

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА»

В. П. ШОРИН, С. П. МУРЗИН

ОПТИКА ЛАЗЕРОВ

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия*

САМАРА
Издательство СГАУ
2006

УДК 535 (075)
ББК 34.52
Ш 794



**Инновационная образовательная программа
"Развитие центра компетенции и подготовка
специалистов мирового уровня в области аэро-
космических и геоинформационных технологий"**

Рецензенты: д-р физ.-мат. наук, проф. Н. Л. К а з а н с к и й
д-р техн. наук, доцент Д. Л. С к у р а т о в

Ш 794 **Шорин В.П.**
Оптика лазеров: учеб. пособие / В.П. Шорин, С.П. Мурзин –
Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2006. – 146 с. : ил.

ISBN 5-7883-0427-X

Приведена информация об основных типах лазеров, модах оптических резонаторов и свойствах лазерных пучков, преобразователях лазерного луча, свойствах используемых оптических материалов, критериях стабильности, устойчивости и лучевой прочности лазерной оптики. Рассмотрены возможности применения фокусаторов излучения в составе систем транспортировки и формирования излучения. Приведены общие требования к оформлению чертежей оптических деталей, узлов и схем.

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по специальности 200202 "Лазерные системы в ракетной технике и космонавтике".

УДК 535 (075)
ББК 34.52

ISBN 5-7883-0427-X

© Шорин В.П., Мурзин С.П., 2006
© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2006

ОГЛАВЛЕНИЕ

Условные обозначения.....	5
Введение.....	9
1 ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ ЛАЗЕРОВ.....	11
1.1 Основные типы лазеров.....	11
1.2 Моды оптических резонаторов.....	14
1.3 Свойства лазерных пучков.....	21
Вопросы самоконтроля к главе 1.....	34
2 ЭЛЕМЕНТЫ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ЛАЗЕРОВ.....	36
2.1 Отражательные элементы.....	36
2.2 Проходные элементы.....	41
2.3 Выбор оптических покрытий.....	46
2.4 Поляризационные элементы.....	51
Вопросы самоконтроля к главе 2.....	54
3 УСТРОЙСТВА УПРАВЛЕНИЯ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ.....	56
3.1 Преобразователи лазерного излучения.....	56
3.2 Системы транспортировки и формирования излучения.....	62
3.3 Применение фокусаторов излучения.....	66
Вопросы самоконтроля к главе 3.....	81
4 МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ.....	84
4.1 Материалы для активных элементов твердотельных лазеров.....	84
4.2 Материалы для элементов проходной оптики.....	93
4.3 Материалы для элементов отражательной оптики.....	104
4.4 Материалы для поляризационных элементов.....	111
4.5 Материалы для интерференционных покрытий.....	113
Вопросы самоконтроля к главе 4.....	115
5 РАСЧЕТ ДОПУСКОВ И ИЗОБРАЖЕНИЕ НА ЧЕРТЕЖАХ ОПТИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ.....	117

5.1 Расчет допусков на изготовление и сборку оптических деталей, узлов и приборов.....	117
5.2 Критерии оценки качества изображения и допуски на дефекты оптической системы.....	118
5.3 Расчет допусков на оптические поверхности и детали.....	120
5.4 Нормируемые показатели качества стекла.....	122
5.5 Изображение на чертежах оптических деталей и сборочных единиц.....	126
Вопросы самоконтроля к главе 5.....	144
Список литературы.....	146

Условные обозначения

R_1, R_2 – радиусы кривизны зеркал, положительные для вогнутых фокусирующих и отрицательные для зеркал с выпуклой поверхностью;

L_p – расстояние между зеркалами резонатора;

ω_0 – минимальный радиус перетяжки в резонаторе;

M – коэффициент увеличения резонатора;

$\bar{q}, \bar{m}, \bar{n}$ – модовые числа;

ε_u – энергия лазерного импульса;

τ_u – длительность импульса;

f_u – частота следования импульсов;

η – общий энергетический КПД лазера;

ν_p – собственная частота резонатора;

Q – добротность квантового генератора;

P_Q – мощность лазерного излучения;

t – время;

$\tau_{\text{ког}}$ – время когерентности;

$L_{\text{ког}}$ – длина когерентности;

n – показатель преломления среды;

I – интенсивность излучения;

ω_G – условный радиус выходящего из резонатора гауссова пучка;

ω_0 – радиус перетяжки в резонаторе;

F – фокусное расстояние;

D – апертура излучения;

$\tilde{\theta}$ – угловая расходимость пучка;

q – плотность мощности излучения;

α_p – коэффициент термического расширения;

A_{II} – коэффициент поглощения;

K – коэффициент теплопроводности;

λ – длина волны излучения;

σ_T – предел текучести материала;

E – модуль упругости;

$T_{пл}$ – температура плавления материала;

ρ – коэффициента отражения;

n – показатель преломления;

β – коэффициент объемного поглощения;

δ – толщина слоя;

γ – модуль сдвига;

σ – разрушающее напряжение;

B – постоянная Керра;

R – максимальный радиус фокусируемого пучка;

L_ϕ – длина фокального отрезка;

$Z(U, V)$ – высота рельефа в точке (U, V) оптического элемента;

U, V – координаты точки отражающего оптического элемента в системе координат с осью OU , направленной противоположно проекции падающего луча и имеющей начало в центре расположенной в области $G: U^2 \cos \bar{\theta} + V^2 = R^2$ отражающей поверхности;

$\bar{\theta}$ – угол между оптической осью излучения и нормалью к плоскости оптического элемента;

$\text{mod}(\bar{h})_{\frac{\bar{h}}{m\lambda/(2\cos\bar{\theta})}}$ – функция, равная наименьшему положительному остатку от деления \bar{h} на $\frac{\bar{h}}{m\lambda/(2\cos\bar{\theta})}$;

r – параметр фокусируемого пучка гауссовского распределе-

ния плотности мощности излучения, в котором интенсивность на расстоянии r от центра уменьшается в e раз по сравнению с интенсивностью в центре пучка;

$U_j; V_j$ – координаты проекции фокальной точки на плоскость оптического элемента;

\overline{M} – координата U прямой на поверхности фокусатора (при синтезе фокусаторов в рамках геометрической оптики принимают, что прямые на их отражающей поверхности, перпендикулярные световому отрезку, фокусируют излучение в точку $\xi = const$ на нем);

$(\mathcal{G}(R/r))^*$ – значение двойного интеграла вероятности в области G для фокусируемого пучка гауссовского распределения плотности мощности излучения;

$\overline{\varphi(U,V)}$ – фазовая функция рассчитываемого оптического элемента;

$n_F - n_C$ – средняя дисперсия;

ΔN_p – предельное отклонение формы рабочей поверхности;

μ_A – показатель ослабления;

τ_A – коэффициент пропускания;

Δn_ε – категория и класс по показателю преломления;

$\Delta(n_{F'} - n_{C'})$ – категория и класс по средней дисперсии;

ε – предел разрешения;

O_3 – световая зона (часть детали, через которую проходит световой поток, или часть поверхности, на которую падает световой поток);

O_ϕ – световой диаметр (световая зона на поверхности круглой формы);

L – длина хода луча в призме (геометрическая);

N – предельное отклонение стрелки кривизны поверхности де-

тали от стрелки кривизны поверхности пробного стекла или допускаемая сферичность плоской поверхности;

ΔN – поле допуска формы поверхности;

f_{\min} – наименьшее допускаемое фокусное расстояние пластинок или призм, как результат сферичности их поверхностей;

θ – предельная клиновидность пластины, разнотолщинность;

π – предельная пирамидальность (угол между ребром призмы и противоположащей гранью);

δ – предельная разность равных по номинальному значению углов призмы;

P – класс чистоты полированной поверхности;

ΔR – класс точности пробного стекла или предельное отклонение от значения расчетного радиуса поверхности;

m – ширина фаски;

α – угол наклона фаски.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важнейших задач высшей школы является подготовка специалистов, способных высокоэффективно работать в современных отраслях практической деятельности. Производство конкурентоспособной продукции в передовых отраслях промышленности немислимо без использования наукоемких, в том числе лазерных, систем и технологий, разработку и внедрение которых могут осуществлять лишь высококвалифицированные инженерно-технические работники. Вузы Российской Федерации осуществляют подготовку специалистов в области лазерных систем (специальности: “Лазерные системы в ракетной технике и космонавтике”, “Лазерная техника и лазерные технологии”, а также “Оптико-электронные приборы и системы”). Важность решаемых вузами задач обуславливает целесообразность активного совершенствования учебно-методического обеспечения, создания специальной учебной литературы, которая отражала бы новые подходы к проблемным вопросам оптики лазеров, учитывающим специфику и особенности лазерных источников энергии.

Цель пособия – дать студентам подготовку по проектированию и изготовлению лазерных оптических элементов в соответствии с современными требованиями, предъявляемыми к инженерам. В учебном пособии кратко рассматриваются физические основы работы лазеров; приводятся основные требования, предъявляемые к элементам оптических систем лазеров и лазерным материалам; описываются устройства управления лазерным излучением; находят отражение вопросы расчета допусков на изготовление и сборку оптических деталей, узлов и приборов, а также изображения на чертежах оптических деталей и сборочных единиц.

В результате освоения курса специалист должен получить представление об основных типах лазеров, модах оптических резонаторов и свойствах лазерных пучков, преобразователях лазерного луча, системах транспортировки и формирования излучения, свойствах оптических материалов, критериях стабильности, устойчивости и лучевой прочности лазерной оптики, получить знания, позволяющие конструировать типовые оптические узлы лазерных систем и их элементы.

1 ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ ЛАЗЕРОВ

1.1 Основные типы 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. Число атомов, находящихся в нижнем энергетическом состоянии, больше, чем число атомов в верхнем состоянии. При переходе из нижнего в верхнее энергетическое состояние атом поглощает один фотон. Обратный процесс сопровождается излучением фотона. Сохранение равновесного состояния обеспечивается самопроизвольным излучением фотонов, происходящим независимо от внешнего воздействия и сопровождающимся переходом атомов из верхнего энергетического состояния в нижнее. Дополнительное внешнее энергетическое воздействие переводит часть атомов в верхнее энергетическое состояние, затем при переходе в нижнее состояние они хаотически излучают фотоны – наблюдается спонтанное излучение. Для генерации излучения нужно, чтобы число атомов на верхнем уровне было бы больше числа атомов на нижнем уровне,

т.е. необходимо, чтобы из двух рассматриваемых уровней верхний был населен больше, чем нижний. Такое состояние вещества называется активным состоянием с инверсной (обращенной) заселенностью. Существуют различные способы создания инверсной заселенности, являющейся основным условием получения лазерного излучения.

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 жидкостных лазерах активную среду составляют растворы органических красителей или специальные жидкости, активированные ионами редкоземельных элементов. Для жидкостных лазеров применяют непрерывную или импульсную оптическую накачку.

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. Существует несколько типов газоразрядных лазеров. В ионных лазерах излучение полу-

чают 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.

К газоразрядным относятся также молекулярные лазеры, в которых излучение возникает в результате переходов электронов между энергетическими уровнями молекул. Эти лазеры имеют широкий диапазон частот, соответствующий длинам волн от 0,2 до 50 мкм. Наиболее распространены молекулярные лазеры на диоксиде углерода (CO₂-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 CO₂-лазеров являются газодинамические. В них инверсная населенность, необходимая для 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 экимерные, 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.

1.2 Моды оптических резонаторов

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, применяют резонатор. Оптический резонатор определяет частоту и пространственные характеристики излучения, он не только увеличивает время жизни кванта в системе и вероятность вынужденных переходов, но и определяет спектральные характеристики излучения. В длинноволновом диапазоне длина волны излучения существенно больше размеров резонансного контура и его спектральные характеристики определяются параметрами электрической цепи. Длинные радиоволны при этом излучаются в пространство практически изотропно. Для формирования электромагнитной волны в СВЧ-диапазоне используют пустотельные объемные резонаторы с размерами, сравнимыми с длиной волны. В ИК- и видимом диапазоне длина волны излучения много меньше характерных размеров резонатора.

Различают устойчивые и неустойчивые резонаторы. Условие устойчивости резонатора в приближении геометрической оптики

имеет вид:

$$0 < \left(1 - \frac{L_p}{R_1}\right) \cdot \left(1 - \frac{L_p}{R_2}\right) < 1 \quad (1.1)$$

где L_p – расстояние между зеркалами; R_1 и R_2 – радиусы кривизны зеркал, положительные для вогнутых фокусирующих и отрицательные для зеркал с выпуклой поверхностью.

В устойчивом резонаторе распределение электромагнитного поля воспроизводится одинаково при многократных проходах излучения между зеркалами и имеет стационарный характер. Области значений L_p , R_1 и R_2 показаны на диаграмме устойчивости (рисунок 1.1). Заштрихованная область устойчивости в системе координат $X_1 = 1 - \frac{L_p}{R_1}$, $X_2 = 1 - \frac{L_p}{R_2}$ ограничена гиперболой $X_1 \cdot X_2 = 1$ и осями координат. Множество точек на прямой $X_1 = X_2$ соответствует симметричным резонаторам с одинаковыми зеркалами ($R_1 = R_2$). Центральная точка A ($X_1 = X_2 = 0$) определяет симметричный конфокальный резонатор, в котором фокальные точки зеркал совпадают и находятся на середине расстояния между зеркалами, т. е. $F_1 = F_2 = \frac{L_p}{2}$. Точка B с координатами $X_1 = X_2 = -1$ соответствует концентрическому резонатору, образуемому отражающей сферой ($R_1 = R_2 = \frac{L_p}{2}$).

Точка C с координатами $X_1 = X_2 = 1$ соответствует плоскому резонатору ($R_1 = R_2 = \infty$). Множество точек на прямой BAC , удовлетворяющих неравенству $X_1 = X_2 > 1$, соответствует симметричному резонатору с выпуклыми зеркалами.

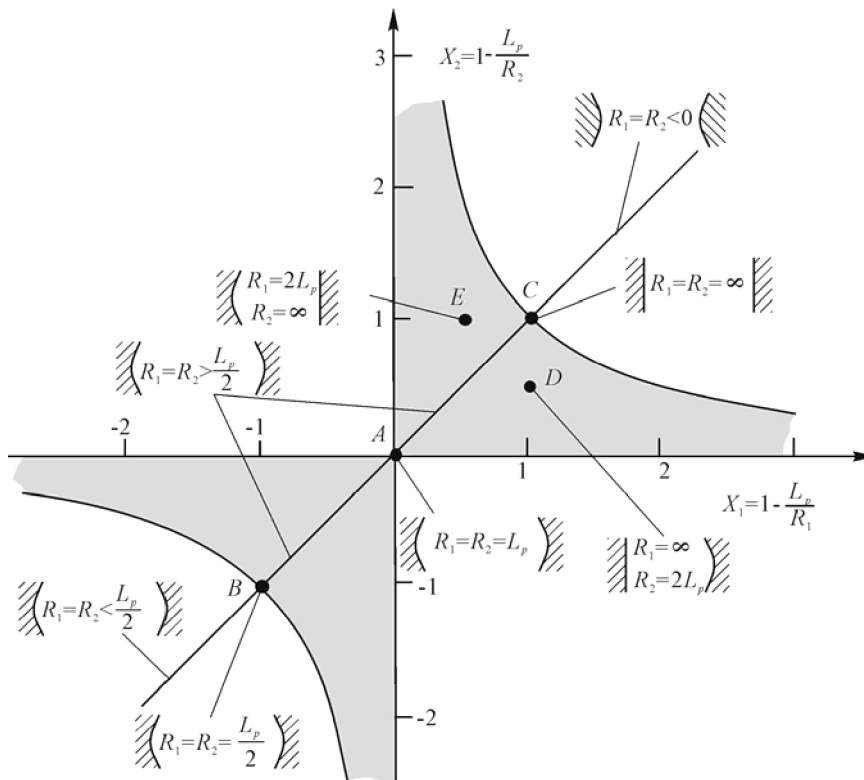


Рисунок 1.1 – Диаграмма устойчивости резонатора

Интенсивность излучения не равномерно распределена по всему объему резонатора, а сосредоточена внутри представленной на рисунке 1.2 заштрихованной области, называемой каустикой.

Радиусы ω_1 и ω_2 этой области на зеркалах, а также ее минимальный радиус ω_0 в месте перетяжки определяются длиной волны и параметрами резонатора (R_1 , R_2 , L_p).

Расстояния L_1 и L_2 от места положения перетяжки до зеркал определяются уравнениями:

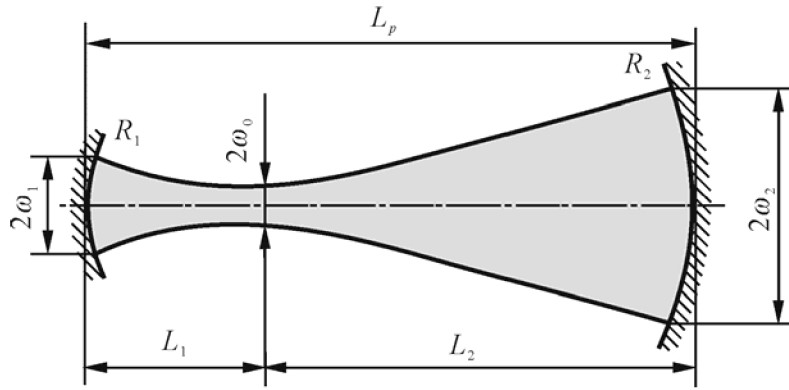


Рисунок 1.2 – Основные параметры устойчивости резонатора

$$\left. \begin{aligned} L_1 &= \frac{L_p(R_1 - L_p)}{(R_1 + R_2 - 2L_p)}, \\ L_2 &= \frac{L_p(R_2 - L_p)}{(R_1 + R_2 - 2L_p)}. \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

Для конфокального резонатора расстояния L_1 и L_2 равны:

$$L_1 = L_2 = \frac{L_p}{2} \quad (1.3)$$

Форма каустики также зависит от геометрических параметров резонатора. Ее вид для некоторых из них представлен на рисунке 1.3. Профиль каустики $\omega(x)$ в случае гауссовых пучков описывается уравнением:

$$\omega(x) = \sqrt{\omega_0^2 + \left(\frac{x\lambda}{2\pi\omega_0}\right)^2} \quad (1.4)$$

Расстояние x отсчитывается от плоскости перетяжки. Размер занятой излучением зоны на зеркалах ($x = L_p/2$) составит при этом:

$$\omega_1 = \omega_2 = \sqrt{2\omega_0^2} = \sqrt{\frac{L_p\lambda}{2\pi}} \quad (1.5)$$

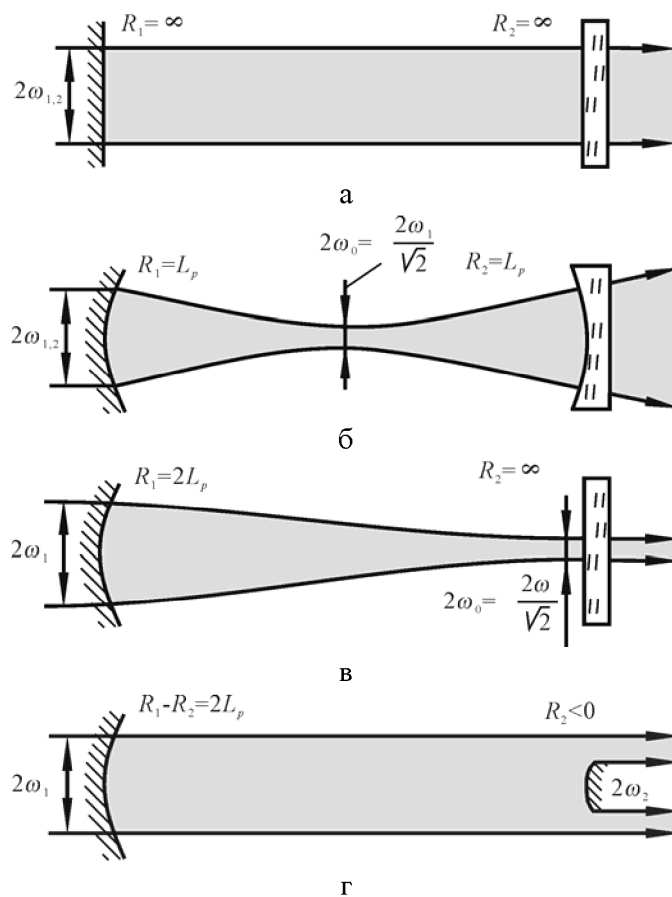


Рисунок 1.3 – Форма каустики для некоторых типов резонаторов: а – плоскопараллельный; б – конфокальный устойчивый; в – полуконфокальный устойчивый; г – конфокальный неустойчивый

Наибольшее распространение среди устойчивых резонаторов получил полуконфокальный резонатор, у которого одно зеркало плоское ($R_2 = \infty$), а второе имеет радиус $R_1 = 2L_p$, т. е. его фокус лежит на плоском зеркале. Этому резонатору соответствует множество точек, принадлежащих кривой $X_1 \cdot X_2 = \frac{1}{2}$. Полуконфокальный резонатор (точки D , E на рисунке 1.1) представляет собой

половину симметричного конфокального резонатора, состоящего из двух одинаковых, отстоящих на расстоянии $2L_p$ друг от друга зеркал с радиусами кривизны $R_1 = R_2 = 2L_p$. Основное преимущество полуконфокального резонатора заключается в возможности использования для вывода излучения плоских окон из частично прозрачных материалов, кроме того, выходящий пучок имеет малую расходимость.

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 пробое. Однако самым серьезным недостатком устойчивых резонаторов является невысокая лучевая стойкость используемых в качестве выходных окон диэлектрических оптических материалов.

Наиболее часто в лазерной технике используется телескопический конфокальный неустойчивый резонатор, состоящий из двух металлических зеркал, формирующих на выходе пучок с малой расходимостью. Схема такого резонатора представлена на рисунке 1.4. Конфокальность для такого резонатора имеет место при выполнении условия:

$$R_1 - R_2 = 2L_p \quad (1.6)$$

В лазере с неустойчивым резонатором генерация возникает в приосевой зоне, усиливаясь при многократных проходах между зеркалами. Относительная величина смещения положения луча на выпуклом зеркале за один проход называется коэффициентом увеличения резонатора:

$$M = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{R_1}{R_2} \quad (1.7)$$

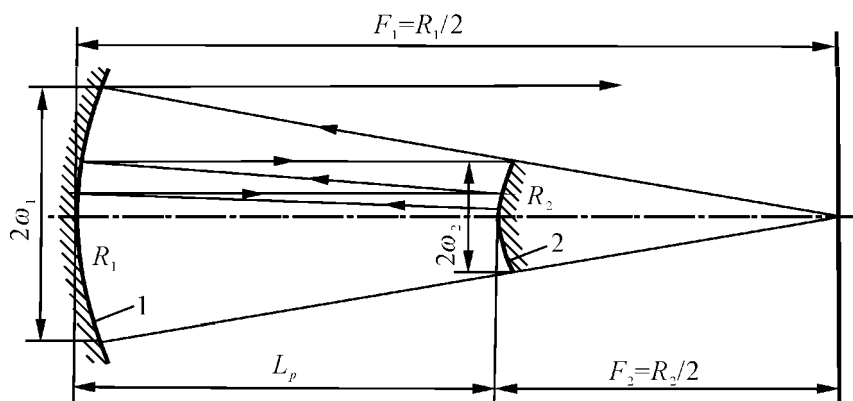


Рисунок 1.4 – Основные параметры и ход лучей в неустойчивом резонаторе

В оптическом резонаторе существует определенный набор типов колебаний. Каждому виду электромагнитных колебаний соответствует определенное устойчивое распределение поля волны в резонаторе, называемой модой. Модовый состав излучения является важной характеристикой лазера, т.к. определяет спектр и пространственные параметры генерируемого пучка. Различные колебания в резонаторе характеризуются набором модовых чисел \bar{q} , \bar{m} , \bar{n} , которые принято писать рядом с буквенным обозначением типа электромагнитных волн (например, $TEM_{\bar{q},\bar{m},\bar{n}}$). Стоячая электромагнитная волна имеет продольную и поперечную структуру распределения электрического поля. Продольное распределение поля описывается модовым числом \bar{q} , которое соответствует различным продольным модам колебаний. Число \bar{q} определяет наличие узлов поля на зеркалах, удовлетворяющее условию:

$$\bar{q}\lambda/2 = L_p \quad (1.8)$$

В реальных условиях \bar{q} достаточно велико. Например, для CO_2 -лазера, имеющего $\lambda = 10,6$ мкм, $L_p \sim 1$ м, значение \bar{q} составляет приблизительно $2 \cdot 10^5$. Колебания, соответствующие различ-

ным 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 \bar{m} и \bar{n} . Качественный вид распределения поля на выходном окне устойчивого полуконфокального резонатора для поперечных мод низшего порядка и соответствующие распределения интенсивности в лазерном пучке представлены на рисунке 1.5.

