

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

**С.С. Вильчинская, В.М. Лисицын**

## **ОПТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ**

*Рекомендовано в качестве учебного пособия  
Редакционно-издательским советом  
Томского политехнического университета*

Издательство  
Томского политехнического университета  
2011

УДК 000000  
ББК 000000  
В00

**Вильчинская С.С.**

В00

Оптические материалы и технологии: учебное пособие / С.С. Вильчинская, В.М. Лисицын; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 107 с.

Учебное пособие посвящено актуальным проблемам современной оптической технологии. В первой главе, в краткой форме изложены основы взаимодействия оптического излучения с оптическими материалами. Во второй описано строение и оптические свойства вещества. В третьей главе рассматривается технология производства оптических элементов и материалов; основные типы и характеристики оптических и светотехнических материалов. Четвертая глава посвящена актуальной проблеме технологии производства светодиодов.

Предназначено для бакалавров и магистров направления 200400 «Оп-  
тотехника».

**УДК 000000**  
**ББК 000000**

*Рецензенты*

Доктор физико-математических наук, профессор  
заведующий лабораторией газовых лазеров ИСЭ СО РАН  
*В.Ф. Лосев*

© ГОУ ВПО НИ ТПУ, 2011  
© Вильчинская С.С., Лисицын В.М., 2011  
© Обложка. Издательство Томского  
политехнического университета, 2011

Введение .....	5
Глава 1. ПРОХОЖДЕНИЕ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЧЕРЕЗ МАТЕРИАЛЫ.....	6
1.1. Классификация оптических материалов.....	6
1.2. Распространение оптического излучения при прохождении через вещество.....	7
1.3. Оптические явления на границе двух сред.....	12
1.4. Поляризация света при отражении от диэлектриков. Закон Брюстера.....	15
1.5. Рассеяние света материалами.....	17
1.6. Люминесценция.....	19
Глава 2. СТРОЕНИЕ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВА	24
2.1. Характерные особенности оптического стекла. Теория строения стекла .....	24
2.2. Типы и марки оптических бесцветных стекол.....	28
2.3. Физико-химические характеристики и технологические свойства оптических стекол.....	31
Механические свойства	31
Определение остаточных напряжений в стекле	32
Термические и термооптические характеристики стекла	34
Химическая устойчивость стекла	36
2.4. Показатели качества оптических бесцветных стекол.....	37
2.5. Стекла оптические цветные, стекла с особыми свойствами, ситаллы, органические стекла.....	41
2.6. Оптические кристаллы и керамика.....	47
Глава 3. ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ.....	53
3.1. Технология производства оптических материалов. Производство оптического бесцветного стекла.....	53
3.2. Выращивание кристаллов.....	58
3.3. Технология изготовления заготовок оптических деталей.....	61
3.4. Расчет припуска на обработку заготовки.....	65
3.5. Основные понятия, определяющие достижение качества оптических деталей.....	66
3.6. Основы процессов обработки оптических поверхностей.....	72
3.7. Абразивные и полирующие материалы.....	76
3.8. Метод магнитно-абразивного полирования.....	78

Глава 4. МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА СВЕТОДИОДОВ.....	80
4.1. Особенности конструкции и параметров светодиодов.....	81
4.2. Получение белого света на основе светодиодов.....	86
4.3. Материалы светодиодов. Гетероструктуры.....	88
4.4. Технология производства светодиодов.....	93
Эпитаксиальный рост.....	94
Формирование светодиодных чипов.....	98
Монтаж светодиодных чипов в корпус.....	98
4.5. Материалы для корпусов светодиодов.....	100
4.6. Световые характеристики полупроводниковых приборов.....	101
Литература.....	107

## ВВЕДЕНИЕ

Основными факторами, определяющими развитие современной оплотехники, являются разработка новых материалов с заданными свойствами, совершенных высокопроизводительных технологий их производства и обработки, подготовка кадров высокой квалификации.

В современной оплотехнике используется огромное количество материалов, как простых, так и сложных, композиционных, комбинированных. Можно сказать, что прогресс оплотехники обязан развитию материаловедения. Появление новых материалов с новыми оптическими характеристиками позволяет создавать оптические и светотехнические изделия с новыми свойствами, новыми принципами. Возрастают требования к структурному совершенству материалов, их качеству, технологичности, развиваются и совершенствуются технологии производства материалов и изделий.

В учебном пособии сделана попытка обобщения современного опыта создания материалов различного назначения. Рассмотрены особенности получения, структура, ее дефекты и свойства основных оптических материалов. Невозможно в одном пособии рассказать о всех проблемах материаловедения широчайшего круга оптических материалов для разных назначений. Поэтому в пособии изложение проблем материаловедения опирается на описании физических принципов, которыми эти проблемы определяются.

Процесс изготовления прецизионных оптических приборов подчинён строгому графику, когда все производственные операции регламентированы и оптимизированы. Здесь нет места ошибкам, компромиссам и небрежному отношению к мелочам. Оптические материалы (стекло, кристаллы и др.), их технические и потребительские свойства определяют качество и добротность изготавливаемой оптической детали. Она должна быть прозрачной, не иметь включений, стойкой к внешним механическим и атмосферным воздействиям. Именно поэтому в оптическом производстве используют только качественные оптические материалы, соответствующие требованиям норм и стандартов, имеющие паспорта и аттестаты. В пособии подчеркивается необходимость тщательности выполнения работ в области оптического материаловедения и технологии.

Кратко рассмотрены вопросы изготовления оптических деталей, методов контроля качества оптических материалов, технологии шлифования и полирования.

В пособии рассмотрены материаловедческие проблемы, возникающие при производстве светодиодов, наиболее бурно развивающегося крупномасштабного производства в оптотехнике в настоящее время. Описываются такие технологические операции как эпитаксиальный рост гетеропереходов, формирование светодиодных чипов, монтаж светодиодов.

Содержание и порядок расположения материала учебного пособия соответствует новым программам высших учебных заведений для оптических специальностей. При написании учебного пособия учтено, что студенты прослушали некоторые разделы геометрической оптики, оптических измерений.

В конце каждой главы приводятся вопросы и задания для самоконтроля усвоения знаний. Имеется библиографический список учебной и научно-технической литературы.

# **Глава 1. ПРОХОЖДЕНИЕ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЧЕРЕЗ МАТЕРИАЛЫ**

## **1.1. Классификация оптических материалов**

К оптическим материалам относят материалы прозрачные для оптического излучения и имеющие высокую оптическую однородность. В ряде случаев оптическим материалам должны быть присущи особые свойства, например, избирательное пропускание оптического излучения, стойкость к радиационному облучению и др. Все эти вещества, за исключением некоторых видов природных кристаллов, получают искусственно различными технологическими методами из химически чистых элементов и соединений.

Оптические материалы подразделяются на следующие виды: бесцветное, цветное и кварцевое стекла, ситаллы, волоконно-оптические элементы, монокристаллы, поликристаллы, обычно называемые оптической керамикой.

Наибольшее распространение в качестве оптического материала получили оптические стекла, которым присущи многообразие оптических свойств, хорошие технологические и эксплуатационные качества. Оптическое стекло используют в производстве оптических деталей (очуляров, луп и пр.), приборов (микроскопов, фотокинопроекционной аппаратуры и пр.), оптико-технических устройств (рефлекторов, отражателей и пр.) и астрономических приборов. Из светотехнического стекла изготавливается всевозможная светотехническая аппаратура и осветительная арматура – преломители и светорассеиватели (оболочки ламп, панели, линзы, фары и пр.) сферические, параболические и гиперболические отражатели, светофильтры и световые сигналы. Радиационно-дозиметрические материалы используют в производстве дозиметров, сцинтилляторов, детекторов в специализированных приборах, предназначенных для радиационной техники. Активированные стекла, кристаллы используются в качестве активных сред для генерации стимулированного излучения. Люминофоры – преобразователи оптического излучения, обеспечивают генерацию почти половины всего искусственного света. Для визуального отображения информации в приборах различного назначения все шире используются электролюминесцентные панели, экраны.

Оптические ситаллы применяют в оптико-механической промышленности для изготовления астрономических зеркал, телескопов.

Диапазон спектральной прозрачности кристаллов превосходит область прозрачности стекол. Этим объясняется очень большой ассортимент различных кристаллов, которые производит современная оптическая промышленность.

Оптическая керамика применяется в изделиях подвергающихся механическим и тепловым ударам, в качестве подложек светофильтров в ИК-спектрофотометрах и окнах газовых лазеров. Приемники излучения с окнами из оптической керамики выдерживают охлаждение до температуры жидкого азота без растрескивания окон.

На поверхность оптических деталей наносят тонкие пленки металлов, окислов, диэлектриков. Толщина пленки незначительна – от одного до нескольких сотен мономолекулярных слоев, благодаря чему физические свойства пленок резко отличаются от свойств материала пленок в обычном агрегатном состоянии. Тонкие пленки прозрачны и так же, как воздух, оптические клеи и иммерсионные жидкости, являются оптическими средами – через них проходит оптическое излучение в оптической системе.

## **1.2. Распространение оптического излучения при прохождении через вещество**

Цвет неба, радуга, восход и заход солнца, эффект тени, смена дня и ночи, притягательная сила огня, богатая цветовая гамма растительного и животного мира, раскаленный металл, витражи, лупа, бинокль, очки... Можно долго перечислять примеры нашего повседневного соприкосновения с миром оптических явлений. Это и неудивительно, так как один из органов чувств, зрение основан на закономерностях взаимодействия света с веществом.

Оптические свойства твердых тел являются предметом пристального научного и технологического интереса на протяжении последних трех-четырех столетий. В 1621 г. Снеллиусом был открыт закон преломления. За исследованиями преломления и отражения последовал этап повышенного внимания к интерференции, дифракции и поляризации света, а затем пришло время для направленного изучения поглощения, люминесценции, рассеяния света и нелинейных оптических эффектов. Длительное соперничество между корпускулярной и волновой теорией увенчалось компромиссом, основанным на концепции дуализма, и открытием законов квантовой механики и квантовой термодинамики. Всем перечисленным явлениям посвящен ряд книг, учебников и статей [1–3]. В настоящей главе рассмотрим основные закономерности распространения оптического излучения в веществе.



## Оптическое излучение

Оптические свойства материалов являются результатом их взаимодействия с электромагнитным излучением. По принципам генерации электромагнитное излучение делится на следующие виды: гамма излучение, рентгеновское, синхротронное, радио и оптическое излучение. Оптическое излучение появляется в результате перехода электронов из возбужденных валентных состояний в основные валентные состояния.

Перечисленные виды излучений различаются энергией квантов излучения  $E = h\nu = hc/\lambda$  (длиной волны излучения –  $\lambda$ , частотой –  $\nu$ ). Поэтому часто виды излучений разделяют по спектральным областям. Излучение в спектральной области от 1 нм до 1 мм называется **оптическим излучением**. Весь диапазон оптического излучения делится на три области: **ультрафиолетовую (УФ)**, **видимую** и **инфракрасную (ИК)**. Ультрафиолетовый диапазон излучения в свою очередь делится на **УФ-А** (315–400 нм), **УФ-В** (280–315) и **УФ-С** (100–280 нм). Ультрафиолетовый диапазон излучения в области длин волн, меньших 180 нм часто называют вакуумным, так как воздух в этой области спектра непрозрачен. Излучение, способное вызвать зрительное ощущение называется видимым. **Видимое излучение** представляет собою узкую спектральную область (380–760 нм) оптического излучения, соответствующую области чувствительности глаза человека. Цветам спектра видимого излучения соответствуют следующие области:

- Фиолетовый – 400...455
- Синий – 455...485
- Синезеленый – 485...505
- Зеленый – 505...550
- Желтозеленый – 550...575
- Желтый – 575...585
- Оранжевый – 585...610
- Красный – 610...700

**Инфракрасное излучение** в спектре занимает область от 760 нм до 1 мм и делится на диапазоны **ИК-А** (760–1400 нм), **ИК-В** (1400–3000 нм) и **ИК-С** (3000– $10^6$  нм).

С потоком оптического излучения  $\Phi_e$ , распространяющимся в любой среде могут происходить следующие количественные изменения:

1. Рассеяние части потока в результате отражения от частиц, имеющих показатель преломления отличающийся от показателя преломления среды.

2. Поглощение части потока излучения средой с преобразованием в другие виды энергии (тепло, генерация носителей тока, эмиссия электронов и ионов).

3. Пропускание части потока через среду.

4. Поглощение части потока излучения средой с преобразованием в излучение другого спектрального состава (люминесценция).

5. Изменение спектрального состава излучения, что является следствием селективного поглощения энергии излучения средой.

Кроме того может иметь место изменение поляризации отраженного и пропущенного потоков, изменение направления распространения (рис. 1.1).

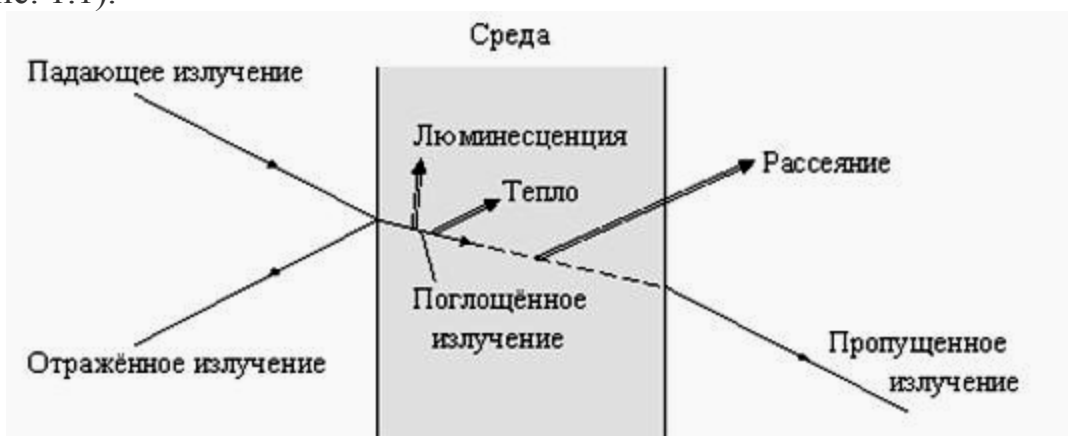


Рис. 1.1. Схема, иллюстрирующая оптические процессы, происходящие на поверхности среды и внутри неё

В отсутствии рассеяния излучения средой (оптически однородная среда) между падающим на среду потоком  $\Phi_0$ , отраженным от поверхности  $\Phi_{отр}$ , поглощенным в среде потоком  $\Phi_{погл}$  и прошедшем потоком  $\Phi_{пр}$  сохраняется баланс:

$$\Phi_0 = \Phi_{отр} + \Phi_{погл} + \Phi_{пр} \quad (1.1)$$

Уравнение баланса (1.1) можно записать следующим образом:

$$1 = \Phi_{отр}/\Phi_0 + \Phi_{погл}/\Phi_0 + \Phi_{пр}/\Phi_0 = \rho + \alpha + \tau, \quad (1.2)$$

где  $\rho$ ,  $\alpha$ ,  $\tau$ , характеризующие относительные доли отраженного, поглощенного и прошедшего потоков излучения, называются соответственно **коэффициентами отражения, поглощения и пропускания**.

Проходящий через поглощающую среду поток излучения уменьшается по величине по экспоненциальному закону:

$$\Phi_{пр} = (\Phi_0 - \Phi_{отр}) \exp(-\kappa l), \quad (1.3)$$

где  $\kappa$  – **показатель поглощения**, характеризующий величину поглощения средой толщиной  $l$  и имеющий размерность  $[м^{-1}]$ ,  $(\Phi_0 - \Phi_{отр})$  – доля

потока излучения, вошедшего в среду. Выражение (1.3) с учетом (1.2) можно записать в виде:

$$\tau = (1 - \rho) \exp(-\kappa l). \quad (1.4)$$

В том случае, когда на границе раздела двух сред не происходит отражения излучения (это имеет место при нормальном падении луча на оптически однородную среду), коэффициент отражения равен нулю. Для этого случая выражение (1.4) имеет вид:

$$\tau = \exp(-\kappa l). \quad (1.5)$$

Произведение  $(\kappa l)$  называется **оптической плотностью**  $D$  (величина безразмерная). Оптическая плотность прямо связана с коэффициентом пропускания соотношением:

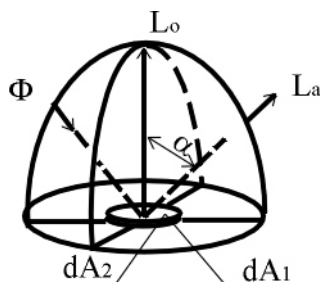
$$D = \kappa l = \ln(1/\tau). \quad (1.6)$$

Отражение, пропускание излучения при падении на поверхность зависит от типа среды (оптически однородная, неоднородная) материала, состояния ее поверхности. Поток излучения может отражаться зеркально, диффузно, направленно-диффузно. Проходящий через оптически неоднородную среду параллельный пучок света может рассеиваться. Прохождение излучения через среду в любом случае описывается экспоненциальной функцией вида:

$$\tau = \exp(-\mu l), \quad (1.7)$$

где  $\mu$  есть **показатель рассеяния**, имеющий размерность  $[m^{-1}]$ .

Под идеальным рассеивателем подразумевается поверхность, яркость которой одинакова во всех направлениях, независимо от направления излучения, падающего на эту поверхность (ламбертовский рассеиватель, рис. 1.2.).



$$L_\alpha = L_0 = const \quad I_\alpha = I_0 \cos \alpha$$

Рис. 1.2. Ламбертовский рассеиватель

В том случае, когда излучение проходит через оптически неоднородную и поглощающую среду, прохождение излучения описывается законом:

$$\tau = \exp(-(\mu + \kappa)l), \quad (1.8)$$

где  $(\mu + \kappa)$  есть **показатель ослабления**.

Отражение, поглощение, пропускание и ослабление проходящего через среду излучения как правило является различным в различных спектральных диапазонах измерений. Поэтому обычно указывается длина волны монохроматического излучения, при которой было проведено измерение. Соответственно коэффициенты отражения, поглощения, пропускания и показатели поглощения, ослабления, измеренные с использованием монохроматического излучения с длиной волны  $\lambda$ , называются **спектральными коэффициентами отражения  $\rho_\lambda$ , поглощения  $\alpha_\lambda$ , пропускания  $\tau_\lambda$  и показателями поглощения  $\kappa_\lambda$  [м<sup>-1</sup>], ослабления  $(\mu + \kappa)_\lambda$  [м<sup>-1</sup>]**.

Зависимости спектральных коэффициентов (показателей) от длины волны (энергии кванта или частоты) называются **спектрами отражения  $\rho(\lambda)$ , поглощения  $\alpha_\lambda$ ,  $\kappa(\lambda)$ ,  $D(\lambda)$ , пропускания  $\tau(\lambda)$ , ослабления  $(\mu + \kappa)(\lambda)$** .

Коэффициент пропускания  $\tau$  последовательно расположенных сред  $\tau_p$  равен произведению коэффициентов пропускания  $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$  каждой из них:

$$\tau_p = \tau_1 \tau_2 \dots \tau_n. \quad (1.9)$$

Оптическая плотность  $D$  последовательно расположенных сред  $D_p$  равна сумме оптических плотностей  $D_1, D_2, \dots, D_n$  каждой из них с толщинами  $l_1, l_2, \dots, l_n$ :

$$D_p = D_1 + D_2 + \dots + D_n = \kappa_1 l_1 + \kappa_2 l_2 + \dots + \kappa_n l_n. \quad (1.10)$$

Спектр пропускания  $\tau_p(\lambda)$  последовательно расположенных сред  $\tau_p(\lambda)$  равен произведению спектров пропускания  $\tau_1(\lambda), \tau_2(\lambda), \dots, \tau_n(\lambda)$  каждой из них:

$$\tau_p(\lambda) = \tau_1(\lambda) \tau_2(\lambda) \dots \tau_n(\lambda). \quad (1.11)$$

Спектр поглощения  $D_p(\lambda)$  последовательно расположенных сред  $D_p$  равен сумме спектров поглощения  $D_1(\lambda), D_2(\lambda), \dots, D_n(\lambda)$  каждой из них с толщинами  $l_1, l_2, \dots, l_n$ :

$$D_p(\lambda) = D_1(\lambda) + D_2(\lambda) + \dots + D_n(\lambda) = \kappa_1(\lambda) l_1 + \kappa_2(\lambda) l_2 + \dots + \kappa_n(\lambda) l_n. \quad (1.12)$$

Между коэффициентами отражения, поглощения, пропускания, являющимися интегральными по существу параметрами и спектральными коэффициентами (их спектрами) связь сложная. Например, коэффициент пропускания среды связан с его спектральными значениями выражением:

$$\tau_1 = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi_\lambda \cdot \tau_\lambda \cdot d_\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi_\lambda \cdot d_\lambda} \quad (1.13)$$

### 1.3. Оптические явления на границе двух сред

**Закон преломления.** В 1621 г. Снеллиусом был открыт закон преломления (рис. 1.3), по которому углы падения  $\alpha$  и преломления  $\beta$  связаны соотношением:

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta, \quad (1.1)$$

где  $n_1$  и  $n_2$  – показатели преломления двух сред.

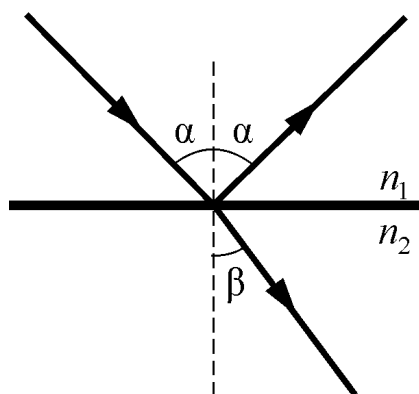


Рис. 1.3. Ход луча света на границе раздела двух сред

Главной оптической характеристикой оптического материала является показатель преломления  $n$ , измеренный для различных длин волн света. Значение показателя преломления с изменением длины волны непрерывно и плавно меняется. В фиолетовой части спектра показатель преломления больше, чем в красной. Это явление называется дисперсией света. Показатель преломления вещества растет с увеличением частоты колебаний световой волны. Поэтому если луч белого цвета, в котором «смешаны» световые волны с разной частотой колебаний, пропустить сквозь стеклянную призму, то световые лучи с большей частотой колебаний отклонятся от первоначального направления на больший угол, чем лучи с меньшей частотой колебаний. В результате белый луч разложится на цветные.

Ньютон первый доказал, что дневной свет состоит из цветных лучей. Пропустив солнечный свет через призму, он получил цветную полосу – спектр. До Ньютона белый свет считали самым простым, хотя спектр получали и раньше. Появление цветной полосы – спектра – объясняли воздействием вещества призмы на белый свет. Выделяя диафрагмой цветные лучи и направляя их на призму, Ньютон убедился, что они не разлагаются на составляющие. Такие лучи Ньютон назвал монохроматическими (в переводе с греческого – «одноцветные»). В монохроматическом излучении световая волна

колеблется с какой-то определенной частотой. И тогда Ньютон, чтобы окончательно доказать, что белый свет сложный, получил его смешением монохроматических лучей).

### **Коэффициент отражения**

Как следует из курса общей физики, электромагнитная волна, падая в однородный диэлектрик, вызывает в нём вынужденные колебания связанных электрических зарядов, которые становятся источником вторичных электромагнитных волн. Интерферируя с первичной волной, эти волны создают результирующую преломлённую волну, которая распространяется в среде с фазовой скоростью в  $n$  раз меньшей скорости света в вакууме ( $n$  – абсолютный показатель преломления среды). Вторичные волны от поверхностного слоя выходят и наружу образца. Складываясь, они образуют отражённую волну. Расчёт коэффициента отражения в зависимости от показателя преломления граничащих плоских диэлектриков был впервые выполнен Френелем и затем дополнен решением уравнений Максвелла для границы раздела двух сред, имеющих различные диэлектрические проницаемости.

Если электромагнитная волна падает перпендикулярно границе раздела двух сред, то коэффициент отражения  $\rho_\phi$  рассчитывается по формуле

$$\rho_\phi = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2}, \quad (1.9)$$

где  $n$  – относительный показатель преломления.

В целом коэффициент отражения зависит от угла падения, оставаясь минимальным при нормальном падении света.

Металлы отличаются от диэлектриков, как высокими значениями коэффициента отражения, так и поглощения. Это обусловлено большой концентрацией в них свободных электронов, которые легко раскачиваются падающим излучением. В результате появляется очень мощная отражённая волна, а сталкивающиеся с ионами кристаллической решётки свободные электроны трансформируют энергию падающего излучения в тепло.

### **Явление полного внутреннего отражения**

При переходе света из оптически более плотной среды в оптически менее плотную среду ( $n_1 > n_2$ ) по мере увеличения угла падения направление преломленного луча приближается к границе раздела. Когда угол падения превосходит некоторое предельное значение, преломленный луч не существует – падающий на границу раздела свет полностью отражается (рис. 1.4).

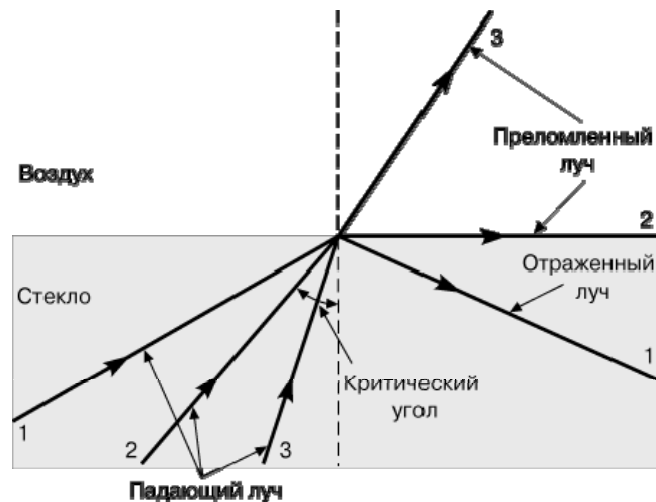


Рис. 1.4. Иллюстрация явления полного внутреннего отражения

На практике широко используют явление полного внутреннего отражения в оптических материалах. Особенностью полного внутреннего отражения является высокий коэффициент отражения, достигающий 99,99 %. Угол полного внутреннего отражения  $\beta$  определяется из соотношения:

$$\sin \beta = 1/n \quad (1.10)$$

На явлении полного внутреннего отражения основано действие линз Френеля, состоящих из большого числа кольцевых призм, расположенных на внутренней или внешней стороне линзы. Линзы Френеля позволяют собрать весь свет, падающий от источника, в параллельный пучок с небольшим углом рассеяния ( $3-7^\circ$ ), интенсивность которого в 600–1000 раз больше, чем при прохождении того же света через плоское стекло. Линзы Френеля применяют в источниках света (в том числе светодиодных), в качестве вторичной оптики.

В оптических приборах часто применяется стеклянная призма полного отражения, основание которой равнобедренный прямоугольный треугольник. Её применение основано на том, что предельный угол полного внутреннего отражения для стекла меньше  $45^\circ$ . Такая призма используется в системе обратной связи рубинового лазера.

Явление полного внутреннего отражения лежит в основе волоконной оптики, в которой изображение передается в результате многократного отражения от стенок волокна, при этом сохраняется до 99 % интенсивности падающего света. Волоконные световоды используют для передачи информации. При передаче информации проблема № 1 – трафик. Число пользователей сети Internet растет, объем информации тоже. И здесь оптика уже полностью и окончательно одержала верх над «классической» электроникой. И сейчас не только вся инфор-

мация передается по оптическому кабелю, но и системы сопровождения тоже стали оптическими: электроника не может обеспечить таких скоростей передачи и обработки информации. Пропускная способность оптических систем растет, и возможности роста колоссальны.

#### 1.4. Поляризация света при отражении от диэлектриков. Закон Брюстера

При отражении неполяризованного света от поверхности диэлектрика имеет место поляризация света, а коэффициент отражения сильно зависит от угла падения света. Количество света, зеркально отраженного от диэлектрика, определяется по формуле Френеля [5]:

$$\rho_{\phi} = 0,5 \cdot \left( \frac{\sin^2(\alpha - \beta)}{\sin^2(\alpha + \beta)} + \frac{\operatorname{tg}^2(\alpha - \beta)}{\operatorname{tg}^2(\alpha + \beta)} \right), \quad (1.11)$$

где  $\rho_{\phi}$  – коэффициент френелевского отражения;  $\alpha$  и  $\beta$  – углы падения и преломления света, соответственно.

Или:

$$\rho_{\phi} = 0,5 \cdot (\rho_{\perp} + \rho_{\parallel}) \quad (1.12)$$

$$\rho_{\perp} = \frac{\sin^2(\alpha - \beta)}{\sin^2(\alpha + \beta)} \quad \text{и} \quad \rho_{\parallel} = \frac{\operatorname{tg}^2(\alpha - \beta)}{\operatorname{tg}^2(\alpha + \beta)},$$

где  $\rho_{\parallel}$  и  $\rho_{\perp}$  – коэффициент отражения для плоскополяризованного света при направлении электрического вектора  $E$  параллельно или перпендикулярно плоскости падения луча.

Согласно выражению (1.12), при  $\alpha + \beta = 90^{\circ}$  т. е. параллельная составляющая света не отражается. При этом наблюдается максимальная поляризация естественного света при отражении.

Угол  $\alpha$ , при котором наблюдается максимальная поляризация отраженного света, называется  $\alpha_B$  углом Брюстера. При этом угол между преломленным и отраженным лучом составляет  $90^{\circ}$  (рис. 1.5), а угол Брюстера следующим образом связан с относительным показателем преломления  $n_{21}$ :

$$\operatorname{tg} \alpha_B = n_{21} \quad (1.13)$$

На рис. 1.5 изображен ход лучей при отражении и преломлении света на границе двух сред ( $n_1 > n_2$ ) при падении лучей под углом Брюстера. Из рис. 1.5 видно, что происходит поляризация света при отражении и преломлении. Согласно определению, степень поляризации отраженного света определяется как

$$P_{\text{omp}} = \frac{I_{\perp} - I_{\parallel}}{I_{\perp} + I_{\parallel}} = \frac{p_{\perp} - p_{\parallel}}{p_{\perp} + p_{\parallel}}, \quad (1.14)$$



где  $P_{отр}$ —степень поляризации отраженного света;  $I_{\perp}$  и  $I_{\parallel}$  —компоненты света (перпендикулярная и параллельная).

