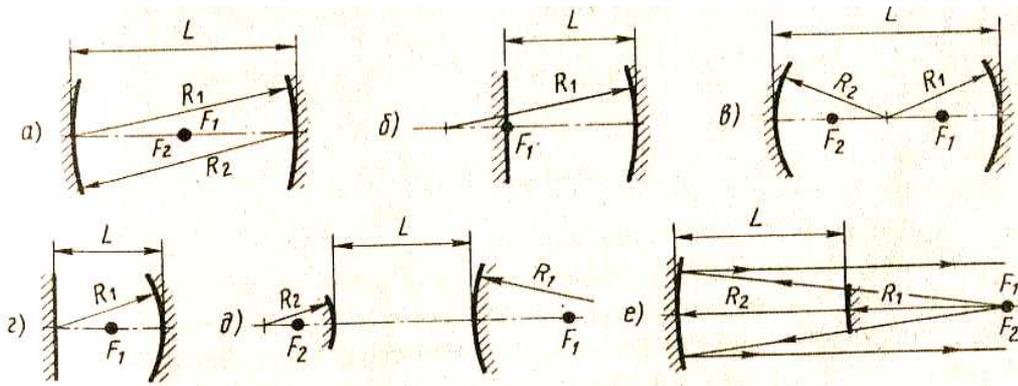


Рисунок 8.1 - Типы резонаторов со сферическими зеркалами: а) конфокальный ($R_1 = R_2 = L$); б) полуконфокальный резонатор $R_1 = 2L$; $R_2 = \infty$ в) concentрический ($R_1 = R_2 = L/2$) г) полуконцентрический ($R_1 = L$, $R_2 = \infty$) д) неустойчивый резонатор, общий случай е) телескопический неустойчивый резонатор

Особое место среди них занимает конфокальный резонатор, на свойствах которого остановимся подробнее.

3.3.1. Конфокальный резонатор

Конфокальным называют открытый резонатор (рис. 8.1, а), образованный одинаковыми сферическими зеркалами, оси и фокусы которых совпадают. Так как фокус сферического зеркала радиусом R расположен на расстоянии $R/2$, то это означает, что радиусы кривизны зеркал равны длине резонатора.

Пучок, распределение поля в поперечном сечении которого характеризуется функцией Гаусса, называется гауссовым пучком. Поверхности равных фаз для гауссова пучка представляют собой сферические поверхности.

След этих поверхностей изображен на рис. 8.2 пунктирными линиями. С приближением к центру резонатора радиусы кривизны синфазных поверхностей увеличиваются.

Таким образом, TEM_{00} -мода конфокального резонатора представляет собой сферическую волну, распространяющуюся из его центра и обладающую гауссовым распределением интенсивности в плоскости, перпендикулярной направлению распространения.

Расходимость пучка в основной моде конфокального резонатора определяется не поперечным, а продольным размером L резонатора.

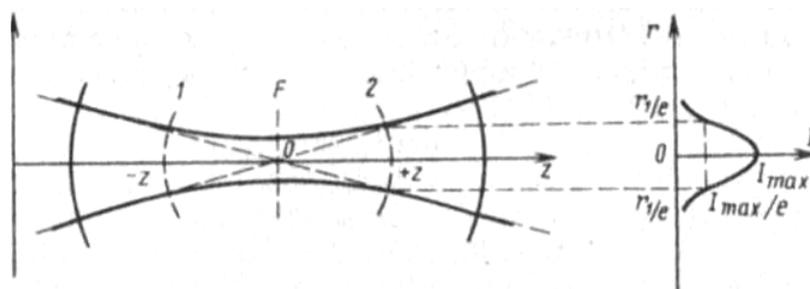


Рисунок 8.2 - Размер освещенного пятна синфазные поверхности и распределение интенсивности для аксиальной TEM_{00} -моды в конфокальном резонаторе

Аналогично, поперечный размер пучка $r_{1/e}$, не зависит от поперечного размера зеркала $2a$. Это является следствием сделанных выше предположений о малости значения отношения (a/L) и о большом значении числа Френеля $N=a^2/\lambda L$.

Перечисленные особенности распределения поля в конфокальном резонаторе имеют как преимущества, так и недостатки. Например, по сравнению с плоским резонатором поле в конфокальном резонаторе более плотно сконцентрировано у его оси и спадает на краях значительно быстрее. Это приводит к тому, что дифракционные потери в конфокальном резонаторе очень малы, в том числе для неаксиальных колебаний высокого порядка (см. рис. 7.5). Поэтому конфокальный резонатор не очень чувствителен к разъюстировке зеркал. Однако эта же причина затрудняет получение одномодового режима генерации и мешает полностью использовать объем активного вещества в резонаторе.

3.3.2. Резонаторы с произвольными сферическими зеркалами

Эти резонаторы состоят из двух соосных сферических зеркал радиусами R_1 и R_2 , расположенных на расстоянии L друг от друга. Свойства таких резонаторов легко определить, если найдена соответствующая конфокальная система, в которой две синфазные поверхности совпадают с поверхностями зеркал резонатора. Если известны радиусы R_1 и R_2 зеркал и расстояние между ними, то можно найти длину, а также радиусы кривизны и координаты зеркал эквивалентного конфокального резонатора. Если известно $L_{\text{эк}}$, то распределение поля внутри и вне резонатора будет таким же, как в эквивалентном конфокальном резонаторе.

$$L_{\text{эк}} = \sqrt{L(2R - 1)}.$$

Эквивалентный конфокальный резонатор определяет только собственные функции произвольного сферического резонатора. Нахождение собственных значений не может быть сведено к задаче о конфокальном резонаторе. В частности, собственные частоты \square_{mnq} в общем случае будут определяться более сложными выражениями. В обобщенном сферическом резонаторе частотное вырождение мод обычно исчезает.

Сферический резонатор может быть либо устойчивым, либо неустойчивым (в последнем случае резонатор теряет свои резонансные свойства). Например, если резонатор образован двумя одинаковыми сферическими зеркалами радиусами R , причем $L > 2R$, то, ему невозможно подобрать эквивалентный конфокальный резонатор. Это означает, что в таких резонаторах невозможно образование устойчивого стационарного распределения электромагнитного поля с малыми потерями.

Пусть R_1 и R_2 — радиусы зеркал, а L — расстояние между ними. Можно показать, что резонатор будет устойчивым и ему всегда можно подобрать эквивалентный конфокальный резонатор, если выполняется неравенство

$$0 \leq (L/R_1 - 1) (L/R_2 - 1) \leq 1.$$

На рис. 8.3 приведена диаграмма, иллюстрирующая условие устойчивости оптических резонаторов.

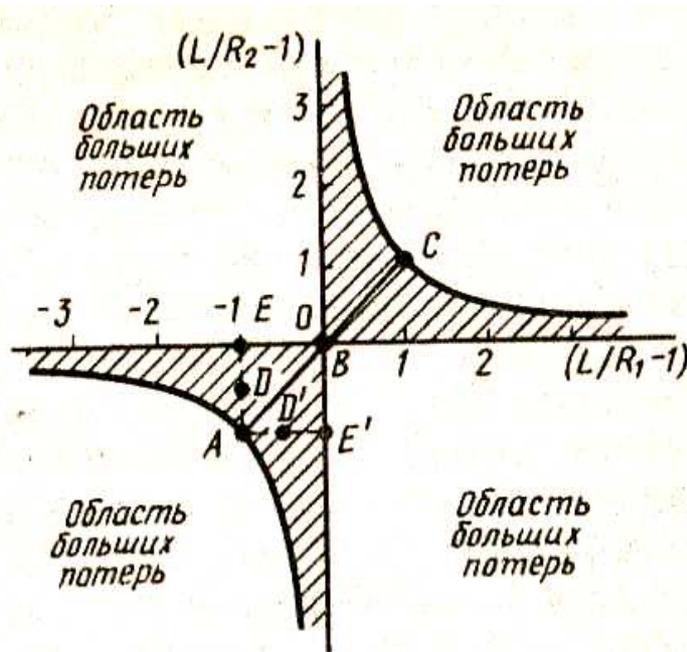


Рисунок 8.3 - Диаграмма устойчивости оптических резонаторов со сферическими зеркалами

Устойчивые области соответствуют, заштрихованным участкам. Отметим характерные точки на этой диаграмме. Точке A с координатами $(-1; -1)$ соответствует резонатор с плоскими зеркалами, расположенный на границе устойчивости. Точке B с координатами $(0; 0)$ соответствует конфокальный резонатор. Точке B с координатами $(0; 0)$ соответствует резонатор, образованный двумя одинаковыми сферическими зеркалами, оси и центры кривизны которых совпадают, т. е. $R_1=R_2=L/2$. Такой *концентрический резонатор* (см. рис. 8.3, в). Дифракционные возрастают с увеличением тип индексов m и n . Поэтому такой резонатор наряду с неустойчивыми резонаторами применяют для селекции (отбора) неаксиальных колебаний.

Точкам D и D' с координатами $(-1; -0,5)$ и $(0,5; -1)$ соответствует *полуконфокальный резонатор*, т. е. резонатор, образование сферическим зеркалом, радиус кривизны которого равен удвоенной длине резонатора (см.

рис. 8.1, б). Он находится в середине устойчивой области, и его свойства аналогичны конфокальному резонатору с удвоенной длиной. Такой резонатор часто применяют на практике. Точкам E и E' с координатами $(-1; 0)$ и $(0; -1)$ соответствует полуконцентрический *резонатор* (см. рис. 8.1, г) Он обладает особенностями, характерными для концентрического резонатора.

К основным недостаткам устойчивых резонаторов относят несовпадение объема каустики с объемом активной среды. Это приводит к уменьшению КПД и увеличению размеров лазера, а также к повышенным значениям плотности мощности в перетяжке, что при малых ее размерах приводит к оптическому пробую. Однако самым серьезным недостатком устойчивых резонаторов является невысокая лучевая стойкость используемых в качестве выходных окон диэлектрических оптических материалов.

3.3.3 Неустойчивые резонаторы и селекции поперечных типов колебаний

В ряде случаев требуется лазера, при котором генерация бы на одной, как правило, продольной моде. Такой режим называется одномодовым. Для его осуществления необходимо выделить основную моду при подавлении поперечных мод. Это можно сделать за счет увеличения потерь при увеличении поперечных индексов мод m и n . Но в устойчивых резонаторах дифракционные потери существенно меньше потерь на частичное пропускание зеркал, а потому добротность Q резонатора для аксиальных (продольных) и неаксиальных (поперечных) колебаний низших порядков слабо зависит от m и n . В этом случае разница в дифракционных потерях не может служить основой для селекции колебаний, но она может быть основана на различии в пространственном распределении поля мод с различными поперечными индексами m и n . Поскольку в резонаторах со сферическими зеркалами основная TEM_{00} -мода имеет гауссово распределение с минимальной шириной пучка $r_{1/e}$ то простейшим и часто применяемым на практике способом селекции является диафрагмированные пучка внутри резонатора. Для этого внутри резонатора помещают диафрагму, размер отверстия которой примерно равен

поперечному размеру моды, следующей за основной, т. е. ТЕМ₀₁-моды. Такая диафрагма будет создавать большие потери для неаксиальных колебаний, большая часть энергии которых сосредоточена по периферии. Очевидно, что при наличии диафрагмы внутри резонатора число Френеля N будет определяться не поперечным размером зеркала, а размером отверстия этой диафрагмы.

Недостатками обсуждавшего выше способа выделения основной ТЕМ₀₀-моды в устойчивом резонаторе являются:

а) малость поперечных размеров моды и, как следствие, малость используемого объема активного вещества;

б) внесение дополнительных потерь в основную моду.

В мощных лазерах, где необходимо применение большого объема активного вещества, эффективным средством селекции поперечных мод является переход к *неустойчивым резонаторам*. В неустойчивых резонаторах, параметры которых попадают в незаштрихованные области диаграммы (см. рис. 8.3), дифракционные потери даже основной моды велики и превосходят все остальные виды потерь. Для поперечных мод потери очень быстро нарастают при увеличении индексов m и n . Именно это обстоятельство приводит к эффективному выделению основной моды. В качестве примера на рис. 8.1, *д* и 8.1, *е* показаны два типа неустойчивых резонаторов.

$$(1 - L/R_1) (1 - L/R_2) > 1$$

(на диаграмме устойчивости рис. 8.3 они расположены в первом и третьем квадрантах вне заштрихованной области), и резонаторы отрицательной области, для которых

$$(1 - L/R_1) (1 - L/R_2) < 0$$

Неустойчивые резонаторы подразделяются на два класса: резонаторы положительной области, для которых (они расположены во втором и четвертом квадрантах диаграммы рис. 8.3).

Неустойчивые резонаторы могут быть применены лишь в лазерах с большим показателем усиления. Это обусловлено необходимостью компенсации больших потерь излучения за один проход, принципиально присутствующих в таких резонаторах.

Важно что это излучение, стремящееся выйти из резонатора (рис. 8.1 *д* — *е*), может быть использовано как полезное выходное излучение лазера.

К достоинствам неустойчивых резонаторов относятся:

а) возможность использования больших объемов активного вещества, что связано с отсутствием фокусировки излучения (гауссова сжатия) к оси резонатора;

б) возможность эффективной селекции поперечных типов колебаний;

в) возможность использования только отражающей оптики (например, металлических зеркал) как для создания резонатора, так и для вывода излучения, а также простота управления выводимой из резонатора энергии и достижения оптимальных условий вывода излучения.

Недостатком неустойчивых резонаторов, ограничивающим их применение мощными лазерами, является необходимость применения активных сред с большим показателем усиления. Кроме того поперечное сечение выходного пучка света в ближней зоне, как видно из рис. 8.1, *е*, имеет форму кольца (для круглых зеркал), что не всегда удобно. Однако вдали от выходного зеркала, в дальней зоне, темное пятно в центре исчезает.

Лекция №9

ТЕМА 4. ЭЛЕМЕНТЫ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ЛАЗЕРОВ

4.1. Отражательные элементы

Одним из основных требований, предъявляемых к лазерным отражателям, является стабильность геометрических характеристик зеркальных поверхностей вследствие значительного влияния на качество отражения пучка электромагнитного излучения. Изменение геометрических параметров вследствие неизотермичности материала отражателя вызывает термическое деформирование отражающих поверхностей при общем повышении температуры оптического элемента. Термическое деформирование связано с поглощением тепловой энергии поступающего на отражатель мощного лазерного излучения. Этот фактор определяется в основном физическими свойствами материала отражающего зеркала, его структурным состоянием, качеством обработки отражающей поверхности.

При создании высококачественных лазерных отражателей обеспечивают: снижение перегрева зеркал за счет понижения коэффициента отражения и уменьшения показателя поглощения на рабочей длине волны; уменьшение термодформаций за счет совершенствования конструкции системы, охлаждения отражающих поверхностей; снижение массы отражателя; стабильную конструкцию оправ и подвесок; повышение ресурса работы и хранения зеркал путем нанесения защитных покрытий на отражающие поверхности. Наиболее распространенными формами поверхностей отражателей являются плоскость, сфера и асферика. Точность формы плоских и сферических зеркал диаметром 200 мм составляет 0,5 мм, а асферических зеркал – 1,0 мм. Высота неровностей поверхностей – не более 0,01 мкм. Применение лазерных технологических установок для обработки изделий из высокопрочных жаростойких материалов обуславливает необходимость разработки и создания оптических элементов, стойких при высокой удельной

лучевой нагрузке. При поглощении лазерного излучения искажение волнового фронта вследствие термических деформаций не должно превышать $\lambda/10 \dots \lambda/4$. Качество изготовления отражающей поверхности контролируют по числу интерференционных полос – не более 3 при допустимом их искривлении 0,5.

Материалы для оптических элементов отражателей должны обладать хорошим рассеиванием поглощенной энергии излучения (теплопроводность должна быть достаточно высокой), легко накапливать внешнюю энергию до достижения теплового равновесия (теплоемкость должна быть низкой), иметь высокий и стабильный во времени коэффициент отражения, высокую оптическую прочность, высокую механическую прочность, обеспечивающую возможность прецизионного полирования отражающей поверхности, высокую оптическую однородность. Наиболее подходящими материалами для отражателей являются металлические оптические элементы, получившие название «металлооптика»: медь, бронзы некоторых марок, молибден и вольфрам, кремний, а также селенид цинка и германий с зеркальными и светоделительными покрытиями.

Диффузные отражатели – это оптические элементы, используемые для калибровки ослабленного лазерного излучения, его деполяризации и равномерного облучения фотоприемных площадок первичных измерительных преобразователей. Для диффузных отражателей мощных лазеров видимого диапазона используется молочное стекло. Конструктивно такие отражатели выполняют в виде круглых пластин диаметром до 60 мм толщиной 10...12 мм, устанавливаемых в опорные обоймы и прижимаемых резьбовыми кольцами.

Механизмы разрушения и параметры стабильности поверхности зеркал. Мощный поток излучения технологического лазера, интенсивность которого достигает значений $10^5 \dots 10^8$ Вт/м², приводит к частичному нарушению формы поверхности зеркала, изменению коэффициента отражения, а в некоторых случаях, к полному разрушению зеркала. Зеркало теряет свою форму из-за обратимой термодформации при нагреве за счет поглощения излучения; необратимой механической деформации при повышении мощности излучения;

оплавления поверхности при дальнейшем увеличении мощности излучения; изменения химического состава материала поверхности за счет окисления, соединения с веществом поверхностного загрязнения и т. п.; образования приповерхностной плазмы. Эти процессы определяются физическими характеристиками материала зеркала, его геометрией, а также интенсивностью падающего излучения.

Обратимые термодформации. Охлаждаемое зеркало толщиной δ при облучении непрерывным во времени пучком радиусом $R \gg \delta$ плотностью мощности q испытывает деформацию, которая приводит к увеличению размера δ на величину Δ_δ :

$$\Delta_\delta \cong q \cdot \frac{\partial^2}{2} \frac{\alpha_p A_{II}}{K}, \quad (9.1)$$

где α_p – коэффициент термического расширения, A_{II} – коэффициент поглощения; K – коэффициент теплопроводности.