1.3 Свойства лазерных пучков

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:

$$\eta = \eta_{кв} \eta_e \eta_p \eta_{с.о.}, \quad (1.9)$$

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

Способность лазеров излучать в узком диапазоне длин волн характеризует монохроматичность лазерного излучения ($\Delta \nu / \nu_0$).

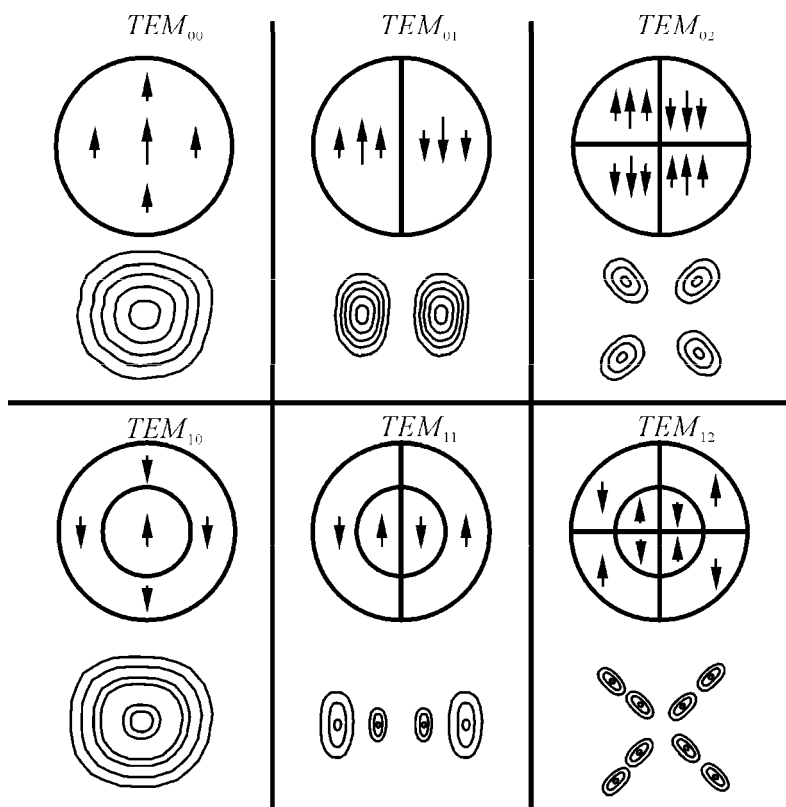


Рисунок 1.5 – Качественный вид распределения амплитуды электромагнитного поля и структуры линейно поляризованного лазерного пучка в устойчивом резонаторе для поперечных мод низшего порядка

Ширина спектра излучения лазера определяется числом линий, на которых происходит генерация. Контур линии усиления активной среды, совпадающий с контуром линии испускания (люминесценции), имеет ширину $\Delta\nu_{\Sigma}$. Поэтому в пределах линии усиления могут разместиться одна или несколько собственных частот резонатора, отстоящих друг от друга на величину:

$$\delta\nu_p = c/2L_p, \quad (1.10)$$

где c – скорость света в среде.

Возникновение генерации возможно на любой собственной

частоте резонатора ν_p , для которой $K_0(\nu_p) > K_n$. Если число, продольных мод удовлетворяющих этому условию, невелико (рисунок 1.6, б), то, как правило, генерация развивается на одной или нескольких частотах, соответствующих максимальным значениям $K(\nu_p)$. Если же число возможных мод велико, то генерация развивается на большом числе длин волн и спектр излучения лазера представляет собой пунктирную линию, огибающую пики излучения, соответствующие различным модам. Ее ширина составляет $(\Delta\nu)_{\text{многомодово}} \leq \Delta\nu_{\Sigma}$ (рисунок 1.6, а). Условие одномодового режима генерации в случае малых $\Delta\nu_{\Sigma}$ и L_p выглядит следующим образом: $\delta\nu_p \geq \Delta\nu_{\Sigma}$.

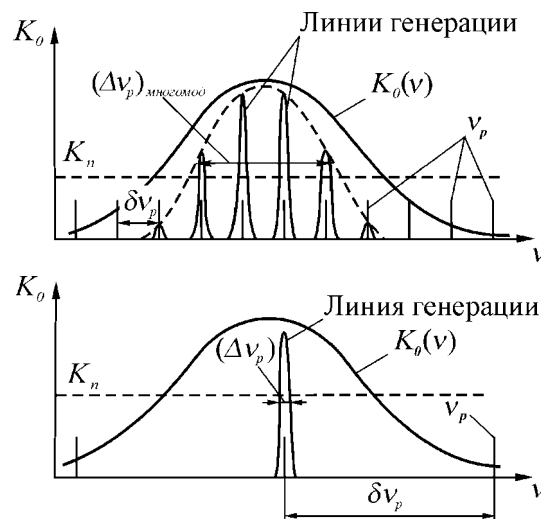


Рисунок 1.6 – Профиль линии усиления $K(\nu)$ и частотный спектр излучения лазера в многомодовом (а) и одномодовом (б) режимах генерации

При выполнении условий генерации внутрирезонаторные потери и потери когерентного излучения через выходное окно резонатора непрерывно восполняются. Поэтому добротность квантового

генератора $Q_n > Q_p$ и ширина одномодового излучения лазера $\Delta\nu_n$ в принципе может быть существенно уже $\Delta\nu_p$.

Теоретически ширина спектра излучения непрерывного лазера определяется мощностью спонтанного излучения возбужденных частиц среды и определяется выражением:

$$(\Delta\nu_n)_{пред} = 2\pi(\Delta\nu_p)^2 \frac{h\nu_0}{P_Q} \quad (1.11)$$

где P_Q – полная мощность излучения лазера. Например, для CO_2 -лазера: $\xi + \chi \approx 0,5$, $L_p \approx 1$ м, $P_Q \approx 1$ кВт, $\Delta\nu_p \approx 1,5 \cdot 10^7$ Гц, величина $(\Delta\nu_n)_{пред} \approx 2 \cdot 10^{-8}$ Гц.

Вследствие неоднородностей активной среды, механических нестабильностей резонаторов и несовершенства оптических элементов резонатора такие значения ширины спектров никогда не наблюдаются в реальных условиях. При выполнении специальных условий по улучшению стабильности (применение материалов с малым коэффициентом теплового расширения, тщательная стабилизация температуры, изоляция от механических и акустических возмущений, стабилизация источников питания) можно создавать лазеры с кратковременной шириной спектра одномодового излучения $\Delta\nu_n \approx 10^3$ Гц. При уменьшении длины резонатора затрудняется получение генерации и неизбежно сопровождается уменьшением мощности излучения.

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. Первая имеет место при наличии разности оптического пути лазерных лучей, а вторая – при рассмотрении

фазовых свойств излучения в разнесенных точках поперечного сечения пучка.

В реальных колебательных процессах, так как фаза и частота колебаний не постоянны, степень когерентности пучка характеризуют специальными показателями. 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:

$$E(r,t) = E_0(r) \cos(2\pi\nu t + \varphi(r,t)) \quad (1.12)$$

Изменение относительной фазы $\varphi(r,t)$ синхронных в момент времени $t = 0$ колебаний с частотами, отличающимися на $\Delta\nu_l$, будет возрастать со временем и 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:

$$L_{\text{ког}} = c\tau_{\text{ког}} = c/\Delta\nu_l. \quad (1.13)$$

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.

Поляризация лазерного излучения характеризует ориентацию 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 селектирующий элемент, позволяющий обеспечить различный уровень внутррезонаторных 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_e , удовлетворяющего условию $\operatorname{tg} \varphi_e = n$, где n – показатель преломления среды, коэффициент отражения для p -поляризации становится равным нулю, т.к. $\sin \varphi_1 / \sin \varphi_2 = n$. При угле Брюстера отраженный и преломленный лучи перпендикулярны друг другу. Отсутствие излучения с p -составляющей поляризации в отраженном пучке при $\varphi_1 = \varphi_e$ имеет простое физическое объяснение: являясь источником отраженной электромагнитной волны, колебания ди-

полей в отражающей среде не излучают электромагнитных волн в направлении своих колебаний, поэтому в отраженном пучке присутствует только s -составляющая колебаний.

В качестве селектирующего элемента в газовых лазерах используются пластины ограничивающие объем активной среды и расположенные под углом Брюстера к оптической оси резонатора. Суммарные потери и, соответственно, пороговый коэффициент усиления для излучения с p -составляющей меньше, чем для излучения с s -составляющей. Следовательно, возникает и будет поддерживаться излучение только с линейной поляризацией, соответствующей p -составляющей. 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.

Пространственные характеристики лазерных пучков. 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_{00} это распределение описывается кривой, близкой к распределению Гаусса:

$$I(\omega) = I_0 \exp(-2\omega^2 / \omega_G^2), \quad (1.14)$$

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:

$$P_Q = 2\pi \int_0^{\infty} I(\omega) \omega d\omega = \pi \omega_G^2 I_0 / 2, \quad (1.15)$$

В случае многомодовой генерации распределение интенсивности по выходной апертуре лазера будет определяться модовым составом и распределением энергии излучения среди этих мод.

В реальных случаях из лазера пучок никогда не выходит в виде параллельных лучей. Расходимость лазерного пучка характеризуется полным углом расходимости: $2\tilde{\theta}$, в пределах которого содержится определенная доля ψ мощности (или энергии) лазерного излучения $\tilde{\theta}_p(\psi)$ или интенсивность падает в определенное число ψ раз: $\tilde{\theta}_i(\psi)$. Ограничение на угол расходимости накладывает явление дифракции. Половину дифракционного угла расходимости представляют в виде уравнения:

$$\tilde{\theta}_d = A_d \frac{\lambda}{b_d}, \quad (1.16)$$

где b_d – характерный размер пучка, определяющий дифракцию; A_d – числовой коэффициент, характеризующий форму распределения интенсивности пучка на выходе из резонатора. Из-за дифракции радиус неограниченного пучка гауссовой распределения интенсивности растет по мере удаления от плоскости перетяжки в резонаторе на расстояние x в соответствии с уравнением:

$$\omega_G(x) = \omega_0 \left[1 + \left(\frac{x\lambda}{\pi\omega_0^2} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (1.17)$$

где ω_0 – радиус перетяжки в резонаторе.

Таким образом, для гауссовых пучков в выражении (1.16):

$b_d = 2\omega_0$, а $A_d = \frac{2}{\pi} \approx 0,63$. В этом угле содержится 86,5% мощности лазерного пучка, т.е. $\tilde{\theta}_I(e^{-2}) \approx \tilde{\theta}_p(0,86)$.

Профиль радиального распределения интенсивности излучения сохраняется только для гауссовых пучков по мере удаления от выходного окна лазера. Поэтому определение расходимости излучения, как правило, связано с некоторой неопределенностью. Для определения угла расходимости пучков целесообразно использовать распределение интенсивности в дальней зоне, где сформировалась дифракционная картина лазерного пучка. Это происходит на расстояниях $x \gg \omega^2 / \lambda$. В реальных условиях распределение интенсивности пучка в дальней зоне можно наблюдать в фокальной плоскости фокусирующей достаточно линзы. Зависимость радиуса в распределении интенсивности сфокусированного излучения $S(r)$ от угла в распределении интенсивности на выходе $I(\tilde{\theta})$ задается при этом соотношением:

$$\tilde{\theta} = r / F, \quad (1.18)$$

где F – фокусное расстояние линзы.

Конкретный вид распределения в дальней зоне S зависит от распределения интенсивности на выходе резонатора. Так, например, для однородного круглого пучка диаметром D_a $S(\tilde{\theta})$ оно имеет вид выражения:

$$S(\tilde{\theta}) = 4S_0 \left[\frac{J_1(\pi D_0 \tilde{\theta} / \lambda)}{\pi D_0 \tilde{\theta} / \lambda} \right]^2, \quad (1.19)$$

где J_1 – функция Бесселя. В качестве углового размера пучка используют угол, соответствующий первому нулю функции Бессе-

ля, т.е. $\tilde{\theta}_d = 1,22\lambda/D_a$

Внутри этого угла или соответствующего ему в фокальной плоскости кружка радиусом $1,22\lambda F/D_a$, называемого кружком Эри, сосредоточено 84% всей мощности излучения, т. е. $\tilde{\theta}_p(0,84) = 1,22\lambda F/D_a$

В случае многомодовой структуры пучка, состоящего из N_n отдельных пучков для нахождения распределения в фокальной плоскости руководствуются следующим правилом: если малые пучки некогерентны между собой, то их угловая расходимость соответствует размеру наименьшего пучка $D_{a\min}$, т.е.

$$\tilde{\theta} \approx \lambda/D_{a\min} \approx \frac{\lambda}{D_a} \sqrt{N_n}, \text{ где } D_a - \text{общая апертура излучения; если}$$

же малые пучки когерентны, то нужно учитывать интерференцию между ними. В этом случае на фоне общей дифракционной картины с угловым размером $\sim \lambda/D_{a\min}$ появятся интерференционные максимумы, соответствующие угловому размеру $\sim \lambda/D < \lambda/D_{a\min}$

В реальных случаях величина расходимости существенно превышать величину $\tilde{\theta}_d$ вследствие оптической неоднородности активной среды, несовершенства оптических элементов резонатора и их механических вибраций, приводящих к колебаниям оси резонатора в пространстве. Расходимость лазерного излучения уменьшают увеличением размера пучка (рисунок 1.7).

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 ла-

зера, 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.

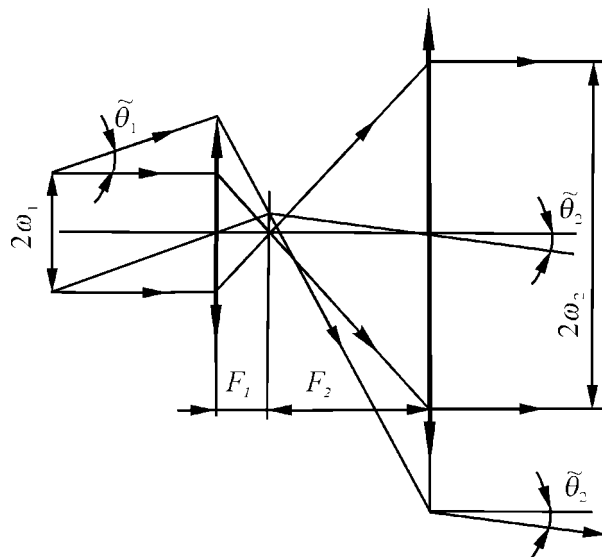


Рисунок 1.7 – Уменьшение расходимости лазерного излучения при увеличении размера пучка

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

$$r_{\Sigma} = r_d + r_a = \tilde{\theta} \cdot F + a_{\min} F \left(\frac{D_a}{F} \right)^3, \quad (1.20)$$

где r_d – радиус, обусловленный дифракцией; r_a – радиус, обусловленный сферической aberrацией; $\tilde{\theta}$ и D_a – угловая расходимость и диаметр фокусируемого пучка; $a_{\min} = \frac{n}{256} \cdot \frac{4n-1}{2+n} \cdot (n^2-1)$ – минимальное значение aberrационного коэффициента линзы,

имеющее место при отношении радиусов кривизны передней и задней поверхности линзы: $\frac{R_1}{R_2} = \frac{2n^2 - n - 4}{n(2 + n)}$.

Минимизируя r_Σ , находим оптимальное значение фокусного расстояния F_{opt} , определяемое выражением:

$$F_{opt} = \left(\frac{2a_{\min}}{\tilde{\theta}} \right)^{1/3} D_a \quad (1.21)$$

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

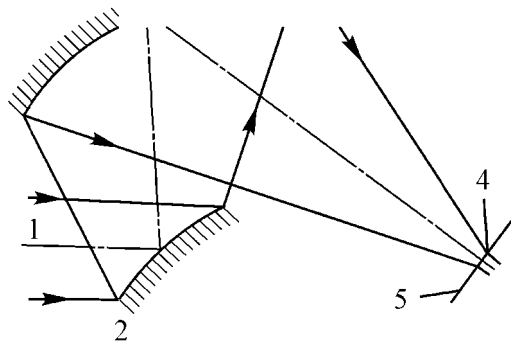
$$r^{\min}_F = \frac{3}{2} \tilde{\theta} \cdot F_{opt} = \frac{3}{243} \cdot \sqrt[3]{a_{\min} \cdot \tilde{\theta}^2 \cdot D_a} \quad (1.22)$$

Применение систем из нескольких линз позволяет снизить влияние aberrаций. 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 (рисунки 1.8).

Способы сравнения характеристик излучения различных лазеров. Требования, предъявляемые к параметрам лазерного излучения при проведении различных технологических процессов, достаточно разнообразны. Выбор единого критерия оценки качества излучения лазера практически невозможен. В селективной технологии наиболее важными параметрами излучения являются интен-

сивность и монохроматичность лазерного пучка, а в термической технологии монохроматичность практически не учитывается.



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

Рисунок 1.8 – Схема внеосевого фокусирующего объектива Кассегрена

Но существует необходимость в наличии показателей, позволяющих сравнивать различные лазеры между собой или характеризующих пригодность конкретного лазера для тех или иных технологических операций. Способность лазерного излучения к фокусировке описывается безразмерным коэффициентом расходимости B_θ , равным:

$$B_\theta = \frac{\tilde{\theta}}{\tilde{\theta}_d} \quad (1.23)$$

Так как $r_{opt} \sim 10b$, где b – характерный размер, определяющий абберацию, а $r_{min} \approx \tilde{\theta}F_{opt}$, то с учетом $\tilde{\theta}_d \approx \lambda/b$ можно получить выражение:

$$r_{min} \approx 10\lambda B_\theta \quad (1.24)$$

В области термической технологии для оценки пригодности лазеров используют размерный параметр B_r , характеризующий способность данного лазера нагревать облучаемый образец и равный:

$$B_T = \frac{P_0}{\theta \cdot b}, \quad (1.25)$$

Параметр, характеризующий эффективность использования лазера в селективных процессах с характерной шириной линии поглощения $\Delta\nu_T$, содержит ширину спектра генерации $\approx \Delta\nu_g$ и интенсивность I , т.е. конкретный вид параметра для сравнения лазеров определяется особенностями их применения в технологических процессах.

Вопросы самоконтроля к главе 1

1. Каким образом создается инверсная заселенность в активной среде лазера?
2. Какие вещества используются в современных лазерах в качестве активной среды?
3. Перечислите и кратко охарактеризуйте основные типы лазеров.
4. Для чего применяют резонатор? Поясните принцип его работы.
5. Какие резонаторы являются устойчивыми? Приведите условие устойчивости резонатора в приближении геометрической оптики.
6. От чего зависит форма каустики? Приведите ее вид для различных типов резонаторов: плоско-параллельного, полуконфокального и конфокального.
7. Перечислите основные недостатки устойчивых резонаторов.
8. Охарактеризуйте ход лучей в неустойчивом резонаторе.
9. Набор каких модовых чисел характеризует колебания в резонаторе? Приведите примеры распределения поля на выходном окне устойчивого полуконфокального резонатора для поперечных мод низшего порядка.
10. Перечислите основные энергетические характеристики излучения лазеров. Как определяют энергетический КПД?

11. Какой величиной характеризуется монохроматичность лазерного излучения? Какова причина уширения линии люминесценции в реальных условиях?

12. Что такое когерентность? Сформулируйте условия получения когерентных колебаний.

13. В чем заключается свойство поляризации лазерного излучения? Какой оптический элемент применяют в качестве селективирующего в газовых лазерах?

14. Перечислите и охарактеризуйте пространственные характеристики лазерных пучков.

15. Какие основные технические проблемы возникают при создании линзовых систем формирования излучения и как их решают?

16. По каким показателям сравнивают характеристики излучения различных лазеров?

2 ЭЛЕМЕНТЫ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ЛАЗЕРОВ

2.1 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. На рисунке 2.1 представлены некоторые типы сферических и плоских кремниевых зеркал технологического CO_2 -лазера.

Диффузные отражатели – это оптические элементы, используемые для калибровки ослабленного лазерного излучения, его деполаризации 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.

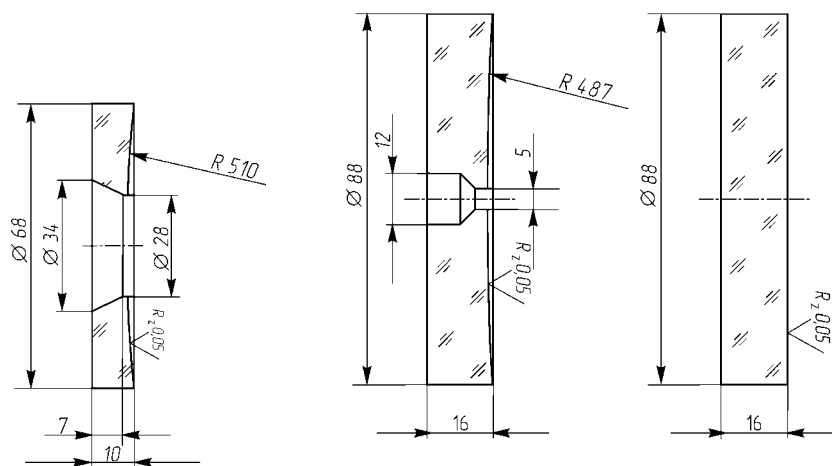


Рисунок 2.1 – Кремниевые зеркала резонатора технологического CO₂-лазера

Молочное стекло имеет индикатрису рассеяния отраженного излучения, близкую к индикатрису ламбертовского излучателя, оно стойко к действию ионизирующего излучения. Оптическая прочность молочного стекла, характеризующаяся пределом световой прочности и пределом надежности материала образца, достаточно высокая.

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, 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 процес-

сы 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 :

$$\Delta_\delta \cong q \cdot \frac{\delta^2}{2} \frac{\alpha_p A_{II}}{K}, \quad (2.1)$$

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:

$$q_{\text{дон}} = \frac{K}{\alpha_p A_{II}} \frac{\lambda}{10\delta^2}, \quad (2.2)$$

где λ – длина волны излучения.