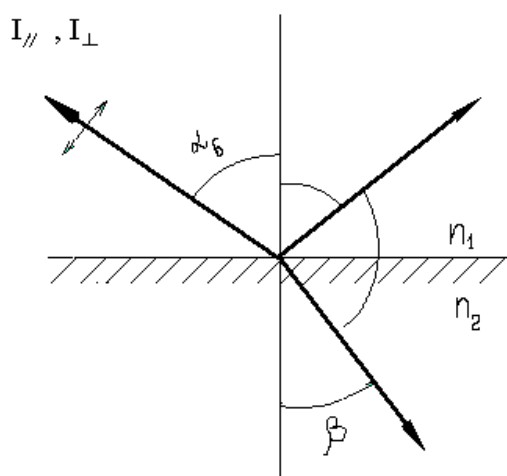


Рис. 1.5. Ход лучей при отражении и преломлении света на границе двух сред ( $n_2 > n_1$ )

Коэффициенты отражения света  $\rho_{\perp}$  и  $\rho_{\parallel}$  зависят от угла падения. Степень поляризации преломленного света определяется как:

$$P_{пр} = P_{отр} \cdot \frac{\rho_{\phi}}{1 - \rho_{\phi}}. \quad (1.14)$$

### 1.5. Рассеяние света материалами

Явления отражения и преломления света, подчиняющиеся законам Френеля, наблюдаются лишь для зеркальных поверхностей раздела сред и являются, строго говоря, идеальными. В большинстве случаев имеют место явления взаимодействия света с не зеркальными поверхностями материалов, имеющих микро и макронеровности, влияющие на характер этого взаимодействия.

Рассеяние, которое вызвано оптическими неоднородностями среды (посторонними частицами) или флуктуациями плотности вещества и показателя преломления называют молекулярным.

Рассеяние на неоднородностях среды происходит из-за отражения, преломления и дифракции на посторонних включениях. Если размер рассеивающих частиц критически мал по сравнению с длиной волны, то рассеяние практически отсутствует (например, излучение оптического диапазона не рассеивается отдельными атомами). С увеличением размера частиц (при переходе от атомов к молекулам) рассеяние сильно растёт и существенно зависит от длины волны. Согласно закону Рэлея при молекулярном рассеянии в газе интенсивность рассеянного света прямо

пропорциональна квадрату объёма частицы и обратно пропорциональна четвёртой степени длины волны. Однако, уже для частиц с радиусом примерно в 5 раз больше длины волны интенсивность рассеяния перестаёт зависеть от частоты излучения.

Характер отражённого света зависит от интенсивности рассеяния:

- если рассеяние отсутствует (однородный слой с гладкими поверхностями), то имеет место направленное отражение (зеркальное) и пропускание;
- если излучение полностью рассеивается (молочные стёкла), то говорят о диффузном отражении и пропускании;
- смешанное отражение и пропускание (направленно-рассеянное) обычно наблюдается на поверхностях, элементы которых различно ориентированы относительно общей плоскости (матовое стекло).

**Индикатрисы рассеяния.** Все многообразия вариантов отражения и пропускания света материалами состоят из промежуточных случаев, когда имеет место как направленное, так и рассеянное отражение и пропускание в различных соотношениях. При взаимодействии светового потока замутненными материалами часть падающего потока отражается от его поверхности, часть поглощается материалом, а оставшая часть рассеивается в толще материала и выходит из него в виде рассеянного света

Рассеивающая способность материала при пропускании света в соответствии с действующими стандартами [4] на светотехнические материалы определяется степенью рассеяния  $\gamma$ , которая определяется как:

$$\gamma = \frac{I_{40}}{I_0}, \quad (1.15)$$

где  $I_{40}$  и  $I_0$  –силы света от светового пятна на образце в проходящем свете под углами 40 и 0 к нормали поверхности образца.

Для оценки рассеивающей способности на отражение пользуются коэффициентом рассеяния  $\delta$ :

$$\delta = \frac{L_{20} + L_{70}}{2L_5}, \quad (1.16)$$

где  $L_5, L_{20}, L_{70}$  – яркости светового пятна на образце, соответственно под углами 5, 20, 70 к нормали при падении светового пучка перпендикулярно поверхности. Для идеально диффузно-отражающей поверхности  $\delta = 1$ , а для зеркальной поверхности  $\delta = 0$ .

Одним из основных светотехнических материалов, обладающих хорошими светотехническими характеристиками, физико-химической стабильностью и способностью сравнительно легко перерабатываться в

изделия, являются акрилаты. Главным представителем этого класса соединений является полиметилметакрилат.

Для осуществления обработки и изготовления светильников с различными светотехническими характеристиками необходимо наличие широкой номенклатуры органических стекол, различающихся по степени рассеивания, начиная с прозрачного и кончая диффузным.

В соответствии с ГОСТ 9784–61 выпускается шесть серий светотехнических органических стекол отличающихся характеристиками светорассеяния, индикатрисами рассеяния, т. е. зависимостью интенсивности света или яркости от угла наблюдения и предназначенных для производства рассеивателей светильников с люминесцентными лампами и лампами накаливания.

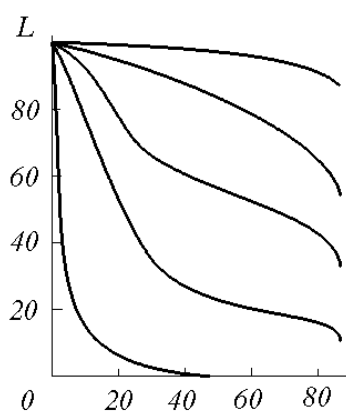


Рис. 1.6. Зависимости яркости светового пятна от угла наблюдения для органических стекол с различной степенью рассеивания

Индикатрисы рассеяния указанных в таблице групп представлены на рис. 1.6 [4].

Материалы VI группы используются в основном качестве отражающих покрытий. Для материалов VI группы степень рассеивания и коэффициент пропускания не нормируются. Измерения индикатрис рассеяния оптических материалов проводят на гониофотометре.

Таблица 1.1. Характеристики светорассеивающих органических стекол по ГОСТ 9784–61

Наименование характеристики	Группа светорассеивающего материала					
	I	II	III	IV	V	VI
Степень рассеивания ( $\gamma$ )	0,02–0,15	0,16–0,4	0,41–0,6	0,61–0,8	0,65–0,8	–
Коэффициент пропускания ( $\tau$ )	0,9–0,7	0,8–0,6	0,7–0,5	0,65–0,4	0,39–0,2	–
Коэффициент отражения ( $\rho$ )	–	–	–	–	–	0,8

## 1.6. Люминесценция

Люминесценцией называют спонтанное свечение тел длительностью, превышающей период световых колебаний и возбуждаемое за счет любого вида энергии, кроме тепловой.

Люминесцировать могут твердые, жидкие и газообразные тела. При разных способах возбуждения и в зависимости от того, в каком агрегатном состоянии находится тело, во время люминесценции могут происходить самые различные процессы. Однако во всех случаях их можно условно разбить на следующие три стадии:

- 1) поглощение возбуждающей энергии и переход тела в неравновесное состояние;
- 2) преобразование энергии возбуждения внутри тела;
- 3) испускание света и переход тела в равновесное состояние.

Первые две стадии всегда зависят от способа и режимов возбуждения. Последняя же стадия в большинстве твердых и жидких веществ определяется почти целиком внутренним строением центров люминесценции.

В зависимости от способа возбуждения люминесценцию подразделяют на следующие виды: фотолюминесценция, катодолюминесценция, электролюминесценция, хемилюминесценция. В данном учебном пособии рассмотрим более подробно электролюминесценцию.

Электролюминесценцией называется свечение, возникающее при возбуждении твердого тела электрическим током. Явление электролюминесценции (ЭЛ) твердых тел принято разделять на два класса: по эффекту Лосева и по эффекту Дестрио. В первом случае электролюминофор соприкасается с электродами, и таким образом носители заряда могут непосредственно проникать в кристалл. Такая люминесценция наблюдается преимущественно на постоянном токе. Впервые наблюдал ее в 1923 году О. В. Лосев на карбиде кремния (SiC). Второй вид ЭЛ – ЭЛ порошкообразных фосфоров на изолированных от контактов кристаллах ZnS–Cu наблюдал впервые в 1936 году Дестрио. При этом свечение, как правило, можно получить только при возбуждении люминофоров переменным электрическим током. ЭЛ в последние годы находит все большее применение: источники света – светоизлучающие диоды, усилители и преобразователи света, элементы памяти и, наконец, лазеры.

Общим преимуществом всех электролюминесцентных устройств является возможность непосредственного преобразования энергии в световую, малая потребляемая мощность и большой срок службы (до 100 тыс. часов).

Инжекционная ЭЛ, в отличие от предпробойной, не требует приложения к образцу больших разностей потенциалов. Обычно для получения вполне заметной инжекционной ЭЛ бывает достаточно нескольких вольт (против десятков вольт, необходимых для возбуждения предпробойной ЭЛ). Простейший случай инжекционной ЭЛ представляет собой свечение р–п-перехода, включенного в прямом направлении (рис. 1.7). В этом случае электроны из р–п-области движутся под действием приложенного напряжения навстречу друг другу. Электроны из n-области проникают в р-область и рекомбинируют там вблизи перехода. Аналогичное наблюдается и для дырок. Однако, обычно один из этих двух процессов преобладает, так что инжекция оказывается односторонней. Если при этом введенная примесь образует центры люминесценции, то рекомбинация на них неравновесных носителей заряда (то есть дырок в n-области и электронов р-области) будет сопровождаться излучением. Возможна также безызлучательная рекомбинация на центрах тушения. Кроме того, необходимо учитывать, что часть из инжектированных носителей заряда может вообще не рекомбинировать в кристалле, а уйти в электроды. Все это приводит к тому, что яркость инжекционной ЭЛ обычно бывает нелинейно связана с проходящим током.

Эффективность инжекционной ЭЛ, в принципе, может быть очень высокой (термодинамика не запрещает выход ЭЛ больше 100 %), так как здесь практически отсутствует бесполезное поглощение энергии, снижающее эффективность предпробойной ЭЛ. В тех случаях, когда удастся очистить кристалл от вредных примесей или устранить их влияние, эффективность инжекционной ЭЛ становится близкой к 100 %. Это один из наиболее перспективных способов возбуждения ЭЛ. Источник света, основанный на этом виде ЭЛ, получил название светодиода.

Если бы встреча каждой дырки и электрона, введенных в р–п-переход, заканчивалась рекомбинацией с излучением, то число таких рекомбинаций в секунду было бы равно просто току  $J$ , выраженному в числе электронов в секунду. Но так как часть рекомбинаций не сопровождается излучением и, кроме того, не все излучение покидает кристалл, а частично поглощается внутри его, то мощность излучения  $\Phi_e$  (Вт) связана с силой тока  $J$  (А) следующим образом:

$$\Phi_e = \beta \cdot \eta_{\text{кв}} \cdot h\nu \cdot J, \quad (1.17)$$

где  $\beta$  – отношение внешнего квантового выхода к внутреннему, т. е. отношение числа вышедших из кристалла квантов к числу квантов, генерированных в результате рекомбинаций;  $\eta_{\text{кв}}$  – внутренний квантовый выход – отношение числа актов излучательной рекомбинации к полному числу актов рекомбинации;  $h\nu$  – энергия излучаемых квантов;  $J$  – ток

через р–n-переход. Обычно  $\eta_{\text{кв}} < 1$ . Кроме того, величина внутреннего квантового выхода в общем случае зависит от  $J$  и от вида, количества и распределения примесных центров в области, прилегающей к плоскости р–n-перехода. Внешний квантовый выход ЭЛ отличается от внутреннего тем, что из-за полного внутреннего отражения из кристалла могут выйти лишь те лучи, которые падают на его поверхность в направлениях, близких к нормали, то есть лучи, не испытывающие полного внутреннего отражения. Поэтому для увеличения внешнего квантового выхода инжекционных СИД их следует делать в виде полушария, в центре плоской поверхности которого расположена небольшая площадка, занятая р–n-переходом. Тогда все лучи света, возникающего в р–n-переходе, будут падать на сферическую часть поверхности кристалла почти по нормали и, следовательно, смогут беспрепятственно выйти наружу.

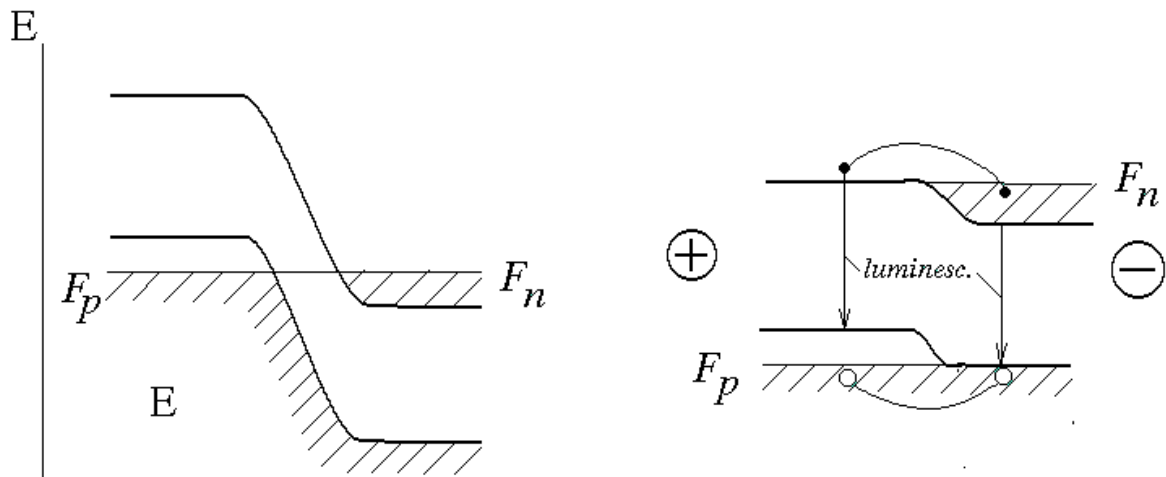


Рис. 1.7. Инжекция и рекомбинация носителей в p–n-переходе:  
 а – при тепловом равновесии (уровни Ферми в n и p равны  $F_p = F_n = F$ ,  $V = 0$ );  
 б – при большом прямом смещении  $V$  (квазиуровни Ферми  $F_p \neq F_n$ )

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) – зависимость рекомбинационного тока от приложенного напряжения  $V$  – в случае преобладания рекомбинации в какой-либо одной области р–n-перехода, описывается в большом интервале значений напряжения формулой вида:

$$J = J_0 \cdot \left( \exp \frac{eV}{mkT} - 1 \right), \quad (1.18)$$

где  $J_0$  – константа, имеющая размерность тока;  $m = 1 \dots 2$  – в зависимости от конкретных условий и структуры р–n перехода.

Мощность излучения связана с напряжением на светодиоде, согласно (1.17) и (1.18), следующей зависимостью:

$$\Phi_e = \beta \cdot \eta_{\text{кв}} \cdot h\nu \cdot J_0 \cdot \left( \exp \frac{eV}{mkT} - 1 \right), \quad (1.19)$$

Эта зависимость, как можно видеть из сравнения выражений (1.18) и (1.19), имеет такой же характер, что и ВАХ.

Важнейшей характеристикой светодиода является внешний квантовый выход  $\beta \cdot \eta_{\text{кв}}$ , который характеризует эффективность преобразования электрической энергии в световую. По определению энергетического выхода

$$\beta \cdot \eta_{\text{кв}} = \frac{\Phi_e}{P}, \quad (1.20)$$

здесь  $\Phi_e$  – мощность оптического излучения, Вт;  $P$  – электрическая мощность, потребляемая светодиодом, Вт [6, 7, 8].

### Контрольные вопросы

1. Каким образом определяют спектральные и интегральные коэффициенты пропускания оптических и светотехнических материалов.
2. Что такое угол Брюстера?
3. Как изменится угол Брюстера для стекла, если вместо красного света пластинку освещает синий?
4. Как изменится степень поляризации преломленного света, если вместо одной пластины свет пройдет через стопу из трех пластин?
5. Показать, используя закон преломления,  $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1}$  и выражение (1.13), что угол между отраженным и преломленным лучом составляет  $90^\circ$  при угле падения  $\alpha_B$ .
6. Каким образом производят измерения индикатрис рассеяния материалов и определяют коэффициент рассеяния и степень рассеяния материала.
7. Назовите основной светотехнический материал, обладающий хорошими светотехническими характеристиками, физико-химической стабильностью и способностью сравнительно легко перерабатываться в изделия.
8. Опишите оптические процессы, происходящие на поверхности среды и внутри неё при падении электромагнитного излучения.
9. Дайте определение коэффициентов отражения, поглощения и пропускания.
10. В результате чего появляется преломлённая и отражённая волна?
11. Чем вызвано рассеяние света?
12. В чём смысл закона Рэлея? Где мы встречаемся с его проявлением?
13. От чего зависит характер отражённого света?
14. Как меняется картина рассеяния света с увеличением размера рассеивающих частиц?

## Глава 2. СТРОЕНИЕ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВА

Развитие всех современных наукоемких технологий невозможно без углубления и совершенствования наших взглядов на природу твердого вещества, взаимосвязь его свойств с составом и строением. В настоящем учебном пособии изложены основные достижения фундаментальных наук и оптического производства.

### 2.1. Характерные особенности оптического стекла

Стекло – вещество, полученное путем переохлаждения расплава определенного химического состава, приобретающее в результате увеличения вязкости свойства твердого тела, причем процесс перехода из жидкого состояния в стеклообразное должен быть обратимым [9].

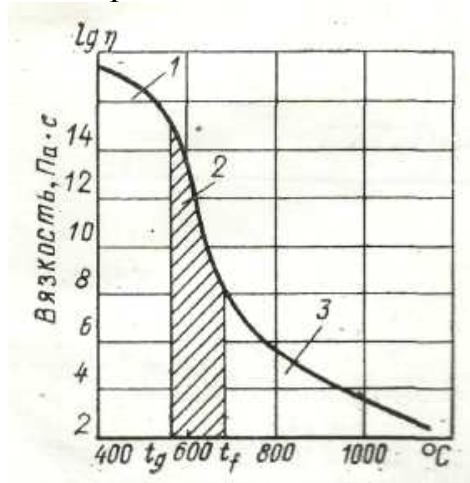


Рис. 2.1. Изменение агрегатного состояния стекла при нагревании:  
1 – твердое стеклообразное вещество; 2 – размягченная стекломасса;  
3 – жидкая стекломасса

Процесс превращения стеклообразующего расплава в твердое вещество происходит постепенно, путем нарастания вязкости в широком интервале температур»  $t_f - t_g$ , минуя кристаллическую фазу (рис. 2.1). При температуре  $t_f$  стекломасса приобретает текучесть; при температуре  $t_g$  возникает подвижное состояние стекла. Образование кристаллов в стекле является пороком и приводит к потере прозрачности и рассеянию света в детали. В процессе варки стеклообразующий расплав тщательно перемешивается для достижения высокой степени однородности.

Стекло в нормальных условиях изотропно по своим оптическим и механическим свойствам. Вопросы теории стеклообразования, природы и строения стекла рассмотрены подробно в работе [10].



## Теория строения стекла

Известный русский учёный Менделеев обосновал представление о стекле как о сплаве окислов некоторых химических элементов. Он уподобил стекло переохлаждённой жидкости находящейся в твёрдом состоянии. Позже в 1921 г. академик Лебедев, изучая изменение показателя преломления стекла в зависимости от температуры, показал, что до температур 500–600 °С этот процесс обратимый, после быстрого охлаждения стекла с более высоких температур значение показателя преломления резко изменяется, и процесс теряет обратимость – в стекле произошли структурные изменения.

В начале 30-х гг. Захариасен [11] выдвинул теорию строения стекла получившую известность под названием теории непрерывной сетки. По этой теории координационные полиэдры окислов способны затвердеть в виде стекла и создавать прочную увязанную структурную сетку. В этой сетке центральный ион-атом стеклообразователя окружён ионами-атомами кислорода и другого двухвалентного элемента расположенными в общих вершинах тетраэдра рис. 2.2. Некоторые ионы-атомы связаны только с двумя центральными атомами и не образуют связей с другими катионами. По этой теории окислы типов  $RO_2$ ,  $R_2O_3$ ,  $R_2O_5$  дают стеклообразования, а окислы типов  $R_2O$  и  $RO$  не образуют стекла.

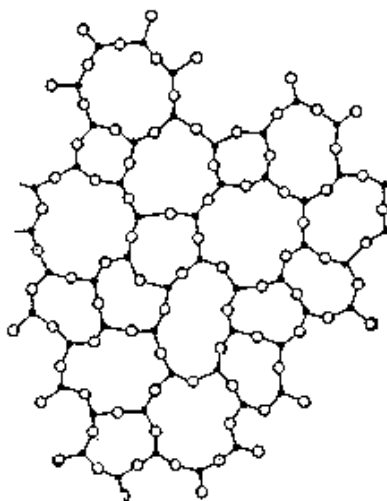


Рис. 2.2. Строение стеклообразного  $SiO_2$ :  
чёрные кружки – атомы  $Si$ , белые – атомы  $O$

**О кристаллизации стекла.** Чтобы избежать появления кристаллов в стекле нужно знать законы, управляющие числом новообразований и их линейным ростом. В жидком состоянии расплава молекулы совершают хаотическое тепловое движение и сталкиваются одна с другой, образуя метастабильные агрегаты, которые перегруппировываются и образуют центры кристаллизации. К этим центрам присоединяются новые части-

цы вещества и кристаллы растут. При дальнейшем понижении температуры скорость движения молекул уменьшается, но кристаллы ещё растут под влиянием увеличения коэффициента диффузии, который зависит от вязкости. При дальнейшем переохлаждении вязкость возрастает чрезвычайно быстро и рост кристаллов прекращается.

Чёткое представление о кристаллизационной способности расплава стекломассы данного химического состава позволяет целенаправленно управлять режимом варки, выработкой и термической обработкой стекла добиваясь его получения без кристаллизации. Увеличение числа вязких компонентов состава, хороший провар и однородность шихты, снижают кристаллизационную способность стекломассы.

### ***Отличительные свойства оптического стекла***

*Первым отличительным признаком* оптического стекла по сравнению с любым техническим стеклом является высокая однородность. Она достигается специальными приемами механического перемешивания стекломассы во время варки и особыми режимами термической обработки готового стекла – тонким оптическим отжигом.

Отжиг как обязательная технологическая операция является частью любого процесса формования изделия из стекломассы, но во всех производствах его целью является только снятие механических напряжений.

Тонкий отжиг является наиболее длительной и завершающей стадией в технологии оптического стекла. Он приводит всю массу стекла в структурно-однородное состояние. При этом оптические постоянные стекла принимают значения, стандартизированные для каждой марки стекла. Напряжения в заготовках понижаются до таких минимальных значений, которые не будут вызывать дополнительных деформаций при обработке заготовок.

*Вторым отличительным признаком* оптического стекла считается его высокая прозрачность. Оптическим стеклом высокого качества сейчас принято называть стекло, обладающее интегральным показателем ослабления  $\mu_A < 0,004 \text{ см}^{-1}$ . Для ряда систем и такое стекло не является вполне удовлетворительным и применяют стекла с показателем ослабления  $0,002\text{--}0,001 \text{ см}^{-1}$  и менее. Сверхпрозрачные стекла требуются для волоконно-оптических линий дальней связи. В рабочем диапазоне длин волн, в красной и ближней инфракрасной частях спектра показатель ослабления такого стекла должен быть около  $0,00002 \text{ см}^{-1}$ . Широкое развитие цветной фотографии, кино и телевидения потребовало введения нормирования пропускания стекла по спектру.

Наконец, к *третьему отличительному признаку* оптических стекол относятся большой интервал значений показателей преломления света,

который составляет для разных марок от 1,44 до 2,35, и строгая воспроизводимость показателей преломления, характерных для каждой марки, независимо от времени и места изготовления стекла.

*Оптические характеристики.* Оптические стекла характеризуются показателем преломления, и дисперсией которые определяют область применения оптических стекол в соответствующих приборах.

Главной оптической характеристикой оптического материала является показатель преломления  $n$ , измеренный для различных длин волн света. Показатель преломления – величина, равная отношению скорости света в вакууме к фазовой скорости света в данной среде. Значение показателя преломления с изменением длины волны непрерывно и плавно меняется. В фиолетовой части спектра показатель преломления больше, чем в красной. Это явление называется дисперсией света. Показатель преломления вещества растет с увеличением частоты колебаний световой волны.

Зависимость показателя преломления от длины волны света  $n = f(\lambda)$  изображается в виде кривых хода дисперсии (рис. 2.3) Кривые хода дисперсии  $n = f(\lambda)$ . Характер кривых, их крутизна в различных областях спектра специфичны для каждой марки стекла. У флинтowego стекла в видимой области  $n$  изменяется в большей степени, чем у кронового.

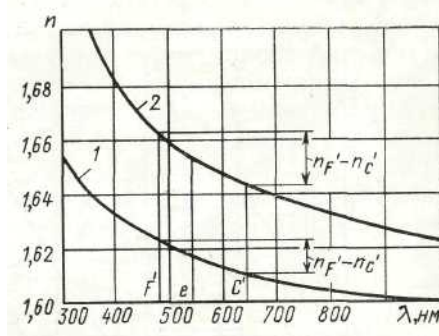


Рис. 2.3. Кривые хода дисперсии  $n = f(\lambda)$ : 1 – для кронового стекла ТК14; 2 – для флинтowego стекла ТФ1.

В качестве основного показателя преломления оптического стекла конкретной марки установлен показатель преломления  $n_e$  для длины волны 546,07 нм спектральной линии  $e$  ртути. Эта линия расположена в зеленой части спектра света вблизи области максимума чувствительности глаза человека.

Дисперсионные свойства стекла в видимой части спектра характеризуются значением основной средней дисперсии, определяемой как разность показателей преломления  $n_{F'} - n_{C'}$  для длин волн 479,99 и 643,85 нм спектральных линий  $F'$  и  $C'$  кадмия, ограничивающих видимую часть спектра.

Разность показателей преломления для двух других значений длин волн, например, соответствующих линиям спектра  $i$  и  $g$  ртути, характеризует дисперсионные свойства в другой части спектра, в данном случае в ультрафиолетовой.

При расчете оптических систем пользуются коэффициентом дисперсии

$$v = (n_1 - 1)/(n_2 - n_3), \quad (2.1)$$

где  $n_2$  и  $n_3$  – показатели преломления для длин волн, ограничивающих какой-либо диапазон спектра, а  $n_1$  – показатель преломления для длины волны, расположенный внутри диапазона.

$$v_e = \frac{n_e - 1}{n_{F'} - n_{C'}}; \quad (2.2)$$

Коэффициент  $v_e$ , называется основным коэффициентом дисперсии или числом Аббе.

## 2.2. Типы и марки оптических бесцветных стекол

В основу классификации оптических стекол положены значения показателя преломления  $n_e$  и коэффициента средней дисперсии  $v_e$ , который называется числом Аббе. Оптическое бесцветное неорганическое стекло в зависимости от показателя преломления и коэффициент дисперсии подразделяют:

- на ЛК – легкий крон;
- ФК – фосфатный крон;
- ТФК – тяжелый фосфатный крон;
- К – крон;
- БК – баритовый крон;
- ТК – тяжелый крон;
- СТК – сверх тяжелый крон;
- ОК – особый крон;
- КФ – крон флинт;
- БФ – баритовый флинт;
- ТБФ – тяжелый баритовый флинт;
- ЛФ – легкий флинт;
- Ф – флинт;
- ТФ – тяжелый флинт;
- СТФ – сверх тяжелый флинт;
- ОФ – особый флинт.

Группа кроновых стекол (ЛК, ФК, ТФК, К, БК, ТК, СТК, ОК, КФ) имеет показатели преломления в пределах от 1,44 до 1,77, коэффициент основной средней дисперсии – от 92 до 50, а группа флинтовых стекол (БФ, ТБФ, ЛФ, Ф, ТФ, СТФ, ОФ) – соответственно от 1,52 до 2,18 и от 54 до 16. Названия типов оптических стекол соответствуют их основному химическому составу (табл. 2.1).

Стекла оптические определяют по 100%-й формуле химического состава. Например, 72 % –  $\text{SiO}_2$ , 10 % –  $\text{CaO}$ , 18 % –  $\text{K}_2\text{O}$ . Для придания стёклам специальных свойств по твёрдости, цвету, радиационной устойчивости в них добавляют определённые химические элементы.

Таблица 2.1. Химический состав оптических стекол

Тип стекла	SiO <sub>2</sub>	B <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	PbO	BaO	ZnO	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	F
Кроны:														
ЛК	53,3	16,2	8,8	-	0,2	-	-	-	-	-	-	16,2	-	5,3
ФК	-	3	10	-	0,5	70,5	-	-	-	-	4	12	-	-
К	72	8,1	-	-	0,2	-	-	-	-	1,5	0,5	10,5	7,2	-
БК	49,5	4,8	-	-	0,2	-	2,6	21,6	12,5	-	-	7,6	1,2	-
ТК	32,7	13,2	3,1	-	1,6	-	-	45,9	3,5	-	-	-	-	-
КФ	63	1,8	-	-	0,2	-	16	-	-	2	-	11	6	-
Флинты:														
БФ	41,8	-	-	-	0,2	-	33,2	11,4	5,2	-	-	8,2	-	-
ЛФ	61	-	-	-	0,2	-	26,3	-	-	-	-	8	4,5	-
Ф	47	-	-	-	0,2	-	46,4	-	-	-	-	6,4	-	-
ТФ	31,6	-	-	-	0,2	-	65,4	-	-	-	-	2,8	-	-
ОФ	53,1	17,5	1,1	21,3	0,5	-	-	-	-	-	-	6,5	-	-

Каждому стеклу определенного химического состава присваивается марка, состоящая из обозначения типа и порядкового номера. По ГОСТ 3514–94 выпускается 180 марок стекол.

Для удобства выбора типов и марок стекла при расчете оптических систем строится диаграмма Аббе  $n_e = f(v_e)$ . Стекла каждого типа располагаются на поле диаграммы на строго ограниченных участках, за исключением стекол типа ОК и ОФ, которые могут находиться на разных участках поля диаграммы (рис. 2.4).

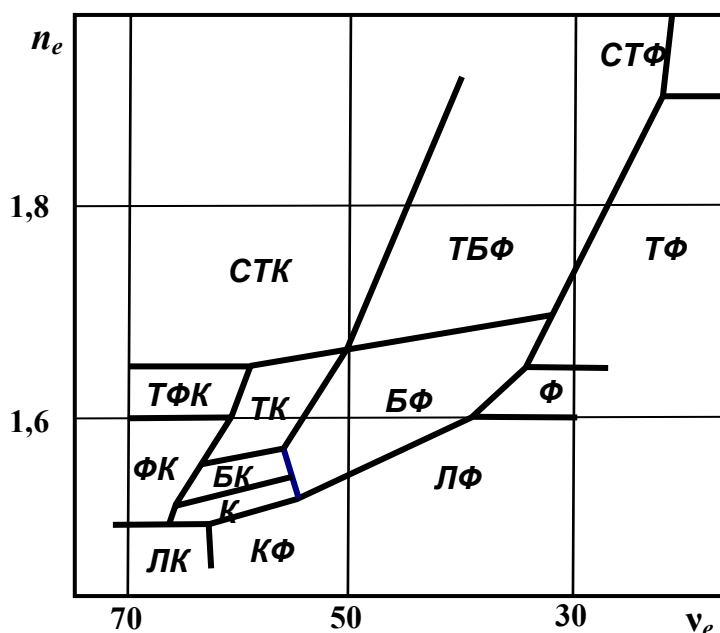


Рис. 2.4. Диаграмма Аббе  $n_e = f(v_e)$  для оптического бесцветного стекла

Более тридцати основных марок оптических стекол имеют свои аналоги, которые при тех же значениях  $n_e$  и  $v_e$  отличаются более высокой устойчивостью к действию жесткого гамма-излучения. Обозначение марок радиационно устойчивых аналогов несколько иное – больше порядкового номера основной марки на 100. Граница их пропускания в коротковолновой части спектра смещена в сторону видимой области. Для разных марок стекол это смещение составляет 30–50 нм.

