

## **Основы оптоэлектроники**

■  
■  
■

岩波講座マイクロエレクトロニクス

編集委員 ● 元岡 達・菅野卓雄・渡辺 誠・淵 一博・石井威望

# マイクロエレクトロニクス素子Ⅱ

光・記憶素子とセンサ

末松安晴

片岡照栄

岸野克己

國分泰雄

鈴木忠二

石井 治

米澤 進


■  
岩波書店  
■


# Основы оптоэлектроники



Перевод с японского  
Э. Г. Азербайева, М. Е. Панюкова, А. М. Тыринова  
под редакцией  
канд. физ.-мат. наук К. М. Голанта



Москва «Мир» 1988



ББК 32.86  
О75  
УДК 621.38

Суэмацу Я., Катаока С., Кисино К., Кокубун Я., Судзуки Т.,  
Исии О., Ёнэдзава С.

О75 288 с., ил.  
ISBN 5-03-001207-9

Книга является переводом второго тома 11-томной серии по микроэлектронике, написанной крупными японскими специалистами. Посвящена современным методам разработки, изготовления и применения оптоэлектронных элементов, устройств памяти ЭВМ, а также устройств визуального отображения информации. Рассмотрены физические принципы работы этих устройств, их конструкторская реализация и практика использования в различных системах.

Для специалистов в области электроники и вычислительной техники, инженеров, занимающихся производством этой техники, а также студентов соответствующих специальностей.

О  $\frac{2403000000-204}{041(01)-88}$  169—88, ч. 1

ББК 32.86

*Редакция литературы по электронике*

ISBN 5-03-001207-9 (русск.)  
ISBN 4-00-010182-X (яп.)

© Ясухару Суэмацу, Сёэй Катаока,  
Кацуми Кисино, Ясуо Кокубун,  
Тюдзи Судзуки, Осаму Исии, Сусуму  
Ёнэдзава  
Iwanami Shoten Publishers, Tokyo,  
1985  
© перевод на русский язык, «Мир»,  
1988

## **Предисловие редактора перевода**

Предлагаемая читателю книга японских специалистов задумана как введение в элементную базу современной оптоэлектроники. Шесть глав книги написаны разными авторами и охватывают очень широкий круг вопросов. За исключением первой главы, где в конспективной форме представлено введение в физические основы взаимодействия оптического излучения с веществом, последующие пять посвящены рассмотрению конкретных устройств. На страницах книги читатель знакомится с принципом действия и основными параметрами полупроводниковых лазеров и светодиодов, фотоприемников, элементов волоконной оптики, оптических модуляторов и затворов, жидкокристаллических, электролюминесцентных и газоразрядных индикаторов, электронно-лучевых трубок, различного рода датчиков и преобразователей, в том числе устройств кодирования и ввода изображения в память ЭВМ, элементов запоминающих устройств и т. д. — словом, тех компонентов, на основе которых сегодня осуществляется практическая реализация систем передачи, приема, хранения, обработки и отображения информации. Содержание книги позволяет ощутить быстрый прогресс в создании таких систем, который оказался возможным благодаря решению целого ряда материаловедческих проблем, связанных главным образом с изготовлением волоконных световодов и полупроводниковых лазеров и фотоприемников ближнего ИК-диапазона. Появление дешевой, малогабаритной, простой в обращении и надежной в эксплуатации элементной базы не только привело к модернизации разработанных ранее информационных устройств, но также способствовало широкому внедрению оптоэлектронных систем различного назначения, построенных на новых физических принципах. Один из наиболее ярких примеров такого рода систем представляют оптические линии связи на стеклянных волоконных световодах с профилированным показателем преломления.

Разумеется, при таком широком спектре затрагиваемых проблем в рамках одной книги не удастся достичь исчерпывающей полноты освещения какого-либо конкретного вопроса. Однако этой цели авторы перед собой и не ставили. Их основной задачей, по мнению редактора японского издания, было дать общедоступное изложение основного содержания рассматриваемых устройств. На мой взгляд, с этой задачей авторам книги справиться удалось. Несмотря на схематичность, неизбежную

в таких случаях, изложение материала позволяет ясно осознать основные физические идеи, которые заложены в основу функционирования конкретного устройства, понять технические и технологические факторы, ограничивающие его параметры. Поэтому данная книга будет интересна прежде всего тем, кто впервые знакомится с современными устройствами оптоэлектроники. Концентрация материала на основе общей идеи дать описание принципов функционирования известных устройств является главным отличием этой книги от большинства изданий на эту тему, в которых основное внимание уделяется специальным вопросам конструирования и применения.

Большое место в книге занимают практические схемы устройств, а также многочисленные таблицы, в которых приведены важнейшие параметры материалов, используемых в оптоэлектронике. Помимо чисто иллюстративных целей эти данные могут быть использованы и в качестве справочного материала, что представляет определенный практический интерес для специалистов-разработчиков.

К. М. Голант

## Предисловие

Эта книга посвящена устройствам, работающим в вычислительных системах и в системах передачи информации. Сюда входят, за исключением логических элементов, датчики, запоминающие устройства, устройства отображения информации и др. Авторы стремились дать читателю по возможности простое и понятное объяснение основ конструирования и работы этих устройств.

В гл. 1 излагаются физические основы функционирования оптических устройств. Рассмотрены явления поглощения и излучения света веществом, главным образом на примере полупроводников, используемых в источниках света, фотоэлементах и т. п. Далее рассматриваются такие понятия, как коэффициент преломления в диэлектриках, важный для оптических устройств и волоконных световодов; внутренний фотоэффект и фотоэлектрический эффект, лежащие в основе работы фотоэлементов и светочувствительных датчиков и, наконец, электро- и магнитооптические эффекты, на которых построено действие светочувствительных элементов и элементов нелинейной оптики. Кроме того, прилагаются многочисленные таблицы с характеристиками веществ, имеющими отношение к вышеупомянутым устройствам.

Гл. 2 содержит описание принципа действия различных оптических устройств и их практического применения в оптической связи и оптической записи в качестве светочувствительных датчиков, источников света, фотоприемников и т. д. Сначала излагается конструкция и принцип действия полупроводникового лазера, в том числе имеющая важное практическое значение модуляционная характеристика. Затем следует анализ характеристик светоизлучающего диода. Далее рассматриваются частотная характеристика фотоприемника и шумовая, определяющая его чувствительность.

В гл. 3 кратко сообщается о различных оптических компонентах и волоконных световодах. Рассматриваются принципы фокусировки и распространения света, лежащие в основе этих элементов и устройств. Представлены разновидности оптических волокон, их характеристики передачи, а также способы соединения между собой и с оптическими приборами. Перечислены области практического применения волоконной оптики в технике и медицине. Среди оптических элементов описываются фильтры, в том числе разделительные, развязки, оптические

модуляторы, а в заключение приведена конструкция волоконно-оптической системы связи.

В гл. 4 рассматривается преобразование неэлектрических величин в электрический сигнал и наоборот. При этом упор делается на полупроводниковые датчики и преобразователи. Перечислены функции датчиков и их роль в системах обработки информации. Уделено внимание проблемам их миниатюризации, многомерности и интеграции, а также повышению чувствительности и многофункциональности.

В гл. 5 дается краткий обзор различных запоминающих устройств (ЗУ), образующих основной блок вычислительной машины. Проведена классификация ЗУ по виду физических явлений, на основе которых происходит запоминание информации, по емкости и быстродействию памяти и др. Далее рассматриваются ЗУ с произвольной выборкой и постоянные ЗУ, ЗУ на цилиндрических магнитных доменах и на приборах с зарядовой связью, а также типы ЗУ на магнитных лентах и дисках. В заключение упоминаются оптические ЗУ, стремительно развивающиеся в последнее время.

Гл. 6 содержит систематизированное описание средств отображения информации посредством ее визуализации. Перечислены требования, предъявляемые к этим устройствам для обеспечения качественного изображения. Приведены конструкции дисплеев на ЭЛТ, газоразрядных, жидкокристаллических и электролюминесцентных индикаторных панелей и др. Описан принцип термозаписи.

Таким образом, эта книга охватывает широкий спектр микроэлектронных устройств, за исключением логических элементов, а также волоконно-оптические линии и системы, начиная с основных понятий и кончая особенностями практического применения. Темы, затронутые здесь, многообразны и охватить их небольшому числу авторов довольно трудно. Написание отдельных глав было поручено соответствующим специалистам, фамилии которых приводятся ниже и которым редактор выражает свою искреннюю благодарность: гл. 1 — Суэмацу Ясухару, гл. 2 — Кисино Кацуми, гл. 3 — Кокубун Ясуо, гл. 4 — Катаока Сёэй и Судзуки Тюдзи, гл. 5 — Исии Осаму и гл. 6 — Ёнэдзава Сусуму.

Июль 1985 г.

*Редактор серии*



## Оптические устройства. Основные понятия

В этой главе описаны физические явления, положенные в основу работы оптоэлектронных приборов. В заключение приводятся многочисленные рисунки и таблицы, цель которых — облегчить усвоение материала.