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

$$q_T \cong \frac{2}{\delta} \frac{\sigma_T K}{E \alpha_p A_{II}}, \quad (2.3)$$

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

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

$$q_m = \frac{KT_{пл}}{A_{II}\delta}, \quad (2.4)$$

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

Поверхностное окисление. При росте плотности мощности падающего излучения поверхность зеркала нагревается, начинается поверхностное окисление, коэффициент A_{II} 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.

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 ($P_0 > 10^3$ Вт). Без охлаждения, во-первых, отражающие оптические элементы могут нагреться до температуры окисления поверхности с соответственным уменьшением коэффициента отражения; во-вторых, уровень термодформации поверхности зеркала Δ_s 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, блока крепления и юстировки зеркала. Наибольшее распространение для технологических лазеров получили многоканальные системы охлаждения: трубчатая, щелевая, щеточная, струйная и т.д.

2.2 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 лазеров установок. Примеры выполнения линз приведены на рисунке 2.2. Линзы из селенида цинка, например, с двусторонним просветляющим покрытием типа 37И.200 (рисунок 2.2, а), имеющая точность формы поверхностей линзы 5 интерференционных колец и искривление 1 кольцо, и из поликристаллической керамики ПО-4 (рисунок 2.2, б) устанавливаются в потоке излучения CO_2 -лазера, $\lambda = 10,6$ мкм.

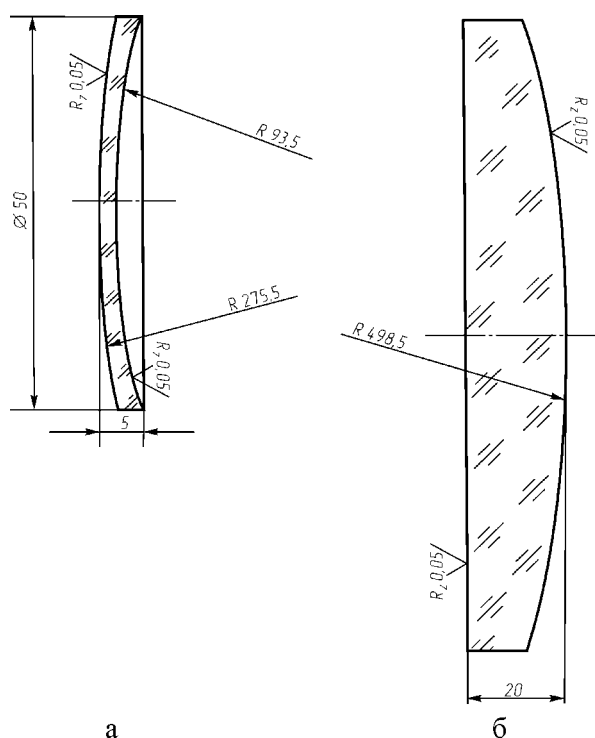


Рисунок 2.2 – Линзы проходных систем: линза из селенида цинка (а); линза из поликристаллической керамики ПО-4 (б)

Пластины, используемые для выходных окон CO_2 -лазеров, представлены на рисунке 2.3. 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 $\lambda=0,653$ мкм; точность формы поверхностей пластины – 3 интерференционных кольца; искривление – 0,5 кольца.

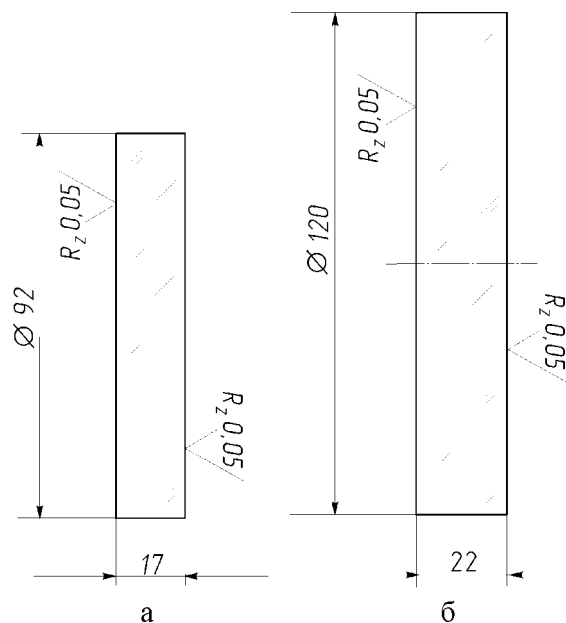


Рисунок 2.3 – Выходные окна проходных систем: пластина из селенида цинка (а); пластина из хлористого калия (б)

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 CO_2 -лазерах.

Рефракционные характеристики ИК-материалов содержат зна-

чения 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:

$$\rho = \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2, \quad (2.5)$$

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

Прходные оптические элементы ИК–области могут искажать 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 и термодформаций. Условие малости искажений волнового фронта после прохождения лазерного излучения через окно толщиной δ накладывает ограничение на полную мощность пучка P_Q :

$$P_Q \ll \frac{K}{\chi\beta} \frac{\lambda}{4\delta} \equiv P_{don}, \quad (2.6)$$

где $\chi = \frac{dn}{dT} + \alpha(n-1) + \chi_3$; χ_3 – слагаемое, соответствующее изменениям фазы волнового фронта за счет упрогооптического 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 мощности 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:

$$P_{кр} = \gamma \frac{4\pi K \sigma}{\beta \alpha_p E}, \quad (2.7)$$

где γ – модуль сдвига; σ – разрушающее напряжение.

Оптический пробой материала оптических элементов. 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-галогидного 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.

2.3 Выбор оптических покрытий

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 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. Поляризующих покрытий 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 установки прибора, температурного режима, расположения оптической детали в установке прибора, условий чистки деталей и их формы.

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. При отражении света от границ раздела возникает интерференция когерентных лучей 1' и 2' (рисунок 2.4.).

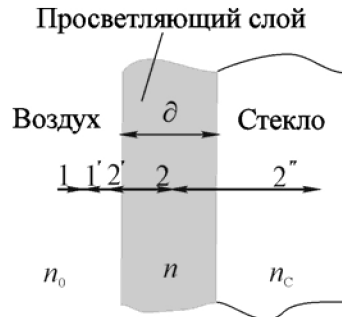


Рисунок.2.4 – Ход лучей в системе воздух - просветляющий слой - стекло

Подбор толщины пленки d и показателей преломления стекла n_c и пленки n обуславливает гашение отраженных волн друг другом. Для выполнения этого условия должно обеспечиваться равенство амплитуд, а оптическая разность хода будет составлять $(2\bar{k} + 1)\frac{\lambda_0}{2}$. Амплитуды отраженных лучей равны при выполнении условия:

$$n = \sqrt{n_c} \quad (2.8)$$

Условие $n_c \geq n \geq n_0$, где n_0 – показатель преломления воздуха, означает, что потеря полуволны происходит на обеих поверхностях. При падении излучения перпендикулярно поверхности условие минимума имеет вид выражения:

$$2n\bar{d} = (2\bar{k} + 1)\frac{\lambda_0}{2}, \quad (2.9)$$

где $n\bar{d}$ – оптическая толщина пленки.

При $\bar{k} = 0$ выражение (2.9) принимает вид соотношения:

$$n\delta = \frac{\lambda_0}{4} \quad (2.10)$$

Гашение отраженных лучей наблюдается при $n = \sqrt{n_c}$ и толщине оптической пленки $\frac{\lambda_0}{4}$.

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 $\frac{\lambda_0}{4}$. Особенностью та-

кой 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 2.5. Трехслойное просветление, обеспечивающее низкие значения ко-

ээффициента 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.

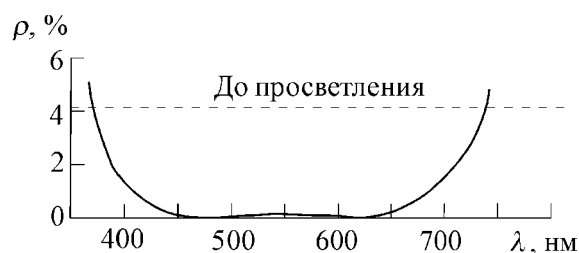


Рисунок.2.5 – Спектральное отражение от поверхности стекла после трехслойного просветления в видимой части спектра

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. Многослойные покрытия, состоящие из чередующихся слоев, обозначают по следующим формулам:

а) для четного числа слоев: $(ab) \cdot \frac{\overline{k_n}}{2}$, где a, b – чередующиеся слои; $\overline{k_n}$ – число слоев);

б) для нечетного числа слоев: $(ab) \cdot (\overline{k_n} - 1) / 2a$.

Если деталь предварительного прогревают или подвергают термообработке слои покрытия, то к условному обозначению покрытий добавляют цифру, показывающую температуру прогрева.

Обозначение нагрева (например, при 300⁰С) выполняют следующим образом: в виде индекса у буквы, если покрытие наносится на нагретую деталь, например: Просветл. 24И₃₀₀; в виде цифры перед буквой, обозначающейся сокращенным наименованием покрытия, с точкой между ними, если покрытие наносится на предварительно прогретую деталь после ее охлаждения, например: Просветл. 300.44Р.43Р; в виде цифры после условного обозначения покрытия, с точкой между ними, при последующей термообработке слоев покрытия, например: Просветл. 45Р.44Р.43Р.300.

2.4 Поляризационные элементы

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 света 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; призмы выполнены с воздушным зазором и с 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: плавленный 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 $\lambda/4$ к $\lambda/2$ 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 лучей обыкновенного и необыкновенного, 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 BaF_2 , CaF_2 , 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.

Вопросы самоконтроля к главе 2

1. Назовите определяющий фактор нарушения геометрической стабильности зеркальных поверхностей, работающих при длительном облучении потоками высокой энергетической мощности. Что обеспечивают при создании высококачественных лазерных отражателей?

2. Какими характеристиками должны обладать материалы для оптических элементов отражателей?

3. Перечислите процессы, приводящие к разрушению поверхности зеркал.

4. Как определяют предельно допустимую (пороговую) плотность мощности падающего на поверхность зеркала излучения?

5. Для чего применяют охлаждение зеркал технологических лазеров?

6. Назовите основные конструктивные элементы охлаждаемых зеркал.

7. Перечислите основные требования, предъявляемые к оптическим элементам проходной оптики. Приведите примеры выполнения основных проходных элементов оптических систем технологических лазеров.

8. Укажите основные причины разрушения проходных оптических элементов.

9. По каким причинам происходят объемный и приповерхностный оптический пробой? Опишите механизмы их образования.

10. Перечислите и охарактеризуйте основные типы оптических покрытий.

11. Как осуществляют подбор толщины пленки и показателей преломления стекла и пленки для гашения отраженных волн?

12. По какой схеме приводятся условные обозначения видов покрытий?

13. Для чего предназначены поляризационные призмы и отражательные поляризаторы?

14. Какие устройства называют фазовыми пластинками и фазовыми компенсаторами?

15. Что представляют собой поляроиды и решетки-поляризаторы?

3 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 по 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.

3.1 Преобразователи лазерного излучения

Модуляция оптического излучения – целенаправленный процесс изменения одного из четырех параметров, характеризующих излучение: амплитуды, начальной фазы, частоты, поляризации. Модуляция предоставляет возможность путем внешних электрических, магнитных или упругих воздействий сообщить потоку света определенную информацию. Различают четыре типа модуляции: амплитудную, фазовую, частотную и поляризационную. В оптическом диапазоне модулирующие устройства подразделяются на внешние, осуществляющие модуляцию уже сформированного луча, и внутренние. Внутренняя модуляция связана с непосредственным воздействием на процесс генерации.

Широкое распространение получили электрооптические моду-

ляторы, позволяющие изменять фазу излучения. Помещенный в резонатор лазера фазовый модулятор управляет оптическими размерами резонатора, а амплитудный модулятор – добротностью. Переход от фазовой модуляции к амплитудной или частотной может быть совершен при помощи пассивного преобразователя. Внутренняя модуляция осуществляется путем управления параметрами оптического резонатора лазера: его оптической длиной, добротностью или величиной обратной связи. В соответствии с этим возможны частотная и амплитудная модуляции.

Оптические свойства среды характеризуют тремя показателями преломления: n_x, n_y, n_z . Для прозрачных сред n_x, n_y, n_z – действительные числа, в поглощающих средах n_x, n_y, n_z представляют собой комплексные величины, причем их мнимая часть определяет поглощение.

Показатели преломления n_x, n_y, n_z определяют некоторую поверхность второго порядка при использовании специальной, кристаллографической, системой координат. Ориентация такой поверхности в пространстве определяется с помощью осей симметрии монокристалла. Это уравнение эллипсоида показателей преломления.

$$\left(\frac{x}{n_x}\right)^2 = \left(\frac{y}{n_y}\right)^2 = \left(\frac{z}{n_z}\right)^2 = 1 \quad (3.1)$$

При выполнении условия $n_0 = n_x = n_y = n_z$ эллипсоид показателей преломления вырождается в шар. Показатели преломления могут быть функциями внешнего воздействия. Если эта функция будет зависеть от величины и направления электрического поля, такое явление называют электрооптическим эффектом. Различают линейный электрооптический эффект или эффект Поккельса, возможный лишь в твердых телах, кристаллическая структура которых не имеет центра симметрии, и квадратичный электрооптиче-

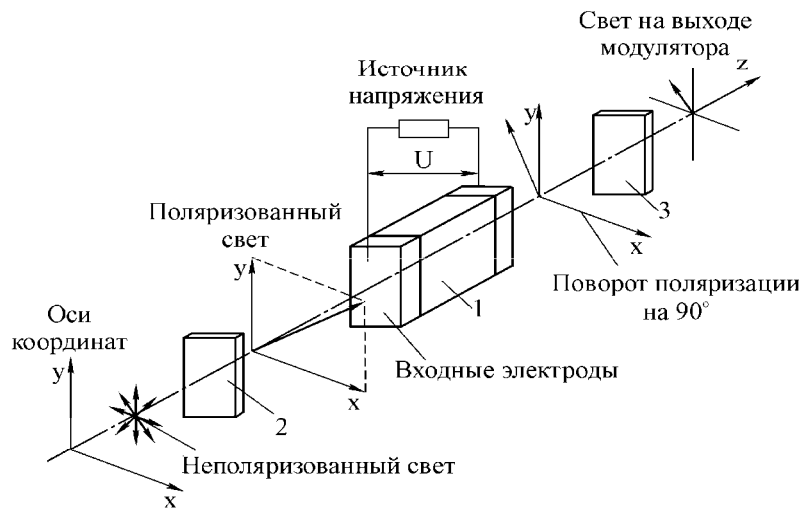
ский эффект, или эффект Керра, наблюдаемый в средах, имеющих центр симметрии.

Электрооптический эффект в жидкостях определяется одной электрооптической постоянной (постоянной Керра). Это связано с равноправностью всех направлений в невозбужденной жидкости. Наиболее распространенной электрооптической жидкостью является нитробензол. При наложении электрического поля в жидкости возникает оптическая неоднородность:

$$\begin{aligned} n'_x &= n_0 \\ n'_y &= n_0 \\ n'_z &= n_0 + BE_m^2, \end{aligned} \quad (3.2)$$

где B – постоянная Керра.

Схема электрооптического модулятора представлена на рисунке 3.1. Электрооптический кристалл (или жидкость) 1 помещают между электродами.



1 – электрооптический кристалл (жидкость); 2 – поляризатор; 3 – анализатор.

Рисунок 3.1 – Электрооптический модулятор

Ток может быть направлен либо параллельно, либо перпендикулярно направлению распространения световой волны. Между скрещенными поляризатором 2 и анализатором 3 помещают электрооптический кристалл.

Эффект Фарадея состоит во вращении плоскости поляризации в магнитном поле. Угол поворота плоскости поляризации равен:

$$\Theta = \pi l / \lambda(n_+ - n_-), \quad (3.3)$$

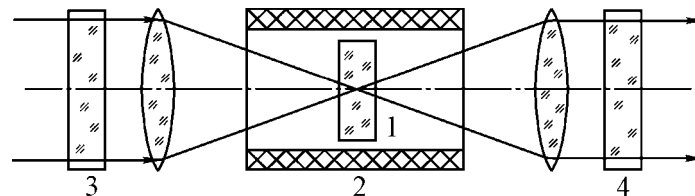
где l – длина кристалла; n_+ и n_- – показатели преломления кристалла по отношению к излучению, поляризованному по правому и левому кругу соответственно.

Магнитооптический модулятор, схема которого представлена на рисунке 3.2, состоит из активного материала 1 (в основном используют железиттриевый гранат), соленоида 2, расположенного между поляризатором 3 и анализатором 4. Интенсивность света на выходе анализатора I связана с интенсивностью света на входе поляризатора I_0 соотношением:

$$I = I_0 \cos^2(\tilde{\beta} - \Theta), \quad (3.4)$$

где $\tilde{\beta}$ – угол между главными плоскостями поляризатора и анализатора. Если поляризатор и анализатор скрещены, т.е. $\tilde{\beta} = \pi/2$, то справедливо выражение:

$$I = I_0 \sin^2 \Theta = I_0 \sin^2(C_\lambda l H) \quad (3.5)$$



1 – активный материал; 2 – соленоид; 3 – поляризатор; 4 – анализатор.

Рисунок 3.2 – Схема магнитооптического модулятора

Полупроводниковые модуляторы осуществляют амплитудную модуляцию. Их работа основана на эффекте изменения коэффициента поглощения при наложении электрического поля. В полупроводниковых модуляторах используют механизм внутризонного поглощения на свободных носителях заряда.

Внутренняя модуляция осуществляется путем изменения населенностей рабочих уровней лазеров, т.е. путем управления коэффициентом усиления активной среды; путем изменения оптической длины резонатора при введении в него электрооптического кристалла, путем управления обратной связью, т.е. модуляцией добротности. Внутренняя модуляция связана с процессом генерации оптического излучения в лазерах.

Для управления лазерным лучом путем отклонения его от оптической оси применяются дефлекторы. При построении управляемых дефлекторов базовым является электрооптический эффект. Простейшая система для сканирования лазерного луча содержит призму из электрооптического материала, помещенную в электрическое поле. Если в дефлекторе используется кристалл с линейным электрооптическим эффектом, то приложенное электрическое поле позволяет плавно менять направление преломленного луча. Электрооптический дефлектор такого типа представлен на рисунке 3.3. Применяются кристаллы дегидрофосфата калия KN_2PO_4 (KDP) с линейным электрооптическим эффектом Поккельса. Дефлектор составлен из двух KDP-призм, ребра которых ориентированы вдоль ортогональных направлений.

В акустооптических преобразователях используют эффект воздействия ультразвука на вещества. Способы и средства управления акустооптическими преобразователями не отличаются разнообразием. В акустооптических модуляторах интенсивность дифрагированных лучей изменяется путем модуляции мощности высокочастотных электрических сигналов и, как следствие, мощности ультразвука.

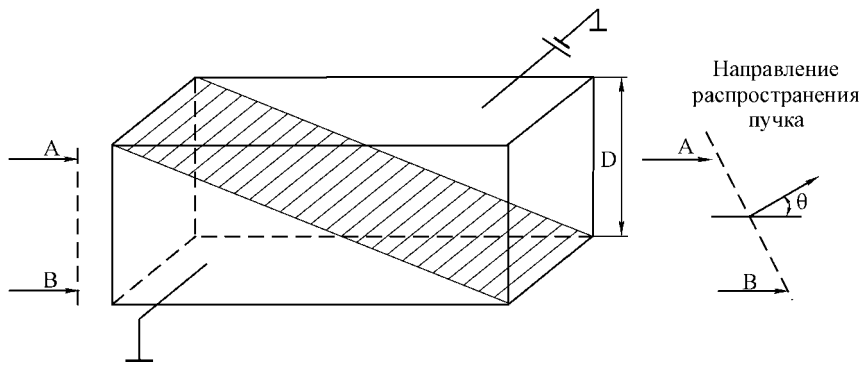


Рисунок 3.3 – Отклонение пучка света в аналоговом электрооптическом дефлекторе

При этом частота высокочастотных электрических и акустических колебаний сохраняется неизменной. В акустооптических дефлекторах углы отклонения дифрагированных лучей света изменяются путем модуляции частоты электрических колебаний и ультразвука при неизменной мощности управляющих сигналов.

Для генерирования ультразвуковых колебаний применяют пьезоэлектрические излучатели, которые энергию высокочастотных электрических колебаний преобразуют в механические колебания той же частоты. Ультразвуковая волна периодически деформирует среду и создает чередующиеся темные полосы сжатия и светлые полосы разрежения. Ритмично изменяется коэффициент преломления n . Таким образом, в кристалле под действием ультразвуковых волн искусственно создается регулярная дифракционная решетка. Дифракционной решеткой является совокупность большого числа сосредоточенных в ограниченном пространстве препятствий и отверстий, на которых происходит дифракция света. Такая решетка называется регулярной, если ее элементы распределены по определенному закону, например на равных расстояниях.

В акустооптической среде, возбуждаемой высокочастотными электрическими сигналами напряжения, регулярная дифракционная решетка формируется с помощью ультразвука. Параметры решетки

непосредственно связаны с мощностью, длиной волны, частотой ультразвука, которые легко изменяются управляющими электрическими сигналами. В акустооптических модуляторах интенсивность дифрагированных лучей света изменяется путем модуляции мощности высокочастотных электрических сигналов и, как следствие, мощности ультразвука. При этом частота высокочастотных электрических и акустических колебаний остается неизменной.

3.2 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, предоставляемое существующими лазерными генераторами, не обеспечивает высокой степени концентрации энергии и характера распределения плотности мощности, требуемых для соответствующей технологии. 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 3.4, 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 3.4, а. Однако в простой линзовой системе существуют различные aberrации – погрешности восприятия, преобразования, фокусировки оптического излучения.

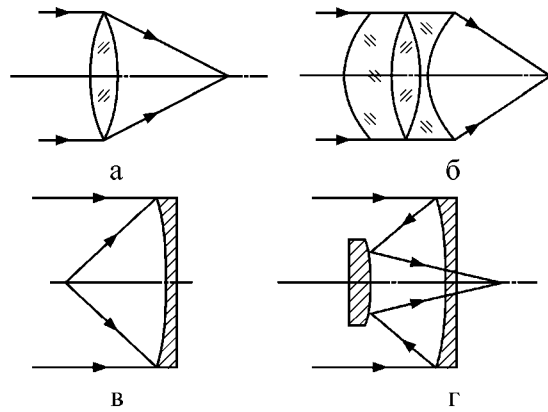


Рисунок 3.4 – Объективы, применяемые для фокусировки лазерного излучения: однолинзовый (а); трехлинзовый (б); одиночное сферическое зеркало (в); объектив Кассегрена (г)

Аберрации оптических систем рассматриваются как погрешности создаваемых изображений и проявляются в том, что оптические изображения в ряде случаев не вполне отчетливы или не точно соответствуют объекту. Наиболее значительны следующие виды аберраций. Сферическая аберрация - недостаток оптического изображения, заключающийся в том, что световые лучи, прошедшие вблизи оптической оси, и лучи, прошедшие через отдаленные от оси части оптической системы, не собираются в одну точку. Сферическая аберрация может быть почти полностью устранена применением специально рассчитанных комбинаций линз. Другим видом аберрации является кома – недостаток оптического изображения, проявляющийся как изображение точки в виде продолговатого несимметричного пятна и возникающий при косом прохождении световых лучей через оптическую систему. В случае простой линзы размеры пятна пропорциональны квадрату радиуса линзы и углу наклона светового пучка по отношению к оси. При больших углах наклона пучка к оси существенно аберрация, называемая астигматизмом. Если при прохождении оптической системы сферическая световая волна деформируется и перестает быть сферической, то

пучок лучей становится сложным: лучи пересекаются не в одной точке, а в двух взаимно перпендикулярных отрезках прямой линии, расположенных на некотором расстоянии друг от друга. Такой пучок называется астигматическим, а само явление – астигматизмом. Аберрация оптической системы, называемая дисторсией, характеризуется неодинаковостью линейного увеличения в пределах всего поля изображения и приводит к нарушению геометрического подобия между объектом и его изображением. Оптические системы могут обладать сразу несколькими видами аберраций. Исправление аберраций в сложных оптических системах производится надлежащим сочетанием линз и представляет достаточно трудную задачу. Те или иные виды аберраций обычно устраняются в соответствии с назначением оптической системы. Перечисленные аберрации оптических систем называются геометрическими. Несовершенства изображения в оптических системах связаны также с волновой природой света. Они возникают из-за дифракции света на диафрагмах, оправках линз и т.п. Влияние дифракции обычно невелико по сравнению с другими аберрациями оптических систем. Аберрации исправляются и корректируются в сложных оптических системах. Изображение более высокого качества предоставляют двух- и многолинзовые объективы, например трехлинзовый объектив (рисунок 3.4, б).