Во всех новых разработках оптических систем, как правило, применяют стекла, сочетающие в себе высокий показатель преломления с высоким коэффициентом дисперсии, т. е. стекла типов ТФК, СТК, ТБФ. Широко используют также стекла с особым ходом относительных частных дисперсий (особые кроны и особые флинты) в целях максимального уменьшения хроматических aberrаций сразу в нескольких частях спектра.

По химическому составу основную группу среди оптических стекол составляют силикатные стекла, в которых содержание массовых долей стеклообразующего диоксида кремния составляет от 30 до 80 %.

Основой стекол типа флинтгов и тяжелых флинтгов является тройная система из оксидов кремния, свинца и калия; некоторые марки флинтгов содержат диоксид титана. Баритовые кроны, баритовые и особые флинты и кронфлинты в некоторых случаях содержат оксиды цинка и сурьмы. На силикатной основе нельзя получить стекла с показателем преломления выше, чем 2,0–2,05, из-за сравнительно низкого показателя преломления кремнезема. Дальнейшее его повышение возможно при переходе к более высокопреломляющему стеклообразователю, каким является диоксид теллура. Показатели преломления теллуридных стекол доходят до 2,17–2,23 при коэффициенте дисперсии, равном 19–17 соответственно.

Широко применяют стекла, в которых основным стеклообразователем вместе с кремнеземом является борный ангидрид. Так, основой всех тяжелых кронов являются оксиды бора, кремния, алюминия и бария. Добавление к борному ангидриду в больших количествах оксидов редкоземельных элементов (лантана, тантала, ниобия, иттрия, циркония) позволяет получать стекла типов СТК и ТБФ, сочетающие в себе относительно большой показатель преломления (1,661,88) с высоким коэффициентом дисперсии (57–35).

Расширение номенклатуры оптических стекол идет по пути создания новых марок с оптическими показателями  $n_e$  и  $v_e$ , имеющими координаты на диаграмме Аббе, отклоняющиеся от уже освоенных областей.

## **2. Физико-химические характеристики и технологические свойства оптических стекол**

### **Механические свойства**

Механические свойства стекла оцениваются следующими показателями: плотность, прочность, твердость, хрупкость, упругость.

*Плотность*  $\rho$  – это масса единицы объема. В зависимости от состава стекла значение  $\rho$  колеблется в пределах от 2,30 (стекло ЛК7) до 6,79 г/см<sup>3</sup> (стекло СТФ11). Значения плотности, необходимые для расчета массы оптической детали и заготовки, приведены в каталоге для каждой марки стекла.

*Прочностные свойства* стекла как конструктивного материала характеризуются стандартными параметрами: модулем упругости  $E$  и модулем сдвига  $G$ , связанными между собой соотношением  $E = 2G(1 + \mu)$ , где  $\mu$  – коэффициент поперечной деформации (коэффициент Пуассона).

Для оптических стекол  $E = (4,8-11,5) \cdot 10^7$  кПа,  $\mu = 0,17-0,31$ . Стекло имеет различную прочность на растяжение и сжатие. Значение прочности определяется предельными напряжениями  $\sigma$ , вызывающими разрушение образца. Специфической особенностью стекла является сравнительно высокая прочность при сжатии  $\sigma_c = (5-10) \cdot 10^7$  Па прочность на растяжение  $\sigma_r$  в 15–20 раз меньше. Стекло практически не имеет пластических свойств, плохо сопротивляется действию изгибающих и ударных нагрузок. Хрупкость стекла приводит при обработке к образованию сколов на краях и ребрах оптических деталей. Прочность стекла в значительной степени зависит от состояния его поверхностей – наличия царапин и трещиноватого слоя, образующегося при обработке. Прочность стёкол можно повысить глубоким шлифованием и полированием, при котором удаляют поверхностный трещиноватый слой и сохраняют высокое качество поверхности. Для повышения прочности стекло подвергают закалке. Удаление дефектного поверхностного слоя травлением повышает прочность стекла в 2–4 раза, но снижает качество поверхности.

*Твёрдость* – это способность материала сопротивляться проникновению в него другого тела. Различают твёрдость: 1) Склерометрическую, характеризующую шириной царапины, образующейся на поверхности стекла при царапании иглой с радиусом закругления 2 мкм. 2) Абразивную – по скорости сошлифовывания; 3) Микротвёрдость – по отпечатку вдавливаемого в стекло инвектора в виде пирамиды. В оптическом приборостроении пользуются относительной твёрдостью по сошлифовыванию  $H_{отн}$  – это соответствует отношению объёма сошлифованного стекла марки К8 к объёму сошлифованного стекла другой испытываемой марки в стандартных условиях обработки. Наибольшая твердость у кварцевого стекла и ситаллов ( $H_{отн} = 1,5-1,9$ ), наименьшая у стекол ФК ( $H_{отн} = 0,2$ ) и тяжелых флинтгов ТФ ( $H_{отн} = 0,5$ ).

*Фотоупругие свойства* стекла проявляются при возникновении упругих деформаций в образце. Стекло становится веществом анизотропным, что приводит к появлению двойного лучепреломления: луч света, проходящий через стекло, поляризуется и разлагается на два луча – обыкновенный и необыкновенный, плоскости поляризации которых взаимно перпендикулярны.

Это явление, специфичное для прозрачных материалов, называют фотоупругостью. Показатели преломления стекла для поляризованных лучей отличаются от показателей преломлений стекла в ненапряженном состоянии. Фотоупругость стекла характеризуется фотоупругими постоянными, выражающими приращение значения показателя преломле-



ния стекла для лучей света, поляризованных в направлениях, параллельном и перпендикулярном действию напряжения, равного  $10^5$  Па, а также оптическим коэффициентом напряжения. Оптический коэффициент напряжения определяет разность оптического хода поляризованных лучей в стекле и характеризует двойное лучепреломление, возникающее при напряжении, равном  $10^5$  Па. После снятия напряжения стекло становится изотропным материалом.

### **Определение остаточных напряжений в стекле**

При аттестации оптического бесцветного или цветного стекла для измерения в образцах величины двойного лучепреломления применяют поляризационно-оптический метод. Сущность его основана на использовании свойств поляризованного света. Для реализации метода в соответствии с ГОСТом 3519–69 используют поляриметр, состоящий из расположенных последовательно источника света, поляризатора, компенсатора и поворачивающихся вокруг оптической оси анализатора.

Свет, проходя от источника через поляризатор, приобретает линейную поляризацию, а затем в анизотропном образце становится эллиптически поляризованным. Такой свет обычно представляют двумя компонентами, которые называются обыкновенным и необыкновенным лучами. Эти лучи (вследствие различия в показателях преломления) распространяются в образце с разной скоростью, что приводит к возникновению между ними разности хода  $\delta$ . Используя компенсационную пластинку, создающую между лучами дополнительную разность хода  $\lambda/4$ , на выходе из неё получают линейно-поляризованный свет. С помощью анализатора, вращая его вокруг оптической оси прибора, определяют угол поворота плоскости поляризации.

Основной причиной разности хода являются термоупругие напряжения, образующиеся на заключительных этапах производства стекла. Эти напряжения приводят к появлению анизотропии материала и изменению состояния поляризованного света, поэтому данный метод широко используют для анализа напряженного состояния заготовок стекла, различных изделий или моделей конструкций при решении специальных задач в теории упругости. При этом по вычисленной величине  $\delta$  определяют значение разности главных нормальных напряжений  $\sigma_1$ – $\sigma_2$ . Напомним, что главными нормальными напряжениями  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  называют соответственно наибольшее и наименьшее напряжения, действующие по взаимно перпендикулярным направлениям элементарной площадки.

Исследованиями установлено, что если в образце имеет место напряженное состояние в пределах упругости материала (выполняется закон Гука), то возникающая анизотропия, характеризуемая разностью хода  $\delta$ , определяется выражением:

$$\delta = B l \cdot (\sigma_1 - \sigma_2) \text{ [нм]}, \quad (2.3)$$

где  $B$  – коэффициент оптической активности, характеризующий чувствительность материала к механическим напряжениям;  $l$  – размер испытуемого образца в направлении распространения поляризованного света.

$$\sigma_1 - \sigma_2 = (\Delta\Gamma \cdot 10^{-7}) / B \cdot L \text{ (Па)}. \quad (2.4)$$

Известно, что остаточные напряжения, деформируя поверхности, влияют на точность формообразования, изменяют оптические характеристики и вызывают двоение изображения.

**Конструкция прибора ПКС – 125.** Полярископ-поляриметр ПКС-125 (рис. 2.5) используют для интегральной оценки разности хода  $\delta$ , обусловленной наличием в стекле остаточных напряжений.

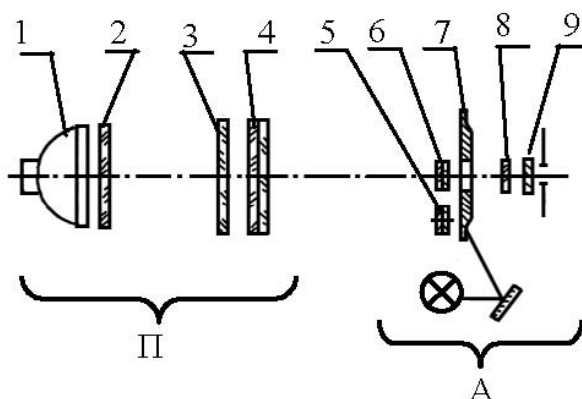


Рис. 2.5. Оптическая схема ПКС-125

Прибор состоит из двух блоков: поляризатора – П с источником света 1, теплофильтром 2, матовым стеклом 3, поляроидом 4; анализатора – А, состоящего из поляроида 8, светофильтра 9, выделяющего область спектра 540 [нм], пластины (компенсатора) 5 или 6, создающих разность хода, соответственно,  $\lambda/4$  и  $\lambda$ . При введении пластинки  $\lambda$  разность хода  $\delta$  определяют по окрашенности интерференционной картины, а при введении пластинки  $\lambda/4$  по углу  $\gamma$  поворота анализатора, соответствующего полному гашению света. Угол  $\gamma$  отсчитывают по шкале лимба [12, 13]

По величине найденной разности хода на единицу длины  $\delta/l$  (с учетом коэффициента оптической активности стекла данной марки) устанавливают категорию стекла по двойному лучепреломлению в соответствии с ГОСТом 3514–76 (табл.2.2).

Таблица 2.2. Категории стекла по двойному лучепреломлению

Категория	Двойное лучепреломление в нм на 1 см ( $\delta/l$ ), не более, в стеклах с оптическим коэффициентом напряжения $10\text{--}12 \text{ [Па]}^{-1}$		
	$B$ до 2,0	$B$ от 2,0 до 2,8	$B$ свыше 2,8
1	до 1,5	до 2	до 3
2	4	6	8
3	7	10	13
4	10	15	20
5	25	50	65

### Термические и термооптические характеристики стекла

В оптическом производстве применяют технологические процессы, связанные с выделением или поглощением тепла стекломассой. Поэтому тепловые свойства имеют важные значения и должны учитываться при назначении режимов обработки стекла.

Тепловые свойства стекла характеризуют: удельная теплоёмкость, теплопроводность, тепловое расширение, термостойкость, температура спекания  $T_{сп}$ .

Удельная теплоёмкость  $C$  – это количество теплоты необходимое для нагревания единицы массы стекла на один градус. У оптических стекол  $C = 300\text{--}800 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$ ; малую удельную теплоемкость имеют стекла ТФ и ТК; высокую – стекла К и ЛК.

Таблица 2.3. Значения теплоёмкости для некоторых марок стёкол

Марка стекла	Теплоемкость, Дж/кг·°С
ТФЗ	407
К8	739
Кварц	889

Коэффициент теплопроводности характеризует способность стекла передавать тепло от нагретых участков к менее нагретым. Повышенную теплопроводность имеют стёкла с большим содержанием  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Ba}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ . Предельным случаем является кварцевое стекло. Стёкла содержащие много  $\text{PbO}$  и  $\text{BaO}$  имеют низкую теплопроводность.

Температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) характеризует относительное удлинение  $d/l$  образца стекла при нагревании его на один градус. Значение ТКЛР изменяется в зависимости от диапазона температуры  $dt$ , в котором он измеряется. Для практического применения пользуются средними значениями ТКЛР, определенными для областей от  $-60$  до  $+20$  °С и от  $+20$  до  $+120$  °С. Коэффициент

расширения стекла зависит в первую очередь от его химического состава. У оптических стекол наименьший ТКЛР имеет кварцевое стекло  $\alpha = (2-5) \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , у большинства стекол ТКЛР находится в пределах  $(50-90) \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ .

*Термостойкость стёкол* – это способность стёкол выдерживать без разрушения резкие перепады температуры. Мерой термостойкости является разность температур, которую выдерживает стекло без разрушения. В отличие от других тепловых свойств, термостойкость зависит не только от химических свойств стекломассы, но и от геометрии и размеров образца, интенсивности теплообмена. При охлаждении термостойкость стекла значительно меньше, чем при нагревании. Наибольшую термостойкость имеет кварцевое стекло, стекло ЛК5 (термостойкое) и ситаллы, способные выдерживать перепад температуры 300–500 °С.

$T_{сп}$  – температура, при которой происходит термическое спекание образцов стекла размером 20×20×10 мм с полированными поверхностями, уложенных один на другой. Эта температура колеблется для различных марок в пределах 460–680 °С. Спекание стекла используют при изготовлении стекло-металлических зеркал, кювет, волоконно-оптических элементов.

Таблица. 2.4. Значения температуры спекания для некоторых марок стёкол

Марка стекла	$T_{сп}, \text{ } ^\circ\text{C}$
ТФ7	460
К8	620
ТК14	680

Термооптические характеристики учитывают изменение показателя преломления и дисперсии стекла при изменении температуры окружающей среды с помощью термооптической постоянной стекла  $V_\lambda = \beta_\lambda / (n_\lambda - 1) - \alpha_{ср}$ , где  $\beta_\lambda$  – приращение показателя преломления при длине волны  $\lambda$  с изменением температуры на один градус;  $n_\lambda$  – показатель преломления стекла для длины волны  $\lambda$  при  $t = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$ ;  $\alpha_{ср}$  – средний ТКЛР в интервале температур от  $-60$  до  $+20 \text{ } ^\circ\text{C}$  и от  $+20$  до  $+120 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Значения  $V_\lambda$  и  $\beta_\lambda$  для всех марок стекла приведены в ГОСТ 13659–78.

*Вязкость*  $\eta$  веществ изменяется в зависимости от температуры. При нагревании выше температуры размягчения стекло приобретает свойства жидкого вещества – становится вязким и текучим. Зависимость вязкости от температуры изображается в виде кривых вязкости  $\eta = f(t)$  (рис. 2.1). Стекло каждой марки в зависимости от его химического состава имеет различную крутизну кривой вязкости.

Температурный интервал, в котором вязкость изменяется в определенных пределах, определяет технологическую «длину» стекла. Наибо-

лее важны для производства стекла и заготовок интервалы: «варочный»  $\eta = 10\text{--}10^3$  Па·с и «выработочный»  $\eta = 10^4\text{--}10^8$  Па·с. Чем больше температурный интервал вязкости, тем стекло более технологично при варке и горячем формообразовании заготовок, так как не требуется точного соблюдения температуры ведения процессов. К «длинным» стеклам относятся флинты Ф, ЛФ, ТФ, к «коротким» – кроны К, ТК.

В каталоге оптического стекла для каждой марки стекла приведены температуры, при которых вязкость стекла равна  $10^7$ ,  $10^9$ ,  $10^{12}$  и  $10^{13,5}$  Па·с. Эти вязкости характеризуют соответственно процессы: моллирования стекла, спекания и отжига.

### Химическая устойчивость стекла

В оптическом производстве установлено два показателя химической устойчивости:

- 1) химическая устойчивость к действию влажной атмосферы.
- 2) устойчивость к действию пятнающих реагентов (нейтральной воде, слабокислым и щелочным водным растворам).

Соприкасаясь с влажным воздухом, поверхность стекла взаимодействует с молекулами воды, образуя тонкую пленку.

По устойчивости к действию влажной атмосферы (налетоопасности) силикатные оптические стекла делятся на группы:

- А – неналетоопасные,
- Б – промежуточные,
- В – налетоопасные.

Большинство оптических стекол относятся к группе А. Оптические детали из неналетоопасных стекол сразу же после обработки покрывают защитными пленками.

По устойчивости к действию пятнающих реагентов оптические стекла делят на следующие группы:

- I – непятнающиеся,
- II – средней пятнаемости,
- III – пятнающиеся,
- IV – нестойкие стекла, требующие обязательного применения защитных покрытий.

Наиболее устойчивыми (группа I) являются кроны, кронфлинты, баритовые флинты, флинты и лёгкие флинты. Пятнающимися и нестойкими (III и IV группы) являются тяжёлые и сверх тяжёлые кроны, тяжёлые баритовые флинты, тяжёлые и особые флинты. К последней группе, например, относятся стекла ОФ4, СТК19, СТК3. Пятнаемость стекол учитывают при обработке, выборе полирующих средств и про-

мывочных жидкостей. Травление стекла некоторых марок растворами кислот используют в технологии нанесения штриховых мер, шкал и сеток на стеклянные подложки.

Учет химических свойств оптических стёкол необходим с одной стороны для предотвращения не желательного воздействия жидкой фазы обрабатывающих суспензий и окружающей среды на полированные поверхности оптических деталей, заготовок на всех стадиях их обработки. С другой стороны для целенаправленного изменения поверхности при травлении штрихов, меток, цифр и т.д.; образованию просветляющих, защитных и прочих покрытий определённой толщины за счёт гидролиза поверхности; интенсификации процессов полирования путём введения в состав полирующих композиций водных растворов окислителей; изменение прочностных и др. свойств оптического контакта за счёт различной толщины гидролизных плёнок.

#### **2.4. Показатели качества оптических бесцветных стекол**

Качество изображения, создаваемого оптическим прибором, находится в прямой зависимости от качества материала, из которого изготовлены детали оптической системы. В соответствии с ГОСТ 3514–76 оптическое бесцветное неорганическое стекло в заготовках нормируется по следующим параметрам:

- показатель преломления  $n_e$ ;
- средней дисперсии  $n_F - n_C$ ;
- однородности партии заготовок по показателю преломления;
- однородности партии заготовок по средней дисперсии;
- оптической однородности;
- двойному лучепреломлению;
- радиационно оптической устойчивости;
- показателю ослабления;
- бессвильности;
- пузырности.

Все перечисленные требования могут быть сведены в две группы: основные, определяющие качество деталей, и дополнительные. Причем, в зависимости от служебного назначения детали эти требования можно группировать различными способами. Необоснованное снижение основных требований к материалу заготовки приводят к заметному ухудшению работы всего прибора в целом. Повышение требований к показателям, которые не являются определяющими, не обеспечивает заметного улучшения всего прибора в целом, повышает его стоимость.

*Предельное отклонение показателя преломления  $n_e$  и средней дисперсии  $n_F - n_C$  от значений установленных для стекол всех марок нормируется пятью категориями (табл. 2.5). Числовые значения предельных отклонений для всех категорий находятся в пределах от  $\pm 2 \cdot 10^{-4}$  до  $\pm 20 \cdot 10^{-4}$  для  $n_e$  и от  $\pm 2 \cdot 10^{-5}$  до  $\pm 20 \cdot 10^{-5}$  для  $n_F - n_C$ ;*

*Таблица. 2.5. Значения предельных отклонений показателя преломления и средней дисперсии*

Категория	$\Delta n_e 10^4$	$\Delta(n_F' - n_C') 10^5$
1	$\pm 2$	$\pm 2$
2	$\pm 3$	$\pm 3$
3	$\pm 5$	$\pm 5$
4	$\pm 10$	$\pm 10$
5	$\pm 20$	$\pm 20$

*Однородность партии заготовок стекла по показателю преломления  $n_e$  нормируется четырьмя классами (Табл.2.6). Числовые значения предельных отклонений  $n_e$  для всех классов лежат в пределах от  $\pm 0,2 \cdot 10^{-4}$  до  $\pm 20 \cdot 10^{-4}$ ;*

*Таблица. 2.6. Значения предельных отклонений показателя преломления и средней дисперсии партии заготовок*

Класс	Наибольшая разность $\Delta n_e 10^4$ в партии заготовок	Наибольшая разность $\Delta(n_F' - n_C') 10^5$ в партии заготовок
А	0,2	–
Б	0,5	–
В	1	1
Г	В пределах заданной категории	В пределах заданной категории

*Однородность партии заготовок стекла по средней дисперсии нормируется двумя классами. Числовые значения предельных отклонений составляют от  $\pm 1 \cdot 10^{-5}$  до  $\pm 20 \cdot 10^{-5}$ ;*

*Оптическая однородность показателя преломления во всем объеме заготовки в зависимости от ее размеров и условий работы деталей*

оценивается по ее разрешающей способности или по ее оптическому градиенту показателя преломления, характеризуемого волновыми аберрациями. Установлено пять категорий оптической однородности;

*Двойное лучепреломление* является показателем качества отжига стекла, который характеризуется разностью хода (в миллиметрах на один сантиметр пути) двух лучей, на которые разделяется падающий луч под действием остаточных напряжений в толще стекла в направлении наибольшего размера.

Допускаемое двойное лучепреломление нормируется пятью категориями. Числовые значения для всех категорий находятся в пределах от 1,5 до 65 нм/см. У заготовок малого размера двойное лучепреломление не оказывает существенного влияния на качество изображения, а проявляется лишь для деталей, имеющих значительную толщину.

*Показатель ослабления*  $\varepsilon_A$  есть величина обратная расстоянию, на котором поток излучения от источника типа А ослабляется в результате поглощения и рассеяния в 10 раз. Установлено 8 категорий, допускаемых значений показателя ослабления, который находится в пределах от  $2 \cdot 10^{-4}$  до  $130 \cdot 10^{-4}$ .

*Свилы* являются резко выраженными локальными оптическими неоднородностями стекла. Они представляют собой прозрачные нитевидные или слоистые включения имеющие показатель преломления отличный от показателя преломления основной массы стекла. Наличие в стекле свилей резко снижает качество изображения, формируемого оптической системой. Класс бессвильности характеризуется отсутствием видимых включений при просмотре образца стекла в одном (А) или двух (Б) взаимно перпендикулярных направлениях. Установлено две категории бессвильности. Установлено что если стекло бессвильно в двух взаимно перпендикулярных направлениях, то оно бессвильно и в любом другом направлении. Наличие в стекле слоистых свилевидных включений вызывают астигматизм в оптических деталях. Пузыри нормируются из-за видимости их в поле зрения прибора, что приводит к появлению различных пятен в изображении и увеличение коэффициента диффузного рассеяния света, а как следствие снижение освещенности в плоскости изображений.

*Пузырность* характеризуют диаметром наибольшего пузыря допускаемого в заготовке при ее просмотре. Установлено 11 категорий пузырьрности. Допустимые предельные отклонения диаметров пузырей для всех категорий находятся в пределах от 0,002 до 5 мм. Присутствие на поверхности скрытых пузырей исключает возможность получения поверхностей высоких классов чистоты. Крупные пузыри вызывают появление вокруг них местных ям на поверхности. Они также затрудняют



очистку поверхностей, нанесение на них покрытий высокого качества, соединение склеиванием или оптическим контактом. Вскрывшиеся пузыри являются также центром химического и биологического разрушения полированных поверхностей детали.

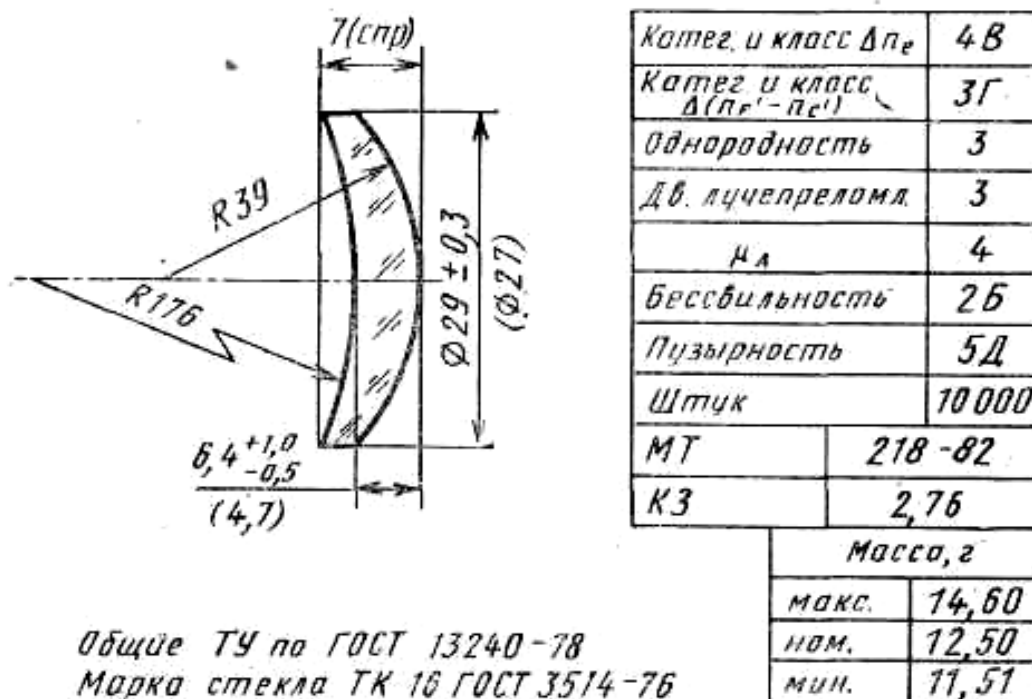


Рис. 2.6. Образец оформления технических условий на заготовку линзы

Оптические детали изображают на чертежах в соответствии с общими правилами, установленными ЕСКД. Чертеж полностью характеризует оптическую деталь и служит исходным документом для разработки технологического процесса ее изготовления и контроля.

В правом верхнем углу чертежа заготовки оптической детали располагают таблицу, в которой указывают все выше рассмотренные требования к материалу (рис. 2.5.).

## 2.5. Стекла оптические цветные, стекла с особыми свойствами, ситаллы, органические стекла

**Цветные оптические стекла** применяют для изготовления светофильтров, ограничивающих или ослабляющих пропускание света, заданного спектрального состава. Основной характеристикой цветного оптического стекла является нормированная спектральная кривая зависимости светопропускания  $\tau_\lambda$  или оптической плотности  $D_\lambda$  от длины волны  $\lambda$ , а также спектральный показатель поглощения  $k_\lambda$ .

Показатель поглощения  $k_\lambda$  стекла для определенной длины волны света находят из выражения  $k_\lambda = -\lg\tau_\lambda/l$ , где  $\tau_\lambda$  – коэффициент пропускания стекла толщиной  $l$  (мм) для монохроматического света длиной волны  $\lambda$ .

Оптическая плотность  $D_\lambda$  для монохроматического света с длиной волны  $\lambda$  связана с показателем поглощения  $k_\lambda$  и коэффициентом пропускания  $\tau_\lambda$  соотношением

$$D_\lambda = \lg\tau_\lambda = k_\lambda l.$$

Поглощение света, для различных значений длины волны света измеряют на спектрофотометре.

Марку цветного стекла обозначают буквами, из которых первая или две первых являются начальными буквами наименования цвета (типа), буква С сокращенно обозначает слово стекло, цифра указывает порядковый номер марки стекла данного типа. Например, ЖЗС5 – желто-зеленое стекло пятое.

В соответствии с ГОСТ 9411–81 «Стекло оптическое цветное» выпускаются цветные стекла 14 типов:

УФС – ультрафиолетовое	ОС – оранжевое
ФС – фиолетовое	КС – красное
СС – синее	ИКС – инфракрасное
СЗС – сине-зеленое	ПС – пурпурное
ЗС – зеленое	НС – нейтральное
ЖЗС – желто-зеленое	ТС – темное
ЖС – желтое	БС – бесцветное

Стекла БС предназначены для ограничения пропускания света в ультрафиолетовой или длинноволновой инфракрасной областях спектра при сохранении пропускания в видимой части.

Окраска стекла обуславливается введением в его состав химических красящих веществ (красителей) которые могут находиться в стекле в молекулярном растворенном или коллоидном состоянии.

Молекулярные красители – это окислы тяжелых металлов: кобальта, железа, никеля и др. При варке стекла они полностью растворяются в его основе. Избирательное поглощение света в стекле вызывается резонансными колебаниями электронов красителей. Характер спектральной кривой пропускания у стекол, окрашенных молекулярными красителями, при изменении концентрации красителя практически не меняется, изменяется лишь пропускание. При вторичной термообработке окраска таких стекол не изменяется. Спектральные кривые  $\tau_\lambda = f(\lambda)$  некоторых цветных стекол толщиной  $l = 2$  мм, окрашенных молекулярными красителями, приведены на рис. 2.7.

Стекло СС5 имеет характерную избирательную кривую пропускания с максимумом в области 415–420 нм. Ультрафиолетовое темное стекло УФС5 ограничивает пропускание ультрафиолетовой части спектра в области 370–380 нм. Нейтральные стекла ослабляют пропускание в видимой части спектра в зависимости от концентрации красителя в составе.



Рис. 2.7. Спектральные кривые пропускания  $\tau_\lambda = f(\lambda)$  цветных стекол, окрашенных молекулярными красителями в слое толщиной 2 мм

Окраска стекла коллоидными красителями: металлическим золотом, серебром, сульфидами и селенидами кадмия или сурьмы – основана на избирательном рассеянии света дисперсными частицами красителей. Стекла, содержащие коллоидные красители в атомарном состоянии, бесцветны, окраска появляется в результате роста мельчайших кристалликов металла размерами 1–100 нм при вторичной термообработке – «наводке».

Наибольшее распространение среди этих стекол получили селенокадмиевые стекла, имеющие желтую, красную и оранжевую окраску. Кривые спектрального пропускания селенокадмиевых стекол (рис. 2.8) имеют крутой подъем, резко отсекают одну часть спектра пропускания от другой.

