

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
Белорусский национальный технический университет

---

Кафедра «Лазерная техника и технология»

А. М. Маляревич

ТЕХНОЛОГИЯ  
ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

Учебно-методическое пособие  
для студентов специальности  
1-27 01 01 «Экономика и организация производства»,  
направления специальности 1-27 01 01-08 «Приборостроение»

*Рекомендовано учебно-методическим объединением по образованию  
в области приборостроения*

Минск  
БНТУ  
2019

УДК 621.397 (075.8)

ББК 32.94я7

Т99

Рецензенты:

*кафедра лазерной физики и спектроскопии БГУ*

*Е. В. Луценко*

**Маляревич, А. М.**

Т99 Технология оптико-электронного приборостроения: учебно-методическое пособие для студентов специальности 1-27 01 01 «Экономика и организация производства», направления специальности 1-27 01 01-8 «Приборостроение» / А. М. Маляревич. – Минск : БНТУ, 2019 – 74 с.

ISBN 978-985-583-421-3.

В издании рассмотрены вопросы проектирования оптико-электронных приборов, задачи технологической подготовки производства, особенности изготовления оптических материалов и обработки оптических деталей, сборки, юстировки и поверки оптико-электронных блоков и устройств, а также основные представления о распространении оптического излучения через материалы и его взаимодействия с оптическими деталями.

Пособие может быть использовано при самостоятельной работе и позволит будущему специалисту получить представление об особенностях организации производства одной из ведущих отраслей промышленности Республики Беларусь.

УДК 621.397 (075.8)

ББК 32.94я7

ISBN 978-985-583-421-3

© Маляревич А. М., 2019

© Белорусский национальный  
технический университет, 2019

## ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Технология опико-электронного приборостроения» предназначена для подготовки будущих специалистов в области управления производством приборостроительного профиля. Программа знакомит студентов с особенностями организации технологического процесса при производстве опико-электронных узлов и приборов.

В учебно-методическом пособии изложены закономерности распространения опического излучения через материалы, приведены характеристики опического излучения и опических материалов; содержатся основные требования, предъявляемые к опико-электронным приборам, описание процессов проектирования, технологической подготовки производства и собственно изготовления опических материалов, опических деталей и опико-электронных приборов. Пособие знакомит с основными видами источников и приемников излучения, в целом с элементной базой опико-электронного приборостроения.

Все это позволяет сформировать у будущего специалиста понимание особенностей ценообразования в опико-электронной отрасли промышленности, характера организации производства и управления предприятием в этой области приборостроения.

## 1. ПОНЯТИЕ ОБ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРАХ

*Оптико-электронными* называют *приборы* (ОЭП), в которых информация об исследуемом или наблюдаемом объекте переносится оптическим излучением, а ее первичная обработка сопровождается преобразованием энергии оптического излучения в электрическую энергию.

*Оптическим* в настоящее время называют *излучение* спектральных диапазонов: ультрафиолетового (УФ) 200–400 нм, видимого 400–800 нм, ближнего инфракрасного (ИК) 800–2500 нм (0,8–2,5 мкм) и среднего ИК диапазонов 2,5–25 мкм.

Важно, что в ОЭП оптические и электронные звенья выполняют основные функции прибора, а не являются вспомогательными устройствами. Если убрать одно из них, то прибор перестанет быть оптико-электронным, а станет или оптическим, или электронным.

Таким образом, ОЭП являются частью *оптических приборов*, которые можно разделить на 4 группы: *оптико-механические* (бинокль, микроскоп, подзорная труба), *световые* (прожектор, осветитель), *технологические*, предназначенные для концентрации оптического излучения на малом участке обрабатываемой поверхности (лазер, газоразрядная лампа) и *ОЭП*.

Все ОЭП можно разделить на две большие группы: приборы для приема, передачи, обработки, хранения информации, переносимой оптическим излучением, и приборы для передачи, приема, использования энергии.

*Классификация ОЭП* может быть проведена по ряду признаков:

1) спектральный диапазон работы – видимый, УФ, ближний или средний ИК;

2) степень автоматизации – автоматические, полуавтоматические, неавтоматические;

3) метод работы – активный (когда исследуемый объект подсвечивается источником света, характеристиками которого управляет наблюдатель), полуактивный (источник света освещает наблюдаемый объект, но характеристиками освещения управлять нельзя), пассивный (для наблюдения используется свечение самого объекта, дополнительных источников использовать не требуется);

4) назначение – астрофизические, геодезические, навигационные, медицинские, робототехнические, контрольно-измерительные, теле-

визионные, системы оптической связи, военные, а также – индикационные, следящие;

5) параметр используемой характеристики оптического сигнала – фотометрические, спектральные, поляризационные, интерференционные, рефрактометрические, геометро-оптические, временные (импульсные, фазовые);

6) условия эксплуатации – лабораторные, цеховые, полевые, бортовые.

*Обобщенная схема ОЭП* представлена на рис. 1.1. Оптический сигнал, представляющий собой свет, рассеянный объектом, поступает в оптическую систему ОЭП, где он преобразуется фотоприемником в электрический сигнал и далее подвергается обработке в электронном тракте (очистке от помех, случайных сигналов, шумов, усилению, кодированию, передаче потребителю). Одновременно с регистрацией полезного сигнала в ОЭП поступают случайные или вредные сигналы – свет от посторонних объектов (фон, помехи и пр.), засветка от источника освещения и т. д. Для их устранения в ОЭП могут использоваться дополнительные устройства или приспособления: фильтры, бленды, модуляторы и пр. После обработки сигнал поступает в выходной блок, который формирует информацию для представления потребителю в удобном для него виде («картинка» на дисплее, фото- или видеосигнал, запись на носителе для последующего просмотра и т. д.).

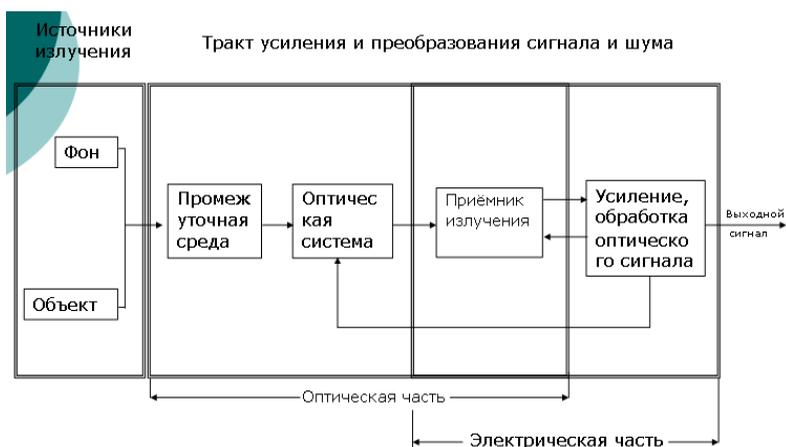


Рис. 1.1. Обобщенная схема ОЭП

При сравнении ОЭП с другими оптическими или иными приборами можно заключить: ОЭП, как правило, сложнее оптических приборов, в которых переносимая светом информация регистрируется глазом (*визуальные приборы*). Но недостаточные чувствительность и разрешающая способность глаза, узкий спектральный диапазон восприимчивости, малое быстродействие, невозможность использовать человека в условиях смертельно опасных температур или радиации вызвали необходимость создания ОЭП.

Очень часто ОЭП выполняют те же функции, что и *приборы радиочастотного диапазона* (наблюдение за объектом, обнаружение постороннего объекта и т. д.). В силу меньшей длины волны оптического излучения ОЭП обладают большей разрешающей способностью, меньшими размерами, большей скоростью передачи информации. Но ослабление излучения в атмосфере существенно выше для оптического излучения, чем для радиочастотного. Поэтому радиоэлектронные и оптико-электронные приборы в общем случае дополняют друг друга. Например, радиолокатор определяет положение самолета на большом расстоянии, а точное наведение ракеты на самолет производится с помощью оптического устройства.

До середины 90-х годов прошлого века ОЭП были достаточно дорогими приборами, поэтому использовались, прежде всего, в военной отрасли. Прогресс в области микроэлектроники резко снизил стоимость электронных комплектующих, привел к созданию полупроводниковых лазеров, светодиодов и полупроводниковых фотоприемников, работающих без охлаждения и с высоким КПД, позволил резко увеличить чувствительность и быстродействие фотоприемников, создать надежные схемы коррекции их чувствительности при изменении температуры. Вышеперечисленные факторы вместе с развитием информационных технологий сделали ОЭП достаточно дешевыми и доступными в повседневной практике.

### **Вопросы для самоконтроля**

1. Дайте определение оптико-электронных приборов и укажите их отличия от других типов оптических приборов.
2. Приведите классификацию оптико-электронных приборов.
3. Проведите сравнение оптико-электронных приборов с визуальными оптическими приборами и радиоэлектронными.

## 2. ОПТИЧЕСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Распространение оптического излучения через материал в общем случае характеризуется отражением, преломлением, рассеянием, поглощением и пропусканием (рис. 2.1).

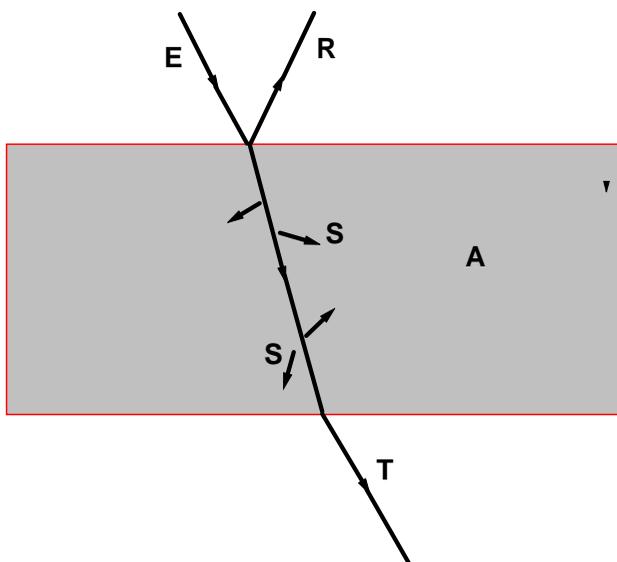


Рис. 2.1. Распространение света через материал:  
 $E$  – падающий луч;  $R$  – отраженный луч;  $S$  – рассеянный свет;  
 $T$  – прошедший луч;  $A$  – поглощенное излучение

Электромагнитная теория света, базирующаяся на уравнениях Максвелла, позволяет найти распределение светового поля после прохождения различных оптических элементов. Однако чтобы избежать достаточно сложных вычислений, на практике пользуются рядом упрощенных подходов, которые, тем не менее, позволяют получить правильные результаты в большом количестве случаев. Таким предельным случаем этой теории при длине волны электромагнитного излучения  $\lambda \rightarrow 0$  является *геометрическая оптика*. Геометрическая оптика рассматривает оптическое излучение как совокупность лучей и не учитывает волновую природу света. Луч – это направление переноса энергии светового поля.

Основные законы геометрической оптики описывают распространение световых лучей.

1) *Закон прямолинейного распространения света.* В однородной среде свет распространяется по прямой линии. Среда является однородной, если расстояние между ее одинаковыми структурными элементами в заданном направлении одинаково в каждой области среды. Закон нарушается, если размеры структурных элементов среды сравнимы с длиной волны, тогда наблюдается явление *дифракции* – отклонение распространения света от прямолинейного направления, в этом проявляется его волновая природа.

2) *Закон независимости световых пучков (принцип линейности).* Эффект, производимый несколькими световыми пучками, равен сумме эффектов, производимых каждым пучком в отдельности. Закон нарушается, если пучки света *когерентны*, это также проявление волновой природы света.

3) *Закон отражения света.* Падающий на поверхность луч, отраженный от нее луч и перпендикуляр, восстановленный к отражающей поверхности в точке падения, лежат в одной плоскости. Угол падения  $\alpha$  и угол отражения  $\beta$  равны между собой  $\alpha = \beta$  (рис. 2.2, а).

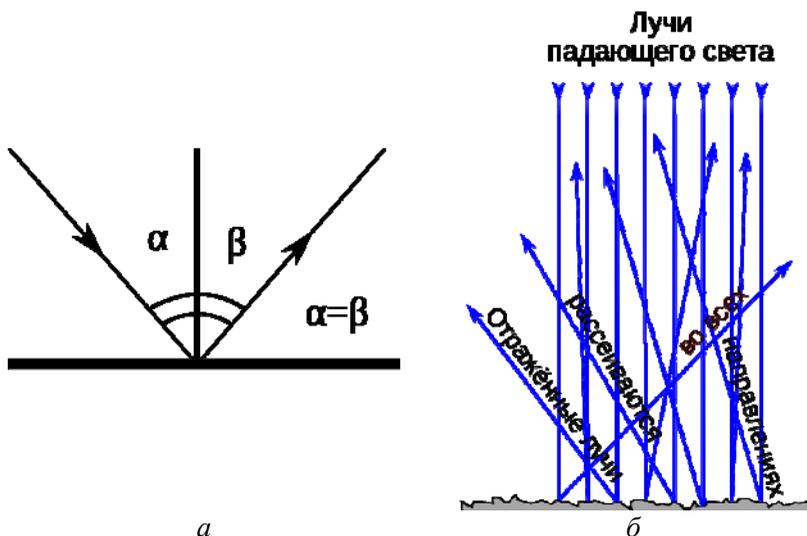


Рис. 2.2. Отражение света поверхностью: зеркальное (а); диффузное из-за шероховатости поверхности (б)

На практике поверхности обычно являются не гладкими, а шероховатыми. То есть, например, у горизонтально расположенной поверхности, ее микроструктурные элементы не обязательно параллельны горизонту, а составляют с ним различные углы (рис. 2.2, б). Поэтому падающие на такую поверхность параллельные лучи отражаются под разными углами. Это явление называют *рассеянием света на шероховатой поверхности* или *диффузным отражением света*. В случае если отраженный поверхностью свет имеет одинаковую интенсивность по всем направлениям, это называют *абсолютно диффузным отражением*, что является полной противоположностью *зеркальному отражению* света поверхностью в соответствии с законом отражения.

4) *Закон преломления света*. Падающий луч на границу раздела двух сред, преломленный луч и перпендикуляр к границе раздела, восстановленный в точке падения, лежат в одной плоскости. Углы падения  $\alpha$  и преломления  $\beta$  связаны соотношением (рис. 2.3):

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta,$$

где  $n_1$  и  $n_2$  – *показатели преломления* соответственно первой и второй сред.

Показатель преломления  $n$  характеризует оптическую плотность среды и указывает, как скорость света в этой среде  $v$  уменьшается в сравнении со скоростью его распространения в вакууме  $c$ :  $v = c/n$ . Величина  $n$  зависит от длины волны.

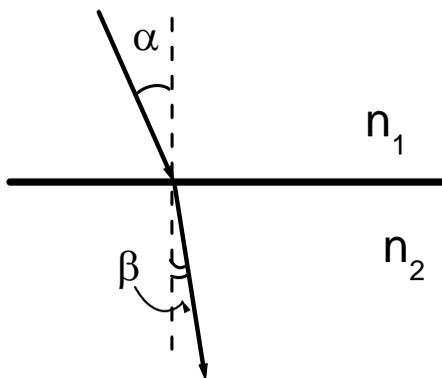


Рис. 2.3. Преломление света на границе раздела двух сред

При распространении света внутри среды может наблюдаться его *поглощение*, которое характеризуется коэффициентом поглощения  $\alpha$  и описывается законом Бугера:

$$I = I_0 \exp(-\alpha l),$$

где  $I_0$  и  $I$  – интенсивности света, падающего на среду и прошедшего в ней расстояние  $l$ , соответственно, коэффициент поглощения света средой  $\alpha$  зависит от длины волны.

Помимо поглощения в среде может наблюдаться *рассеяние* света, которое обусловлено ее неоднородностью и, как следствие, разницей показателей преломления ее различных микрообластей.

Количество прошедшего через среду света  $I_1$  в сравнении с вошедшим в нее  $I_0$  характеризует пропускание среды

$$T = I_1 / I_0 = \exp(-\beta L),$$

где  $\beta$  – коэффициент ослабления света средой, учитывающий поглощение и потери света из-за рассеяния;

$L$  – расстояние, которое свет прошел в среде при своем распространении.