Отношение $K/(\alpha_p A_{II})$ называют параметром стабильности зеркала по отношению к стационарным термодформациям. Чем больше этот параметр, тем меньше термодформации зеркала при воздействии непрерывного излучения. Предельно допустимая плотность мощности падающего лазерного пучка, при котором нет существенного искажения волнового фронта отраженного пучка определяется выражением:

$$q_{\text{дон}} = \frac{K}{\alpha_p A_{II}} \frac{\lambda}{10\delta^2}, \quad (9.2)$$

где λ – длина волны излучения.

Необратимые термодформации. Значение пороговой плотности мощности непрерывного излучения, приводящей к появлению текучести металла вследствие термодформаций, равно:

$$q_T \cong \frac{2}{\delta} \frac{\sigma_T K}{E \alpha_p A_{II}}, \quad (9.3)$$

где σ_T – предел текучести материала; E – модуль упругости.

Оплавление поверхности. Пороговая плотность мощности излучения, приводящая к оплавлению поверхности зеркала, определяется выражением:

$$q_{пл} = \frac{KT_{пл}}{A_{пл}\delta}, \quad (9.4)$$

где $T_{пл}$ – температура плавления материала.

Поверхностное окисление. При росте плотности мощности падающего излучения поверхность зеркала нагревается, начинается поверхностное окисление, коэффициент $A_{пл}$ увеличивается и поверхность нагревается еще сильнее. Поверхностное горение зеркал начинается при достижении поверхностью критической температуры T^* , зависящей от свойств отражающего материала.

Образование плазмы у поверхности зеркала. При достижении поверхностью металла некоторой пороговой температуры $T = T_{пор}$ (плотность мощности $q \approx 10^9 \dots 10^{11}$ Вт/м²) развивается ионизационно-тепловой взрыв – пробой в слое газа, примыкающем к поверхности металла. На воздухе $T_{пор} \approx 4 \cdot 10^3$ °С.

Ионизация в парах металла или материала пылинок, находящихся на поверхности отражающего материала, возможна при плотности мощности $q > 10^{11}$ Вт/м². Рассматриваемое явление проявляется в импульсных лазерах, где возможны большие пиковые значения интенсивности лазерного излучения.

Диэлектрические покрытия зеркал. Тонкие пленки диэлектриков толщиной 1...10 мкм наносят на поверхность зеркал методом вакуумного напыления. Это позволяет защитить зеркала от влаги, абразивных частиц, увеличить коэффициент отражения ρ , а также управлять поляризацией отражаемого излучения. Для повышения ρ наносят до четырех пар слоев, каждый слой толщиной $\delta = \lambda / 4n$, где n – показатель преломления.

4.2. Проходные элементы

Основными требованиями, предъявляемыми к оптическим элементам проходной оптики, являются: высокая механическая и термическая прочность;

оптическая однородность заготовки, из которой изготавливается элемент; высокая оптическая прочность и малое поглощение излучения на рабочей длине волны; хорошая теплопроводность, обеспечивающая рассеяние материалами поглощенной энергии излучения; устойчивость к воздействию внешних факторов; высокая химическая стойкость; малая шероховатость рабочих поверхностей.

Линзы и пластины – основные проходные элементы оптических систем технологических лазеров. Они служат для транспортирования и формирования излучения, для герметизации и защиты внутренних полостей и деталей лазерных установок. Примеры выполнения линз приведены на рисунке 8. Линзы из селенида цинка, например, с двусторонним просветляющим покрытием типа 37И.200 (рисунок 9.1, а), имеющая точность формы поверхностей 5 интерференционных колец и искривление 1 кольцо, и из поликристаллической керамики ПО-4 (рисунок 9.1, б) устанавливаются в потоке излучения СО₂-лазера, $\lambda=10,6$ мкм.

Пластины, используемые для выходных окон СО₂-лазеров, представлены на рисунке 9.2. Пластина из селенида цинка с двусторонним просветляющим покрытием типа 37И.200 и пластина из хлористого калия с двусторонним просветляющим покрытием типа 122И.37И.150 имеют характеристики: спектральный коэффициент пропускания не менее 0,5 при $\lambda=10,6$ мкм; точность формы поверхностей пластины – 3 интерференционных кольца; искривление – 0,5 кольца.

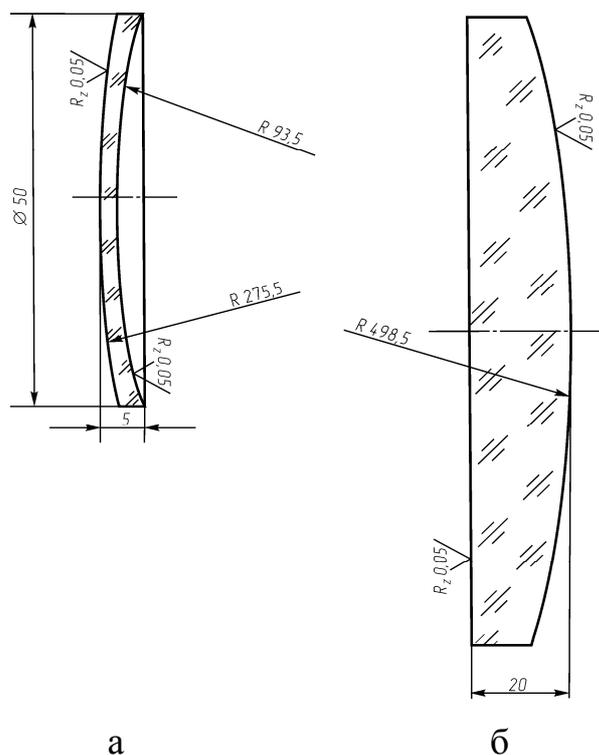


Рисунок 9.1 – Линзы проходных систем: линза из селенида цинка (а); линза из поликристаллической керамики ПО-4 (б).

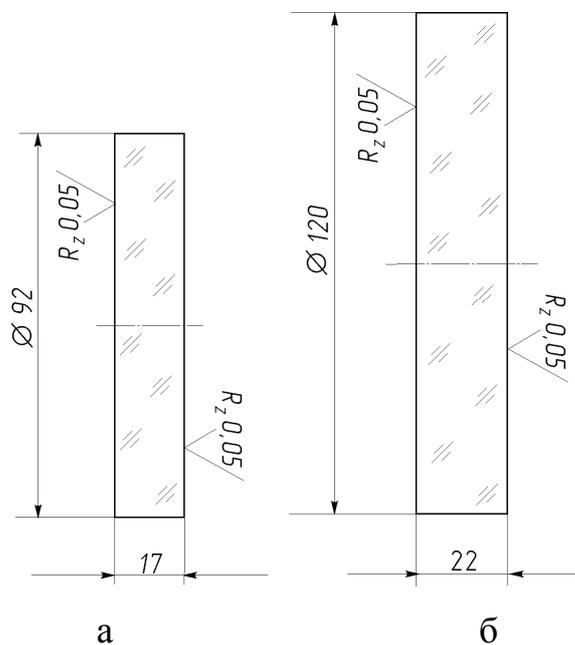


Рисунок 9.2 – Выходные окна проходных систем: пластина из селенида цинка (а); пластина из хлористого калия (б)

Физические характеристики материалов оптических элементов в ИК-области. Проходные оптические элементы технологических лазеров испытывают

большие тепловые и механические нагрузки, подвержены разрушающим факторам лазерного излучения, особенно в случае их применения в CO₂-лазерах.

Рефракционные характеристики ИК-материалов содержат значения n , и $dn/dT = f(T)$. Коэффициент зеркального отражения ρ от границы раздела диэлектрических сред определяют по формулам Френеля. При нормальном падении луча на оптический элемент коэффициент зеркального отражения равен:

$$\rho = \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2, \quad (9.5)$$

где n_1 , n_2 – показатели преломления первой и второй по ходу луча диэлектрических сред.

Проходные оптические элементы ИК-области могут исказить волновой фронт проходящего через них излучения или разрушаться по следующим причинам: деформация окна вывода лазерного излучения под действием перепада давлений между атмосферным воздухом и рабочим газом в объеме вакуумного корпуса лазера; термодформация из-за нагрева; термическое раскалывание; поверхностный или объемный оптический пробой.

Искажение волнового фронта лазерного излучения при термодформации оптического элемента. При прохождении пучка лазерного излучения через оптический элемент часть энергии поглощается. В результате происходит нагрев и термодформации оптического элемента, приводящие к искажениям волнового фронта за счет неоднородностей нагрева. Условие малости искажений волнового фронта после прохождения лазерного излучения через окно толщиной δ накладывает ограничение на полную мощность пучка P_Q :

$$P_Q \ll \frac{K}{\chi\beta} \frac{\lambda}{4\delta} \equiv P_{don}, \quad (9.6)$$

где $\chi = \frac{dn}{dT} + \alpha(n-1) + \chi_3$; χ_3 – слагаемое, соответствующее изменениям фазы волнового фронта за счет упругооптического эффекта; β – коэффициент объемного поглощения; δ – толщина слоя.

Термическая стабильность окна, охлаждаемого по периметру, по отношению к искажениям волнового фронта проходящего пучка зависит от полной мощности пучка, а не от его плотности мощности.

Термораскалывание при поглощении лазерного излучения. При превышении мощностью пучка некоторой критической величины $P_{кр}$ азимутальное напряжение в некоторой области окна превышает предел прочности, происходит термораскалывание. Критическая мощность, при которой происходит термораскалывание, определяется уравнением:

$$P_{кр} = \gamma \frac{4\pi K \sigma}{\beta \alpha_p E}, \quad (9.7)$$

где γ – модуль сдвига; σ – разрушающее напряжение.

Оптический пробой. Основными процессами, приводящими к разрушению оптических элементов, являются объемный и приповерхностный оптический пробой. Объемный пробой происходит из-за наличия включений, неоднородностей, самофокусировки пучка и электрического пробоя. Наличие частиц включений размерами 0,5...1 мкм приводит к развитию пробоя в результате поглощения излучения этими частицами. Электрический пробой в объеме происходит за счет многофотонного поглощения при достаточно сильных интенсивностях пучка. Для щелочно-галогенидного кристалла NaCl при $\lambda = 10,6$ мкм: $q_{пр} = 2 \cdot 10^{10}$ Вт/м².

Приповерхностный пробой происходит на входной и выходной поверхностях окна при меньших интенсивностях, чем пробой в объеме. Основные механизмы возникновения приповерхностного пробоя: эмиссия электронов и УФ-излучения из микротрещин с последующим лавинным размножением в электрическом поле ИК-излучения; пробой в парах материала окна; пробой в парах воды, абсорбированной поверхностным слоем материала и испарившейся при нагреве лазерным излучением.

Возможны различные механизмы нарушения оптического качества и разрушения покрытий при поглощении лазерного излучения: оптические искажения и разрушения из-за нагрева при поглощении и из-за поглощения

макровключениями; отслаивание покрытия от подложки из-за разогрева; внутренние повреждения, в том числе пробой.

Лекция № 10

ТЕМА 5. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ЛАЗЕРОВ

5.1. Материалы для активных элементов твердотельных лазеров.

Среди лазерных кристаллов наиболее представительной является группа ионных кристаллов с примесями. Кристаллы неорганических соединений фторидов (CaF_2 , LaF_3 , LiYF_4), оксидов (например, Al_2O_3) или сложных соединений (CaWO_4 , $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$, $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$) содержат в кристаллической решетке ионы активных примесей, редкоземельных (самария Sm^{2+} , диспрозия Dy^{2+} , тулия Tm^{2+} , Tm^{3+} , празеодима Pr^{3+} , неодима Nd^{3+} , эрбия Er^{3+} , гольмия Ho^{3+}) или переходных (хрома Cr^{3+} , никеля Ni^{2+} , кобальта Co^{2+} , ванадия V^{2+}) элементов. Концентрация активных примесей в кристаллах составляет от 0,05 до нескольких процентов. Генерация возбуждается методом оптической накачки, причем энергия поглощается в основном примесными ионами.

Лазерные кристаллы с дозированными примесями обычно выращиваются направленной кристаллизацией расплава в специальных установках, обеспечивающих высокую стабильность температуры расплава и скорости роста кристалла. Из выращенных кристаллов вырезаются цилиндрические стержни длиной до 250 мм и диаметром 2...20 мм. Торцы стержней шлифуются, а затем полируются. В большинстве случаев стержни изготавливаются с плоскими торцами, параллельными друг другу, с точностью 3-5", и строго перпендикулярными геометрической оси стержня.

Рубин ($\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}^{3+}$) стал первым рабочим веществом, на котором была получена генерация вынужденного излучения. При воздействии рентгеновского излучения и фотовозбуждении рубин люминесцирует в области 0,510...0,595 мкм. В связи с хорошими термическими, оптическими и механическими характеристиками синтетический монокристаллический рубин нашел применение в лазерной технике как материал для активных элементов. Степень окраски активного элемента увеличивается от светло-розового до

темно-вишневого при росте содержания хрома. В рубиновых лазерах обычно используются активные элементы розового цвета, создающие генерацию на длине волны $\lambda = 0,6943$ мкм. Часто их выполняют в виде цилиндрических стержней с полированными взаимно параллельными основаниями, с учетом взаимной ориентации оптической оси монокристалла и оси стержня (при параллельности выходящий луч поляризован по кругу или по эллипсу, при перпендикулярности – поляризован линейно).

Рубиновые лазеры обычно используют в импульсном режиме, так как при работе в непрерывном режиме в кристалле выделяется большое количество тепла, приводящего к перегреву кристалла, нарушению его оптической однородности и снижению генерационной способности. Применяемые рубиновые стержни имеют диаметр до 10 мм, длину до 300 мм.

Гранат алюмоиттриевый с неодимом ($Y_3Al_5O_{12}:Nd^{3+}$) – синтетический кристалл кубической симметрии, представляющий собой изотропный кристалл алюмоиттриевого граната ($Y_3Al_5O_{12}$), в котором часть ионов иттрия замещена трехвалентными ионами неодима Nd^{3+} . Алюмоиттриевый гранат с неодимом не растворяется в воде, в серной, соляной, азотной и фтористоводородной кислотах. Имея хорошие термические, оптические, термооптические и механические характеристики $Y_3Al_5O_{12}:Nd^{3+}$ широко используется в лазерной технике в качестве материала для активных элементов твердотельных лазеров. Низкие пороги возбуждения и высокая теплопроводность позволяют создать лазеры, работающие при большой частоте следования импульсов. Алюмоиттриевый гранат с неодимом прозрачен для излучения в области спектра 0,24...6,0 мкм, генерация создается на длине волны $\lambda = 1,064$ мкм.

Выпускают стержни диаметров до 60 мм и длиной до 750 мм. Недостатками данного материала для оптических элементов являются высокая стоимость, обусловленная сложностью изготовления (длительность выращивания стержня длиной около 150 мм превышает 300 ч, что требует непрерывной работы соответствующего оборудования в течение 12...15 суток)

и относительно высокая стоимость технологической оснастки: иридиевые тигли для выращивания кристаллов и др.

Лейкосапфир ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) – прозрачный природный и синтетический монокристалл. Синтетический лейкосапфир – бесцветный двулучепреломляющий кристалл корунда. Исходным материалом являются алюмоаммониевые квасцы, очищенные рекристаллизацией в растворе и прокаленные. Искусственный лейкосапфир выгодно отличается от природных аналогов высоким структурным совершенством и существенно меньшим содержанием химических и механических примесей. Растворимость лейкосапфира в воде незначительная. Материал слабо растворяется в кипящей азотной и ортофосфорной кислотах при 573 К. При действии рентгеновского излучения и фотовозбуждении наблюдается люминесценция в области спектра 0,510...0,595 мкм независимо от предварительной облученности монокристалла лейкосапфира.

Лейкосапфир применяют в лазерной технике в качестве деталей проходной оптики, конструктивных элементов твердотельных и ионных лазеров, для ламп накачки лазеров и фазовых пластинок для области спектра 5 мкм. Низкий температурный коэффициент линейного расширения, высокая прочность и твердость позволяют использовать лейкосапфировые фазовые пластины при большой мощности лазерного излучения. Коэффициент внутреннего пропускания лейкосапфира существенно зависит от качества исходного сырья и используемых для выращивания монокристаллов-заготовок. Улучшение светопропускания достигается нанесением на полированные поверхности образцов просветляющих пленок диоксида титана или кремния. Стоимость лейкосапфира достаточно высокая: более чем в 400 раз превышает стоимость неглазуированного оксида алюминия.

Кристаллы бората лития применяются для работы в видимом и ультрафиолетовом диапазоне. Обладают сочетанием физических и оптических свойств, которое делает его наиболее подходящим материалом для удвоения и утроения частоты, например, Nd:YAG-лазеров. Лазерные системы, ключевым

компонентом которых является борат лития, широко используются в офтальмологии, обработке материалов, маркировке, записи и хранении информации, обработке полупроводников и других областях.

Борат лития применяется для оптических параметрических осцилляторов и усилителей. Имеет следующие особенности: широкий диапазон прозрачности (от 0,16 до 2,6 мкм), хорошие нелинейные свойства, высокую оптическую однородность, широкий угол приема, хорошую сопротивляемость термическому повреждению. Кристаллы изготавливают в виде прямоугольных параллелепипедов сечением до 20×20 мм, длиной до 50 мм.

Кристалл цезий-борат лития применяется для работы в ультрафиолетовом диапазоне, прозрачен вплоть до 0,180 мкм. Главным недостатком является его сильная гигроскопичность. В неконтролируемой окружающей среде он активно реагирует с водой, теряя свои оптические свойства. Эта проблема может быть решена, если кристалл поддерживается при температуре около 150 °С. Кристаллы цезий-бора поставляются в вакуумных контейнерах и должны монтироваться в печи или на стойке с подогревом.