### 1.1. Поглощение и излучение света

#### 1.1.1. Поглощение и рассеяние света. Переход электронов

При попадании света внутрь вещества происходит его поглощение. Поглощение света приводит к увеличению энергии электронов вещества и изменению их состояния. В металлах происходит в основном увеличение кинетической энергии свободных электронов, а в полупроводниках и диэлектриках в большинстве случаев наблюдается переход электронов в различные энергетические состояния. Энергетические состояния валентного электрона в полупроводнике, как показано на рис. 1.1, образуют зону проводимости и валентную зону. Если энергия фотона больше энергетического интервала между зоной проводимости и валентной зоной, то в полупроводнике происходит сильное поглощение света. Другими словами, если энергетический интервал между зоной проводимости и валентной зоной, т. е. энергетическую ширину запрещенной зоны, обозначить через  $E_g$  (эВ), длину волны света — через  $\lambda$  (мкм), то диапазон длин волн сильного поглощения можно представить в виде соотношения

$$\lambda \leq hc/E_g = 1,2398/E_g, \quad (1.1)$$

где  $h$  — постоянная Планка,  $c$  — скорость света. В результате

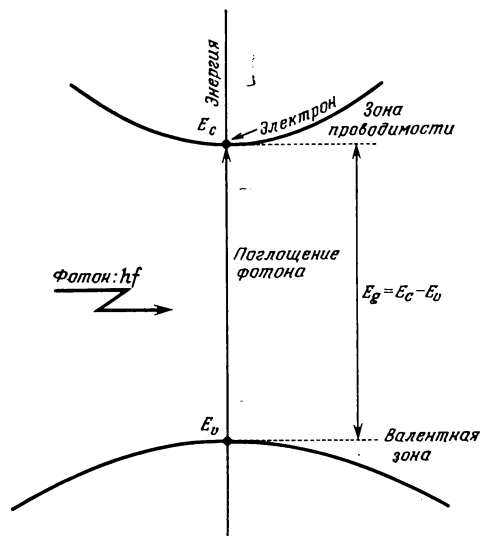


Рис. 1.1. Поглощение света в полупроводнике.

поглощения света электрон из валентной зоны переходит в зону проводимости. Длину волны, соответствующую равенству в (1.1), т. е. длину волны, соответствующую энергетическому интервалу, назовем длиной волны энергетического интервала. Свет с энергией ниже энергетического интервала в (1.1), а именно свет в диапазоне длин волн, больших длины волны энергетического интервала, не будет вызывать междузонного электронного перехода. Рассеяние, обусловленное свободными электронами в зоне проводимости полупроводника, либо рассеяние, обусловленное дырками в валентной зоне, составляет сравнительно небольшое поглощение, зависящее от концентрации донорной и акцепторной примеси. (Рис. П. 1.1 приложения.)

В некоторых стеклах возбуждение электронов за счет ультрафиолетового поглощения приводит к небольшому дополнительному поглощению света видимой области. Это явление называется фотохромизмом и используется для изменения спектра поглощения видимого излучения под действием ультрафиолетового излучения.

### 1.1.2. Рекомбинация и излучение света

При инжекции электрона в зону проводимости полупроводника этот электрон спустя некоторое время, называемое временем жизни, вступает в рекомбинацию с дыркой в валентной зоне и

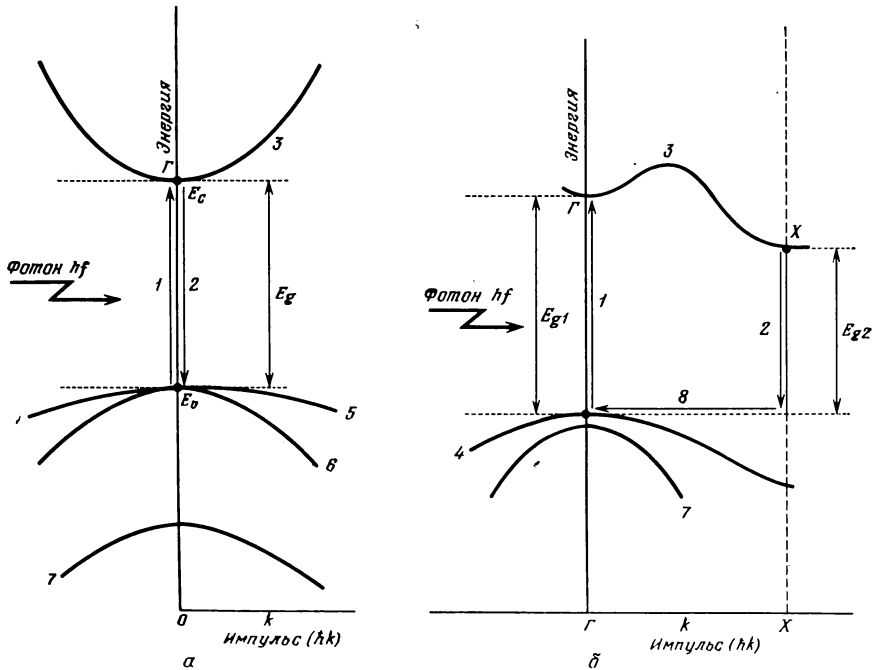


Рис. 1.2. Излучение света в полупроводнике: *а* — прямой переход; *б* — непрямой переход; 1 — поглощение фотона; 2 — излучение фотона; 3 — зона проводимости; 4 — валентная зона; 5 — ветвь легких дырок; 6 — ветвь тяжелых дырок; 7 — спин-орбитальное расщепление; 8 — излучение фотона.

из зоны проводимости переходит в валентную зону, что сопровождается, как это видно из рис. 1.2, исчезновением пары электрон проводимости — дырка и выделением избытка энергии в виде излучения света. Этот процесс называется спонтанным или же рекомбинационным излучением света, а время, необходимое для излучения света, называется временем рекомбинации носителей или же временем жизни спонтанного излучения.

Так как процесс спонтанного излучения рассматривается как явление соударения электрона и фотона, то при электронном переходе в системе, состоящей из электрона и фотона, имеют место законы сохранения энергии и импульса. В процессе перехода разность энергии электрона  $E_g$ , согласно закону сохранения энергии, равняется энергии фотона  $hf$ , где  $f$  — частота света. Поскольку импульс фотона достаточно мал по сравнению с импульсом электрона, при излучательной рекомбинации импульс электрона в соответствии с законом сохранения не изменяется, другими словами, остается неизменным значение волнового числа  $k$  в волновой функции электрона.

Обычно в полупроводниках, как видно из рис. 1.2, *а*, потолок валентной зоны, в котором находятся дырки, обусловленные тепловым возбуждением, соответствует нулевому значению волнового числа ( $\hbar k$  или  $k$ ). Вследствие этого электронные межзональные переходы осуществляются в основном с участием состояний этой части валентной зоны. Существуют полупроводники с прямыми переходами, в которых, как показано на рис. 1.2, *а*, потолок валентной зоны совпадает с дном зоны проводимости, и полупроводники с непрямыми переходами, в которых (рис. 1.2, *б*) потолок валентной зоны не совпадает с дном зоны проводимости. Кремний, используемый в транзисторах, представляет собой полупроводник с непрямыми переходами, а арсенид галлия, применяемый в светоизлучающих приборах, относится к полупроводникам с прямыми переходами.

В полупроводниках с прямыми переходами вероятность перехода велика. Следовательно, время существования спонтанного излучения короткое и составляет несколько наносекунд. В полупроводниках с прямыми переходами легко достигается излучательная рекомбинация, а короткое время существования спонтанного излучения позволяет с высокой скоростью менять интенсивность света. Поэтому светоизлучающие диоды и полупроводниковые лазеры на их основе служат источниками света в системах связи.

В полупроводниках с непрямыми переходами имеет место двухступенчатый не прямой переход. Сначала электронный переход осуществляется через виртуальный энергетический уровень, и при сохранении импульса происходит излучение фотона. Затем излучается фонон, уносящий избыточный импульс, и происходит переход к потолку валентной зоны. Вероятность не прямых переходов мала, а время существования спонтанного излучения — большое: от нескольких десятков до нескольких сотен микросекунд. Скорость временных изменений интенсивности света обратно пропорциональна времени жизни носителей. Поэтому полупроводники с непрямыми переходами и с большим временем жизни носителей используются в индикаторных светодиодах, где допускается инерционность излучателя света.

### **1.1.3. Длины волн светового излучения и поглощения. Энергетические зоны**

Если в зону проводимости полупроводника с энергией запрещенной зоны  $E_g$  инжектировать электрон, то в соответствии с вышеизложенным электрон перейдет в валентную зону и возникнет световое излучение. В полупроводниках с непрямыми

переходами, как видно из рис. 1.1, между длиной волны светового излучения и длиной волны, при которой начинается поглощение, существует довольно большая разница. (В табл. П.1.1. приложения приведены значения ширины запрещенной зоны для различных полупроводников.)

## 1.2. Коэффициент преломления

Электроны, ионы, молекулы и другие заряженные частицы, реагирующие на внешнее электрическое поле, смещаясь, образуют различные электрические диполи. Возникает эффект, направленный на уменьшение напряженности внешнего электрического поля. Этот эффект можно описать с помощью понятия о диэлектрической проницаемости вещества. В случае света на быстро меняющееся электрическое поле реагируют главным образом электроны, образуя электрические диполи, вследствие чего возникает преломление.

Связь между диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$  и коэффициентом преломления  $n$  имеет вид

$$\epsilon = \epsilon_0 n^2,$$

где  $\epsilon_0$  — диэлектрическая проницаемость вакуума.