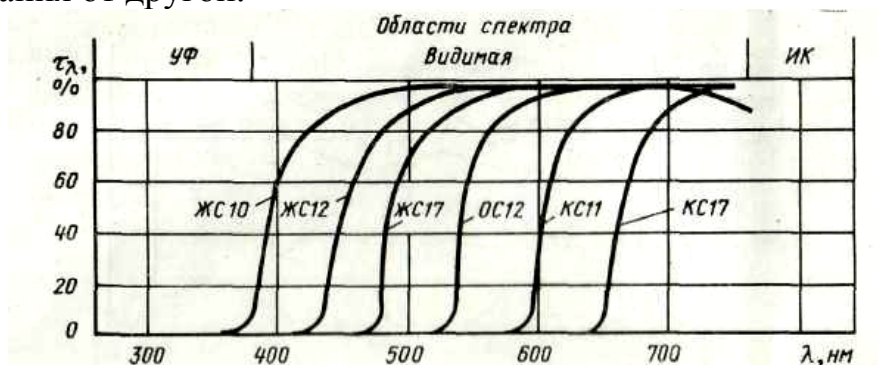


Рис. 2.8. Спектральные кривые пропускания  $\tau_\lambda = f(\lambda)$  цветных селенокадмиевых стекол, окрашенных коллоидными красителями в слое толщиной 5 мм

## Стекла с особыми свойствами

*Стекла светорассеивающие (молочные)* применяют для изготовления деталей, диффузно рассеивающих проходящий или отраженный свет, их обозначают МС. Они приобретают рассеивающие свойства благодаря введению в состав соединений фтора в виде криолита, кремнефтористого натрия и других соединений, обеспечивающих мелкодисперсную кристаллизацию («глушение») стекла.

*Стекла фотохромные* обратимо изменяют свою прозрачность в видимой части спектра в зависимости от величины освещенности и длительности облучения. После прекращения облучения пропускание стекла восстанавливается. Их применяют для изготовления светофильтров, светозащитных очков и экранов и обозначают ФХС.

Основными характеристиками фотохромных стекол является коэффициент фотохромности  $K_{\phi}$  и чувствительность  $S_{\phi}$ .

$K_{\phi}$  – это величина характеризующая уменьшение оптической плотности за 30 секунд термического обесцвечивания.

$S_{\phi}$  – это величина обратная количеству освещенности необходимого для получения добавочной оптической плотности равной 0,2.

Наиболее характерным представителем группы фотохромных стекол является стекло ФХСЗ, имеющее  $K_{\phi} = 0,5-0,7$ ;  $S_{\phi} = (2-5) \cdot 10^{-6} \text{ (лк*с)}^{-1}$ .

Кривая пропускания светофильтров из оптического фотохромного стекла ФХСЗ толщиной 2,5 мм в процессе облучения (зона А) и после облучения (зона Б) приведена на рис. 2.9.

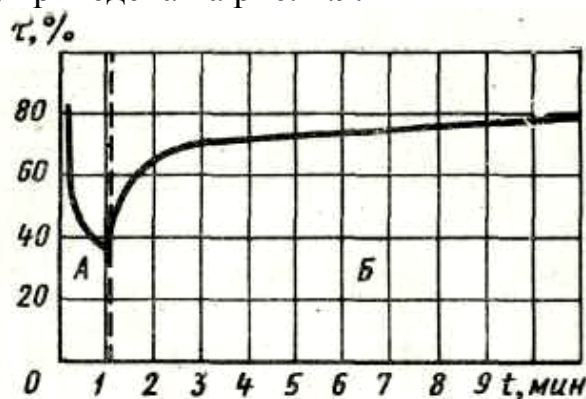


Рис. 2.9. Кинетическая кривая пропускания фотохромного стекла

*Радиационно стойкие стекла* сохраняют оптические свойства под действием радиационного излучения. Большинство обычных стекол под действием радиации окрашиваются – темнеют, уменьшается их светопропускание до определенного значения, зависящего от дозы радиации и состава стекла. Устойчивость стекол к воздействию ионизирующего

излучения характеризуется приращением оптической плотности  $\Delta D$  на 1 см толщины стекла после облучения дозой гамма-лучей  $10^5 P$  от источника излучения  $Co_{60}$ . Повышение радиационной устойчивости стекол достигается введением в их состав добавок, способных предотвращать образование центров окраски. Наибольший эффект достигается при введении в качестве добавки окиси церия  $SeO_2$ . Стекла, содержащие  $SeO_2$ , сохраняют светопропускание после облучения дозой гамма-лучами  $10^5 P$ , их обозначают как стекла серии 100. Например, радиационно-стойкое стекло К8 обозначают К108, значение  $\Delta D$  после облучения не должно быть более 0,015. По другим оптическим свойствам радиационно-стойкие стекла серии 100 практически не отличаются от своих аналогов серии 0.

*Стекла оптические люминесцирующие*, активированные неодимом, имеют узкие полосы люминесценции, причем на полосу 1060 нм приходится до 80 % всей энергии люминесценции. Их используют для изготовления активных элементов твердотельных лазеров направленного излучения с длинами волн 900, 1060, 1300 нм, работающих как в режиме свободной генерации, так и в моноимпульсном режиме. Спектр поглощения стекол, активированных неодимом, имеет много полос в видимой и ближней ИК областях спектра, что облегчает оптическую накачку. Стекла обозначают ГЛС (генерирующее люминесцирующее стекло).

*Инфракрасные бескислородные стекла* это стеклообразное вещество, отличающееся от обычных стекол тем, что в их составе нет химических соединений содержащих кислород, а процесс стеклообразования происходит в бескислородной среде. Наиболее известны халькогенидные бескислородные стекла, основным компонентом которых является трех сернистый мышьяк, селен, германий, теллур. Халькогенидные стекла прозрачные в инфракрасной области спектра от 1–17 мкм имеют высокую химическую и термохимическую прочность. Их обозначают ИКС. Они различаются границами пропускания и показателем преломления. Бескислородные инфракрасные стекла используют для изготовления оптических деталей и волоконных элементов, работающих в ИК области спектра.

### **Стекло оптическое кварцевое**

Стекло оптическое кварцевое это однокомпонентное силикатное стекло на основе кремнезема  $SiO_2$ . Оно обладает следующими физико-химическими свойствами:

- прозрачность в широком диапазоне ультрафиолетовых, видимых, инфракрасных волн и радиочастот;

- высокая термостойкость;
- химическая и радиационная устойчивость;
- малый коэффициент линейного расширения.

Оптические кварцевые стекла применяют для изготовления прозрачных люков летательных аппаратов, уголковых отражателей, активных элементов ОКГ, оболочек источников света и других оптических деталей, подвергающихся резким температурным воздействиям. В зависимости от основной области спектрального пропускания выпускается оптическое кварцевое стекло следующих марок:

- 1) КУ1, КУ2 – прозрачные в ультрафиолетовой области спектра.
- 2) КВ, КВР – прозрачные в видимой области спектра.
- 3) КИ – прозрачные в инфракрасной области спектра.

### **Оптические ситаллы**

Ситаллы – это особый класс стеклокерамических материалов, имеющих микрокристаллическую структуру с кристаллами размером не более 1–2 мкм, равномерно распределенных по всему объему стеклообразного вещества. Оптические ситаллы отличаются особо тонкой зернистой структурой, размеры кристаллов в них не превышают длины полу-волны видимого участка спектра. Оптическая плотность кристаллов и стекловидной массы совпадают или близки между собой, что исключает светорассеивание на границах раздела фаз "стекло – кристалл". Ситаллы имеют повышенную по сравнению со стеклом термостойкость, механическую прочность и твердость. Коэффициент линейного расширения ситаллов некоторых марок приближенно равен нулю. В оптической промышленности применяются ситаллы: СО115М, СО156, СО21.

СО115М – термостойкий ситалл с малым близким коэффициентом линейного теплового расширения. Применяют для изготовления оптических деталей в которых не допускается изменение формы поверхности с изменением температуры: астрономических зеркал, оптических деталей гироскопов, подставок интерферометров.

СО156 – ситалл с малым коэффициентом линейного теплового расширения. Отличается повышенной прозрачностью в видимой области спектра и лучшей однородностью. Применяют для изготовления пробных стекол и деталей измерительной техники.

СО21 – ситалл с малым коэффициентом линейного теплового расширения в пределах 0...+350 °С. Обладает максимальной термостойкостью (до +700 °С) и максимальной относительной твердостью по сошлифовыванию. Применяют для изготовления деталей приборов лазерных гироскопов и приборов работающих в космосе.

**Органические стекла.** Это полимерные термопластические органические материалы, находящиеся в нормальных условиях в аморфном стеклообразном состоянии. Наибольшее распространение в качестве оптических материалов получили полиметилметакрилат, полистирол и поликарбонат, имеющие прозрачность в видимой и ближней ИК области спектра.

Полимерные материалы по сравнению с оптическими стеклами имеют более низкую стоимость, меньшую плотность и высокую ударопрочность. Изготовление деталей из органического стекла осуществляется высокопроизводительными экономичными методами. Однако недостаточная оптическая однородность, большое значение ТКЛР, термическая усадка и старение ограничивают применение полимеров для изготовления оптических деталей ответственного назначения. Шлифование и полирование деталей из полимеров с высокой точностью затруднено ввиду их низкой абразивной стойкости. Физико-оптические свойства органических стекол приведены в табл. 2.7.

Из органического стекла изготавливают неответственные оптические детали: лупы, линзы окуляров, рассеиватели, фильтры, растры, очковые контактные линзы, светозащитные очки и др. Из полимеров можно делать детали сложной формы, такие, как линзы Френеля, детали маячной оптики, изготовление которых из оптического стекла экономически нецелесообразно, а иногда и невозможно.

Таблица 2.7. Физико-оптические свойства органических стекол

Материал	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	ТКЛР 10 <sup>6</sup> °С <sup>-1</sup>	Максимальная температура эксплуатации материала, °С	$n_D$	$v_D$	$\tau$ в видимой области для образца толщиной 5 мм, %
Полиметилметакрилат	1,18–1,2	63–77	60–105	1,491	57,8	89–92
Полистирол	1,05–1,1	63–90	60–82	1,59	30,8	85
Поликарбонат	1,17–1,24	60–70	121–140	1,586	30,3	88–90

## 2.6. Оптические кристаллы и керамика

**Свойства кристаллов.** Для изготовления оптических деталей используют прозрачные кристаллы с необычными для стекол оптическими свойствами: аномальными значениями показателя преломления и дисперсии, прозрачностью в УФ и ИК областях спектра излучения света, двулучепреломлением и поляризационной способностью.

Кристаллы отличаются от стеклообразных веществ тем, что составляющие их молекулы, атомы, ионы расположены в строго определенном порядке в узлах пространственной кристаллической решетки. Характерным признаком кристаллов является их правильная внешняя форма, ограниченная плоскими гранями, образующими при пересечении ребра и вершины. Грани, ребра и вершины кристалла являются элементами его огранения. Каждому виду кристаллов свойственны закономерная повторяемость и симметрия элементов огранения в трехмерном пространстве.

Особенностью отдельных кристаллов является также *анизотропность* – способность проявлять различные свойства в разных направлениях. Например, прочностные свойства, твердость, сопротивление скалыванию во многом зависят от направления приложения усилий.

Способность кристаллов раскалываться по плоскостям, параллельным кристаллографическим граням, называется спайностью. Спайность неразрывно связана со структурой кристалла, раскалывание происходит по определенным плоским сеткам структуры, обычно перпендикулярно направлению наиболее слабых внутренних связей.

Твердость оптических кристаллов различна, например, сапфир очень твердый материал, уступающий по твердости только алмазу, а кристаллы NaCl или KCl легко царапаются и растворяются в воде.

По оптическим свойствам кристаллы делят на две группы: изотропные и анизотропные. В изотропных кристаллах, как и в аморфных и стеклообразных веществах, свет распространяется во всех направлениях с одинаковой скоростью и показатель преломления и средняя дисперсия – величины постоянные. В оптически анизотропных кристаллах скорость распространения света в различных направлениях неодинакова, причем луч света, попадая в анизотропный кристалл, делится на два луча: обыкновенный (о) и необыкновенный (е), поляризованные в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

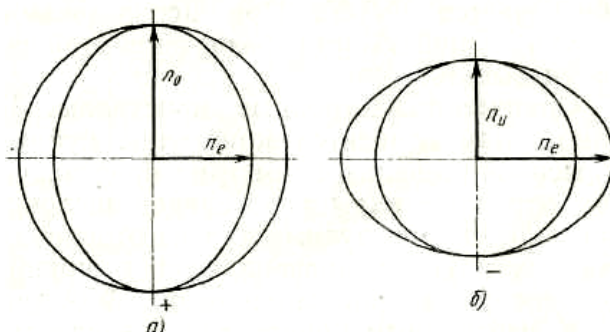


Рис. 2.10. Волновые поверхности обыкновенных и необыкновенных лучей в одноосных кристаллах: а – оптически положительном; б – оптически отрицательном



Это явление можно пояснить следующим образом. Если внутри кристалла поместить точечный источник света, то от него будут распространяться лучи – обыкновенные и необыкновенные. Обыкновенные лучи распространяются в кристалле во все стороны с одинаковой скоростью, необыкновенные – с различной, зависящей от направления. Волновой фронт от обыкновенных лучей представляет собой сферическую поверхность, а от необыкновенных – поверхность эллипсоида вращения. Обе эти поверхности, называемые волновыми поверхностями Френеля, соприкасаются одна с другой в двух диаметрально расположенных точках, совпадающих с осями вращения эллипсоида. Если построить сечение волновых поверхностей в полярных координатах для  $n_o$  и  $n_e$ , то они будут иметь вид, показанный на рис. 2.10. Если соприкосновение сечений осуществляется по большой оси эллипсоида (рис. 2.10, а), кристалл называется оптически отрицательным  $n_e \leq n_o$ . Если соприкосновение сечений осуществляется по малой оси эллипсоида (рис. 2.10, б), кристалл называется оптически положительным  $n_e \geq n_o$ . Линия, соединяющая точки соприкосновения сферы и эллипсоида, называется оптической осью. Все лучи, распространяющиеся в кристалле параллельно направлению оптической оси, имеют одинаковую скорость и показатель преломления  $n_o$ , при этом двойное лучепреломление не наблюдается. Анизотропные кристаллы, имеющие одно изотропное направление оптических лучей, называются оптически одноосными кристаллами.

В оптическом приборостроении применяют как природные кристаллы: исландский шпат, кварц, флюорит, так и синтетические кристаллы, выращенные искусственно.

Природные оптические кристаллы необходимой прозрачности, однородности и больших размеров встречаются редко. Поэтому только с развитием технологии выращивания кристаллов значительно расширилась область их применения. Освоено выращивание кристаллов с полезными оптическими свойствами, не встречающихся в чистом виде в природных условиях. К ним относятся кристаллы полупроводниковых элементов: кремния, германия и сложных соединений типа иодистобромистого таллия и арсенида галлия.

Как и к другим оптическим материалам, к кристаллам предъявляются требования по стабильности оптических характеристик, и разработаны нормативы показателей качества, оговоренные в стандартах.

Марку оптического кристалла обозначают начальными буквами химического названия материала кристалла с добавлением букв У, В или И, указывающих на основную рабочую область спектра пропускания. Например, кристалл фтористого лития для УФ области обозначается ФЛ-У. При использовании оптического кристалла только в одной области обозначение этой рабочей области допускается не указывать.

**Оптически изотропные кристаллы.** К оптически изотропным кристаллам относятся кристаллы кубической системы (сингонии) с высокой степенью симметрии пространственной решетки. В основном это кристаллы галогенидов щелочных и щелочно-земельных металлов, используемые для изготовления деталей приборов, работающих в ИК диапазоне, окон и призм спектральных приборов, конденсоров и линз микроскопов УФ диапазона.

К изотропным кристаллам относятся также синтетические кристаллы полупроводниковых материалов: кремния, германия, используемых для изготовления оптических деталей, работающих в дальней ИК области спектра.

*Кремний* Si-прозрачен в области 1,5–22 мкм и непрозрачен в видимой области излучения. В воде нерастворим, растворяется в смеси плавиковой и азотной кислот. Его плотность 2,33 г/см<sup>3</sup>, показатель преломления  $n = 3,458$  для  $\lambda = 2$  мкм; кристалл хрупкий.

*Германий* Ge прозрачен в области 2–265 мкм и непрозрачен в видимой области спектра. В воде нерастворим, растворяется в горячей серной кислоте. Его плотность 5,327 г/см<sup>3</sup>, показатель преломления  $n = 4,0217$  для  $\lambda = 4,2$  мкм; кристалл хрупкий, относительная твердость по сошлифовыванию 0,53.

Свойства кристаллов галогенидов щелочных и щелочно-земельных металлов приведены в табл. 2.8.

Таблица 2.8. Свойства кристаллов галогенидов щелочных и щелочно-земельных металлов

Химический состав кристалла	$\rho$ , г/см <sup>2</sup>	$n_D$ , $\lambda = 589,3$ нм	$v_D$	Область прозрачности, мкм
NaCl	2,165	1,5443	42,7	0,25–15
KCl	1,984	1,4904	43,9	0,33–21
CaF <sub>2</sub>	3,18	1,4339	95,15	0,18–10
LiF	2,601	1,3921	99,26	0,18–6
KBr	2,75	1,5601	33,5	0,21–27

**Одноосные оптические кристаллы.** Одноосные кристаллы применяют для изготовления оптических деталей поляризационных, спектральных приборов и элементов лазеров. Рассмотрим свойства наиболее широко используемых в оптическом приборостроении оптических одноосных кристаллов. Величины  $n_0$  и  $n_e$  приведены для  $\lambda = 589,3$  нм.

*Исландский шпат* CaCO<sub>3</sub> (кальцит) – природный мягкий кристалл, очень хрупкий, характеризуется сильно выраженным двойным лучепреломлением,  $n_0 = 1,658$ ,  $n_e = 1,486$ , плотность 2,71 г/см<sup>3</sup>. Хорошо раскалывается по плоскости спайности.

*Кварц кристаллический*  $\text{SiO}_2$  – твердый кристалл, имеет относительно слабо выраженное лучепреломление,  $n_o = 1,5534$ ,  $n_e = 1,5442$ , плотность  $2,65 \text{ г/см}^3$ . При нормальных условиях практически нерастворим в воде и кислотах, за исключением плавиковой. Кварц обладает хорошей прозрачностью в области  $0,18\text{--}10 \text{ мкм}$  и пьезоэлектрическими свойствами. Спайность практически отсутствует.

*Фтористый магний*  $\text{MgF}_2$  – кристалл средней твердости,  $n_o = 1,3680$ ,  $n_e = 1,3792$ . Практически нерастворим в воде, растворяется в азотной кислоте. Область прозрачности  $0,1\text{--}10 \text{ мкм}$ .

*Лейкосапфир*  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (корунд) – очень твердый термостойкий синтетический кристалл,  $n_o = 1,7681$ ,  $n_e = 1,7599$ . Его плотность  $3,98 \text{ г/см}^3$ , температура плавления  $2030 \text{ }^\circ\text{C}_T$ . Область прозрачности  $0,17\text{--}6 \text{ мкм}$ . Из лейкосапфира изготавливают защитные стекла и обтекатели приборов УФ и ИК диапазона, работающих в тяжелых условиях эксплуатации.

*Рубин* – синтетический кристалл корунда  $\text{Al}_2\text{O}_3$  с добавкой до 3 % окиси хрома  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , придающего рубину красноватую окраску. Рубин генерирует излучение в видимой области спектра и используется в качестве активного элемента твердотельных лазеров.

**Оптическая керамика.** Поликристаллический материал, прозрачный в ИК области спектра. Изготавливают оптическую керамику методом горячего прессования химически чистых кристаллических порошков с размерами зерен  $0,1\text{--}10 \text{ мкм}$ . Прессование осуществляют в вакууме при больших давлениях ( $100\text{--}300 \text{ МПа}$ ) и температуре, равной  $0,5\text{--}0,8$  температуры плавления исходного вещества. Во время прессования происходит спекание зерен и одновременно процесс рекристаллизации – рост зерен с увеличением их первоначальных размеров в  $3\text{--}5$  раз. В результате получают высокопрочный материал плотностью более 99,9 % плотности исходного монокристалла.

Оптическая керамика изотропна по оптическим и механическим свойствам, в ней отсутствуют плоскости спайности и трещины, она термостойка и нерастворима в воде.

Обозначают оптическую керамику КО и порядковым номером, определяющим ее химический состав. Физико-химические свойства оптической керамики приведены в табл. 2.9.

Таблица 2.9. Физико-химические свойства оптической керамики

Марка	Химический состав	$\rho$ , г/см <sup>2</sup>	n, для $\lambda = 2 \text{ мкм}$	Область прозрачности, мкм	$\alpha_t 10^{6^\circ\text{C}^{-1}}$
K01	$\text{MgF}_2$	3,171	1,372	1–7	11,3
K02	$\text{ZnS}$	4,09	2,2631	1–14	6,9
K04	$\text{ZnSe}$	5,25	2,4472	0,5–21	7,7
K05	$\text{MgO}$	3,578	1,7089	0,4–8	11
K06	$\text{CdTe}$	5,85	2,711	0,9–29	5,5

Одной из основных характеристик оптической керамики является прозрачность. Спектральные характеристики пропускания  $\tau = f(\lambda)$  ряда марок оптических керамик толщиной 1 см приведены на рис. 2.11. Коротковолновая граница прозрачности у них находится в пределах 0,5–2,0 мкм, длинноволновая – в пределах 8–28 мкм. Под границей прозрачности понимают длину волны, при которой коэффициент пропускания образца толщиной 2 мм равен 50 %.

Детали из оптической керамики хорошо шлифуются и полируются обычными методами обработки оптических деталей, однако наличие поликристаллической структуры влияет на чистоту обрабатываемой поверхности.

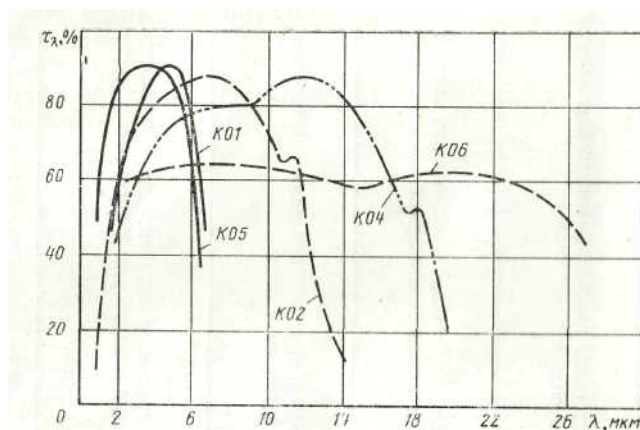


Рис. 2.11. Спектральные характеристики пропускания  $\tau = f(\lambda)$  оптических керамик толщиной 10 мм.

Оптическая керамика является основным конструкционным материалом для изготовления оптических деталей приборов, работающих в ИК диапазоне в условиях больших перепадов давления и температуры. Так, оптическую керамику KO1 можно применять при температуре до 900 °С.

### Контрольные вопросы

1. Приведите классификацию оптических материалов по строению.
2. Формула по которой вычисляется основной коэффициент дисперсии (число Аббе).
3. Температурный коэффициент линейного расширения.
4. Перечислите нормируемые показатели качества стекла.
5. Перечислите показатели химической устойчивости стекол.
6. Что такое дисперсия света?
7. Сущность поляризационно-оптического метода исследования напряженного состояния оптических материалов.

8. Причины, вызывающие двойное лучепреломление в стекле.
9. Влияние напряжений на оптические характеристики деталей и качество оптической системы в целом.
10. Полярископ-поляриметр ПКС-125. Его устройство, назначение, основные узлы и их элементы.
11. Перечислите основные параметры электромагнитного излучения.
12. Что происходит с лучами света на границе раздела двух сред?
13. Назовите основные свойства оптического стекла.
14. Расскажите о диаграмме типов стекла (диаграмме Аббе)?
15. Какие марки бесцветного оптического стекла применяют для изготовления оптических деталей?

### **Глава 3. ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ**

Хотелось бы подчеркнуть, что точность, с которой оптик обычно обрабатывает поверхности своих деталей, т. е. отступление реальных поверхностей от математически точных поверхностей, составляет несколько десятков атомных слоев. Такое оказывается возможным благодаря трем условиям традиционной оптической технологии: взаимному притиру инструмента и детали, использованию самоустанавливающихся звеньев станок – инструмент – деталь, а также прецизионной доводке поверхностей с применением в качестве обратной связи интерференционного метода контроля.

С 80-х гг. XX века в оптике шел бурный процесс синтеза. Результаты высоких технологий из различных отраслей интенсивно внедрялись в оптику. Были разработаны и внедрены высокооборотные шпиндели на воздушных подшипниках, на базе которых родились станки точного алмазного точения. Были разработаны высокоточные индукционные датчики, позволяющие воспроизводить позиционирование исполнительных механизмов с точностью менее 1 мкм. Повсеместно началось использование лазерного излучения, обеспечивающего длину когерентности в несколько метров. Вычленение тонкой структуры электромагнитного колебания – за счет определения тысячных долей его фазы – позволило регистрировать ошибки поверхностей в ангстремах.

Широкое использование вычислительной техники и компьютерных технологий позволило: автоматизировать метод последовательных приближений; обеспечивать надежную обратную связь; выполнять с высокой точностью кропотливую работу; обеспечивать воспроизводимость результатов; моделировать процессы перед началом их выполнения с целью предупреждения возможных ошибок; выполнять по программе сложные комплексы технологических операций; обеспечить безопасность процессов.

В результате внедрения перечисленных технических решений традиционная оптическая технология вышла на принципиально новый уровень качества продукции и производительности. И это еще раз убеждает в жизнеспособности традиционной оптики.

### 3.1. Технология производства оптических материалов.

#### Производство оптического бесцветного стекла

**Состав стекол.** Ряд химических веществ, например кремнезем  $\text{SiO}_2$ , борный ангидрид  $\text{B}_2\text{O}_5$ , фосфорный ангидрид  $\text{P}_2\text{O}_5$ , способны при охлаждении расплава переходить в стеклообразное состояние. Некоторые вещества, например глинозем  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , хотя и образуют стекло только при сплавлении с другими веществами, но составляют его основу – структурную сетку стекла. Такие химические вещества называют стеклообразующими. В зависимости от стеклообразующего вещества стекла относятся к различным группам: силикатным (основа  $\text{SiO}_2$ ), боратным (основа  $\text{B}_2\text{O}_5$ ), фосфатным (основа  $\text{P}_2\text{O}_5$ ) и др. Стеклообразующая основа оказывает основное влияние на ход дисперсии в стекле.

Большинство оптических стекол многокомпонентны, многообразие их оптических свойств достигается введением в состав в различных соотношениях окислов многих элементов периодической системы Менделеева (табл. 2.1). Каждый окисел оказывает определенное влияние на оптические свойства стекла. Например, чем больше в стекле кремнезема, тем меньше его показатель преломления. Увеличение окислов свинца в составе флинтowych стекол приводит к увеличению показателя преломления и средней дисперсии.

Для улучшения технологических свойств расплавленной стекломассы: уменьшения температуры плавления, снижения вязкости и повышения химической устойчивости стекла – в состав вводят окислы щелочно-земельных элементов (калия, лития, кальция). Добавление небольшого количества окислов  $\text{Al}_2\text{O}_3$  способствует снижению кристаллизационной способности стекла. Соединения мышьяка, сурьмы и церия в массовых долях 0,2–1 % используют в качестве осветлителей расплавленной стекломассы, они ускоряют процесс удаления из расплава пузырей и нейтрализуют окрашивающее действие вредных красящих примесей – окислов железа.

В технологии стекловарения применяют также химические вещества, временно понижающие вязкость стекломассы в начальный период варки, что ускоряет ведение процесса. К таким веществам относятся сульфат аммония, бифторид калия и др. В дальнейшем они разлагаются, образуя окислы, или улетучиваются в виде газообразных соединений.

В синтетический состав оптических стекол обычно входят 4–12 различных окислов. Например, одна из марок стекла типа К содержит семь окислов в следующем соотношении:  $\text{SiO}_2$  – 72 %;  $\text{B}_2\text{O}_3$  – 8,15 %;  $\text{K}_2\text{O}$  – 10,45 %;  $\text{Na}_2\text{O}$  – 7,20 %,  $\text{CaO}$  – 1,55 %;  $\text{MgO}$  – 0,45 %;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 0,20 %.

**Приготовление шихты.** Шихта для варки стекла представляет собой механическую смесь сырьевых химических материалов: солей, оки-

слов, гидроокисей. Используют как природные материалы: кварц, сульфат, так и синтетические: основные и кислотные окислы, азотнокислые соли калия и бария, углекислые соли кальция, калия и др. При высоких температурах соли и гидроокиси разлагаются, образуя окисел и газообразное соединение. Например,  $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ .

В сырьевых материалах для оптического стекловарения не должны присутствовать красящие примеси: соединения железа, хрома, никеля, меди. Присутствие соединений железа вызывает окрашивание стекла и резкое снижение пропускания света, особенно УФ области спектра. В молотом кварце, например, содержание железа в шихте обычных оптических стекол ограничено 0,008–0,01 %, а для особопрозрачных стекол 0,0004 %.

Перед составлением шихты материалы подвергают измельчению, помолу до зернистости 0,05–0,3 мм. Составляют шихту по строго определенной рецептуре с учетом поправок на фактическую влажность материала в партии и процентного содержания в нем вводимого окисла. Массу порции составленной шихты (навески) принимают равной 100 кг. В этом случае масса каждого компонента соответствует его процентному содержанию. Взвешивание компонентов осуществляется на механизированной линии.

Для варки оптических стекол используют также бой стекла той же марки в виде кусков массой 10–100 г и количестве до 40 % теоретической массы навариваемой стекломассы. От тщательности приготовления шихты и чистоты сырьевых материалов во многом зависит качество сваренного стекла.

**Варка и выработка стекла.** Варка стекла – это термический процесс, в результате которого шихта и бой стекла превращаются в расплавленную однородную стекломассу.

Варят стекло в пламенных горшковых печах периодического действия либо в ваннных печах непрерывного действия. Стекла некоторых марок с повышенными требованиями по однородности и пузырьности, имеющие склонность к разъеданию стенок керамических сосудов в расплавленном состоянии ввиду химической активности компонентов, варят в платиновых тиглях в печах с индукционным нагревом.

Выбор печи и метода варки определяется прежде всего объемом производства и требованиями к показателям качества стекла. Стекла наиболее распространенных марок К8, ТК14, ТФ5, требующиеся в больших объемах, целесообразно варить в ваннных печах непрерывного действия, так как при этом значительно облегчается механизация и автоматизация процессов превращения стекломассы непосредственно в заготовки оптических деталей.



Несмотря на ряд различий, варка стекла в горшковых и в ваннных печах имеет одну и ту же физико-химическую и технологическую основу и может быть рассмотрена на примере технологического процесса варки в одногоршковой печи периодического действия (рис. 3.1).