Цезий-борат лития применяется для генерации четвертой и пятой гармоник YAG, оптических параметрических осцилляторов, генерации суммарных частот. Имеет следующие особенности: малые оптические потери, широкий диапазон спектральной и угловой восприимчивости. Кристаллы изготавливают в виде прямоугольных параллелепипедов сечением от 5×5 мм до 20×20 мм, длиной до 30 мм или большей длины при меньшем сечении.

5.2. Стекла для активных элементов лазеров

Стекло, твердый аморфный материал, полученный в процессе переохлаждения расплава. Для стекла характерна обратимость перехода из жидкого состояния в метастабильное, неустойчивое стеклообразное состояние. При определенных температурных условиях кристаллизуется. Стекло не плавится при нагревании подобно кристаллическим телам, а размягчается, последовательно переходя из твердого состояния в пластическое, а затем – в жидкое. По агрегатному состоянию стекло занимает промежуточное положение

между жидким и кристаллическим веществами. Упругие свойства делают стекло сходным с твердыми кристаллическими телами, а отсутствие кристаллографической симметрии (и связанная с этим изотропность) приближает к жидким. Склонность к образованию стекла характерна для многих веществ (селен, сера, силикаты, бораты и др.). Стеклом называют также отдельные группы изделий из стекла, например строительное стекло, тарное стекло, химико-лабораторное стекло и др. Изделия из стекла могут быть прозрачными или непрозрачными, бесцветными или окрашенными, люминесцировать под воздействием, например, ультрафиолетового и γ -излучения, пропускать или поглощать ультрафиолетовые лучи и т. д. Наибольшее распространение получило неорганическое стекло, характеризующееся высокими механическими тепловыми, химическими и др. свойствами. Вырабатываются стекла, защищающие от ионизирующих излучений, стекла индикаторов проникающей радиации, фотохромные стекла с переменным светопропусканием, стекло, применяемое в качестве лазерных материалов, увиолевое стекло, пеностекло, растворимое стекло и др.

Физико-химические свойства стекла. Стекло оптическое – прозрачное стекло любого химического состава, обладающее высокой степенью однородности. Содержат PbO, SiO и другие оксиды; кроны – SiO, щелочные и другие оксиды.

Свойства стекла зависят от сочетания входящих в их состав компонентов. Наиболее характерное свойство стекла – прозрачность (светопрозрачность оконного стекла 83–90%, а оптического стекла – до 99,95%). Стекло типично хрупкое тело, весьма чувствительное к механическим воздействиям, особенно ударным, однако сопротивление сжатию у стекла такое же, как у чугуна. Для повышения прочности стекло подвергают упрочнению (закалка, ионный обмен, при котором на поверхности стекла происходит замена ионов, например натрия, на ионы лития или калия, химическая и термохимическая обработка и др.), что ослабляет действие поверхностных микротрещин (трещины Гриффитса), возникающих на поверхности стекла в результате воздействия

окружающей среды (температура, влажность и пр.) и являющихся концентраторами напряжений, и позволяет повысить прочность стекла в 4–50 раз. Обычно для устранения влияния микротрещин применяют стравливание или сжатие поверхностного слоя. При стравливании дефектный слой растворяется плавиковой кислотой, а на обнажившийся бездефектный слой наносится защитная пленка, например из полимеров. При закалке поверхностный слой сжимается, что препятствует раскрытию трещин. Плотность стекла 2200–8000 кг/м³, твердость по минералогической шкале 4,5–7,5, микротвердость 4–10 Гн/м², модуль упругости 50–85 Гн/м². Предел прочности стекла при сжатии равен 0,5–2 Гн/м², при изгибе 30–90 Гн/м², при ударном изгибе 1,5–2 Гн/м². Теплоемкость стекла 0,3–1 кДж/кг·К, термостойкость 80–1000 °С, температурный коэффициент расширения (0,56...12) 10⁹ 1/К. Коэффициент теплопроводности стекла мало зависит от его химического состава и равен 0,7–1,3 Вт/(м·К). Коэффициент преломления 1,4–2,2, электрическая проводимость 10⁻⁸...10⁻¹⁸ Ом⁻¹ см.

Активные элементы твердотельных лазеров должны обладать комплексом свойств, обеспечивающих длительный ресурс работы, высокую мощность генерации и направленность лазерного излучения.

Одними из основных требований к материалам активных элементов являются:

- оптическая однородность материала;
- стабильность материала (отсутствие оптических искажений) в процессе генерации;
- возможность варьирования в широких пределах термооптических характеристик материала путем изменения его состава для их сочетания с другими тепловыми характеристиками;
- высокая теплопроводность материала;
- высокая оптическая прочность и фотохимическая стойкость, обеспечивающие надежность работы и длительный ресурс при большой мощности генерации;

- слабое поглощение излучения в материале на рабочей длине волны;
- технологичность изготовления материала и его обработки;
- возможность получения заготовок материала больших размеров;
- отсутствие токсичности материала и продуктов его обработки;
- невысокая стоимость материала и исходного сырья для его изготовления.

Для активных элементов твердотельных лазеров широкое распространение получили кристаллические и аморфные конденсированные среды, играющие роль матриц, с введенными в них добавками (чаще всего в виде ионов лантаноидов), выполняющими функции активаторов. Эти материалы достаточно полно удовлетворяют перечисленным требованиям. Для технологических лазеров в качестве материалов для активных элементов наиболее широкое применение получили неодимовые стекла, рубин $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}^{3+}$ (для импульсного режима работы) и алюмоиттриевый гранат с неодимом $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Nd}^{3+}$ (для импульсного и непрерывного режима работы). Разработаны новые материалы, перспективные для изготовления активных элементов: неодимовый ортованадат иттрия, борат лития, бета-борат бария, цезий-борат лития, калий гадолиниевый вольфрамат, иттрий-литий-фторид, легированный редкоземельными ионами и др.

Лазерные стекла имеют неупорядоченную внутреннюю структуру. Наряду со стеклообразующими компонентами SiO_2 , B_2O_3 , P_2O_5 , BeF_2 в них содержатся Na_2O , K_2O , Li_2O , MgO , CaO , BaO , Al_2O_3 , Sb_2O_3 . Активными примесями служат чаще всего ионы неодима Nd^{3+} , используются также гадолиний Gd^{3+} , эрбий Er^{3+} , гольмий Ho^{3+} , иттербий Yb^{3+} .

В лазерных стеклах достигается высокая концентрация активных частиц, например, до 6% по массе ионов неодима Nd^{3+} . Другим достоинством стекол является возможность изготовления активных элементов больших размеров практически любой формы с очень высокой оптической однородностью. К недостаткам стекол в качестве лазерных материалов относят сравнительно

широкую полосу генерации (3...10 нм) и низкую теплопроводность, препятствующую быстрому отводу тепла при мощной оптической накачке.

Неодимовые стекла, т. е. стекла, активированные трехвалентными ионами неодима, получили широкое распространение в качестве активных сред импульсных твердотельных лазеров с длиной волны генерации 1,06 мкм. Такие стекла имеют характерную сиреневую окраску. Общими требованиями к неодимовым стеклам являются: высокая оптическая однородность; эффективное преобразование энергии излучения лампы накачки в энергию излучения лазера; высокая прозрачность на длине волны генерации; высокая оптическая и термическая прочность; высокая химическая стойкость.

Лазерные стекла различаются по своим характеристикам. Силикатное лазерное стекло (ГЛС). Достаточно высокие энергетические и термомеханические параметры стекла на силикатной основе марок ГЛС1 и ГЛС19 позволяют применять их в частотных технологических лазерах. Стекло ЛГС61, обладающее большой лазерной эффективностью и высокой термостойкостью, является уникальным заменителем дорогих лазерных кристаллов. Силикатные стекла ГЛС6, ГЛС7 и ГЛС8, обеспечивающие минимальные термические искажения волнового фронта при накачке активного элемента, относят к классу атермальных.

Фосфатные лазерные стекла (ЛФС) отличают высокий коэффициент усиления, большее сечение индуцированного излучения, более узкая линия генерации, оптическая атермальность, устойчивость к действию УФ-излучения. Они обладают несколько меньшей механической и термической прочностью, чем силикатные стекла. Стекла ЛФС4 и ЛФС5 имеют низкие значения нелинейного показателя преломления. Среди фосфатных стекол большей термостойкостью обладает стекло ЛФС5.

Изготовленные из лазерных стекол активные элементы имеют высокую оптическую однородность ($\Delta n_D = 10^{-6}$ на длине до 1000 мм), малое поглощение на длине волны генерации $(1...2) \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$ и не имеют дефектов в виде свилей и

крупных пузырей. Лазерное стекло производят различных форм и размеров: цилиндрические стержни, пластины, риски.

Лекция № 11

5.3. Материалы для элементов проходной оптики. Диэлектрические покрытия зеркал и защитные просветляющие покрытия.

Выбор материала для проходной лазерной оптики определяется в первую очередь пропусканием излучения рабочей длины волны. Реализация технологических возможностей CO₂-лазеров как импульсного, так и непрерывного действия в ряде случаев ограничивается разрушением оптических материалов. Поэтому их применение в мощных лазерах на CO₂ обусловлено требованиями, основными из которых являются:

- малый коэффициент поглощения β для $\lambda = 10,6$ мкм;
- высокая оптическая прочность, позволяющая достичь требуемых значений поверхностного и объемного порога разрушения и ресурса работы;
- высокая механическая прочность материала, определяемая пределом упругости или прочности на изгиб $\sigma_{изг}$ и обеспечивающая технологичность высококачественного полирования рабочих поверхностей;
- хорошая оптическая однородность, стабильная во времени и в процессе эксплуатации;
- высокая термостойкость в рабочем диапазоне температур, т. е. высокие критические температуры материала (плавления, диссоциации и т. п. в зависимости от механизма разрушения);
- высокая теплопроводность, обеспечивающая рассеяние поглощенной материалом энергии излучения;
- минимальное изменение показателя преломления с изменением температуры;
- большая теплоемкость;
- малый коэффициент теплового расширения α ;
- технологичность оптической обработки, негигроскопичность;
- высокая химическая стойкость и нетоксичность материала;
- невысокая стоимость материала;
- удобство монтажа и юстировки системы оптических элементов.

Полностью удовлетворяющие всем перечисленным требованиям материалы не созданы. Однако целый ряд материалов, прозрачных в ИК-области спектра, этим требованиям частично удовлетворяет. К ним относятся: тугоплавкие монокристаллы Ge, Si (применяется в основном в спектральном диапазоне 3...5 мкм); полупроводниковые соединения ZnSe, CdTe, GaAs; монокристаллические растворы на основе солей таллия, известные под шифрами КРС-5 и КРС-6; щелочно-галогидные кристаллы KCl, NaCl, CaF₂, LiF, BaF₂; оптическая керамика типа КО3 (на основе CaF₂), КО4 (на основе ZnSe) и КО6 (на основе CdTe).

Так как каждый из этих материалов не полностью отвечает поставленным требованиям (например, КРС-5 и КРС-6 имеют малую термостойкость и достаточно токсичны; Ge, GaAs, CdTe непрозрачны для видимого света, что затрудняет юстировку; KCl, NaCl, LiF гигроскопичны; ZnSe, BaF₂, и CdTe имеют высокую стоимость), то целесообразность применения того или иного материала определяется отдельно для каждого конкретного случая. Собственное поглощение в щелочно-галогидных кристаллах мало (кроме механически очень прочного BaF₂). Расчетные значения минимально достижимых потерь значительно меньше, чем в реальных кристаллах, вследствие дополнительного поглощения излучения дефектами и включениями. Обычно соли типа KCl и NaCl имеют коэффициент поглощения 0,2...0,4 м⁻¹, в то время как высокочистые и совершенные кристаллы имеют β на порядок меньше, однако обладают малой механической прочностью, что ограничивает их применение в мощных лазерах. Разработанный метод упрочнения (пластическое деформирование путем одноосного сжатия монокристаллов) на порядок увеличивает механическую прочность при увеличении оптического поглощения в 1,5...2 раза (у прессованных кристаллов KCl $\beta \sim 0,1$ м⁻¹). Щелочно-галогидные кристаллы, имеющие по сравнению с полупроводниковыми большее пропускание, значительно уступают последним в прочности, гигроскопичности, теплопроводности.

Монокристаллы ZnSe и GaAs обычно имеют недостаточно стабильное качество. Так, для ZnSe коэффициент поглощения отличается почти на порядок

от кристалла к кристаллу в зависимости от исходного сырья и условий выращивания. В полупроводниках мощное лазерное излучение приводит к нелинейности поглощения. В германии при 313 К начинается нелинейный рост поглощения, и это не позволяет использовать его в очень мощных лазерах на CO₂, в то время как для ZnSe и GaAs нелинейные процессы начинают сказываться лишь при температурах свыше 573 К.

Критерием применимости того или иного материала для лазерных окон служит средняя мощность, при которой отсутствуют разрушения или избыточные искажения. Плотность потока, которая обуславливает появление видимых разрушений, характеризует оптическую прочность материала, являющуюся функцией ряда параметров, в том числе полной мощности, площади пятна облучения и времени воздействия. Порог оптической прочности лазерного окна – это значение плотности потока, которую неохлаждаемое окно выдерживает в течение времени установления стационарного температурного поля или времени распространения радиального теплового потока до охладителя.

Арсенид галлия (GaAs) – монокристалл синтетический с кубической симметрией. Представляет собой полупроводниковое соединение. При комнатной температуре не растворим в воде; при 573 К растворимость около 50 г на 100 г воды; не окисляется на воздухе при нагревании до 573 К; активно разлагается кислотами; растворяется в водных растворах сильных окислителей.

GaAs имеет слабую растворимость в воде, поэтому отсутствует необходимость в специальной защите от влаги окружающей среды, достаточно высокое значение теплопроводности, сравнительно высокую оптическую прочность, хорошее пропускание оптического излучения в области длин волн $\lambda = 1,5 \dots 15$ мкм (для деталей толщиной 2 мм спектральный коэффициент пропускания превышает 0,5). Перечисленные свойства позволяют использовать GaAs для изготовления оптических элементов ИК-систем, в частности, для оптических систем лазеров мощностью свыше 1 кВт. К недостаткам арсенида галлия относят его высокую стоимость (цена заготовки диаметром 25 мм и

толщиной 3 мм превышает 200 \$); непрозрачность в видимой области спектра, что затрудняет проверку и юстировку систем, содержащих оптические детали из этого материала.

Хлористый калий (КСl) – природный и синтетический моно- и поликристаллический материал с достаточно хорошей степенью однородности; оптически изотропный; очень хрупкий и мягкий. Обладает высокой гигроскопичностью, растворимостью и низкой термостойкостью. Растворяется в щелочах, эфире, глицерине. Незначительно растворяется в спирте. Гигроскопичность КSl зависит от кристаллографической ориентации, имеет минимум при ориентации по грани с минимальной поверхностной энергией. По сравнению с другими широко применяемыми щелочно-галогенидными кристаллами КSl в нормальных условиях является наиболее гидростойким. Уменьшение гигроскопичности и растворимости достигается путем химической защиты (например, нанесением пленки 2%-м раствором полистирола в толуоле) и упрочнением при горячей распрессовке.

В связи с тем, что область оптической прозрачности КSl охватывает интервал спектра 0,3...21 мкм, хлористый калий используется для изготовления оптических элементов, работающих в ближнем УФ-, видимом и ИК-диапазонах. В частности, широко применяется как материал для конденсорных линз УФ-микроскопов, для диспергирующих призмных элементов и окон в ИК-спектральной аппаратуре. Прозрачность КSl в видимом участке спектра облегчает юстировку оптических систем, содержащих элементы из этого материала. КSl применяется для изготовления плоских и сферических элементов оптических систем технологических лазеров, работающих в ИК-области спектра. Основным эксплуатационным недостатком КSl как материала для оптических элементов является способность интенсивно поглощать влагу окружающей среды. Это приводит к порче полированных поверхностей элементов, необходимости их повторного переполитирования, снижению спектрального коэффициента пропускания и оптической прочности.

Хлористый натрий (NaCl) также представляет собой природный или синтетический моно- или поликристаллический материал с высокой степенью однородности. Материал очень хрупкий и мягкий, оптически изотропный, обладает высокой гигроскопичностью, растворимостью и низкой термостойкостью. Растворяется в воде, в спиртах, глицерине, аммиаке. Не растворяется в ацетоне и эфире. Уменьшение гигроскопичности и растворимости достигается путем химической защиты. Синтетический хлористый натрий получается методом выращивания из расплава. Является недорогим кристаллом (стоимость заготовки диаметром 25 мм и толщиной 3 мм составляет 6 \$). В связи с тем, что область оптической прозрачности NaCl охватывает интервал спектра 0,25...18 мкм, хлористый натрий используется для изготовления оптических элементов, работающих в ближнем УФ-, видимом и ИК-диапазоне. Прозрачность NaCl в видимом участке спектра облегчает юстировку оптических систем, содержащих элементы из этого материала. NaCl нашел применение при изготовлении плоских и сферических элементов оптических систем технологических лазеров, работающих в ИК-области. При оптической нагрузке до 0,3 кВт/см² (облучение CO₂-лазером непрерывного действия) ресурс работы пластин и линз из NaCl достаточно велик. Основным эксплуатационным недостатком NaCl как материала для оптических элементов является способность интенсивно поглощать влагу из окружающей среды. Это приводит к порче полированных поверхностей элементов, необходимости их повторного переполитирования, снижению спектрального коэффициента пропускания и оптической прочности.

Диэлектрические покрытия зеркал и защитные просветляющие покрытия. Оптические покрытия могут быть однослойными и многослойными, состоящими из чередующихся пленок различных веществ: диэлектриков, металлов и других пленкообразующих материалов. В зависимости от назначения и физических свойств их подразделяют на следующие типы: просветляющие, светоделительные, спектроделительные, зеркальные, фильтрующие, поляризующие и защитные. При нанесении оптических

покрытий на преломляющие и отражающие поверхности оптических деталей существенно изменяются оптические параметры и расширяются функции оптических приборов, работающих в ультрафиолетовом, видимом и инфракрасном спектральном диапазоне.