### 1.2.1. Зависимость коэффициента преломления вещества от длины волны

Диэлектрическая проницаемость вещества с увеличением частоты, как показано на рис. 1.3, обычно уменьшается. Это объясняется тем, что в области нижних частот диэлектрическая проницаемость оказывается тесно связанной с различными видами поляризации, включая электрические диполи, образованные смещением тяжелых заряженных частиц: ионов, атомов, вклад которых исчезает в области верхних частот. Тем самым в области частот световых волн весь вклад определяется только диполями, образованными смещением легких электронов. Таким образом, в оптической части спектра основной вклад в коэффициент преломления будет определяться только внешними электронами.

Итак диэлектрическая проницаемость отражает суммарный вклад всех видов поляризации. Если какой-либо вид поляризации, входящий в состав диэлектрической проницаемости, по мере увеличения частоты перестает давать отклик, то, как показано на рис. 1.4, после достижения резонанса этот вид поляризации исчезает и одновременно возникают потери. По этой

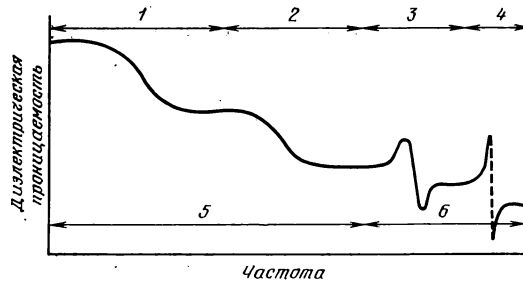


Рис. 1.3. Частотные изменения диэлектрической проницаемости: 1 — межслойная поляризация; 2 — ориентационная поляризация; 3 — атомная поляризация; 4 — электронная поляризация; 5 — область электрических колебаний; б — область световых волн.

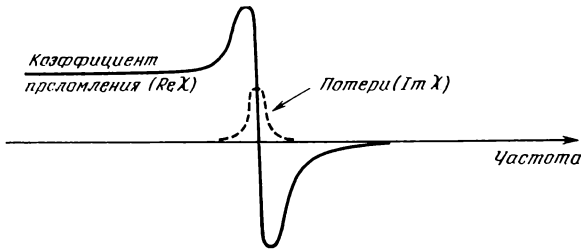


Рис. 1.4. Явление резонанса.

причине диэлектрическая проницаемость или коэффициент преломления становятся комплексными величинами. Между частотными характеристиками вещественной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости существует взаимосвязь, которая называется соотношением Крамера — Кронига. Если комплексную поляризуемость обозначить через  $\chi$ , то получаем

$$\chi = \text{Re } \chi + j \text{Im } \chi.$$

Если ввести сюда угловую частоту  $\omega$  приложенного электрического поля, то

$$\text{Re } \chi(\omega) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\omega' \text{Im } \chi(\omega')}{(\omega'^2 - \omega^2)} d\omega', \quad (1.2)$$

$$\text{Im } \chi(\omega) = -\frac{2\omega}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\text{Re } \chi(\omega')}{(\omega'^2 - \omega^2)} d\omega'.$$

Таким образом, при быстром изменении коэффициента преломления на частоте резонанса обязательно возникают потери.

Для выражения зависимости коэффициента преломления от длины волны в определенной области длин волн воспользуемся основами теории гармонических колебаний, а также эмпирической дисперсионной формулой Друде — Фойгта.

В соответствии с теорией гармонических колебаний коэффициент преломления  $n$  представляется в виде

$$n^2 = 1 + \frac{E_d}{E_0} + \frac{E_d}{E_0^3} E^2 + \frac{\eta}{\pi} E^4 \ln \frac{2E_d^2 - E_g^2 - E^2}{E_g^2 - E^2}, \quad (1.3)$$

где  $\eta$ ,  $E_d$  и  $E_0$  — постоянные вещества (см. далее разд. 1.2.3).

Коэффициент преломления  $n$ , согласно эмпирической формуле Друде — Фойгта, куда входят экспериментальные параметры  $\lambda_i$  ( $i = 1, 2, \dots$ ),  $A_i$ , выражается в виде

$$n^2 = 1 + \frac{Ne^2}{2\pi m} \sum_i \frac{A_i}{\lambda^2 - \lambda_i^2}, \quad (1.4)$$

где  $N$  — число ионов в единице объема,  $e$  и  $m$  — соответственно заряд и масса электрона. На рис. 1.5 приведен пример зависимости коэффициента преломления стекла от длины волны.

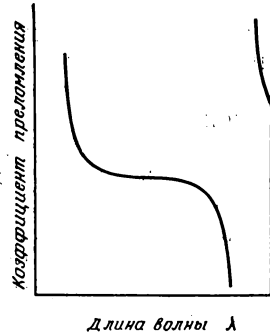


Рис. 1.5. Зависимость коэффициента преломления стекла от длины волны.

### 1.2.2. Коэффициент преломления и двойное лучепреломление в диэлектрике

Величина атомной поляризации, определяющей значение коэффициента преломления стекла и других материалов, в большинстве случаев зависит от движения электронов на внешней оболочке и в первом приближении оказывается пропорциональной размеру атома, другими словами, атомному номеру. Следовательно, можно утверждать, что коэффициент преломления вещества с большим атомным номером оказывается больше коэффициента преломления вещества с небольшим атомным номером. По этой причине коэффициент преломления стекла будет возрастать по мере увеличения значения атомного номера (см. табл. 1.2 приложения). На рис. 1.2 приложения приведены

значения коэффициентов преломления для различных диэлектриков, а на рис. 1.3 приложения — характеристики пропускания различных диэлектриков.

В кубических кристаллах с ярко выраженной изотропностью в расположении атомов коэффициент преломления не обладает направленностью, т. е. не зависит от направления распространения излучения и состояния его поляризации (см. табл. 1.3 приложения). Однако в некоторых кристаллах в зависимости от их структуры поляризуемость оказывается различной в зависимости от направления приложенного электрического поля. Это выражается разностью коэффициента преломления в зависимости от плоскости поляризации. Такие материалы называют двоякопреломляющими кристаллами. Среди двоякопреломляющих кристаллов различают одноосные кристаллы с различным коэффициентом преломления в двух направлениях и двухосные кристаллы с различным коэффициентом преломления в трех направлениях (см. табл. 1.4 приложения). В одноосном кристалле между обыкновенным лучом, перпендикулярным оптической оси кристалла, и необыкновенным лучом, имеющим составляющую в направлении оптической оси, возникает разница не только в коэффициенте преломления, но и в оптической длине пути. В итоге получается двойное изображение. На основе материалов с двойным лучепреломлением можно изготовить поляризационные призмы и другие поляризационные приборы.

Вещества, коэффициент преломления которых не обладает анизотропией, но плоскость поляризации поворачивается при пропускании через них света, называются оптически активными веществами. К ним относятся растворы фруктозы, винной кислоты и др. (см. табл. 1.5 приложения).

### 1.2.3. Коэффициент преломления полупроводников

Как видно из рис. 1.6, *а* и *б*, коэффициент преломления полупроводников в окрестности длины волны  $\lambda_g$  энергетической ширины запрещенной зоны при увеличении  $dn/d\lambda$  и  $\lambda$  падает приблизительно на 10%. Коэффициент преломления на длине волны энергетической ширины запрещенной зоны для большинства кристаллов группы  $A^{III}B^V$  имеет значение порядка  $n=3,5$ . Поскольку на длинах волн короче длины волны энергетической ширины запрещенной зоны сильно возрастает поглощение, то коэффициент преломления представляется в виде комплексной величины.

Если зависимость коэффициента преломления четырехкомпонентного кристалла  $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}/InP$  (выражение после / обозначает состав подложки, а выражение перед / обозначает состав