В целом количество падающего на среду света  $E$  и света, отраженного на границах раздела  $R$ , поглощенного  $A$ , рассеянного  $S$  и прошедшего  $T$  через среду, равны между собой, в соответствии с законом сохранения энергии (рис. 2.1):

$$E = R + S + A + T.$$

Как известно, все материалы в соответствии с их электрической проводимостью делятся на металлы, диэлектрики и полупроводники. Природа электропроводности материалов имеет значение и для их оптических свойств. Так высокая электропроводность *металлов* обусловлена большим количеством свободных электронов в них. По этой же причине металлы толщиной более 1 мкм являются непрозрачными для электромагнитного излучения. Они отражают или поглощают весь падающий световой поток. *Диэлектрики* в общем случае могут иметь сложную молекулярную структуру, и их взаимодействие со светом характеризуется коэффициентом поглощения  $\alpha$ , который различен для разных длин волн. На одних длинах волн

диэлектрики поглощают оптическое излучение и непрозрачны для света (коэффициент поглощения велик), в то время как на других могут быть прозрачны или частично прозрачны (коэффициент поглощения мал). Особенности энергетической структуры *полупроводников* обуславливают существование у них особой длины волны  $\lambda_{33}$ , которая связана с энергией, характеризующей ширину запрещенной зоны конкретного полупроводникового материал  $E_{33}$ , соотношением:

$$E_{33} = h \cdot c / \lambda_{33}.$$

Для длин волн короче  $\lambda_{33}$  полупроводник непрозрачен для света и ведет себя подобно металлам. На длинах волн  $\lambda > \lambda_{33}$  полупроводники прозрачны или частично прозрачны для оптического излучения и характеризуются коэффициентом поглощения (подобно диэлектрикам).

*Фотометрические величины.* Любое излучение, в том числе и оптическое, переносит энергию. Поскольку воздействие света на какой-то объект зависит не только от его энергии, но и от длины волны излучения, размеров поверхности, на которую падает свет, длительности воздействия и др., то характеристик, описывающих это воздействие (фотометрических величин) несколько.

Основная энергетическая характеристика – *поток излучения*:

$$\Phi = E / t,$$

где  $E$  – количество энергии, переносимое излучением через какую-либо площадку в единицу времени  $t$ .

Определение потока излучения соответствует мощности, поэтому его измеряют в ваттах (Вт). Но при работе в видимом диапазоне и визуальной регистрации сигналов часто используется еще одна единица измерения – люмен (лм). Ее использование обусловлено тем, что исторически первым приемником оптического излучения являлся глаз. Именно с помощью глаза сравнивались световые потоки. Глаз неодинаково чувствует свет различных длин волн, поэтому связь между величинами светового потока в люменах и ваттах зависит от его спектрального состава. 1 люмен равен 1/683 Вт на длине волны 0.555 мкм, где глаз наиболее чувствителен к свету. Для других длин волн поток в 1 Вт будет восприниматься глазом,

как более слабый, и, соответственно, характеризоваться меньшим числом люменов.

*Сила света* – это величина потока излучения, распространяющегося в единичном телесном угле. Она характеризует распределение светового потока по определенным направлениям. Сила света измеряется в Вт/стр или канделах,  $1 \text{ кд} = 1 \text{ лм/стр}$ .

$$K = \Phi / \Omega.$$

*Освещенностью* называют поток излучения, падающий на единицу площади освещаемой поверхности. Эта величина является плотностью мощности и ее часто называют *интенсивностью* излучения. Освещенность измеряется в Вт/м<sup>2</sup> или люксах,  $1 \text{ лк} = 1 \text{ лм/м}^2$ .

$$I = \Phi / S.$$

*Светимость* – это величина светового потока, посылаемого единицей поверхности источника  $S_{\text{ист}}$  во всех направлениях. Она характеризует интенсивность свечения источника. Единицы измерения светимости такие же, как и освещенности.

$$M = \Phi / S_{\text{ист}}.$$

*Яркость* излучения – это величина светового потока, излучаемая единицей площади поверхности источника в единичный телесный угол в направлении под углом  $\alpha$  к поверхности. Яркость измеряется в Вт/стр·м<sup>2</sup> или кд/м<sup>2</sup>. Как и сила света, яркость зависит от направления, в котором распространяется излучение относительно поверхности источника.

$$B = \Phi / (S_{\text{ист}} \cdot \cos\alpha \cdot \Omega) = K / (S_{\text{ист}} \cdot \cos\alpha).$$

Оптическая система может только уменьшить яркость вследствие поглощения ее элементами части излучения. Эта особенность делает яркость базовой величиной в расчетах потоков и освещенностей при проектировании оптических и оптико-электронных приборов. Кроме того, отклик зрительного аппарата человека на световое раздражение зависит именно от яркости попадающего в глаз светового потока. Визуальное восприятие объектов зрительным аппаратом человека основано на сравнении яркостей объекта и фона.

*Распространение оптического излучения в атмосфере.* Атмосфера Земли содержит газообразные, жидкие и твердые вещества, которые могут существенно поглощать и рассеивать оптическое излучение. Это вызывает ослабление излучения при его распространении в атмосфере в соответствии с законом Бугера. В отсутствии загрязнителей, вызванных производственной деятельностью человека и природными катаклизмами, основное ослабление излучения происходит вследствие поглощения парами воды и углекислым газом. Зависимость коэффициента поглощения этих ослабителей от длины волны имеет сложный вид (рис. 2.4). Существует несколько спектральных диапазонов, в которых атмосфера характеризуется высоким пропусканием. Помимо видимого диапазона эти области (их часто называют «окна» прозрачности атмосферы) находятся на длинах волн 1,6–1,8; 2,1–2,5; 3,5–4,0; 4,5–5,1; 8,2–9,0; 10,2–13,5 мкм. Выбор источников и приемников излучения оптико-электронных приборов во многом обусловлен наличием этих «окон» прозрачности атмосферы.

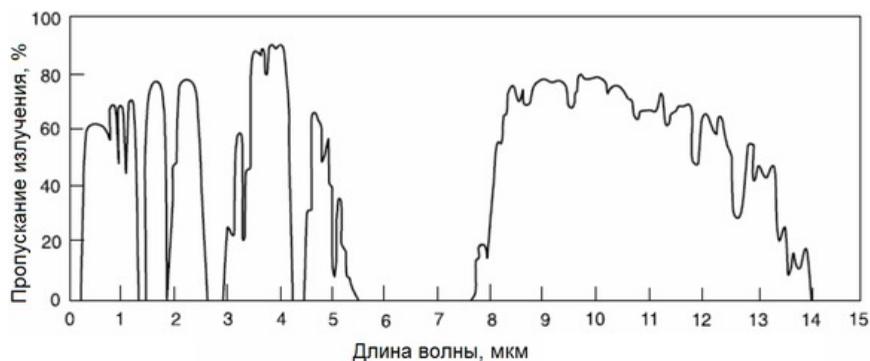


Рис. 2.4. Пропускание атмосферы в оптическом диапазоне электромагнитных волн

Источники излучения принято разделять на *естественные* и *искусственные*. К первым относятся Солнце, звезды, другие светящиеся объекты естественного происхождения (молния, светлячок, огонь, вызванный самовозгоранием или повышением температуры из-за естественных причин и т. д.). Искусственные источники разделяют на 4 большие группы: тепловые, газоразрядные, светодиодные, лазерные.

Тепловые источники света в виде костра известны человеку с первобытных времен. Их современная реализация – лампа накаливания. Свечение теплового источника обусловлено законом природы, согласно которому любое тело с температурой выше абсолютного нуля (0 К) излучает электромагнитные волны. Спектр испускания идеального объекта (абсолютно черного тела, нагретого до температуры  $T$ )  $\varepsilon(\nu, T)$ , где  $\nu$  – частота излучения, описывается формулой Планка:

$$\varepsilon(\nu, T) = \frac{2\pi h \nu^3}{c^2 (e^{h\nu/kT} - 1)},$$

где  $h$  и  $k$  – постоянные Планка и Больцмана, соответственно.

Вид спектра испускания при различных температурах представлен на рис. 2.5. Как можно видеть, повышение температуры тела сдвигает его спектр испускания в коротковолновую область.

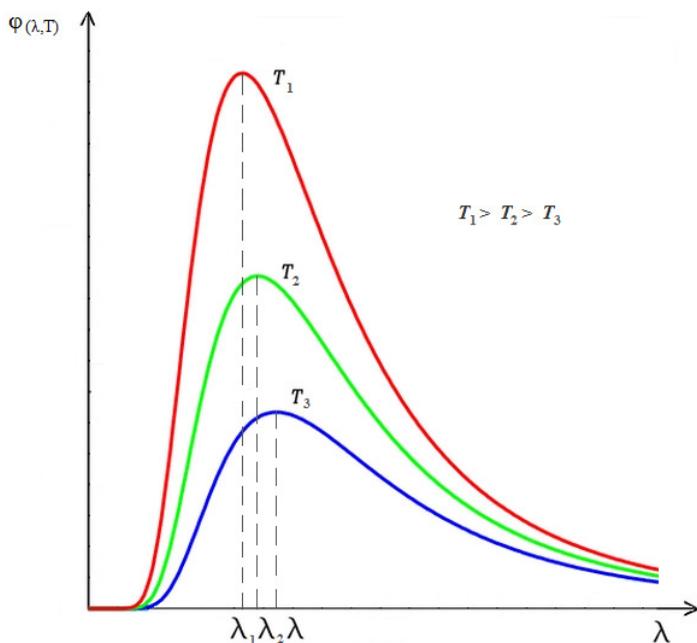


Рис. 2.5. Спектр свечения абсолютно черного тела, нагретого до разных температур

В лампе накаливания при пропускании электрического тока через тело накала, оно нагревается и начинает светиться. Телом накала является вольфрамовая нить, поскольку вольфрам – тугоплавкий металл (его температура плавления  $T_{пл} = 3422$  °С) и его можно раскалить до таких температур, что он начинает светиться белым светом. Но основным недостатком ламп накаливания является низкий КПД – около 3 %. Введение в колбу лампы паров галогенов (бора или йода) позволяет повысить температуру нити до 3200 °С, что вызывает повышение КПД до 9–12 %.

В газоразрядных лампах свечение возникает в результате возбуждения газообразной среды протекающим через нее электрическим током. В качестве среды используются инертные газы (неон, ксенон, криптон) и пары металлов (натрий, ртуть, водород, дейтерий). Многие из этих сред дают окрашенное излучение и применяются для рекламной или цветной подсветки. Наиболее эффективно излучают ртутные лампы, но основная доля их излучения приходится на УФ-участок спектра. Чтобы повысить светоотдачу ламп в видимом спектральном диапазоне и сделать их пригодными для использования в быту, УФ-излучение преобразуют в видимое. Для этого на внутреннюю сторону колбы газоразрядной лампы наносят люминофор – материал, который поглощает ультрафиолетовое излучение паров ртути, а сам в результате светится в видимом диапазоне. Это, так называемые люминесцентные или энергосберегающие лампы, их КПД – не менее 15 %.

Светодиод – полупроводниковый источник света. Испускание света происходит в полупроводниковом устройстве, состоящем из двух частей: одна является материалом с нехваткой электронов (в ней избыток положительно заряженных частиц, «дырок», positive), *p*-полупроводник, другая – с избытком электронов (negative), *n*-полупроводник. Область их контакта – *p-n* переход. Если на это устройство подать электрическое напряжение такой полярности, чтобы электроны начали двигаться в *p*-область, то при встрече электронов и дырок происходит их объединение (рекомбинация) с испусканием света.

Преимуществами светодиодных источников света является их компактность, низкое потребление энергии, низкое питающее напряжение, высокий КПД – около 20 %, высокая механическая прочность и длительный срок службы (от 10 000 до 100 000 часов).

Принципиальным отличием 4-й группы искусственных источников излучения – *лазеров* – от всех других источников является то, что они испускают *когерентное* (согласованное по фазе) излучение. Это позволяет фокусировать излучение в очень малые пятна и обеспечивать чрезвычайно высокую концентрацию энергии в малой области пространства. По этой причине лазеры используются в технологических целях для обработки материалов (резки, сварки, пробивки отверстий, упрочнения поверхности), а также – в медицине, передаче информации, диагностике и др. В зависимости от типа лазера его КПД составляет от долей процента до 70–80 %.

### **Вопросы для самоконтроля**

1. Дайте определение закона отражения. Что такое диффузное и абсолютно диффузное отражение?
2. Что такое «окна прозрачности» атмосферы, какими причинами вызвано их наличие, и на каких длинах волн они наблюдаются?
3. Чем обусловлено явление рассеяния излучения?
4. Дайте определение закона преломления.

### **3. ОПТИЧЕСКИЕ ДЕТАЛИ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ**

*Оптические детали* – простейшие оптические элементы, из которых составляются (собираются) оптические устройства. Они разделяются на следующие виды: плоскопараллельная пластинка, призма, линза, зеркало, волоконно-оптические элементы. По своему внешнему виду и назначению оптические детали представляют собой:

1) *плоскопараллельная пластинка* (рис. 3.1) предназначена для смещения пучка в пространстве на определенное расстояние без изменения направления его распространения;

2) *призма* – деталь, которая изменяет направление распространения светового луча, различают: диспергирующую призму (изменяет направление распространения луча на определенный угол в зависимости от длины волны света и, таким образом, разлагает свет в спектр, рис. 3.2, *а*), клин (призма с малым преломляющим углом  $\omega$ , см. рис. 3.2, *а*), отражающую призму (изменяет направление распространения луча на противоположное, рис. 3.2, *б*);

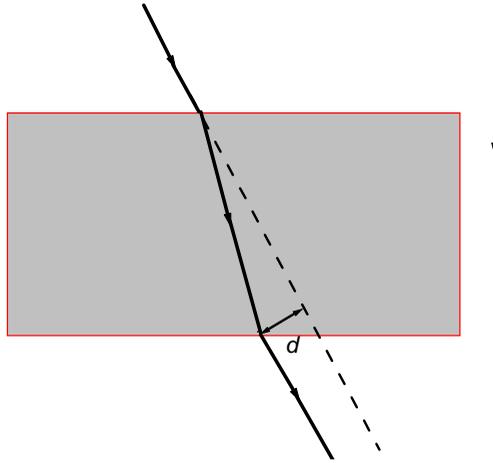


Рис. 3.1. Распространение света через плоскопараллельную пластинку, где  $d$  – расстояние, на которое смещается луч после прохождения пластинки

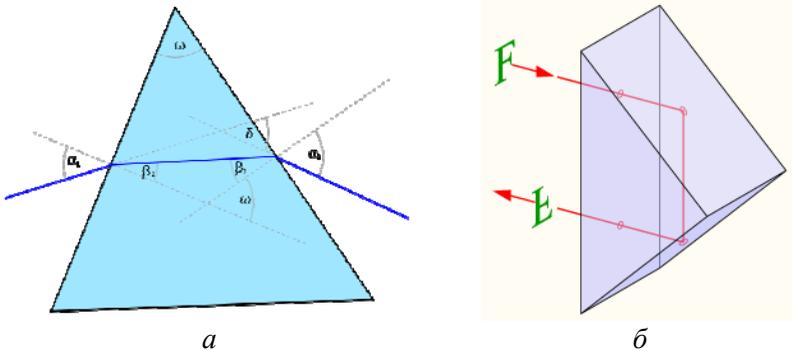


Рис. 3.2. Призмы: диспергирующая (а), отражающая (б)

3) *линза* – деталь, при распространении через которую свет фокусируется или расфокусируется и происходит формирование действительного или мнимого изображения предмета. По форме может быть (рис. 3.3) двояковыпуклой, двояковогнутой, плосковыпуклой, плосковогнутой или менисковой (положительной или отрицательной). Обычно используются линзы с поверхностью, представляющей собой часть сферы определенного радиуса, но возможно использование деталей с иной формой, в частности, асферической;

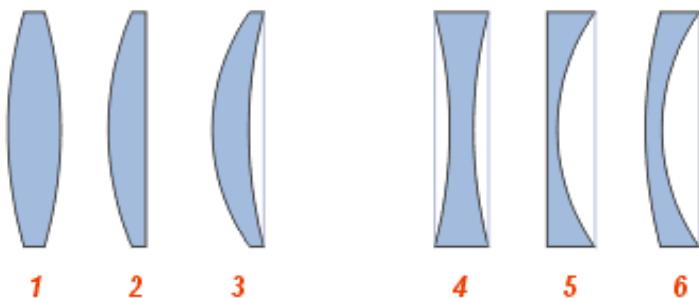


Рис. 3.3. Виды линз. Собирающие: 1 – двояковыпуклая; 2 – плосковыпуклая; 3 – вогнуто-выпуклая (положительный мениск). Рассеивающие: 4 – двояковогнутая; 5 – плосковогнутая; 6 – выпукло-вогнутая (отрицательный мениск)

4) *зеркало* – деталь для отражения (в частности, фокусировки или расфокусировки) света, в результате чего формируется действительное или мнимое изображение предмета. По форме представляет собой плоскую, выпуклую или вогнутую поверхность. Неплоские зеркала могут быть сферической (обычно) или иной (гиперболической, параболической, эллиптической, асферической) формы;

5) *волоконно-оптические элементы*. В связи с развитием волоконно-оптических технологий (в частности, линий связи) в последние десятилетия появились элементы, которые используются для управления распространением света по волоконно-оптическим сетям. Часто они применяются для фокусирования или расфокусирования света, выходящего из волокна, а также для соединения световых потоков, распространяющихся по двум волокнам, в одно волокно (оптический смеситель или мультиплексер) или разделения светового пучка на два для распространения по двум разным волокнам (оптический разветвитель или демультиплексер) для доставки информации двум разным потребителям.

Для повышения качества изображения, которое создает оптическая система ОЭП, используют *вспомогательные оптические элементы*. К ним относятся, прежде всего, бленда, светофильтр.