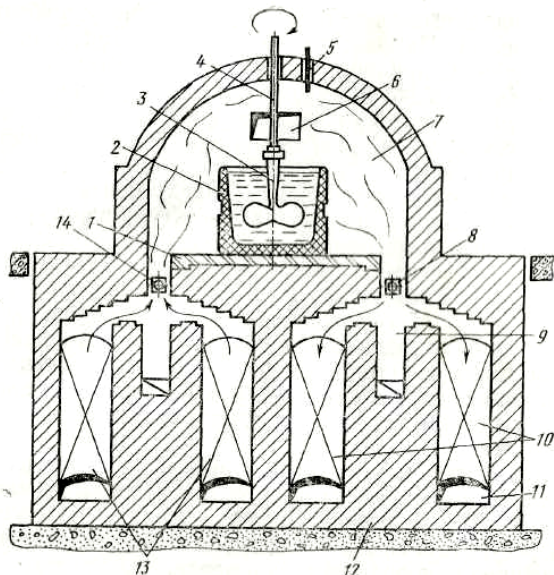


Рис. 3.1. Одногоршковая стекловаренная печь

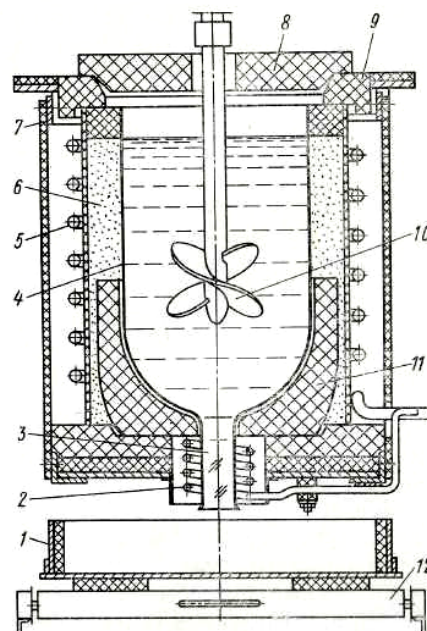


Рис. 3.2. Установка для варки стекла в платиновом тигле

Печь регенеративная с нижним пламенем, состоит из основания 12, сложенного из огнеупорного кирпича, двух пар регенераторов 10 и 13 и рабочей камеры 7. Пол 1 рабочей камеры выложен огнеупорными плитами. На задней стенке рабочей камеры имеется окно 6 для засыпки шихты, взятия проб и наблюдения за ходом процесса варки; передняя стенка имеет проем для вставки и вывоза стекловаренного горшка 2. Рабочая камера обогревается пламенем от сгорания природного газа, подаваемого попеременно через две пары горелок 8 и 14. Температура в рабочей камере печи достигает 1550–1570 °С, контроль температуры осуществляется термопарой 5.

Регенератор – устройство для утилизации теплоты отходящих газов, конструктивно представляет собой камеру или несколько камер с множеством каналов, образованных решетчатой кладкой огнеупорного кирпича. Воздух поступает в предварительно разогретую левую пару регенераторов, нагревается до температуры 900 °С и смешивается с газом, поступающим от горелок 14. Образующаяся газоздушная смесь сгорает в рабочей камере печи. Пламя омывает горшок с боков и сверху, горячие продукты сгорания уходят через горелочный канал правой пары регенераторов 10, обогревают их и отводятся через борова 11 в дымо-

вую трубу. Дымовоздушный клапан периодически через определенное время переключают, в результате чего направление подачи воздуха в печь и удаление горячих газов через регенераторы меняются. Одновременно подача газа перебрасывается с левой пары горелок 14 на правую 8, что меняет направление пламени в печи. Для предотвращения засорения каналов регенераторов отходами стекломассы печь оборудована вертикальными каналами-колодцами 9, через которые отходы периодически удаляются. На металлической обвязке печи сверху устанавливают стекло-мешальную машину; на конец штанги 4 машины при варке стекла надевают керамическую мешалку 3.

Технологический процесс варки стекла можно разделить на этапы: засыпка и развар шихты, осветление и гомогенизация расплава, охлаждение стекломассы до температуры выработки, вывоз горшка со стекломассой из печи на отлив. Для удобства ведения и контроля технологического процесса варки составляется технологический график. Типовой график варки стекла кроновой марки показан на рис. 3.3.

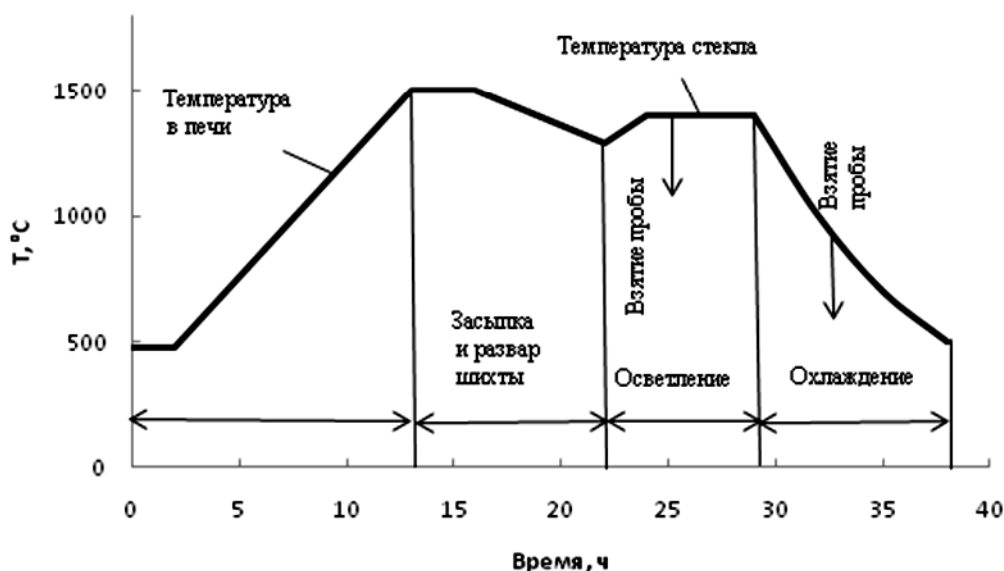


Рис. 3.3. Технологический график варки оптического стекла

В период развара испаряется влага, плавятся основные компоненты шихты и происходят химические реакции в стекломассе, в результате которых выделяется большое количество газообразных соединений  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}$  и др. На операциях осветления и гомогенизации стекломассы повышается однородность и удаляются пузыри. Температуру в печи повышают до значения, соответствующего вязкости стекла 1–10 Па·с, расплав становится менее вязким, что интенсифицирует процесс выделения и подъема на поверхность пузырей. При перемешивании происходит выравнивание химического состава стекломассы и удаление ос-

тавшихся пузырей. Процесс осветления считается законченным, когда в пробе стекла, взятой из горшка, количество пузырей не превышает допустимого. В период охлаждения стекломассу продолжают интенсивно размешивать во избежание образования свилей. Выработку стекла из горшка осуществляют двумя способами: отливом в форму или на литейный стол с прокаткой в лист. После прокатки лист стекла помещают в печь для отжига.

Рассмотрим конструкцию установки для варки стекла в платиновом тигле (рис. 3.2). Тигель 4 объемом 50–70 л установлена керамическом поддоне 11 в каркасе 7 печи. Пространство между тиглем и индуктором 5 теплоизолируют высокоглиноземистым материалом 6 и закрывают керамическим кольцом 9 с коническим отверстием под разъемную крышку 8. Индуктор изготовлен из медных трубок, внутри которых циркулирует вода для охлаждения, и закреплен на изоляционных прокладках к стойкам каркаса печи. При подаче на индуктор 5 напряжения высокой частоты в тигле 4 индуцируются вихревые токи, разогревающие его до температуры 1400–1450 °С. Шихта получает тепло от стенок тигля. На дне тигля имеется отверстие с патрубком 3 для выпуска сваренного стекла. Технологический процесс варки стекла в платиновом тигле аналогичен процессу варки в керамических горшках. При выключенном индукторе 2 стекло в патрубке охлаждается и является как бы пробкой, препятствующей выливаю расплава из тигля. После засыпки всей шихты и боя закрывают крышку 8 и расплавляют стекломассу. Размешивают стекломассу платиnorodиевой мешалкой 10 до образования однородного беспузырного расплава. Для отлива стекла включают индуктор 2, выплавляют некачественное стекло из патрубка в отдельную емкость и подводят под струю стекла тележку 12 с предварительно разогретой формой 1. После отлива форму со стеклом помещают в печь отжига. Отжиг оптического стекла проводят в камерных электрических печах.

### 3.2. Выращивание кристаллов

**Кристаллизация.** Образование и рост кристаллов – сложный физико-химический процесс, связанный со скачкообразным переходом из неупорядоченного состояния вещества, расплава, растворов, пара в кристаллическую фазу.

Переход в кристаллическое состояние происходит при строго определенной для каждого вещества температуре кристаллизации. Необходимым условием начала кристаллизации является нарушение равновесия системы, например раствора и кристаллической фазы, путем переохлаждения или перенасыщения раствора.

Процесс кристаллизации состоит из двух этапов: образования кристаллического зародыша и роста зародыша в кристалл. При выращивании кристаллов, в раствор или в расплав вводится кристаллик – затравка со строго определенной кристаллографической ориентацией. После появления кристалла зародыша или введения затравки в жидкую фазу начинается спонтанное отложение на нем вещества, образующего правильный многогранный кристалл.

Выращивание кристаллов осуществляется кристаллизацией из раствора, расплава или газовой фазы. Выбор метода кристаллизации зависит от свойств вещества, в ряде случаев кристаллы одного и того же вещества можно выращивать различными методами.

**Выращивание из раствора.** Таким способом получают кристаллы вещества, образующих перенасыщенные растворы. В качестве растворителей применяют воду, органические вещества (ацетон, толуол и др.), а также щелочные растворы.

**Выращивание кристаллов из расплава.** Этот процесс осуществляется несколькими методами.

**По методу Киропулоса** выращивают щелочно-галогенидные кристаллы из расплава (рис. 3.4). Исходная кристаллическая соль 3 расплавляется в цилиндрическом тигле 5 и нагревается до температуры, которая превышает температуру плавления на 100–120°. На поверхность перегретого расплава опускают закрепленный на охлаждаемом стержне 1 затравочный кристалл и начинают медленно снижать температуру расплава. В определенный момент на границе раздела кристалл – расплав за счет отвода теплоты через стержень создается переохлаждение, и на затравке начинает расти монокристалл 2. Кристалл растет в радиальном направлении от затравки к стенкам тигля, не распространяясь в глубину. Когда диаметр кристалла достигает размеров, близких к внутреннему диаметру тигля, стержень с растущим кристаллом начинают медленно поднимать, следя за тем, чтобы фронт кристаллизации находился под поверхностью расплава. Для предотвращения испарения и образования окислов над поверхностью расплава внутри герметичного кварцевого сосуда 6 поддерживают почти атмосферное давление инертного газа. Заготовка или расплав вращаются с частотой 2 об/мин. В течение суток кристалл, например KCl, вырастает массой 2 кг. При работе по методу Киропулоса необходимо тщательно выдерживать температурный режим расплава; нагреватели для уменьшения градиента температуры закрывают выравнивающим экраном 4.

**По методу Вернейля** выращивают пламенной плавкой кристаллы с температурой плавления 1500–2500 °С: корунды, титанаты бария, стронция и др.

При выращивании кристаллов рубина (рис. 3.5.) химически чистая окись алюминия  $Al_2O_3$  с добавкой окиси хрома  $Cr_2O_3$  в виде порошков с частицами размером 1–20 мкм загружается в бункер 2. Под действием встряхивающего устройства 1 порошок через сетчатое дно бункера попадает в струю водородно-кислородного пламени горелки 3. Снизу через муфель 6 вводится ориентированный затравочный кристалл 5. Благодаря малым размерам частицы шихты расплавляются на лету и, попадая на затравочный кристалл, образуют расплавленный слой 4. Затравка, медленно вращаясь, опускается, и по мере охлаждения расплава происходит кристаллизация и рост кристалла. Полученные кристаллы отжигают во избежание образования трещин и внутренних натяжений.

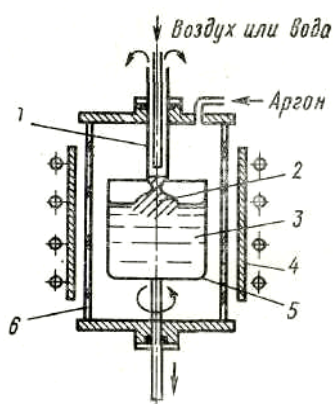


Рис. 3.4. Установка для выращивания кристаллов по методу Киропулоса

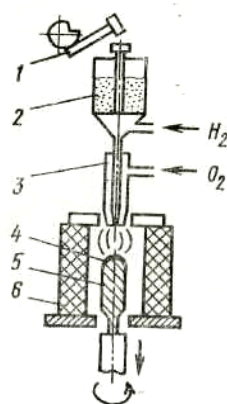


Рис. 3.5. Выращивание кристаллов рубина методом Вернейля

**Методом зонной плавки** (рис. 3.6) получают тугоплавкие кристаллы сапфира, граната и др.

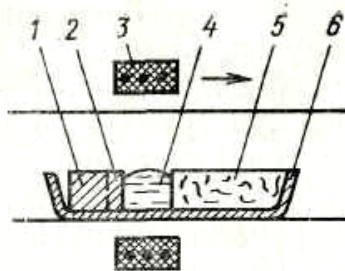


Рис. 3.6. Выращивание кристаллов методом зонной плавки

В контейнер-лодочку 6 прямоугольной формы помещают затравочный кристалл 1 и поликристаллический стержень 5. С помощью нагревателя 3 создают расплавленную зону 4, медленно сдвигают ее к затравке, добиваясь полного оплавления затравки по торцу. Затем перемещают нагреватель в направлении от затравки и смещают зону расплава. На границе затравка – расплав 2 происходит переохлаждение и кри-

сталлизация расплава. Процесс происходит в вакууме или в среде инертного газа. Лодочку изготавливают из графита, кварца или тугоплавких окислов алюминия. При зонной плавке кристалла происходит одновременно очистка исходного вещества. Примеси ввиду разной растворимости в жидкой фазе оттесняются в конец лодочки.

**Методом Бриджмена** выращивают крупные кристаллы различной формы из расплава щелочно-галогенидных и полупроводниковых веществ. Установка представляет собой вакуумную печь с двумя температурными зонами: верхней с температурой выше на 5–20° температуры плавления вещества и нижней с температурой ниже температуры кристаллизации. Шихту засыпают в тигель с коническим дном и полностью расплавляют в верхней зоне печи. Кристаллизация осуществляется при медленном опускании тигля с расплавом через поле температурного градиента, образующегося между верхней и нижней зонами печи.

**Выращивание из газовой фазы.** Тонкие монокристаллические пленки и нитевидные кристаллы получают этим методом. Кристаллизацию осуществляют сублимацией собственного пара вещества в закрытых сосудах с градиентом температуры по зонам, либо путем транспортных реакций, когда над нагретым веществом пропускают поток газа, который захватывает образующиеся газообразные продукты реакции.

При росте кристаллов в результате воздействия различных технологических факторов могут появляться нежелательные дефекты структуры. Малейшее отклонение от заданной температуры кристаллизации, изменение концентрации, скорости роста вызывает появление слоев, отличающихся по составу и физическим свойствам, в том числе и по показателю преломления. Применение недостаточно чистого сырья приводит к образованию включений и увеличению поглощения света.

### **3.3. Технология изготовления заготовок оптических деталей**

Заготовки оптических деталей из оптического стекла получают в виде прямоугольных или круглых пластин, плиток, штабиков и прессовок (рис. 3.7). На обработку заготовки поступают партиями, состоящими из заготовок одного наименования и размера. К партии прикладывают сопроводительный паспорт, в котором указывают фактические значения оптических характеристик стекла, показатели качества, номера варок и отжига.

Наиболее рациональной заготовкой деталей типа линз и призм является прессовка (рис. 3.7, д), повторяющая конфигурацию готовой детали. Для изготовления прессовок необходима технологическая оснастка: прессформа, шаблоны и др. Стоимость оснастки окупается только

при прессовании определенного числа заготовок. Поэтому ГОСТ 13240–78 «Заготовки оптического стекла» установлен минимальный объем партии заготовок, поставляемых в виде прессовок (Табл. 3.1).

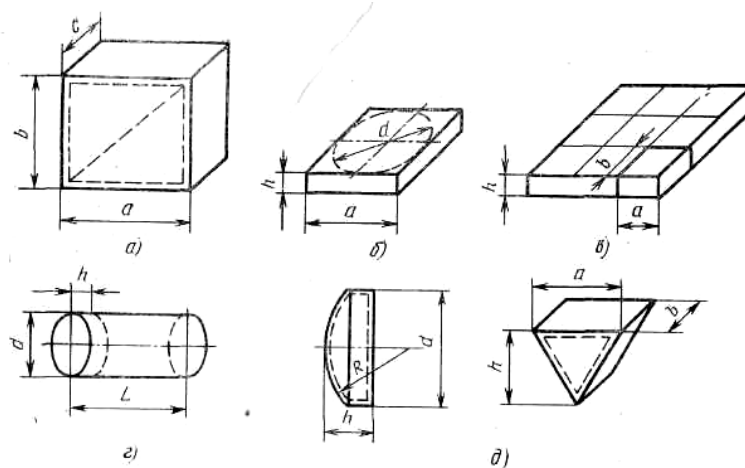


Рис. 3.7. Заготовки оптических деталей: а – прямоугольная пластина; б – плитка для круглых деталей; в – плитка с размерами, кратными размерам единичной заготовки; г – штабик с круглым сечением; д – прессовки линзы и призмы

Таблица 3.1. Минимальный объем партии заготовок

Масса заготовки, г	Объем при заказе, шт.
1,5–10	2000
10–15	1000
50–100	250
100–250	150
250–500	100

Технические условия (ТУ) на заготовку составляют на основе чертежа оптической детали. В ТУ приводится эскиз заготовки с необходимыми для изготовления и контроля размерами и допусками, указывается марка стекла, технические требования к стеклу и заготовке, масса и число заказываемых заготовок в штуках (рис. 2.6). На эскизе рядом с размерами заготовки в скобках проставляют как справочные соответствующие размеры готовой детали. Для деталей с размерами более 150 мм на заготовке указывают также световой диаметр или расположение рабочей зоны. Вне рабочей зоны дефекты типа одиночных пузырей и узловых свилей не нормируются.

Маршрутную технологию (МТ) изготовления заготовки технолог разрабатывает с учетом: требований к стеклу, размерам партии и габаритным размерам детали. Выбирается метод и последовательность опе-

раций на основе типовых технологических процессов. Номер маршрутной технологии указывают в ТУ на заготовку.

Коэффициент запуска (КЗ), равен отношению массы сырьевого стекла, необходимого для изготовления заготовки, к теоретической массе заготовки, КЗ устанавливают на основе имеющихся нормативов и выбранной МТ. Коэффициент запуска зависит от требований к показателям качества стекла. Например, для заготовок линз фотооптики диаметром 20–50 мм значение КЗ находится в пределах 2–3. Размеры заготовки рассчитывают с учетом необходимого припуска на обработку и предельных отклонений размеров. Значение припуска зависит от выбранной технологии, метода базирования детали при обработке и толщины дефектного слоя поверхности заготовки. Для заготовок-прессовок размером до 150 мм толщина заготовок не должна быть менее 3 мм для линз и 4 мм для плоских деталей, отношение диаметра или диагонали заготовки к ее толщине должно быть в пределах от 15 : 1 до 1,25 : 1.

Технологические процессы изготовления заготовок оптических деталей можно разделить на две группы:

- 1) холодная разделка
- 2) горячее формование.

При холодной разделке сырьевое стекло: стеклоблоки, плитку – после визуального осмотра и разметки раскалывают или распиливают алмазным инструментом.

Горячее формование заготовок осуществляют в формах из кусочков стекла, разогретых до температуры пластической деформации, или жидкой стекломассы, вырабатываемой из ванной стекловаренной печи.

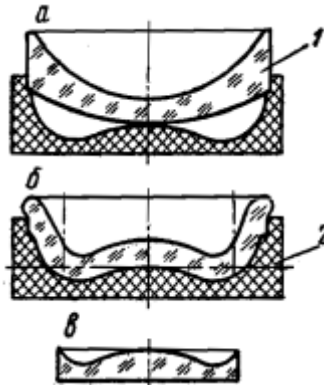
#### **Горячее формобразование заготовок:**

- 1) моллирование;
- 2) прессование.

**Моллирование** – процесс, в ходе которого поверхность заготовки, обращенная к рабочей части формы, под действием нагрева за счет пластической деформации материала заготовки принимает эту форму, а внешняя поверхность заготовки деформируется так, что получается требуемая поверхность, не нуждающаяся в последующей обработке, называют моллированием (рис. 3.8).

Моллирование может быть рекомендовано для серийного изготовления светотехнических и оптических деталей, например зеркал осветительных светособирающих устройств приборов, обтекателей, иллюминаторов, рабочие поверхности которых образованы эквидистантными сферическими или асферическими поверхностями.

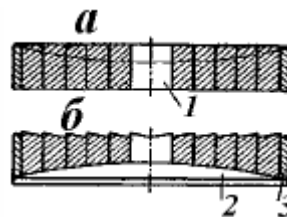




*Рис. 3.8. Этапы процесса моллирования: а – исходная заготовка 1 уложена в форму; б – процесс моллирования завершен; в – готовая деталь вырезана из моллированной заготовки по линиям 2*

**Прессование.** В качестве материала для прессования оптических деталей наиболее часто используют органические стекла, например полиметилметакрилаты. Температура размягчения полимеров находится в низком температурном диапазоне (90–140° С), не требующем больших затрат на нагревание и теплоизоляцию.

Основным инструментом при пластической обработке оптических деталей является пресс-форма. На рис. 3.9 приведена конструкция пресс-формы, используемой для формирования линз Френеля.



*Рис. 3.9. Пресс-форма для пластического формования оптических деталей: а – исходный набор колец; б – готовая прессформа для формования линз Френеля: 1 – заглушка; 2 – шаблон; 3 – центрующее кольцо*

**Тонкий отжиг** – последняя операция технологического процесса изготовления заготовок оптических деталей. Цель его – снизить до минимально допустимых значений остаточные термические напряжения в стекле, т. е. ликвидировать физические неоднородности и получить заготовки с одинаковыми для данной партии значениями показателей преломления и дисперсии.

### 3.4. Расчет припуска на обработку заготовки

Выбор оптимальных припусков имеет большое технико-экономическое значение при проектировании технологических процессов, так как завышение припусков приводит к перерасходу материалов, инстру-

мента, увеличению трудоемкости и себестоимости изготовления деталей. Заниженные припуски увеличивают материальный брак, требуют повышенной точности установки заготовок на приспособлениях и т.п. В оптическом производстве принят опытно-статистический метод установления припусков, основу которого составляют систематизированные и обобщенные данные предприятий. Опытные значения припусков завышены по сравнению с расчетно-аналитическими, так как в них закладывают такие условия изготовления заготовок и их механической обработки, при которых возможен минимальный материальный и технологический брак.

Припуск  $z_t$  на толщину по оси заготовок линз и пластин устанавливают от верхнего предела допуска на размер готовой детали. Величину  $z_t$ , которая лежит в пределах от 1,8 до 8,0 мм, назначают в зависимости от диаметра  $D_0$  круглых или наибольшей стороны некруглых пластин:  $z_t = 0,014D_0 + 1,22$  мм.

Припуск  $z_d$  на диаметр устанавливают от номинального размера готовой детали от 1,5 до 12 мм. Назначают  $z_d$  так же, как и припуск на толщину по оси, в зависимости от диаметра детали. При толщине края более 0,3 мм:  $z_d = 0,022D_0 + 1,05$  мм.

При толщине менее 0,3 мм краевая зона заготовки деформируется в процессе обработки и усложняет формообразование. Уменьшая припуск на диаметр, увеличивают толщину края заготовки, а вместе с тем и ее жесткость.

Припуски на радиусы кривизны  $R_{заг}$  сферических поверхностей пресованных заготовок устанавливают в зависимости от назначенного ранее припуска  $z_t$  на толщину по оси и коэффициента  $k$ , предусматривающего утолщение или утоньшение заготовки по краю. Радиус увеличивают (+) при обработке с края и уменьшают (–) при обработке с центра:

для выпуклых поверхностей

$$+ R_{заг} = +R_0 + \frac{z_t}{2} \pm k ;$$

для вогнутых поверхностей

$$- R_{заг} = -R_0 + \frac{z_t}{2} \pm k$$

где  $R_0$  – радиус кривизны поверхности готовой детали. Коэффициент  $k$  находят из выражения  $k = \left( \frac{R_0}{D_0} \right)^2$ ;  $D_0$  – диаметр детали.

Припуски на длину  $z_L$  и ширину  $z_{III}$  некруглых пластин устанавливают от номинального размера готовой детали. Их значения (от 0,5 до 4,0 мм) назначают по размеру наибольшей стороны детали.

Номинальные размеры заготовок – толщину, диаметр, длину, ширину – определяют с учетом соответствующего номинального размера готовой детали, поля допуска на данный размер, припуска на механическую обработку и допуска по ГОСТ 13240–67 на размер заготовок, изготавливаемых методом прессования.

### **3.5. Основные понятия, определяющие достижение качества оптических деталей**

#### **Виды поверхностей**

Оптическая деталь ограничена исполнительными (рабочими), вспомогательными и свободными поверхностями.

*Исполнительные* поверхности предназначены для выполнения детали своего служебного назначения. Это полированные сферические или асферические поверхности.

*Вспомогательные* поверхности ОД служат для присоединения к ним оправ, упоров и установочных плат. Это шлифованные цилиндрические или плоские поверхности, используемые как базовые в процессе сборки оптического прибора.

*Свободные* поверхности завершают конструкцию ОД. Они не соприкасаются с другими деталями прибора и выполняются шлифованными – с целью предохранения ОД от заколов (фаски).

#### **Допуски**

*Чертежи оптических деталей.* Оптические детали изображают на чертежах в соответствии с общими правилами, установленными ЕСКД и ГОСТ 2.412 – 81. Чертеж полностью характеризует оптическую деталь и служит исходным документом для разработки технологического процесса ее изготовления и контроля.

При изображении оптической детали используют общие правила машиностроительного и приборостроительного черчения, но ввиду специфики ее служебного назначения требуются некоторые дополнения, а также выполнение особых нормативных требований.

Приведем некоторые общие особенности выполнения чертежей оптических деталей по ГОСТ 2.412 – 81:

- детали располагают на чертежах по ходу луча света, идущего слева направо;
- числовое значение радиусов сферических исполнительных поверхностей обозначают буквой R;
- асферические поверхности определяют уравнением воспроизводящей кривой профиля поверхности вращения;

- цилиндрические поверхности задают значением ее радиуса  $R$ , перед которым пишут «Цилиндр»;
- в правом верхнем углу чертежа располагают таблицу, в которой указывают требования к материалу, требования к детали и оптические характеристики;
- в поле чертежа и примечаниях указывают дополнительные конструктивные особенности и технологические требования, например, чертеж штрихов и цифр в увеличенном масштабе с указанием размеров, размер светового диаметра, размеры для справок отмечаются звездочкой и т. п., а также обозначение материалов покрытия с указанием его типа (табл. 3.2);
- в штампе обязательно пишут наименование детали, марку стекла и ГОСТ, массу детали, масштаб чертежа;
- для сборочных единиц таблица состоит только из требования к изделию и оптических характеристик;
- на чертежах сборочных единиц склеиваемую поверхность выделяют линией двойной толщины и указывают стрелкой с буквой  $K$  в ее разрыве.

Таблица 3.2. Типы покрытий оптических деталей и их условные обозначения

Тип покрытия	Отражающее		Свето-дели-тельное	Про-свет-ляю-щее	Фильт-рую-щее	За-щит-ное	Токо-про-водя-щее	По-ляри-зую-щее
	внеш-нее	внут-реннее						
Обозна-чение на чертеже								

Пример выполнения рабочего чертежа оптической детали приведен на рис. 3.10. по ГОСТ 2.412 – 81.

**Показатели качества деталей.** В таблице чертежа указывают значения показателей качества материала.

Значения оптических характеристик, помещенных в таблице, определены при габаритном расчете системы, и при подготовке производства технологии не должны их пересматривать.

Для разработки технологического процесса изготовления оптических деталей наиболее важны требования, которые указаны на чертеже для изготовления.

Наличие или отсутствие какого-либо показателя в таблице требований к детали имеет для процесса изготовления вполне определенный технологический смысл. Числовые значения показателей качества обуславливают трудоемкость и сложность обработки детали.

Кроме главных показателей качества изготовления оптических деталей существуют и дополнительные показатели, но последние задают значительно реже главных.

Допуски, указываемые в таблицах требований к деталям, как показатели качества выражают суммарное действие погрешностей технологического базирования, обработки и измерений.

Суммарные погрешности, независимо от причин их возникновения, складываются по правилу максимума, минимума или вероятностно и не должны превышать значений допусков, указанных в таблицах требований к деталям.

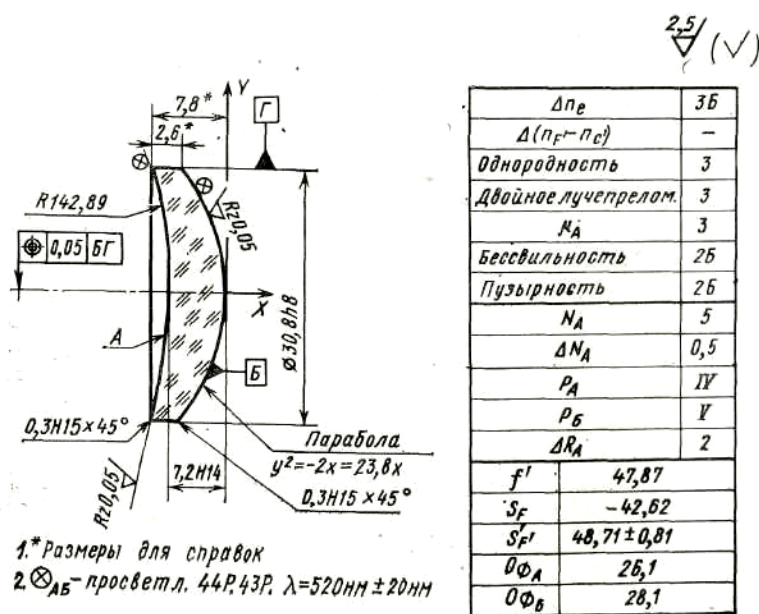


Рис. 3.10. Линза с асферической поверхностью из стекла БК10

### Допуски по кривизне, форме, классам чистоты

Полированные поверхности оптических деталей имеют отклонения от заданных геометрически по: стрелке кривизны, форме и классам чистоты.

Допуск на стрелку кривизны исполнительных оптических поверхностей измеряют числом интерференционных колец  $N_A$ . (рис. 3.10,  $N_A = 5$ ), укладываемых на диаметре детали при контроле пробным стеклом (оптическим калибром).

Контроль сферических и плоских полированных оптических поверхностей осуществляют с помощью пробных стекол или интерферометров на рабочем месте и в ОТК: сравнивают кривизну контролируемой поверхности детали с кривизной измерительной поверхности пробного стекла. При наложении пробного стекла на контролируемую поверхность в тонком, переменном по толщине воздушном промежутке

происходит интерференция света. Интерференционная картина при освещении белым светом имеет вид радужных колец или полос. В монохроматическом свете она состоит из темных и светлых колец или полос. В заводской практике интерференционную картину обычно называют «цветом».