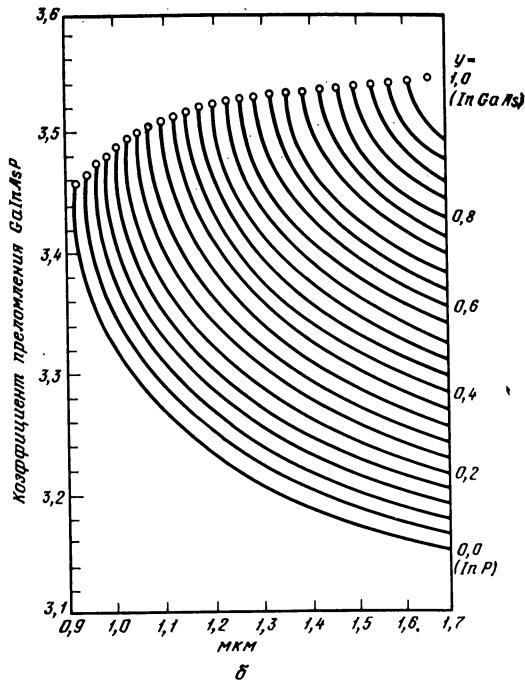
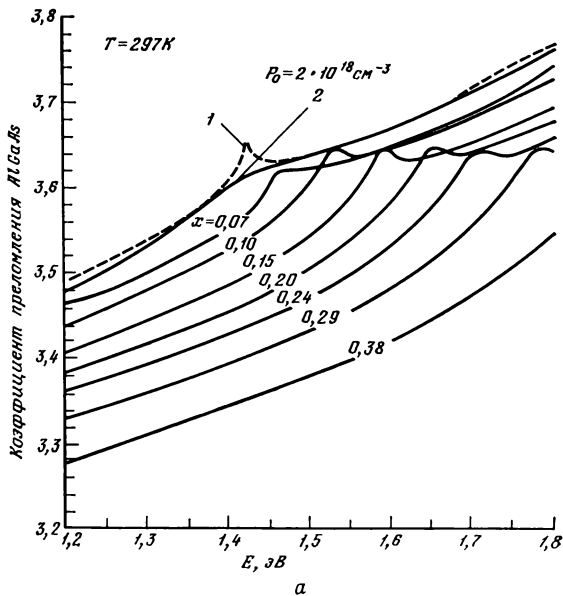
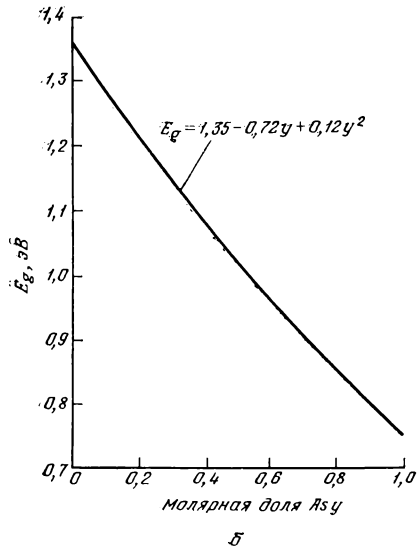
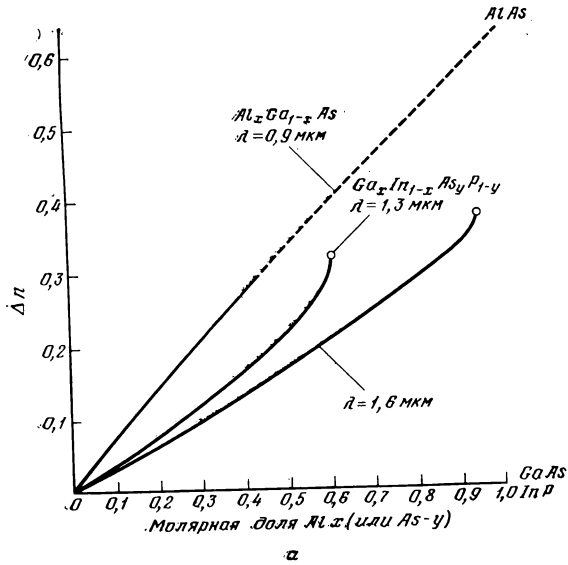


Рис. 1.6. *a* — изменение коэффициента преломления  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  в зависимости от энергии падающих фотонов. Положения небольших пиков соответствуют длинам волн  $\lambda_g$  энергетической ширины запрещенной зоны. 1 — GaAs высокой степени очистки; 2 — GaAs, легированный кремнием; *b* — изменение коэффициента преломления  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$  от длины волны для составов, в которых параметр решетки ( $y=2,197x$ ) согласован с InP. Кружки соответствуют  $\lambda_g$ . Точно указаны значения, меньше  $E_g$  на 1~2 мэВ.



Фиг. 1.7. а — разность коэффициентов преломления GaAs и AlGaAs, а также GaInAsP и InP. Для AlGaAs сплошная линия соответствует спектральной области прямого перехода, пунктирная — области непрямого перехода. Кружки соответствуют значениям  $\lambda_g$ . Показаны значения, меньшие  $E_g$  на 1 мэВ; б — изменение ширины запрещенной зоны  $E_g$  в зависимости от значения  $y$  в Ga<sub>x</sub>In<sub>1-x</sub>As<sub>y</sub>P<sub>1-y</sub> при согласованных параметрах решетки с InP ( $x = 0,467y$ ).

кристалла, выращенного на указанной подложке) от длины волны в интервале длин волн, больших длины волны энергетической ширины запрещенной зоны, выразить, используя формулу (1.3), то между параметрами этой формулы будут иметь место следующие соотношения:

$$\begin{aligned} \eta &= \pi E_d / [2E_d^3 (E_d^3 - E_g^3)], \\ E_d &= 3,391 - 1,652y + 0,863y^2 - 0,123y^3, \\ E_0 &= 28,91 - 9,278y + 5,626y^2. \end{aligned} \quad 1.5)$$

Полученные зависимости представлены на рис. 1.6, б. Далее, на рис. 1.7, а показана разность коэффициентов преломления подложки и выращенного на ней кристалла.

#### 1.2.4. Коэффициент преломления магнетиков

Так как в оптической области спектра магнитный эффект веществ незначителен, то относительную магнитную проницаемость веществ обычно полагают равной единице. Магнитные свойства проявляются в виде эффекта Фарадея. Этот эффект представляет собой вращение плоскости поляризации в результате намагничивания и описывается специальной константой, называемой постоянной Верде (см. раздел 1.4.3).

#### 1.2.5. Коэффициент преломления металлов

Плазменная частота свободных электронов металла лежит в инфракрасной области спектра. В более длинноволновой области спектра имеет место обычное поведение диэлектрической проницаемости и коэффициента преломления. Однако поскольку видимая область спектра соответствует частотам выше плазменной, то под действием свободных электронов одновременно с поглощением во многих случаях проходная диэлектрическая проницаемость ( $n^2 - k^2$ ) оказывается отрицательной (см. табл. 1.6 приложения).

#### 1.2.6. Коэффициент отражения

При нормальном падении света из среды с коэффициентом преломления  $n_1$  в среду с коэффициентом преломления  $n_2$  (рис. 1.8) доля отраженного света  $R$  (коэффициент отражения

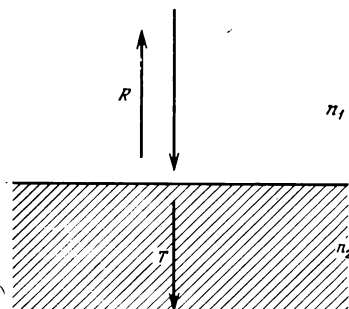


Рис. 1.8. Коэффициент отражения и коэффициент пропускания света.

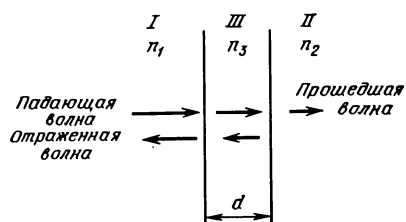


Рис. 1.9. Многократное отражение света.

по отношению к интенсивности света) выражается следующей зависимостью:

$$R = (n_2 - n_1)^2 / (n_2 + n_1)^2. \quad (1.6)$$

Можно сказать, что отражение света при разности в коэффициентах преломления существует из-за разности характеристических сопротивлений  $\sqrt{\mu/\epsilon} = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0}/n$  двух сред на границе раздела. Это отражение, в основе которого лежит различие в коэффициентах преломления, называют также френелевским отражением.

Коэффициент пропускания  $T$  материала толщиной  $d$  с коэффициентом поглощения  $\alpha$  в пренебрежении интерференций на поверхности раздела можно представлять в виде

$$T = (1 - R) \exp(-\alpha d). \quad (1.7)$$

С учетом многократного отражения света под действием интерференции коэффициент отражения будет представляться в виде, отличном от (1.7). Если между средами I и II ввести среду III толщиной  $d$  с коэффициентом преломления  $n_3$  (рис. 1.9), то коэффициент отражения, рассматриваемый со стороны среды II, будет иметь вид

$$R = \frac{\{n_3(n_2 - n_1) + (n_3^2 - n_2n_1) \operatorname{tg}(\beta_3 d)\}^2}{\{n_3(n_2 + n_1) + (n_3^2 + n_2n_1) \operatorname{tg}(\beta_3 d)\}^2}, \quad (1.8)$$

где  $\beta_3 = 2\pi n_3/\lambda$  — постоянная распространения промежуточной среды III. Если толщина промежуточного слоя III равняется четверти длины волны, т. е.  $d = \lambda/4n_3$ , а коэффициент преломления среды III оказывается равным

$$n_3 = \sqrt{n_2n_1}, \quad (1.9)$$

т. е. является средним геометрическим коэффициентов прелом-

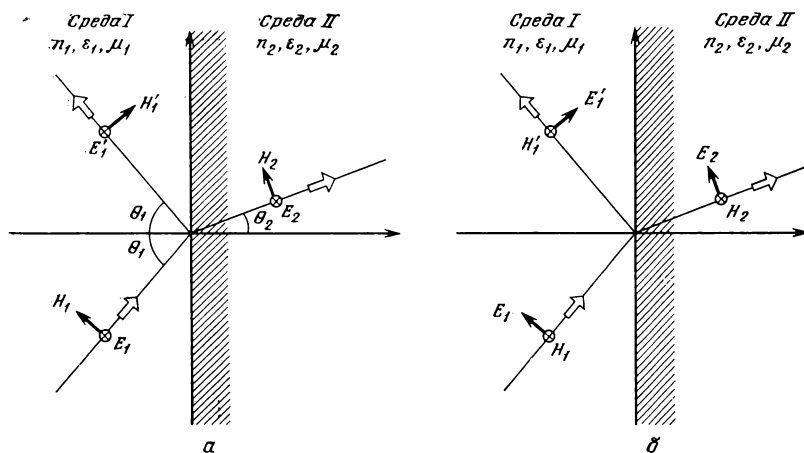


Рис. 1.10. Закон Снелля: а — электрическое поле параллельно поверхности раздела; б — магнитное поле параллельно поверхности раздела.