Просветляющие оптические покрытия, позволяющие уменьшить отражение падающего излучения от поверхности детали, являются важной составляющей оптических систем, состоящих из большого количества оптических элементов. Основная задача просветляющих покрытий – увеличение спектрального диапазона и уменьшение остаточного отражения. Просветляющие покрытия предоставляют возможность получать более яркие изображения вследствие уменьшения интенсивности паразитных изображений, которые возникают в оптических системах при наличии многократного отражения от поверхностей.

Светоделительные покрытия предназначены для разделения падающего пучка на отраженный и проходящий с заданным соотношением интенсивности. Спектроразделительные покрытия позволяют разделять падающий пучок на отраженный и проходящий различного спектрального состава. Задача зеркальных оптических покрытий, подразделяемых на металлические, металлодиэлектрические и диэлектрические, состоит в создании систем с максимальным коэффициентом отражения.

Фильтрующие покрытия предназначены для выделения требуемого спектрального диапазона из сплошного спектра излучения. В зависимости от назначения фильтры подразделяют на блокирующие (отрезающие), узкополосные и полосовые. Поляризующие покрытия применяются для получения линейно поляризованного излучения. Нанесение защитных покрытий проводится для повышения механической и химической устойчивости поверхности.

Большое значение для оптических покрытий имеют эксплуатационные характеристики, определяющие способность покрытий противостоять воздействию окружающей среды. Различают механическую, химическую,

коррозионную и термическую прочность, влагуустойчивость, невосприимчивость к лучевой нагрузке. Выбор покрытий определяют исходя из технических требований к оптической детали, условий эксплуатации прибора, температурного режима, расположения оптической детали в установке, условий чистки деталей и их формы.

5.4. Материалы для элементов отражательной оптики.

Общими требованиями к материалам для лазерной отражательной оптики являются:

- максимальный коэффициент отражения на рабочей длине волны;
- возможность высокой точности изготовления отражающей поверхности;
- стабильность формы и качества отражающей поверхности в течение длительного времени эксплуатации и складирования.

В соответствии с этими требованиями материалы должны иметь:

- достаточно высокую теплопроводность,
- малый температурный коэффициент линейного расширения,
- минимальную плотность, высокий предел упругости,
- максимальную жесткость, минимальный коэффициент поглощения на рабочей длине волны,
- высокую лучевую стойкость, возможность обработки отражающей поверхности с высокой точностью воспроизводства геометрии поверхности и малой ее шероховатостью, а также возможность использования внешнего и внутреннего ее охлаждения.

Для рационального выбора отражающих материалов часто используют так называемые общие критерии качества лазерных зеркал, представляющие собой удельные интенсивности лазерного излучения, рассчитанные на единицу перегрева, напряжения и смещения отражающей поверхности. Чем больше значение критерия, тем более отвечает соответствующий материал требованиям геометрической стабильности, т. е. способности сохранять в процессе

эксплуатации первоначальную форму, что обуславливается массой зеркала, его изотермичностью и структурной стабильностью.

Для технологических газовых лазеров используют металлические или полупроводниковые зеркала, охлаждаемые водой. Наиболее полно удовлетворяют перечисленным требованиям медь марок М00б, М0б, М1б с содержанием меди свыше 99,95 %, медно-хромистая бронза БрХ08, молибден и вольфрам. На них, как правило, наносят защитно-просветляющие покрытия. Установлена номенклатура предпочтительных покрытий, надежно предохраняющих от окисления при длительном хранении и сильном нагреве: фториды и другие интерференционные покрытия, обладающие малым поглощением на рабочей длине волны. Кроме того, на поверхность зеркала наносят отражающее золотое, серебряное или другое металлическое покрытие.

Особенности спектрального диапазона, а также высокие мощности излучения лазеров на CO_2 накладывают дополнительные требования к материалу подложек и отражающих покрытий лазерных зеркал. Эти требования связаны с тепловым режимом зеркал и сводятся к получению максимально возможного коэффициента отражения и созданию оптимальных условий для охлаждения зеркал, для того чтобы повысить их лучевую прочность. Таким требованиям удовлетворяют зеркала с металлическими (чаще всего – медными) подложками и тонкослойными отражающими покрытиями из тугоплавких металлов с высокими коэффициентами отражения для $\lambda = 10,6$ мкм.

Зеркала из Ni-Cu изготавливаются из высокочистой меди, не имеющей микропор и трещин. На рабочую поверхность медной подложки наносят слой никеля и после полировки с точностью до $\lambda/20$ проверяют, нет ли у отражающего слоя поверхностных дефектов и каковы его параметры шероховатости. Затем на отражающую поверхность наносят тонкий слой золота, повышающий коэффициент отражения и механическую стойкость при чистке зеркала.

Зеркала из Be-Cu предназначены в основном для сферических резонаторов с выпуклыми и вогнутыми отражающими поверхностями, а также

для других оптических систем, использующихся в импульсных лазерах с удельной энергией до 10^6 Дж/м². Хороший термический контакт между Вe и Сu обеспечивает быстрый теплоотвод от рабочей поверхности зеркала и позволяет избежать локального нагрева, который может привести к повреждению зеркала. Для повышения механической прочности и коэффициента отражения на отражающую поверхность иногда наносят тонкий слой золота.

Зеркала из молибдена используют в мощных газодинамических лазерах на СО₂. Однако из-за высокой стоимости их недостаточно широко внедряют, несмотря на то, что хорошо полированная молибденовая поверхность обладает отличными оптико-механическими качествами и не требует дополнительных дорогостоящих покрытий. Кроме того, молибден обладает малым температурным коэффициентом линейного расширения и высоким термическим порогом разрушения, что позволяет использовать зеркала из молибдена без дополнительного охлаждения.

Промышленные зеркала из меди используют в системах мощных лазеров на СО₂. На них наносят в вакууме тонкий слой диэлектрических покрытий, предотвращающих окисление полированной медной поверхности и повышающих прочность отражающего слоя при чистке зеркала. Суперполированные зеркала из меди позволяют полностью обеспечить выполнение требований к лазерным отражающим зеркалам без нанесения тонких пленочных покрытий. Для обеспечения работы максимально мощных лазеров на СО₂ используют, как правило, металлические зеркала с водяным охлаждением. Наряду с нанесением диэлектрических покрытий, повышающих механическую прочность отражающих поверхностей, водяное охлаждение позволяет достигнуть максимальных значений энергетического порога повреждения зеркал.

Использование материалов высокой чистоты, замена традиционных методов шлифования, полирования и доводки зеркал методом алмазной обработки без последующего шлифования, использование эффективных способов охлаждения отражающих поверхностей обеспечивают повышение

порога поверхностного разрушения до 10^{13} Вт/м² ресурса работы до 1000 ч, снижение термдеформаций до долей микрометра при одновременном сокращении трудоемкости изготовления таких зеркал.

Лекция № 12

5.5. Оптические цветные стекла.

Оптическое стекло применяется для изготовления линз, призм, кювет и др.

Основное требование, предъявляемое к оптическому стеклу – это высокая степень однородности. Отсутствие однородности вызывает отклонение лучей света от их правильного пути, что делает стекло негодным для его прямого назначения. Однородность оптического стекла нарушается причинами химического и физического порядка. Химическая неоднородность обусловлена местными изменениями химического состава и устраняется размешиванием оптического стекла в процессе варки. Физическая неоднородность вызывается напряжениями, возникающими в процессе охлаждения оптического стекла, и устраняется тщательным отжигом. Оптическое стекло должно иметь определенные оптические свойства – точные величины показателей преломления для лучей различных длин волн. Большой ассортимент оптического стекла с различными показателями преломления и средней дисперсией имеет огромное значение при расчете и конструировании оптических систем для снижения их дефектов, в частности для уничтожения вредного влияния вторичного спектра и исправления качества изображения. Оптические свойства стекла зависят от его химического состава. Разнообразным сочетанием окислов удается получить стекло с требуемыми значениями оптических постоянных. Некоторые сорта оптического стекла, например, не содержат кремнезема (основного составляющего любого стекла), другие содержат обычно применяемые окислители, но в чрезвычайно больших количествах. Прозрачность оптического стекла должна быть высокой, порядка 90...97% на 100 мм пути луча в стекле. Оптическое стекло должно быть химически устойчивым по отношению к действию влажной атмосферы и к действию слабых кислот, характеризующему «пятнистость» их, т. е. чувствительность к прикосновению рук.

Для производства оптического стекла применяются такие же сырьевые материалы, как и для других типов стекол. Однако требования к чистоте сырья весьма высоки. Особенно вредными примесями являются соединения железа и хрома, окрашивающие стекло и увеличивающие его светопоглощение.

К оптическим стеклам можно отнести также и специально окрашенные цветные стекла, применяемые для изготовления точных светофильтров, которые в виде плоско-параллельных пластин часто применяются в оптических приборах и служат для изменения спектрального состава проходящего через них света. Эти цветные стекла изготавливаются на заводах оптического стекла теми же приемами, что и оптическое стекло.

Цветное оптическое стекло предназначено для изготовления светофильтров с избирательным поглощением светового излучения в широком диапазоне длин волн, которое формируется крутыми границами в различных областях спектра, узкими и размытыми полосами поглощения, определяется природой центров окраски, т. е. различными типами электронных переходов.

5.6. Материалы для поляризационных элементов.

Поляризационные призмы служат для формирования линейно поляризованного оптического излучения, т. е. действуют как линейные поляризаторы. Состоят из двух или более трехгранных призм, одна или несколько из которых вырезается из анизотропного кристалла с двойным лучепреломлением. Конструктивно поляризационные призмы выполняются так, что проходящее через них излучение преодолевает наклонную границу раздела двух сред, на которой условия преломления составляющих светового пучка, поляризованных в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, резко различаются. Выделяют поляризационные призмы двух видов: однолучевые и двухлучевые. Однолучевые поляризаторы создают на выходе один линейно поляризованный пучок света. Их выполняют из двух и более частей, образованных при распиливании и соединенных таким образом, что направления оптических осей в соединенных частях совпадают. Двухлучевые поляризационные призмы формируют на выходе под углом друг к другу два

пучка света, линейно поляризованных в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Конструктивно их выполняют из двух частей, образованных при распиливании кристалла и соединенных таким образом, что направления оптических осей в соединенных частях взаимно перпендикулярны.

Для работы в УФ- и ИК-областях спектра (от 0,14 до 7 мкм) используют двухлучевые призмы, изготовленные из фтористого магния, причем составные детали этих призм посажены на оптический контакт. Разработанные специально для лазерных оптических систем поляризационные призмы с минимизированием потерь на отражение выполняются с воздушным зазором и нанесением на поверхности просветляющих покрытий. Для призм, работающих в области спектра 0,38...5,5 мкм в условиях с повышенным содержанием влаги, применяют ниобат лития. Этот материал практически нерастворим в воде, достаточно технологичен при механической обработке и склеивании.

Отражательные поляризаторы предназначены для получения двух ортогональных линейно поляризованных пучков излучения при отражении на границе двух диэлектриков, а также для разделения этих пучков. Отражательные поляризаторы представляют собой одну или несколько отражающих пластин. Материалом для таких поляризаторов обычно являются: плавленый кварц (в УФ-области); оптическое стекло (в видимой области); хлористое серебро, селен и германий (в ближней ИК-области); селенид цинка, германий и теллурид кадмия (в области длин волн ~10...11 мкм). Требования к качеству пластин, как правило, следующие: плоскостность поверхностей по длине – одна интерференционная полоса на 25 мм длины, по ширине – одна интерференционная полоса на всю ширину; чистота поверхностей – не более 10...20 царапин для пластин серийного производства и 2...5 – для пластин специального назначения.

Для создания определенной разности фаз (разности хода волн) между ортогональными линейно поляризованными составляющими оптического излучения определенной длины волны или в широком интервале длин волн применяют фазовые пластинки, которые для видимой и ближней ИК-областей

изготавливают из слюды-мусковита и кристаллического кварца. Для излучения с длиной волны 10,6 мкм в качестве фазовых пластинок $\lambda/4$ и $\lambda/2$ применяют полированные диски из теллурида кадмия, вырезанные параллельно оптической оси кристалла. Фазовые пластинки нулевого порядка изготавливают из двух пластин, толщины которых отличаются на $\lambda/4$ или $\lambda/2$, а фазовые пластины высоких порядков – из одиночных пластин толщиной, создающей разность хода обыкновенного и необыкновенного лучей, равную $\lambda/4$ или $\lambda/2$.

Фазовыми компенсаторами называют устройства, компенсирующие до нуля или дополняющие до π любую создающуюся в системе разность фаз. В фазовых компенсаторах для работы на длине волны 10,6 мкм оптические элементы, т. е. плоскопараллельные пластины, подвижные и неподвижные клинья, также выполняют из CdTe. Для видимой и ближней ИК-области спектра фазовые компенсаторы изготавливают из кристаллического кварца.

Поляроиды представляют собой поляризаторы, в которых поляризующим узлом является дихроичная пленка. Например, для области спектра 0,3...0,8 мкм они представляют собой растянутую в одном направлении окрашенную йодом пленку поливинилового спирта толщиной до 0,05 мм, заклеенную между стеклянными пластинами. В так называемом контактно-иммерсионном поляроиде между защитными стеклами и поляроидной пленкой вводят слой инертной оптической иммерсионной жидкости.

Для получения излучения с высокой относительной степенью поляризации в ближней, средней и дальней ИК-областях используют решетки-поляризаторы. В ближней, средней ИК-областях применяют решетки из BaF₂, CaF₂, а также из КРС-8. Для работы в ближней ИК-области используют также органические полимерные термопластичные материалы, которые по сравнению с оптическими стеклами имеют меньшую плотность и большую ударопрочность. Однако, абразивная стойкость органических стекол низка, что вызывает затруднения при их шлифовании и полировании. В дальней ИК-

области применяют решетки-поляризаторы на основе органических полимеров, в частности, на основе полиэтилена.

Поляризационные оптические элементы осуществляют поляризацию излучения или изменение его состояния (преобразование линейной поляризации в круговую и др.). Материалы для их изготовления должны обладать как специфическими для поляризационных деталей характеристиками (показатель двулучепреломления, степень поляризации, угол вращения плоскости поляризации и т. д.), так и общими для оптических элементов лазеров характеристиками (высокие значения оптической прочности, теплопроводности, спектрального коэффициента пропускания, температурного коэффициента линейного расширения и т. д.).

К классу поляризационных материалов относятся такие природные двулучепреломляющие материалы, как исландский шпат, слюда-мусковит, природный и синтетический кристаллический кварц, синтетические дихроичные материалы (поляроиды), а также искусственный сульфид кадмия, который применяется для поляризационных элементов, работающих в ИК-области спектра.

5.7. Материалы для интерференционных покрытий.

При нанесении просветляющих или высокоотражающих покрытий для улучшения качества оптических приборов используют явление интерференции. Прохождение излучения через каждую преломляющую поверхность линзы сопровождается частичным его отражением, например, на границе стекло-воздух отражается около 4% падающего потока (при $n_c \approx 1,5$). Так как объективы содержат достаточно большое количество линз, число отражений от поверхностей в них велико, следовательно, увеличиваются потери светового потока. Интенсивность прошедшего света ослабляется и светосила оптического прибора уменьшается.

С целью уменьшения отражения на свободные поверхности линз наносят тонкие пленки с меньшим, чем у материала линзы показателем преломления.

Используя явление многолучевой интерференции, получают высокоотражающие покрытия. В отличие от двухлучевой многолучевая интерференция возникает при наложении большого числа когерентных световых пучков. Существенные различия в распределении интенсивности в интерференционной картине: максимумы значительно уже и ярче, чем при наложении двух когерентных световых пучков. Результирующая амплитуда световых колебаний для N интерферирующих пучков одинаковой амплитуды в максимумах интенсивности в N раз больше, а интенсивность в N^2 раз больше, чем от одного пучка. Наблюдать многолучевую интерференцию можно с помощью дифракционной решетки, представляющей собой систему нанесенных на отражающую поверхность чередующихся пленок с разными показателями преломления и одинаковой оптической толщиной, равной $\lambda_0/4$. Особенностью такой системы является то, что она действует в очень узкой спектральной области, причем, чем больше коэффициент отражения, тем уже эта область. Такие отражатели применяются в лазерной технике, используются для создания интерференционных светофильтров. С помощью трехслойного просветления достигается уменьшение интенсивности отраженного света в широком интервале длин волн. Зависимость коэффициента отражения от длины волны излучения для трехслойного просветляющего покрытия, нанесенного на поверхность стекла К8 представлена на рисунке 13.1. Трехслойное просветление, обеспечивающее низкие значения коэффициента отражения получают в широком интервале длин волн практически любой области спектра. В зависимости от толщины пленки максимум отражения может быть получен на различных участках спектра.

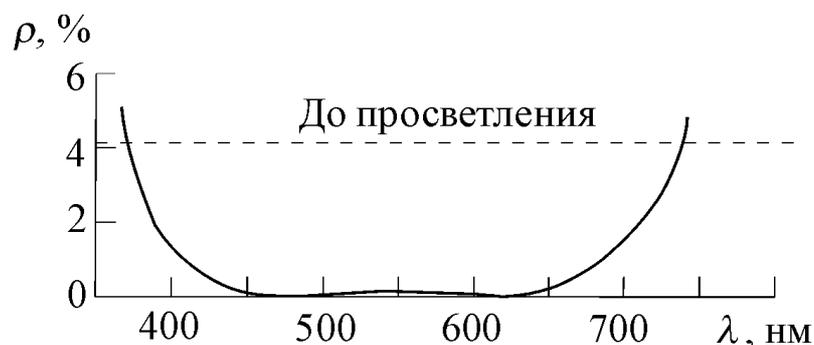


Рисунок 12.1 – Спектральное отражение от поверхности стекла после трехслойного просветления в видимой части спектра

Условные обозначения видов покрытий приводятся по следующей схеме:

- 1) сокращенное обозначение покрытия;
- 2) обозначение исходного материала первого слоя покрытия;
- 3) обозначение способа нанесения первого слоя покрытия;
- 4) обозначение исходного материала и способа нанесения последующих слоев покрытия.