*Бленда* (от нем. *blenden* – заслонять) – дополнительная насадка к объективу или часть его оправы, предназначенная для борьбы с бликами и паразитной засветкой при съемке в сложных условиях освещения (например, в яркий солнечный день). Кроме того, она может предохранять первую линзу от попадания брызг. Бленда пред-

ставляет собой тонкостенную полую насадку конической, пирамидальной или цилиндрической формы (рис. 3.4, *а–в*). Для предотвращения «затенения» блендой углов кадра используют бленды достаточно сложной лепестковой конструкции (рис. 3.4, *г*). Их изготавливают обычно из пластмассы.

*Светофильтр* – элемент, который служит для подавления или выделения части спектра оптического излучения. Различают *нейтральные* и *селективные* светофильтры. Нейтральные оптические фильтры в рабочем участке спектра имеют одинаковую величину пропускания  $T$  для различных длин волн, а селективные – различные величины  $T$  для разных длин волн. Кроме того, светофильтры различают по функциональному назначению (защитные, градиентные, спектральные, аддитивные, субтрактивные, для создания специальных эффектов), типу выделяемой части спектра (узкополосные, односторонние, двусторонние, корректирующие), принципу действия (абсорбционные, интерференционные, отражательные, поляризационные).



Рис. 3.4. Формы бленд: *а* – коническая; *б* – пирамидальная; *в* – цилиндрическая; *г* – лепестковая

Оптические детали и вспомогательные элементы изготавливают из оптических материалов, к которым относятся стекло, ситаллы, кристаллы, кристаллокерамика, пластмасса и металлы.

*Оптическое стекло* – стекло специального состава, от обычного (технического) стекла отличается особенно высокой прозрачностью в рабочем диапазоне длин волн, чистотой, однородностью, а также строго нормированным коэффициентом преломления, дисперсией и, в необходимых случаях, цветом. Выполнение всех этих требований значительно усложняет и удорожает производство оптического стекла.

*Ситаллы* – это стеклокристаллический материал, который получается в результате вторичной термической обработки стекла особого состава. В результате такой обработки в исходной стеклянной матрице формируются мелкодисперсные кристаллы определенной структуры. Их химическая формула зависит от состава стекла, а размер – от температуры обработки и для оптических применений не превышает десятков нанометров (иначе материал становится оптически непрозрачным). Кристаллические частицы равномерно распределены в стеклянной матрице. Количество кристаллической фазы в ситаллах может составлять 20–95 % об. Ситаллы обладают высокими прочностью, твердостью, износостойкостью, химической и термической стойкостью, малым термическим расширением, высокими газо- и влагонепроницаемостью.

*Кристаллы* – твердые тела, в которых *составляющие их частицы* (атомы, молекулы, ионы) регулярно расположены (*упорядочены*), что придает им естественную форму правильных симметричных многогранников определенных видов. В качестве оптических материалов обычно используются диэлектрические и полупроводниковые кристаллы. Часто эти материалы *легируются* (дополняются) инородными атомами для придания им требуемых оптических свойств. Производство оптических кристаллов отличается высокими требованиями к исходным материалам, в частности, отсутствию посторонних примесей, соблюдению технологии выращивания, и как следствие, высокой стоимостью.

*Кристаллокерамика* – оптический материал, который получается в результате обработки при высоком давлении и высокой температуре мелкокристаллических остатков обработки оптических кристаллов. В настоящее время удалось добиться того, что кристалло-

керамика практически не уступает монокристаллам по прозрачности, коэффициенту преломления, другим важным для оптических применений показателям.

*Пластмасса* – оптически прозрачный полимерный материал, как правило, органического происхождения. Имеет низкую (80–150 °С) температуру плавления и высокую пластичность, поэтому легко преобразуется в нужную форму, часто сложного вида. Однако обладает малой механической стойкостью и достаточно быстрой деградацией при естественном освещении, что затрудняет их использование в качестве внешних оптических элементов.

*Металлы* используются в качестве материалов для отражающих оптических элементов (зеркал). Обычно это – медь, серебро, сплавы металлов, например, инвар. Важное их качество – высокая теплопроводность и малый коэффициент термического расширения, что способствует сохранению формы изделия при значительном изменении температуры.

### **Вопросы для самоконтроля**

1. Перечислите виды оптических деталей и укажите, какие функции они выполняют.
2. Приведите основные типы оптических материалов и укажите их основные отличительные особенности.
3. Приведите основные характеристики материалов, важные для их использования в оптике.
4. Назовите основные вспомогательные оптические элементы и для чего они применяются.

## **4. АБЕРРАЦИИ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

*Идеальной оптической системой* называется система, отображающая каждую точку предмета точкой изображения и обеспечивающая одинаковый масштаб преобразования предмета в пределах всего изображения. Для такой системы доказаны следующие теоремы, которые позволяют представить, по какой причине появляются определенные искажения (*абберации*) при создании изображения оптическими системами.

**Теорема 1.** Плоскости, перпендикулярной главной оптической оси в пространстве предметов, соответствует плоскость, перпендикулярная главной оптической оси в пространстве изображений (такие *плоскости* называются *сопряженными*).

**Теорема 2.** Линейное увеличение в паре сопряженных плоскостей одинаково.

Для оптической системы, основу которой составляют линзы или зеркала, характерны следующие основные (*кардинальные*) элементы: главная оптическая ось, центр линзы (полюс зеркала), побочная оптическая ось, фокус, плоскость фокусов (фокальная плоскость), а также входной и выходной зрачки, поле зрения. С последними понятиями познакомимся позже, а сейчас дадим определения терминам, используемым при характеристике зеркал и линз.

*Главная оптическая ось* – прямая, проходящая через центры кривизны первой и второй преломляющей поверхностей линзы (или прямая, проходящая через полюс зеркала перпендикулярно к его поверхности).

*Центр (оптический) линзы* – точка, лежащая на главной оптической оси внутри линзы между полюсами кривизны первой и второй преломляющей поверхностей, через которую оптические лучи проходят, не изменяя направление.

*Полюс зеркала* – вершина сегмента поверхности, из которой вырезано зеркало.

*Побочная оптическая ось* – любая прямая линия, проходящая через оптический центр линзы.

*Фокус* – точка на главной оптической оси, в которой пересекаются после преломления лучи (или их продолжения), падающие на линзу параллельно главной оптической оси. У любой линзы два фокуса – передний и задний.

Плоскость, перпендикулярная оптической оси, расположенная в фокусе линзы, называется *фокальной плоскостью* (или *плоскостью фокусов*).

Для идеальной оптической системы справедлива формула *оптической силы линзы*:

$$\frac{1}{F} = (n - 1) \left( \frac{1}{R_1} \pm \frac{1}{R_2} \right),$$

где  $F$  – фокусное расстояние линзы;

$n$  – показатель преломления материала линзы;

$R_1$  и  $R_2$  – радиусы кривизны передней и задней поверхностей линзы, соответственно.

Реальные оптические системы не лишены искажений, которые называются *абберациями*. Они делятся на два класса: *монохроматические* (присущие системам, работающим с излучением на одной длине волны) или *хроматические* (которые характерны для многоцветных оптических систем).

*Монохроматические абберации* – бывают 4-х видов: *сферическая абберация*, *астигматизм*, *дисторсия* и *кома*.

*Сферическая абберация* – обусловлена тем, что световые лучи, исходящие из точки, лежащей на главной оптической оси оптической системы (линзы), не пересекаются в одной точке (рис. 4.1). Это обусловлено тем, что лучи падают на линзу под разными углами и, соответственно, имеют разные углы преломления на передней и задней преломляющих поверхностях линзы. В итоге, точка предмета передается в изображении не точкой (как это требуется в соответствии с положениями об идеальной оптической системе), а кружком (см. рис. 4.1). Это вызывает «размытие» изображения (нечеткость). Может корректироваться комбинацией линз с «положительной» и «отрицательной» оптической силой.

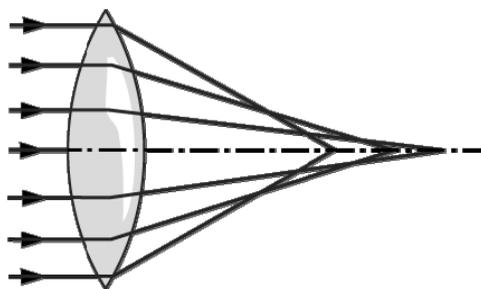


Рис. 4.1. Проявление сферической абберации линзы

Сферическая абберация (лучи, идущие дальше от главной оптической оси линзы, пересекают главную оптическую ось ближе от плоскости фокусов, чем лучи, идущие вблизи от главной оптической оси) проявляется для точек, лежащих на главной оптической оси, и поэтому характерна даже для оптических систем, фокусирую-

ших лазерное излучение. Остальные виды монохроматических аберраций проявляются при создании изображений точек, лежащих вне главной оптической оси.

*Астигматизм* – нарушение качества изображения, обусловленное тем, что лучи, лежащие в *меридиональной* (плоскость, содержащая главную оптическую ось и луч, исходящий из точки предмета) и *сагиттальной* (перпендикулярной к меридиональной и содержащей точку предмета) плоскостях, пересекаются в разных плоскостях в области изображений (рис. 4.2).

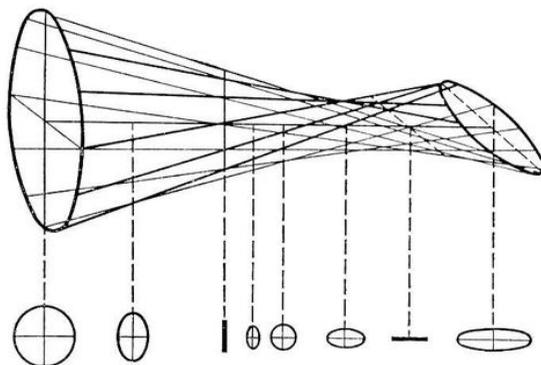
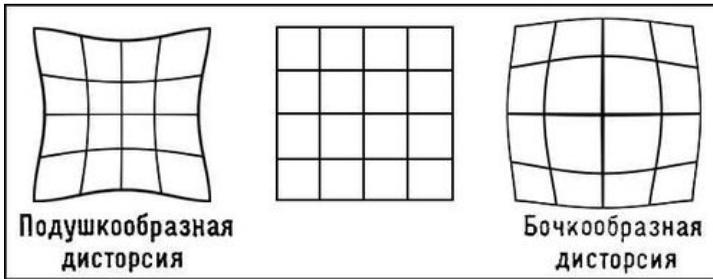


Рис. 4.2. Проявление аберрации линзы *астигматизм* – лучи, идущие в меридиональной плоскости (плоскость рисунка), пересекают главную оптическую ось ближе от плоскости пересечения лучей, идущих в сагиттальной плоскости, (в данном случае – перпендикулярна плоскости рисунка)

В результате наилучшее изображение точки представляется кругом, иначе – линией, в меридиональной или сагиттальной плоскостях. Коррекция аберрации достигается в результате расчета оптической системы в соответствующей программе путем комбинации линз разной оптической силы и изготовленных из разных материалов.

*Дисторсия* – аберрация, вызванная нарушением *Теоремы 2* об идеальных оптических системах (линейное увеличение в паре сопряженных плоскостей одинаково). Она проявляется, как подушкообразная или бочкообразная дисторсии (рис. 4.3), в зависимости от знака аберрации (увеличение или уменьшение коэффициента увеличения при удалении от главной оптической оси). Коррекция аберрации достигается путем комбинации линз разной оптической силы и изготовленных из разных материалов.



а бв

Рис. 4.3. Виды дисторсии:  
 а – подушкообразная; б – предмет; в – бочкообразная

*Кома* – аберрация оптической системы, которая обусловлена тем, что для внеосевой точки предмета лучи, идущие под разными углами к плоскости линзы/зеркала, пересекаются в пространстве изображений в разных плоскостях (рис. 4.4), что вызывает изображение точки в виде круга или загнутого значка, как комета, что и обусловило название этого вида аберрации. Коррекция аберрации достигается путем расчета оптической системы и комбинации линз разной оптической силы, изготовленных из разных материалов.

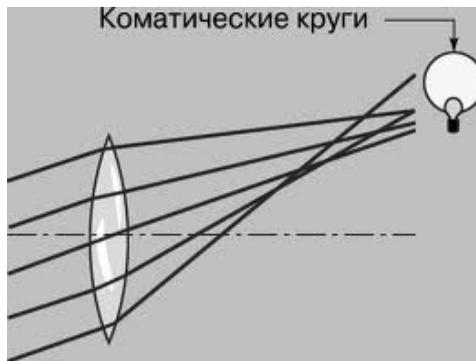


Рис. 4.4. Аберрация «кома»

Таким образом, сферическая аберрация и кома проявляются при распространении через оптическую систему лучей, идущих в широком диапазоне углов. А дисторсия и астигматизм будут наблюдать-

ся даже при создании изображения лучами, распространяющимися в непосредственной близости от оптической оси.

Хроматические aberrации обусловлены дисперсией оптических сред, из которых образована оптическая система, то есть зависимостью показателя преломления оптических материалов, из которых изготовлены элементы оптической системы, от длины проходящей через них световой волны. К ним относятся *хроматизм положения* и *хроматизм увеличения*.

*Хроматизм положения* вызван тем, что показатель преломления для фиолетовых лучей, как правило, больше, чем для красных, поэтому место их фокуса расположено ближе к задней поверхности линзы, чем для красных лучей (рис. 4.5). Отсюда следует, что для луча белого света единого фокусного расстояния у данной линзы не существует, а есть совокупность фокусных расстояний для лучей каждого цвета. Поэтому если наводить на резкость по красным лучам, изображение в синих лучах будет не в фокусе, и наоборот. Эта aberrация характерна даже для параксиальных лучей, т. е. лучей, распространяющихся вблизи от главной оптической оси. Хроматизм положения может быть исправлен путем комбинирования собирающей и рассеивающей линз из стекол с различной дисперсией.

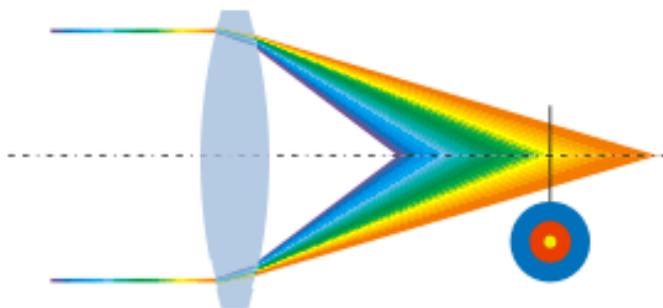
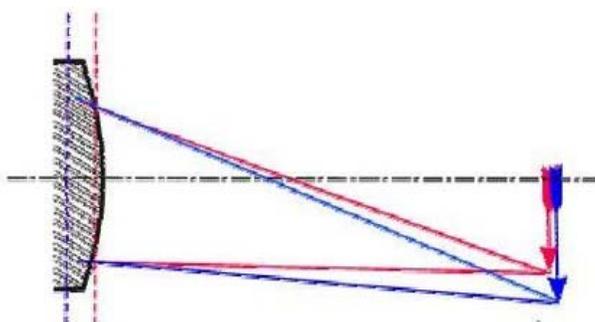


Рис. 4.5. Хроматическая aberrация «хроматизм положения»

*Хроматизм увеличения* обусловлен тем, что из-за различия показателей преломления для разных длин волн у материала линзы один и тот же предмет в лучах разного цвета имеет различный размер. В результате предмет имеет радужную окраску по его периферии (рис. 4.6).



*a*



*б*

Рис. 4.6. Причина (*a*) и проявление (*б*) хроматической aberrации «хроматизм увеличения»

Хроматизм увеличения может быть в какой-то степени исправлен программным путем, т. е. путем расчета оптической системы с целью уменьшения этого дефекта. Для тонкой оптической системы, если исправлен хроматизм положения, то и хроматизм увеличения также не будет проявляться.

### Вопросы для самоконтроля

1. Назовите виды монохроматических aberrаций в линзах и как они проявляются.
2. Назовите виды и укажите причины хроматических aberrаций. Что такое сферохроматические aberrации?

3. Назовите монохроматические aberrации, которые проявляются при распространении широких пучков и укажите, как их можно минимизировать.

4. Назовите монохроматические aberrации, которые характерны для точек, лежащих вне главной оптической оси, и укажите их причины.

## 5. ПРИЕМНИКИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА ОТОБРАЖЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ

Все фотоприемники можно разделить на две большие группы: *селективные* – чувствительные к электромагнитному излучению в определенном спектральном диапазоне, и *неселективные* – чувствительные к электромагнитному излучению практически любых длин волн в оптическом диапазоне.

*Селективные* фотоприемники подразделяются по физическому принципу реагирования на внешний оптический сигнал на фотоприемники с *внешним* или *внутренним фотоэффектом*. В них результатом поглощения кванта оптического излучения является вылет электрона в окружающее пространство (внешний фотоэффект) или только за границы атома, при этом электрон остается в пределах тела, к которому относится его атом (внутренний фотоэффект).