ления двух соседних сред, то в соответствии с формулой (1.8) коэффициент отражения света окажется равным нулю. Этот эффект используется в просветляющих пленках для снижения торцевого отражения в оптических устройствах.

Как видно из рис. 1.10, при падении света под углом наклона  $\theta_1$  на границу раздела величина отражения зависит от направления плоскости поляризации относительно поверхности. Если через  $R_n$  обозначить коэффициент отражения в случае, когда магнитное поле параллельно поверхности раздела, а через  $R_t$  обозначить коэффициент отражения в случае, когда плоскость поляризации электрического поля параллельна поверхности раздела, то угол преломления  $\theta_2$  в соответствии с законом Снелла будет связан с остальными параметрами следующими соотношениями:

$$\sin \theta_1/n_1 = \sin \theta_2/n_2, \tag{1.10}$$

$$R_n = \left( \frac{\sin \theta_1/n_1 - \sin \theta_2/n_2}{\sin \theta_1/n_1 + \sin \theta_2/n_2} \right)^2, \tag{1.11}$$

$$R_t = \left( \frac{n_1 \sin \theta_1 - n_2 \sin \theta_2}{n_1 \sin \theta_1 + n_2 \sin \theta_2} \right)^2, \tag{1.12}$$

Если угол падения равен

$$\theta_1 = \arctg(n_2/n_1), \tag{1.13}$$

\* Для углов  $\theta_1$  и  $\theta_2$ , определенных согласно рис. 1.10, синусы в формулах (1.11) и (1.12) должны быть заменены на косинусы. — *Прим. ред.*

$R_n$  оказывается равным нулю, т. е. при падении света на границу раздела, поляризованного так, что направление магнитного поля оказывается параллельным поверхности раздела, отражение света становится равным нулю. Этот угол называется углом Брюстера, а окно, в котором отражение света при определенном направлении поляризации становится равным нулю, называется окном Брюстера.

Угол падения, выражаемый формулой

$$\theta_1 = \arcsin(n_2/n_1), \quad (1.14)$$

называется критическим углом полного отражения и имеет смысл при  $n_2 < n_1$ . Луч света, падающий под углом меньше критического, полностью отражается на границе раздела (полное отражение).

В металлах, как было изложено в разд. 1.2.5, коэффициент преломления принимает отрицательное значение, а характеристическое сопротивление металла отличается от характеристического сопротивления воздуха. Вследствие этого возникает отражение от поверхности металла. Его коэффициент преломления сильно меняется в зависимости от длины волны, соответственно меняется и отражение от поверхности металла. В табл. 1.7 приложения приведены спектральные характеристики коэффициента отражения.

### 1.3. Фотопроводимость и фотогальванический эффект

*Фотопроводимость.* При световом облучении полупроводника происходит возбуждение носителей заряда, что приводит к увеличению электропроводности. Это явление, называемое фотопроводимостью или внутренним фотоэффектом, находит применение в оптических датчиках.

*Фотогальванический эффект.* Если светом облучать электрод вакуумной лампы, то возникает эмиссия электронов. Это явление называется фотоэффектом. Чем меньше работа выхода материала, тем сильнее проявляется этот эффект. Если же осветить окрестность поверхности перехода в полупроводнике, то появится ЭДС. Это явление называется фотогальваническим эффектом и связано с тем, что в полупроводнике при поглощении фотонов образуются пары электрон — дырка, которые преодолевают потенциальный барьер в месте перехода. В результате возникает ЭДС. На рис. 1.11 приведены зависимости светочувствительности фотодетекторов\* из различных материалов от длины волны.

\* Приведенный на рисунке параметр называется обнаружительной способностью фотоприемника. — *Прим. ред.*

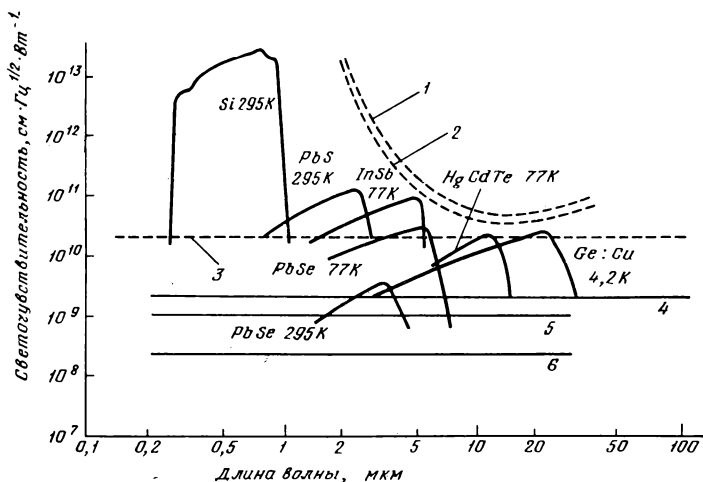


Рис. 1.11. Светочувствительность фотодетекторов, изготовленных из различных материалов. Здесь светочувствительность соответствует выходному напряжению в единичной полосе частот при падении светового потока единичной интенсивности в единицу объема: 1 — идеальный фотогальванический элемент; 2 — идеальный фоторезистор; 3 — идеальный болометр; 4 — элемент Голея; 5 — термопара; 6 — термисторный болометр.

**Пироэлектрический и болометрический эффекты.** При нагревании некоторых материалов возникает электродвижущая сила. Это явление носит название «пироэлектрический эффект». Этот эффект характеризуется высокой чувствительностью по отношению к инфракрасному излучению, однако его слабым местом является большая инерционность. Болометром называется устройство, в котором при изменении температуры происходит сильное изменение электрического сопротивления. Поэтому он применяется в качестве фотодетектора там, где под действием света происходит изменение температуры.

## 1.4. Электрооптический и магнитооптический эффекты

### 1.4.1. Эффект Поккельса, эффект Керра и фотоупругий эффект

При приложении слабого электрического поля кристалл диэлектрика дает линейный отклик. Однако в сильном электрическом поле постоянного тока, а также в интенсивном световом поле возникает нелинейный отклик. Эффектом Поккельса называется явление, при котором коэффициент преломления изме-

няется пропорционально приложенному электрическому полю, а эффектом Керра называется явление, при котором коэффициент преломления изменяется пропорционально квадрату приложенного электрического поля. Относительно электрического поля эффект Погкельса представляет собой нелинейное явление второго порядка, а эффект Керра — нелинейное явление третьего порядка.

Если направление распространения света совпадает с оптической осью кристалла или же перпендикулярно ей, то тензор диэлектрической проницаемости, как показано ниже, содержит только диагональные компоненты

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix}. \quad (1.15)$$

Если на кристалл воздействует электрическое поле постоянно-го или переменного тока, световой поток, давление, магнитное поле или другое какое-либо внешнее возмущение, то тензор диэлектрической проницаемости кристалла немного изменяется. Это изменение имеет вид

$$\delta\varepsilon = \begin{bmatrix} \delta\varepsilon_{xx} & \delta\varepsilon_{xy} & \delta\varepsilon_{xz} \\ \delta\varepsilon_{yx} & \delta\varepsilon_{yy} & \delta\varepsilon_{yz} \\ \delta\varepsilon_{zx} & \delta\varepsilon_{zy} & \delta\varepsilon_{zz} \end{bmatrix}. \quad (1.16)$$

При отсутствии потерь  $\delta\varepsilon_{ii}$  будет представлять собой вещественное число, а  $\delta\varepsilon_{ij} = \delta\varepsilon_{ji}^*$ . Знак \* указывает на комплексно-сопряженное число.

Так как в кристалле с эффектом Погкельса коэффициент преломления изменяется пропорционально приложенному электрическому полю, то

$$\delta\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ii}\varepsilon_{jj} \sum_k \gamma_{ijk} E_k, \quad (1.17)$$

где  $\gamma_{ijk}$  — электрооптический коэффициент первого порядка, а  $E_k$  — составляющая приложенного электрического поля в  $k$ -направлении. Поляризация  $P_i$  при использовании электрического поля  $E_i(\omega)$  в области световых волн выражается формулой

$$P_i = \varepsilon_{ii}\varepsilon_{jj}\gamma_{ijk} E_k E_i(\omega), \quad (1.18)$$

с возможной заменой  $jk$  на  $kj$ .  $\gamma_{ijk}$ , выраженная в виде  $\gamma_{im}$ , называется постоянной Погкельса. При этом предполагается, что

$$\begin{aligned} m = xx = 1, \quad m = yy = 2, \quad m = zz = 3, \quad m = yz = zy = 4, \\ m = xz = zx = 5, \quad m = xy = yx = 6. \end{aligned} \quad (1.19)$$



В табл. 1.8 приложения приведена постоянная Поккельса для различных кристаллов с ярко выраженным электрооптическим эффектом.