Обозначение состоит из букв и цифр всех наносимых на деталь видов покрытий в последовательности их нанесения слева направо.

Нанесение на рабочие поверхности оптических деталей тонких пленок диэлектриков, металлов и их оксидов (так называемых оптических или интерференционных покрытий) вызывает изменение оптических и физико-химических свойств этих поверхностей. Эти пленки изменяют интенсивность, направление и спектральный состав проходящего и отраженного излучения, механическую, химическую и оптическую прочность поверхностей. Оптические покрытия состоят из чередования слоев определенной оптической толщины с высокими и низкими показателями преломления, которые рассчитываются на основе законов интерференции и поляризации света в тонких пленках. Свойства оптических покрытий зависят от их конструкции, природы и чистоты наносимых материалов, а также способа нанесения покрытий. Наиболее разработанными и распространенными способами нанесения тонких пленок являются: нанесение из растворов легко

гидролизующихся соединений; термическое (резистивное) испарение в вакууме; катодное распыление. В лазерной технике широко практикуется нанесение тонких пленок на детали как отражательной, так и проходной оптики.

К параметрам оптических покрытий предъявляются следующие требования: постоянный по площади пленки показатель преломления; высокое светопропускание (коэффициент поглощения менее 10^{-4}); минимальное рассеяние; соответствующая требованиям геометрическая толщина; минимальные внутренние напряжения; высокая адгезия к материалу подложки; высокая механическая прочность к истиранию и стойкость к деформации; аморфная или мелкокристаллическая микроструктура; высокая температурная стабильность; минимальные сорбционные свойства; высокая химическая устойчивость к определенным средам; максимальная влагостойкость; высокая стойкость к излучению (в том числе, к лазерному); постоянный химический состав с высокой воспроизводимостью в соответствии с установленной стехиометрией.

Материалы для оптических покрытий являются продуктами химического синтеза, специально подготовленными для нанесения тонких пленок. Обычно к параметрам пленкообразующих материалов предъявляются следующие требования: высокое содержание основного вещества (не менее 99 %); минимальное содержание вредных примесей (менее 10^{-4} %); без отступлений от заданной стехиометрии; близкая к теоретической плотность; удобные для помещения в испаритель установки для нанесения тонких пленок форма и размеры.

Одной из основных характеристик интерференционных покрытий является оптическая прочность, которую определяют той лучевой нагрузкой (энергией, мощностью), при которой разрушение покрытия происходит с вероятностью не ниже 0,5. В связи с тем, что оптическая прочность покрытий к лазерному излучению зависит от большого числа факторов (распределения интенсивности в пучке излучения и в пятне на облучаемом покрытии, модовой

структуры и т. д.), эти факторы должны быть определены при анализе и сопоставлении различных покрытий.

Оценить все факторы, определяющие то или иное покрытие; и все технологические особенности их получения практически невозможно. По-разному определяют начало процесса повреждения покрытий (это либо появление трещин, проплавов, кратеров испарения материала, либо возникновение плазменной вспышки и т. д.). Неодинаково фиксируется появление разрушений покрытий (визуально, с помощью лупы или микроскопа, в естественном или поляризованном свете и т. д.), что также создает расхождение в числовых значениях оптической прочности.

Лекция № 13

ТЕМА 6. УСТРОЙСТВА УПРАВЛЕНИЯ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Под управлением лазерным излучением понимают изменение таких его параметров, как амплитуда, частота, фаза, расходимость, поляризация, длительность импульса, направление распространения, профиль интенсивности излучения. Устройства управления их функциональному назначению подразделяют на две большие группы: преобразователи лазерного излучения (модуляторы и дефлекторы) и фокусирующие системы.

Модулятором является устройство, изменяющее по определенному закону амплитуду (интенсивность), фазу, частоту или поляризацию электромагнитного излучения оптического диапазона, дефлекторы позволяют управлять направлением, ориентированием распространением оптического излучения. Фокусирующие системы обеспечивают изменение распределения интенсивности излучения в фокальной плоскости при его концентрации.

6.1. Преобразователи лазерного излучения

Модуляция оптического излучения - целенаправленный процесс изменения одного из четырех параметров, характеризующими излучение: амплитуды, начальной фазы, частоты, поляризации. Модуляция предоставляет возможность путем внешних электрических, магнитных или упругих воздействий сообщить потоку света определенную информацию.

Режим модуляции добротности прежде всего используется для генерации гигантских импульсов (при импульсной накачке) или генерации регулярной последовательности импульсов (при непрерывной накачке). На практике наиболее широко применяются три вида активной модуляции добротности:

1. оптико-механическая,
2. электрооптическая
3. акустооптическая.

При оптико-механической модуляции добротности широко используются вращающиеся отражающие плоскости. В качестве примера на рис. 13.1 приведены две схемы с оптико-механической модуляцией добротности. Здесь 1 - активный элемент, 2 - призма полного внутреннего отражения, вращающаяся вокруг оси, перпендикулярной оси резонатора, 3 - выходное зеркало резонатора, 4 - дополнительная (неподвижная) призма полного внутреннего отражения. В процессе вращения призма 2 лишь на короткое время обеспечивает высокую добротность резонатора. Угол поворота призмы, при котором добротность снижается в два раза по сравнению с максимальным значением, оказывается порядка угловой минуты. При скорости вращения призмы порядка 10^3 об/с время переключения добротности составляет примерно 100 нс. Введение дополнительных оптических элементов позволяет увеличить эффективную угловую скорость вращения призмы (при неизменной реальной скорости вращения). Так эффективная угловая скорость вращения оказывается вдвое выше реальной. Однако медленное переключение добротности ограничивает область применения оптико-механических схем модуляции.

В связи с этим, на практике обычно применяют либо электрооптический, либо акустооптический методы модуляции добротности. Электрооптическая модуляция добротности основана на использовании электрооптического эффекта, заключающегося в изменении показателя

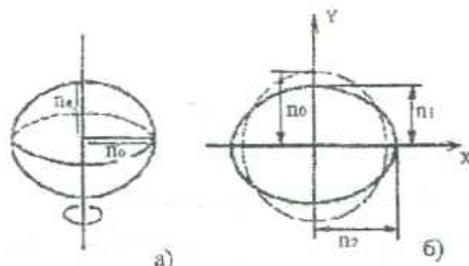
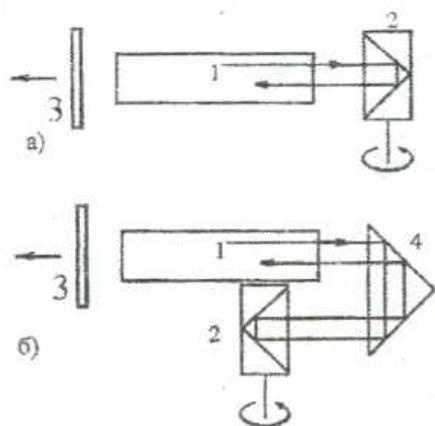


Рис. 13.1: Оптико-механическая модуляция добротности Рис. 13.2: Эффект Погкельса

преломления среды под действием внешнего электрического поля. Различают два электрооптических эффекта - квадратичный (эффект Керра) и линейный (эффект Погкельса). В первом случае изменение показателя преломления пропорционально квадрату электрической напряженности внешнего поля, а во втором - первой степени напряженности поля. Эффект Погкельса существует лишь в кристаллах, не имеющих центра симметрии. В качестве примера укажем одноосные кристаллы *KDP* (химическая формула KH_2PO_4) и *DKDP* (формула $KH_{2-2x}P_2xPO_4$ где x - степень дейтерирования).

Рассмотрим электрооптическую модуляцию добротности резонатора на основе эффекта Погкельса. На рис. 13.2а изображена оптическая индикатриса одноосного кристалла, представляющая собой эллипсоид вращения вокруг оптической оси OO , n_0 и n_e - показатели преломления для обыкновенной и необыкновенной волн соответственно.

Приложим к кристаллу внешнее электрическое поле, направленное по оси OO . Под действием поля оптическая индикатриса кристалла превратится из эллипсоида вращения в трехосный эллипсоид (кристалл превратится из одноосного в двуосный). На рис. 13.2б показаны сечения оптической индикатрисы плоскостью, перпендикулярной оси OO (перпендикулярной направлению приложенного поля): штриховая линия - до включения поля, непрерывная - после включения поля. Главные показатели преломления кристалла после включения поля - n_1, n_2, n_e , главные диэлектрические оси - X, Y, Z (последняя перпендикулярна плоскости рисунка).

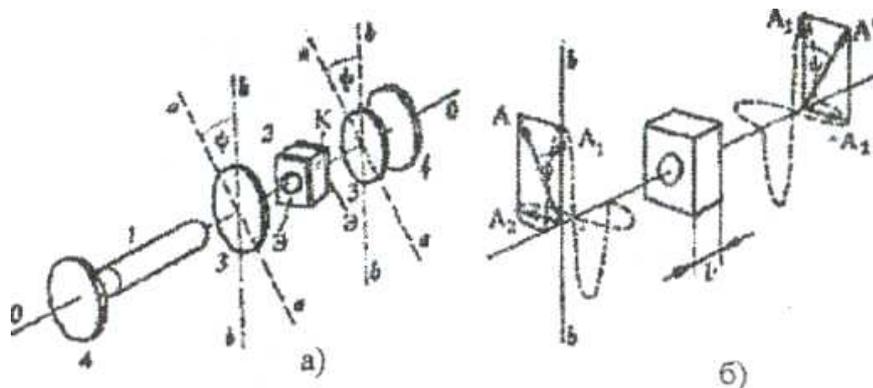


Рисунок 13.3 - Лазер с электрооптической модуляцией

На рис. 13.3а приведена схема лазера с модуляцией добротности на основе продольного эффекта Поккельса. Здесь 1 - активный элемент, 2- ячейка Поккельса (K - кристалл $DKDP$, Э -электроды), 3 - линейные поляризаторы, 4 - зеркала резонатора. Направление поляризации света, прошедшего через

$$\begin{aligned} n_1 &= n_0 + \frac{n_0^3 r E}{2}, \\ n_2 &= n_0 - \frac{n_0^3 r E}{2}, \end{aligned}$$

поляризатор (направление aa на рисунке), составляет угол ψ с направлением главной диэлектрической оси кристалла X (направление bb на рис. 13.3).

Предположим, что на кристалл подано напряжение (ячейка Поккельса включена). В этом случае световые волны с поляризациями вдоль оси X и вдоль оси Y окажутся после прохождения ячейки сдвинутыми по фазе друг относительно друга. В результате линейно-поляризованный световой пучок, входящий в ячейку Поккельса, превратится на выходе из ячейки в эллиптически поляризованный пучок. Пусть на ячейку подано напряжение, при котором $\Delta\varphi = \pi$. Такое напряжение называют полуволновым и обозначают как $U_{\lambda/2}$.

$$U_{\lambda/2} = \frac{\lambda_0}{2n_0^3 r} \quad (13.1)$$

При использовании полуволнового напряжения поляризация светового пучка на выходе из ячейки остается линейной, однако при этом направление поляризации оказывается повернутым на угол 2ψ относительно исходного направления. Вследствие поворота направления поляризации световая волна, вышедшая из ячейки Поккельса, сможет лишь частично пройти через второй поляризатор. Интенсивность волны, прошедшей через второй поляризатор (обозначим ее через A^2_{out}), связана с интенсивностью волны, прошедшей через первый поляризатор (интенсивностью A^2), соотношением

$$\frac{A^2_{out}}{A^2} = \cos^2 2\psi \quad (13.2)$$

Таким образом, включение ячейки Поккельса в схеме на рис. 13.3 приводит к увеличению потерь по сравнению со случаем, когда ячейка выключена. Максимальная степень повышения потерь при включении ячейки достигается при $\psi = \pi/4$. В этом случае $A^2_{out} = 0$, т.е. затвор полностью заперт. При выключении ячейки Поккельса (при снятии напряжения с ее электродов) реализуется быстрое и значительное увеличение добротности резонатора. Время переключения добротности определяется скоростью изменения напряжения на электродах ячейки Поккельса; оно составляет несколько наносекунд.

Другим эффективным методом модуляции добротности является акустооптическая модуляция. В основе действия акустооптического затвора лежит явление дифракции света на ультразвуковой волне. Предположим, что в некоторой среде распространяется плоская ультразвуковая волна, возбуждаемая пьезообразователем. При этом в среде возникают механические напряжения, связанные с локальными сжатиями и разрежениями. В результате в среде образуются различающиеся показателем преломления периодические слои (пространственный период равен длине звуковой волны Λ), перемещающиеся по среде со скоростью звука. При прохождении световой волны через такую среду будет иметь место дифракция на пространственной периодической структуре, связанной с периодически изменяющимся показателем преломления.

Полагая, что звуковая волна частоты Ω распространяется вдоль оси y , представим показатель преломления среды в виде

$$n(y, t) = n + \Delta n \sin\left(\frac{2\pi y}{\Lambda} - \Omega t\right)$$

Здесь n - показатель преломления среды в отсутствие ультразвуковой волны, Δn - амплитуда изменения показателя преломления. Величина Δn определяется амплитудой упругой деформации, с которой она связана через упруго-оптические постоянные среды. В свою очередь, амплитуда упругой деформации зависит от мощности звуковой волны.

Будем считать, что выполнено условие:

$$\frac{l\lambda}{\Lambda} > 1,$$

(13.4)

где λ - длина световой волны в среде, l - длина акустооптического взаимодействия (путь, проходимый световым пучком в объеме среды, охваченным звуковой волной). При выполнении условия (13.4) имеет место дифракция Брэгга.

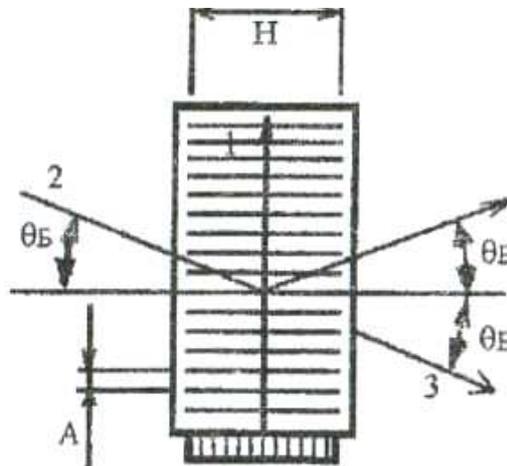


Рисунок 13.4 - Акустооптический преобразователь

Принцип действия акустооптического затвора на основе дифракции Брэгга поясняет рис. 13.4. Здесь H - ширина звукового пучка; цифрами обозначены направления распространения пучков: 1 - звукового, 2 - издающего светового, 3 - прошедшего светового, 4 - дифрагированного светового (преломление света на границе затвора на рисунке не показано). Угол θ_B (угол Брэгга) определяется соотношением

$$\sin \theta_B = \frac{\lambda}{2\Lambda} \quad (13.5)$$

Затвор ориентируют внутри резонатора лазера таким образом, чтобы направление падающего светового пучка внутри затвора соответствовало условию (13.5). Если пьезопреобразователь выключен, световой пучок

проходит через затвор, не изменяя направления (затвор открыт). При включении пьезопреобразователя падающий световой пучок (интенсивность J_0) будет частично преобразовываться в дифрагированный пучок (интенсивность J_1), направление которого образует угол θ с направлением падающего пучка. Чем ближе к единице отношение J_1/J_0 , тем меньше пропускание затвора в направлении падающего светового пучка. Отношение J_1/J_0 является мерой эффективности акустооптического затвора.

Обозначим через Δt время переключения акустооптического затвора - время, в течение которого возникает или, напротив, исчезает дифрагированный пучок. Оно может быть оценено как время, за которое звуковая волна проходит расстояние d , равное диаметру светового пучка. Для уменьшения Δt надо уменьшать d , именно поэтому акустооптический затвор помещают в месте перетяжки падающего светового пучка. Чем меньше радиус перетяжки, тем меньше Δt , тем выше быстродействие затвора. Однако следует помнить, что с уменьшением радиуса перетяжки возрастает расходимость светового пучка и, как следствие, понижается эффективность затвора.

Сравнение двух видов затворов показывает, что минимальные потери (потери в открытом состоянии затвора) в случае акустооптических затворов примерно на порядок ниже, чем у электрооптических, и составляют около 0,1%. Электрооптические затворы хорошо запираются (максимальные потери составляют практически 100%), тогда как акустооптические затворы запираются заметно хуже. Время переключения у электрооптических затворов на два-три порядка меньше, чем у акустооптических, и составляет несколько наносекунд.

Акустооптические затворы применяют преимущественно в лазерах с непрерывной накачкой, а электрооптические - с импульсной. Это связано со свойствами затвора и с тем фактом, что лазеры с импульсной накачкой характеризуются существенно более высокими значениями коэффициента усиления по сравнению с непрерывно накачиваемыми лазерами. Заметим в этой связи, что оптимальный коэффициент пропускания выходного зеркала

составляет обычно всего несколько процентов для непрерывно накачиваемых лазеров, тогда как для лазеров с импульсной накачкой он превышает 50%.

При низких значениях коэффициента усиления, характерных для лазеров с непрерывной накачкой, существует возможность срыва генерации уже при относительно небольших потерях, вносимых затвором в резонатор. Поэтому в таких лазерах могут эффективно использоваться акустооптические затворы как обладающие наиболее низкими потерями в открытом состоянии. Однако при импульсной накачке потери, вносимые акустооптическим затвором в запертом состоянии, могут оказаться недостаточными для срыва генерации накачиваемого лазера и, следовательно, для реализации режима модуляции добротности.

Хорошее запираение затвора особенно важно в лазерах с импульсной накачкой. В этом случае не играет роли тот факт, что в открытом состоянии затвор может вносить относительно высокие потери (порядка нескольких процентов), важно лишь, чтобы затвор хорошо запирался и мог обеспечить срыв генерации при больших значениях коэффициента усиления. Поэтому в лазерах с импульсной накачкой предпочтительны электрооптические затворы.