Ярким представителем фотоприемников с внешним фотоэффектом является *фотоэлектронный умножитель* (ФЭУ). ФЭУ представляет собой электровакуумный прибор (рис. 5.1), в котором поток электронов, испускаемый фотокатодом под действием оптического излучения, усиливается в умножительной системе в результате процесса вторичной электронной эмиссии. То есть, каждый электрон за счет разгона в электрическом поле ФЭУ набирает такую энергию, что может выбить в промежуточном электроде (диноде) несколько новых электронов. В итоге даже при одиночном фотоне, падающем на катод и выбивающем 1 электрон, к аноду приходит огромное количество электронов, для разных конструкций это число составляет  $10^5$ – $10^8$ . Для этого в ФЭУ обеспечиваются высокие напряжение (сотни – тысячи В) и вакуум.

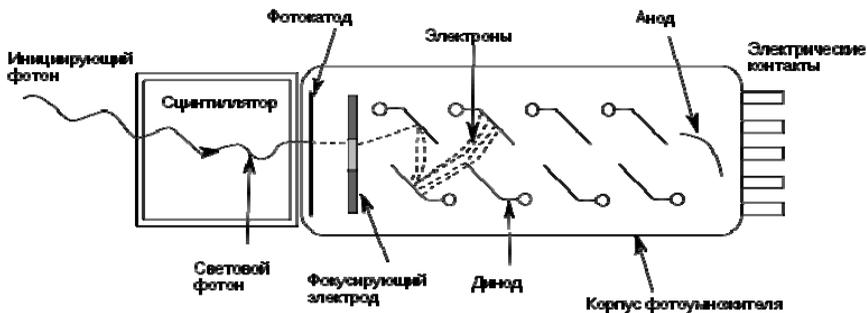


Рис. 5.1. Схема фотоэлектронного умножителя (наличие сцинтиллятора для видимого оптического излучения необязательно)

В зависимости от материала фотокатода ФЭУ могут быть чувствительными не только к видимому, но и к УФ или ближнему ИК излучению. ФЭУ был впервые предложен и разработан советским ученым Л. А. Кубецким в 1930–1934 гг., его внешний вид представлен на рис. 5.2.



Рис. 5.2. Внешний вид фотоэлектронного умножителя

К фотоприемникам с внутренним фотоэффектом относятся, в частности, фотодиоды и фотосопротивления (фоторезисторы). Фотодиод (рис. 5.3) представляет собой устройство, в котором чувствительную к оптическому излучению площадку представляет собой область из  $p$  и  $n$  легированного полупроводника.

Поглощение квантов света в  $n$  области (рис. 5.3) вызывает «вылет» электронов из атомов и, как следствие, электрический ток через фотодиод. Величина тока пропорциональна освещенности фотодиода.

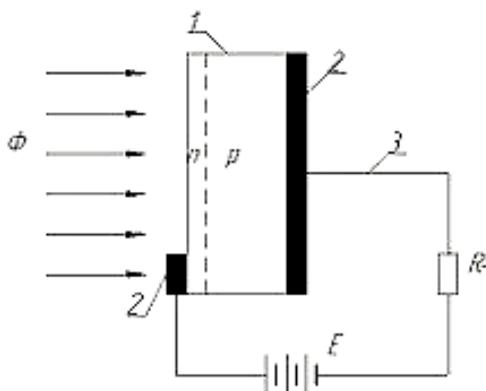


Рис. 5.3. Структурная схема фотодиода:

1 – кристалл полупроводника, легированного  $n$  или  $p$  примесью; 2 – электрические контакты; 3 – выводы на нагрузку;  $\Phi$  – поток электромагнитного излучения;  $E$  – источник постоянного тока;  $R$  – нагрузка

Фотосопротивление – это светочувствительное устройство, в котором в результате поглощения кванта оптического излучения появляется свободный электрон и, как следствие, повышается электрическая проводимость (снижается сопротивление). Изменение сопротивления пропорционально освещенности фотоприемника.

К неселективным приемникам излучения относятся термоэлемент, болометр и пирозлектрические устройства.

*Термоэлемент* (или *термопара*) – устройство, составленное из, по крайней мере, двух разнородных проводников или полупроводников. Если места контактов этих материалов находятся при различных температурах, то в цепи возникает электрический ток. Поглощение света приводит, в частности, к нагреву. Если один из контактов находится при фиксированной температуре, а другой подвергается воздействию тепла или охлаждению, то величина возникающего тока пропорциональна разности температур, а его знак указывает на повышение или понижение температуры по сравнению с фиксированной. Таким образом, это устройство можно использовать для регистрации светового потока любой длины волны.

Принцип действия *болометра* основан на изменении электрического сопротивления материала вследствие нагревания под воздействием поглощаемого потока электромагнитной энергии. Основной

компонент болометра – очень тонкая металлическая или полупроводниковая пластинка, зачерненная для лучшего поглощения излучения. Под действием излучения пластинка нагревается и ее сопротивление повышается, что позволяет ее использовать для измерения интенсивности светового потока. Для большей точности обычно используют приемник, состоящий из двух одинаковых пластинок. Одна находится при фиксированной температуре, а другая подвергается воздействию излучения. Разность их сопротивлений пропорциональна величине падающего светового потока.

В *пироэлектрических* приемниках используется эффект, присущий некоторым материалам и заключающийся в изменении их поляризации при изменении температуры. Такие приемники представляют собой тонкую пластинку, на противоположные стороны которой нанесены электроды (т. е. конденсатор). При попадании света на одну сторону она нагревается, и величина поляризации материала изменяется, что вызывает появление электрического поля, которое можно регистрировать по изменению емкости конденсатора.

Параметрами, характеризующими фотоприемники, являются:

*Чувствительность* – отражает изменение электрического состояния на выходе фотоприемника при подаче на его вход (фоточувствительную площадку) единичного оптического сигнала. Чувствительность количественно измеряется отношением изменения электрической характеристики, снимаемой на выходе фотоприемника, к световому потоку его вызвавшему.

*Шум* – сигнал на выходе фотоприемника, который регистрируется даже в отсутствии полезного сигнала, т. е. когда вообще нет никакого сигнала.

*Спектральные* характеристики – это зависимость величины фототока от длины волны падающего на фотоприемник света. Все фотоприемники по-разному реагируют на электромагнитное излучение различных длин волн.

*Постоянная времени* – время, в течение которого ток фотоприемника достигает стационарного значения, соответствующего величине освещающего его светового потока.

*Динамический интервал* – диапазон интенсивностей светового потока, в котором фотоприемник линейно реагирует на изменение освещенности. За его пределами фотоприемник может «чувствовать» увеличение или уменьшение потока света, но его показатели

не будут соответствовать количественной характеристике потока (коэффициент пропорциональности будет *нелинейным*).

Фотоприемник регистрирует излучение как будто это излучение точки предмета, даже если это вовсе не точка, а большой объект (то есть одиночный фотоприемник является интегральным приемником). Вне зависимости от своих размеров фотоприемник не может разделить изображение от разных точек предмета. Для того, чтобы регистрировать раздельно разные точки предмета необходимо сканировать пространство фотоприемником (направлять фотоприемник на различные точки пространства) или рассматривать пространство одновременно несколькими фотоприемниками. Последний способ наблюдения реализуется путем использования *многоэлементных приемников* оптического излучения.

Многоэлементные фотоприемники могут быть выполнены в виде *линейки* или *матрицы*. Линейка фотоприемников лишь частично выполняет задачу одновременного наблюдения за областью пространства, поскольку также требует сканирования (по горизонтальной или вертикальной направляющей). Но в ряде случаев такое сканирование даже и не требуется (регистрация направления на объект). В случае матричных фотоприемников их точность и разрешающая способность определяются размером чувствительной площадки отдельного фотоэлемента – «пикселя». Качество такого устройства зависит от того, насколько хорошо соответствуют друг другу оптическая и механическая части. Оптическое устройство должно фокусировать точку предмета в пятно изображения, не превышающее по площади размер пикселя. В противном случае малый размер пикселя (или их большое количество) не имеет значения, поскольку точка предмета регистрируется двумя (или более) пикселями. Такой фотоприемник можно заменить устройством с меньшим количеством пикселей большего размера.

Оптоэлектронные изображающие устройства удобны в использовании тем, что позволяют быстро визуализировать изображение, зарегистрированное фотоприемником. Все типы устройств, превращающих электрический сигнал обратно в видимое изображение, можно разделить на 4 группы: электронно-лучевые трубки, жидкокристаллические, плазменные и светодиодные мониторы и/или устройства.

Электронно-лучевая трубка (ЭЛТ) – это прибор, в котором пучок электронов, вылетающий из катода, создает изображение на люми-

несцирующем экране. В глубоком вакууме ЭЛТ электронный пучок отклоняется с помощью электрического или магнитного поля и летит в нужном направлении к экрану. Изменение силы поля позволяет менять количество вылетевших из катода электронов и, следовательно, яркость свечения экрана, а изменение в вертикальной или горизонтальной плоскости направления луча создает точку изображения в нужной области экрана. Количество точек в горизонтальной и вертикальной линиях определяет разрешающую способность экрана, например,  $1024 \times 628$ .

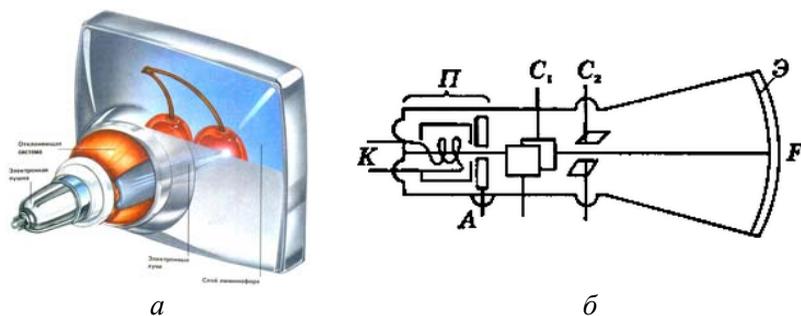


Рис. 5.4. Электронно-лучевая трубка:  
*a* – внешний вид; *б* – принципиальная схема устройства

*Жидкокристаллический* дисплей является в настоящее время, наверное, самым распространенным устройством отображения информации. Он состоит из ЖК-матрицы (двух стеклянных пластин, между которыми располагаются пиксели с жидкими кристаллами – длинными молекулами в растворе жидкости, ориентированными в одном направлении, что и позволяет их назвать кристаллами – упорядоченными и жидкими – в жидкости), источников света для подсветки экрана и, естественно, корпуса.

Каждый пиксель ЖК-матрицы состоит из слоя молекул между двумя прозрачными электродами, и двух поляризаторов, плоскости поляризации которых (как правило) перпендикулярны (рис. 5.5). Если бы жидких кристаллов не было, то свет, пропускаемый первым поляризатором (поляризационным фильтром), полностью блокировался бы вторым. Поверхность электродов, контактирующая с жидкими кристаллами, специально обработана для изначальной

ориентации молекул в выбранном направлении. Эта структура изменяет поляризацию света таким образом, что до второго фильтра плоскость его поляризации поворачивается на  $90^\circ$  и через него свет проходит уже без потерь. Если не считать поглощения первым фильтром половины неполяризованного света, ячейку можно считать прозрачной.

Если же к электродам приложено напряжение, то молекулы стремятся выстроиться в направлении электрического поля, что искажает винтовую структуру, вплоть до того, что все молекулы становятся параллельны, а это приводит к непрозрачности ячейки. Варьируя напряжение, можно управлять степенью прозрачности, т. е. степенью «серости» ячейки (или ее цвета для цветного экрана).

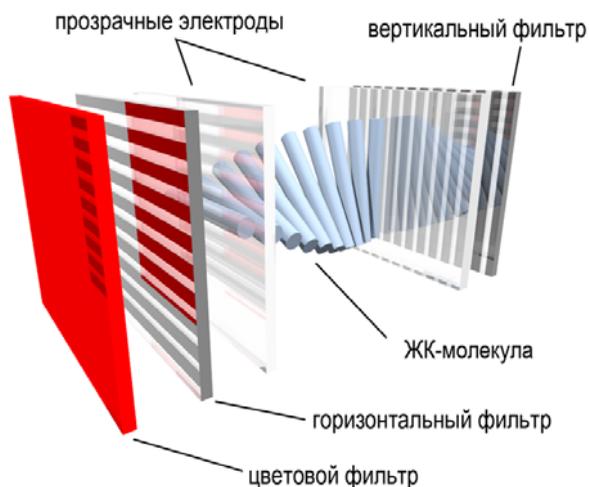


Рис. 5.5. Принципиальная схема работы жидкокристаллической ячейки ЖК-монитора

К преимуществам ЖК-мониторов можно отнести, прежде всего, малый вес и небольшое энергопотребление в сравнении с ЭЛТ и плазменными панелями. Их недостатками являются: плохая видимость изображения при ярком солнечном свете; изменение яркости, цветности и четкости изображения при изменении угла наблюдения экрана; механическое повреждение стекла дисплея приводит к деградации монитора.

*Плазменная* изображающая панель представляет собой матрицу из множества маленьких газоразрядных ламп – наполненных газом ячеек, расположенных между двумя стеклянными поверхностями. В качестве газа обычно используют неон или ксенон. Свечение газа в результате электрического разряда преобразуется в свет определенного цвета из-за люминофора, которым изнутри покрыта трубка лампочки. Цветное изображение создается путем сочетания трех цветов (красный, синий, зеленый, принятых в современной цвето-передаче) от трех пикселей, которые управляются независимо и составляют в итоге одну точку на экране монитора.

*Светодиодные* изображающие устройства в настоящее время используются преимущественно в виде индикаторных устройств – автомобильных фар, светофоров, устройств подсветки элементов декора и т. д. Они редко передают собственно изображение предмета (только в случае больших экранов, которые рассматриваются с большого расстояния). Причинами являются достаточно большие размеры светящегося элемента, высокая стоимость светодиодной техники и сравнительно короткий срок службы мощных светодиодов (около 1000 часов). Однако светодиоды характеризуются низкими эксплуатационными расходами. Вследствие их экономичности в настоящее время созданы прототипы устройств, которые показывают потенциальную возможность реализации в очень широком масштабе светодиодных дисплеев на основе органических молекул. В этих устройствах используются органические молекулы, светящиеся определенным цветом в видимом диапазоне спектра при пропускании через них электрического тока. Их использование удобно, поскольку органические молекулы можно размещать в пластиковой матрице и придавать ей практически любую форму – сферическую, цилиндрическую, руки человека и т. д.

### **Вопросы для самоконтроля**

1. Приведите классификацию источников излучения и назовите их основные типы.
2. Приведите классификацию оптических систем по их схемному решению.
3. Приведите признаки, по которым классифицируют приемники излучения, и поясните их.

4. Приведите основные параметры, характеризующие приемники излучения, и поясните их.

5. Приведите основные типы приемников излучения и укажите их отличительные особенности.

6. Приведите основные типы электронно-оптических устройств отображения информации и укажите их отличительные особенности.

## 6. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К ОЭП

К оптоэлектронным устройствам, вследствие сложности задач, которые они выполняют, предъявляется целый ряд требований. К ним относятся:

- требования по внешним условиям и условиям эксплуатации;
- технико-конструктивные требования;
- технической эстетики;
- требования к стандартизации;
- технологические требования;
- технико-экономические требования;
- требования к надежности.

В процессе эксплуатации ОЭП различают две ситуации (режима):

**Сохранение работоспособности** ОЭП при воздействии дестабилизирующих факторов с экстремальными значениями (*устойчивость*).

**Обеспечение работоспособности** ОЭП в нормальных условиях после воздействия на неработающий прибор дестабилизирующих факторов с экстремальными значениями (*прочность* или *стойкость*).

К *внешним условиям*, оказывающим влияние на работу ОЭП, относятся климатические факторы, механические воздействия, возникающие при транспортировании и эксплуатации, различные виды силовых полей, действие ионизирующего излучения. Наиболее разнообразно влияние климатических факторов: температуры, влажности, давления окружающей среды, воздействия твердых и газообразных примесей, солнечного излучения, ветровой нагрузки, биофакторов. К *нормальным климатическим условиям* относят следующие: температурный диапазон  $t = (25 \pm 10) \text{ }^\circ\text{C}$ , относительная влажность  $R = 45\text{--}80 \%$ , атмосферное давление  $P$  варьируется от  $8,36 \cdot 10^4$  до  $10,6 \cdot 10^4$  Па (630–800 мм рт. ст.). При этом, если  $t > 30 \text{ }^\circ\text{C}$ , то  $R < 70 \%$ .

*Климатические зоны* в соответствии с ГОСТ 15150-69 разделяют на:

– *умеренный* климат температура от  $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$  (это – основная часть территории Европы, США, юг Австралии);

– *холодный* климат ( $t < -45\text{ }^{\circ}\text{C}$  от двух месяцев в году) – северо-восток России, Аляска, Антарктида, Арктика;

– *влажный тропический* климат  $t > 20\text{ }^{\circ}\text{C}$  при  $R > 80\text{ } \%$  по 12 ч и более в сутки непрерывно в течение 2–12 мес. в году – Центральная Америка и север Южной Америки, экваториальная Африка, Индия, Индокитай;

– *сухой тропический* климат  $t > 40\text{ }^{\circ}\text{C}$  в дневное время, высокое содержание пыли и песка в воздухе;

– *умеренно холодный морской* климат – побережья северных районов Европы, Канады, США, южных районов Южной Америки;

– *тропический морской* (ТМ) климат  $t = 20\text{--}40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $R > 80\text{ } \%$ , высокое содержание соли в воздухе.