Фотоупругий эффект выражается в изменении коэффициента преломления под действием упругой деформации. Если, используя выражение (1.16), через  $p_{ijkl}$  обозначить коэффициент фотоупругости, а через  $S_{kl}$  — составляющую тензора деформации, то изменение диэлектрической проницаемости, связанной с коэффициентом преломления, под действием деформации будет выражаться в виде

$$\delta\epsilon_{ij} = \epsilon_{ii}\epsilon_{jj} \sum_{k,l} p_{ijkl} S_{kl}. \quad (1.20)$$

В табл. 1.9 приложения приведены характеристики различных акустооптических материалов.

#### 1.4.2. Нелинейные оптические эффекты

*Эффект Рамана, эффект Бриллюэна.* Если облучать вещество интенсивным световым пучком, то возникают так называемые стоксова и антистоксова линии, частоты которых на частоту собственных колебаний молекул меньше или больше частоты возбуждающего света. Это явление называется эффектом Рамана или комбинационным рассеянием света. Таким образом, измеряя частоты линий, можно определить частоты собственных колебаний молекул различных веществ, проявляющихся в спектре эффекта Рамана. Для наблюдения вынужденного эффекта Рамана используются лазеры большой мощности.

В результате взаимодействия акустического фонона с оптическим излучением наблюдается рассеяние Бриллюэна\* со смещением на частоту фонона. Вынужденный эффект Бриллюэна возникает под действием достаточно интенсивных световых пучков возбуждающего света.

В веществах с ярко выраженной нелинейностью можно наблюдать так называемый солитон — уединенную волну, устойчиво распространяющуюся внутри рассеивающего вещества с постоянной скоростью. Импульсный сигнал любой формы можно разложить на несколько солитонов и мелких пульсаций.

*Параметрическое взаимодействие.* Используя эффект Поккельса, можно осуществить взаимодействие между двумя сиг-

---

\* Этот эффект был независимо предсказан Л. И. Мандельштамом и Л. Бриллюэном и в нашей литературе носит название «рассеяние Мандельштама — Бриллюэна». — *Прим. ред.*

налами различной частоты или другими словами, так называемое параметрическое взаимодействие.

Если через  $E_k(\omega)$  обозначить составляющую электрического поля световой волны с угловой частотой  $\omega$ , а через  $d_{ijk}$  — нелинейный оптический коэффициент второго порядка, то величина возмущения коэффициента преломления, выражаемая формулой (1.17), будет представляться в следующем виде:

$$\delta\varepsilon_{ij} = \sum_k d_{ijk} E_k(\omega), \quad (1.21)$$

а поляризация —

$$P_i = d_{ijk} E_k(\omega) E_j(\omega). \quad (1.22)$$

При этом оба вышеприведенных выражения инвариантны относительно замены  $jk$  на  $kj$ . По этой причине используем выражение (1.19). Исходя из этого, получаем для поляризации следующее выражение:

$$\begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x^2 \\ E_y^2 \\ E_z^2 \\ 2E_{zy} \\ 2E_{zx} \\ 2E_{xy} \end{bmatrix}, \quad (1.23)$$

где  $[d_{ij}]$  означает  $d$ -тензор. Путем умножения частоты света и генерации разностной и суммарной частот двух световых волн можно осуществить усиление света за счет параметрического эффекта. В табл. 1.10 приложения приведены нелинейные оптические параметры второго порядка различных нелинейных кристаллов.

Для эффективного параметрического взаимодействия необходимо осуществить фазовое согласование между скоростями распространения двух взаимодействующих волн. Для этой цели используется двулучепреломление и фазовое согласование с помощью световода.

### 1.4.3. Магнитооптический эффект, эффект Фарадея

Если свет пропустить через вещество, которое находится в магнитном поле, то в результате эффекта Фарадея возникает вращение плоскости поляризации света. Магнитное вращение плоскости поляризации света, отнесенное к единице напряженности приложенного магнитного поля и приходящееся на еди-

ницу длины вещества, называется постоянной Верде или удельным магнитным вращением.

Если через  $\lambda$  обозначить длину волны, а через  $H$  — напряженность магнитного поля, то, согласно формуле (1.16), получим выражение

$$\delta\varepsilon_{xz} = \delta\varepsilon_{yx}^* = j\lambda VH/\pi, \quad (1.24)$$

где  $V$  — постоянная Верде (знак \* обозначает комплексно-сопряженное число). Если свет распространяется в веществе длиной  $l$  (см) в направлении магнитного поля напряженностью  $H$  (Э), то плоскость поляризации с учетом постоянной Верде будет повернута вправо в соответствии со следующей зависимостью на угол  $\alpha$  (мин).

$$\alpha = V l H. \quad (1.25)$$

В табл. 1.11 приложения приведены постоянные Верде для различных веществ.

В отличие от электрооптического эффекта, который является взаимным, эффект Фарадея является невзаимным, поэтому он может быть использован при создании различных невзаимных оптических устройств, например оптического изолятора, пропускающего свет только в одном направлении. Эффект Фарадея ярко выражен в АИГ — кристалле с добавкой висмута, в котором постоянная Верде достигает значения 3000 град/см/э.

## 1.5. Приложение

Таблица П.1.1

Основные физические характеристики важнейших полупроводниковых материалов

Вещество	Темпер. плавл., °С	Ширина запрещ. зоны, $E_g$ , эВ (0 К)	$\beta = -\frac{\partial E_g}{\partial T}$ , эВ/°С·10 <sup>4</sup>	Подвижность электронов, см <sup>2</sup> /В·с (300 К)	Подвижность дырок $\mu_p$ , см <sup>2</sup> /В·с (300 К)
Ge	959	0,785	+4,0	3600	1800
Si	1410	1,206	+4,2	1500	500
ZnSb	544	0,56			150
CdSb	456	0,48		660	362
Cu <sub>2</sub> O	1236	2,172			50
AlP		≈ 3,0			
AlAs	> 1600	2,2			
AlSb	1060	1,55	+3,5	200	200
GaP	1350	2,32	+5,4	175	75
GaAs	1280	1,53	+4,9	9700	420
GaSb	728	0,81	+3,5	4000	700
InP	1055	1,29	+4,6	3400	50
InAs	942	0,35	+3,5	33000	460
InSb	525	0,17	+2,7	82000	≈ 750
ZnO	1975	3,436			
ZnS (гекс.)	1850	3,91			
ZnSe	≈ 1500	2,83		≈ 100	
ZnTe	1239	2,39		≈ 100	
CdS (гекс.)	1750	2,582	+5,5	210	
CdSe	1350	1,84			
CdTe	1098	1,607		650	60
InSe	660	1,2		≈ 5	
PbS	1114	0,29	-5,0	640	800
PbSe	1065	0,17	-5,0	1200	850
PbTe	905	0,19	-5,0	2100	840
Bi <sub>2</sub> Te <sub>3</sub>	580	0,2	+0,9	800	400

Таблица П.1.2

Физико-химические характеристики оптических стекол, Коэффициент преломления  $n_d$  приведен для длины волны D-линии Na

Стекло	$n_d$	Стекло	$n_d$
SF <sub>2</sub>	1,64769	F <sub>8</sub>	1,59551
SF <sub>6</sub>	1,80518	LF <sub>1</sub>	1,57309
F <sub>2</sub>	1,62004	LF <sub>7</sub>	1,57501

Стекло	$n_d$	Стекло	$n_d$
KF <sub>2</sub>	1,52630	PK <sub>1</sub>	
K <sub>8</sub>	1,51276	BK <sub>1</sub>	1,51009
BaSF <sub>2</sub>	1,66446	BK <sub>7</sub>	1,51680
BaF <sub>10</sub>	1,67003	PKS <sub>1</sub>	1,51728
BaLF <sub>1</sub>		FK <sub>1</sub>	1,47069
BaK <sub>1</sub>	1,57250	FK <sub>3</sub>	1,46450
BaK <sub>2</sub>	1,53996	KzF <sub>1</sub>	1,55115
SSK <sub>2</sub>	1,62230	ZK <sub>1</sub>	1,53315
SK <sub>1</sub>	1,61025	LaF <sub>2</sub>	1,74400
SK <sub>3</sub>	1,60881	LaF <sub>3</sub>	1,71700
SK <sub>5</sub>	1,58913	LaK <sub>10</sub>	1,72000
SK <sub>16</sub>	1,62041		

Таблица П.1.3

**Коэффициент преломления оптически изотропных кристаллов  
(при 20 °С)**

Вещество	Коэффициент преломления
KRS-5 (бромид галлия)	2,395
Канадский бальзам	1,542
Хлорид серебра	2,09
Германий	4,092
Оксид магния	1,7373
Бромид калия	1,5599
Кремний	3,448
Цинковая обманка (ZnS)	2,370
Алмаз	2,4195
Фторид лития (21 °С)	1,3921
Полициклогексилметакрилат (15 °С)	1,507
Полистирол (15 °С)	1,592
Полиметакрилметил	1,491
Иодид калия	1,6666

Таблица П.1.4

**Коэффициент преломления двоякопреломляющих кристаллов  
а. Одноосные кристаллы (20 °С)**

Вещество	Коэффициент преломления $n$	
	обыкновенный луч	необыкновенный луч
Вюртцит (ZnS)	2,356	2,378
Рутил (TiO <sub>2</sub> )	2,616	2,903
Корунд (сапфир, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	1,768	1,760
Лед (0 °С)	1,309	1,313
Красный железняк (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) (670,8 нм)	2,940	3,220
Чилийская селитра (NaNO <sub>3</sub> )	1,5854	1,3369