Лекция № 14

6.2. Системы транспортировки и формирования излучения

Улучшение эксплуатационных свойств деталей, прошедших лазерную обработку во многом определяется способностью оптической системы перераспределять энергию по поверхности заготовки с заданной интенсивностью. Излучение на выходе из резонатора технологического лазера представляет собой пучок диаметром от нескольких миллиметров до десятков миллиметров и не обеспечивает высокой степени концентрации энергии и требуемого характера распределения плотности мощности. Высокое качество лазерной обработки деталей достигается только при использовании соответствующих систем преобразования параметров излучения, позволяющих осуществить необходимое энергетическое воздействие. Применение лазерной технологии обуславливает тщательный выбор оптических систем транспортировки и формирования излучения. Для создания на обрабатываемой поверхности плотности мощности в диапазоне значений $q = 10^7 \dots 10^{12}$ Вт/м² используются различные методы фокусировки. Наиболее распространено применение линзовых систем, приведенных на рисунке 14.1, а, б. Они предоставляют возможность в ряде случаев реализовать требуемый характер энергетического воздействия изменением расстояния от объекта обработки до фокальной плоскости. Простейшим объективом является одиночная положительная линза, представленная на рисунке 14.1, а. Однако в простой линзовой системе существуют различные aberrации – погрешности восприятия, преобразования, фокусировки оптического излучения. Изображение более высокого качества предоставляют двух- и многолинзовые объективы, например трехлинзовый объектив (рисунок 14.1, б).

Оптические элементы пропускающего типа имеют небольшой срок службы из-за недостаточной лучевой стойкости и низкую надежность. Фокусирующие прозрачные линзы используются при малых мощностях лазерного излучения (до 1...3 кВт). При повышенных мощностях лазерного излучения используются зеркальные фокусирующие системы из

металлооптики, обеспечивающие значительно больший срок службы. В качестве объектива может использоваться одиночное сферическое зеркало, а также зеркало с параболической или гиперболической поверхностью (рисунок 14.1, в). Широко применяются более сложные объективы, например двухзеркальные, содержащие основное вогнутое зеркало с отверстием в центре и контррефлектор, который может быть плоским, вогнутым, выпуклым, в том числе – с асферической поверхностью. По этому принципу построен объектив Кассегрена, приведенный на рисунке 14.1, г.

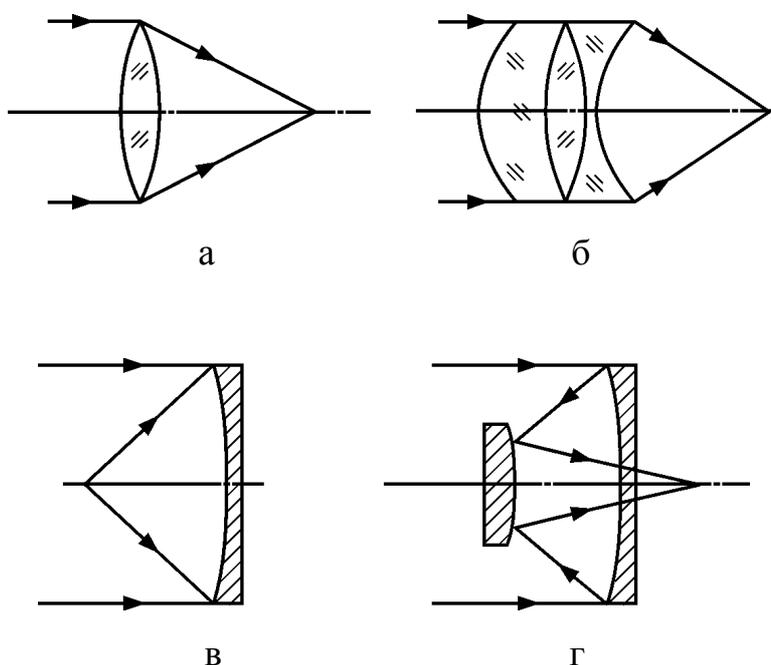


Рисунок 14.1 – Объективы, применяемые для фокусировки лазерного излучения: однолинзовый (а); трехлинзовый (б); одиночное сферическое зеркало (в); объектив Кассегрена (г)

Для импульсных твердотельных лазеров вследствие неоднородности накачки активного элемента и его нагрева имеет место существенная неравномерность распределения плотности энергии излучения. Для формирования однородной освещенности поверхности материала используются фокусирующие призмные растры и хаотические фазовые экраны, основным достоинством которых является слабая зависимость

распределения освещенности в пятне от расходимости и начального распределения излучения.

Сложность в изготовлении внеосевых зеркальных фокусирующих систем второго порядка и их высокая стоимость определяют преимущественное использование отражательной металлооптики в виде одиночного зеркала или какого-либо варианта двухзеркального технологического объектива Кассегрена.

Фокусировка одиночным зеркалом может осуществляться при лазерной сварке, когда фокусирующее сферическое зеркало установлено под углом к оси падающего излучения. Может использоваться дополнительно плоское зеркало, которое необходимо при обработке крупногабаритных деталей. Если обрабатываемые детали имеют небольшие размеры, то лазерное излучение можно направлять непосредственно на фокусирующее сферическое зеркало (по траектории отраженного от плоского зеркала излучения). Также может использоваться плоское кольцевое зеркало, а фокусирующее сферическое зеркало устанавливаться соосно с падающим излучением. Этот метод фокусировки целесообразно использовать в тех случаях, когда лазерное излучение имеет кольцевое сечение.

Отражательная система, состоящая из вогнутого и поворотного плоского зеркал, применяется при малых углах схождения пучка, т. е. больших фокусных расстояниях. Небольшие углы наклона ($<10^\circ$) фокусирующего зеркала, позволяют снизить астигматизм. Для фокусировки пучков технологических лазеров применяются объективы Кассегрена. Например, внеосевой косоугольный объектив Кассегрена (рисунок 14.2) состоит из малого (диаметром $D_{\text{вн}}=30\text{...}80$ мм) выпуклого и большого вогнутого сферических зеркал. При его применении отсутствуют искажения пятна фокусировки, и вся энергия независимо от ее исходного распределения достигает обрабатываемой поверхности.

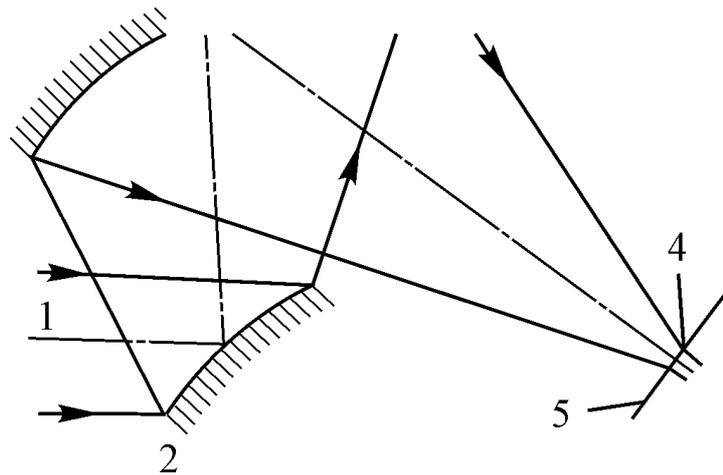
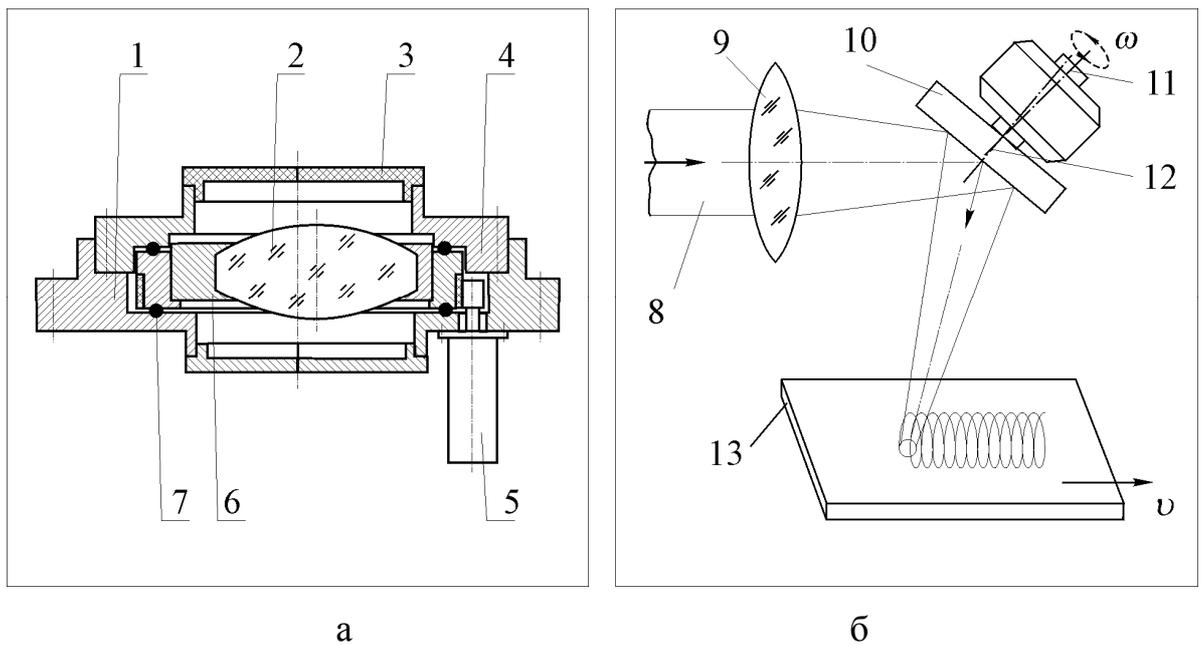
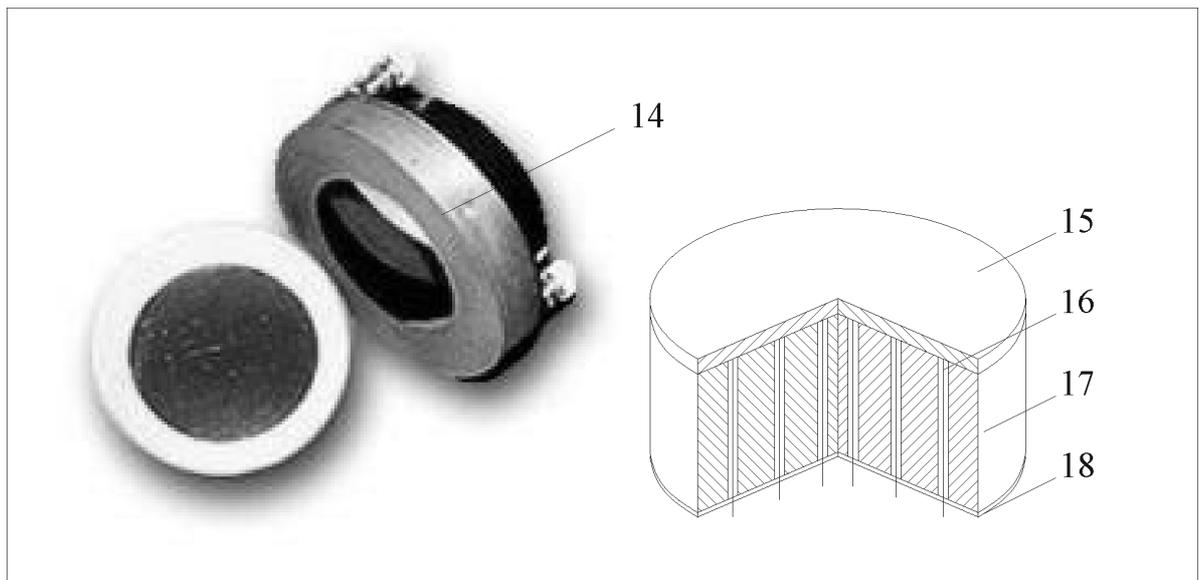


Рисунок 14.2 – Схема внеосевого фокусирующего объектива Кассегрена
 1 – входящий пучок; 2 – выпуклое зеркало; 3 – вогнутое зеркало;
 4 – пятно фокусировки; 5 – фокальная плоскость.

6.3. Применение фокусаторов излучения

Успешная реализация технологических процессов лазерной термообработки возможна только при условии формирования определенного пространственного профиля интенсивности в требуемой области на поверхности детали (рисунок 14.3).





В

Рисунок 14.3 – Линзовый сканатор (а). Сканатор с наклонным вращающимся зеркалом (б). Пьезоэлектрическое адаптивное зеркало (в)

На рисунке 14.3 обозначено: 1 – корпус сканатора; 2, 9 – линзы; 3 – крышка; 4 – кольцо; 5 – электродвигатель; 6 – эксцентрик; 7 – шарик; 8 – лазерное излучение; 10 – зеркало; 11 – ось вращения зеркала; 12 – ось симметрии зеркала; 13 – обрабатываемое изделие; 14 – общий вид пьезоэлектрического адаптивного зеркала; 15 – отражающая пластина; 16 – управляющие электроды; 17 – пьезоблок; 18 – общий электрод.

В настоящее время созданы принципиально новые оптические элементы с ранее недостижимыми функциями – фокусаторы излучения. Они представляют собой дифракционные оптические элементы, фокусирующие лазерное излучение в тонкие линии или малые области пространства, рассчитанные в геометрическом (лучевом) приближении и имеющие регулярную структуру микрорельефа. Такие оптические элементы заданным образом преобразуют интенсивность оптического излучения и представляют собой рельефные структуры с высотой рельефа порядка длины волны излучения λ , нанесенные на плоскую поверхность. Например, для фокусировки пучка излучения в точку, отражающая поверхность должна иметь форму параболоида вращения.

Работа составного зонного зеркала, составленного из разных частей

параболоидов, расположенных на расстоянии друг от друга $\bar{k}\lambda/2$, где \bar{k} – целое число, и фокусирующих излучение в одну точку с фазой, отличающейся на $2\pi\bar{k}$ эквивалентна работе любого целого параболоида. В этом случае оптический элемент (фокусатор) представляет собой пластину с профилем, нанесенным в виде зон, причем внутри каждой зоны высота плавно изменяется от 0 до $\lambda/2$ (рисунок 14.4).

Традиционные способы формообразования поверхности, например, механическая обработка, ограничены в возможностях и не могут обеспечить необходимой точности. Так, алмазное точение на станках с программным управлением позволяет изготавливать асферическую оптику для ИК-диапазона с формой поверхности только в виде фигур вращения. Особое внимание специалистов в области дифракционной оптики привлекают технологии формирования микрорельефа, основанные на достижениях и оборудовании микроэлектроники.

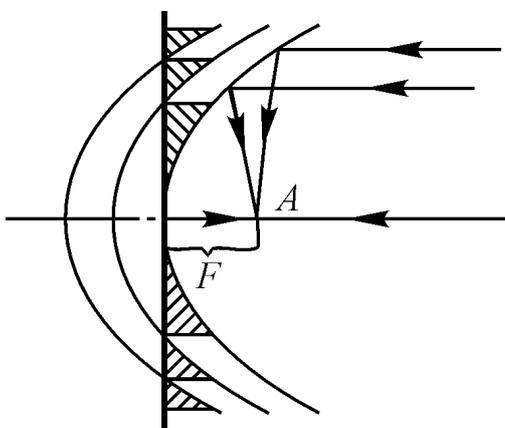


Рисунок 14.4 – Построение рельефа фокусатора излучения

Отражающие фокусаторы осуществляют поворот пучка лазерного излучения, его пространственную фазовую модуляцию и перераспределение его энергии в различные геометрические фигуры с заранее заданным профилем интенсивности. Они представляют собой профилированные отражающие излучение пластины с микрорельефной структурой рабочей поверхности, определяемой в зависимости от заданной формы зоны обработки,

распределения в ней интенсивности излучения и его длины волны.

Для применения в технологии лазерной обработки деталей фокусатор выполняется в виде отражающей пластины с микрорельефной структурой поверхности, определяемой в зависимости от формы зоны обработки, требуемого распределения интенсивности лазерного излучения и его длины волны, с возможностью перемещения (поворота, вращения, колебательного движения и т. д.). Применение схемы нагрева непрерывным излучением, сфокусированным в неподвижный (установленный перпендикулярно, под углом, параллельно траектории движения заготовки) или вращающийся отрезок, позволяет реализовать технологические возможности лазерной термической обработки. В этом случае при выборе конструкции оптической системы целесообразно осуществить вращение отражающего элемента. Применение фокусаторов излучения в технологии лазерной обработки материалов открывает принципиально новые возможности управления свойствами и эксплуатационными характеристиками обрабатываемых деталей.

Лекция №15

ТЕМА 7. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОПТОВОЛОКНА ДЛЯ ТРАНСПОРТИРОВКИ ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРОВ. ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ.

Волоконная оптика – раздел оптики, рассматривающий распространение электромагнитных волн оптического диапазона по световодам – оптическим волокнам. Волоконная оптика как направление сформировалась в 50-х гг. XX в., сам этот термин введен в 1956 г. английским ученым Н. Капани, впервые разработавшим технологию стеклянных волокон в стеклянной оболочке.

Оптическое волокно – это волокно для передачи световой энергии и оптических сигналов. Для распространения излучения внутри волокна его изготавливают с плавным изменением показателя преломления (градиентные волокна) или ступенчатым изменением вдоль радиуса волокна (ступенчатые волокна). Одиночные волокна используют в связи, лазерной хирургии, в датчиках и установках обработки материалов. Иногда их называют моноволокнами. Устройства, состоящие из большого числа волокон, могут передавать энергию и изображения.

Устройство световода. Конструкция отдельно взятого оптического волокна достаточно проста. Световод состоит из сердцевины и оболочки. Сердцевина изготавливается из материала прозрачного для передаваемого излучения. Торцы сердцевины обычно перпендикулярны боковой поверхности цилиндра. Оболочка волокна изготавливается из материала с показателем преломления меньшим показателя преломления сердцевины. В простейшем случае это кварцевый стержень в воздухе. Сердечник и оболочка покрываются защитной оболочкой. Таким образом, оптическое волокно – типичный диэлектрический волновод электромагнитных волн.