В некоторых случаях  $N_A$  и  $N_B$  указывают со знаками плюс или минус. Это означает, что при знаке плюс наблюдается воздушный зазор на краю, касание в центре – «общий бугор», а при знаке минус – зазор в центре, касание на краю – «общая яма» (рис. 3.11). Для плоской поверхности это означает, что при знаке плюс она слегка выпуклая, а при знаке минус слегка вогнутая.

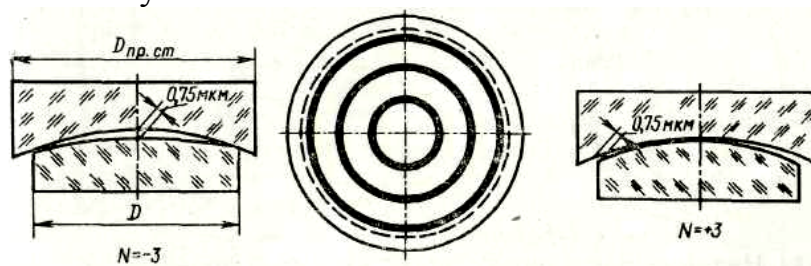


Рис. 3.11. Измерение пробным стеклом отклонений кривизны поверхности линзы

Значениям  $N_A$  и  $N_B$  пропорциональна толщина слоя стекла, который надо споллировать, чтобы сделать отклонение кривизны поверхности меньше допустимой, заданной чертежом. Толщина этого слоя по оси увеличивается пропорционально квадрату диаметра детали. Трудности обработки в процессе полирования в связи с этим возрастают ориентировочно пропорционально квадрату или кубу диаметра детали; при этом следует учесть, что полирование выполняется приблизительно в 20 раз медленнее шлифования.

Получение значений  $N_A$  и  $N_B$ , меньших заданных чертежом, составляет одну из главных задач, решаемых на операциях шлифования и полирования. При единичном производстве решение этой задачи требует высокой квалификации рабочего для непрерывного управления параметрами геометрии инструмента и настройки станка. При этом необходимо учитывать еще ряд технологических факторов: характер изменения кривизны поверхности в зависимости от физических свойств данной марки стекла, способа блокировки, теплового режима обработки и т. п.

Значительную долю допусков на  $N_A$  и  $N_B$  составляют отклонения, возникающие при обработке в зависимости от способа крепления заготовки. Например, при эластичном блокировании можно получить  $N < 1$ , а при жестком блокировании – обычно  $N = 2-5$ .

При серийном производстве требуется тщательная отработка технологического процесса с последующей его стабилизацией для надежного получения заданных  $N_A$ ,  $N_B$  по методу автоматического получения размера при заданной настройке станка.

*Допуск формы исполнительных оптических поверхностей*

Если на поверхности детали имеются местные отклонения от сферической формы, то они приводят к местным искривлениям интерференционных полос. Местные отклонения  $\Delta N$  измеряются в долях полосы и определяются отношением изогнутости  $h$  местного искривления полосы к ее ширине  $H$ :

$$\Delta N = h/H.$$

Интерференционные картины характерных местных ошибок показаны на рис. 3.12.

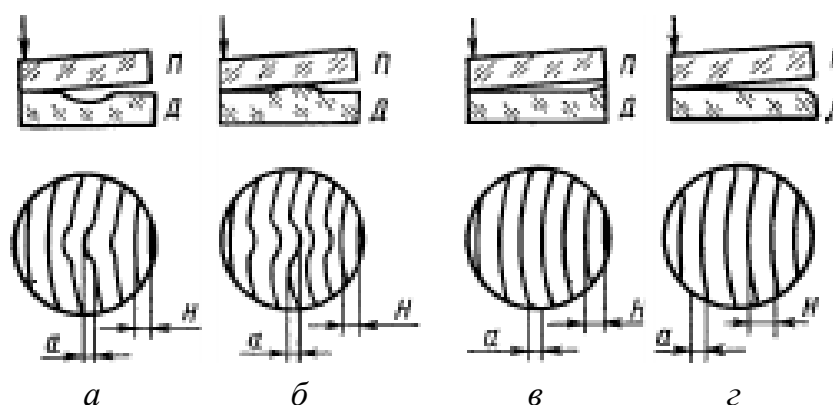


Рис. 3.12. Интерференционные картины местных ошибок

Если на интерференционной картине кольца вытянуты в одном и сжаты в другом направлении или изогнутые полосы не составляют часть окружности, то имеется общее отклонение формы поверхности от сферической. Это отклонение называют астигматизмом поверхности. Геометрически это означает, что оптическая поверхность стала сфероцилиндрической. Интерференционные картины для ряда типовых аберраций приведены на рис. 3.13.

Местные ошибки формы оптических поверхностей уменьшают предел разрешения системы, что не компенсируется размерами толщин и радиусов линз, воздушных промежутков. Поэтому подход к допустимым значениям  $\Delta N$  строже, чем к  $N$ .

Местные ошибки возникают как результат резкого несоответствия размеров инструмента и обрабатываемой поверхности, грубых ошибок в настройке станка, наличия неоднородностей и разной температуры притирающихся материалов.

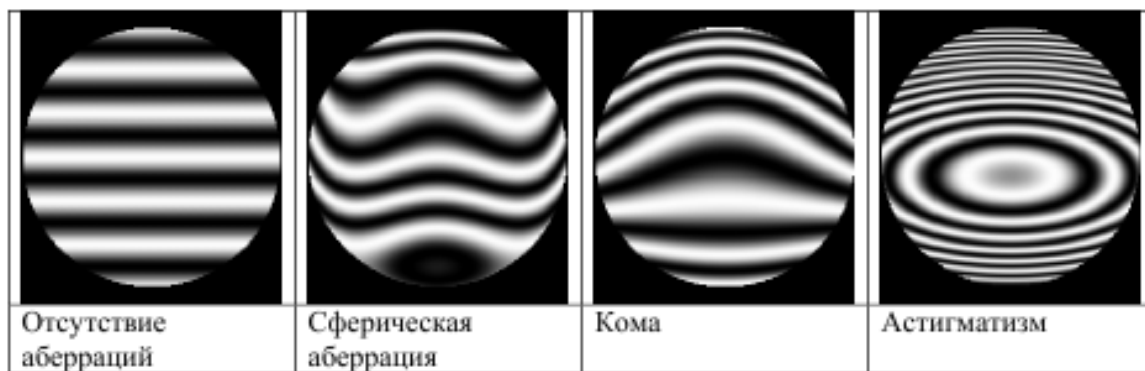


Рис. 3.13. Форма интерференционных картин для ряда типовых aberrаций

Ошибки формы  $\Delta N \geq 3$  полированной поверхности обычно исправляют тонким шлифованием.

Допуск на дефекты чистоты полирования  $P_A, P_B$  выражают в классах чистоты оптических поверхностей по ГОСТ 1114–76, которым оговорены размеры и число дефектов – царапин и точек (рис. 3.10,  $P_A$  IV,  $P_B$  V).

Требования регламентированы одиннадцатью классами P от IXa до I для поверхностей, удаленных от плоскостей изображения, и еще более строгим классом P0 с подразделениями 0–40, 0–20 и 0–10 для поверхностей, расположенных в плоскостях изображения предметов. Например, по классу P подразделением 0–10 допускается ширина царапины 0,002 и диаметр точки 0,004 мм.

Таблица 3.3. Значения допусков на показатели качества оптических деталей

Элементы оптических приборов		Допуски на оптические поверхности по			
		кривизне N	форме $\Delta N$	классам чистоты P	
Объективы	коллиматоров и астрономические	1–3	0,2–0,3	VII, VIII	
	телескопические	3–5	0,3	IV, V	
	аэрофотосъемочные	1–3	0,1–0,5	IV–VI	
	фотографические	3–5	0,3–0,5	IV–VI	
	микроскопов	до $10^X$	2–3	0,2–0,5	III
		от $10^X$ до $40^X$	1–2	0,1–0,2	II
свыше $40^X$		0,5–1	0,1–0,2	III–V	
Окуляры, лупы		3–5	0,5–1	III–V	
Призмы	отражающие поверхности	0,5–1	0,1–0,3	II, III	
	преломляющие поверхности	2–4	0,5–1	III–IV	
Сетки и коллективы		5–10	1–2	0–10, 0–20, 0–40	
Защитные стекла и светофильтры перед объективом		3–5	0,3–0,5	V	
Светофильтры за и перед окуляром		5–10	0,8–2	II, III	
Зеркала		1–2	0,2–0,3	III, IV	



Последние требования столь строги, что оговариваются круговые средняя и краевая зоны диаметром  $1/3$  и  $2/3$  светового диаметра. Дефекты в краевых зонах допускаются, а в центральной зоне их не должно быть.

Очень трудно не допустить появления царапин и точек на полированных оптических поверхностях. Главными причинами их образования являются загрязнение среды, окружающей рабочее место оптика, и загрязнение порошкообразных шлифующих и полирующих материалов.

В расчетах, проводимых в учебных целях, можно использовать значения допусков (табл. 3.3), назначаемых на показатели качества оптических деталей.

### **3.6. Основы процессов обработки оптических поверхностей**

Технологический процесс изготовления линз состоит из выполняемых по определённому маршруту операций обработки исполнительных поверхностей, операций совмещения геометрической оси линз с оптической и снятия фасок на ребрах, образованных пересечением преломляющих поверхностей с цилиндрической образующей. Построение процесса определяется типом производства. В данном учебном пособии рассматривается изготовление плосковыпуклой линзы в опытном или мелкосерийном производстве.

Подготовительная операция необходима для определения достаточности предоставленной разработчиком информации для изготовления детали, грамотности выполнения чертежа и установления технических требований; наличия достаточной информации об инструментах, приспособлениях для изготовления детали; соответствия указанных типов станков имеющимся на предприятии-изготовителе.

При обработке заготовок, первичной операцией технологического процесса есть установка (блокировка) заготовки на приспособление для выполнения операций грубого шлифования. Блокировочная операция включает в себя присоединение и жесткое закрепление обрабатываемой заготовки на станке. Операции тонкого шлифования и полирования выполняются при эластичном способе блокирования заготовок, положение заготовок фиксируют приклеиванием к приспособлению толстым ( $0,05d_{\text{заг}}+1,0$  мм) слоем смолы.

После блокировки осуществляют грубое шлифование последовательно первой и второй преломляющих поверхностей и вспомогательных поверхностей. Далее следуют тонкое шлифование и полирование исполнительных поверхностей, центрирование, фасетирование и нанесение покрытий.

## Шлифование

Процесс шлифования стекла может осуществляться двумя способами: закрепленными абразивными зёрнами и суспензиями абразивных порошков.

Процесс шлифования закрепленными абразивными зёрнами применяют для обработки вспомогательных поверхностей с шероховатостью до 2,5 мкм. Производительность обработки оптических поверхностей закрепленными абразивными зёрнами на этих операциях определяется объемом припуска, удаленного в единицу времени, и отсутствием дефектов (царапин, точек) на шлифованной поверхности.

Операцию грубого шлифования выполняют на станках с алмазным инструментом прямого профиля.

Инструмент с закрепленными абразивными зёрнами, также применяется при тонком шлифовании оптических поверхностей, что позволяет избежать длительной технологической операции шлифования несколькими мелкими абразивными порошками и подготовить поверхность непосредственно к полированию. В этих случаях применяют алмазные инструменты с зёрнами мелких размеров и материал связки, имеющий некоторую пластичность.

Шлифование суспензиями абразивных порошков подготавливает исполнительные поверхности к последующему полированию с заданными значениями N, ΔN, P. Шлифующая суспензия представляет собой взвесь порошка абразивных зёрен в воде.

Разрушение стекла происходит под действием абразивных зёрен, передающих вибрационно-ударным действием кинематическую энергию инструмента на обрабатываемую поверхность стекла. Стекло разрушается абразивными зёрнами, и взамен исходной поверхности образуется поверхность с новыми более совершенными качествами.

Тонкое шлифование исполнительных поверхностей выполняют на шлифовально-полировальных станках различных марок. Например, на станке 6ШП-100М, шлифуют детали, диаметр которых не превышает 100 мм, на станке 3ШП-320М – детали, диаметр которых не превышает 320 мм. Шлифование осуществляют в несколько переходов с использованием водных суспензий микропорошков электрокорунда зернистости М60, М40, М28, М14, М10, в системе станок – планшайба (гриб или чаша) – деталь – суспензия абразивных порошков – чугунный или латунный шлифовальник.

Диаметр планшайб, высоту грибов и глубину чашек определяют исходя из условий, при которых может быть достигнута минимальная скорость изменения кривизны рабочей поверхности инструмента. Диаметр планшайб находят по известному диаметру заготовки или блока

заготовок с учетом положения инструмента, который может выполнять функцию как нижнего, так и верхнего звена.

Радиус кривизны рабочей поверхности шлифовальника для каждого перехода определяется по известному радиусу кривизны поверхности готовой детали, зернистости абразива, для которой предназначен инструмент и глубине слоя, нарушенного этим абразивом, толщине слоя абразива определенной зернистости, находящегося в зазоре между притирающимися поверхностями. Радиус кривизны поверхности заготовки после шлифования абразивом какой-либо зернистости отличается от радиуса готовой детали на величину, соответствующую глубине слоя, нарушенного этим абразивом.

Радиус и форму поверхности оптической детали контролируют на сферометре или пробным стеклом, которое накладывается на шлифованную поверхность заготовки.

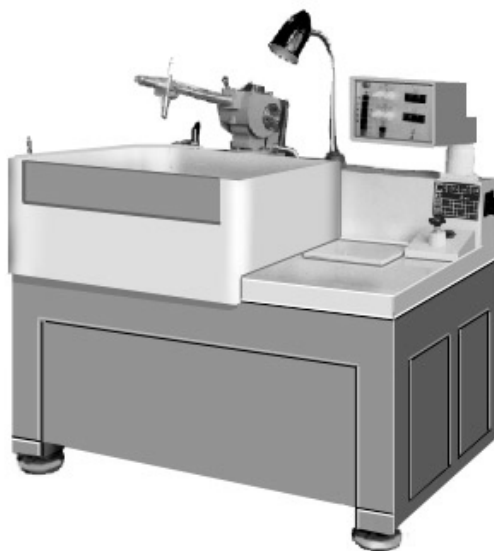
### **Полирование оптических поверхностей**

Цель полирования заключается в том, чтобы придать исполнительной поверхности прозрачность и значения  $N$ ,  $\Delta N$ ,  $P$ . Процесс полирования стекла водными суспензиями полирующих порошков имеет более сложную, чем шлифовальные, физико-химическую природу. Шероховатость полированной поверхности установлена ГОСТ 2789 – 73 как  $Rz = 0,05-0,1$  мкм.

Полирование выполняют на тех же станках, что и шлифование, но при меньшей частоте вращения рабочих инструментов. На рис. 3.14. изображен станок полировально-доводочный 6ПД-100М, предназначенный для тонкого шлифования, полирования и доводки сферических и плоских поверхностей оптических деталей или блоков методом притира с применением свободного абразива.

Полирование ведут на станках водными суспензиями полирита с применением смоляных полировальников. Марку смолы выбирают в зависимости от интенсивности процесса и температуры помещения. Наружный рельефный слой, образованный шлифованием, удаляется полированием полностью. Полирующие порошки состоят из окислов металлов: железа, церия, лантана с размерами зерен  $0,2-5$  мкм; порошки взвешены в воде и находятся между притирающимися поверхностями полировальника и стекла. По сравнению со шлифующими, зерна полирующих порошков имеют меньшую твердость и менее резко выраженные абразивные свойства самозатачивания при раскалывании. Вода, в которой взвешены зерна, в первые моменты подачи суспензии оказывает гидростатическое противодействие наружу, а затем растекается, и зерна закрепляются, адсорбируясь в наружном слое смолы. Часть зерен,

еще не закрепившихся в смоле, перекачивается, или, закрепившись на мгновение, продолжает движение по направлению вектора относительной скорости. Зерна срезают вершины рельефного слоя, которые сразу становятся гладкими, полированными. Перекачиваемые зерна, закрепляясь в смоле, и одновременно в порах и бороздах, на отполированных элементарных площадках стекла как бы склеивают их с поверхностью полировальника и в дальнейшем при относительном перемещении сдирают кусочки коллоидной пленки, образующейся на поверхности стекла под химическим воздействием воды.



*Рис. 3.14. Станок полировально-доводочный 6ПД-100М*

Остаточные неровности полированной поверхности меньше  $0,03$  мкм, т. е. меньше длины волны видимого излучения, так как размер части зерна, проникающей в стекло, не превышает  $0,3$  мкм. При полировании с помощью механических воздействий можно управлять процессом образования поверхности с заданными значениями  $N$ ,  $\Delta N$  и  $P$ .

Царапины в процессе полирования образуются при попадании под инструмент частиц более твердых и крупных, чем зерна полирующего порошка. Размеры дефектов частоты полированных поверхностей оптических деталей нормируются и указываются соответствующими значениями.

Контроль поверхности производится с помощью контрольных стекол и микроскопа. Этот метод контроля основан на законах интерференции.

Помимо контроля поверхности после каждой операции по окончании механической обработки и нанесения покрытия осуществляется более точный и сложный контроль чистоты поверхности, бессвильности, пузырьности просматриванием детали на просвет, а также проверяется интегральный коэффициент отражения и коэффициент отражения света.

Упаковочная – окончательная операция. Деталь, изготовленная из стекла, как известно, является хрупкой, и малейшая неосторожность может привести к нарушению оптических свойств. Поэтому для избежания механических воздействий при транспортировке и хранении готовую деталь упаковывают в вату ТУ 17 РСФСР 63-9022–88 и укладывают в картонные ящики (ГОСТ 3479–85).

### 3.7. Абразивные и полирующие материалы

**Абразивные материалы.** К абразивным материалам относят порошкообразные твердые кристаллические вещества, зерна которых при раскалывании образуют острые режущие грани, способные самозатачиваться при изнашивании. Абразивные свойства материала комплексно оценивают коэффициентом шлифующей способности, который представляет собой отношение массы стекла, сошлифованного в стандартных условиях данным абразивом, к массе стекла, сошлифованного природным алмазом.

В оптическом производстве используются как природные абразивные материалы: алмаз, кварцевый песок, наждак, корунд, так и искусственные: синтетический алмаз, электрокорунд, карбид бора. Применение природных материалов в настоящее время значительно сократилось, так как искусственные материалы имеют более высокую шлифующую способность, более однородны по свойствам и содержат меньше примесей.

Основные физико-механические свойства абразивных материалов, используемых в технологических процессах обработки оптических деталей, приведены в табл. 3.4.

Таблица 3.4. Физико-механические свойства абразивных материалов

Наименование материала	Твердость		$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Относительная шлифующая способность
	по минералогической шкале	микротвердость, Н·10 <sup>10</sup> , Па		
Алмаз природный	10	10	3,01–3,56	1
Алмаз синтетический	10	8,6–10	3,48–3,54	0,7–1
Карбид бора	9,8–9,9	3,7–4,5	2,48–2,52	0,5–0,6
Карбид кремния	9,5–9,7	2,8–3,5	3,16–3,99	0,25–0,45
Электрокорунд	9–9,2	1,8–2,4	3,93–4,01	0,15–0,25
Песок кварцевый	7	1–1,1	2,6–2,65	0,02–0,03

**Классификация абразивных материалов по зернистости и зерновому составу.** Порошки электрокорунда, карбида бора и других абразивных материалов, кроме алмаза, в зависимости от размера зерен делят на группы: шлифзерно (2000–160 мкм), шлифпорошки

(125–40 мкм), микрошлифпорошки (63–14 мкм), тонкие микрошлифпорошки (10–3 мкм), а внутри группы классифицируют по зернистости.

Микрошлифпорошки обозначают буквой М и цифрой, указывающей наибольший размер зерен основной фракции в микрометрах.

Классификация шлифовальных порошков по зернистости и область их применения в технологических процессах обработки оптических деталей показаны в табл. 3.5.

Таблица 3.5. Классификация шлифовальных порошков

Наименование группы шлифовальных порошков	Зернистость	Размер зерен основной фракции, мкм	Область применения
Шлифзерно	20	250–200	Грубое шлифование
	16	200–160	
Шлифпорошки	12	160–125	Шлифование
	10	125–100	
	8	100–80	
	6	80–63	
	5	63–50	
Микрошлифпорошки	4	50–40	Тонкое шлифование, полирование деталей из полупроводниковых материалов и кристаллов
	M63	63–50	
	M50	50–40	
	M40	40–28	
	M28	28–20	
Тонкие микрошлифпорошки	M20	20–14	
	M14	14–10	
	M10	10–7	
	M7	7–5	
	M5	6–3	

Порошки природного и синтетического алмазов в зависимости от размеров зерна делятся на три группы: шлифпорошки (3000–40 мкм), микропорошки (80–1 мкм), субмикропорошки (1,0–0,1 мкм и мельче).

**Полирующие материалы.** Для полирования оптических деталей применяют тонкодисперсные порошки различных окислов металлов.

Основным показателем качества полировального порошка является его полирующая способность, характеризующаяся объемом сполированного стекла К8 в стандартных условиях за определенное время. Полирующая способность зависит от твердости, формы и размеров зерен полировальных порошков и химической активности вещества порошка по отношению к обрабатываемому материалу и материалу полировальника. Для повышения полирующей способности порошков практи-

куют введение в массу основного порошка добавок других окислов металлов и растворимых солей.

Полирующие порошки должны хорошо смачиваться водой, стабильно сохранять свои полирующие свойства, не образовывать на полированной поверхности деталей царапин и налетов.

*Полирит* – основной полирующий материал для обработки деталей из оптического стекла. Он представляет собой гомогенный твердый раствор окислов редкоземельных элементов на основе двуокиси церия. Получают полирит путем высокотемпературного обжига (850–1050 °С) карбонатов редкоземельных элементов. Высокие полирующие свойства имеют порошки полирита, состоящие из кристаллических зерен пластинчатой формы со средними размерами зерна 2–3 мкм. Чем больше в составе двуокиси церия, тем выше полирующая способность полирита.

Для полирования твердых кристаллов, волоконно-оптических пластин и других деталей в качестве полирующего материала используют алмазные микро- и субмикropорошки [9].

### **3.8. Метод магнитно-абразивного полирования**

Одним из перспективных методов финишной обработки деталей является метод магнитно-абразивного полирования (МАП) [14]. Сущность метода: магнитно-абразивный порошок располагается между полюсами электромагнитов, создавая режущий инструмент в виде своеобразной "полирующей щетки". При движении заготовки через рабочую зону порошок оказывает давление на деталь в каждой точке поверхности, что приводит к съему металла и сглаживанию микронеровностей. В роли связки абразивных зерен используется магнитное поле, обладающее упругими силами воздействия на единичные зерна. Причем степень упругости этой связки легко регулируется изменением напряженности магнитного поля, обеспечивая различные этапы обработки. Тем самым МАП может приближаться к шлифованию свободным или связанным абразивом, позволяя использовать преимущества первого или второго в одном рабочем цикле.

В общем случае при магнитно-абразивной обработке (МАО) деталей в качестве основной рабочей среды используется ферроабразивный порошок. Ферроабразивные порошки изготавливают на основе железа и карбидов переходных металлов – вольфрама, молибдена, ниобия и титана. Большинство технологических процессов МАО реализуется с использованием смазочно-охлаждающих жидкостей, существенно повышающих эффективность обработки. Достоинствами МАО являются [15]: универсальность абразивного инструмента, что позволяет обраба-

тывать заготовки из различных материалов и конфигураций; незначительный нагрев заготовки и ее участков во время обработки, отсутствие тепловых дефектов и внедрения абразива в поверхностный слой, что повышает эксплуатационные свойства изделий; возможность формирования поверхностей с высотой микронеровностей менее 10 нм; обеспечение заданного выглаженного или развитого шероховатого микрорельефа поверхности; возможность механизации и автоматизации при обработке. В настоящее время большое распространение получает абразивная обработка в магнитном поле оптических поверхностей изделий из стекла, керамики, кристаллов, пластмасс и других немагнитных материалов. Полирование в магнитном поле позволяет получить высококачественные, высокоточные сферические, асферические и плоские поверхности оптических изделий, в том числе: поверхности тонких линз и деталей микрооптики. Магнитно-абразивная обработка применяется также при полировании поверхностей заготовок-пластин из германия и кремния для подложек интегральных схем.

### **Контрольные вопросы**

1. Перечислите сырьевые материалы, используемые для варки стекла.
2. Виды стекловаренных печей. Этапы технологического процесса варки. Содержание этапов варки оптического стекла.
3. Выращивание кристаллов (методы выращивания кристаллов, суть методов).
4. Способы разделки стекла и производства заготовок оптических деталей путем термической и механической обработки.
5. Допуски на чистоту полированных поверхностей.
6. Как контролируют форму шлифованных и полированных оптических поверхностей?
7. Что такое пробные стекла?
8. Укажите назначение интерферометров.
9. Основные, вспомогательные и специальные операции обработки стекла.
10. Расскажите о способах обработки поверхностей свободным и связанным абразивом.
11. Перечислите основные классы абразивных и полирующих материалов.
12. Суть метода магнитно-абразивного полирования.
13. Перечислите виды покрытий оптических деталей и укажите их характеристики.



## **Глава 4. МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА СВЕТОДИОДОВ**

В течение последних десятилетий технический прогресс в области разработки и изготовления светодиодов идет с захватывающей скоростью. Современные светодиоды отличаются миниатюрностью, прочностью, длительным сроком службы, хорошими оптическими характеристиками и высоким квантовым выходом излучения. В отличие от многих других источников света светодиоды могут преобразовывать электрическую энергию в световую с к.п.д. близким к единице.

Область применения светодиодных технологий расширяется с каждым днем. Это обусловлено в первую очередь их энергетической эффективностью и низким энергопотреблением при высокой светоотдаче. Светодиоды уже в настоящее время стали источниками света, которые производятся в промышленных масштабах для самых разных применений в светотехнике. Это стало возможным благодаря достаточно быстрому росту энергетических показателей, надежности и долговечности светодиодов. Малое потребление электрической энергии, легкость формирования диаграммы направленности с помощью вторичной оптики, простота управления и, самое важное, специфическое восприятие излучения глазом делают светодиоды незаменимыми для создания источников света. Поэтому важно понимать явления, определяющие принципы действия светодиодов, производство приборов и их разнообразные применения.

Появление сверх ярких, а также синих (в середине 1990-х годов) и белых диодов (в начале XXI века) и постоянное снижение их рыночной стоимости привлекли внимание многих производителей к данным источникам света. Светодиоды стали использовать в качестве индикаторов режимов работы электронных устройств, в подсветке жидкокристаллических экранов различных приборов. Впоследствии применение светодиодов основных цветов (красного, синего и зеленого) позволило получать цвета вывесок фактически любых оттенков, а также конструировать из них дисплеи с выводом полноцветной графики и анимации. Светодиоды, за счет их малой потребности в электроэнергии, – оптимальный выбор декоративного освещения в местах, где существуют проблемы с энергетикой. Срок службы светодиодов, превышающий в 6–8 раз долговечность люминесцентных ламп, относительная простота в работе с ними на этапе сборки изделий, отсутствие необходимости в регулярном обслуживании и их антивандальные качества делают эти ис-

точники света конкурентоспособными с более традиционными – газоразрядными, люминесцентными лампами и лампами накаливания.

Реализация таких возможностей достигается решением ряда технологических задач, возникающих в процессе разработки светодиода. Данная глава посвящена анализу проблем конструкций светодиодов, описанию материалов и технологии производства светодиодов, прогнозу тенденций повышения качества светодиодов.

#### **4.1. Особенности конструкции и параметров светодиодов**

Светодиод (СИД) – это полупроводниковый прибор, преобразующий энергию электрического тока в световую, основой которого является излучающий кристалл. На основе полупроводниковых кристаллов с излучающими р–n-переходами разрабатываются различные модификации конструкций светоизлучающих диодов. Светодиод состоит из полупроводникового кристалла на подложке, корпуса с контактными выводами и оптической системы. Корпуса для мощных светодиодов также содержат теплоотвод для рассеяния избытков тепла. Большинство корпусов светодиода изготавливается из полимеров с показателем преломления в диапазоне от 1,5 до 1,8. Уменьшение разницы показателя преломления на поверхности полупроводника увеличивает углы полного внутреннего отражения, что увеличивает эффективность вывода излучения.

На рис. рис. 4.1, а показан вариант корпуса маломощного светодиода. Кристалл светодиода крепится выводами вверх, приклеивается или припаивается на дне чашеподобного углубления (чашки отражателя), соединенного с одним из электрических контактов (обычно с катодом). В маломощных светодиодах корпуса, как правило, имеют форму полусфер (рис. 4.1, а), поэтому лучи выходящего света всегда попадают на границу раздела корпус-воздух под прямыми углами, не испытывая полного внутреннего отражения. Существуют и не сферические типы корпусов, например прямоугольные и цилиндрические с плоскими верхними поверхностями (рис. 4.1, б). Плоские поверхности используют, если светодиоды должны быть на одном уровне с поверхностью устройств, в которые они встраиваются, или если на них будут смотреть только под углами близкими к прямым. Эпоксидный корпус защищает светодиод от нежелательных механических воздействий, влажности и химических реагентов, обеспечивает механическую связь между анодом и катодом. Кристалл светодиода крепится к плоской поверхности дна чашки отражателя при помощи проводящей эпоксидной смолы, содержащей серебро. В мощных светодиодах для крепления кристаллов с от-

ражатель используют металлосодержащие спаи, поскольку их тепловое сопротивление намного ниже, чем у проводящих эпоксидных смол.

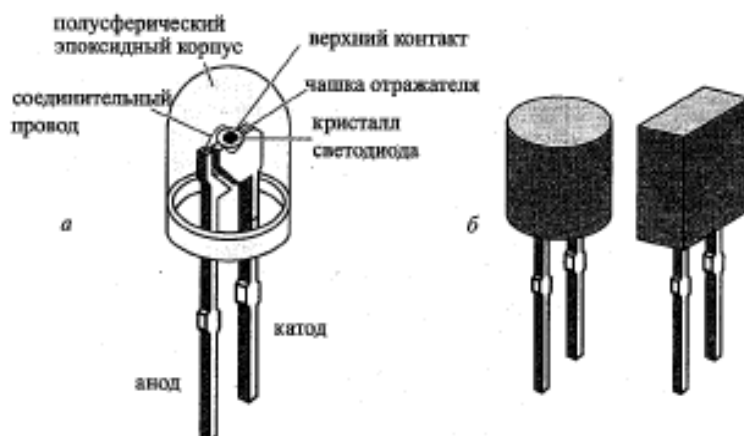


Рис. 4.1. Типичные корпуса светодиодов: а – светодиод в полусферическом корпусе; б – светодиоды в цилиндрическом и прямоугольном корпусах

На рис. 4.2 показана конструкция и внешний вид мощного современного светодиода. Мощный СИД обладает тремя характерными особенностями:

1. В его состав входит алюминиевый или медный радиатор, имеющий низкое тепловое сопротивление, к которому при помощи содержащего металл припоя, крепится кристалл.
2. Кристалл светодиода герметизируется силиконом, обеспечивающим отсутствие механических напряжений во время эксплуатации. На силикон наносится пластиковое покрытие, играющее роль линзы.
3. Кремниевая подложка, на которую крепится светодиод, обеспечивает конструкции защиту от электростатических разрядов.