Температура окружающей среды оказывает существенное влияние на работу приборов, так как при ее изменении практически все элементы и детали ОЭП меняют свои свойства. Диапазон температур, в котором приходится работать ОЭП, весьма широк. Даже в земных условиях возможны перепады температуры воздуха от  $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Антарктида) до  $+55\text{ }^{\circ}\text{C}$  (пустыни, в тени). При прямом воздействии Солнца температура нагретой поверхности может быть значительно выше. В отдельных случаях требуется обеспечить нормальную работу прибора в еще более жестких температурных условиях. Например, температура на поверхности Венеры достигает  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а в условиях космического пространства при затенении от солнечного излучения близка к абсолютному нулю ( $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

В соответствии с ГОСТ 15150-69 при эксплуатации изделий в воздушной среде различают их следующие категории в зависимости от места размещения:

– на открытом воздухе;

– под навесом или в помещениях, где изменения климатических параметров не отличаются от их изменений на открытом воздухе;

– в закрытых помещениях с естественной вентиляцией без искусственно регулируемых климатических условий;

– в помещениях с искусственно регулируемыми климатическими условиями;

– в помещениях с повышенной влажностью, в которых возможно длительное наличие воды или частая конденсация влаги.

*Тепловые воздействия* на электронные элементы ОЭП проявляются, в частности, в нарушении контактов и пробоях в изоляционных материалах.

В кинематических цепях ОЭП при изменении температуры возможны ухудшение прочности материалов, повышение трения за счет изменения зазоров и вытекания или загустения смазочного материала. При неравномерном нагреве или охлаждении могут появляться деформации, приводящие к заклиниванию механизмов.

Серьезные последствия оказывает на ОЭП попадание влаги: запотевание оптических деталей (при резком изменении температуры), изменение физико-химических свойств специальных покрытий и изоляционных материалов, коррозия металлов, окисление контактов. Количество влаги в воздухе может быть различным. В области *умеренного* климата относительная влажность воздуха составляет 60–70 %, в *пустынях* – 5–10 %, в *тропической* зоне – 95–98 %. Особенно пагубно воздействие на ОЭП паров воды, содержащих соли химических элементов (морская вода). В районах с *влажным тропическим климатом* в воздухе содержится большое количество микроорганизмов, проникновение которых в прибор вызывает появление плесени на органических материалах и поверхностях оптических деталей.

*Давление* окружающей среды оказывает заметное влияние на функционирование ОЭП. При понижении давления воздуха падает значение напряжения пробоя, что особенно важно при использовании высоковольтных элементов. Кроме того, существенно возрастает скорость испарения смазочного материала, что может привести к повышению трения и заклиниванию элементов кинематики прибора. В связи с уменьшением давления отвод теплоты за счет конвекционного переноса ослабевает, в результате чего резко возрастает вероятность перегрева элементов прибора.

На работу ОЭП оказывают влияние *песок* и *пыль* в воздухе. Их механическое воздействие в сочетании с воздействием влаги и нагрева приводит к значительному ухудшению характеристик приборов. Наибольшие неприятности доставляют мелкие частицы песка и пыли размером 1–40 мкм. В результате их воздействия на подшипники и механизмы увеличивается трение, износ и могут воз-

никнуть «заедания». Попадая в контактные зазоры, частицы пыли нарушают работу соединителей, реле, переключателей. Накапливаясь на поверхностях изоляционных материалов, гигроскопичная пыль ухудшает их изоляционные свойства и способствует возникновению паразитной проводимости, пробоев и возгораний. Скопление пыли ухудшает теплоотдачу узлов и нарушает тепловой режим приборов. В сочетании с ветровым воздействием наличие в воздухе частиц песка и пыли приводит к абразивному разрушению полированных и окрашенных поверхностей. При этом вследствие матирующего эффекта возможен выход из строя оптических систем.

Для приборов, эксплуатируемых на *открытом воздухе*, необходимо учитывать, что воздействие солнечного излучения, кислорода и влаги воздуха приводят к перегревам, разрушению лакокрасочных покрытий, усилению коррозии, быстрому старению резины, пластмасс и электрической изоляции.

При длительной эксплуатации и хранении ОЭП, а также при эксплуатации в тропических условиях следует учитывать влияние *биофакторов*, к которым относятся плесневые грибы, насекомые и грызуны. Развитие плесени ухудшает механические и электрические параметры приборов, а также светопропускание оптических деталей. Борьба с этим заключается в осушке и герметизации внутренних объемов приборов, защите оптических деталей специальными покрытиями, использованию фунгицидов. Кроме того, корпуса должны быть без углублений, пазов, выступов, которые способствуют скоплению грязи (в т. ч. биологической) и затрудняют чистку прибора.

*Механические воздействия*, к которым относятся вибрация, ударные воздействия, транспортировочные перегрузки, вызываются как внешними источниками, так и внутренними, например несбалансированностью вращающихся частей, неточностью изготовления, зазорами, разрушениями соприкасающихся кинематических элементов. В результате их воздействий возможны разрушения отдельных элементов, деталей и паек, нарушение контактов, повреждение изоляции с возникновением замыканий, самоотвинчивание резьбовых соединений, появление трещин, сколов в оптических и других хрупких деталях. Наиболее опасен для прибора *механический резонанс*, приводящий к его разрушению. Для его предотвращения необходимо определять собственные частоты элементов и деталей прибора и учитывать их при конструировании.

Воздействие *электромагнитных полей* снижают за счет экранирования различными способами. Воздействие *ионизирующего излучения* (использование ОЭП на атомных электростанциях, в космосе и т. п.) приводит к ухудшению оптических свойств материалов, нарушению работы полупроводниковых и электровакуумных приборов, изменению проводимости воздушных промежутков и диэлектрических материалов. При конструировании ОЭП, работающих в указанных условиях, прежде всего, необходимо применять радиационно-стойкие материалы и элементы.

В связи с условиями эксплуатации к ОЭП могут предъявляться специфические требования. Например, работа в условиях открытого космоса, невесомости, глубоко под водой, в шахтах. Иногда отдельные блоки ОЭП могут работать в нормальных условиях, а другие – в крайне неблагоприятных.

Технико-конструктивные требования – комплекс требований, предъявляемых к прибору, которые *существенно* влияют на его компоновку, конструктивные взаимосвязи между узлами и блоками, нормальное функционирование и обслуживание. К ним относятся:

- обеспечение заданных ТЗ характеристик и параметров прибора;
- рациональные габаритные размеры, объем, форма и масса;
- удобство доступа для регулирования, ремонта и осмотра. При этом наиболее рациональной является блочно-модульная конструкция, обеспечивающая быстрое отключение, снятие и включение узлов;
- предотвращение возможности выхода прибора из строя при его неправильном подключении или нештатных условиях работы;
- защита от внешних помех, наводок, предотвращение внутренних наводок и излучения помех во внешнее пространство;
- обеспечение требуемых давления и температурного режима работы блоков и узлов прибора;
- оперативность и безопасность обслуживания;
- прочность и долговечность конструкции прибора, обеспечение требуемого срока службы в условиях эксплуатации и возможности длительного хранения;
- удобство транспортирования и погрузки;
- а также специальные (специфические) требования, которые определяются конкретными условиями эксплуатации прибора (в шахтах, космосе и т. д.). К ним можно отнести, например, требования по миниатюрности или ограниченному энергопотреблению.

Требования технической эстетики (дизайн) – создание новых изделий, требующихся обществу при выполнении ими заданных функций, с утилитарной формой, функциональной окраской и обладающих эстетической выразительностью. Гармонически решенные изделия благоприятно влияют на условия труда и быта, снижают утомляемость, травматизм, повышают производительность труда, способствуют их сбыту. К ним относятся *техничко-конструктивные* (частично), а также *социологические, эргономические и эстетические* требования.

*Социологические требования* заключаются в экономической обоснованности выпуска прибора при оптимальном ассортименте и номенклатуре, обеспечении в нем требуемых потребительских свойств и конкурентоспособности.

*Эстетические требования* проявляются в композиционном построении и эстетической выразительности изделия.

*Эргономические требования* включают аспекты антропометрии, физиологии, охраны и гигиены труда и инженерной психологии, т. е. учитывают взаимодействие человека или группы людей с машиной в процессе труда. Они направлены на ликвидацию источников утомления человека в процессе труда и предупреждение различных профессиональных заболеваний.

При конструировании ОЭП и особенно комплексных пультов управления необходимо учитывать свойства зрительного аппарата человека. Поле зрения человека можно разделить на 4 зоны:

– в центре поля вокруг линии зрения находится узкая *зона высокоточного зрения*, составляющая в угловой мере  $1^\circ$ . Она характеризуется наилучшей остротой зрения, под которой понимается способность видеть раздельно два предмета, расположенных на близком расстоянии друг от друга, и наиболее тонко различать оттенки цвета;

– *зона точного зрения* (или центральное пятно) находится внутри конуса с углом, равным  $25^\circ$ . Здесь глаз хорошо различает форму и цвет объектов, но недостаточно чувствует оттенки цвета;

– *зона окружения* расположена внутри конуса с углом при вершине около  $60^\circ$ . Эта зона соответствует падению остроты зрения до 1 % от максимальной. На краю зоны форма объекта различается слабо, слабое цветовое восприятие. Направление движения предмета идентифицируется надежно;

– в *периферийной зоне*, лежащей за пределами зоны окружения, различаются движение и отдельные цвета, в зависимости от прост-

ранственного положения объекта; детали объекта не различаются совершенно.

Поскольку большинство устройств отображения информации рассчитано на визуальное восприятие, при создании пультов важно правильно выбрать и расположить индикаторы в поле зрения оператора. Можно выделить две области приборной панели: в первой (примерно 25°) наблюдатель видит стрелки всех приборов, поэтому приборы, несущие наиболее важную информацию, размещают ближе к центру этой области, а по периферии – аварийные или второстепенные индикаторы. Система размещения элементов управления и информирования должна быть такой, чтобы визуальные приборы находились по возможности в зоне точного зрения, а устройства управления по его периферии, так как в этом случае движения рук не создают помех наблюдению за приборами.

Требования стандартизации. Разработка современных ОЭП базируется на широком применении принципов стандартизации. На предприятиях оптоэлектронного приборостроения используют следующие категории стандартов: государственные (ГОСТ), отраслевые (ОСТ) и стандарты предприятия (СТП).

ОСТы устанавливаются на те виды продукции, которые не регламентированы ГОСТами: отдельные виды продукции ограниченного применения; технологическую оснастку, предназначенную для применения в данной отрасли; сырье, материалы, полуфабрикаты внутриотраслевого применения.

СТП бывают трех видов:

– *ограничительные*, которые создаются на основе государственных или отраслевых и ограничивают применение на предприятиях установленных стандартами номенклатуры, типоразмеров, марок материалов и т. п.;

– *дополняющие*, создаваемые при необходимости дополнить государственные или отраслевые стандарты данными (требованиями, характеристиками и т. п.), отсутствующими в этих стандартах;

– *оригинальные*, разрабатываемые при условии, что на стандартизуемые объекты отсутствуют ГОСТы или ОСТы. Оригинальные и дополняющие СТП не должны ухудшать показателей государственных и отраслевых стандартов.

Одной из важнейших функций органов стандартизации на предприятиях является нормоконтроль конструкторской документации.

Технологические требования обусловлены уровнем развития технологии производства. Они включают в себя:

– *технологичность деталей и узлов, удобство сборки и юстировки.*

Технологичность конструкций характеризуется показателями: минимальные затраты труда на изготовление, ассортимент средств изготовления, число операций и время их проведения; минимум сложных и трудоемких производственных процессов; простота подготовки производства; простота монтажа деталей в узлы и сборки прибора в целом; удобство и простота юстировки;

– рациональный выбор материалов;

– минимальная номенклатура элементов, материалов, полуфабрикатов, максимальная нормализация и унификация конструкций. Комплектующие изделия и материалы не должны быть дефицитными;

– взаимозаменяемость деталей, узлов и блоков. Это имеет важное значение при крупносерийном и массовом производстве, а также при обслуживании и ремонте приборов;

– возможность изготовления деталей при единичном и мелкосерийном производстве на универсальном оборудовании.

Технико-экономические требования. Экономические показатели при создании приборов часто являются в конечном итоге критерием оценки выполнения всех перечисленных выше требований. Конструирование ОЭП без экономического обоснования недопустимо. Оптимально спроектированный прибор должен отвечать следующим требованиям:

– минимальная себестоимость с учетом расходов на проектирование, эксплуатацию и техническое обслуживание;

– автоматизация обслуживания;

– патентоспособность и патентная чистота. Требование *патентоспособности* выходит за рамки технико-экономических требований, поскольку результаты патентных исследований позволяют также обеспечивать высокий технический уровень разрабатываемых приборов. Для выполнения требования патентоспособности необходимо выявлять технические решения, которые могут быть признаны изобретениями. Это относится как к приборам в целом, так и к их узлам и отдельным деталям, а также к приемам их использования и технологии изготовления. Изделие обладает *патентной чистотой*, если оно не попадает под действие патентов на изобретения, выданных в стране, куда предполагается экспорт.

Требования к надежности. Свойствами, характеризующими надежность, являются безотказность, долговечность, ремонтпригодность, а также сочетание этих свойств, хотя можно использовать и другие характеристики.

*Безотказность* – способность объекта *непрерывно* сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или некоторой наработки. *Наработка* – продолжительность или объем работы объекта.

*Долговечность* – период времени, в течение которого объект сохраняет работоспособность до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта. *Предельное состояние* – состояние объекта (прибора), при котором технически невозможно или нецелесообразно продолжать его эксплуатировать.

*Ремонтпригодность* – свойство объекта, заключающееся в приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возникновения отказов, повреждений, к поддержанию и восстановлению работоспособности путем проведения технического обслуживания и ремонта. *Отказ* – нарушение работоспособного состояния объекта. *Повреждение* – нарушение исправного состояния объекта при сохранении работоспособного состояния.

*Срок службы* – календарная продолжительность от начала эксплуатации объекта до перехода его в предельное состояние.

*Ресурс* – наработка объекта от начала его эксплуатации (с учетом возобновления ее после ремонта) до перехода в предельное состояние.

*Надежность* – это один из основных параметров прибора. Поэтому, разрабатывая прибор, следует рассчитывать надежность и на основе результатов этих расчетов делать выводы о правильности выбора схемы, режимов работы и конструкции. При разработке конструкции с высокой степенью надежности всегда следует стремиться к уменьшению числа входящих в нее элементов, поскольку, чем их меньше, тем надежнее прибор.

### **Вопросы для самоконтроля**

1. Перечислите основные требования, предъявляемые к оптико-электронным приборам.

2. Назовите и поясните характер воздействия основных факторов, относящихся к внешним условиям и условиям эксплуатации ОЭП, которые оказывают существенное влияние на их работу.

3. Перечислите и поясните основные технико-конструктивные требования к оптико-электронным приборам.

4. Перечислите и поясните основные требования технической эстетики к оптико-электронным приборам.

5. Перечислите и поясните основные технологические и технико-экономические требования к оптико-электронным приборам.

## **7. ОРГАНИЗАЦИЯ И СОДЕРЖАНИЕ ПРОЦЕССА КОНСТРУИРОВАНИЯ ОЭП**

В общем случае создание ОЭП содержит несколько основных этапов: «идея», содержащая суть нового прибора или улучшения существующего → подготовка документации для его реализации → подготовка производства для его изготовления → выпуск прибора в массовом или мелкосерийном (единичном) производстве. Эта обобщенная схема получает реальное наполнение в зависимости от новизны решаемой задачи:

– создание *нового прибора* для решения известных или принципиально новых задач и основанного на новых принципах действия;

– *существенная модернизация* прибора, значительно улучшающая его основные показатели за счет серьезного изменения параметров и структурной схемы, что сопровождается большими конструктивными изменениями прибора;

– *частичная модернизация* существующего прибора, приводящая к улучшению одного или нескольких показателей за счет изменения параметров, элементной базы, частичного изменения структуры и т. п.

При создании новых ОЭП сначала проводятся *научно-исследовательские работы* (НИР). Целью НИР является выяснение и доказательство возможности и целесообразности создания прибора и, следовательно, проведения всех последующих этапов работ. Это позволяет предотвратить значительные затраты на проектные работы и запуск производства в случае, когда поставленная задача не может быть решена предлагаемыми в «идее» средствами.

Основанием для проведения *научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ* (НИОКР) является *технико-экономическое*

*обоснование* (ТЭО). Целью ТЭО является обоснование экономической целесообразности исследований (в случае НИР), конструкторских работ и разработки опытного образца (для ОКР). Таким образом, основная задача ТЭО – документально показать возможность достижения современного уровня качества новой продукции, ее экономической эффективности и перспектив для дальнейшего совершенствования, что и обосновывает выделение финансирования на проведение НИОКР. Это обеспечивается сравнением разрабатываемого прибора с лучшими аналогами по показателям технологичности, материалоемкости, организации производства, экологии, социальных последствий и др.