Когда поток света пересекает границу раздела двух сред с показателями преломления n_1 и n_2 то, как известно, наблюдаются два явления: преломление и отражение. Если световой поток пересекает границу раздела со стороны

оптически более плотной среды, то угол преломления больше угла падения. С ростом угла падения преломленный луч будет прижиматься к границе раздела. И, наконец, при определенном угле падения, называемом критическим, преломленный луч начнет скользить вдоль поверхности раздела. При углах падения, больших критического, преломленный световой поток отсутствует (в идеализированном случае), поверхность раздела приобретает свойства зеркала – вся переносимая лучом энергия остается в отраженном потоке. Это явление носит название полного внутреннего отражения. На эффекте полного внутреннего отражения построены все оптические волокна. Условно оптическим волокном называют световоды, диаметр которых менее 0,5 мм.

Излучение, поступающее на входной торец при определенных условиях, испытывает полное отражение от внутренней боковой поверхности и распространяется по зигзагообразному пути до другого торца, который параллелен входному. Направление выходящего луча параллельно направлению входящего пучка или отличается от него на входной угол.

$$\sin i' = n \cdot \sin i. \quad (15.1)$$

Преломленный луч падает на боковую поверхность под углом

$$\varepsilon_m = \pi/2 - i'. \quad (15.2)$$

Для полного внутреннего отражения на боковой стенке необходимо выполнение условия

$$\varepsilon_m \geq \varepsilon_c. \quad (15.3)$$

где ε_c – критический угол полного внутреннего отражения.

$$\sin \varepsilon_c = \frac{1}{n}, \quad (15.4)$$

$$\sin \varepsilon_m = \cos i' \geq \frac{1}{n}. \quad (15.5)$$

Если $n \geq \sqrt{2}$, то свет, падающий под любым углом, после переотражения выйдет из световода.

Длина волокна l_0 , определяющая свободный пробег луча, равна

$$l_0 = d/\operatorname{tgi}', \quad (15.6)$$

где d – диаметр сердцевины.

Число полных отражений на длине световода l определяется как

$$N = l/l_0 . \quad (15.7)$$

Коэффициент внутреннего светопропускания равен отношению светового потока, вышедшего из волокна к величине входящего потока

$$\tau = \frac{\Phi_{\text{вых}}}{\Phi_{\text{вх}}} . \quad (15.8)$$

Рассмотрим волокно с оболочкой. Необходимым условием распространения луча только в сердечнике является

$$n_{\text{возд}} \cdot \sin \Theta_a = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} , \quad (15.9)$$

Θ_a – называют приемным углом волокна для меридиональных лучей.

Апертура оптического волокна – это максимальный угол Θ_a между оптической осью и образующей вводимого в торец волокна из свободного пространства светового конуса лучей, для которых в дальнейшем выполняется условие полного внутреннего отражения (рисунок 15.1). Такие лучи удерживаются внутри волокна, испытывая множество внутренних отражений, и выходят из волокна только на противоположном конце. Лучи, падающие под углом, большим номинального апертурного угла, после преломления покидают волокно. Оптическое волокно характеризуют также числовой апертурой NA , которая выражается равенством $NA = \sin \theta_A$. Эта характеристика позволяет оценить количество световой энергии, которую можно ввести в волокно. Это безразмерная величина, зависящая только от n_1 и n_2 .

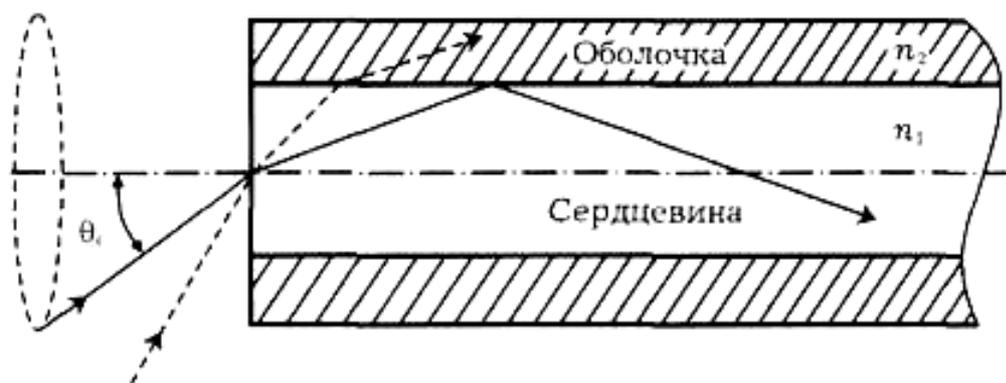


Рисунок 15.1 – Параметры оптического волокна

Оболочка SiO имеет показатель преломления $n_2=1,46$. По технологическим соображениям разница показателей преломления Δ не должна превышать 1%:

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \leq 0,01. \quad (15.10)$$

Следовательно,

$$NA = \sqrt{(n_1 + n_2) \cdot (n_1 - n_2)} = n_1 \cdot \sqrt{2\Delta}. \quad (15.11)$$

Обычно числовая апертура находится в пределах 0,1...0,2. Это соответствует приемным углам $\Theta_a = 5,7...11,5^\circ$. В технологических установках апертура может быть больше 0,5 ($\Theta_a \geq 30^\circ$).

Традиционные проводные линии, коаксиальные кабели, СВЧ-волноводы – все они требуют дорогих и дефицитных материалов, по меньшей мере, меди. Для изготовления стекловолокна используются оксиды кремния – самые распространенные на Земле вещества. Волокна из прозрачных пластиков также почти не нуждаются в редких материалах. Таким образом, источники сырья для производства световолокон практически не ограничены. К этому следует добавить, что по диаметру оптические кабели существенно меньше металлических. Материалы оптических кабелей не подвержены коррозии и экологически безопасны.

Волоконно-оптические кабели не восприимчивы к помехам со стороны электромагнитных полей радиодиапазона, и сами не создают таких помех.

Поэтому в плане электромагнитной совместимости – это идеальные средства передачи информации. Столь же совершенны они и по электробезопасности, поскольку переносимые в них мощности очень малы.

Для того чтобы передать свет на некоторое расстояние, необходимо сохранить его мощность. Снизить потери при его передаче можно, во-первых, обеспечив оптически достаточно прозрачную среду распространения, тем самым, сведя к минимуму поглощение волны, и, во-вторых, обеспечить правильную траекторию движения луча. Первая задача в настоящее время решается с помощью применения высокотехнологичных материалов, таких как чистое кварцевое стекло. Вторая задача решается с помощью закона оптики, описанного выше.

И сердцевина, и оболочка изготавливаются из стекла или пластика. Наиболее часто (вследствие лучших характеристик) используется оптоволокно типа “стекло-стекло”, когда сердцевина и оболочка изготавливаются из особого кварцевого стекла. Понятно, что стекло, используемое для оболочки, должно иметь меньший показатель преломления, чем для сердцевины. Показатель преломления стекла регулируется с помощью легирующих добавок. В оптических волокнах показатели преломления сердцевины и оболочки различаются на величину порядка 1%.

Затухание в световоде, т. е. потери мощности светового сигнала, происходит, в основном, по двум причинам: поглощение и рассеивание. Поглощение связано с возбуждением в материале световода электронных переходов и резонансов. В результате этого увеличивается тепловая энергия, накапливаемая в оптическом волокне. Поглощение зависит как от свойств материала, из которого изготавливается оптоволокно, так и от длины волны источника света.

Рассеивание меньше зависит от свойств материала и, в основном, определяется нарушением геометрической формы оптического волокна. Следствием этих нарушений является то, что часть лучей покидает оптоволокно. Интенсивность рассеивания зависит не только от качества

материала, из которого изготавливается сердцевина волокна, но и от качества оболочки.

Гибкие жгуты волокон используются для передачи изображения и света по протяженному каналу. Область применения – медицинские и технические эндоскопы, предназначенные для визуального наблюдения внутренних органов человека и животного, а также при осмотре деталей конструкций, находящихся в труднодоступных местах (например, двигатели самолетов и автомобилей).

Волоконно-оптические элементы – это оптические устройства, выполненные на основе волоконных световодов. К основным элементам относятся волоконно-оптические жгуты, волоконно-оптические кабели, фоконны, селфоки и волоконно-оптические пластины.

Волоконно-оптический жгут представляет собой пучок оптических волокон из стекла или пластмассы, склеенных или спеченных у концов (гибкий волоконно-оптический жгут) либо по всей длине (жесткий волоконно-оптический жгут), защищенный непрозрачной оболочкой и имеющий торцы с отполированной поверхностью. Используется для передачи оптического изображений или света.

Волоконно-оптический кабель (оптико-волоконный кабель, оптический кабель) – это кабель, состоящий из одного или нескольких свободно уложенных или скрученных по определенной системе оптических волокон, заключенных в общую защитную оболочку, и предназначенный для передачи (“канализации”) оптического излучения. При необходимости кабель может содержать силовые (упрочняющие), защитные и демпфирующие элементы, а также элементы продольной и поперечной герметизации для защиты волокон от воздействия влаги. Оптические кабели классифицируются по назначению, области применения, конструкции сердечника и типу защитной оболочки.

Фокон представляет собой конусообразный элемент волоконной оптики, изготовленный из спеченных вместе конических стеклянных нитей. При этом сердцевина каждой нити имеет более высокий показатель преломления, чем оболочка. Торцы фокона обычно плоские. Изображение, спроектированное на

один торец фокона, переносится с соответствующим изменением масштаба на другой торец. Фоконы могут служить концентраторами света в оптических системах с малой апертурой.

Селфок – световодный элемент цилиндрической формы, у которого (в отличие от обычного световода) показатель преломления есть величина переменная, достигающая максимума вдоль оси и уменьшающаяся вдоль радиуса. Селфок обладает свойствами собирающей линзы и используется как элемент световодной техники.

Волоконно-оптическая пластина (стекловолоконная планшайба) – пластина, изготовленная из нескольких тысяч стеклянных волокон, расположенных параллельно одно другому и сплавленных вместе в герметично плотный когерентный жгут. Она предназначена для передачи изображения из одной плоскости в другую.

Лекция №16

ТЕМА 8. ОПТИЧЕСКИЕ ДЕТАЛИ И УЗЛЫ. ОХЛАЖДАЕМАЯ ЛАЗЕРНАЯ ОПТИКА.

8.1. Оптические детали и узлы. Крепление оптических деталей.

Линзами называют оптические детали, изготовленные из оптического стекла или другого прозрачного материала и ограниченные поверхностями вращения. В большинстве своем линзы ограничены сферическими поверхностями, которые при радиусе кривизны, равном бесконечности, превращаются в плоские. По своей форме линзы могут быть: двояковыпуклые, плосковыпуклые, вогнутовыпуклые, двояковогнутые, плосковогнутые и выпукловогнутые (рисунок 16.1). Первые три типа относятся к положительным или собирающим линзам, вторые – к отрицательным или рассеивающим. Линзы, имеющие радиусы кривизны одного знака, называются менисками.

Конструктивные элементы линз (рисунок 16.1) разделяются на две группы:

Первая группа – элементы, которые характеризуют оптическое действие линзы и определяются при расчете оптической системы: константы оптического стекла и технические требования к нему, радиусы кривизны (форма) поверхностей, толщина (по оси), световые диаметры, вид просветления или защиты поверхностей и допуски на качество поверхности, чистоту и центрировку. Расчетные радиусы должны быть округлены до ближайших значений по ГОСТ 1807-75.

Диаметр линзы D назначают в зависимости от полученных при габаритном расчете системы световых диаметров $D_{св}$ и способа крепления линзы. При креплении линзы в оправе завальцовкой величина припуска на световой диаметр меньше, чем при креплении линзы зажимным кольцом. Полученные расчетные значения диаметров линзы округляются до ближайшего (большего) нормального диаметра по ГОСТ 6636-69.

При расчете не должны допускаться слишком тонкие линзы, так как при полировании они деформируются, что делает невозможным получение точных поверхностей и центрировку (особенно, если мал припуск на центрировку и трудно разместить фаски).

Вторая группа – элементы, зависящие от способа крепления линз. К этой группе относятся диаметры линз D , а также размеры и расположение фасок. Для закрепления линз в оправе полный диаметр линзы делается несколько больше светового.

У всех видов линз необходимо снимать фаски:

- для удаления мелких выколов, образовавшихся при центрировке и для предохранения деталей от выколов (защитные, технологические фаски);
- для крепления линз завальцовкой или обеспечения центрировки; причем размер фаски берется в отличие от механических деталей по гипотенузе (см. рисунок 16.1);
- для удаления излишков стекла в том случае, если между световыми диаметрами на первой и второй поверхностях линзы имеется большая разница (конструктивные).

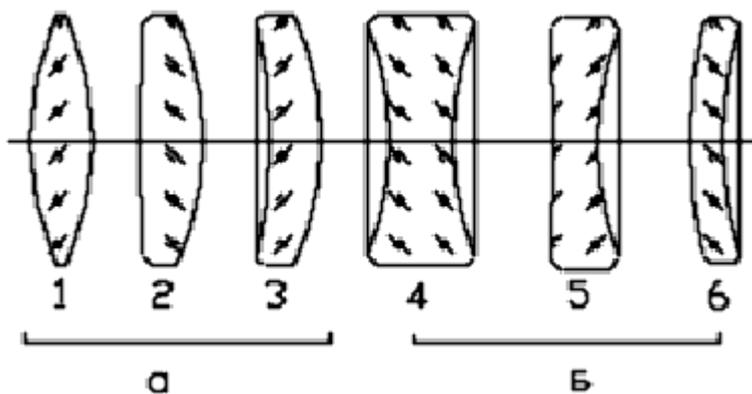


Рисунок 16.1 – Формы линз: а – положительные: 1 – двояковыпуклая, 2 – плосковыпуклая, 3 – вогнутовыпуклая; б – отрицательные: 4 – двояковогнутая, 5 – плосковогнутая, 6 – выпукловогнутая

Фаски снимаются:

1. Конструкторские – для обеспечения крепления линз кольцом или закаткой, или обеспечения центрировки. Ширина фасок выбирается по ОСТ 3-1825-73.

2. Конструктивные – для удаления излишков стекла, уменьшения массы, обеспечения условий удобного крепления. Их размеры не нормируются.

3. Технологические – для предохранения от выколов (защитные фаски).

Компоненты некоторых узлов оптических систем (объективы, окуляры, оборачивающие линзы, сложные призмы, ахроматические клинья и т. д.) соединяют вместе склеиванием, спеканием, свариванием, а также оптическим и глубоким оптическим контактом. Любой из этих способов должен удовлетворять следующим требованиям:

1. не изменять оптические свойства соединенных деталей;
2. не деформировать поверхности деталей после их соединения;
3. обеспечивать достаточную механическую, химическую и термическую прочность и т. п.

подавляющее большинство оптических деталей соединяют друг с другом путем склеивания. Для склеивания оптических деталей, изготовленных из неорганических и органических стекол всех марок, кристаллов, ситаллов, а также для склеивания оптических деталей с металлическими ГОСТ 14887-80 предусматривает виды оптических клеев, перечисленные и описанные ниже.

Оптические клеи, кроме бальзама (природный термопластичный материал), являются синтетическими термоактивными материалами и представляют собой вязкие и прозрачные растворы низко- или высокомолекулярных веществ в органических растворителях без добавок или с добавками отвердителей. Склеивающий слой плесневыми грибами не поражается.

Клеи должны иметь определенные свойства, а именно: высокую степень прозрачности, чистоту, оптическую однородность; соответствие показателя преломления значению одной из соединяемых деталей; переход в твердое

состояние без деформации деталей; высокую механическую прочность, влаго-, термо- и морозостойкость соединений.

В зависимости от функционального назначения склеиваемого компонента и условий его работы значимость каждого из этих свойств различна. С технологической точки зрения существенно исходное агрегатное состояние (твердое, жидкое) и те свойства клея, в зависимости от которых определяется необходимость нагрева склеиваемых деталей и способность полимеризующихся веществ образовывать механически прочное соединение без дополняющего или ускоряющего этот процесс прогрева склеенного компонента.

Детали, изготовленные из прозрачного для оптического излучения материала и входящие в оптическую схему прибора, называются оптическими. К ним относятся линзы, зеркала, призмы, светофильтры, прозрачные шкалы, сетки и защитные стекла. Исключение составляют зеркала с наружным покрытием и дифракционные решетки, которые могут быть выполнены из непрозрачного материала.

При соединении механических деталей с оптическими нельзя игнорировать одно важное, хотя и побочное обстоятельство, заключающееся в том, что оптические детали имеют полированные (оптические) поверхности, чрезвычайно легко поддающиеся химическому воздействию разных составов, в частности влаги, что вызывает их порчу. Поэтому при креплении следует с большой осторожностью и выбором относиться к применяемым материалам.

Металлы и другие материалы должны предварительно тщательно обезжириваться. При наличии смазок и замазок надо принимать меры против распространения их на полированные стеклянные поверхности.

При пользовании различными прокладками следует избегать таких, на которых легко могут оказаться загрязнения или обладающих большой гигроскопичностью. В частности, применение пробки не гарантирует оптические детали от порчи. Что касается бумаги, то некоторые ее сорта,

содержащие испаряемые химические соединения или влагу, должны быть исключены. Вообще бумагу лучше заменять станиолом (Al-фольга).

При несоблюдении этих мер на оптических поверхностях образуются налеты разного происхождения, приводящие оптический прибор в негодное или неудовлетворительное состояние. Иногда эти налеты имеют биологический характер (бактерии, быстро размножающиеся). Все подобного рода реагенты могут быть занесены и помимо оправ, если не соблюдается чистота или составы для чистки оптики загрязнены, но они легко получаются и от деталей, служащих для крепления оптики.

Конструирование узла крепления линзы предполагает обеспечение её базирования, ориентирования и закрепления в соединении с базовой механической основой, называемой оправой.