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 растрсы и хаотические фазовые экраны, основным достоинством которых является слабая зависимость распределения освещенности в пятне от расходимости и начального распределения излучения.

Оптические элементы пропускающего типа имеют небольшой срок службы из-за недостаточной лучевой стойкости и низкую на-

дежность. Для формирования излучения повышенной мощности ($P_0 > 10^3$ Вт) применяются металлооптические элементы, обладающие высокой лучевой стойкостью и достаточной надежностью. В качестве объектива может использоваться одиночное сферическое зеркало, а также зеркало с параболической или гиперболической поверхностью (рисунок 3.4, 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 3.4, г.

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. Более приемлемой зеркальной системой для лазерной обработки является внеосевая коосульный объектив Кассегрена, состоящий из малого (диаметром $D_{\text{вн}} = (30...80) \cdot 10^{-3}$ м) выпуклого и большого вогнутого сферических зеркал. При его применении отсутствуют искажения пятна фокусировки и вся энергия независимо от ее исходного распределения достигает обрабатываемой поверхности.

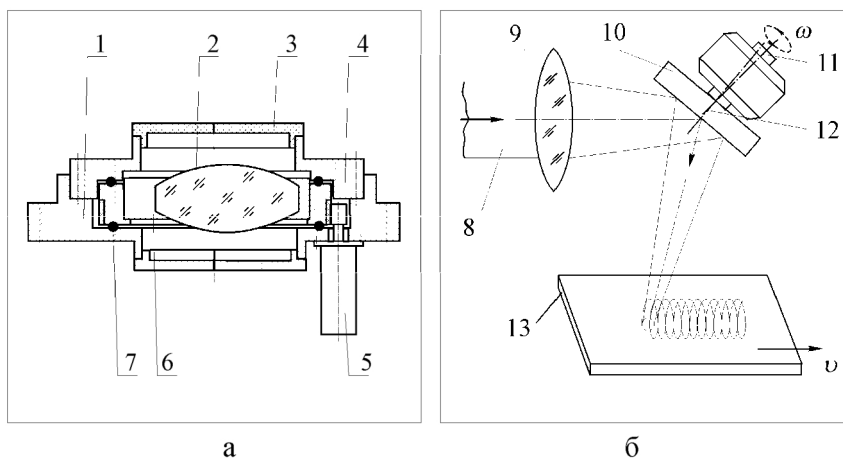
Использование вышеперечисленных систем и элементов при проведении технологических операций термической обработки деталей ограничено, т.к. в подавляющем большинстве случаев невозможно достичь заданной геометрии сфокусированного луча и характера распределения интенсивности по его сечению. Такие методы построения оптического изображения как контактный и проекционный также не нашли широкого применения из-за значительных потерь энергии на отражение от трафарета и предъявляемых жестких требований к характеру освещенности по всему полю изображения.

Для обеспечения относительно равномерного распределения энергии в пучке применяют сканирование (развертку) лазерного пучка. Используются такие приемы, как вращение многогранного зеркала или призмы, колебания зеркала с высокой частотой. Механические сканирующие системы (рисунок 3.5, а, б), обеспечивающие получение светового контура на обрабатываемой поверхности за счет одно- или двухкоординатного перемещения их элементов, имеют существенные недостатки. В частности, неравномерность энергоснабжения на поверхности зоны лазерного воздействия из-за высокой инерционности системы и колебательного закона осцилляции луча, высокая стоимость, низкая надежность из-за наличия механических частей, движущихся с большими скоростями. Сегментные и гибкие фокусирующие зеркала (рисунок 3.5, в) для формирования заданного распределения излучения не нашли достаточного применения из-за сложности их изготовления, высокой стоимости и низкой надежности.

Представленный анализ показывает, что ни одна из вышеописанных систем не может обеспечить одновременного сочетания таких свойств, как создание требуемого распределения интенсивности, концентрации энергии лазерного излучения в зоне воздействия заданной формы и высокой надежности, в значительной степени определяющих эффективность процессов и уровень совершенства лазерной технологии.

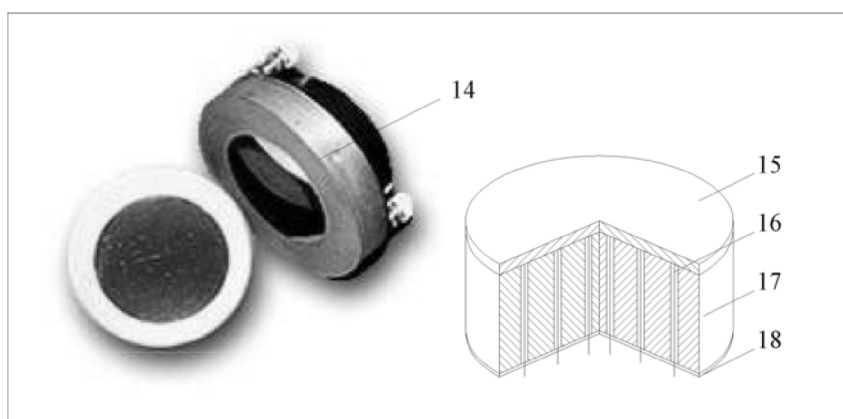
3.3 Применение фокусаторов излучения

Успешная реализация технологических процессов лазерной термообработки возможна только при условии формирования определенного пространственного профиля интенсивности в требуемой области на поверхности детали. В настоящее время созданы принципиально новые оптические элементы с ранее недостижимыми функциями – фокусаторы излучения.



а

б



в

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.

Рисунок 3.5 – Линзовый сканатор (а). Сканатор с наклонным вращающимся зеркалом (б). Пьезоэлектрическое адаптивное зеркало (в)

Они представляют собой дифракционные оптические элементы, фокусирующие лазерное излучение в тонкие линии или малые об-

ласти 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 фокусирующее 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 3.6).

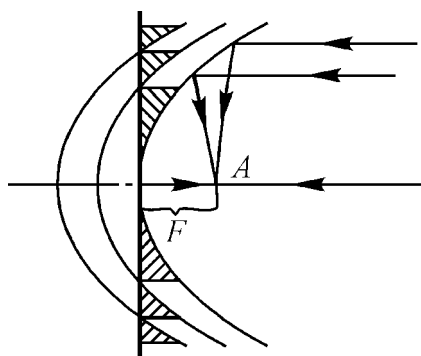


Рисунок 3.6 – Построение рельефа фокусатора излучения

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.

Отражающие фокусаторы осуществляют поворот пучка лазерного излучения, его пространственную фазовую модуляцию и перераспределение его энергии в различные геометрические фигуры с заранее заданным профилем интенсивностью. 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.

В соответствии с существующими подходами к проектированию фокусаторов излучения для вывода исходных уравнений служат геометрооптические законы отражения лучей, а также условие прохождения всех отраженных от оптического элемента лучей через заданную фокальную область. В исходные уравнения вносятся информация о распределении интенсивности падающего и отраженного излучения. Вычисление формы рабочей поверхности $Z(U, V)$ (см. рисунок 3.7) оптического элемента проводится с учетом допущений $R \ll F$; $L_\phi \ll F$, при этом $\tilde{\psi} \approx \sin \tilde{\psi} \approx \text{tg} \tilde{\psi}$, где R – максимальный радиус фокусируемого пучка; L_ϕ – длина фокального отрезка; F – фокусное расстояние оптического элемента; $\tilde{\psi}$ – угол между направлением пучка, отраженного от зеркальной поверхности $Z(U, V) = 0$, и лучами, отразившимися от различных точек искомой поверхности $Z = Z(U, V)$; $Z(U, V)$ – высота рельефа в точке (U, V) оптического элемента; U, V – координаты точки отражающего оптического элемента в системе координат с осью OU , направленной противоположно проекции падающего луча и

имеющей начало в центре расположенной в области $G: U^2 \cos \bar{\theta} + V^2 = R^2$ отражающей поверхности; $\bar{\theta}$ – угол между оптической осью излучения и нормалью к плоскости оптического элемента.

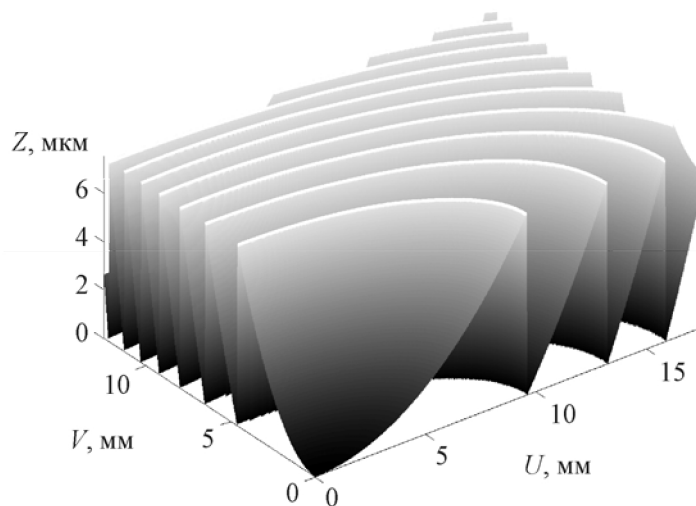


Рисунок 3.7 – Форма рабочей поверхности $Z(U, V)$ оптического элемента

В таблице 3.1 приводятся аналитические выражения оптических элементов для преобразования излучения в область с минимальными размерами и отрезок равномерной интенсивности. Приведем вывод этих формул.

Обозначения параметров: $mod(\bar{h})_{m\lambda/(2\cos\bar{\theta})}$ – функция, равная наименьшему положительному остатку от деления \bar{h} на $\bar{k}\lambda/(2\cos\bar{\theta})$; λ – длина волны излучения; \bar{k} – целое число; r – параметр фокусируемого пучка гауссовского распределения плотности излучения, в котором интенсивность на расстоянии r от центра

Таблица 3.1 – Аналитические выражения, описывающие форму рельефа поверхности отражающих оптических элементов, предназначенных для фокусировки гауссовского потока излучения в область с минимальными размерами и отрезок равномерной интенсивности

Форма сфокусированного светового пятна	Аналитическое выражение	Используемые допущения
Фокальное пятно с минимальными геометрическими размерами	$Z(U, V) = \text{mod}_{k\lambda, (2\cos\theta)} \left(\frac{1}{2\cos\theta} \sqrt{(U - U_1)^2 \cos^2\theta + (V - V_1)^2 + F^2} \right)$	$\sin \tilde{\psi} \approx \tilde{\psi}$ $R \ll F$ $I_\phi \ll F$
Отрезок прямой линии равномерной интенсивности	$Z(U, V) = \text{mod}_{k\lambda, (2\cos\theta)} \left(\frac{1}{\cos\theta} \left[\frac{U^2 \cos^2\theta + V^2}{4f} - \frac{U \cos\theta}{I_\phi} \int_0^{U^2 + V^2} dU \int_0^{\sqrt{r^2 - U^2}} \exp\left(-\frac{U^2 + V^2}{r^2} \right) dV \right] \right)$ $\frac{\pi F (\mathfrak{S}(\frac{R}{r}))^*}{\pi F (\mathfrak{S}(\frac{R}{r}))^*}$	

уменьшается в e раз по сравнению с интенсивностью в центре пучка; $U_j; V_j$ – координаты проекции фокальной точки на плоскость оптического элемента; \bar{M} – координата U прямой на поверхности фокусатора, (при синтезе фокусаторов в рамках геометрической оптики принимают, что прямые на их отражающей поверхности, перпендикулярные световому отрезку, фокусируют излучение в точку $\xi = const$ на нем); $(\mathcal{G}(R/r))^*$ – значение двойного интеграла вероятности в области G для фокусируемого пучка гауссовского распределения плотности излучения:

$$\left(\mathcal{G}\left(\frac{R}{r}\right)\right)^* = \frac{4}{\pi} \iint_{G_i} \exp\left[-\frac{(U^2 + V^2)}{r^2}\right] dUdV ; \quad (3.6)$$

G_i – часть области G оптического элемента, проекция которой на ось $O\xi$ лежит левее точки ξ вдоль этой оси; $O\xi$ – ось, проходящая через проекцию начала координат плоскости UOV на фокальную плоскость и параллельная фокальному отрезку.

Расчет формы рабочей поверхности отражающих фокусаторов излучения проводится в рамках положений геометрической оптики. Форма поверхности $Z = Z(U, V)$ задается уравнением:

$$\Phi(U, V, Z) - \Phi_0(U, V, Z) = 0, \quad (3.7)$$

где $\Phi_0(U, V, Z)$ – функция оптической длины пути в зависимости от координат точки луча (эйконал), падающего на оптический элемент;

$\Phi(U, V, Z)$ – эйконал отраженной волны.

Современными техническими средствами поверхность, определяемую уравнением (3.7), выполнить достаточно сложно или невозможно, поэтому непрерывную оптическую поверхность заменяют на кусочно-непрерывную, определяемую уравнением:

$$\Phi(U, V, Z) - \Phi_0(U, V, Z) = \lambda c(U, V), \quad (3.8)$$

где λ – длина волны излучения; $c(U, V)$ – произвольная кусоч-

но-постоянная целочисленная функция. В этом случае оптический элемент (фокусатор излучения) представляет собой пластину с профилем, нанесенным в виде зон. Выступы микрорельефа выполнены с высотой \bar{H} изменяющейся от основания к вершине в диапазоне значений от 0 до $\lambda/(2\cos\bar{\theta})$ для отражающей пластины и от 0 до $\lambda/(n-1)$ для пропускающей пластины, где n – коэффициент преломления.

Проведем вывод аналитического выражения, описывающего форму поверхности отражающего оптического элемента в световое пятно минимальных размеров на фокальной плоскости с координатами центра его проекции на плоскость оптического элемента (U_j, V_j) . На рисунке 3.8 представлены ход луча, отразившегося от оптического элемента и положение фокальной плоскости.

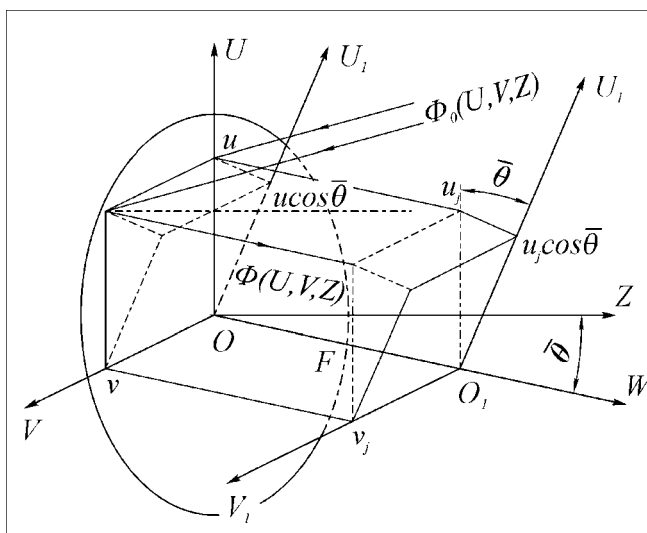


Рисунок 3.8 – Схема фокусировки падающего под произвольным углом $\bar{\theta}$ излучения в световое пятно минимальных размеров

Фокусатор расположен в области плоскости $Z=0$, а эйконал падающего на оптический элемент луча определяется уравнением:

$$\Phi_0(U, V, Z) = -Z\cos\bar{\theta} - U\sin\bar{\theta} \quad (3.9)$$

Эйконал отраженного излучения, распространяющегося вдоль оси OW , определяется выражением:

$$\Phi(U, V, Z) = \overline{\varphi(U, V)} + Z\cos\bar{\theta} - U\sin\bar{\theta}, \quad (3.10)$$

где $\overline{\varphi(U, V)}$ – фазовая функция рассчитываемого оптического элемента.

$$Z(U, V) = \frac{1}{2\cos\bar{\theta}} (\overline{\varphi(U, V)} + \lambda c(U, V)) \quad (3.11)$$

При расчете фазовой функции $\overline{\varphi(U, V)}$ предполагают, что все лучи отраженного поля, вышедшие из области G фокусатора, пересекают фокальную плоскость в точке $(U_j\cos\bar{\theta}, V_j)$ (см. рисунок 3.8). В приближении геометрической оптики формируемое в плоскости $W=f$ изображение определяется свойствами отображения F_φ , переводящего область апертуры оптического излучения G в фокальную плоскость $W=F$. Условие прохождения лучей через точку (x_0, y_0) имеет вид:

$$F_\varphi \begin{cases} x_0 = \xi + \frac{f\varphi'_\xi}{\sqrt{1-\varphi'^2_\xi - \varphi'^2_\eta}}, \\ y_0 = \eta + \frac{f\varphi'_\eta}{\sqrt{1-\varphi'^2_\xi - \varphi'^2_\eta}} \end{cases}, \quad (3.12)$$

где (x_0, y_0) – координаты точки, отображенной на плоскость $W=F$ (плоскость $U_1O_1V_1$ на рисунке 3.8), из области G ; ξ и η – преобразы этой точки на координатной плоскости $U_1O_1V_1$; φ'_ξ и

$\dot{\varphi}_\eta$ – производные фазовой функции по соответствующим координатам.

Решая в принятых координатах систему уравнений (3.12) относительно $\dot{\varphi}_U$ и $\dot{\varphi}_V$, получаем:

$$\begin{aligned}\dot{\varphi}_U &= \frac{(U - U_j) \cos \bar{\theta}}{\sqrt{(U - U_j)^2 \cos^2 \bar{\theta} + (V - V_j)^2 + F^2}}, \\ \dot{\varphi}_V &= \frac{(V - V_j)}{\sqrt{(U - U_j)^2 \cos^2 \bar{\theta} + (V - V_j)^2 + F^2}}\end{aligned}\quad (3.13)$$

Интегрируя выражения (3.13) получим аналитическую зависимость:

$$\overline{\varphi(U, V)} = -\sqrt{(U - U_j)^2 \cos^2 \bar{\theta} + (V - V_j)^2 + F^2} + const \quad (3.14)$$

Подставив (3.14) в (3.11), получим уравнение для определения высоты рельефа отражающего оптического элемента, преобразующего излучение в световое пятно минимальных размеров на фокальной плоскости:

$$Z(U, V) = \frac{1}{2 \cos \theta} \sqrt{(U - U_j)^2 \cos^2 \bar{\theta} + (V - V_j)^2 + F^2} \quad (3.15)$$

Кусочно-непрерывная отражающая оптическая поверхность, фокусирующая излучение в световое пятно минимальных размеров на фокальной плоскости с координатами центра его проекции на плоскость оптического элемента (U_j, V_j) , определяется выражением:

$$Z(U, V) = \text{mod}_{\frac{k\lambda}{2 \cos \theta}} \left(\frac{1}{2 \cos \theta} \sqrt{(U - U_j)^2 \cos^2 \bar{\theta} + (V - V_j)^2 + F^2} \right) \quad (3.16)$$

Выражение, описывающее форму поверхности отражающего оптического элемента, фокусирующего излучение в световое пятно в виде отрезка прямой линии, получено следующим образом. Фокусатор рассматривается как оптический элемент, отображающий

плоскость UOV (плоскость фокусатора) на плоскость изображения $U_1O_1V_1$, в которой задана прямая L_ϕ . Условие фокусировки означает, что все отраженные от области G оптического элемента лучи проходят через прямую L_ϕ (рисунок 3.9), т.е. в каждую точку (x_0, y_0) прямой L_ϕ приходит излучение с некоторой гладкой кривой в области. При $R \ll F$; $L_\phi \ll F$ для всех точек области G и прямой L_ϕ выполняются соотношения: $|x - \xi| \ll f$, $|y - \eta| \ll F$.

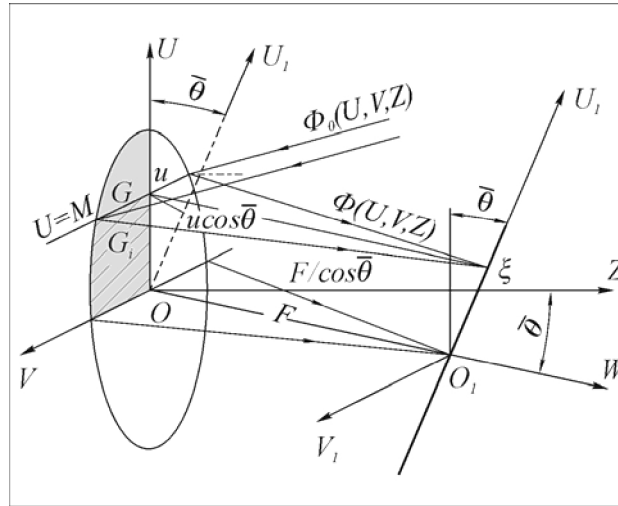


Рисунок 3.9 – Схема фокусировки падающего под произвольным углом $\bar{\theta}$ излучения в отрезок

Учитывая связь $\varphi(\xi, \eta)$ с направлением луча из точки (ξ, η) в точку $(x_0, y_0) \in L_\phi$ при $R \ll F$; $L_\phi \ll F$: $\varphi_\xi^2 + \varphi_\eta^2 \ll 1$.

Если в выражении (3.13) пренебречь значениями φ_ξ^2 и φ_η^2 как бесконечно малыми, и принимая во внимание, что отрезок L_ϕ задается уравнением $y = 0$ (или $V = 0$), то отображение F_ϕ в приня-

тых координатах принимает вид:

$$F_{\varphi} \begin{cases} \xi = U \cos \theta + \frac{f}{\cos \theta} \varphi'_U, \\ 0 = V + f \varphi'_V \end{cases} \quad (3.17)$$

Решая систему (3.17) для каждой точки в фокальной плоскости относительно φ'_U и φ'_V , затем, интегрируя выражение, определяем фазовую функцию и форму поверхности отражающего оптического элемента, фокусирующего излучение в отрезок неравномерной интенсивности:

$$\begin{aligned} \overline{\varphi(U, V)} &= -\frac{U^2 \cos^2 \bar{\theta} + V^2}{2F} + \frac{\xi \cdot U \cos \bar{\theta}}{F}, \\ Z(U, V) &= \frac{1}{2 \cos \bar{\theta}} \left(\frac{U^2 \cos^2 \bar{\theta} + V^2}{2F} - \frac{\xi \cdot U \cos \bar{\theta}}{F} \right) \end{aligned} \quad (3.18)$$

Для получения выражения, описывающего форму поверхности отражающего оптического элемента, фокусирующего излучение в отрезок равномерной интенсивности, введено понятие двойного интеграла вероятности для фокусируемого пучка гауссовского распределения плотности излучения $(\mathcal{P}(R/r))^*$, определяемого выражением (3.6).