Несколько чипов, расположенных на одной подложке, могут быть соединены последовательно, что позволит увеличивать рабочее напряжение при одновременном снижении рабочих токов.

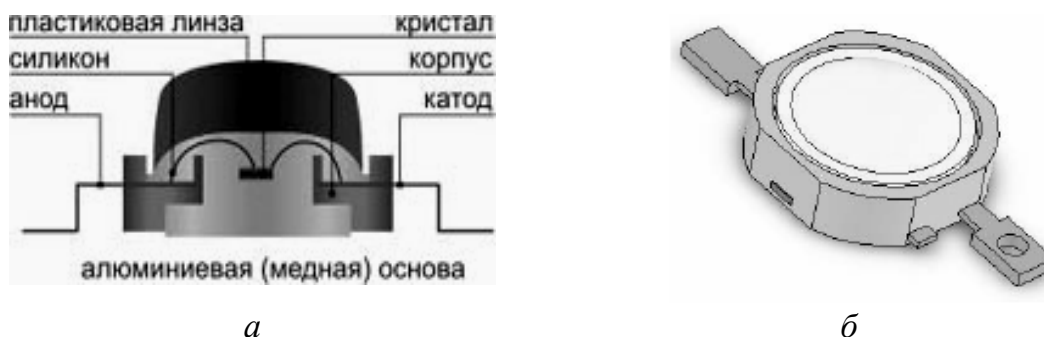


Рис. 4.2. Конструкция и внешний вид мощного светодиода

Конструкция светодиода определяет направление, пространственное распределение, интенсивность излучения, электрические, тепловые, энергетические и другие характеристики излучения от полупроводникового кристалла. И конечно, взаимное влияние всех этих параметров друг на друга.

Несмотря на большое количество модификаций конструкций излучающих кристаллов, нельзя однозначно отдать предпочтение какой-либо одной. Если не говорить о качестве самого производства кристалла и соблюдения технологических процессов при их производстве, то выбор определяется, как правило, исходя из идеи построения оптической системы светодиода, на которую работает излучающий кристалл, и задачи, которую впоследствии должен решать этот светодиод.

### **Светодиоды для систем отображения информации**

В устройствах отображения информации светодиоды собраны в группы (кластеры) и не работают поодиночке. Практически на всех режимах воспроизведения изображения в работе участвует подавляющее большинство светодиодов одновременно. И здесь самым важным условием выбора светодиодов для таких устройств является идентичность большого числа характеристик приборов всех используемых цветов одновременно. Иначе будет нарушено условие правильной цветопередачи и линейности яркости устройства в зависимости от угла обзора.

Одной из разновидностей является конструкция светоизлучающего диода с применением овальных линз (рис. 4.1, а), формирующих пространственное распределение с существенной разницей в углах излучения в горизонтальной и вертикальной плоскостях. В некоторых случаях для достижения такого эффекта и для обеспечения максимальной равномерности диаграммы в материал линзы локально или по всему объему вводится диспергатор. В результате получается достаточно рациональная конструкция: с одной стороны, широкий (как правило, 110 градусов) угол в горизонтальной плоскости дает возможность построить экран, наблюдаемый под большими углами в этой плоскости без искажений, с другой стороны, небольшой вертикальный (30–50 градусов) ограничивает бесполезное распространение светового потока в пространство, где нет наблюдения. Таким образом, весь световой поток от кристалла равномерно направляется на наблюдателя. Сложность в том, что распределение светового потока внутри диаграммы направленности светодиодов разного цвета свечения редко бывают одинаковым. Хотя угловые характеристики, указываемые в спецификациях, совпадают. Это связано с особенностью конструкций кристаллов, их геометрическими размерами, правильно подобранной оптикой, процентным со-

держанием диспергатора в материале линзы и т. д. Невыполнение этого условия и приводит к появлению искажений изображения, сформированного кластером из таких светодиодов.

Важно понимать, что построение качественного устройства воспроизведения полноцветного изображения, где имеет место смешение цветов и формирование оттенков, невозможно без учета характеристик распределения светового потока внутри диаграммы пространственного распределения излучения. Это условие касается также условия минимального разброса интенсивностей излучения (силы света) всех светодиодов одного цвета, невыполнение которого проявляется в виде неравномерной засветки поля светящегося полотна. Глаз способен различить разницу яркостей двух элементов, находящихся в пределах его разрешения и отличающихся друг от друга всего на несколько процентов.

Следующим важным параметром, идентичность которого должна быть соблюдена обязательно, является колориметрическая характеристика. Следствием невыполнения этого требования будет появление различных неоднородностей воспроизведения цвета. Система управления формированием цвета будет настроена на определенное соотношение интенсивностей основных цветов по формуле (4.1) чтобы получить белый цвет с необходимыми координатами цветности:

$$F = rR + gG + bB. \quad (4.1)$$

Отличающиеся по цветовым параметрам светодиоды будут выделяться и исказят цветопередачу. Стоит отметить, что глаз очень чувствителен к изменению цвета и способен различать монохроматическое излучение с точностью до 1–2 нм. Кроме идентичности параметров спектрального распределения необходимо остановиться на некоторых их значениях, требуемых для формирования правильной цветопередачи. МКО 1931 года рекомендует следующие координаты основных цветов (табл. 4.1).

*Таблица 4.1. Значения координат основных цветов, требуемых для формирования правильной цветопередачи, рекомендованные МКО 1931 года*

	X	Y
R	0,61–0,7	0,32–0,35
G	0,27–0,36	0,55–0,65
B	0,13–0,17	0,04–0,08

Следующим шагом в разработке конструкций светодиодов для систем отображения информации высокого качества стали многокристальные светодиоды с различным цветом излучения, содержащий три кристалла в одном корпусе, позволяющий формировать любой оттенок све-

чения (в том числе белый) как результат матрицирования трех цветов. Кристаллы расположены на одной общей подложке и находятся друг от друга на расстоянии, не превышающем 1–3 своих линейных размеров. Именно с использованием таких приборов стал возможен отказ от кластеров при изготовлении полноцветных экранов с высокой разрешающей способностью и яркостью до 2500 кд/м<sup>2</sup>. Размер пикселя при этом получается равным размеру одного светодиода, а смешение цветов вообще происходит в точке с размером примерно 0,8 x 0,3 мм. Более того, будучи расположенными на одном основании, все три кристалла имеют одинаковую температуру в любой момент времени, поэтому все тепловые уходы их параметров происходят одновременно, независимо от большой разницы прямых токов, и не влияют на результирующий цвет и интенсивность, сформированные в этот момент системой управления (в отличие от кластеров на дискретных светодиодах, где нет единой термостабилизации).

Однако взаимное геометрическое расположение кристаллов все же вносит искажения в равномерность смешения световых потоков. Но по сравнению со светодиодами с овальной оптикой качество равномерности распределения намного выше на отдаленных от оптической оси углах, соответственно больше и угол наблюдения без искажений.

Также в таких светодиодах существует проблема с упорядочением идентичности параметров кристаллов, ведь необходимо, чтобы все три кристалла были по параметрам очень близки к соответствующим в других светодиодах. Добиться такого сочетания необходимо уже на уровне монтажа кристаллов в корпус, иначе выход приборов с близкими параметрами будет невысок относительно всей партии. Такое действие достаточно трудоемко с технологической точки зрения и приводит к удорожанию продукта. Как правило, за основу берут один параметр, который можно скорректировать уже в составе светодиода. Это сила света. Цветовые характеристики кристаллов тестируются и разделяются еще до монтажа. Впоследствии интенсивность свечения каждого кристалла каждого светодиода в составе табло, например, доводится до одинакового значения программными средствами либо коррекцией питания. Таким образом, реализуется идентичность характеристик в трех кристалльных светодиодах, используемых группами [16].

## **4.2. Получение белого света на основе светодиодов**

По мере повышения эффективности светодиодов растет число их возможных применений. Перспективным направлением, имеющим большое экономическое значение для будущего, являются излучатели дневного света на основе светодиодов. Человеческий глаз воспринимает

свет как белый, если все три группы рецепторов его сетчатки возбуждены в определенном соотношении.

Существует несколько способов создания белого света при помощи монохроматических излучателей видимого спектра. Их можно условно классифицировать по количеству смешиваемых цветов (двухцветные, трехцветные и т.д.) либо по наличию преобразователей длины волны, которые создаются на основе люминофоров, полупроводников или красителей.

Способы получения белого света от светодиодов.

1. Первый способ заключается в смешивании цветов по технологии RGB. На одной матрице плотно размещаются красные, голубые и зеленые светодиоды, излучение которых смешивается при помощи оптической системы, например линзы. В результате получается белый свет.

2. Второй способ заключается в том, что на поверхность светодиода, излучающего в ультрафиолетовом диапазоне, наносится три люминофора, излучающих, соответственно, голубой, зеленый и красный свет. Это похоже на то, как светит люминесцентная лампа.

3. Третий способ – желто-зеленый или зеленый плюс красный люминофор наносится на голубой светодиод, так что два или три излучения смешиваются, образуя белый или близкий к белому свет.

Какой из трех способов лучше?

У каждого способа есть свои достоинства и недостатки. Технология RGB в принципе позволяет не только получить белый цвет, но и перемещаться по цветовой диаграмме при изменении тока через разные светодиоды. Этим процессом можно управлять вручную или посредством программы, можно также получать различные цветовые температуры. Поэтому RGB-матрицы широко используются в светодинамических системах. Кроме того, большое количество светодиодов в матрице обеспечивает высокий суммарный световой поток и большую осевую силу света. Но световое пятно из-за aberrаций оптической системы имеет неодинаковый цвет в центре и по краям, а главное, из-за неравномерного отвода тепла с краев матрицы и из ее середины светодиоды нагреваются по-разному, и, соответственно, по-разному изменяется их цвет в процессе старения – суммарные цветовая температура и цвет «плывут» за время эксплуатации. Это неприятное явление достаточно сложно и дорого скомпенсировать. Белые светодиоды с люминофорами существенно дешевле, чем светодиодные RGB-матрицы (в пересчете на единицу светового потока), и позволяют получить хороший белый цвет. И для них в принципе не проблема попасть в точку с координатами (0,33, 0,33) на цветовой диаграмме МКО.

Недостатки же таковы:

- во-первых, у них меньше, чем у RGB-матриц, светоотдача из-за преобразования света в слое люминофора;
- во-вторых, достаточно трудно точно проконтролировать равномерность нанесения люминофора в технологическом процессе и, следовательно, цветовую температуру;
- в-третьих люминофор тоже стареет, причем быстрее, чем сам светодиод. Промышленность выпускает как светодиоды с люминофором, так и RGB-матрицы – у них разные области применения.

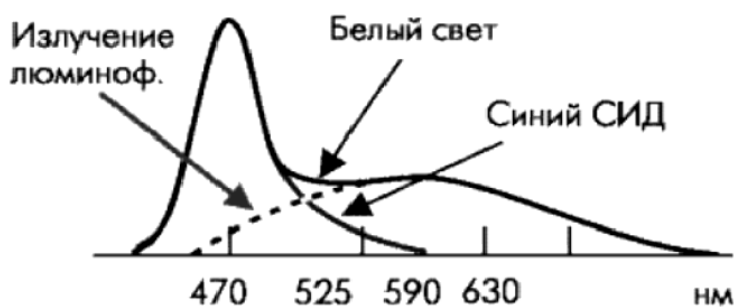


Рис. 4.3. Получение белого света с помощью кристалла синего светодиода и нанесенного на него желтого люминофора

Рассмотрим производство белых светодиодов, устроенных по принципу сочетания синего излучения светодиодов на основе  $GaN$  и желтого излучения люминофора. Полупроводниковые кристаллы  $GaN$ , излучают на длине волны 465–470 нм (рис. 4.3). В качестве желтого люминофора используется алюмоиттриевый гранат (YAG), легированный трехвалентным церием  $Ce^{3+}$ . Спектр люминесценции этого люминофора характеризуется длиной волны максимума в диапазоне 530–560 нм и доминантной длиной волны в диапазоне 540–575 нм. Человеческий глаз комбинацию такого рода воспринимает как белый свет.

Эффективность преобразования энергии в белом светодиоде можно рассчитать как отношение мощности излучения белого светодиода к мощности излучения синего светодиода, если разница между конструктивными исполнениями этих светодиодов заключается только в наличии в белом светодиоде люминофора.

### 4.3. Материалы светодиодов. Гетероструктуры

Светодиоды создают из слоев полупроводниковых материалов. Важнейшее свойство полупроводниковых материалов – наличие небольшого энергетического барьера между свободными электронами, переносящими электричество, и электронами, которые удерживаются на



атомных орбитах. Чтобы последние могли преодолеть барьер и поддерживать электрический ток, им необходимо сообщить достаточное количество энергии, приложив к полупроводнику электрическое напряжение.

Проводимость полупроводника можно увеличить, если внедрить в него примесные атомы с меньшим числом электронов, из-за недостатка которых появляются положительно заряженные дырки. Так получаются полупроводники *p*-типа. Легирование полупроводников атомами с избытком электронов превращает его в полупроводник *n*-типа. Электрон, попавший в полупроводник *p*-типа, может встретить дырку и перейти на более низкий энергетический уровень. При этом излучается фотон, длина волны которого зависит от величины энергетического барьера эмитирующего материала.

Не всякие полупроводниковые материалы эффективно испускают свет при рекомбинации. Хорошими излучателями являются, как правило, прямозонные полупроводники типа  $A^{III}B^V$  (например, GaAs или InP) и  $A^{II}B^{VI}$  (например, ZnSe или CdTe). Варьируя состав полупроводников, можно создавать светодиоды для всевозможных длин волн от ультрафиолета (GaN) до среднего инфракрасного диапазона (PbS).

Диоды, сделанные из непрямозонных полупроводников (например, кремния, германия или карбида кремния), свет практически не излучают. Впрочем, в связи с развитием кремниевой технологии, активно ведутся работы по созданию светодиодов на основе кремния. В последнее время большие надежды связываются с технологией квантовых точек и фотонных кристаллов.

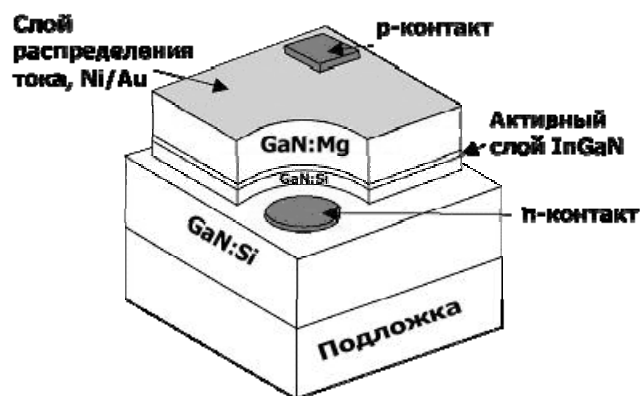


Рис. 4.4. Вид излучающего кристалла с гетероструктурой типа  $InGaN/AlGaN/GaN$  на подложке из  $Al_2O_3$ .

Основой для построения современных полупроводниковых источников света служат излучающий кванты света полупроводниковые кристаллы. Существует множество вариантов создания *p-n*-перехода в полупроводнике, но мы остановимся только на тех структурах, которые способны излучать кванты электромагнитного излучения при протека-

нии через них электрического тока. Это гетероструктуры с широкозонными р–n-переходами, ширина запрещенной зоны которых более 1,9 эВ (рис. 4.4). В настоящее время созданы структуры, способные излучать во всем видимом диапазоне, в ближнем ИК и ультрафиолете (рис. 4.5). Большой выбор цветов свечения, комбинация мощного излучения с любой формой пространственного распределения и возможность получения любого оттенка в широком диапазоне яркостей открывают огромные перспективы использования светоизлучающих диодов в качестве различных источников света.

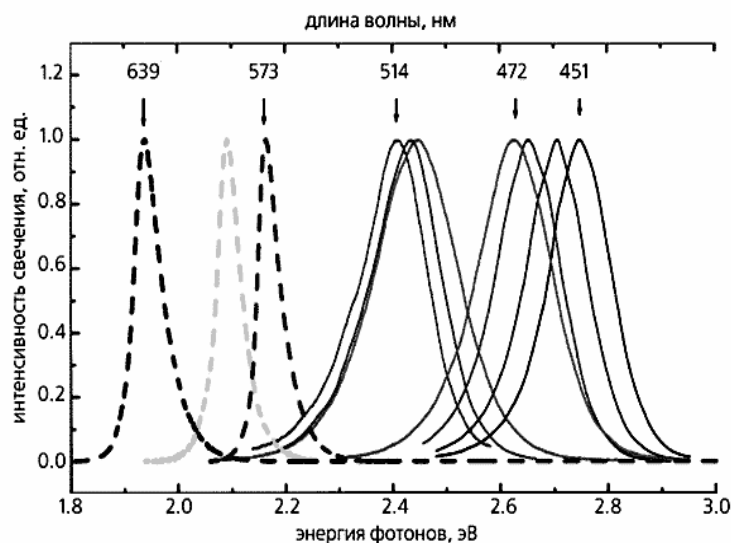


Рис. 4.5. Спектры электролюминесценции светодиодов на основе гетероструктур InGaN/AlGaIn/GaN (сплошные линии) и AlInGaP/GaP (штриховые). Видно, что они перекрывают всю область видимого спектра.

### Гетероструктуры

Если в кристалле полупроводника создан р–n-переход, то есть граница между областями с дырочной (р-) и электронной (n-) проводимостью, то при положительной полярности внешнего источника тока на контакте к р-области (и отрицательной – на контакте к n-области) потенциальный барьер в р–n-переходе понижается и электроны из n-области инжектируются в р-область, а дырки из р-области – в n-область. Инжектированные электроны и дырки рекомбинируют, передавая свою энергию либо квантам света  $h\nu$  (излучательная рекомбинация), либо, через дефекты и примеси, тепловым колебаниям решетки (безызлучательная рекомбинация). Вероятность излучательной рекомбинации пропорциональна концентрации электронно-дырочных пар, поэтому наряду с повышением концентраций основных носителей в р- и n-областях желательно уменьшать толщину активной области, в которой идет рекомбинация. Но в обычных р–n-переходах эта толщина не может быть

меньше диффузионной длины – среднего расстояния, на которое диффундируют инжектированные носители заряда, пока не рекомбинируют. Задача ограничения активной области рекомбинации решена в конце 60-х годов Алфёровым Ж.И. и его сотрудниками. Были предложены и практически изготовлены гетероструктуры, сначала на основе GaAs и его твердых растворов типа AlGaAs, а затем и на основе других полупроводниковых соединений [17]. Использовались *гетероструктуры*, получаемые *методом жидкостной эпитаксии*, при этом был достигнут внешний квантовый выход до 15 % для красной части спектра (световая отдача до 10 лм/Вт) и более 30 % для инфракрасной. Показателен факт присуждения Ж.И. Алфёрову Нобелевской премии в 2000 г.

Попадая в узкие и достаточно глубокие ямы, электроны и дырки оказываются запертыми в них. Если активный слой (с узкой запрещенной зоной  $E_{g1}$ ) содержит малое количество дефектов, электронно-дырочные пары рекомбинируют с излучением кванта  $E_{g1}$ . О вероятности излучательной рекомбинации в узкозонном слое говорит внутренний квантовый выход излучения  $\eta_i$  (число излучаемых фотонов на одну электронно-дырочную пару). В гетероструктурах величина  $\eta_i$  может быть близка к 100 %.

Для практики, однако, важнее внешний квантовый выход излучения  $\eta_e$  – отношение числа излучаемых во внешнюю среду квантов света к числу электронно-дырочных пар, пересекающих р–n-переход. Он характеризует преобразование электрической энергии в световую.

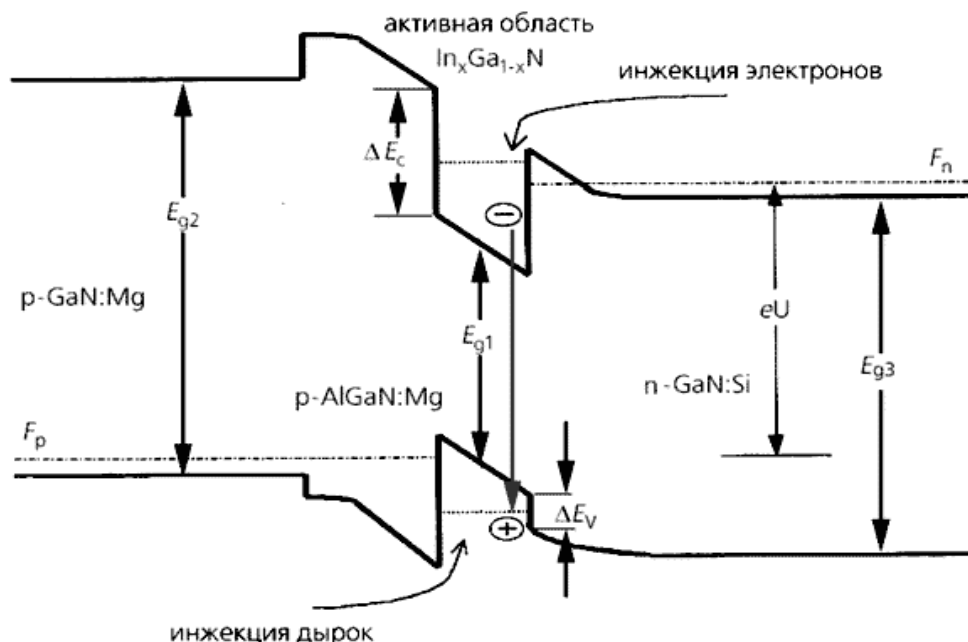


Рис. 4.6. Энергетическая диаграмма гетероструктуры типа InGaN/AlGaN/GaN

В гетероструктурах толщина активной области рекомбинации может быть много меньше диффузионной длины. Рассмотрим энергетическую диаграмму гетероструктуры (рис. 4.6), в которой между внешними р- и n-областями полупроводника с большими величинами ширины запрещенной зоны  $E_{g2}$ ,  $E_{g3}$  расположен тонкий слой с меньшей шириной  $E_{g1}$ . Толщину этого слоя можно сделать очень малой, порядка сотен или даже десятков атомных слоев. Помимо потенциального барьера обычного р–n-перехода на гетерограницах слоя образуются потенциальные барьеры для электронов  $\Delta E_c$  и дырок  $\Delta E_v$ . Если приложить к переходу прямое смещение, возникнет инжекция электронов и дырок с обеих сторон в узкозонный слой. Электроны будут стремиться занять положения с наименьшей энергией, спускаясь на дно потенциальной ямы в слое, дырки устремятся вверх – к краю валентной зоны в слое, где минимальны их энергии. Широкозонные внешние части гетероперехода можно сильно легировать с обеих сторон, добиваясь больших концентраций в них равновесных носителей. И тогда, даже не легируя активную узкозонную область примесями, удастся достичь при инжекции значительных концентраций неравновесных электронно-дырочных пар в слое. Отказ от легирования активной области принципиально важен, поскольку атомы примеси, как уже говорилось, могут служить центрами безызлучательной рекомбинации. Попав в яму, инжектированные электроны наталкиваются на потенциальный барьер  $\Delta E_c$ , дырки – на барьер  $\Delta E_v$ , поэтому и те и другие перестают диффундировать дальше и рекомбинируют в тонком активном слое с испусканием фотонов. Применяемые материалы группы  $A^{III}B^V$  имеют диапазон ширины запрещенной зоны от 1,9 до 3,5 эВ. Твердые растворы AlGaInP на различных подложках излучают в диапазоне от 650 до 580 нм, структуры на основе GaN, InGaN имеют наибольший квантовый выход в пределах 540–400 нм. Рекомбинация электронно-дырочных пар в таких материалах происходит преимущественно с выделением кванта света. Энергия кванта  $h\nu$  пропорциональна ширине запрещенной зоны  $E_g$  – энергии, которую должен затратить заряд для прохода через эту зону. О вероятности излучательной рекомбинации в узкозонном слое говорит внутренний квантовый выход излучения  $\eta_i$  (число излучаемых фотонов на одну электронно-дырочную пару). В гетероструктурах величина  $\eta_i$  теоретически может быть близка к 100 %.

Таким образом, большинство СИД изготавливаются на основе гетеропереходов, которые образуются из множества полупроводниковых слоев. Наиболее широко используемыми структурами являются GaAs и AlGaAs, InGaAsP. В случае GaAs для образования доноров используют S, Se, Te, Si, Ge; в качестве акцепторов Be, Mg, Zn, Cd.

Там, где не требуется высокая яркость, применяют светодиоды на основе GaAsP и GaAsP:N. Светодиоды на основе AlGaAs используют в тех случаях, когда необходима как низкая, так и высокая яркость. В устройствах повышенной яркости применяются светодиоды на основе AlInGaP и InGaN [18].

Основная проблема, связанная с гетероструктурой возникает из-за несоответствия постоянных решеток на границе раздела. Очень важно подобрать такие материалы, которые имеют одинаковые постоянные кристаллической решетки. Существуют совершенно различные полупроводниковые материалы, которые, тем не менее, имеют одинаковые или почти одинаковые постоянные кристаллической решетки. Поэтому они могут образовывать один монокристалл. На границе между ними меняется ширина запрещенной зоны, электронное сродство, постоянные кристаллической решетки, подвижность носителей тока, их эффективные массы, диэлектрическая проницаемость и другие свойства. Такие переходы между полупроводниками, имеющими согласованные решетки, но различные свойства, называются гетеропереходами.

#### **4.4. Технология производства светодиодов**

Современный светодиод представляет собой достаточно сложный полупроводниковый прибор, при производстве которого используются разнообразные технологии из области физики, химии и электротехники. Основу любого светодиода составляет светодиодный чип «кристалл».

Первым этапом создания светодиодного чипа является послойное выращивание определенной полупроводниковой гетероструктуры на выбранном базисном материале (подложке). Именно состав и физические свойства подобной структуры определяют длину волны излучаемого светодиодом света. Физическое качество гетероструктуры, наличие или отсутствие внутренних дефектов и примесей коренным образом определяют эффективность светодиода и его долговечность.

В массовом производстве полупроводниковые гетероструктуры выращиваются практически исключительно методом осаждения металлоорганических соединений из газообразной фазы (MOCVD). Конкретные параметры данного технологического процесса являются наиболее охраняемым секретом любого производителя светодиодных чипов.

Каждая компания обладает оригинальными запатентованными эпитаксиальными технологиями. Как правило, структуры InGaAlN выращивают на сапфировых подложках с особо низким количеством ростовых дефектов (дислокаций). Благодаря низкой концентрации дислокаций чипы, не подвержены ускоренной деградации при высоких токах и температурах, что, соответственно, увеличивает время жизни готового

светодиода. Из-за отсутствия волноводных эффектов на границах дислокаций возрастает общая средняя эффективность чипа. Кроме того, не наблюдается катастрофического падения эффективности на повышенных токах.

Именно эпитаксиальные технологии, позволяют в итоге создавать светодиоды на уровне мировых стандартов. Однако качественно выращенная эпитаксиальная структура автоматически не означает появление качественного и эффективного светодиодного чипа.

Исключительно важными являются последующие технологические шаги, позволяющие создать из полупроводниковой пластины готовые к упаковке в корпус светодиодные чипы. На данном производственном этапе, называемом «формированием чипов», пластины проходят несколько циклов фотолитографии, химического травления, нанесения защитных и буферных слоев и электрических контактов. Стабильность и технологическая чистота каждого из указанных процессов определяют не только качество готового чипа, но также и его цену. Именно поэтому предприятия по производству светодиодов постоянно совершенствуют каждый из отдельных процессов, доводя их до оптимального уровня.

Сформированные чипы проходят разнообразные тесты, в ходе которых определяются их качество, электрические и оптические параметры, и после процесса разделения (механической или лазерной резки) поступают для конечного монтажа чипа в корпус светодиода. В процессе монтажа светодиодный чип соединяется с внешними контактами корпуса светодиода и заливается эпоксидным гелем или силиконом. Этим, простым, на первый взгляд, производственным процессам на предприятиях также уделяется пристальное внимание.

Ведь качество соединения чипа с внешними контактами корпуса определяет не только способность светодиода безотказно работать при заявленных электрических параметрах, но и определяет степень и качество отвода излишков тепла из активной зоны светодиодного чипа, что напрямую определяет долговечность светодиода. Эпоксидный гель или силикон не только защищают поверхность чипа механически, но также улучшают оптический выход света из чипа в окружающую среду. Непосредственно в геле или силиконе может быть растворен фосфор, частично преобразующий излучаемый чипом синий свет в желтый. Именно правильно определенная комбинация указанных цветов и создает воспринимаемый человеческим глазом белый свет. Таким образом, качество и состав заливки светодиода определяют цветовые параметры и равномерность распределения излучаемого им белого света.

## **Технологические процессы, применяемые при производстве светодиодов**

### **Этап 1: Эпитаксиальный рост (MOCVD)**

Производство светодиодов начинается с подложки. Подложка – это тонкая монокристаллическая пластина, которая является основой для осаждаемых слоев и определяет их кристаллографические свойства. Для светодиодов на основе полупроводникового материала GaN эта пластина в большинстве случаев из сапфира. Сапфировая подложка  $Al_2O_3$  помещается в специальную камеру, где происходит выращивание кристаллических слоев.

Что касается выращивания кристаллов, то основная технология – металлоорганическая эпитаксия. Для этого процесса необходимы особо чистые газы. В современных установках предусмотрены автоматизация и контроль состава газов, их отдельные потоки, точная регулировка температуры газов и подложек. Толщины выращиваемых слоев измеряются и контролируются в пределах от десятков ангстрем до нескольких микрон.

Разные слои необходимо легировать примесями, донорами или акцепторами, чтобы создать p–n-переход с большой концентрацией электронов в n-области и дырок – в p-области. За один процесс, который длится несколько часов, можно вырастить структуры на 6 – 12 подложках диаметром 50 – 75 мм. Очень важно обеспечить и проконтролировать однородность структур на поверхности подложек.

Стоимость установок для эпитаксиального роста полупроводниковых нитридов, разработанных в Европе и США, достигает 1,5 – 2 млн. долларов. Опыт разных фирм показал, что научиться получать на такой установке конкурентоспособные структуры с необходимыми параметрами можно за время от одного года до трех лет. Это – технология, требующая высокой культуры. Важным этапом технологии является планарная обработка пленок: их травление, создание контактов к n- и p-слоям, покрытие металлическими пленками для контактных выводов. Пленку, выращенную на одной подложке, можно разрезать на несколько тысяч чипов размерами от 0,24 x 0,24 до 1 x 1 мм<sup>2</sup>.