В рамках НИР изучается состояние дел по поставленной или родственной этой задаче, анализируются все доступные источники информации, а также опыт промышленности. На основе теоретических положений и экспериментальных исследований дается заключение о принципиальной возможности создания прибора. При этом могут разрабатываться макеты узлов и прибора в целом и формулироваться рекомендации по проведению ОКР.

Проектирование прибора обычно разделяют на три этапа: схемный, конструкторский и технологический. Первые два часто включают в ОКР, а технологическое проектирование рассматривают как начальную часть технологической подготовки производства. На практике конструкторское и технологическое проектирование достаточно сильно перекрываются во времени, а конструкторская и технологическая документации дорабатываются в ходе выпуска опытного образца, установочной партии и их испытаний, а также при эксплуатации изделия. В данном разделе остановимся на рассмотрении ОКР, а последующие работы будут описаны позже.

В целом проектирование ОЭП можно представить в виде последовательности стадий, в ходе которых разрабатывают техническое задание, техническое предложение, эскизный и технический проекты, рабочие (конструкторскую и технологическую) документации. Перечисленные стадии позволяют обеспечить изготовление опытного образца, который затем испытывается. По результатам испытаний в конструкцию вносятся необходимые изменения и уточнения, дается заключение о возможности изготовления установочной серии приборов и осуществляется переход к мелкосерийному, серийному или массовому производству.

Следует отметить, что содержание указанных стадий изменяется в зависимости от конкретной задачи и некоторые из них могут не выполняться в связи с отсутствием необходимости.

*Техническое задание (ТЗ)* – документ, который устанавливает назначение и область применения изделия, технические, качественные и технико-экономические требования к нему, а также определяет необходимые стадии разработки проектной документации и ее состав.

Для формулирования ТЗ на ОЭП необходимо получить и проанализировать совокупность исходных данных, которые содержат: определение объектов измерения, перечень измеряемых физических величин и методов их измерений; методы калибровки прибора и коррекции результатов измерений с учетом внешних воздействий, чувствительности к ним прибора; способы представления результатов измерений (цифровой или аналоговый); особенности размещения и использования прибора, а также его возможные неисправности и отказы.

Задача подготовки ТЗ очень ответственна, поэтому ее целесообразно выполнять совместными усилиями заинтересованных организаций – заказчика, потребителя и разработчика проектируемой системы.

ТЗ на проектирование ОЭП состоит из ряда разделов. Общее количество пунктов требований составляет до нескольких десятков. Среди них выделяют:

- *вводная часть* – содержит основание для проведения ОКР;
- *назначение и область применения* изделия;
- *технические требования*, предъявляемые к изделию. К ним относятся: диапазон и точность измерений, дальность действия, чувствительность или разрешающая способность, спектральный диапазон работы; выходные параметры прибора, обеспечивающие его стыковку с другими системами (если данный ОЭП входит в состав какого-либо комплекса), или форма представления информации об измеряемой величине; конструктивные требования к схемам и узлам прибора (кинематическим, электрическим, оптическим), габаритные размеры и масса; требования по видам и мощности потребляемой энергии, к тепловыделению, а при необходимости – параметры системы охлаждения; соответствие параметров прибора или его конструктивного исполнения ГОСТам, ОСТам и другим нормативным документам;

– *характеристика условий работы* изделия: характер помех; данные о среде распространения излучения (дальность видимости, наличии задымленности и т. п.); характер размещения прибора (вибрации, перегрузки, ударные воздействия); метеорологические факторы (температурный диапазон, влажность, давление, воздействие осадков, пыли, морского воздуха, солнечного излучения и др.); требования к защите прибора от воздействия полей и излучений; условия хранения и транспортирования; диапазон возможных отклонений параметров системы энергопитания и др.;

– *требования по надежности и работоспособности*: гарантийный срок службы прибора при указанных условиях эксплуатации; периодичность проверок, аттестаций и профилактического ремонта; режимы работы, в частности, длительность непрерывной работы, периодичность включения, время готовности прибора к работе от момента включения; требования к надежности работы в течение определенного времени с требуемой вероятностью безотказной работы;

– требования по охране труда;

– технической эстетике;

– технологичности,

– технико-экономические показатели;

– *специальные требования*, учитывающие специфику построения, применения и изготовления прибора;

– этапы создания прибора;

– состав технической документации;

– *другие аспекты* проектирования, имеющие принципиальное значение.

Следует отметить, что ТЗ может уточняться по взаимному согласованию заинтересованных сторон в случаях, если доказана необоснованность каких-либо требований, показана принципиальная невозможность обеспечения некоторых характеристик и т. п.

Этап *схемного проектирования* определяет принципиальную структуру ОЭП: его оптическую схему работы («оптический выпуск»), содержащую численные значения оптических параметров и их допустимые отклонения; электронную схему преобразования сигналов со значениями их параметров; кинематическую схему устройства прибора. В результате определяются структура ОЭП (количество и характер функциональных блоков), связь блоков между собой, оптимальные значения параметров структуры, уста-

навливаются требования к характеристикам каждого конкретного блока, исходя из требований ТЗ на прибор в целом. В частности, определяются требования к качеству изображения (размер и форма пятна рассеяния), светосиле оптической системы и ее увеличению, габаритам блоков и используемым материалам, элементной базе будущего прибора.

Выполнение указанных задач в рамках схемного проектирования обеспечивается на стадиях технического предложения и эскизного проекта.

*Техническое предложение* разрабатывают в целях выявления дополнительных или уточненных технических и эксплуатационных требований к прибору, которые не были отражены в ТЗ и для обоснования которых целесообразно выполнение предварительной конструкторской проработки и анализа различных вариантов решения.

*Фактически в техническом предложении* организация-разработчик показывает, каким образом она предполагает реализовать ОЭП в соответствии с требованиями ТЗ. На этой стадии выполняются следующие виды работ: углубленный научно-технический поиск и анализ всех доступных материалов по проектируемому изделию; установление возможных вариантов схемы и конструкции прибора; сравнительная оценка выявленных вариантов по показателям ТЗ и предварительной технологичности конструкции прибора; проверка их на патентную чистоту, конкурентоспособность, требования стандартизации, унификации, техники безопасности, эргономики и др.; оформление заявок на изобретение. При этом выполняются расчеты, экспериментальные исследования, изготавливаются макеты.

Результатом работ на данной стадии являются уточненное ТЗ и максимально упрощенная конструкторская документация, дающая *обобщенное* представление о выявленных технических решениях. В итоге следует предложить оптимальный вариант прибора, что позволит избежать ненужных затрат на последующих этапах и ускорит проектирование. В случае невозможности такого выбора необходимо представить возможные варианты с описанием преимуществ и недостатков каждого и установить дополнительные требования к последующим этапам проектирования для возможно наиболее быстрого отбора лучшего решения.

После утверждения технического предложения его материалы служат основой для проведения дальнейших стадий проектирования.

*Эскизный проект* разрабатывается в целях получения принципиальных схемных и конструктивных решений ОЭП. Конструкторская документация, полученная в результате эскизного проектирования, должна давать общее представление об устройстве и принципе работы прибора и особенностях его использования.

При выполнении эскизного проекта проводится:

- проработка вариантов схемного и конструктивного решений прибора, предложенных на предыдущем этапе или иных;
- расчетное обоснование ожидаемых технических характеристик;
- оценка возможности реализовать полученные варианты на основе освоенной промышленностью номенклатуры материалов и комплектующих изделий;
- оценка технологичности конструкции и возможностей изготовления прибора в условиях конкретной производственной базы, его метрологическое обеспечение;
- проверка решений на патентную чистоту, соответствие требованиям техники безопасности, стандартизации, унификации, технической эстетики.

В итоге выбирается оптимизированный вариант прибора и обычно макетирование его отдельных узлов или прибора в целом проводится с последующим исследованием этих макетов. Также выполняются функциональные или принципиальные оптические, электрические, кинематические схемы. Они должны давать полное представление о принципе работы прибора, взаимосвязях и взаимодействии всех его узлов и элементов.

На стадии эскизного проектирования следует выявить новые изделия и материалы, которые планируется разработать и изготовить другими предприятиями. На этом этапе необходимо составить технические требования к таким изделиям и материалам и определить круг их возможных разработчиков.

Конструкторская документация эскизного проекта ОЭП включает основные схемы прибора, чертеж его общего вида и основных сборочных единиц, габаритный чертеж, ведомость эскизного проекта, пояснительную записку.

В пояснительной записке, в частности, при изложении технических характеристик прибора приводятся сведения об отклонениях или соответствии требованиям ТЗ, сравнительные данные отечественных и зарубежных аналогов. Она должна содержать все необхо-

димые расчеты ОЭП, подтверждающие возможность его реализации. К числу наиболее важных расчетов относят следующие: энергетический (светотехнический), расчет оптической системы (габаритный, абберационный), электронного тракта, точности. В зависимости от принципа работы ОЭП проводят и другие расчеты, часто имеющие принципиальное значение: кинематический, динамический, надежности, прочности и жесткости, температурных режимов и т. п.

Эскизный проект защищается перед заинтересованными организациями. Выявленные замечания устраняются, либо по ним намечаются мероприятия для следующих этапов проектирования, после чего утверждается протокол о защите.

*Конструкторское проектирование*, или конструирование, идет обычно параллельно схемному проектированию или с некоторым отставанием и является важнейшей частью процесса проектирования, поскольку именно здесь ОЭП приобретает не только схемную, но и в некотором роде материальную (правда, только в документации) реализацию. Разработчик, работающий на этом этапе, обычно называется конструктором.

Следует различать этапы схемного и конструкторского проектирования, в том числе и потому, что в большинстве проектных организаций они выполняются разными людьми и даже разными подразделениями. Так, проектирование оптической схемы прибора выполняет оптик-расчетчик или оптик-вычислитель, работающий в специализированном оптическом бюро. Результатом этого проектирования является оптический выпуск, содержащий всю необходимую информацию об оптической схеме. На основании этой информации другой разработчик – конструктор оптик-механик – выполняет конструирование соответствующего оптического узла, например, объектива, диафрагм, механизма фокусировки объектива и т. д. Он выпускает чертежи всех деталей этого объектива, включая оптические сборочные чертежи отдельных узлов и объектива в целом. Естественно, что этот процесс может быть итерационным. Аналогичная картина наблюдается для электронных и кинематических схем. После того, как они разработаны на этапе схемного проектирования, конструктор материализует эти схемы в виде определенного монтажа на печатной плате, в виде деталей и узлов механизма.

Конструкторское проектирование обычно разделяется на уровни: *компоновочный*, на котором определяется общая компоновка всего

прибора, взаимное расположение его отдельных узлов; *уровень узлов* (сборочных единиц), где разрабатываются конструкции отдельных частей прибора; *уровень деталей*, на котором разрабатываются и выпускаются рабочие чертежи отдельных деталей.

Цель стадии *технического проектирования* состоит в выявлении *окончательных* технических решений, дающих полное представление о конструкции прибора. Основными видами работ здесь являются:

- детальная разработка конструкции всего прибора и его составных частей;

- разработка принципиальных схем, на основе которых могут быть выполнены монтажные схемы, схемы соединений, осуществлены сборка и настройка оптических и электронных блоков;

- окончательное оформление заявок и ТЗ на изготовление новых изделий и материалов;

- выявление номенклатуры покупных изделий и согласование их применения;

- окончательное согласование габаритных, установочных и присоединительных размеров, мест подключения разъемов с заказчиком и потребителем;

- анализ конструкции прибора, его узлов и наиболее сложных, ответственных деталей на технологичность, определение возможности использования оборудования, имеющегося на предприятии, необходимости приобретения или создания нового технологического оборудования и спецоснастки;

- окончательное решение вопросов метрологического обеспечения по выбору средств измерений и методов контроля характеристик прибора;

- проверка принятых технических решений на соответствие требованиям стандартизации, унификации, техники безопасности;

- проверка приборов на патентную чистоту, оформление заявок на изобретения;

- окончательное решение вопросов транспортирования, хранения и монтажа на месте эксплуатации;

- оценка эксплуатационных характеристик приборов, в частности, взаимозаменяемости, удобства обслуживания, ремонтпригодности, устойчивости к воздействию факторов внешней среды, возможности быстрого устранения отказов, контроля качества работы, обеспеченности средствами контроля технического состояния и др.

Как правило, разработка технического проекта сопровождается большим объемом макетирования для проверки конструктивных и схемных решений прибора и подтверждения принятых решений. При этом на макетах можно проверить удобство обслуживания и расположения элементов, т. е. отработать эргономические и художественно-конструкторские показатели.

На этой стадии уточняется суммарная инструментальная погрешность прибора, особое внимание уделяется подбору необходимого оборудования для его лабораторных испытаний. В результате технического проектирования обычно выпускается следующая конструкторская документация: чертежи общего вида прибора и его сборочных единиц, габаритный чертеж, чертежи всех схем, пояснительная записка, ведомости покупных изделий и согласования их применения, патентный формуляр (документ, подтверждающий защиту образцов техники в соответствии с законодательством), карта технического уровня и др.

Пояснительная записка технического проекта включает те же разделы, что и записка к эскизному проекту. Однако в ней особое внимание уделяется обоснованию и описанию конструктивных особенностей прибора, принципов его функционирования. Существенно расширяется раздел, посвященный описанию организации работ с прибором на месте эксплуатации, даются сведения о транспортировании, монтаже и хранении, количестве и квалификации обслуживающего персонала.

Технический проект подлежит защите и утверждению заказчиком.

Стадия *рабочего проектирования* выполняется с целью создания и отработки **полного комплекта конструкторской документации ОЭП, достаточной для изготовления опытного образца прибора**. Рабочее проектирование может выполняться как самостоятельный этап, но иногда для ускорения процесса проектирования, его начинают на этапе технического проекта (технорабочий проект). Этап рабочего проектирования характеризуется *тесным взаимодействием конструкторских и технологических подразделений* предприятия. Основными видами работ на этой стадии являются:

– детальная разработка конструкции прибора и его узлов с указанием технологических требований к сборке и юстировке;

– доведение всех схем до рабочего состояния (выполняются монтажные схемы, на оптических схемах приводятся требования по юстировке и т. п.);

– составление спецификаций и сводных ведомостей покупных и стандартных изделий и деталей, марок и сортаментов применяемых материалов;

– разработка ведомостей и чертежей согласования, применения готовых изделий;

– согласование методик юстировки, настройки, монтажа, испытаний;

– составление технического описания, технических условий, инструкций по эксплуатации, технического паспорта;

– составление ведомости запасного инструмента и принадлежностей;

– разработка технологических процессов изготовления наиболее сложных и ответственных деталей.

В процессе рабочего проектирования выполняются контрольно-сборочные чертежи узлов и прибора в целом для выявления ошибок в рабочих чертежах деталей до их изготовления и сборки. После этого чертежи проходят нормоконтроль, технологический контроль и утверждаются. Рабочие чертежи деталей и сборочные чертежи являются основной документацией, руководствуясь которой можно осуществить изготовление опытного образца прибора.

Разработка и изготовление любого ОЭП связаны с выпуском конструкторской документации. *Конструкторская документация* (КД) прибора – это совокупность документов, которые полностью и однозначно определяют все необходимые и достаточные данные для изготовления, настройки и юстировки, приемки, эксплуатации и ремонта как всего прибора в целом, так и его составных частей. КД включает следующие графические и текстовые документы:

– чертежи деталей, содержащие изображения каждой детали и другие данные, необходимые для ее изготовления и контроля;

– сборочный чертеж, содержащий изображение сборочной единицы и другие данные, необходимые для ее сборки и контроля;

– чертеж общего вида, определяющий конструкцию прибора, взаимодействие его основных составных частей, поясняющий принцип работы изделия, содержащий предельные отклонения сопря-

гаемых поверхностей и сопровождаемый техническими требованиями к прибору;

- габаритный чертеж, представляющий собой упрощенное изображение прибора с габаритными, установочными и присоединительными размерами;

- монтажный чертеж – упрощенное изображение прибора с данными, необходимыми для его установки на месте эксплуатации;

- спецификация – документ, определяющий состав сборочной единицы, комплекса или комплекта. Спецификация в общем случае состоит из разделов: документация, комплексы, сборочные единицы, детали, стандартные изделия, прочие изделия, материалы, комплекты;

- ведомости: спецификаций, ссылочных документов, покупных изделий, согласования применения изделий, держателей подлинников технического предложения, эскизного проекта, технического проекта;

- пояснительная записка (ПЗ) содержит описание прибора и принципа его действия, а также обоснование принятых при разработке прибора технических и технико-экономических решений;

- технические условия (ТУ) содержат требования к прибору и его составным частям и деталям. Обычно включают следующие разделы: вводную часть с указанием назначения, области применения прибора и условий его эксплуатации; состав комплекта прибора; технические требования к материалам, отдельным деталям, сборочным единицам и прибору в целом; требования к покрытиям и окраске; методы контроля технических характеристик, порядок приемки, проверок и испытаний; требования к транспортированию и хранению, смазыванию, упаковке; порядок маркировки; указания о гарантийных обязательствах изготовителя;

- технический паспорт и формуляр – документы, сопровождающие прибор в процессе эксплуатации. Технический паспорт включает основные номинальные технические характеристики прибора, результаты исследования технических характеристик, состав комплекта, свидетельство о приемке, положения о гарантиях и сведения о рекламациях, номер прибора и номера комплектующих изделий. В формуляре, даются сведения о режиме работы, учете времени эксплуатации, отметки о текущем состоянии прибора, его техобслуживании и ремонте;

– программа и методика испытаний, патентный формуляр, карта технического уровня и качества изделия, характеризующая уровень качества прибора, расчеты, инструкции и т. п.