Интеграл вероятности $(\mathcal{P}(R/r))^*$ оценивает долю энергии, которая будет фокусироваться в каждую точку на оси $O\xi$ (см. рисунок 3.9) из части области G_i оптического элемента. Координата точки ξ определяется отношением полной мощности излучения в области G_i оптического элемента к суммарной мощности в области G . Кусочно-непрерывная оптическая поверхность, фокусирующая излучение в световое пятно в виде отрезка прямой линии, определяется уравнением:

$$Z(U, V) = \text{mod}_{k\lambda/(2\cos\bar{\theta})} \left(\frac{1}{\cos\theta} \left(\frac{U^2 \cos^2 \bar{\theta} + V^2}{4F} - \frac{U \cos \bar{\theta} L_\phi \int_0^{\bar{M} \cos \theta} dU \int_0^{\sqrt{R^2 - U^2}} \exp\left(-\frac{U^2 + V^2}{r^2}\right) dV \right) \right) \quad (3.19)$$

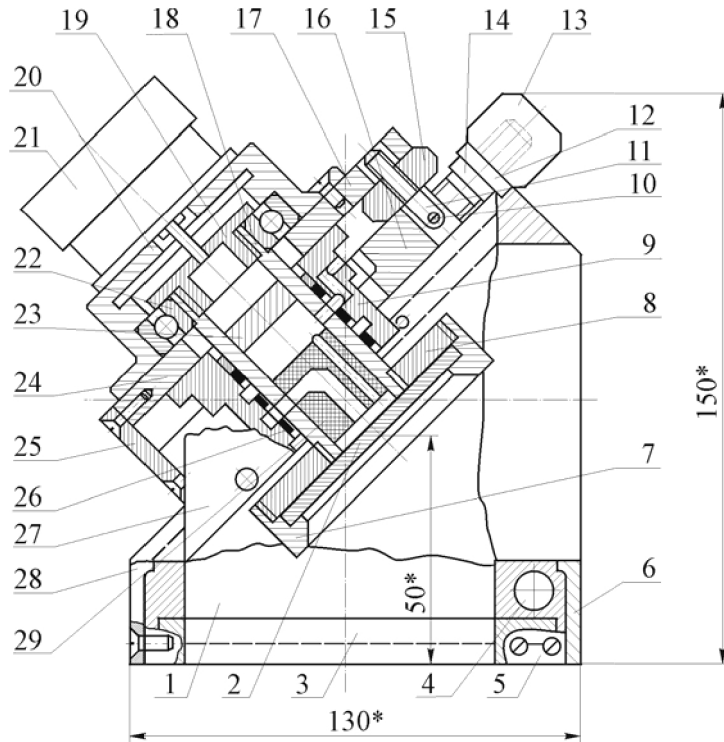
$$\frac{\pi F \left(\frac{R}{r} \right)^*$$

Оптические поверхности, для которых приведены исходные аналитические выражения, очень сложно или невозможно выполнить современными техническими средствами. В приближении подобные поверхности получают в виде кусочно-гладкого зеркала (зонной пластины). Профилированная зонная пластина (фокусатор) обеспечивает изменение фазы излучения от 0 до 2π . Поскольку оптическое излучение является электромагнитным колебанием с периодом 2π , то при соблюдении условия $R \ll F$ фокусатор будет работать как соответствующее гладкое зеркало. Приведенные формулы справедливы и для этого класса оптических элементов.

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 экс-

плутационными характеристиками обрабатываемых деталей.

Для проведения операций лазерной обработки фокусатор целесообразно применять в составе технологического оптического приспособления, состоящего из узлов его фиксации, охлаждения, юстировки и вращения, представленного на рисунке 3.10.



1 – корпус; 2 – оптический элемент; 3 – плита нижняя; 4, 14 – валы перемещения; 5, 12 – стопорные пластины; 6, 27, 28 – направляющие; 7 – крышка узла фиксации; 8 – кольцо узла фиксации; 9 – неподвижная втулка; 10 – штифт; 11 – опора; 13, 15 – рукоятки; 16 – плита боковая; 17 – плита верхняя; 18 – подвижная втулка; 19 – муфта; 20 – крышка; 21 – электродвигатель; 22 – подшипник; 23 – перегородка; 24 – кольцо; 25 – пластина; 26 – уплотнение; 29 – внутренняя полость.

Рисунок 3.10 – Технологическое оптическое приспособления на основе фокусатора излучения

Оптический элемент 2 устанавливается и фиксируется в приспособлении крышкой 7 и кольцом 8, закрепленным на втулке 18, передающей крутящий момент через муфту 19 от электродвигателя 21. Регулирование скорости вращения электродвигателя типа ДСМ2-П-220 или типа СД-54 проводится изменением питающего напряжения переменного тока в пределах 180 – 220В. Угловая скорость вращения фокусатора достигает $\omega_{\phi} = 0,235$ рад/сек. Электродвигатель закрепляется на верхней плите 17, имеющей возможность перемещения относительно плиты 16 вдоль опоры 11 вращением рукоятки 15 для изменения угла падения излучения на оптический элемент в диапазоне $\bar{\theta} = 45 \pm 3^{\circ}$ и точной установки фокусатора по этому параметру.

Юстировка оптического элемента относительно центра лазерного луча по двум взаимно-перпендикулярным координатам проводится вращением рукояток 13, 30 (на рисунке 3.10 не указана), закрепленных на валах 4, 14. Последние, опираясь на стопорные пластины 5, 12, осуществляют преобразование вращательного движения в поступательное и необходимы для перемещения, соответственно, плиты 16 относительно корпуса 1 и корпуса 1 относительно нижней плиты 3 по направляющим 6, 27, 28. Плита 3 четырьмя винтами устанавливается в узел крепления оптической системы технологического модуля лазерной установки.

Узел водяного охлаждения состоит из неподвижной втулки 9 с двумя установленными в ней штуцерами и внутренней фторопластовой полости 29 с центральным каналом подвода воды и тремя периферийными каналами отвода. Для предотвращения попадания охлаждающей жидкости в узел вращения и на оптический элемент служат перегородка 23, кольцо 24 и фторопластовые уплотнения 26. Применение водяного охлаждения позволяет повысить лучевую стойкость фокусатора, т.е. максимальное значение энергетического порога его стабильной работы, до значений плотности мощности

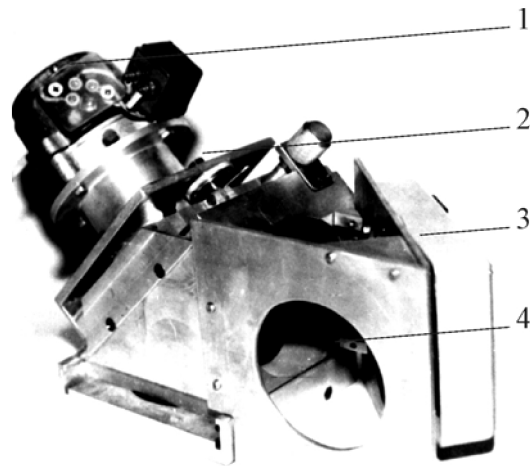
формируемого непрерывного излучения $[q] \geq 10^8$ Вт/м².

Приспособление является универсальным, для комплексов на базе мощных технологических СО₂-лазеров целесообразно применение устройств в качестве последнего поворотного зеркала блока технологического модуля. Достигается расширение функциональных возможностей таких установок в связи с проведением дополнительной операции термообработки. Применение разработанных технологических устройств формирования лазерных потоков позволяет исключить пропускающие оптические элементы (линзы), имеющие низкую стойкость и надежность, из состава системы транспортировки и фокусировки излучения.

Значительно расширить технологические возможности устройств для лазерной обработки с применением фокусаторов излучения позволяет их использование в составе оптической системы с адаптивным оптическим элементом. Имеется возможность увеличить плотность мощности излучения в 20...50 раз за счет уменьшения размеров фокального пятна, уменьшить фокусное расстояние. Кроме того, введение в состав оптической системы адаптивного зеркала с механическим или электрическим приводом позволяет более эффективно управлять профилем интенсивности в плоскости заготовки. Общий вид оптического устройства для проведения лазерной обработки материалов, состоящего из фокусатора и адаптивного зеркала с электромеханическим приводом представлен на рисунке 3.11. Вогнутое адаптивное зеркало, входящее в состав оптического устройства изготовлено методом электролитического осаждения.

Вопросы самоконтроля к главе 3

1. На какие группы подразделяются устройства управления по их функциональному признаку? Дайте определения этих устройств.
2. Что называют модуляцией и какие модуляторы получили наибольшее распространение? Кратко охарактеризуйте их.



1 – узел вращения фокусатора излучения; 2 – узел юстировки; 3 – электромагнитный привод деформируемого зеркала; 4 – вогнутое деформируемое зеркало.

Рис. 3.11 – Оптическое устройство для проведения лазерной обработки материалов

3. Каким параметром характеризуются оптические свойства среды? Какое явление называют электрооптическим эффектом?

4. Какой эффект используют в акустооптических преобразователях? Чем отличаются акустооптические модуляторы от дефлекторов?

5. В чем проявляются aberrации оптических систем? Перечислите наиболее значительные виды aberrаций.

6. Для чего необходимо сканирование лазерного пучка? Перечислите недостатки механических сканирующих устройств.

7. Что представляют собой фокусаторы излучения и каким образом происходит построение их рельефа?

8. Какие допущения используются при выводе уравнения формы рабочей поверхности фокусаторов?

9. Проведите вывод аналитического выражения формы поверхности отражающего фокусатора, преобразующего излучение в све-

товое пятно минимальных размеров.

10. Каким образом получено выражение, описывающее форму поверхности отражающего элемента, фокусирующего излучения в отрезок прямой линии на плоскости?

11. Кратко опишите конструкцию технологического оптического приспособления для проведения операций лазерной обработки материалов на основе фокусатора излучения.

12. Из каких основных узлов состоит оптическое устройство для проведения лазерной обработки материалов?

4 МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

4.1 Материалы для активных элементов твердотельных лазеров

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 $Al_2O_3 : Cr^{3+}$

(для импульсного режима работы) и алюмоиттриевый гранат с неодимом $Y_8Al_5O_{12} : Nd^{3+}$ (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.

Деление неодимового стекла на категории и классы осуществ-

ляется по показателю поглощения, пузырьности, включениям. Специальная термообработка существенно повышает термическую прочность активных элементов из неодимового стекла, а удаление воды из стекол позволяет улучшить их спектрально-люминесцентные параметры. Достигаются следующие размеры цилиндрических активных элементов из неодимового стекла: диаметр 50 мм; длина 200...500 мм. Повышение мощности снимаемой генерации достигают при использовании активных элементов из неодимового стекла, выполненных в виде расширяющихся растрескиваний круглого или прямоугольного сечения. Порог объемного и поверхностного разрушения неодимовых стекол зависит от их химического состава, типа источника излучения, технологии и качества обработки рабочих поверхностей, наличия металлических и других включений и примесей. Улучшения оптической прочности, а также некоторых других физико-химических свойств фосфатных стекол достигают за счет изменения состава шихты, в частности за счет введения в нее оксида алюминия.

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, относятся к классу атермальных.

Фосфатные лазерные стекла (ЛФС) отличаются высоким коэффициентом усиления, большим сечением индуцированного излучения, более узкой линией 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 $(1 \dots 2) \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$ и не имеют дефектов в виде свилей и крупных пузырей. Лазерное стекло производят различных форм и размеров: цилиндрические стержни, пластины, риски.

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 воз-

действии 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 (α - Al_2O_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 неодимового ортованадата иттрия (ванадата) обладают хорошей структурой для внедрения трехвалентных ионов неодима и в настоящее время чаще находят применение в качестве активной среды твердотельных лазеров. Одним из преимуществ над Nd:YAG является то, что ванадат обладает более широкой полосой поглощения, а как следствие, более высокой эффективностью накачки и меньшей зависимостью от термического дрейфа длины волны диодов накачки.

Применяется для непрерывных твердотельных лазеров с диодной накачкой, импульсных твердотельных лазеров, лазеров для микрочипов. Имеет следующие особенности: генерирует линейно поляризованное параллельно оптической оси излучение с длиной волны 1,0643 мкм; высокий коэффициент усиления; широкую полосу поглощения (пик полосы поглощения $\lambda=0,81$ мкм, ширина полосы поглощения 0,008 мкм), низкий порог генерации и короткое время флуоресценции. Кристаллы изготавливают в виде стержней диаметром от 3 до 6 мм и длиной до 20 мм, а также прямоугольных параллелепипедов сечением от 2x2 до 10x10 мм, длиной до 20 мм.

Кристаллы бората лития применяется 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 20x20 мм, длиной до 50 мм.

Кристаллы бета-бората бария применяется для генерации второй и высших гармоник Nd:YAG, титан-сапфировых, ионных и александритовых лазеров. Обладают сочетанием физических и оптических свойств, которое делает их наиболее подходящими материалами для генерации второй и высших гармоник, смешивания частот, перестраиваемых источников. Лазерные системы, ключевым компонентом которых является бета-борат, также широко используются в офтальмологии, обработке материалов, маркировке, записи и хранении информации, обработке полупроводников и других областях.

Бета-борат бария применяется для оптических параметрических осцилляторов и усилителей, а также электрооптических модуляторов. Имеет следующие особенности: широкий диапазон прозрачности (от 0,19 до 3,5 мкм), высокую оптическую однородность, хорошую сопротивляемость термическому повреждению. Кристаллы изготавливают в виде прямоугольных параллелепипедов сечением до 40x40 мм, длина до 35 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 150⁰С. Кристаллы цезий-бора поставляются в вакуумных контейнерах и должны монтироваться в печи или на стойке с подогревом

Цезий–борат лития применяется для генерации 4-ой и 5-ой 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 5x5 мм до 20x20 мм, длиной до 30 мм или большей длины при меньшем сечении.

Достаточно широкая полоса поглощения калия гадолиниевого вольфрамата $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ с центром $\lambda=0,81$ мкм позволяет использовать для накачки лазерные диоды с широким интервал температур и технических характеристик. Кристалл, легированный ионами неодима, является низкопороговой эффективной лазерной средой. При применении калия гадолиниевого вольфрамата в качестве материала активного элемента для лазеров малой и средней мощности с ламповой накачкой его эффективность превышает эффективность алюмоитриевого граната, легированного ионами неодима, а энергоемкостью достигает 10^5 Дж/м³.

Является высокоэффективным материалом для производства лазеров, использующих эффект вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР). Обеспечивает предельно низкий порог ВКР преобразования в пикосекундном режиме генерирования с длиной волны генерации $\lambda=0,94; 1,18; 1,32$ мкм и длительностью импульса в интервале от 0,9 до 10 пикосекунд. Использование перехода ${}^4\text{F}_{3/2} - {}^4\text{F}_{13/2}$ с одновременным ВКР преобразованием позволяет получить на одном элементе эффективную генерацию на длине волны $\lambda=1,54$ мкм с частотой до 8 Гц.

Кристаллы иттрий-литий-фторида, легированные редкоземельными ионами ($\text{LiYF}_4:\text{TR}^{3+}$), применяются в качестве материала для изготовления лазерных стержней задающих лазеров к лазерным системам на фосфатном стекле. Используют для создания высокочувствительных измерительных систем – лазеров локации, а также при производстве сложных измерительных систем, работающих на

нескольких длинах волн (так называемых, многочастотных лазеров).

4.2 Материалы для элементов проходной оптики

Выбор материала для проходной лазерной оптики определяется в первую очередь пропусканием излучения рабочей длины волны. Реализация технологических возможностей CO_2 -лазеров как импульсного, так и непрерывного действия в ряде случаев ограничивается разрушением оптических материалов. Поэтому их применение в мощных лазерах на CO_2 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 прочностью 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 КОЗ (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. На рисунках 4.1 и 4.2 представлены зависимости пропускания материалов для CO₂-лазеров от длины волны, а в таблице 1 приведены технические характеристики оптических материалов.

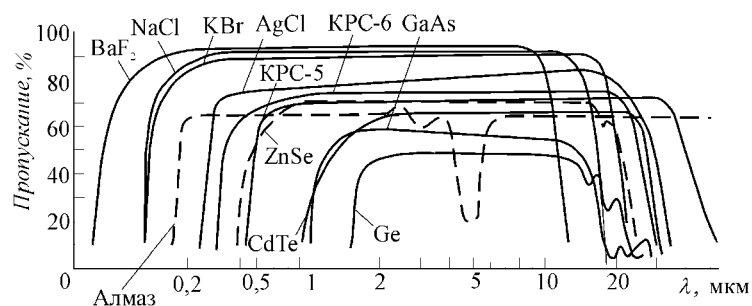


Рисунок 4.1 – Зависимости пропускания материалов, применяемых для лазеров на CO₂, от длины волны

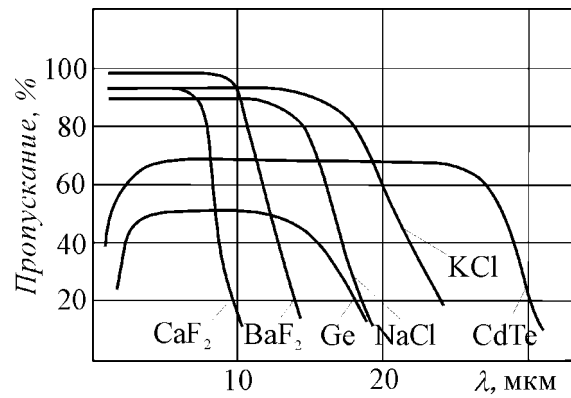


Рисунок 4.2 – Зависимости пропускания оптических материалов от длины волны

Таблица 4.1 – Технические характеристики оптических материалов для CO₂-лазеров

Параметр	Ал-маз	ZnSe	CdTe	Ge	CdS	GaAs	NaCl	KCl
Коэффициент преломления для $\lambda = 10,6$ мкм	2,41	2,4	2,67	4,0	2,2	3,3	1,49	1,46
Коэффициент отражения непокрытой поверхности, %	17	17	19	36	14	25	8,8	7,6
Коэффициент поглощения для $\lambda = 10,6$ мкм, %/см	0,01	0,5	0,2	2	3	2	0,2	0,2
Удельное электрическое сопротивление, Ом·см	10^{15}	10^{12}	10^8	10^2	10^3	10^7	—	—
Диапазон пропускания излучения, мкм	0,2-26,5	0,5-20	2-28	3,23	0,5-16	1-18	0,25-16	0,3-20
Теплопроводность, Вт/(см·К)	20	0,21	0,07	0,6	0,27	0,46	0,1	0,1
Коэффициент линейного расширения $\alpha_p \cdot 10^6, K^{-1}$	1,05	8,53	4,5	6,1	—	5,7	44	36

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 излу-

чения дефектами и включениями. Обычно соли типа KCl и NaCl имеют коэффициент поглощения $0,2 \dots 0,4 \text{ м}^{-1}$, 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 $1,5 \dots 2$ раза (у прессованных кристаллов KCl: $\beta \sim 0,1 \text{ м}^{-1}$). 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.

Германий (Ge) – устойчив к действию воздуха при нормальных условиях, не растворяется в воде, соляной и разбавленной серной кислоте. Синтетический поликристаллический германий обычно выращивают из раствора, а затем методом зонной плавки проводят тщательную его очистку. Германий широко используется в оптическом приборостроении в качестве материала для деталей проходной оптики, в акустикооптических приборах ИК-диапазона для модуляции и сканирования излучения (считывающие элементы оптических запоминающих устройств, лазерные устройства отображения информации, лазерные локаторы).

Высокая механическая прочность германия позволяет получать рабочие поверхности линз и пластин хорошего качества. К недостаткам германия следует отнести его относительную дороговизну (стоимость заготовки Ge диаметром 25 мм и толщиной 3 мм составляет 25 долл.), а также затруднения при юстировке германиевых оптических систем, поскольку он не прозрачен в видимой области спектра. Начиная от $\lambda = 1,8$ мкм коэффициент пропускания германия быстро увеличивается и при $\lambda = 2...10$ мкм имеет сравнительно высокое, мало изменяющееся значение.

Кремний (Si) – неметаллический, химически малоактивный материал; устойчив к коррозии при нагревании на воздухе; нерастворим в воде. Кремний высокой чистоты характеризуется очень низкой электропроводностью и сравнительно невысокой теплопроводностью. Синтетический кремний производят как в аморфном виде, так и кристаллическом (кубической структуры). Максимальный размер выращиваемых заготовок кремния составляет около 200 мм.

Кремний широко применяют в оптическом приборостроении благодаря следующими свойствам: высокий спектральный коэффициент пропускания в областях спектра 3...5 мкм и 25...45 мкм, что позволяет использовать его для инфракрасных фильтров и плоских деталей проходной оптики (для повышения коррозионной стойкости применяется покрытие на основе SiO_2); малая плотность;

малый температурный коэффициент линейного расширения; высокие твердость и модуль упругости; химическая инертность. Эти свойства позволяют использовать кремний в качестве конструкционного материала для силовой отражательной оптики, а также для полупрозрачных зеркал и линз. К недостаткам кремния при его применении в оптических системах относят его непрозрачность в видимой части спектра, что затрудняет юстировку.

Селенид цинка (ZnSe) представляет собой полупроводниковое соединение. Природный минерал штиллит встречается достаточно редко, синтетические кристаллы ZnSe получают расплавленным методом (заполнение матриц под давлением), а также испарением поликристаллического продукта в вакууме или химическим осаждением поликристаллического материала из парообразной фазы на подложку. Растворим в воде (10 г на 100 г H₂O при 573 К), в спиртах и в азотной кислоте.

Свойства кристаллического ZnSe, в частности равномерность свойств по объему кристалла, в значительной степени определяются его чистотой. В интервале длин волн $\lambda = 0,5...20$ мкм спектральный коэффициент пропускания селенида цинка для толщины 2 мм превышает 0,5. Благодаря сравнительно низкому коэффициенту поглощения в области спектра 9...12 мкм, достаточно высокой теплопроводности, стабильности при нагреве, достаточно высокой температуре плавления, механической прочности, технологичности изготовления и ряду других свойств селенид цинка нашел широкое применение для элементов проходной оптики инфракрасных лазеров, в частности CO₂-лазеров, работающих на длине волны 10,6 мкм. Из ZnSe изготавливают плоские пластины – входные и выходные окна, коллимирующие линзы, полупрозрачные зеркала и др. Стоимость селенида цинка достаточно высокая: цена заготовки материала диаметром 25 мм и толщиной 3 мм превышает 120 долл.

Арсенид галлия (GaAs) – монокристалл синтетический с кубической симметрией. Представляет собой полупроводниковое со-

единение. 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 λ 1,5...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 1кВт. К недостаткам арсенида галлия относят: его высокую стоимость (цена заготовки диаметром 25 мм и толщиной 3 мм превышает 200 долл.); непрозрачность GaAs в видимой области спектра, что затрудняет проверку и юстировку систем, содержащих оптические детали из этого материала.

КРС-5 и КРС-6 представляют собой синтетические монокристаллы, изготавливаемые из расплава. В состав КРС-5 входят бромистый таллий ТlBr (42%) и йодистый таллий ТlI (58%). Материал имеет темно-красный цвет. Бесцветный материал КРС-6 представляет собой твердый раствор состава: бромистый таллий ТlBr (30%) и хлористый таллий ТlCl (70%). Слабо растворимы в воде; растворяются в кислотах. КРС-5 и КРС-6 характеризуются достаточно высокой токсичностью, поэтому технологический процесс их изготовления, обработки и эксплуатации связан с необходимостью соблюдения целого ряда мер техники безопасности. Механические свойства КРС-5 и КРС-6 затрудняют их высококачественную оптическую обработку: материалы мягкие, трудно полируются, обладают холодной текучестью, подвержены пластической деформации даже при небольшом напряжении, легко деформируются и царапа-

ются. Термостойкость материалов невысокая, температура плавления $T_{пл} = 687$ К (КРС-5) и $T_{пл} = 697$ К (КРС-6). Относительно высокий показатель преломления КРС-5 обуславливает большие потери на отражение в видимой области спектра, что затрудняет юстировку оптических систем, содержащих элементы из КРС-5.