## Продолжение табл. П.1.4

Вещество	Коэффициент преломления $n$	
	обыкновенный луч	необыкновенный луч
Турмалин	1,669	1,638
Сульфид кадмия	2,506	2,529
Первичный кислый фосфат калия	1,5095	1,4684
Первичный кислый фосфат аммония	1,5242	1,4787
$KD_2PO_4$ (DKDP)	1,51	1,47
$KH_4AsO_4$ (KDA)	1,57	1,47
$PbH_2AsO_4$ (RDA)	1,56	1,52
$BaTiO_2$	2,41	2,36
$K_3Li_2Nb_2O_{15}$ (KLN)	2,277	2,163
$Sr_{0,75}Ba_{0,25}Nb_2O_6$ (SBN)	2,3117	2,2987
$Sr_{0,5}Ba_{0,5}Nb_2O_6$ (SBN)	2,3123	2,3144
$KTa_{0,45}Nb_{0,35}O_3$ (KTN)	2,318	2,277

## б. Двухосные кристаллы (20 °С)

Вещество	Коэффициент преломления		
	$n_1$	$n_2$	$n_3$
Арагонит ( $CaCO_3$ )	1,6862	1,6810	1,5309
Слюда	1,5993	1,5944	1,5612
Сурьмяный блеск (стибнит, $Sb_2S_3$ )	4,460	4,303	3,194
Гипс ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ )	1,5298	1,5228	1,5208
Селитра ( $KNO_3$ )	1,5064	1,5056	1,3346

Таблица П.1.5

## Оптически активные вещества

$[\alpha]_{20}^D$ -отношение угла вращения плоскости поляризации при прохождении D-линии натрия через раствор с температурой 20 °С к числу граммов оптически активного вещества, приходящегося на 1 см<sup>3</sup> раствора,  $c$  — число граммов оптически активного вещества в 100 см<sup>3</sup> раствора,  $\rho$  — число граммов оптически активного вещества в 100 г раствора, т. е. в процентах по весу растворителем во всех случаях является вода.

Вещество	Условие	$\frac{D}{[\alpha]_{20}}$
Фруктоза	$c=10$	$-104^\circ$ (спустя 6 мин после растворения), $-90^\circ$ (спустя 33 мин после растворения)
Фруктоза	$\rho=2-31$	$-91,9-0,11\rho$ (после установления равновесия)
Сахароза	$c=0-65$	$+66,462+0,00870c-0,000235c^2$
Инвертный сахар	$\rho=9-68$	$-19,447-0,06068\rho+0,000221\rho^2$
Глюкоза (правостороннее вращение)	$c=9,1$	$+105,2$ (спустя 5,5 мин после растворения), $+52,5$ (спустя 6 ч после растворения)
Глюкоза (правостороннее вращение)	$\rho=1-18$	$+52,5+0,0188\rho+0,000517\rho^2$ (после установления равновесия)

Вещество	Условие	$D$ [ $\alpha$ ] <sub>20</sub>
Глюкоза (левостороннее $p=4$ вращение)		-94,4 (спустя 7 мин после раство- рения), -51,4 (спустя 7 ч после рас- творения)
Винная кислота	$p=4,7-18$	+14,83-0,149 $p$
Винная кислота	$p=18-36$	+14,849-0,144 $p$
Виннокислый калий	$p=9-55$	+27,62+0,1064 $p$ -0,00108 $p^2$
Сегнетова соль	—	+29,73-0,0078 $c$

Таблица П.1.6

## Коэффициент преломления металлов

а. При длине волны  $\lambda=0,85$  мкм

Металл	Коэффициент преломления		Диэлектрическая проницаемость	
	действительная часть $n$	мнимая часть $k$	действительная часть ( $n^2-k^2$ )	мнимая часть $2nk$
Pt	1,7	4,5	-17	15
Cu	0,12	5,47	-30	1,3
Fe	3,8	4,1	-2,4	31
Sn	1,3	9,2	-83	24
Ag	0,10	5,9	-35	1,2
Au	0,17	5,3	-28	1,8
Ga	2,4	9,2	-79	44
K	0,04	2,6	-6,8	0,21
Cd	2,5	4,2	-11	21
In	1,4	3,5	-10	9,8
Zn	3,1	5,5	-21	34
Al	2,1	7,2	-47	30

б. При длине волны  $\lambda=1,5$  мкм

Металл	Коэффициент преломления		Диэлектрическая проницаемость	
	действительная часть $n$	мнимая часть $k$	действительная часть ( $n^2-k^2$ )	мнимая часть $2nk$
Pt	5	8	-39	80
Cu	0,24	8,9	-79	4,3
Fe	3,8	4,1	-2,4	31
Sn	2,3	9,8	-91	45
Ag	0,30	11	-121	6,6
Au	0,32	8,2	-67	5,3
Ga	2,4	5,8	-28	28
K	0,066	4,7	-22	0,62
Cd	1,5	5,4	-27	16
In	2,5	5,5	-24	28
Zn	2,9	9,8	-88	57
Al	1,8	12	-140	43

Таблица П.1.7

**Коэффициент отражения (в %) от поверхностей металлов различных длин волн**

Длина вол- ны $\lambda$ , мкм	Алюминий	Серебро	Золото	Медь	Родий
0,220	91,5	28,0	27,5	40,4	58,5
0,240	91,9	29,5	31,6	39,0	61,3
0,250	92,1	30,4	33,2	37,0	63,0
0,260	92,2	29,2	35,6	35,5	65,0
0,280	92,3	25,2	37,8	33,0	68,5
0,300	92,3	17,6	37,7	33,6	71,2
0,315	92,4	5,5	37,3	35,5	73,0
0,320	92,4	8,9	37,1	36,3	73,6
0,340	92,5	72,9	36,1	38,5	75,5
0,360	92,5	88,2	36,3	41,5	77,0
0,380	92,5	92,8	37,8	44,5	77,4
0,400	92,4	94,8	38,7	47,5	77,6
0,450	92,2	96,6	38,7	55,2	77,2
0,500	91,8	97,7	47,7	60,0	77,4
0,550	91,6	97,9	81,7	66,9	78,0
0,600	91,1	98,1	91,9	93,3	79,1
0,650	90,3	98,3	95,5	96,6	79,9
0,700	89,9	98,5	97,0	97,5	80,4
0,750	88,0	98,6	97,4	97,9	81,2
0,800	86,3	98,6	97,7	98,1	82,0
0,850	85,8	98,7	97,8	98,3	82,8
0,900	88,9	98,7	98,0	98,4	83,5
0,950	91,8	98,8	98,1	98,4	84,2
1,0	93,9	98,9	98,2	98,5	85,0
1,5	96,8	98,9	98,2	98,5	88,2
2,0	97,2	98,9	98,3	98,6	90,5
3,0	97,5	98,9	98,3	98,6	92,5
4,0	97,6	98,9	98,3	98,7	94,0
5,0	97,7	98,9	98,3	98,7	94,5
6,0	97,7	98,9	98,3	98,7	94,8
7,0	97,8	98,9	98,4	98,7	95,2
8,0	97,9	98,9	98,4	98,7	95,5
9,0	97,9	98,9	98,4	98,8	95,8
10,0	98,0	98,9	98,4	98,8	96,0



Таблица П.1.8

Постоянная Поккельса кристаллов с ярко выраженным электрооптическим эффектом.  $n_o$  и  $n_e$  — коэффициент преломления для обыкновенного и необыкновенного луча; индексы S и T соответствуют частотам электрического поля, много большим (S) и много меньшим (T) частоты собственного акустического резонанса

Кристалл	Точечная группа	Постоянная Поккельса, $\gamma \times 10^{-12}$ , м/В	Коэффициент преломления, $n$	Диапазон пропускаемых длин волн, мкм	Диэлектрическая проницаемость, $\epsilon$	Температура перехода $T_c$ , К
KN <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> (KDP)	$\bar{4}2 m$	$\gamma_{41}^T = 8,6$	$n_o = 1,51$	0,2—1,55	$\epsilon_1^T = 42$	122
		$\gamma_{63}^T = -10,5$	$n_e = 1,47$		$\epsilon_3^T = 21$	
		$\gamma_{63}^S = -9,7$	0,546 (мкм)		$\epsilon_1^S = 44$ $\epsilon_3^T = 21$	
KD <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> (DKDP)	$\bar{4}2 m$	$\gamma_{41}^T = 8,8$	$n_o = 1,51$	0,2—1,55	$\epsilon_3^T = 50$	222
		$\gamma_{63}^T = 26,4$	$n_e = 1,47$		$\epsilon_1^S = 58$	
		$\gamma_{63}^S = 24,0$	(0,546 мкм)		$\epsilon_3^S = 48$	
NH <sub>4</sub> H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> (ADP)	$\bar{4}2 m$	$\gamma_{41}^T = 24,5$	$n_o = 1,53$	0,19—1,5	$\epsilon_1^T = 56$	148
		$\gamma_{63}^T = -8,5$	$n_e = 1,48$		$\epsilon_3^T = 15$	
		$\gamma_{63}^S = -5,5$	(0,546 мкм)		$\epsilon_1^S = 58$ $\epsilon_3^S = 14$	
GaAs	$\bar{4}3 m$	$\gamma_{41}^T = 1,0-1,6$	$n_o = 3,6$	1—16	$\epsilon^S = 13,2$	
		( $\lambda = 4-12$ мкм)	( $\lambda = 0,9$ мкм)			
		$\gamma_{41}^S = 1,2$	$n_o = 3,42$		(1,25 мкм)	