Каждый документ комплекта КД должен иметь определенное обозначение в соответствии с обезличенной классификационной системой обозначений изделий и документов. Все подлинники, дубликаты и копии КД подлежат учету и хранению в отделе технической документации предприятия. Вносить изменения в КД или аннулировать ее имеет право только предприятие-держатель подлинников. Основой для этого служит «Извещение об изменении». Изменяемые размеры, слова, знаки, надписи и т. п., зачеркивают так, чтобы можно было легко прочитать зачеркнутое, а рядом с зачеркнутым проставляют новые данные.

Стадия ОКР завершается изготовлением опытного образца (или опытной партии приборов). Возникающие в процессе изготовления опытного образца замечания к КД исправляются.

Изготовленный опытный образец прибора передается на испытания. При проведении *предварительных испытаний* проверяют правильность функционирования, соответствие прибора ТУ и техническому паспорту. Эти испытания могут проводиться как в условиях заводской испытательной лаборатории, так и в условиях предполагаемой эксплуатации. Если опытный образец прошел предварительные испытания, что подтверждается соответствующим актом, его передают на *государственные испытания* для полной проверки на соответствие ТЗ и ТУ.

Государственные испытания осуществляются под руководством государственной комиссии, состоящей из специалистов, представителей заказчика и предприятия-разработчика. Испытания регламентируются специальной программой. Все замечания, поступающие в процессе государственных испытаний, фиксируются. Если они легко устранимы, то испытания продолжаются; если носят принципиальный характер, то опытный образец и КД возвращаются на доработку, после которой вновь представляются на испытания. По окончании испытаний составляется акт, где дается заключение о соответствии прибора ТЗ и о возможности его запуска в серийное или массовое производство, а также приводятся замеченные недостатки, которые должны быть устранены в процессе подготовки прибора к следующему этапу изготовления.

## Вопросы для самоконтроля

1. Приведите порядок создания оптико-электронных приборов.
2. Укажите основное содержание технического задания и результаты работ этапа технического предложения.
3. Приведите цель проведения и основные результаты выполнения этапов эскизного и технического проектирования.
4. Приведите цель проведения, основное содержание и результаты выполнения этапа рабочего проектирования.
5. Приведите цель проведения, основное содержание и результаты работ по изготовлению опытного образца.
6. Приведите порядок проведения и результаты государственной приемки опытного образца.

## 8. ОСОБЕННОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОЭП

Для изготовления серии ОЭП необходимо провести *технологическую подготовку производства*, которая заключается в осуществлении следующих работ: проектирование технологических процессов изготовления деталей, сборки узлов и прибора в целом; конструирование и изготовление технологической оснастки; разработка методик контроля характеристик ОЭП; проектирование и изготовление соответствующей контрольно-юстировочной аппаратуры.

На стадии *технологического проектирования* производится разработка технологических процессов изготовления прибора. Эту стадию (как и другие, рассмотренные ранее) можно логически разделить на уровни детализации процессов. Верхним уровнем является *испытание прибора*, на котором разрабатываются методики испытаний прибора на соответствие различным пунктам ТЗ. Ниже располагается уровень *юстировки*, где разрабатываются методики юстировки прибора, еще ниже – *сборки всего прибора*, далее процесс разветвляется на *сборку отдельных узлов* (сборочных единиц). На этих уровнях разрабатываются технологические процессы сборки, юстировки и контроля отдельных сборочных единиц ОЭП. На низших уровнях разрабатываются *технологические процессы изготовления* отдельных

деталей. Результатом работы на стадии технологического проектирования является технологическая документация.

*Технологическая документация* – комплект графических и текстовых документов, который содержит данные для организации производственного процесса и регламентирует технологический процесс изготовления отдельных деталей и всего ОЭП. В нее входят маршрутная и комплектовочные карты (технологические карты), карта эскизов и схем, технологическая инструкция, спецификация технологических документов, а также ведомости расцеховки, оснастки, материалов и прочие документы, в частности, по которым осуществляется технический контроль (операционная карта и ведомость технического контроля).

*Маршрутная карта* – документ, содержащий описание технологического процесса изготовления изделия по всем операциям в технологической последовательности, с указанием соответствующих данных по оборудованию, оснастке, материальным, трудовым и другим нормативам.

*Карта эскизов и схем* – документ, в котором приведена графическая иллюстрация технологического процесса изготовления изделия и отдельных его элементов, дополняющая или поясняющая содержание операций.

*Технологическая инструкция* содержит описание специфических приемов работы, методики контроля технологического процесса, правил пользования оборудованием и приборами, мер безопасности, а также описание физико-химических явлений, происходящих при выполнении отдельных операций технологического процесса.

*Ведомость материалов* составляется на материалы, применяемые при выполнении технологического процесса изготовления ОЭП, она является поддетальной и сводной ведомостью норм расхода этих материалов.

*Ведомость оснастки* – документ, содержащий перечень стандартных и специальных приспособлений и инструментов, необходимых для осуществления технологического процесса изготовления изделия. Эту ведомость составляют на основании карт технологического процесса.

*Операционная карта* содержит описание операций технологического процесса изготовления изделия с расчленением операций по

переходам и с указанием режимов работы, расчетных норм и трудовых нормативов.

По окончании этапа технологической подготовки производства может быть изготовлена установочная партия приборов, на этой стадии окончательно отрабатываются КД и технологический процесс, а также проверяются наличие требуемых технологической оснастки и контрольно-юстировочной аппаратуры и их возможности. При соответствии установочной партии приборов и документации предъявляемым требованиям, ОЭП запускается в серийное производство.

Неотъемлемая часть любого ОЭП – оптические детали, которые изготавливаются из оптических материалов (раздел 3). Эти материалы характеризуются следующими параметрами:

- показатель преломления  $n_e$  для зеленого цвета (длина волны  $\lambda = 546$  нм) и его предельное отклонение от номинального значения;

- средняя дисперсия ( $n_{F'} - n_C$ ) – разность показателей преломления на длинах волн синего ( $\lambda = 480$  нм) и красного ( $\lambda = 644$  нм) цвета и ее предельное отклонение от номинального значения;

- оптическая однородность – однородность объема заготовки по показателю преломления;

- бесшвильность – отсутствие в материале внутренних прозрачных полосок или нитей;

- пузырность – количество и размер пузырей внутри объема материала;

- показатель ослабления (коэффициент поглощения) – величина, обратная расстоянию, на котором поток излучения ослабляется в 10 ( $e$ ) раз;

- химическая стойкость, относительная твердость к сошлифовыванию, требования к спектральному пропусканию.

Изготовление оптических материалов характеризуется высокими требованиями по качеству исходного сырья, отсутствию в нем посторонних примесей и строгому соблюдению технологического режима. Кристаллы изготавливают методами роста из раствора (водорастворимые), вытягивания из расплава, а особо сложные по составу – осаждения из газовой фазы в вакуумированной камере.

Оптические стекла обычно изготавливаются из смеси различных оксидов, хотя используются и бескислородные составы (например,

халькогенидные стекла), бесцветные или окрашенные (для изготовления светофильтров). Обычно основной компонент оксидных стекол – оксид кремния (силикатные стекла). Стекла варят при высокой температуре (около 1500 °С, в зависимости от состава) из предварительно тщательно перемешанной смеси компонентов (шихты). Шихта подается в разогретую емкость в печи и постепенно нагревается до жидкого состояния. Далее стекломасса длительное время перемешивается для достижения высокой однородности материала и удаления пузырьков и медленно остужается. После охлаждения стекло вновь нагревают до температуры стеклования для снятия остаточных внутренних механических напряжений, что значительно повышает прочность материала.

Повторная термическая обработка стекол определенных составов позволяет сформировать внутри их кристаллики нанометровых размеров. Такие сложнкомпонентные материалы (стеклянная матрица с нанокристаллами) называются ситаллами.

Изготовление оптических деталей из материалов производится путем резки (распиловка), сверления, кругления, первичной обдирки (придание заготовке общей формы будущей детали), шлифовки, снятие фасок и полировки. Для этого используют абразивные материалы: абразивные и полирующие порошки. *Абразивные порошки* в зависимости от размера кристалликов разделяют на шлифзерно (размер частиц больше 200 мкм), шлифпорошок (40–160 мкм) и микропорошок (меньше 40 мкм). Они бывают из естественных (алмаз, корунд) или искусственных материалов (синтетический алмаз, карборунд  $\text{SiC}_2$ , электрокорунд, карбид бора  $\text{B}_4\text{C}$ , боразон  $\text{B}_3\text{N}$ ). К *полирующим материалам* относятся полирит (смесь оксидов церия и лантана размером менее 5 мкм), крокус ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , размер зерен 0,6–1 мкм), паста ГОИ ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ), оксиды тория и церия.

Изготавливают оптические детали с применением специальных инструментов, приспособлений и станков. В режущих инструментах – пилы, фрезы, трубки, сверла, карандаши, абразивные круги – частицы абразива закреплены с помощью связующего материала. Хотя может использоваться закрепление отдельных частиц непосредственно в инструменте (стеклорез, карандаш) или обработка свободным (несвязанным) абразивом. Шлифование и полирование осуществляют с помощью шлифовальных и полировальных. В зависимости от формы обрабатываемой поверхности их разделяют на «планшайбы»

(получение плоских поверхностей), «грибы» (получение вогнутых поверхностей) и «чашки» (для выпуклых поверхностей).

Станки для изготовления оптических деталей различают по виду выполняемых функций:

- для заготовительных операций – резка, сверление, обдирка, кругление;
- шлифовально-полировальные;
- специальные – центрирование, снятие фасок, изготовление асферических поверхностей и др.

Они могут быть предназначены для ручной, механизированной или автоматизированной обработки.

Для создания условий и обеспечение выполнения основных, специальных или вспомогательных операций по обработке оптических деталей (блокировка, шлифовка, полировка, лакировка, чистка и т. д.) применяют *вспомогательные материалы*. К ним относятся: гипс, парафин, сукно, фетр, различные воски, смолы, лаки, растворители и др.

*Гипс* используют для блокировки (закрепления) заготовок в приспособлении. *Воски* и *парафин* выполняют наклейные функции, они размягчаются при температуре 80–90 °С. *Смолы* выполняют как крепежную (наклеичную), так и полировочную функции. Основными составляющими смол являются канифоль и пек. Полировочные смолы (сплавы пека, канифоли и воска) применяют для полировки точных рабочих поверхностей оптических деталей. *Волокнистые материалы* (грубошерстные ткани, войлок, фетр, сукно, вата, древесные опилки и т. д.) применяют вместе со смолой для изготовления подложки – рабочей поверхности полировальников – при так называемом полировании на сукне.

Важные функции выполняют разного рода *покрытия*. Они могут быть однослойными и многослойными. Их наносят на преломляющие и отражающие поверхности. С помощью покрытий изменяют оптические, химические и электрические свойства деталей. По назначению покрытия разделены на несколько видов: *защитные, отражающие (зеркальные), светоделительные (полупрозрачные), просветляющие, фильтрующие, токопроводящие, поляризирующие*. Защитные покрытия (из лаков или шеллака) должны предохранять полированные поверхности от механических повреждений, действия щелочей, кислот, т. е. быть нейтральными, кроме того, быстро высыхать и хорошо растворяться в дешевых и неопасных раствори-

телях (например, горячей воде). Просветляющие покрытия увеличивают поток проходящего через деталь света за счет уменьшения отражения на границе раздела сред с различными показателями преломления, они характеризуются остаточным коэффициентом отражения. Назначение других покрытий ясно из их названий.

Каждый тип покрытия имеет несколько разновидностей, отличающихся материалом пленки, способом ее нанесения, защиты и т. п., их толщина составляет от единиц нм до десятков мкм.

Для промывки и чистки оптических деталей от защитного лака и крепежных материалов в процессе изготовления, контроля и для окончательной чистки перед сборкой применяют *растворители*: бензин, спирты, эфиры, ацетон. Бензин хорошо растворяет воск, пек, канифоль и жировые загрязнения. Спирты хорошо растворяют лаки и смолы, хуже – воски и парафин. Жировые загрязнения удаляют эфирами. Для окончательной чистки деталей используют смеси из эфиров и этилового спирта.

Основные способы нанесения покрытий: *травление, из раствора гидролизующихся соединений, путем восстановления серебра (отражающие покрытия), термического или электронно-лучевого испарения пленкообразующих веществ в вакууме, катодного распыления* (при электрическом разряде в разреженной атмосфере поверхность катода разрушается под ударами ионов или ионизированных молекул газа, в результате частички вещества катода распыляются и осаждаются на подложках, находящихся на аноде или вблизи его). Катодным распылением получают просветляющие, зеркальные, светоделительные и интерференционные покрытия из тугоплавких веществ.

### **Вопросы для самоконтроля**

1. Приведите основные этапы изготовления оптического стекла.
2. Для чего необходима повторная термическая обработка стекла?
3. Приведите основные параметры, которые характеризуют оптические материалы.
4. Перечислите основные абразивные материалы и назовите характеристические размеры частиц порошков для грубой средней и тонкой полировки.

5. Перечислите основные полирующие материалы.

6. Перечислите основные вспомогательные материалы и назовите, для каких целей они служат.

## 9. КОМПОНОВКА, ИСПЫТАНИЯ И ПОВЕРКИ ОЭП

В зависимости от назначения и условий работы ОЭП применяют следующие компоновочные схемы: децентрализованную (разбросанную), полностью централизованную и централизованную с автономным пультом управления.

При *децентрализованной компоновочной схеме* каждый из блоков прибора конструируется отдельно и размещается автономно, а его функционирование обеспечивается системой соединительных кабелей. Такую схему часто применяют в тех случаях, когда ОЭП служит для измерения каких-либо параметров без доступа оператора (в частности, в неблагоприятных условиях) или при работе в полевых условиях, когда прибор надо транспортировать и масса его отдельных блоков должна быть невелика.

Достоинствами децентрализованной схемы являются простота компоновки, возможность произвольного размещения блоков, высокая надежность, поскольку вышедшие из строя блоки легко заменить и поломка одного блока не влияет на работоспособность других. Недостатками являются наличие наружных соединительных кабелей и необходимость обеспечения защиты от вредных воздействий каждого функционального блока в отдельности.

При *полностью централизованной компоновочной схеме* все блоки прибора размещаются в общем корпусе. Такая схема свойственна стационарно устанавливаемым приборам, и ее наиболее широко используют в оптико-электронном приборостроении. По этой схеме выполняют многие лабораторные приборы: фотометры, спектрометры, гониометры, приборы для астроориентации, космоса, многие ОЭП с использованием лазеров, контрольно-измерительные приборы.

Достоинствами централизованной схемы являются компактность прибора, минимальная длина межблочных связей, возможность обеспечения одновременной защиты всех блоков от внешних воздействий. К недостаткам следует отнести возможность взаимного влияния отдельных блоков или элементов и сложность транспортирования при значительных габаритных размерах и массе прибора.

Иногда компоновку прибора требуется выполнять по *централизованной схеме с автономным пультом управления*. Примером такого прибора может служить фотоэлектрическое устройство для дистанционного задания и измерения угла поворота объекта, в котором фотоэлектрический датчик, привод, электронный блок и блок питания скомпонованы в общем корпусе, установленном на объекте, а пульт управления и индикации вынесен в зону размещения оператора. Возможен также вариант с автономным оптическим блоком и централизованной компоновкой остальных блоков прибора.

Независимо от выбранной компоновочной схемы при конструировании прибора необходимо учитывать следующие общие принципы:

- конструкцию необходимо делить на узлы (блоки) по функциональному признаку;

- узлы и блоки прибора по возможности должны быть законченными с точки зрения производства и не требовать после сборки дополнительной обработки совместно с другими частями, позволять автономную проверку качества их функционирования;

- число деталей в узле должно быть минимальным;

- элементы и блоки устанавливаются так, чтобы не препятствовать прохождению лучей;

- движение перемещающихся частей прибора должно быть согласованным, чтобы исключить их столкновение и перекрывание хода лучей;

- при монтаже в общем кожухе отдельные узлы и блоки не должны оказывать вредного взаимного воздействия (нагрев, блики, электромагнитные наводки, вибрации и т. п.);

- следует учитывать требования, определяемые условиями эксплуатации и размещения прибора (герметизация, защита от наводок и пр.);

- необходимо предусмотреть возможность быстрой замены отдельных элементов или блоков.