В связи с высокой гигроскопичностью материала использование КРС-5 и КРС-6 для деталей, соприкасающихся с атмосферой, связано с необходимостью применения специальных мер защиты. КРС-5 и КРС-6 применяют для внутренних деталей оптических приборов (например, аппаратуры самонаведения), размещаемых в герметизированном пространстве и не подверженных механическим и химическим воздействиям внешней среды и для оптических элементов лазеров, работающих в ИК-области спектра. КРС-5 используется также в качестве кристаллов для управления оптическим излучением (модуляторов излучения) и является перспективным материалом для применения в гибких волоконно-оптических системах, предназначенных для передачи излучения высокомогущных СО и СО₂-лазеров в лазерной технологии и хирургии. Стоимость заготовки из КРС-5 (пластина диаметром 25 мм, толщиной 3 мм) достигает 50 долл.

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-галоидными кристаллами КSl в нормальных условиях является наиболее гидроустойчивым. 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 КСl 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 КСl в видимом участке спектра облегчает юстировку оптических систем, содержащих элементы из этого материала. КСl применяется для изготовления плоских и сферических элементов оптических систем технологических лазеров, работающих в ИК-области спектра. Основным эксплуатационным недостатком КСl 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 однородностью. 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 долл.). В связи с тем, что область оптической прозрачности NaCl охватывает интервал спектра 0,25...18 мкм, хлористый натрий используется для изготовления оптических элементов, ра-

ботающих 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 ТЛ, работающих в ИК-области. При оптической нагрузке до $0,3 \text{ кВт/см}^2$ (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.

Фтористый кальций (CaF₂) – природный и синтетический монокристаллический кристалл, имеющий достаточно хорошую степень однородности. Материал негигроскопичен, оптически изотропен, но с резко выраженной анизотропией механических свойств. Хорошо растворяется в солях NH₄, в LiCl и CaCl₂, при нагревании разлагается серной кислотой. Механическая и термическая стойкость незначительная. Синтетический фтористый кальций выращивается в виде сростка блоков монокристаллов, ориентированных произвольным образом. Является дорогим материалом. В связи с тем, что область оптической прозрачности CaF₂ охватывает интервал спектра 0,125...12 мкм, фтористый кальций широко используется в оптическом приборостроении для элементов УФ и ИК–микроскопов, для окон и диспергирующих призм в УФ и ИК–спектроскопии. В зависимости от рабочей области спектрального пропускания установлены три марки синтетического фтористого кальция: ФКУ, ФКИ, ФКВ. Все три марки технологичны в обработке, легко шлифуются и полируются. CaF₂ используется в качестве материала для проходных элементов лазерных систем, работающих в диапазоне длин волн от УФ–области до 9 мкм. Кроме

того, CaF_2 с редкоземельными добавками служит материалом для активных элементов лазеров.

Оптическая керамика КО3 (на основе CaF_2 , зарубежный аналог “Иртран-3”) представляет собой поликристаллический материал. Получают методом горячего прессования в вакууме химически чистого порошка CaF_2 с размером зерна 0,1...10 мкм при давлении до 300 МПа. Материал химически устойчив, хорошо шлифуется и полируется обычными методами обработки оптических деталей. Однако поликристалличность структуры керамики влияет на качество обрабатываемой поверхности, которое в общем случае оказывается хуже, чем у монокристаллического материала. Прозрачность керамики КО3 определяется качеством сырья и в видимой области спектра оказывается несколько ниже, чем у монокристалла. При хорошем качестве исходного сырья достаточно высокая прозрачность достигается в интервале длин волн $\lambda = 0,4...10$ мкм. Керамика КО3 является перспективным материалом для прозрачных в ИК-области оптических деталей, работающих при больших перепадах давления и температуры и при сильных термомеханических ударах.

Оптическая керамика КО4 (на основе ZnSe , зарубежный аналог “Иртран-4”) принадлежит к категории так называемых мягких керамик из-за ее сравнительно невысокой твердости, представляет собой поликристаллический материал. Получается методом горячего прессования в вакууме. В воде не растворяется, слабо растворяется в кислотах, на воздухе при $T=293$ К не окисляется. Сильное окисление наблюдается при нагревании на воздухе до 520 К, хорошо шлифуется и полируется обычными методами обработки оптических деталей. Керамика КО4 прозрачна в спектральном диапазоне 0,5...21 мкм. На основе ZnSe разработан поликристаллический материал ПО4, получаемый сублимацией в вакууме.

Оптическая керамика КО6 (на основе CdTe , зарубежный аналог “Иртран-6”) представляет собой поликристаллический материал. В

воде не растворяется, слабо подвержен действию органических кислот. На воздухе при $T = 293$ К не окисляется. При нагреве до $T > 623$ К начинает окисляться. В нейтральной среде устойчив при любой температуре до температуры плавления. В вакууме начинает испаряться при $T > 723$ К. Керамика КОб прозрачна в спектральном диапазоне 0,9...20 мкм, причем спектр пропускания не содержит полос поглощения. Керамика КОб применяется в качестве подложек для интерференционных светофильтров и в инфракрасных спектрофотометрах, является перспективным материалом для прозрачных в ИК-области спектра оптических деталей, (например, для оптических окон аэрогазодинамических труб, для окон СО₂-лазеров и др.). При оптическом нагружении, не превышающем 10^4 Вт/м², имеет большой ресурс работы. В связи с высоким значением показателя преломления в ближней ИК-области спектра имеет место большая потеря энергии излучения на отражение. Снижение коэффициента отражения достигается нанесением на отражающие поверхности КОб покрытия из полистирола.

4.3 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 по-

верхности 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 марки 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 предохраняющая их 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 – мед-

ными) подложками и тонкослойными отражающими покрытиями из тугоплавких металлов с высокими коэффициентами отражения для $\lambda = 10,6$ мкм. Основные характеристики наиболее широко распространенных зеркал приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Технические характеристики металлических зеркал

Зеркала	Коэффициент отражения, %	Точность обработки поверхности		Энергетический порог повреждения в режиме	
		сферической	плоской	импульсном, 10^4 Дж/м ²	непрерывном, 10^3 Вт/см ²
Из никеля-меди	98,8 >99 (с золотым покрытием)	$\lambda/10$ - $\lambda/20$	$\lambda/20$	5 ($\tau_u \sim 0,6$ мкс)	1 (с охлаждением)
Из бериллия-меди	98 95,5 (с золотым покрытием)	$\lambda/20$	$\lambda/20$	100	—
Из молибдена	>98	$\lambda/40$	$\lambda/40$	35 ($\tau_u \sim 0,6$ мкс)	200 ($t \sim 8$ с)
Промышленные	>99	$\lambda/20$	$\lambda/10$	до 100 ($\tau_u \sim 0,6$ мкс)	>10 (без охлаждения)
Суперполированные из Си	>99	$\lambda/40$	$\lambda/40$	130 ($\tau_u \sim 0,6$ мкс)	10 (без охлаждения) 200 (с охлаждением)
Из суперинвара (сплав 32 НКД)	$\sim 97-98$	$\sim \lambda/(5-10)$	$\lambda/(5-10)$	—	—

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 предназначаются 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 Be и Cu 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 CO₂. 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 CO₂. 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 CO_2 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 термодформаций до долей микрометра при одновременном сокращении трудоемкости изготовления таких зеркал.

Медь – металл красного цвета, ковкий и мягкий, хороший проводник теплоты и электричества. В оптическом приборостроении медь применяется для отражателей (медные зеркала и тонкие пленки меди на диэлектрических подложках), широко используется для силовой отражательной оптики, т. е. для зеркал, работающих при высокой плотности излучения. Это обусловлено высоким значением спектрального коэффициента отражения, невысоким значением температурного коэффициента линейного расширения, высокой теплопроводностью, хорошей оптической прочностью и малыми значениями термодформации. Преимущественно используется бескислородная медь марок М00б, М0б, М1б.

При увеличении шероховатости отражающей поверхности наблюдается заметное увеличение диффузного отражения и одновременное снижение зеркального отражения. С увеличением температуры спектральный коэффициент отражения меди уменьшается. Порог поверхностного разрушения меди заметно зависит от пара-

метров лазерного излучения (непрерывный или импульсный режим, длина волны излучения, длительность воздействия, частота следования и форма импульса, диаметр пучка лучей), от состояния облучаемой мишени (качество материала, технология обработки, режим охлаждения) и от параметров окружающей среды (состав, давление, температура).

Бронза БрХ08 относится к группе медно-хромистых бронз. Обладает высокой электропроводностью и теплопроводностью, имеет хорошие механические свойства, характеризуется высокой температурой рекристаллизации и размягчения. Легко поддается механической обработке. При ее чистовом точении с помощью резцов из природных алмазов на плоских и сферических поверхностях получают высокое качество обработки: высота неровностей не превышает 0,02 мкм. В промышленности бронза БрХ08 широко используется для изготовления электродов, жаропрочных деталей, элементов, работающих при охлаждении до 20 К, к которым предъявляются требования высокой прочности, твердости, электропроводности и теплопроводности, особенно при повышенных температурах (например, для контактов электрической аппаратуре, для коллекторов электродвигателей и др.). При создании высококачественной рабочей поверхности бронза БрХ08 получила применение в оптических системах в качестве материала для отражательных элементов лазеров.

Молибден – тугоплавкий, хрупкий, немагнитный металл светло-серого цвета. Относится к химически стойким материалам, на воздухе при $T = 293$ К не окисляется и не подвержен действию соляной и разбавленной серной кислот; растворяется в азотной и концентрированной серной кислотах. При накаливании на воздухе до температуры свыше $T = 673$ К интенсивно окисляется. Характеризуется высокой температурой плавления (среди тугоплавких металлов уступает лишь вольфраму и танталу), что позволяет применять его для изделий, работающих при высоком нагреве.

Имеет значительно более высокую теплопроводность, чем у других тугоплавких металлов, что обеспечивает хороший отвод тепла от деталей и узлов, а также сравнительно небольшой температурный коэффициент линейного расширения. Молибден можно сваривать электронно-лучевой сваркой с коррозионно-стойкой сталью, коваром, танталом, никелем и платиной; точечной сваркой – с танталом и никелем. Он хорошо поддается пайке в водородных печах золотоникелевыми и платиновыми припоями.

Прочностные и тепловые характеристики молибдена делают его перспективным материалом для отражателей оптикоэлектронных приборов, в частности для зеркал, подверженных воздействию высоких мощностей излучения лазерных установок. К недостаткам молибдена относят его высокую стоимость (в 30...40 раз выше, чем стоимость меди). Упрочнение поверхности и повышение ее коррозионной стойкости достигают лазерной аморфизацией, электронным и ионным облучениями, а также механическим полированием. При этом толщина аморфного слоя на поверхности, шлифованной алмазным кругом и полированной водной суспензией на основе алмазного порошка, составляет 10...100 нм.

Вольфрам – светло-серый металл, наиболее тугоплавкий из металлов. Вольфрам мало подвержен эрозии, на воздухе при обычной температуре устойчив, окисляется только при температуре красного каления. Очень стоек по отношению к кислотам, чувствителен к воздействию газов, выделяемых из пластмасс или других изоляционных материалов, особенно в условиях повышенной влажности.

Широко применяется в электротехнике, вакуумной технике и радиоэлектронике (в высокотемпературных печах в качестве нагревательных элементов, для контактов мощных электрических установок, нитей ламп накаливания, разрядников, катодов и анодов электронных приборов, в рентгентехнике, в аппаратуре связи, для магнето, ртутных и вакуумных выключателей). Высокая рабочая температура и твердость, очень малое испарение при нагреве обес-

печивают хорошую оптическую прочность зеркал, изготовленных из вольфрама, и стабильность их оптических свойств в процессе эксплуатации и при хранении. Поэтому вольфрам является перспективным материалом для лазерной техники, в частности, для силовой отражательной оптики с длительным ресурсом работы.

4.4 Материалы для поляризационных элементов

Поляризационные оптические элементы, осуществляющие 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.

Исландский шпат ($\text{CaO}\cdot\text{CO}_2$) – природный материал, представляющий собой водяно-прозрачную разновидность углекислого кальция (кальцита), является классическим примером двулучепреломляющего кристалла. Нашел широкое применение в оптическом приборостроении в качестве материала для изготовления одно- и двулучевых двулучепреломляющих призм, используемых в качестве поляризаторов, анализаторов, устройств для отклонения светового луча в электрооптических узлах, преобразователей светового излучения, модулированного по фазе, в излучение, модулирован-

ное по амплитуде, и др. Область спектрального пропускания исландского шпата высокой чистоты 0,24...1,90 мкм. За пределами этой области наблюдаются сильное поглощение и появление дихроизма.

Кристаллический кварц (SiO_2) – природный и синтетический твердый монокристаллический материал. Обладает стекляннм до матового блеском. Природный кварц представляет собой кристаллический диоксид кремния, являющийся наиболее стойким его соединением. Входит в состав многих пород (гранит, кварцит, песчаники и др.). Кристаллический кварц имеет различный цвет: фиолетовый (аметист), черный (морион), бурый (дымчатый топаз), бесцветный (горный хрусталь). Известны мелкокристаллические разновидности (агат, яшма и др.).

Широкое применение кристаллического кварца в оптических приборах обусловлено его хорошей прозрачностью для видимого, ближнего ИК– и УФ–излучения, наличием двулучепреломления, высокой теплоустойчивостью, а также способностью вращать плоскость поляризации. Из кристаллического кварца изготавливают оптические фильтры, спектральные диспергирующие элементы (призма Корню и др.), оптические детали, к которым предъявляются требования высокой теплоустойчивости (концевые отражатели дальнометров, эталонные зеркала и пластины), многие поляризационные детали (фазовые компенсаторы, фазовые и поляриметрические пластинки и др.).

Кристаллический кварц достаточно технологичен при механической обработке, вследствие его высокой твердости удается получать высококачественные отражающие и преломляющие поверхности методами шлифования и полирования оптического стекла. Спектральный коэффициент пропускания кварца достаточно высок в видимой, ближней ИК– и УФ–областях спектра. В диапазоне значений длин волн $\lambda = 4...11$ мкм кварц практически непрозрачен даже в тонких слоях. При $\lambda = 11...16$ мкм кварц также имеет вы-

сокий спектральный коэффициент пропускания, который при $\lambda = 16 \dots 20$ мкм существенно понижается. Далее до $\lambda = 100$ мкм кварц опять становится прозрачным.

Дихроичные материалы. Из природных материалов, обладающих дихроизмом, применяется турмалин, представляющий собой минерал кальциевых боросиликатов. Является двулучепреломляющим одноосным кристаллом. Особенно ярко выражен дихроизм у зеленой разновидности турмалина. Спектральная область применения 0,45...0,55 мкм. Поглощение луча зависит от длины волны проходящего через кристалл излучения и от угла падения. В природе турмалин встречается редко в связи с этим применение турмалина в оптической аппаратуре ограничено. Синтетические дихроичные материалы – анизотропные пленки, пропитанные дихроичными молекулами (молекулярные пленки) или микрокристаллами (кристаллические пленки), имеют существенное преимущество перед природными возможности получения крупногабаритных заготовок и сравнительно низкой стоимости изготовления.

4.5 Материалы для интерференционных покрытий

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 рас-

пространенными 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 зави-

сит 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.

Вопросы самоконтроля к главе 4

1. Какие стекла используются в качестве активных элементов твердотельных лазеров? Перечислите их достоинства.

2. Назовите и охарактеризуйте основные виды кристаллических соединений и активных примесей, применяемых при изготовлении активных элементов.

3. Перечислите основные требования, предъявляемые к материалам, применяемым для изготовления элементов проходной оптики СО₂-лазеров.

4. Назовите материалы, применяемые для изготовления элементов проходной оптики в ИК-области спектра, укажите их основные характеристики.

5. Назовите основные свойства тугоплавких монокристаллов и полупроводниковых соединений, обуславливающие их применение в оптических системах СО₂-лазеров.

6. Что представляют собой синтетические монокристаллические растворы на основе солей таллия? Укажите их основные достоинства, недостатки и области применения в качестве материалов

для деталей оптических приборов.

7. Назовите основные свойства щелочно-галогидных кристаллов, предоставляющие возможность использовать их в оптических системах технологических лазеров. Приведите примеры использования этих материалов в оптическом приборостроении.

8. Что представляет собой оптическая керамика? Перечислите ее основные свойства.

9. Перечислите общие требования к материалам для лазерной отражательной оптики. Какие общие критерии качества лазерных зеркал используются? Назовите материалы, применяемые для лазерной отражательной оптики.

10. Укажите основные технические характеристики металлических зеркал для CO_2 -лазеров.

11. Назовите особенности изготовления зеркал из медно-никелевого и медно-бериллиевого сплавов. Укажите основные свойства зеркал из молибдена, а также промышленных и суперполированных медных зеркал.

12. Перечислите основные характеристики меди и бронзы, обуславливающие их применение в качестве конструкционных материалов для лазерной отражательной оптики.

13. Назовите основные свойства молибдена и вольфрама, предоставляющие возможность использовать их в качестве материала для силовой отражательной оптики с длительным ресурсом работы.

14. Перечислите характеристики, которыми должны обладать поляризационные оптические элементы. Назовите поляризационные материалы и укажите их свойства.

15. Для чего предназначены оптические покрытия, и какие требования предъявляются к их параметрам?

5 РАСЧЕТ ДОПУСКОВ И ИЗОБРАЖЕНИЕ НА ЧЕРТЕЖАХ ОПТИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

5.1 Расчет допусков на изготовление и сборку оптических деталей, узлов и приборов

Важным этапом проектирования оптических деталей, узлов и приборов является расчет и задание обоснованных допусков на точность их изготовления. Ошибки механических и оптических деталей и устройств существенно влияют на точность функционирования приборов. К таким погрешностям относят дефекты качества изображения, параллакс, разворот шкал и сеток, наклон и перекоп изображений, биение или увод визирной оси и другие. Правильно заданные допуски на изготовление и установку оптических деталей и узлов позволяют обеспечить высокое качество выпускаемых приборов при наименьшей их себестоимости. Поэтому расчету допусков для оптических деталей, узлов и систем в целом уделяют большое внимание. На характеристики и качество изображения оптической системы влияют погрешности, которых подразделяют на три основные группы:

- погрешности оптических материалов – отклонения величины основного показателя преломления n_e , средней дисперсии $n_F - n_C$ и других характеристик материалов от принятых при расчете табличных величин, а также оптическая неоднородность, двойное лучепреломление, свили и т. д.;

- погрешности обработки оптических деталей – отклонение формы рабочей поверхности от заданной (N , ΔN , ΔR), децентрировка линз и поверхностей (C), клиновидность пластин (θ) и развороток призм;

- погрешности сборки, влияющие на деформацию оптических

рабочих поверхностей линз, нарушение взаимоположения деталей и узлов в приборе, децентрирование системы, расфокусировка изображения, отклонения визирных осей.

Отклонения показателей качества оптических материалов (например, показателя преломления), погрешности изготовления формы и толщины, влекущие за собой отклонения фокусного расстояния линзы или дефекты качества изображения, компенсируются путем изменения воздушных промежутков между оптическими деталями и продольным их смещением. Поэтому удастся существенно расширить допуски на изготовление оптических деталей, снизить требования к материалам, из которых изготавливаются оптические детали.

5.2 Критерии оценки качества изображения и допуски на дефекты оптической системы

Для оценки качества изображения, формируемого оптическими системами, применяют критерий Рэля и частотно-контрастную характеристику. Если волновые aberrации не превосходят величины $\Delta_s = \lambda/4$, то в пределах пучка лучей качество изображения считают приемлемым. Для средней длины волны $\lambda_{cp} = 0,55$ мкм видимой области спектра величина волновых aberrаций не должна превышать $\Delta_s = 0,14$ мкм. Величину допустимой суммарной волновой aberrации на все оптические детали системы считают равной $(\Delta_s)_{дон} = 0,1$. Расчет допусков на оптические детали и поверхности выполняют применяя принцип таутохронизма. Согласно этому принципу при прохождении через любую последующую оптическую систему волновые деформации в пределах рабочего пучка лучей не изменяют своей величины. Возникающие волновые деформации при прохождении пучка лучей через оптические детали, имеющие дефекты материала и изготовления, алгебраически суммируются.

Если на плоскости раздела двух сред имеется местная неровность глубиной $-\Delta$, то участок волнового фронта, проходящий через него, отстанет от основной его части. На выходящем в воздух волновом фронте Ω' возникает местная деформация Δ_* (рисунок 5.1). Согласно принципу таутохронизма для проходящего луча:

$$\Delta_{*n.} = -(n_1 - n_2)\Delta \quad (5.1)$$

Для волнового фронта, отраженного от той же плоскости раздела получим выражение:

$$\Delta_{*o.n.} = -2n\Delta \quad (5.2)$$

Проходящий или отраженный от зеркальной поверхности плоский волновой фронт повторяет дефекты рабочей поверхности. Коэффициент пропорциональности в первом случае равен разности показателей преломления $n_1 - n_2$ на границе сред, а во втором – удвоенной величине показателя преломления среды, в которой отражается волновой фронт.

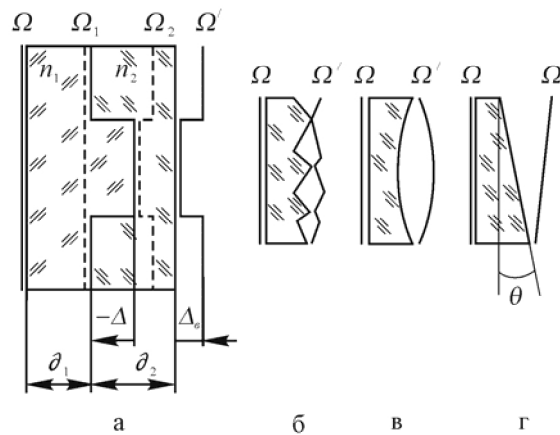


Рисунок 5.1 – Влияние дефектов плоской оптической преломляющей поверхности на выходящий волновой фронт: местные неровности на границе двух сред с различными показателями преломления $n_1 > n_2$ (а); микрошероховатость (б); цилиндричность (в); клиновидность (г)

Из формул (5.1) и (5.2) следует, что дефекты зеркальных по-

верхностей, особенно с задним отражением, вызывают большее (до 4 более раз) искажение волнового фронта, чем преломляющие поверхности. Дефекты оптических поверхностей: микрошероховатость или волнистость рабочих поверхностей, несферичность (цилиндричность) поверхностей, клиновидность деталей или местные и зональные ошибки вызывают различные по характеру деформации волнового фронта, представленные на рисунке 5.1.

Допуск на так называемые “технологические” aberrации оптической системы разделяют на допуски для отдельных деталей и их элементов (поверхностей и углов) в предположении, что действия первичных ошибок будут суммироваться как случайные величины по квадратичному закону. Во многих случаях взаимный разворот оптических деталей уменьшает до минимума суммарный астигматизм.