Эпитаксиальное выращивание – наиболее наукоемкая часть технологической цепочки производства светодиодов. Пока это все же искусство, нежели чем устоявшаяся технология. Рецепт (ноу-хау) эпитаксиального роста определяют работу светодиода: КПД и срок службы.

Эта пластина помещается в специальную камеру, куда подаются газы – источники атомов, из которых будет состоять выращиваемый слой. В этой камере под воздействием температуры происходит разложение газов на составные атомы и происходит химическая реакция, в

результате которой на поверхности подложки синтезируется соответствующий полупроводниковый слой. Так последовательно выращиваются все слои этой многослойной структуры: «n» – слой, активная область, состоящая из наноразмерных квантовых ям, и «р» – слой.

Рассмотрим более подробно выращивание легированных эпитаксиальных слоев арсенида галлия. Перспективы приборного применения эпитаксиальных слоев *GaAs* определяются возможностями легирования их в процессе роста. Эпитаксию проводят на подложках арсенида галлия с ориентацией поверхности (001).

Выращивание эпитаксиальных слоев *GaAs* методом хлоридной газовой эпитаксии проводится в системе, которая показана на рис. 4.7, а. На рис. 4.7, б показан профиль распределения температуры вдоль реактора. Такой профиль распределения температуры обеспечивает насыщение газовой фазы в зоне источника *Ga* и перенасыщения газовой фазы арсенидом галлия в зоне роста, что обеспечивает его конденсацию на подложке.

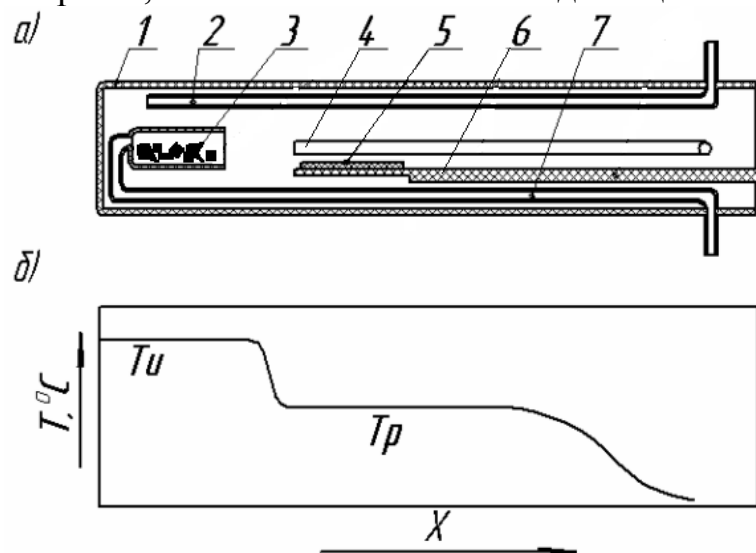


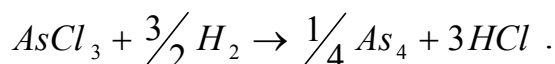
Рис. 4.7. а) Схема реактора: 1 – колба из кварца; 2 – линия для подачи триэтилгаллия; 3 – монокристаллический арсенид галлия марки АГЧО; 4 – линия для подачи лигатуры; 5 – подложка; 6 – подложкодержатель; 7 – ростовой канал; б) профиль распределения температуры в реакторе:  $T_i$  – температура источника;  $T_r$  – температура осаждения

Все каналы, показанные на рис. 4.7, соединены с соответствующими линиями газовой схемы, подводящими вещества-реагенты к реактору (рис. 4.8).

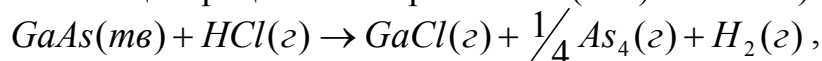
В качестве газа-носителя используется водород, предварительно очищаемый на диффузионной очистке типа ОДВ-10 (очистка диффузионная водорода, 10 кубометров/час). Точка росы водорода по  $H_2O$  на входе в установку составляла  $-63$  °С. Проходя через питатели, водород насыщается парами содержащихся в них веществ и переносит их в реактор.



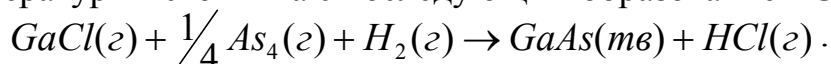
$AsCl_3$  поступающая в горячую зону реактора (выше  $400\text{ }^\circ\text{C}$ ) разлагается по реакции:



Выделившийся  $HCl$  взаимодействует с  $GaAs$  в лодочке источника (в качестве источника используется монокристаллический арсенид галлия марки АГЧО с концентрацией электронов  $n = (4-6) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ )



с образованием  $GaCl$  и  $As_4$ , переносимых в зону роста с температурой ниже температуры источника с последующим образованием  $GaAs$ .



Для удаления спонтанного осаждения со стенок реактора после процесса осаждения проводят газовое травление камеры, подавая травящий поток  $H_2 - AsCl_3$  через специальный канал травления, обозначенный на схеме. Величина газового потока при этом составляет  $10-15 \text{ л/час}$ .

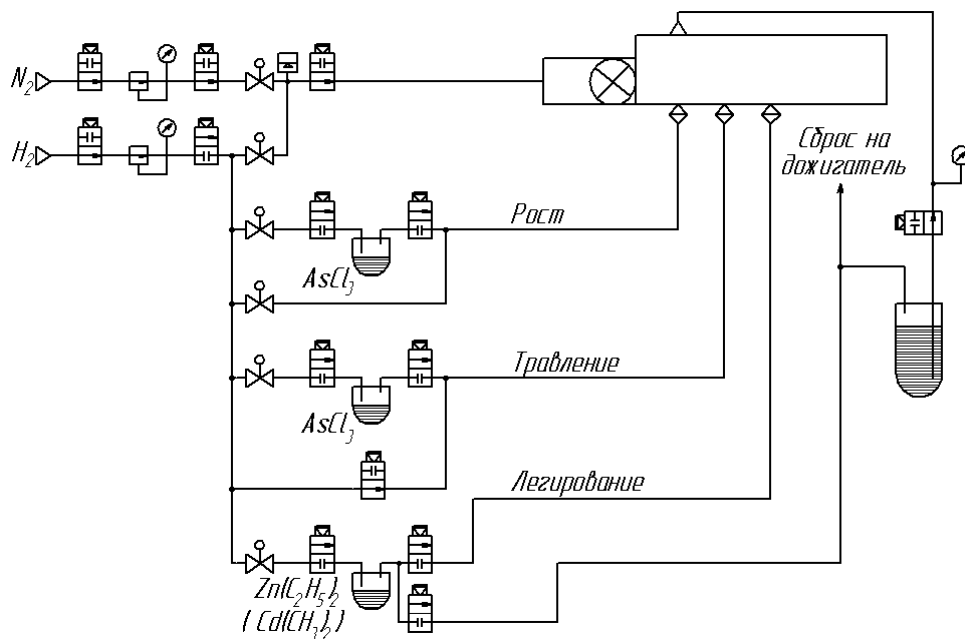
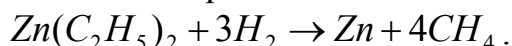


Рис. 4.8. Упрощенная газораспределительная схема установки для выращивания легированных слоёв арсенида галлия

Наращивание эпитаксиальных слоев  $GaAs$ , легированных кадмием или цинком, проводится на подложках марок АГЧП-2 (арсенид галлия, выращенный методом Чохральского, полуизолирующий). Перед наращиванием эпитаксиального слоя подложки прогревается в течение 15 минут в атмосфере водорода и подвергается двухминутному газовому травлению. Благодаря подаче в реактор одновременно ростового и травящего потоков определенной величины, обеспечивается полирующий режим газового травления.

Во время роста через канал к источнику подается ростовой поток  $H_2 - AsCl_3$  совместно с разбавляющим потоком  $H_2$ . Поступающие в камеру реагенты взаимодействуют в соответствии с описанными выше реакциями, что приводит к осаждению эпитаксиальных слоев  $GaAs$ . В качестве источника лигатуры используются ДЭЦ. Эти металлоорганическое соединение размещается в питателе из нержавеющей стали. Водород, проходя через питатель, захватывает пары металлоорганического соединения и переносит их к реактору. В горячей зоне реактора происходит выделение металла согласно реакции:



Который затем хлорируется избыточным хлористым водородом, практически всегда имеющимся в газовой фазе реактора за счет неполного взаимодействия с материалом источника, и встраивается в растущий слой арсенида галлия.

Полученные таким образом подложки с легированными эпитаксиальными слоями арсенида галлия направляются на последующую обработку, необходимую для получения определенных полупроводниковых приборов, например, излучателей инфракрасного диапазона длин волн.

## **Этап 2: Формирование светодиодных чипов**

Следующая операция производства светодиодов – это формирование светодиодных чипов на поверхности светодиодной структуры. Необходимо задать площадь будущего чипа, от которой будет зависеть количество светодиодов на одной пластине, для этого применяются специальные маски. Затем с помощью операции травления светодиодный чип начинает приобретать свою форму. После этого напыляются контакты. На заключительном этапе происходит утонение подложки и разделение светодиодных чипов.

Формирование светодиодных чипов на поверхности светодиодной структуры – это процесс, состоящий из большого количества операций, одними из которых являются фотолитография, травление, напыление контактов. Свойства будущего светодиода крайне чувствительны к качеству выполнения этих операций, поэтому они проводятся в так называемых «чистых комнатах».

## **Этап 3: Монтаж светодиодных чипов в корпуса**

Следующим шагом является создание светодиодов из этих чипов. Необходимо смонтировать кристалл в корпусе, сделать контактные выводы, изготовить оптические покрытия, просветляющие поверхность для вывода излучения или отражающие его.

Если это белый светодиод, то нужно равномерно нанести люминофор. Надо обеспечить теплоотвод от кристалла и корпуса, сделать пла-

стиковый купол, фокусирующий излучение в нужный телесный угол. Около половины стоимости светодиода определяется этими этапами высокой технологии.

Необходимость повышения мощности для увеличения светового потока привела к тому, что традиционная форма корпусного светодиода перестала удовлетворять производителей из-за недостаточного теплоотвода. Надо было максимально приблизить чип к теплопроводящей поверхности. В связи с этим на смену традиционной технологии и несколько более совершенной SMD-технологии (surface montage details – поверхностный монтаж деталей) приходит наиболее передовая технология COB (chip on board).

Светодиоды, выполненные по SMD- и COB-технологии, монтируются (приклеиваются) непосредственно на общую подложку, которая может исполнять роль радиатора – в этом случае она делается из металла. Так создаются светодиодные модули, которые могут иметь линейную, прямоугольную или круглую форму, быть 50–75 мм, быть жесткими или гибкими, и призваны удовлетворить любую прихоть дизайнера. Появляются и светодиодные лампы с таким же цоколем, как у низковольтных галогенных, призванные им на замену. А для мощных светильников и прожекторов изготавливаются светодиодные сборки на круглом массивном радиаторе.

Раньше в светодиодных сборках было очень много светодиодов. Сейчас, по мере увеличения мощности, светодиодов становится меньше, зато оптическая система, направляющая световой поток в нужный телесный угол, играет все большую роль.

До получения готового прибора остается совсем не много. После того как были получены светодиодные чипы специальный автомат сажает их на клей внутрь корпуса светодиода. Затем другой автомат соединяет золотой проволокой контактные площадки чипа с контактными площадками корпуса. Корпус светодиода обычно пластиковый с металлическими выводами. Для лучшего отвода тепла может выполняться, например из керамики. Финальной стадией изготовления светодиода является заливка прозрачного компаунда, смешанного с люминофором.

#### **4.5. Материалы для корпусов светодиодов**

К корпусам светодиодов предъявляют несколько требований: они должны быть прозрачными, химически стабильными, герметичными, обладать высоким показателем преломления и выдерживать высокие температуры. В качестве материалов для корпусов светодиодов используют эпоксидные смолы, силиконовые полимеры и полиметилметакрилаты. Молекула самого простого полимера состоит цепочки углеводов.

Для герметизации дискретных светодиодов и СИД кластеров, часто применяют эпоксидные смолы или компаунды. Такие корпуса прозрачны и не деградируют при использовании их в светодиодах длинноволновой части видимой и инфракрасной областях спектра. Однако эпоксидные компаунды теряют прозрачность при использовании в коротковолновых светодиодах, излучающих в голубой, фиолетовой или УФ-области спектра. Эпоксидные смолы химически стабильны до температур 120°C. Длительное воздействие более высоких температур приводит к их пожелтению и потере прозрачности. Показатель преломления эпоксидных смол близок к 1,6.

С начала 2000 гг. для улучшения термостабильности корпусов светодиодов вместо эпоксидных смол стали применять кремний-органические соединения (силиконы), которые сохраняют свои характеристики до температур 190 °С. Кроме того, силикон упругий материал (он сохраняет это свойство на протяжении нескольких десятилетий), что позволяет снижать механическую нагрузку на полупроводниковый кристалл.

Полиметилметакрилат РММА (акриловое стекло или плексиглас) пока довольно редко используется для изготовления корпусов светодиодов. Он обладает сравнительно низким показателем преломления (1,49 в диапазоне длин волн 500–650 нм). Поэтому при использовании РММА-корпусов для светодиодов, выполненных на основе полупроводниковых материалов с высоким показателем преломления, полученные структуры имеют ограничения по величине оптического вывода. Из РММА изготавливают вторичную оптику для светодиодных источников света.

Наиболее эффективно использовать корпуса светодиодов с градиентным изменением показателя преломления, которые состоят из нескольких слоев материалов с разными показателями преломления. Слой с наибольшим показателем преломления находится в непосредственном контакте с полупроводниковым кристаллом. Внешние слои корпуса обладают меньшими показателями. Корпуса с градиентным изменением показателя преломления обеспечивают более высокие коэффициенты оптического вывода излучения, чем корпуса с постоянным показателем преломления.

Иногда в состав материалов для изготовления корпусов светодиодов вводят специальные добавки, заставляющие свет отражаться, преломляться и рассеиваться, что делает диаграмму направленности излучения круговой и изотропной. В многоцветных светоизлучающих устройствах (например, в многокристальных светодиодах белого свечения) такие добавки позволяют получать равномерное распределение цвета.

В качестве добавок, как правило, используют оптически прозрачные вещества –  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{CaF}_2$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaCO}_3$  и  $\text{BaSO}_4$ , показатели преломления которых отличаются от показателя преломления материала корпуса.

В работе [18] предложено вводить в материалы корпусов светодиодов наночастицы, имеющие высокий показатель преломления, например оксидов магния, титана, иттрия, циркония, алюминия, GaN, AlN, ZnO, ZnSe. Наночастицы, встроенные в исходный материал (полимер), не вызывают рассеяния света, если они распределены равномерно и их размер намного меньше длины волны излучения. Показатель преломления материала с введенными наночастицами определяется следующим выражением:

$$n = \frac{n_1V_1 + n_2V_2}{V_1 + V_2}, \quad (4.2)$$

где  $V_1$  и  $V_2$  – объемы исходного материала и наночастиц. При большой концентрации наночастиц показатель преломления материала со встроенными наночастицами может намного превышать показатель исходного материала, что увеличивает выходной конус излучения светодиода и повышает его коэффициент оптического вывода.

#### 4.6. Световые характеристики полупроводниковых приборов

После создания конечной продукции в виде полупроводниковых приборов они подвергаются технологическим испытаниям. Одной из задач испытаний является определение их световых характеристик. При оценке полупроводниковых источников света используются световые характеристики, приведенные в табл.4.2.

Таблица 4.2. Фотометрические единицы для оценки источников света

Наименование, обозначение, единица измерения	Определение
Световой поток $\Phi$ , лм	1 Вт энергетического потока монохроматического излучения с длиной волны $\lambda = 555$ нм равен 680 лм. Световой поток, $\Phi$ , сложного излучения: $\lambda = 780$ нм $\Phi = 680 \int \varphi_e(\lambda)V(\lambda)d\lambda$ $\lambda = 380$ нм где $\varphi_e(\lambda)$ – энергетический поток монохроматического излучения с длиной волны $\lambda$ , $V(\lambda)$ – относительная световая эффективность монохроматического излучения ( $V(555\text{нм}) = 1$ ). Интегрирование идет по видимой глазом человека области длин волн

Наименование, обозначение, единица измерения	Определение
Сила света $I$ , Кд	Пространственная плотность светового потока: отношение светового потока $d\Phi$ к телесному углу $d\Omega$
Освещенность $E$ , лк	Плотность светового потока по освещаемой поверхности: отношение $d\Phi$ к площади освещаемой поверхности $dA$
Светимость, $\text{лм}/\text{м}^2$	Отношение светового потока к единице площади светящейся поверхности
Яркость, $\text{кд}/\text{м}^2$	Отношение силы света в направлении точки наблюдения к видимой из этой точки площади светящейся поверхности

### Измерение распределения силы света и величины светового потока

Для измерения светового потока источников света со сложным пространственным светораспределением используются два различных метода: гониометрический и «интегрирующая сфера».

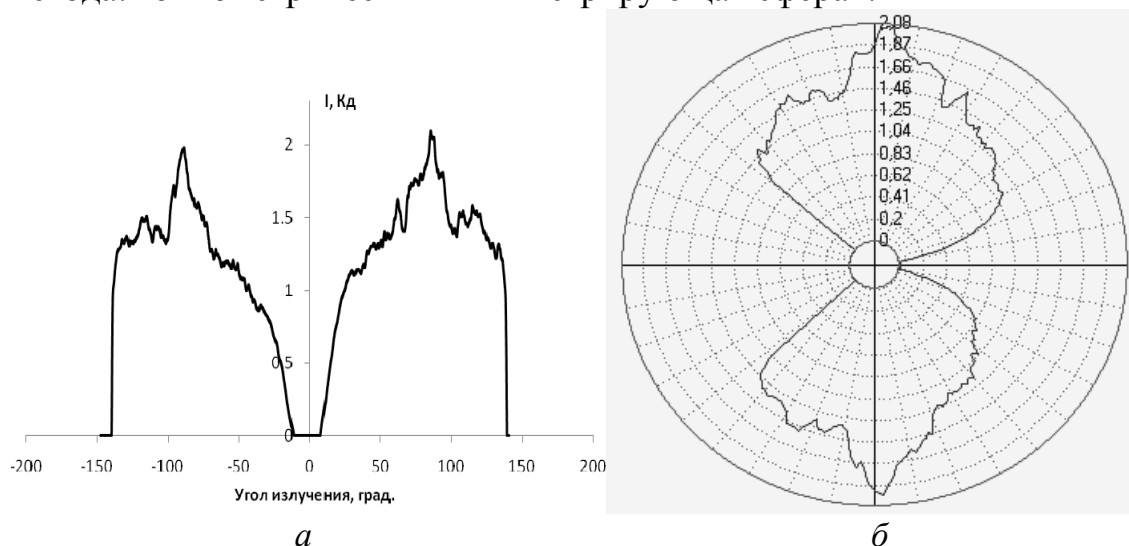


Рис. 4.9. Распределение интенсивности излучения полупроводниковой лампы ЛПРЗ-03 в азимутальных (а) и полярных (б) координатах ( $\Phi = 15,2$  лм)

**Гониометрический метод** основан на пошаговой фиксации значений силы света источника излучения при его повороте на известный угол на каждом шаге. Используемая для этих целей установка включает в себя гониометр, фотометрическую головку на основе кремниевого фотодиода с известным коэффициентом преобразования, блок синхронизации и ПК. Измерение производится путём поворота закреплённого на вращающейся вокруг вертикальной оси платформе источника света. Данные об угле поворота считываются при помощи датчика угла поворота и передаются в

ПК. При изменении угла поворота платформы на каждые 6 угловых минут (т. е. на 0,1 угловых град.) датчик выдаёт команды на взятие фотоотсчёта и на подсчёт абсолютного значения угла поворота. Осуществление измерения и обработка полученных результатов производятся с помощью программного обеспечения “Гониометр 2.0”. На рис. 4.9 приведены распределения интенсивности излучения полупроводниковой лампы ЛПРЗ-03 в азимутальных и полярных координатах. Величина светового потока для этого источника составляет 15,2 лм.

**В методе «интегрирующей сферы»** сопоставляется неизвестный (измеряемый) световой поток с заведомо известным световым потоком эталонного источника света. Указанное сопоставление производится посредством интегрирующей сферы (иначе – фотометрический шар или шар Ульбрихта), окрашенной изнутри белой неселективной матовой краской с ламбертовским диффузным отражением. Стандартная измерительная установка включает в себя фотометрический шар, приемник излучения, микроамперметр, источник питания, вольтметр и амперметр. Фотометрический шар состоит из двух полушарий, одно из которых неподвижное. Измерительное отверстие в нем предназначено для укрепления приемника излучения. Оно закрыто светорассеивающим стеклом для создания равномерной освещенности на поверхности приемника излучения. Экран фотометрического шара обеспечивает защиту измерительного отверстия от прямых лучей лампы. Приемник излучения служит для измерения освещенности внутренней поверхности фотометрического шара.

Измерение электрических и световых параметров источников излучения производится по методике, изложенной в ГОСТ 17616 и соответствующей научно-технической документации.

### **Измерение спектрального состава, цветовых характеристик и яркости источников света с помощью спектроколориметра**

При использовании в качестве регистрирующего устройства спектроколориметра ТКА-ВД (рис. 4.10, а) появляется возможность одновременно получать данные об относительном спектральном распределении, цветовых характеристиках и яркости источников излучения.

Принцип действия прибора основан на измерении спектра излучения протяженного источника света в видимом диапазоне 380–750 нм с последующей математической обработкой результатов измерения с помощью микропроцессорного устройства. Конструктивно прибор состоит из двух функциональных блоков: оптоэлектронного блока и блока обработки сигнала, связанных между собой гибким многожильным кабелем.

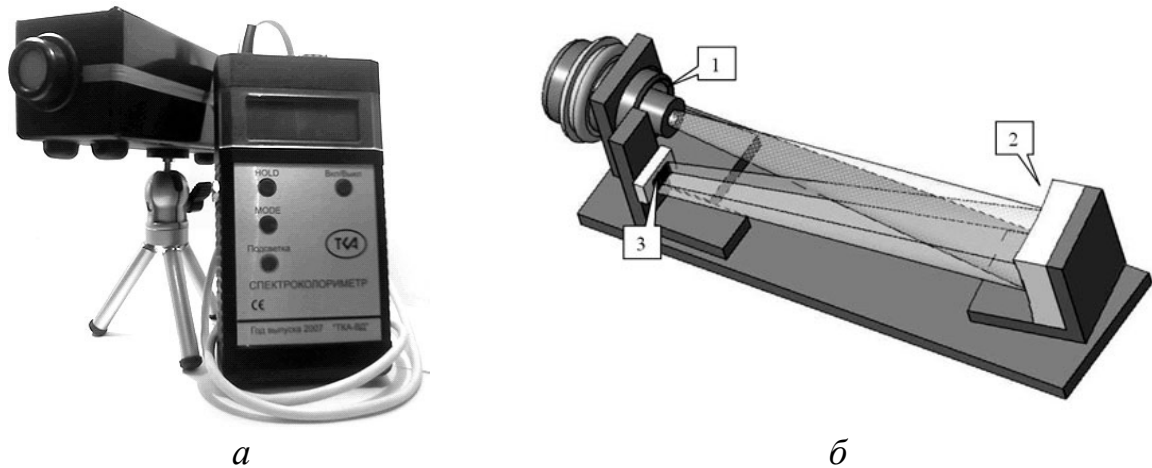


Рис. 4.10. Спектроколориметр ТКА-ВД: а) внешний вид; б) оптическая схема полихроматора прибора: 1 – объектив, 2 – вогнутая дифракционная решетка, 3 – диодная линейка

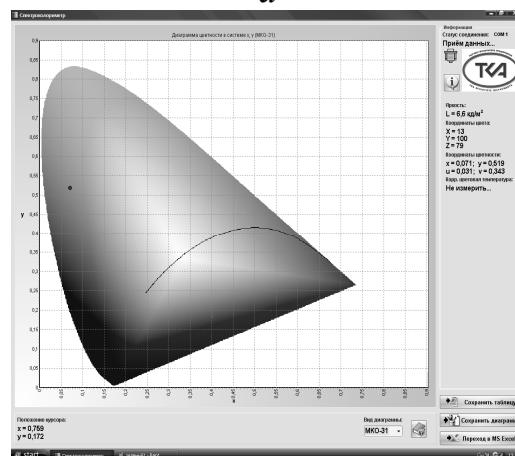
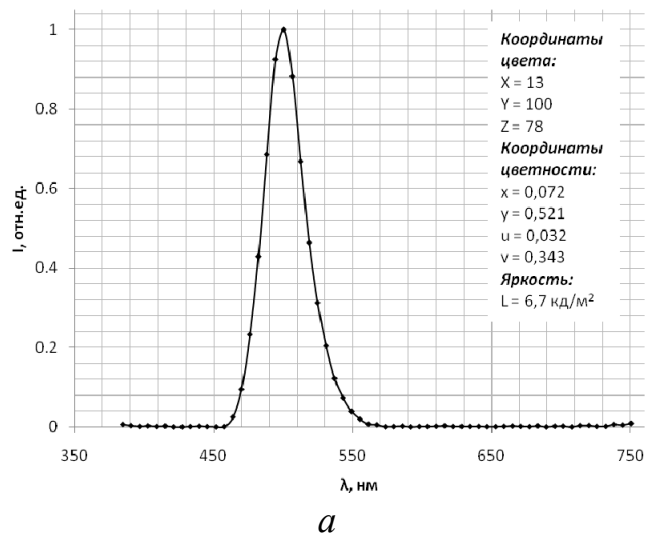


Рис. 4.11. Спектральное распределение (а) и диаграммы цветности в системах МКО-31 (б) излучения лампы ЛПРЗ-03



Оптоэлектронный блок прибора представляет собой полихроматор (рис. 4.10, б): входное оптическое излучение, формируемое объективом (1), разлагается в спектр на вогнутой дифракционной решетке (2) и фокусируется на диодной линейке (3), с которой снимается сигнал для последующей обработки и вычисления измеряемых параметров. Рабочий диапазон измерения яркости составляет 10–20000 кд/м<sup>2</sup>, а коррелированной цветовой температуры 1600–16000 К. Для приема и обработки данных используется программа «Спектрофотометр».

На рис. 4.11 приведены спектральные распределения и диаграммы цветности в системах МКО-31 (Международной Комиссии по Освещению) излучения лампы ЛПРЗ-03. Из спектрального распределения видно, что максимум излучения лампы ЛПРЗ-03 приходится на длину волны  $\lambda_{\max} = 500$  нм. Диаграммы цветности, в свою очередь, дают информацию о координатах цвета и цветности, яркости и коррелированной цветовой температуре источников света в международной колориметрической системе МКО-31 и МКО-60.

Светодиодная индустрия развивается во всем мире очень быстрыми темпами. Светодиоды становятся ярче, эффективнее, стабильнее и долговечнее. Российские компании по производству светодиодов, такие как: ЗАО "Светлана-Оптоэлектроника" (г. Санкт-Петербург), ОАО "ПРОТОН" (г. Орел), ООО НПЦ ОЭП "ОПТЭЛ" (г. Москва), ОАО "НИИПП" (г. Томск) постоянно совершенствуют практически все производственные процессы и разрабатывают новые технологии, позволяющие успешно конкурировать с ведущими мировыми производителями.

### Контрольные вопросы

1. Конструкция параметры и применение СИД?
2. Энергетическая диаграмма гетероструктуры.
3. Какие виды материалов используют для создания гетероструктур?
4. Какие материалы применяют в качестве подложки СИД?
5. Опишите методику эпитаксиального выращивания гетероструктур.
6. Какие операции выполняют в процессе монтажа светодиодных чипов в корпуса?
7. Какие материалы используют для герметизации светодиодов?
8. Способы получения белого света на основе светодиодов.
9. Перечислите основные световые характеристики полупроводниковых источников излучения и методы их измерения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ландсберг Г.С. Оптика: учеб. пособие для вузов. – 6-е изд. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 848 с.
2. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. – М.: Наука, 1978. – 792 с.
3. Окатов М.А. Справочник технолога-оптика – 2-е изд. – СПб.: Политехника, 2004. – 679 с.
4. Долгополов В.И. Светотехнические материалы. – М.: Энергия, 1972. – 167 с.
5. Дитчберн Р. Физическая оптика. – М.: Наука, 1965. – 632 с.
6. Казанкин О.Н., Марковский Л.Н. и др. Неорганические люминофоры. – Л.: Химия, 1975. – 192 с.
7. Прикладная электролюминесценция / под ред. М.В. Фока. – М.: Сов. радио, 1974. – 416 с.
8. Панков Ж. Оптические процессы в полупроводниках. – М.: Мир, 1973. – 456 с.
9. Зубаков В.Г., Семибратов М.Н., Штандель С.К. Технология оптических деталей – М.: Машиностроение, 1985. – 368 с.
10. Бужинский, Л.И. Демкина, К.С. Евстропьев и др. Физико-химические основы производства оптического стекла. – Л.: Химия, 1976. – 456 с.
11. Zachariasen W. Atomic Arrangement in Glass. – J. Am. Chem. Soc. – 1932. – № 54. P. 38–41.
12. Нагибина И.М. Интерференция и дифракция света. – Л.: Машиностроение, 1974. – 360 с.
13. Кривовяз Л.М., Знаменская М.А. Практика оптической измерительной лаборатории. – Л.: Машиностроение, 1974. – 336 с.
14. Сакулевич Ф.Ю. и др. Магнитно-абразивная обработка точных деталей. – Мн.: Высш. школа, 1977. – 288 с.
15. Хомич Н.С. Магнитно-абразивная обработка: технология и оборудование. – Мн.: БелНИИТИ, 1991. – 48 с.
16. Никифоров С. Проблемы, теория и реальность светодиодов для современных систем отображения информации высшего качества // Компоненты и технологии. – 2005. – № 5.
17. Алферов Ж. И. Физика и жизнь. – СПб.: Наука, 2000. – 255 с.
18. Шуберт Ф.Е. Светодиоды / пер. с англ.; под ред. А.Э. Юновича. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 496 с.

Учебное издание

ВИЛЬЧИНСКАЯ Светлана Сергеевна  
ЛИСИЦЫН Виктор Михайлович

## ОПТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ

Учебное пособие

**Издано в авторской редакции**

Научный редактор  
*доктор физико-математических наук,  
профессор В.Ф. Лосев*

Компьютерная верстка *С.С. Вильчинская*  
Дизайн обложки *И.О. Фамилия*

**Отпечатано в Издательстве ТПУ в полном соответствии  
с качеством предоставленного оригинал-макета**

Подписано к печати 30.03.2011. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».

Печать XEROX. Усл.печ.л. 9,01. Уч.-изд.л. 8,16.


Заказ . Тираж 100 экз.



Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
Система менеджмента качества

Издательства Томского политехнического университета сертифицирована  
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту BS EN ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30  
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, www.tpu.ru