В настоящее время не существует какой-либо общей методики выполнения компоновки ОЭП. Конструирование и компоновку приборов выполняют в каждом конкретном случае индивидуально.

Детали и элементы ОЭП собирают в узлы и блоки методами разъёмного и неразъёмного соединения. К *разъёмным* относятся закрепление винтами, штифтами. *Неразъёмными соединениями* называются такие соединения, которые невозможно разобрать без нарушения эле-

ментов соединяемых деталей. К этому виду соединений относятся заклепывание, завальцовка, развальцовка, склейка, сварка, пайка и соединение с гарантированным натягом. Неразъемно в ОЭП соединяют, прежде всего, детали, относящиеся к механической части, и электронного блока, изготовленные из металла, пластмассы, кожи, фибры и других разнородных материалов. Неразъемное соединение оптических деталей и элементов между собой и с механическими (оправы, прокладки и т. д.) осуществляют, как правило, склеиванием, завальцовкой (рис. 9.1), а также методом глубокого оптического контакта.

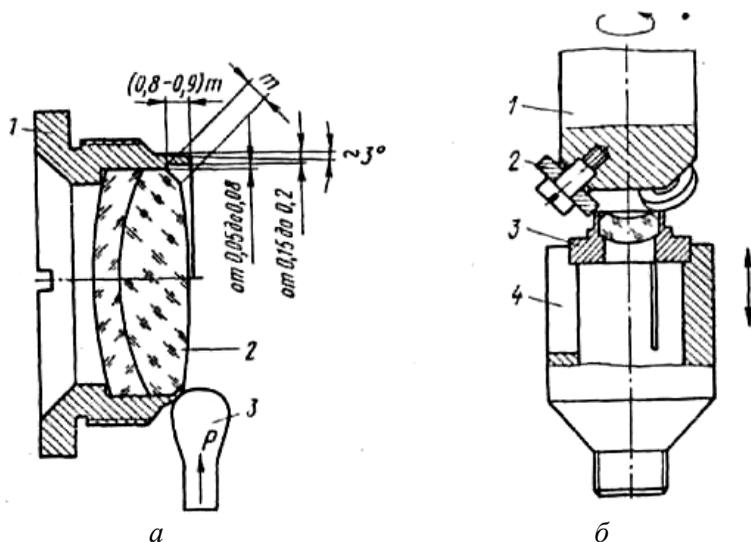


Рис. 9.1. Завальцовка линзы вручную (а) и роликами (б)

Крепление деталей *завальцовкой* является самым распространенным способом соединения механических элементов с оптическими деталями круглой формы. Это соединение осуществляется путем плотной закатки края металлической оправы 1 на фаску оптической детали 2 по всей ее окружности (рис. 9.1, а). Эта операция может выполняться на токарно-арматурных станках вручную. При массовом производстве ОЭП детали завальцовывают так называемыми роликовыми головками, которые могут быть установлены в коническое отверстие задней бабки токарно-арматурного станка или шпин-

деля специального станка. Кромка оправы закатывается тремя вращающимися вокруг своих осей роликами 2, закрепленными на головке 1, которая, в свою очередь, обкатывается вокруг детали (рис. 9.1, б).

Собранный оптико-механический блок подвергается юстировке. *Юстировка* – это совокупность операций по приведению средств измерений в состояние, обеспечивающее их правильное функционирование. Она заключается в регулировании взаимного расположения оптических деталей (линз, призм, зеркал) с целью их центрирования и обеспечения высокого качества изображения. В отъюстированном положении оптические детали закрепляются винтами, штифтами, склеиванием. В конструкции оптических систем обычно предусматриваются устройства, регулирующие положение оптических деталей и их закрепление при юстировке.

Основная цель испытаний ОЭП – выявление их способности сохранять заданные свойства в условиях эксплуатации. Испытания являются завершающей стадией процессов проектирования и изготовления прибора. В соответствии с видом воздействий испытания разделяют на механические, климатические, электрические, электромагнитные, специальные и др. К *механическим* испытаниям относят проверку работы прибора при наличии внешних механических факторов (вибрация, удар), трение и плавность хода подвижных частей, состояние уравновешенности, определение положения центра тяжести, момента инерции. *Климатические* испытания проводят для выявления способности прибора противостоять воздействию внешней среды, (например, повышенной или пониженной температуры), а также биологических факторов. К *электрическим* испытаниям относится проверка качества монтажных работ и пайки, изоляции токоведущих частей, потребление электроэнергии. *Специальным* испытаниям подвергаются ОЭП, предназначенные для работы в особых условиях, например, в условиях повышенной проникающей радиации при действии космических лучей, в условиях высокого вакуума.

Испытания в зависимости от места и условий разделяют на *лабораторные, стендовые*, которые проводятся на месте изготовления приборов, и *полигонные*, проводимые в условиях эксплуатации приборов. *Приемочные* испытания проводят с целью всесторонней проверки опытного образца на соответствие техническим требованиям в условиях, максимально приближенных к реальным, для определения целесообразности его постановки на производство.

Цель *периодических* испытаний – проверить соответствие приборов всем требованиям технических условий один раз в течение оговоренного промежутка времени, как правило, не реже одного раза в год. Цель *типовых* испытаний – проверить соответствие приборов требованиям технических условий в случаях изменения принципиальной схемы, конструкции или технологии их изготовления, примененных материалов и покупных изделий, а так же по рекламациям потребителей.

*Поверка* приборов заключается в определении метрологическим органом их погрешностей и установлении пригодности к применению. Составными элементами поверки являются метод, средства и операция. Методы поверки – совокупность приемов ее проведения. К средствам поверки относятся технические средства (аппаратура), с помощью которых проводится контроль метрологических характеристик поверяемых приборов. Операция поверки – это процесс собственно измерений, в результате которого выявляется фактическое значение метрологической характеристики поверяемого прибора. Поверка приборов заключается в передаче размера единицы физической величины от эталона или образцового средства измерений к приборам (рабочим средствам измерений). Эта передача проводится на основе нормативного документа, называемого поверочной схемой, которая устанавливает соподчинение средств измерений различных уровней точности по целесообразной системе.

*Эталон*, воспроизводящий единицу измерений с наивысшей точностью, называют первичным. *Образцовое средство измерений* является промежуточным звеном между эталоном и поверяемым прибором. В зависимости от точности их делят на разряды. *Поверочные схемы* для ОЭП различного назначения устанавливаются нормативно-технической документацией. Во главе поверочных схем стоят эталоны угла, метра, силы ветра, различные эталоны энергетических величин, а иногда и некоторые другие.

## **ПРИМЕРНАЯ ТЕМАТИКА ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ**

### **Практическое занятие 1**

#### **Распространение оптического излучения через атмосферу**

*Содержание:* Причины существования «окон прозрачности» атмосферы. Спектральные и энергетические характеристики источников излучения. Классификация источников оптического излучения.

*Литература:*

1. Якушенков, Ю. Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов / Ю. Г. Якушенков. – М. : Логос, 1999. – 480 с. *Главы 1, 4, 6.*

### **Практическое занятие 2**

#### **Ход лучей через оптические элементы**

*Содержание:* Ход лучей в светопропускающих и отражательных оптических элементах.

*Литература:*

1. Заказнов, Н. П. Теория оптических систем: учебник для студентов приборостроительных специальностей вузов / Н. П. Заказнов, С. И. Кирюшин, В. И. Кузичев. – М. : Машиностроение, 1992. – 448 с. *Главы III, IX, X.*

### **Практическое занятие 3**

#### **Приемники оптического излучения**

*Содержание:* Физические принципы работы и конструктивные особенности селективных и неселективных приемников, в том числе, на основе ПЗС и КМОП структур.

*Литература:*

1. Якушенков, Ю. Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов / Ю. Г. Якушенков. – М. : Логос, 1999. – 480 с. *Глава 6.*

### **Практическое занятие 4**

#### **Оптико-электронные устройства отображения информации**

*Содержание:* Особенности работы, преимущества и недостатки жидкокристаллических, плазменных и светодиодных мониторов и устройств.

## **Практическое занятие 5**

### **Требования, предъявляемые к ОЭП**

*Содержание:* Основные требования, предъявляемые к ОЭП, на примере цифрового фотоаппарата.

*Литература:*

1. Парвулюсов, Ю.Б. Проектирование оптико-электронных приборов / Ю.Б. Парвулюсов [и др.]. – М. : Логос, 2000. – 488 с. Глава 5.

## **Практическое занятие 6**

### **Проектирование оптико-электронных приборов (часть 1)**

*Содержание:* Содержание технического задания и задачи технического предложения.

*Литература:*

1. Парвулюсов, Ю.Б. Проектирование оптико-электронных приборов / Ю.Б. Парвулюсов [и др.]. – М. : Логос, 2000. – 488 с., пар. 4.2, 4.3.

## **Практическое занятие 7**

### **Проектирование оптико-электронных приборов (часть 2)**

*Содержание:* Отличительные особенности этапов эскизного, технического и рабочего проектирования.

*Литература:*

1. Парвулюсов, Ю. Б. Проектирование оптико-электронных приборов / Ю.Б. Парвулюсов [и др.]. – М. : Логос, 2000. – 488 с. §§ 4.4–4.6.

## **Практическое занятие 8**

### **Технологическая подготовка производства ОЭП**

*Содержание:* Содержание основной технологической документации.

*Литература:*

1. Каледин, Б. Ф. Производство оптико-электронных приборов / Б. Ф. Каледин, М. Д. Мальцев, А. И. Скороходов. – М. : Машиностроение, 1981. – 303 с. §§ 4.1–4.4.

## Практическое занятие 9 Производство оптических деталей

*Содержание:* Отличительные особенности изготовления и обработки разновидностей оптических материалов (стекло, ситаллов, пластмасс, кристаллов и керамики).

*Литература:*

1. Ефремов, А. А. Изготовление и контроль оптических деталей / А. А. Ефремов, Ю. В. Сальников. – М. : Высшая школа, 1983. – 255 с.

*Глава 2.*

2. Каледин, Б. Ф. Производство оптико-электронных приборов / Б. Ф. Каледин, М. Д. Мальцев, А. И. Скороходов. – М. : Машиностроение, 1981. – 303 с. *Глава 13.*

## Примерный перечень вопросов к экзамену

1. Классификация оптических и оптико-электронных приборов. [5, § 1.2].
2. Обобщенная схема работы оптико-электронного прибора, этапы и перспективы их развития [5, Гл. 1].
3. Оптические детали и материалы, из которых они изготавливаются. [2, §§ 1.1; 1.2]; [4, Гл. III, X].
4. Идеальная оптическая система. Хроматические aberrации. [4, Гл. III, X].
5. Монохроматические aberrации оптических систем и методы их устранения. [4, Гл. IX].
6. Классификация оптических систем по схемному решению и их кардинальные элементы. [5, §§ 5.1; 5.3; 5.4]; [4, Гл. III].
7. Назначение и характеристики вспомогательных оптических элементов. [1, § 7.2]; [5, Гл. 5].
8. Основные законы распространения оптического излучения через материалы, диффузное и зеркальное отражение, селективный отражатель. [2]; [6, § 2–4].
9. Распространение оптического излучения через атмосферу, «окна прозрачности» атмосферы. [5, Гл. 4].
10. Фотометрические величины. [6, Гл. 1, 2].
11. Классификация и основные характеристики источников излучения.
12. Электронно-оптические изображающие устройства.
13. Классификация фотоприемников и основные описывающие их параметры. [5, Гл. 6].
14. Принципы работы и основные характеристики фотоприемников на внешнем и внутреннем фотоэффекте.
15. Принципы работы и основные характеристики неселективных фотоприемников.
16. Требования, предъявляемые к оптико-электронным приборам по внешним условиям и условиям эксплуатации. [1, § 5.1].
17. Техничко-конструктивные требования к оптико-электронным приборам. [1, § 5.2].
18. Технологические и технико-экономические требования к оптико-электронным приборам. [1, §§ 5.5; 5.6].
19. Требования по надежности и технической эстетике к оптико-электронным приборам. [1, §§ 5.3; 5.7].

20. Порядок и общее содержание этапов создания оптико-электронных приборов. Техничко-экономическое обоснование. [1, §§ 2.1–2.3; 4.1].
21. Назначение и содержание технического задания на оптико-электронный прибор. [1, § 4.2].
22. Назначение и содержание технического предложения. [1, § 4.3].
23. Назначение и содержание этапа эскизного проектирования. [1, § 4.4].
24. Назначение и содержание этапа технического проектирования. [1, § 4.5].
25. Назначение и содержание этапа рабочего проектирования. [1, § 4.6].
26. Состав конструкторской документации. [1, § 4.7].
27. Структура оптического сигнала, поступающего на вход оптико-электронного прибора, и задачи энергетического расчета. [1, § 6.1].
28. Задачи этапа технологической подготовки производства, состав технологической документации. [3, §§ 4.1; 4.4].
29. Порядок проектирования технологических процессов. [3, § 4.2].
30. Характеристики оптических материалов. [3, С. 134–135]; [2, §§ 2.1; 2.2; 4.1].
31. Особенности производства оптического стекла. [3, § 13.2; 13.3].
32. Особенности производства и основные характеристики кристаллов, керамики и ситаллов. [3, § 13.3; 13.4]; [2, § 2.6].
33. Абразивные, полирующие и вспомогательные материалы. [3, Гл. 14]; [2, §§ 3.1–3.3].
34. Инструменты для обработки оптических деталей. [3, § 15.1].
35. Станки и приспособления для обработки оптических деталей. [3, §§ 15.2; 15.3].
36. Технологический процесс обработки оптических деталей. [3, §§ 16.1–16.3]; [2, § 2.5].
37. Особенности изготовления линз в единичном и серийном производстве. [3, § 16.4].
38. Особенности изготовления призм в единичном и серийном производстве. [3, § 13.4].
39. Особенности изготовления пробных стекол, шкал, сеток, деталей с асферическими поверхностями. [3, § 16.5].
40. Виды покрытий оптических деталей и способы их нанесения. [3, § 17.1]; [2, § 3.4].

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Парвулюсов, Ю.Б. Проектирование оптико-электронных приборов / Ю.Б. Парвулюсов [и др.]. – М. : Логос, 2000. – 488 с.
2. Ефремов, А. А. Изготовление и контроль оптических деталей / А. А. Ефремов, Ю. В. Сальников. – М. : Высшая школа, 1983. – 255 с.
3. Каледин, Б. Ф. Производство оптико-электронных приборов / Б. Ф. Каледин, М. Д. Мальцев, А. И. Скороходов. – М. : Машиностроение, 1981. – 303 с.
4. Заказнов, Н. П. Теория оптических систем: учебник для студентов приборостроительных специальностей вузов / Н. П. Заказнов, С. И. Кирюшин, В. И. Кузичев. – М. : Машиностроение, 1992. – 448 с.
5. Якушенков, Ю. Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов / Ю. Г. Якушенков. – М. : Логос, 1999. – 480 с.
6. Гуревич, М. М. Фотометрия (теория, методы и приборы) / М. М. Гуревич. – Л. : Энергоатомиздат, 1983. – 272 с.
7. Запрягаева, Л. А. Расчет и проектирование оптических систем / Л. А. Запрягаева, И. С. Свешникова. – М. : Логос, 2000. – 584 с.
8. Ключникова Л. В. Проектирование оптико-механических приборов / Л. В. Ключникова, В. В. Ключников. – СПб. : Политехника, 1994. – 206 с.
9. Федорцев, Р. В. Элементы и детали оптических приборов / Р. В. Федорцев. – Мн. : БНТУ, 2005. – 226 с.
10. Геометрическая оптика: учеб. пособие по курсу «Прикладная оптика» / Г. И. Цуканова [и др.]. – СПб. : СПбГИТМО (ТУ), 2002. – 135 с.
11. Справочник технолога-оптика / под ред. М. А. Окатова. – СПб. : Политехника, 2004. – 679 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	3
1. Понятие об оптико-электронных приборах .....	4
2. Оптическое излучение .....	7
3. Оптические детали и вспомогательные оптические элементы .....	16
4. Аберрации оптических систем .....	21
5. Приемники оптического излучения и электронно-оптические устройства отображения информации .....	28
6. Основные требования, предъявляемые к ОЭП .....	36
7. Организация и содержание процесса конструирования ОЭП .....	45
8. Особенности организации производства и технологических процессов изготовления ОЭП .....	57
9. Компоновка, испытания и поверки ОЭП .....	63
Примерная тематика практических занятий .....	68
Примерный перечень вопросов к экзамену .....	71
Библиографический список .....	73

Учебное издание

**МАЛЯРЕВИЧ** Александр Михайлович

**ТЕХНОЛОГИЯ  
ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ**

Учебно-методическое пособие  
для студентов специальности  
1-27 01 01 «Экономика и организация производства»,  
направления специальности 1-27 01 01-08 «Приборостроение»

Редактор *А. С. Кириллова*  
Компьютерная верстка *Н. А. Школьниковой*

Подписано в печать 16.10.2019. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Печать цифровая.  
Усл. печ. л. 4,36. Уч.-изд. л. 3,41. Тираж 100. Заказ 658.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя  
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.