5.3 Расчет допусков на оптические поверхности и детали

Единичные дефекты полированных поверхностей, такие как царапины, выколки и др., контролируют по величине отношения площади дефектов к площади поперечного сечения рабочего пучка лучей в месте их нахождения. Допустимая величина отношения указанных площадей – не более 1%. Допуски на несферичность (астигматичность) поверхностей в пределах светового диаметра, приводимые на чертеже оптической детали, определяются выражением:

$$\Delta N = \Delta N_p \left(\frac{D_{ce}}{D} \right)^2, \quad (5.3)$$

где ΔN_p – предельное отклонение формы рабочей поверхности, D_{ce} – световой диаметр, D – рабочий диаметр.

Величина допустимых aberrаций определяет допуск N на общее отклонение поверхности. Для деталей неотчетливого назначения этот допуск задают исходя из возможностей технологии се-

рийного оптического производства или удобства контроля несферичности, в этом случае принимают $N \leq (3 - 5) \cdot \Delta N$.

При расчете допусков и контроле призм каждая из ошибок рассматривается самостоятельно. Из разверток призм находят связь между ошибками отдельных углов призм и клиновидностью θ_c , а также между пирамидальностью призм и клиновидностью θ_π .

Децентрировка линз вызывает не только астигматизм, но и кому на оси и другие aberrации, что необходимо учитывать в ответственных системах. Наклоненная линза отличается от центрированной добавлением спереди и сзади сферических клиньев с равными и противоположными по знаку углами θ и $-\theta$ (рисунок 5.2). Для этих клиньев определяют суммарную кому на оси и другие aberrации.

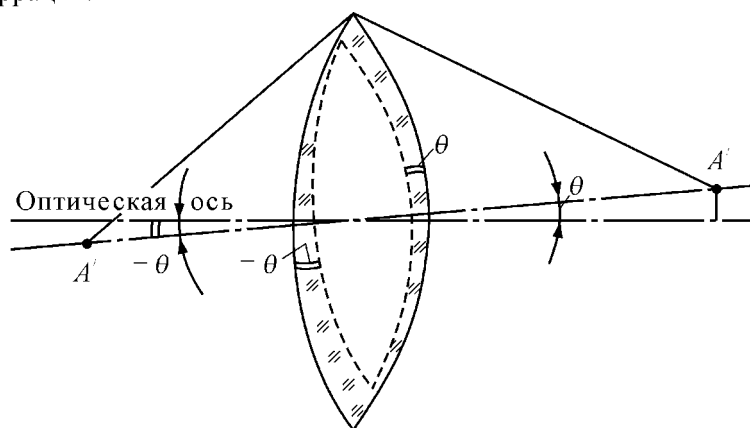


Рисунок 5.2 – Влияние наклона отдельных линз на кому на оси

Допуски на отдельные погрешности оптических поверхностей и деталей зависят от их местонахождения в оптической системе и, в первую очередь, от диаметра сечения рабочего пучка лучей. Чем шире сечение рабочего пучка, тем строже все указанные допуски для деталей. В такой же зависимости от размера сечения рабочего пучка находятся и требования к оптическим материалам в отноше-

нии оптической однородности, двойного лучепреломления и др. Для деталей, расположенных в широком сечении рабочего пучка назначают материалы более высоких категорий, чем для деталей, стоящих в узком пучке, ближе к плоскости изображения.

Требования к чистоте полировки поверхностей и к таким дефектам материала как пузыри, царапины, выколоки, напротив, возрастают с уменьшением сечения рабочего пучка. Для деталей и поверхностей, расположенных близко к плоскости изображения, т.е. для узких световых пучков предъявляются более высокие требования.

5.4 Нормируемые показатели качества стекла

Нормируемыми показателями качества бесцветного оптического стекла являются: отклонения от номинальных значений показателя преломления Δn_e и коэффициента дисперсии $\Delta(n_{F'} - n_{C'})$; однородность показателя преломления в партии заготовок или оптическая однородность, которая оценивается по разрешающей способности; показатель ослабления, который характеризует поглощение и представляет собой величину, обратную расстоянию, на котором поток излучения ослабляется в результате поглощения и рассеяния в 10 раз; двойное лучепреломление, характеризующее разность хода лучей, образованных при раздвоении поляризованного луча при прохождении его через напряженный оптический материал; бессвильность; пузырность. Требования к материалу оптической детали, представленные в виде категорий и классов качества, в зависимости от функционального назначения деталей могут быть основными, т.е. определяющими качество детали, и дополнительными. Необоснованное повышение основных требований к материалам деталей приводит к усложнению технологии изготовления, а их снижение – к ухудшению качества создаваемого изображения. Повышение дополнительных требований не может обеспечить значительного улучшения работы оптической системы, но

повышает ее себестоимость.

По показателю преломления и коэффициенту дисперсии нормируется пять категорий качества с приведенными в таблице 5.1 допустимыми отклонениями Δn_e и $\Delta(n_{F'} - n_{C'})$ от номинальных значений. Несоответствие их фактических значений расчетным приводит к появлению aberrаций.

Таблица 5.1 – Допустимые отклонения показателя преломления Δn_e и коэффициента дисперсии $\Delta(n_{F'} - n_{C'})$ оптического стекла от номинальных значений

Категории	$\pm \Delta n_e \cdot 10^4$	$\Delta(n_{F'} - n_{C'}), \%$
1	2	0,2
2	3	0,3
3	5	0,5
4	10	0,8
5	20	1,6

По характеризуемой наибольшей разницей Δn_e однородности показателя преломления в партии заготовок установлено четыре класса, представленные в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Максимальные значения наибольшей разницы Δn_e показателя преломления стекла в партии заготовок

Класс	$\Delta n_e \cdot 10^4$
А	0,2
Б	0,5
В	1,0
Г	в пределах категории, указанной при заказе

Оптическая однородность или однородность показателя преломления по объему материала характеризуется максимальной разницей значений показателя преломления для различных зон детали. Нарушение однородности обуславливают химические и физические

ские неоднородности. Химические неоднородности (свилы), возникают в процессе производства стекла и обусловлены непостоянством химического состава. Они представляют собой прозрачные стеклообразные включения в виде нитей, полос или узловатых образований с отходящими от них нитями. Причиной физических неоднородностей является наличие в стекле остаточных напряжений, приводящих к появлению двулучепреломления, и структурных неоднородностей. Заготовки, предназначенные для изготовления оптических деталей высокоточных объективов для коллиматоров, микролитографии и измерительных приборов, у которых остаточные волновые aberrации системы имеют значения, соизмеримые с искажениями, вызываемыми неоднородностью стекла, проверяют интерференционными методами по искажению волнового фронта при прохождении светового пучка через заготовку. Максимальные значения показателей преломления Δn_e в объеме заготовки для различных категорий однородности по показателю преломления представлены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Категории однородности стекла по показателю преломления

Категория однородности по показателю преломления	Разность показателей преломления Δn_e в объеме заготовки, не более
01	10^{-6}
1	$2 \cdot 10^{-6}$
2	$5 \cdot 10^{-6}$
3	10^{-5}
4	$2 \cdot 10^{-5}$
5	$5 \cdot 10^{-5}$

Распространение излучения в оптическом стекле сопровождается его ослаблением. Потери излучения в стекле нормируются интегральным показателем ослабления ε_A . Установлены восемь кате-

горий, характеризующихся указанными в таблице 5.4 предельными значениями ε_A .

Таблице 5.4 – Категории оптического стекла по показателю ослабления

Категория по показателю ослабления	Показатель ослабления ε_A , (м ⁻¹)
1	0,02 – 0,04
2	0,05 – 0,09
3	0,10 – 0,17
4	0,18 – 0,25
5	0,26 – 0,35
6	0,36 – 0,45
7	0,46 – 0,65
8	0,66 – 1,30

По двулучепреломлению установлены пять категорий, характеризующихся разностью хода лучей при длине волны $\lambda = 550$ нм, указанных в таблице 5.5.

Таблица 5.5 – Категории стекла по двулучепреломлению

Категория по двулучепреломлению	Двулучепреломление по краю, не более (нм/см)
1	2
2	6
3	10
4	15
5	50

На бессвильность оптическое стекло контролируется теньвым методом, позволяющим визуально обнаружить свили на экране при просмотре в заданном направлении и оценить их методом сравне-

ния с аттестованными контрольными образцами 1 и 2 категорий бессвильности. В зависимости от направлений просмотра стекла установлены два класса: А – контроль в двух взаимно-перпендикулярных направлениях; В – контроль в одном заданном направлении. Блочное стекло контролируется в направлении перпендикулярном к нижней и верхней поверхностям блока. Заготовки, прессовки контролируются в рабочем направлении. Пузырность классифицируется группой, устанавливающей допустимую суммарную площадь сечений пузырей, а также приравняваемых к ним включением и узловым свилям с размером более 0,05 мм в 100 см³ стекла. Пузыри с размерами менее 0,05 мм во внимание не принимаются.

5.5 Изображение на чертежах оптических деталей и сборочных единиц

Оптические детали и сборочные единицы, изображают на чертеже по ходу луча, идущего слева направо, а на схеме – по ходу луча. На чертежах и схемах применяют буквенные обозначения:

Δn_e – категория и класс по показателю преломления;

$\Delta(n_{F'} - n_{C'})$ – категория и класс по средней дисперсии;

ε – предел разрешения, ...¹;

O_3 – световая зона (часть детали, через которую проходит световой поток или часть поверхности, на которую падает световой поток);

O_ϕ – световой диаметр (световая зона на поверхности круглой формы);

L – длина хода луча в призме (геометрическая);

N – предельное отклонение стрелки кривизны поверхности детали от стрелки кривизны поверхности пробного стекла или допускаемая сферичность плоской поверхности, интерференционное кольцо (полоса);

- ΔN – поле допуска формы поверхности, интерференционное кольцо (полоса);
- ΔN^z – зональная составляющая поля допуска формы;
- ΔN^a – астигматическая составляющая поля допуска формы;
- RMS – среднеквадратическое отклонение;
- f_{\min} – наименьшее допускаемое фокусное расстояние пластинок или призм, как результат сферичности их поверхностей;
- θ – предельная клиновидность пластины, ...^I (...^{II}) разнотолщинность, мм;
- π – предельная пирамидальность (угол между ребром призмы и противоположащей гранью), ...^I (...^{II});
- δ – предельная разность равных по номинальному значению углов призмы (с цифровым индексом угла призмы, например, для прямоугольной призмы – δ_{45° , ...^I (...^{II});
- P – класс чистоты полированной поверхности;
- ΔR – класс точности пробного стекла или предельное отклонение от значения расчетного радиуса поверхности, %.

В правой верхней части чертежа помещают таблицу параметров, состоящую из трех частей: требования к материалу; требования к изготовлению; расчетные данные. На чертежах оптических сборочных единиц указанная таблица состоит из двух частей: требования к изготовлению; расчетные данные. Части таблицы отделяют друг от друга, сплошной основной линией. Если какое-либо из требований таблицы не нормируется, то в соответствующей графе ставят прочерк или графу не вводят.

При оформлении рабочих чертежей деталей в первой части таблицы параметров указывают требования к материалу. Для указания показателей качества, их категорий и классов на чертежах применяют следующие сокращения:

Категория по оптической однородности – однородн.

Категория по двулучепреломлению – двулучепр.

Категория и класс бессвильности – бессвильн.

Категория и класс пузырности – пузырн.

Категория по свилеподобным дефектам – свилебодоб. дефекты.

Категория по включениям – включен.

Во второй части таблицы указывают требования к изготовлению детали: N ; ΔN ; P ; θ ; π ; δ ; ε ; f_{\min} ; ΔR .

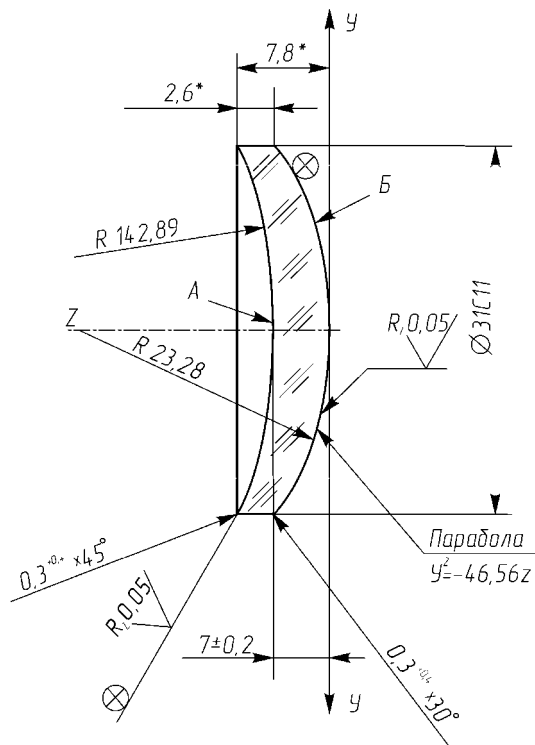
N и ΔN относят к наименьшему размеру световой зоны, а для детали, работающей отдельными участками – к наименьшему размеру этого участка, указываемому в технических требованиях. Допускается указывать составляющие допуска формы (например, астигматическую ΔN^a , зональную ΔN^z и т.п.), а также среднеквадратическое отклонение RMS. При неодинаковых значениях N , ΔN или P для разных поверхностей одной детали или разных зон одной и той же поверхности их указывают с буквенными обозначениями, соответствующими обозначениям поверхностей или зон на изображении, каждое в отдельной строке.

В третьей части таблицы указывают расчетные данные: для линз – f' ; S_F ; S'_F , для призм – l , а также размеры световой зоны, если они не указаны на изображении. Одну из величин f' ; S_F ; S'_F указывают при необходимости с предельными отклонениями.

На рабочих чертежах деталей радиусы сферических поверхностей деталей выбирают по ГОСТ 1807–75. Асферические поверхности линз и зеркал определяют координатами точек поверхности или уравнением использованной для ее построения кривой, как показано на рисунке 5.3. Толщину по краю линз и неплоских зеркал, а также габаритную толщину менисков указывают в качестве справочных размеров, как показано на рисунках 5.3 и 5.4.

На чертежах призм, некруглых защитных стекол и зеркал, в случае если для световых зон поверхностей предъявляются более высокие требования в отношении класса (группы) дефектов, чем для краевой зоны, кроме определяющих их геометрическую форму

линейных и угловых размеров указывают номинальные размеры световых зон (рисунок 5.5). Световые зоны ограничивают тонкой штрихпунктирной линией с указанием на полке линии-выноски обозначения « O_3 ».

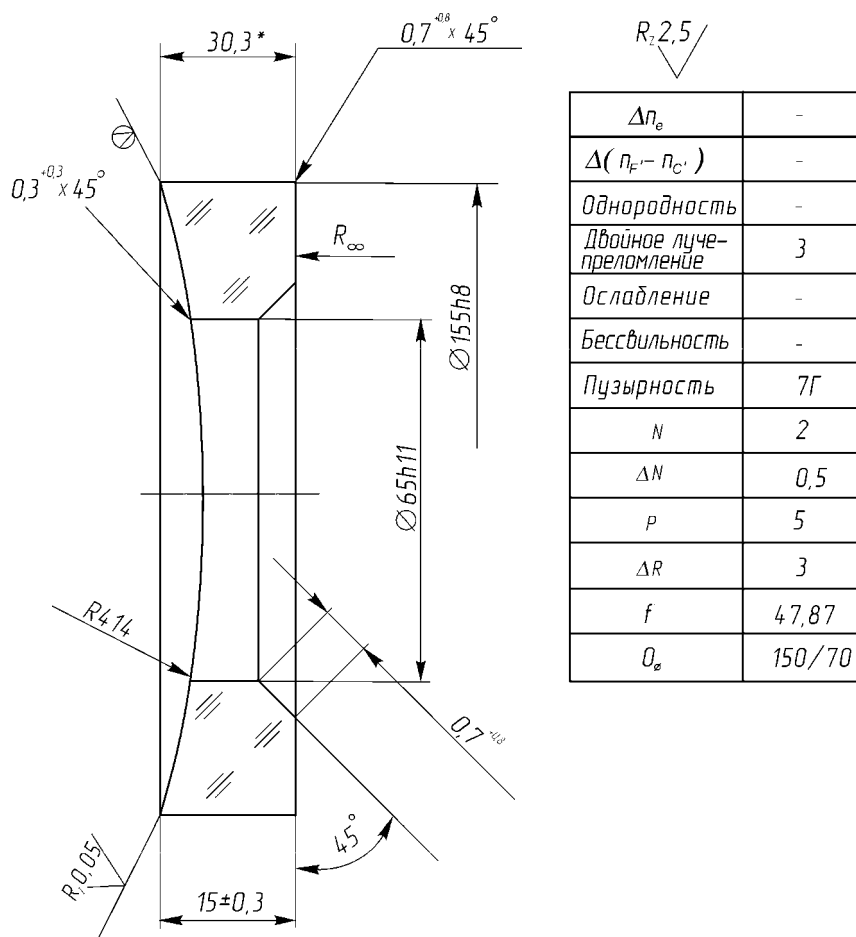


1. $\Delta 2p = \pm 0,05\%$
2. Диаметр окружности рассеяния не более 0,2 мм.
3. \otimes - просветл. 44P,43P по ТУ ..., $\lambda = 560 \pm 50$ нм.
4. Покрытие матовых поверхностей Эм ХС-77 по ТУ.
5. *Размер для справок.

$R, 2,5$

Δn_e	3В
$\Delta(n_F - n_C)$	3В
Однородность	3
Двойное лучепреломление	3
Ослабление	2
Бесвиальность	3В
Пузырность	2Б
N_{AB}	5
ΔN_{AB}	0,5
c	0,05
P_A	IV
P_B	V
ΔR_{AB}	3
f'	47,87
S_F	-42,65
$S_{F'}$	48,7 - 0,81
$D_{\varnothing 1}$	26,1
$D_{\varnothing 5}$	28,1

Рисунок 5.3 – Чертеж параболической линзы



1. N и ΔN для участка $\varnothing 50$ мм.
2. Разность толщин по краю до 0,1 мм.
3. \textcircled{V} – зеркальность 1И.21Е по ТУ...
4. Вне светового диаметра допускаются кант без зеркального покрытия и точки от контактов.
5. Покрытие матовых поверхностей Эм ХС-77 по ТУ.....
6. *Размеры для справок.

Рисунок 5.4 – Чертеж сферического зеркала

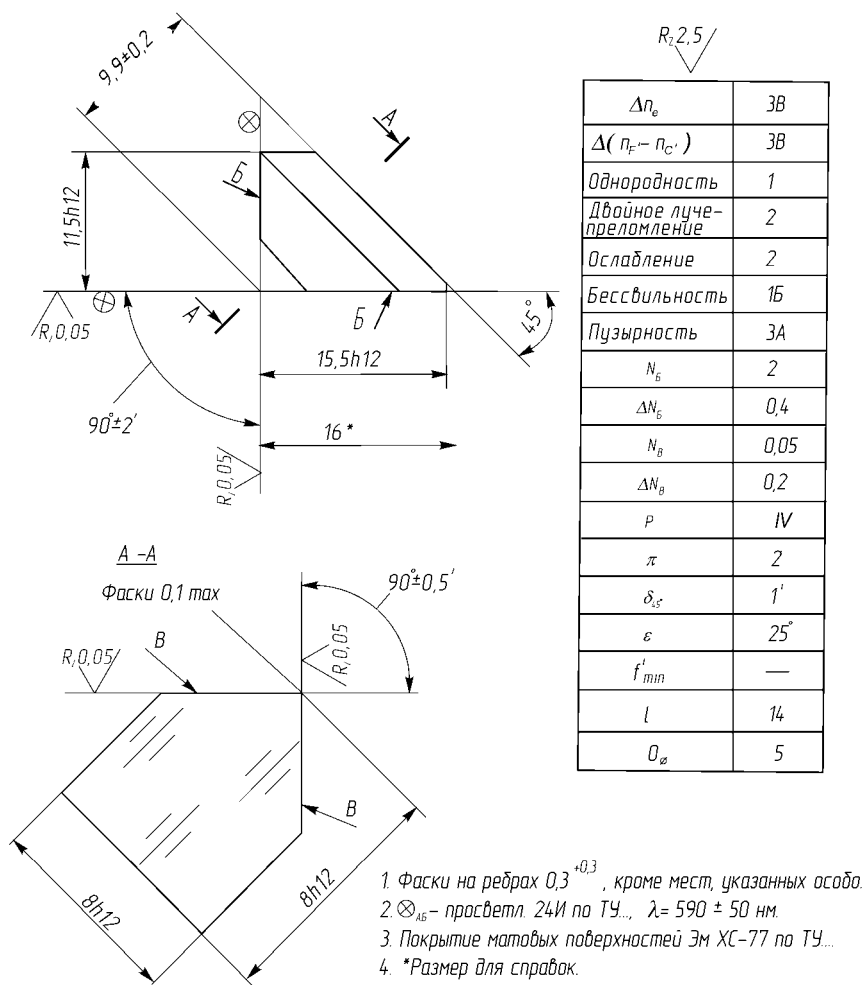


Рисунок 5.5 – Чертеж призмы

Для деталей из бесцветного оптического стекла в первой части таблицы помещают следующие требования к материалу: категорию и класс по показателю преломления и средней дисперсии; категорию по оптической однородности; категорию по двойному лучепреломлению; категорию по радиационно-оптической устойчиво-

сти (стекла серии 100); категорию по показателю ослабления; категорию и класс бессвильности; категорию и класс пузырности. Для деталей из цветного оптического стекла в таблице указывают категории по спектральной характеристике, двойному лучепреломлению, бессвильности и пузырности. Для деталей из других оптических материалов (кварцевое стекло, естественные и искусственные кристаллы и др.) первую часть таблицы заполняют в соответствии с действующими техническими условиями на эти материалы.

Требования к изготовлению деталей помещают во второй части таблицы, в которой указывают N и ΔN . Предельные отклонения N и ΔN относят: для круглых деталей – к их диаметру; для некруглых деталей – к наименьшему размеру; для деталей больших размеров, проверка которых проводится по участкам – к диаметру проверяемого участка, который указывают в примечаниях.

Далее в таблице приводятся следующие допуски: c ; P ; θ ; π ; δ и, при необходимости, ε ; f_{\min} ; ΔR . При назначении неодинаковых допусков N , ΔN или P для разных поверхностей одной детали или разных зон одной и той же поверхности, а также при назначении неодинакового допуска c обозначения этих допусков указывают с буквенными индексами, каждое в отдельной строке, как показано на рисунках 5.3 – 5.5. Эти же индексы проставляют у соответствующих поверхностей или у их зон на изображении. Для деталей, не подлежащих контролю пробными стеклами, отклонения N и ΔN не указываются.

На чертежах деталей в третьей части таблицы указывают световой диаметр (O_ϕ), а для сферических деталей, кроме того, значения величин f' ; S_F ; S'_F . Одну из величин указывают с предельными отклонениями.

На чертежах призм в третьей части таблицы указывают геометрическую длину хода луча в призме (l), световой диаметр (O_ϕ) по наибольшему сечению пучка и, при необходимости, предел разре-

шения.

На чертежах деталей, подлежащих просветлению, серебрению, алюминированию и другим покрытиям, в технических требованиях указывают условное обозначение покрытия и его условный графический знак. Тот же знак указывают на изображении у поверхности, подлежащей покрытию (рисунки 5.3 – 5.5), или на выносной линии к ней. Кроме условного обозначения покрытий в технических требованиях указывают следующие характеристики.

Для светоделительных покрытий – одну из следующих характеристик с соответствующим допуском:

– отношение коэффициента отражения ρ к коэффициенту пропускания τ ;

– коэффициент отражения ρ ;

– коэффициент пропускания τ .