Конкретное конструктивное решение узла крепления зависит от ряда факторов: назначения линзы, ее материала, размеров и формы, от требований, регламентирующих функционирование этой детали в оптической системе прибора, от назначения прибора и условий его работы, а также от вида производства.

При выборе типа крепления и разработке конструкции узла необходимо обеспечить выполнение следующих общих требований:

- крепление должно быть надежным, т. е. во время работы прибора положение линзы относительно оправы не должно изменяться;
- замыкающие усилия, необходимые для осуществления сопряжения между линзой и оправой, не должны вызывать опасных деформаций и напряжений;
- базовая основа узла, ориентирующие и крепежные детали или их элементы должны быть расположены вне габаритов светового пучка. Поверхности этих элементов, находящиеся вблизи пучка, не должны быть причиной появления рассеянного света и бликов в системе;
- крепления должны быть технологичны, как в отношении изготовления деталей, так и в отношении сборки.

Часто при конструировании узлов крепления линз необходимо учитывать особые требования, связанные со специфическими условиями работы проектируемого прибора. Так, для приборов, работающих в нестабильном тепловом режиме, необходимо иметь в виду температурные деформации, которые могут существенно повлиять на качество крепления. Для некоторых приборов отдельные узлы крепления должны быть герметичными, т. е. в местах соединения линзы и оправы следует предусмотреть специальное уплотнение.

При любом методе крепления линз их цилиндрическая поверхность должна находиться в сопряжении с такой же внутренней поверхностью оправы. При этом исключаются две степени свободы детали – поперечные смещения x и y .

Также существуют следующие способы крепления линз: крепление завальцовкой (закаткой), крепление резьбовым (прижимным) кольцом, крепление пружинящими планками и проволочным (разрезным) кольцом. Первые два вида крепления используются наиболее широко, так как они являются универсальными.

8.2. Охлаждаемая лазерная оптика

Системы охлаждения зеркал технологических лазеров. Охлаждение позволяет интенсифицировать отвод поглощенной энергии и уменьшить температурные перепады, вызывающие термодформации отражателя. Чаще всего используют воздушное или водяное охлаждение. Охлаждаемые зеркала в основном применяют в лазерных установках большой мощности ($P_Q > 1$ кВт). Без охлаждения, во-первых, отражающие оптические элементы могут нагреться до температуры окисления поверхности с соответственным уменьшением коэффициента отражения; во-вторых, уровень термодформации поверхности зеркала ΔD может превысить допустимое значение; в-третьих, возникающие термонапряжения в зеркале могут превысить предел текучести материала отражателя.

Конструктивное выполнение охлаждаемых зеркал должно интенсифицировать теплообмен и максимально приближать каналы

охлаждения к отражающей поверхности. Наиболее распространенными для технологических лазеров ИК-диапазона спектра, в частности для CO_2 -лазеров, являются металлические зеркала с многоканальными системами охлаждения. Диаметр канала таких зеркал в зависимости от мощности излучения составляет от долей миллиметра до нескольких миллиметров. Конструкция охлаждаемого зеркала состоит из сплошного отражающего слоя, охлаждаемого слоя с системой каналов, а также жесткой массивной основы, через которую подводится и отводится хладагент, блока крепления и юстировки зеркала. Наибольшее распространение для технологических лазеров получили многоканальные системы охлаждения: трубчатая, щелевая, щеточная, струйная и т. д.

Наибольшее распространение для ТЛ получили многоканальные системы охлаждения (рисунок 16.2), поперечные размеры каналов которых могут быть от долей мм до нескольких мм. Конструкция охлаждаемого зеркала состоит из: 1) сплошного отражающего слоя; 2) охлаждаемого слоя с системой каналов; 3) жесткой массивной основы, через которую подводится и отводится теплоноситель, а также крепится зеркало.

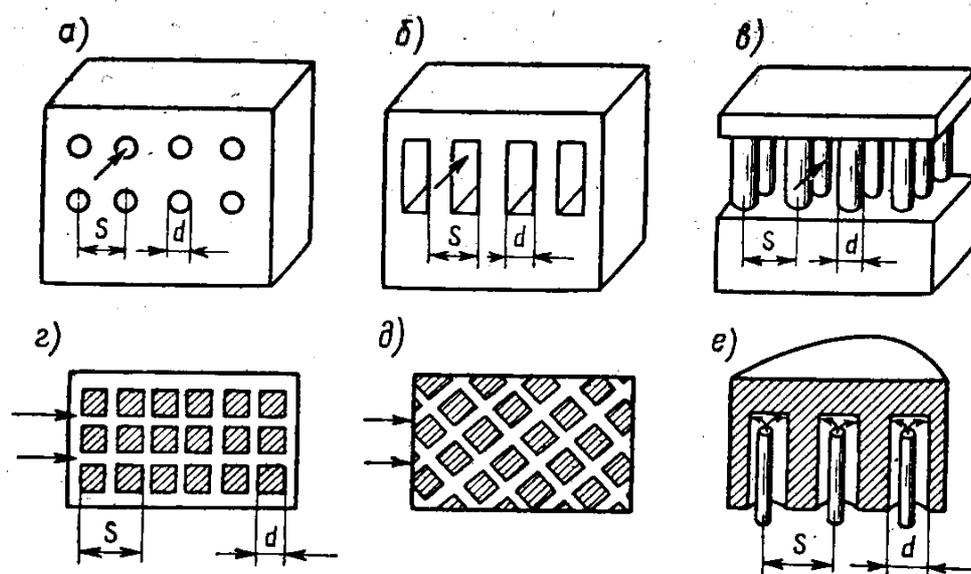


Рисунок 16.2 – Схемы многоканальных систем охлаждения зеркал технологических лазеров: а – трубчатая; б – щелевая; в – щеточная; г, д – вафельные; е – струйная. Стрелками показано направление течения хладагента

Лекция №17

ТЕМА 9. ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЛАЗЕРОВ.

Оптическая система в лазерных технологических установках служит для передачи энергии излучения лазера к месту обработки, регулирования параметров излучения, формирования светового пучка с высокой плотностью мощности, также для визуальной наводки излучения на обрабатываемую точку, контроля за процессом обработки и для оценки ее результатов. Оптические системы, служащие для передачи и трансформации мощных световых пучков лазерного излучения, называются энергетическими. С помощью оптической системы излучение лазера может быть подведено к обрабатываемой детали на необходимом от излучателя расстоянии и под любым углом к ее поверхности. Помимо этого оптическая система может обеспечивать перемещение луча по поверхности детали для осуществления операций резки, сварки, термообработки или пробивки отверстий.

Рассмотрим подробнее особенности отдельных элементов оптической системы.

Отклоняющие системы служат для изменения направления луча от источника до детали. При проектировании или выборе этих систем необходимо учитывать следующие положения и требования:

взаимное расположение детали и источника излучения проектировать с таким расчетом, чтобы расстояние между ними было минимально возможным, также сводить к минимальному количество отклоняющих элементов – при соблюдении этого условия достигается снижение потерь излучения на отражение и рассеяние;

для изменения направления излучения с длиной волны, лежащей в видимой или ближней инфракрасной части спектра, использовать призмы полного внутреннего отражения и интерференционные зеркала с

многослойными диэлектрическими покрытиями; такие системы применимы, в основном, для твердотельных технологических лазеров с длиной волны излучения 1,06 мкм и невысокой мощностью излучения;

в системах с мощными газовыми лазерами, работающих на длине волны 10,6 мкм, применять металлические, преимущественно медные зеркала, при использовании СО₂-лазеров низкой мощности до 100...150 Вт возможно применение стеклянных зеркал с покрытиями из золота и алюминия, которые имеют высокий коэффициент отражения и не окисляются на воздухе;

при выборе или конструировании отклоняющих систем учитывать возможность их нагрева вследствие поглощения излучения. При относительно небольших мощностях излучения, особенно в непрерывном режиме работы лазера, это может привести к термическим деформациям оптических деталей, к изменению их оптической силы и, следовательно, изменению параметров сфокусированного пучка, а также увеличению aberrаций. При увеличении мощности излучения оптические детали могут быть повреждены, поэтому плотность энергии излучения на их поверхностях не должна превышать определенных значений, допускающих длительную нормальную работу этих деталей. Например, оптические стекла могут использоваться до плотности 10³ Вт/см², медные зеркала при соответствующей массе могут выдерживать значительно большие плотности мощности.

Фокусирующая система служит для создания необходимой плотности мощности на поверхности детали. Фокусировка излучения с длиной волны в видимой или ближней инфракрасной области спектра осуществляется линзами из оптического стекла. Подобные линзы используются для фокусировки луча твердотельных лазеров с длиной волны излучения 1,06 мкм. Для снижения aberrаций применяют линзы плоско-выпуклые, конструктивно выполненные в виде специальных объектов с регулируемым расстоянием.

Минимальный диаметр пятна обычно достигается при использовании короткофокусных линз, однако в этом случае резко сокращается рабочий отрезок фокусирующей системы. Такое снижение часто нежелательно, так как

при этом парами и жидкими частицами металла, образующимися при обработке, может быть повреждена линза. Кроме того, часто требуется по технологии увеличенное рабочее расстояние, например при обработке на дне углублений. Для увеличения рабочего расстояния применяют телескопические системы, установленные перед длиннофокусной линзой, за счет чего рабочее расстояние может быть увеличено в десятки раз.

Для излучения на длине волны 10,6 мкм (газовые лазеры) традиционные оптические материалы непрозрачны. Материалом для изготовления линз служат монокристаллы солей галогеноводородных кислот, ZnSe, GaAs и др. Эти материалы обладают высокой прозрачностью, но гигроскопичны и имеют недостаточную стойкость при мощностях более 5...7 кВт, поэтому их применение отличается недостаточной для технологических целей надежностью. Наибольшей стойкостью и надежностью обладают металлические зеркальные объективы типа “Кассегрен”. Подобные объективы работоспособны при достаточно высоких мощностях излучения, имеют высокую надежность и долговечность. Объективы такого типа имеют систему вогнутых и выпуклых зеркал, обеспечивающих фокусировку лазерного луча до размеров 0,3...0,5 мм.

Перспективно применение дифракционных элементов компьютерной оптики – фокусаторов, позволяющих перераспределять энергию в заданную область пространства с заданным распределением интенсивности при высокой энергетической эффективности. Преимуществами фокусаторов являются также их высокая стойкость и надежность в работе. Фокусаторы выполняются в виде отражающих рельефных металлических пластин или оптически прозрачных многослойных фильтров.

Система наблюдения служит для наблюдения, контроля и наведения излучения на обрабатываемую точку. Существуют две основные схемы системы наблюдения: когда система наблюдения соосна с фокусирующей системой и когда система наблюдения расположена под углом к фокусирующей системе. Первые системы выполняются путем соответствующей установки

отклоняющих зеркал и призм, полупрозрачных зеркал или зеркал с отверстием. Такая система применена на установках КВАНТ-15, КВАНТ-16 и в системе наблюдения СОК-2. Для точного наведения излучения на обрабатываемую деталь в оптических системах с совмещенными фокусирующими объективами и микроскопом применяется сетка с перекрестием, обеспечивающим максимальную точность наведения. Соосные системы наблюдения применяются, в основном, для лазеров с длиной волны излучения в ближней инфракрасной области ($\lambda = 1,06$ мкм). Для излучения с длиной волны $\lambda = 10,6$ мкм, т.е. для газовых лазеров, соосная система связана с определенными трудностями. В частности, соляные линзы могут удовлетворительно фокусировать излучение, имея существенные дефекты поверхности, неприемлемые для визуальной системы. Из несоосных систем наиболее рационально использование оптического микроскопа, расположенного под углом к падающему излучению, или специальной телевизионной системы.

Помимо рассмотренных функций оптическая система может обеспечивать: перемещение, расщепление, сканирование, модуляцию луча.

В большинстве случаев относительное перемещение детали и источника нагрева осуществляется перемещением детали. Однако в случаях высоких скоростей обработки и увеличенных габаритов деталей выгоднее применять перемещение луча; в отдельных случаях, например при резке, возможны совмещенные перемещения. Это позволяет уменьшить массу подвижных узлов, что облегчает управление их перемещением, способствует повышению точности обработки.

Перемещение достигается следующими способами: использование системы подвижных зеркал, перемещаемых по соответствующим координатам; при небольших перемещениях используют изменение угла наклона зеркала по отношению к оптической оси; для обеспечения кругового перемещения используют систему вращения зеркала вместе с объективом. Если радиус окружности не превышает радиуса поля зрения объектива, то круговую

траекторию движения фокального пятна можно получить путем смещения объектива и его вращения относительно оси луча.

Разделение луча осуществляют бипризмами. Подобным лучом можно одновременно обрабатывать несколько точек. Применение системы зеркал позволяет разделять лучи большой мощности, например для двусторонней сварки. Отклонение зеркала с определенной частотой от оси распространения луча позволяет сканировать последний по поверхности детали, обеспечивая, например, большие площади обработки при лазерном термоупрочнении. Модуляцию луча можно осуществлять за счет специальных пьезооптических модуляторов, устанавливаемых на пути луча, а также за счет колебаний фокусирующей оптики.

Технологическая оснастка лазерных установок состоит из различного рода манипуляторов и приспособлений для закрепления и установки деталей в нужном положении. Технологические возможности установок в значительной степени зависят от типа и конструкции манипуляторов, которыми они оснащены. Конструктивные решения манипуляторов весьма разнообразны, однако существует два основных направления в конструировании:

создание универсальных электромеханических систем с большим количеством степеней свободы, применимых для различных процессов лазерной обработки и типов деталей;

создание специализированных упрощенных сменных манипуляторов, применяемых для одного или более методов обработки, а также для обработки однотипного вида деталей.

Манипуляторы первого типа эффективно используются при единичном и мелкосерийном производстве. При крупносерийном и массовом производстве сменные устройства, приспособленные для конкретного вида детали, позволяют получить максимальный эффект.

Основные требования, предъявляемые к манипуляторам для лазерной обработки, можно сформулировать следующим образом:

манипуляторы должны обеспечивать плоское перемещение по любой траектории, вращательные реверсивные движения во всех плоскостях, угловые перемещения в вертикальной и горизонтальной плоскостях, вертикальное перемещение;

механизмы и приводы манипуляторов должны быть рассчитаны на скоростные режимы до $v = 200...300$ м/ч, требуется обеспечить равномерность скорости дискретных перемещений из точки в точку;

погрешность позиционирования манипуляторов должна находиться в пределах от нескольких микрон до 0,5 мм в зависимости от габаритов детали и технологических требований. В отдельных случаях эти требования могут быть повышены в несколько раз;

манипуляторы, особенно при крупносерийном и массовом производстве, должны быть оснащены устройствами ЧПУ на микроэвм и микропроцессорах;

при выборе и разработке манипуляторов необходимо учитывать возможность перемещения самого луча, что часто упрощает конструкцию, в основном за счет исключения необходимости перемещать с большой скоростью массивные детали;

специализированные манипуляторы должны предусматривать возможность многопозиционной обработки.

Из существующих типов манипуляторов для резки, например, наиболее эффективны машины порталного типа с продольным перемещением листа по рольгангу и поперечным перемещением луча. Для размерной обработки, где габариты деталей относительно невелики, чаще применяется схема с перемещением детали.

Для сварки применяют, в основном, вращатели с различным позиционированием оси вращения и двухкоординатные столы плоского перемещения. Аналогичные манипуляторы применимы и для термообработки лучом лазера, однако в отдельных случаях появляется необходимость обработки сложных криволинейных поверхностей, что требует специальных манипуляторов.

Высокие требования к точности позиционирования связаны с достижением необходимой точности взаимных перемещений изделия и луча. В связи с крайне малым диаметром луча требуется точность от нескольких микрон до 0,1 мм, например при сварке встык. Если отклонение превышает допустимую величину, луч сместится со свариваемого стыка, и сварное соединение не образуется. При резке требования по точности к манипулятору диктуются требованиями технического задания на деталь, которые при лазерной резке наиболее высоки.

Сборочно-установочные приспособления необходимы для решения следующих основных задач в технологическом процессе обработки:

удобное размещение детали для соответствующего метода обработки;

точное базирование места обработки относительно лазерного луча;

надежное закрепление детали во избежание перемещений за счет механических и термических воздействий;

быстрая установка и съем детали в процессе обработки.

В лазерной технологии применимы практически все типы универсальных и специальных приспособлений, известных и применяемых в технологии сварки, газоплазменной резки, механической обработке, точность базирования которых не превышает 0,1...0,2 мм.

Основой любого сборочного приспособления является жесткий каркас с упорами, фиксаторами и прижимами. При сборке детали заводят в приспособление, укладывают по упорам или фиксаторам и закрепляют прижимами. Винтовые, рычажные или эксцентриковые прижимы просты, но приводятся в действие вручную. Использование пневматических, гидравлических, магнитных или вакуумных прижимов значительно сокращает вспомогательное время, особенно, если требуется зажать изделие одновременно в нескольких местах.

Использование того или иного типа сборочно-установочных приспособлений определяется конструкцией изделия, принятой технологией изготовления и программой выпуска.

Список использованных источников

1. Шорин, В.П. Оптика лазеров: уч.пособие / В.П. Шорин, С.П. Мурзин – Самара: Изд-во Сам. гос. аэрокос. ун-та, 2006. – 146с.
2. Захаров, В.П. Лазерная техника: учебн. Пособие / В.П. Захаров, Е.В. Шахматов – Самара: Сам. гос. аэрокос. ун-та, 2006 – 312с.
3. Пихтин, А.Н. Оптическая и квантовая электроника: Учеб.для вузов/А.Н. Пихтин. – М.: Высш.шк., 2001. – 573с.
4. Привалов, В.Е. Лазеры и экологический мониторинг атмосферы: учебное пособие / Привалов, В.Е., Фотиади А.Э., Шеманин В.Г. – СПб: Изд-во «Лань», 2013. – 288с.
5. Янг, М. Оптика и лазеры, включая волоконную оптику и оптические волноводы: пер. с англ. – М.: Мир, 2005. – 541с.