Для просветляющих, светоделительных и отражающих покрытий: среднюю рабочую длину волны света (с допуском), для которой рассчитано покрытие, если она отличается от средней длины волны для белого света (0,55 мкм), или участка спектра, для которого покрытие предназначено.

Для покрытий - фильтров:

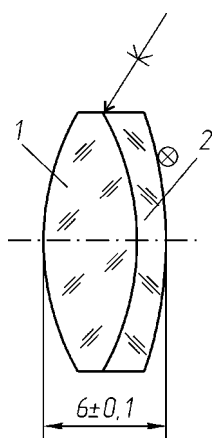
– для нейтральных (серых) – оптическую плотность (с допуском);

– для интерференционных (узкополосных) – длину волны λ_{\max} , отвечающую середине полосы пропускания, коэффициент пропускания τ_{\max} для этой длины волны, полуширину полосы пропускания δ_v , определяемую как разность длин волн, соответствующих $\tau_{\max}/2$, и минимальное пропускание τ_{\min} по обе стороны от полосы пропускания.

В технических требованиях при окраске нерабочих матовых поверхностей деталей указания помещают в соответствии с требованиями ГОСТ 2.310–68 (рисунки 5.3 – 5.5).

На чертежах оптических сборочных единиц указывают размеры, которые должны быть выполнены в процессе сборки. В технических требованиях или в спецификации на чертеже узла указывают наименование, марку клеящего вещества и номер нормативного документа (рисунок 5.6), а в необходимых случаях и толщину склеивающего слоя. В первой части таблицы указывают N , ΔN , c (для линз), P ; f_{\min} и ε указывают при необходимости. Значения f' , S_F , S'_F , и другие требования указывают во второй части таблицы.

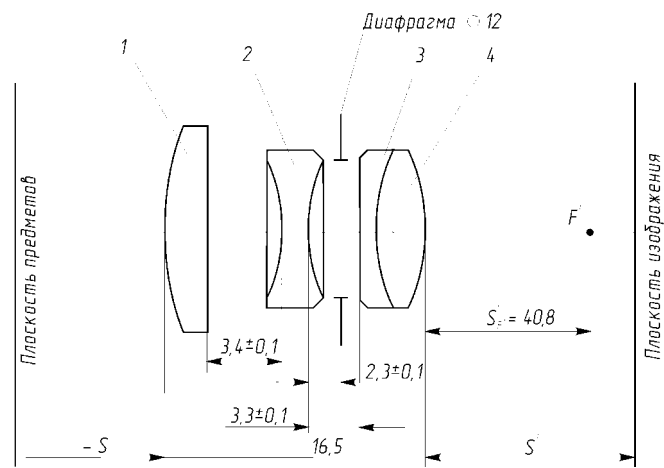
На оптических схемах детали и узлы, располагают по ходу светового луча, идущего от плоскости предметов слева направо (рисунок 5.7).



N	2
ΔN	0,5
c	0,02
P_1	4
P_2	5
f'	69,72
S_F	-65,52
S'_F	66,91 ± 0,7
O_{\varnothing}	16

1. \otimes – Просветл. 44P43P. По ТУ... $\lambda = 520 \pm 50$ нм.
2. Покрытие матовых поверхностей ЭМХС-77 по ТУ ...

Рисунок 5.6 – Чертеж склеенной линзы



$-S, м$	$S', м$
∞	40,8
20	40,9
10	41,02
7	41,13
5	41,27
2	42,05

Фокусное расстояние 51,3
 Относительное отверстие 1,3,5
 Предел разрешения 20
 Размер кадра 20X24

Расчет оптики № от

№ поз.	$\theta_{\cdot 1}$	Стрелка по $\theta_{\cdot 1}$	$\theta_{\cdot 2}$	Стрелка по $\theta_{\cdot 2}$	Толщина по оси
1	15,5	1,56	12	—	3,5
2	12,2	1,02	12	1,51	1
3	12	—	12	1,26	1,2
4	12	1,26	12	1,17	4

Перечень деталей

Формат	Зона	Поз.	Обозначения	Наименование	Кол.	Примечание
—	—	1		Линза	1	
—	—	2		Линза	1	
—	—	3		Линза	1	
—	—	4		Линза	1	

Рисунок 5.7 – Оптическая схема фотообъектива

Для сложных приборов оптическую схему основной его части и оптические схемы узлов, имеющих самостоятельное назначение, оформляют отдельными чертежами. На основной схеме такие узлы допускается обводить штрихпунктирной линией. Все детали, поворачивающиеся или перемещающиеся вдоль или перпендикулярно оптической оси системы, показывают в основном рабочем положении.

На чертеже оптической схемы указывают:

– основные оптические характеристики системы (при необходимости с допусками), например:

для телескопических систем – увеличение, угловое поле, диаметр выходного зрачка, удаление выходного зрачка от последней поверхности, предел разрешения, коэффициент светопропускания (при необходимости);

для фотографических объективов – фокусное расстояние, относительное отверстие, угловое поле или линейное поле, предел разрешения (при необходимости);

для фотоэлектрических систем – размеры или типы фотокатодов, размеры светового пятна на фотокатодах (при необходимости);

– значения фокусных расстояний f' и фокальных отрезков S_F и S'_F , отдельных узлов оптической системы, как, например, объективов, оборачивающих систем и окуляров; эти данные помещают на поле чертежа в виде таблицы.

– различные дополнительные сведения, например: расстояния от последней поверхности фотографического объектива до плоскости изображения в зависимости от расстояния до предмета (рисунок 5.7); линейное перемещение окуляра и т. д.

На оптической схеме проставляют:

– размеры световых диаметров оптических деталей и соответствующих им стрелок, а также толщину детали по оси (для призм – длину развертки). Эти данные помещают на поле чертежа в виде

таблицы, представленной на рисунке 5.7.

– диаметры диафрагмы и размеры зрачков, размеры тела накала или иных светящихся элементов источников освещения (при необходимости с допусками);

– воздушные промежутки и другие размеры по оси;

– размеры, определяющие пределы перемещения или предельные углы поворота оптических деталей;

– размеры, определяющие положение оптической системы относительно механической части прибора, например размер, определяющий положение объектива микроскопа относительно нижнего среза тубуса;

– габаритные или сборочные размеры, например длина базы, высота выноса (при необходимости).

Изображение фасок на чертежах оптических деталей представлено на рисунке 5.8, а. Защитные (предохранительные) фаски допускается графически не изображать. Размеры фасок указывают на полках линий-выносок (рисунок 5.8, б), или в технических требованиях надписью $t \times \alpha$, где t – ширина фаски, α – угол наклона.

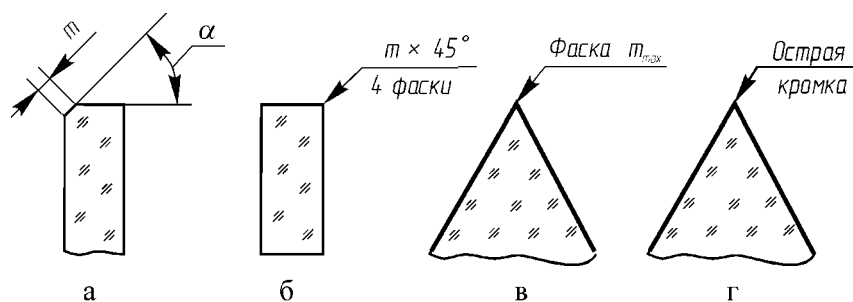


Рисунок 5.8 – Изображение фасок на чертежах оптических деталей

Если угол наклона фаски для предохранения от выкалывания не нормируется, то на изображении детали или в технических требованиях приводят только ширину фаски. Обозначение максимально допустимой ширины фаски представлено на рисунке 5.8, в. В слу-

чае недопустимости применения защитной фаски на чертеже наносится надпись “Острая кромка” (рисунок 5.8, г).

На чертеже оптической детали и сборочной единицы с плоскими и сферическими поверхностями смещение центра кривизны нормируемой поверхности от определяемой базовыми поверхностями оси (децентрировку) задают одним из допусков: позиционным, формы заданной поверхности, перпендикулярности (рисунок 5.9). Обозначение допуска формы заданной поверхности, т.е. наибольшего допустимого отклонения точек реальной поверхности от номинальной относительно заданных базовых поверхностей, используют для определения разности толщины линзы по краю.

При необходимости указать разность толщины линзы на заданном диаметре, диаметр указывают рядом с допуском и отделяют от него наклонной линией. Обозначением допуска перпендикулярности, т.е. наибольшего допустимого отклонением угла между плоскостью и базовой осью от прямого угла, выраженного в угловых единицах, задается децентрировка плоской поверхности.

В технически обоснованных случаях вместо допуска центрирования первой поверхности наклеиваемой детали (C_B , C_D на рисунке 5.9, г) в технических требованиях чертежа расположение этой поверхности задают относительно поверхности, на которую ее наклеивают (поверхности Б, Г на рисунке 5.9, г). Например: “Проекция расстояния между центрами кривизны поверхностей Б и В на плоскость, перпендикулярную оси, определяемой поверхностями А и Е, не более ... мм”.

Оптические поверхности на сборочных чертежах допускается штриховать тонкими линиями. Штриховка сферических и асферических поверхностей представлена на рисунке 5.10, а, а плоских поверхностей – на рисунке 5.10, б, в. На чертеже сборочной единицы при необходимости повторяют маркировку, указываемую на чертежах соответствующих деталей.

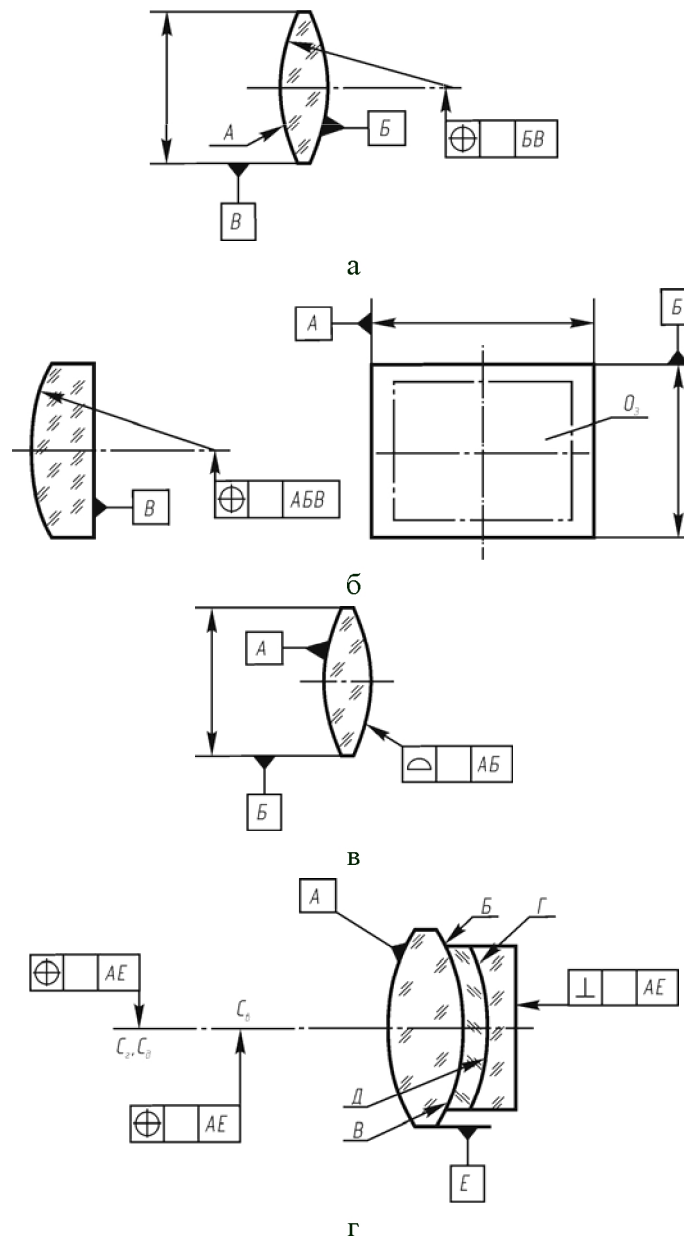


Рисунок 5.9 – Задание предельного значения децентрировки допусками: позиционным (а, б), формы заданной поверхности (в), перпендикулярности (г).

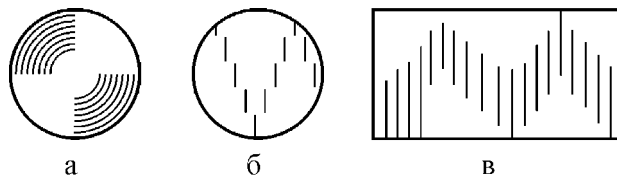


Рисунок 5.10 – Штриховка сферических и асферических (а), а также плоских поверхностей (б, в)

На рабочих чертежах деталей размеры, определяющие световую зону, округляют до десятых долей миллиметра. На изображении оптической детали световую зону (световой диаметр) ограничивают тонкой штрихпунктирной линией с указанием условного знака O_3 (O_ϕ) на полке линии-выноски, проведенной от световой зоны (светового диаметра). Если требования к части световой зоны отличаются от требований к остальной световой зоне, то ее ограничивают тонкой штрихпунктирной линией и обозначают буквой. В этом случае требования к части световой зоны указывают в таблице параметров или в технических требованиях чертежа.

Область изображения, т. е. часть световой зоны, в которой находится действительное изображение предметов, ограничивают тонкой штрихпунктирной линией и заштриховывают (рисунок 5.11, а). На чертеже указывают поверхность, содержащую штрихи, деления, знаки и т.п., а также видимое увеличение, с которым данную поверхность рассматривают при контроле (рисунок 5.11, б).

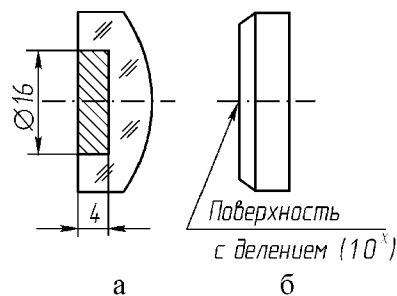


Рисунок 5.11 – Область изображения (а) и поверхность, содержащая штрихи, деления, знаки (б)

На изображении поверхности детали, подлежащей оптическому покрытию, или на полке линии-выноски к ней проставляют условный графический знак покрытия. В технических требованиях указывают условный графический знак с буквенными обозначениями поверхности, условное обозначение покрытия и соответствующие характеристики согласно действующим стандартам, а также наименования источников и приемников излучения, применяемых при измерениях.

Если на одну поверхность наносится несколько различных покрытий, то условное обозначение покрытия должно состоять из условных обозначений всех наносимых на поверхность покрытий в последовательности их нанесения. Если покрытие необходимо нанести только на часть поверхности детали, то зону покрытия обводят штрихпунктирной утолщенной линией с указанием ее размеров. На чертеже оптической сборочной единицы условный знак покрытия обозначают на полке линии-выноски (рисунок 5.12), при необходимости указывают знаки покрытий для справок.



Рисунок 5.12 – Знаки покрытий на чертеже оптической сборочной единицы

Асферическую поверхность определяют уравнением и приводят его в технических требованиях чертежа. На поле чертежа помещают таблицу, в которой указываются необходимые параметры

или требования, определяемые в контрольной схеме. Перед размерным числом радиуса асферической поверхности (цилиндр, тор) указывают ее наименование, например, “Цилиндр R100”. Допускается указывать фокусы без соблюдения масштаба перекрестиями на оптической оси и буквами F или F' . Если коэффициент пропускания детали из цветного стекла обеспечивается изменением ее толщины, то на изображении детали указывают толщину с предельными отклонениями и знаком “*”, а в технических требованиях указывают коэффициент пропускания.

На оптической схеме должны быть изображены: оптические элементы изделия; источники излучения (упрощенно или условными графическими обозначениями); приемники лучистой энергии, например, фотоэлементы, фотоумножители (условными графическими обозначениями). Элементы, поворачивающиеся или перемещающиеся вдоль или перпендикулярно оси, показывают в основном рабочем положении. Кроме основного рабочего положения могут быть показаны и другие положения элементов, например, крайние. При необходимости, например, при изображении поворачивающихся элементов, оси обозначают прописными буквами русского алфавита.

Также на оптической схеме указывают: положение диафрагм, зрачков (при необходимости), фокальных плоскостей, плоскостей изображения и предмета (при необходимости, например, для фотографических объективов и объективов микроскопов), положение экранов, светорассеивающих полостей и поверхностей (при необходимости).

Элементам схемы номера позиций присваивают по ходу луча. При разветвлении схемы в несколько направлений номера позиций указывают по одному из направлений до конца, затем последующие номера позиций по другому направлению и т. д. Если в схему изделия входит элемент, имеющий самостоятельную принципиальную схему (расчет оптических величин), то его изображают упро-

щенно, обводят тонкой штрихпунктирной линией и указывают размеры, определяющие его положение.

Повторяющимся элементам присваивают один и тот же номер позиции, после которого в скобках ставят порядковый номер. Источникам излучения и приемникам лучистой энергии допускается присваивать номера позиций. Данные об элементах должны быть указаны в таблице. В графе “Обозначение” указывают обозначение основного конструкторского документа. Для элементов, имеющих самостоятельную принципиальную схему (расчет оптических величин), при необходимости, указывают ее (его) обозначение в графе “Примечание”. Если изделие имеет оптические сменные части, то на оптической схеме изображают одну из них, вынося ее позицию, а в графе “Примечание” таблицы элементов помечают, что они сменные, и указывают размеры, определяющие их положение в схеме.

На принципиальной оптической схеме помещают основные оптические характеристики изделия в виде записей на поле схемы или таблицы произвольной формы. Например, для телескопических систем: видимое увеличение; угловое поле оптической системы в пространстве предметов; диаметр выходного зрачка; удаление выходного зрачка от последней поверхности; предел разрешения; коэффициент пропускания (при необходимости). Указывают фокусные расстояния f' и расстояния S_f и S'_f отдельных сборочных единиц оптической системы, например, объективов, оборачивающих систем и окуляров. Эти данные помещают на поле схемы в таблице. Основные оптические характеристики изделия указывают с предельными отклонениями или их наибольшие и наименьшие значения. Допускается указывать световые диаметры и соответствующие им стрелки.

На оптической схеме указывают: диаметры диафрагм, размеры зрачков, размеры тела накала или других светящихся элементов источников излучения (при необходимости); воздушные проме-

жутки и другие размеры по оси, определяющие взаимное расположение оптических элементов, диафрагм, зрачков, фокальных плоскостей, плоскостей изображения и предмета (для систем, работающих на конечном расстоянии), источников излучения и приемников энергии; размеры, определяющие пределы рабочего перемещения или предельные углы поворота оптических деталей; размеры, определяющие положение оптической системы относительно механических частей прибора, например, размер, определяющий положение объектива микроскопа относительно нижнего среза тубуса (при необходимости); габаритные или установочные размеры, например, длину базы, высоту выноса (при необходимости).

Вопросы самоконтроля к главе 5

1. Перечислите основные группы погрешностей оптических систем.
2. Какие критерии применяются для оценки качества изображения, формируемого оптическими элементами?
3. Как влияют дефекты поверхности на выходной волновой фронт?
4. Каким образом задают допуски на различные aberrации оптической системы?
5. Как осуществляют расчет допусков на оптические поверхности?
6. Перечислите основные нормируемые показатели качества оптического стекла и кратко охарактеризуйте их.
7. Перечислите и кратко охарактеризуйте основные виды оптической неоднородности стекла, какими методами ее оценивают.
8. Назовите основные обозначения, которые применяют на чертежах оптических деталей и сборочных единиц.
9. Какие данные приводят в таблице параметров чертежа детали и сборочной единицы?
10. Какие характеристики указывают в технических требованиях?

11. Перечислите правила оформления технических требований или спецификации.
12. Какие параметры проставляют и указывают на чертежах оптических схем?
13. Приведите примеры обозначения фасок на чертежах оптических деталей.
14. Каким образом на чертежах задают децентровку?
15. Каким образом обозначают оптические поверхности и оптические покрытия на чертежах?
16. Укажите особенности изображения на чертеже асферической поверхности.
17. Какие основные позиции должен содержать чертеж оптической схемы?
18. Что должно быть изображено на оптической схеме? Какие размеры на них указывают?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

ГОСТ 11141-84. Детали оптические. Классы чистоты поверхностей. Методы контроля.

ГОСТ 2.412-81. Единая система конструкторской документации. Правила выполнения чертежей и схем оптических изделий.

Гуреев Д.М., Ямщиков С.В. Основы физики лазеров и лазерной обработки материалов: Учеб. пособие. – Самара: Изд-во “Самарский университет”, 2001. – 392 с.

Лазерная оптика. Каталог – справочник / Сост. П.Е. Дубовский, Т.А. Сетюков. – М.: НТИУЦ ЛАС, 2000. – 238 с.

Лазерная техника и технология. В 7-ми кн. Кн.1. Физические основы технологических лазеров: Учеб. пособие для вузов / В.С. Голубев, Ф.В. Лебедев; Под ред. А.Г. Григорьянца. – М.: Высш. шк., 1988. – 191 с.

Лазерная техника и технология. В 7-ми кн. Кн.2. Инженерные основы создания технологических лазеров: Учеб. пособие для вузов / В.С. Голубев, Ф.В. Лебедев; Под ред. А.Г. Григорьянца. – М.: Высш. шк., 1988. – 176 с.

Методы компьютерной оптики / Под ред. В.А. Сойфера. – М.: Физматлит, 2000. – 688 с.

Справочник конструктора оптико-механических приборов / В.А. Панов, М.Я. Кругер, В.В. Кулагин и др.; Под общ. ред. В.А. Панова. – 3-е изд., пераб. и доп. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1980.

Технологические лазеры: Справочник: В 2 т. / Г.А. Абиьсиитов, В.Г. Гонтарь, Л.А. Новицкий и др.; Под общ. ред. Г.А. Абиьсиитова. М.: Машиностроение, 1991.

Т. 1: Расчет, проектирование и эксплуатация. – 432 с.

Т. 2: Системы автоматизации. Оптические системы. Системы измерения. – 544 с.

Device for laser treatment of an object: Pat. USA 5,103,073. 7.04.92. Int. cl.⁵ B 23 K 26/00. // V.A. Danilov, V.V. Popov, A.M. Prokhorov, I.N. Sisakian, D.M. Sagatelian, V.A. Soifer, E.V. Sisakian, L.P. Naumidi, J.K. Danileiko, J.D. Terekhin, V.S. Akopian, V.P. Shorin, V.I. Mordasov, S.P. Murzin.

Optical phase element for focussing monochromatic radiation: Patent GB 2185126. 24.05.89. Int. cl.5 G 02 B 5/10. // A.M. Prokhorov, I.N. Sisakian, M.A. Golub, V.A. Soifer, S.V. Karpeev, A.V. Goncharsky.

Учебное издание

Шорин Владимир Павлович
Мурзин Сергей Петрович

ОПТИКА ЛАЗЕРОВ

Учебное пособие

Редакторская обработка О. Ю. Дьяченко
Технический редактор С. В. Лукачев
Компьютерная верстка В. И. Артюшина,
А. Е. Поликарпов,
С. А. Малов,
С. А. Сорокина

Подписано в печать 10.11.2006 г. Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 8,6. Усл. кр.-отт. 8,7. Печ. л. 9,25.
Тираж 50 **Оптика лазеров** экз. Заказ .

Самарский государственный
аэрокосмический университет.
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

Изд-во Самарского государственного
аэрокосмического университета.
443086 Самара, Московское шоссе, 34.