Продолжение табл. П.1.8

Кристалл	Точечная группа	Постоянная Показателя, $\gamma \times 10^{-12}$ , м/В	Коэффициент преломления, $n$	Диапазон пропускаемых длин волн, мкм	Диэлектрическая проницаемость, $\epsilon$	Температура перехода $T_c$ , К
GaP	$\bar{43} m$	$\gamma_{41}^S = -1,07 \div -0,97$ (0,56—3,39 мкм)	$n_o = 3,315$ (0,633 мкм)	0,6—6	$\epsilon^S = 10-12$	
		$\gamma_{41}^T = 4,3$ (0,633 мкм)	$n_o = 3,1$ (0,57 мкм)	0,57—5,2	$\epsilon^T = 10,1$ $\epsilon^S = 10,1$	
ZnTe	$\bar{43} m$	$\gamma_{41}^T = 1,4$ (10,6 мкм)	$n_o = 2,7$ (10,6 мкм)			
		$\gamma_{41}^S = 2,0$ (0,633 мкм)	$n_o = 2,66$ (0,546 мкм)	0,47—46	$\epsilon^T = 9,1$ $\epsilon^S = 9,1$	
ZnSe	$\bar{43} m$	$\gamma_{41}^T = 2,2$ (10,6 мкм)	$n_o = 2,3$ (10,6 мкм)			
		$\gamma_{41}^S = 1,2$ (0,4 мкм)	$n_o = 2,471$ (0,45 мкм)	0,4—12	$\epsilon^T = 16$ $\epsilon^S = 12,5$	
ZnS	$\bar{43} m$	$\gamma_{41}^S = 1,6$ (0,633 мкм)	$n_o = 2,364$ (0,6 мкм)			
		$\gamma_{33}^S = 2,6$ $\gamma_{13}^S = -1,4$ (0,633 мкм)	$n_o = 1,999$ $n_e = 2,015$ (0,6 мкм)		$\epsilon_1^S = 8,15$ $\epsilon_3^S \approx \epsilon_1^S$	

Кристалл	Точечная группа	Постоянная Пожельса $\gamma \times 10^{-12}$ , м/В	Коэффициент преломления, $n$	Диапазон пропускаемых длин волн, мкм	Диэлектрическая проницаемость, $\epsilon$	Температура перехода $T_c$ , К
CdTe	43 <i>m</i>	$\gamma_{41}^T = 6,8$	$n_o = 2,82$	0,9—40	$\epsilon^S = 9,4$	
		(3,39—10,6 МКМ)	(1,3 МКМ)			
CdSe	6 <i>mm</i>	$\gamma_{33}^S = 4,3$	$\gamma_o = 2,452$	0,8—40	$\epsilon_1^T = 9,7$	
		$\gamma_{13}^S = 1,8$	$n_e = 2,471$		$\epsilon_3^T = 10,65$	
		(3,39 МКМ)	(3,39 МКМ)		$\epsilon_1^S = 9,33$	
					$\epsilon_3^S = 10,2$	
CdS	6 <i>mm</i>	$\gamma_{33}^S = 2,4$	$n_o = 2,46$	0,4—17	$\epsilon_1^T = 9,35$	
		$\gamma_{11}^S = 1,1$	$n_e = 2,48$		$\epsilon_3^T = 10,33$	
		(0,633 МКМ)	(0,633 МКМ)		$\epsilon_1^S = 9,02$	
					$\epsilon_3^S = 9,53$	

Продолжение табл. П.1.8

Кристалл	Точечная группа	Постоянная Поукельса $\gamma \times 10^{-12}$ , м/В	Коэффициент преломления, $n$	Диапазон пропускаемых длин волн, мкм	Диэлектрическая проницаемость, $\epsilon$	Температура перехода $T_c$ , К	
CuCl	$\bar{4}3m$	$\gamma_{41}^T = 3,6$	$n_o = 1,958$	0,2~20,5	$\epsilon^S = 7,5$		
		$\gamma_{41}^S = 2,35$	(0,633 мкм)				
		$\gamma_o = 1,90$ (10,0 мкм)					
BaTiO <sub>3</sub>	4 mm	$\gamma_{33}^S = 28$	$n_o = 2,46$	0,5~7	$\epsilon_1^T = 3600$	393	
		$\gamma_{13}^S = 19$	$n_e = 2,40$				
		$\gamma_{51}^T = 1640$	(0,546 мкм)				$\epsilon_1^S = 2300$
		$\gamma_{51}^S = 820$	$n_o = 2,41$				$\epsilon_3^S = 60$
		(0,546 мкм)	$n_e = 2,36$				
		(0,633 мкм)	(0,633 мкм)				
Sr <sub>0,5</sub> Ba <sub>0,5</sub> Nb <sub>2</sub> O <sub>6</sub> (SBN)	4 mm	$\gamma_c^T = 218$	$n_o = 2,3123$		$\epsilon_3 = 450$	428	
		(0,633 мкм)	$n_e = 2,2734$				
KTa <sub>0,45</sub> Nb <sub>0,35</sub> O <sub>3</sub> (КТН)	4 mm	$\gamma_c^T = 450$	(0,633 мкм)	0,5—4,5	$\epsilon_1 = 20000$	~303	
		$\gamma_{51}^T = 50$	(0,633 мкм)				

Таблица П.1.9

Характеристики акустооптических материалов (L — продольная акустическая волна, ⊥ и || — направления поляризации света, соответственно перпендикулярное и параллельное плоскости и проходящей через направление распространения световой и акустической волн, показатель добротности  $M = n^2 p^2 / \rho v$ )

## а. Стекля

Материал	Диапазон пропускания, мкм	Длина волны измерения, мкм	Плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	тип, направление движения	Звуковые волны			Световые волны		Добротность $M$ , $10^{-7}$ ·см <sup>3</sup> ·с/г
					скорость звука, 10 <sup>6</sup> ·см/с	коэффициент затухания дБ/см·Гц <sup>2</sup>	Поляризация	Коэффициент преломления $n$		
Кварцевое стекло	0,2—4,5	0,633	2,20	L	5,96	12	⊥	1,457	8,05	
Теллурическое стекло	0,47—2,7	0,633	5,87	L	3,40	170		2,089	58,1	
Тяжелый флинтглас (SF-4)	0,38—1,8	0,633	3,59	L	3,63		⊥	1,616	1,83	
Тяжелый флинтглас (SF-59)	0,46—2,5	0,633	6,17	L	3,26	1200		1,95	39	
As <sub>12</sub> Se <sub>85</sub> Ge <sub>3</sub>	1—14	1,06	4,40	L	2,52	29	⊥	2,7	418	
As <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	0,6—11	0,633	3,20	L	2,6	170		2,61	762	
		1,153						2,46	619	
As <sub>2</sub> Se <sub>3</sub>	0,9—11	1,153	4,64	L	2,25	280		2,893	1600	
Аморфный Se	1,0—20	1,153	4,27	L	1,83		⊥	2,497	1012	
Вода	0,2—0,9	0,633	0,997	L	1,49	2400	arb*	1,330	37,2	

Продолжение табл. П.1.9

Материал	Звуковые волны		Световые волны		Поларизация	Коэффициент поглощения $\mu$	Добротность $M$ , $10^{-7} \text{ см}^2 \cdot \text{с/г}$
	Диапазон пропускаемых волн, мкм	Длина волны из-мерения, мкм	Плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	тип, направление движения			
<b>6. Вещества с коэффициентом затухания меньше 10</b>							
LiTaO <sub>3</sub>	0,4—5	0,633	7,45	L [001]	6,19	0,1	11,4
LiNbO <sub>3</sub>	0,4—4,5	0,633	4,64	L [100]	6,57	0,15	66,5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,15—6,5	0,633	4,0	S [001]	[3,59]	2,6	9,2
		L [100]		11,0	0,2	1,766	7,7
Y <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub> (YAG)	0,3—5,5	0,633	4,55	L [001]	11,2	0,2	7,32
		L [110]		8,60	0,25	1,83	0,96
Y <sub>3</sub> Ga <sub>5</sub> O <sub>12</sub> (YGG)	1—6	0,633	5,79	S [100]	5,03	1,1	1,1
		L [100]		7,08	1,0	1,93	2,04
Y <sub>3</sub> Fe <sub>5</sub> O <sub>12</sub> (YIG)	0,45—6	0,633	5,17	S [100]	4,06	0,25	2,7
		L [100]		7,21	1,1	2,22	3,94
TiO <sub>2</sub>	0,2—5	1,153	4,23	S [100]	3,85	0,35	2,3
		0,633		L [001]	10,3	0,55	2,584
Алмаз	0,12—4,5	0,633	3,52	L [100]	8,03	[010]	62,5
		0,589		L [100]	17,5	~1,5	2,417
SiO <sub>2</sub>	0,45—7,5	0,589	2,65	L [001]	6,32	2,1	9,11
		0,633		L [100]	5,72	3,0	1,553
Bi <sub>12</sub> SiO <sub>20</sub>	1,5—10	10,6	2,33	L [100]	3,83	arb*	33,8
Si				L [111]	9,85	6,5	206

Материал	Диапазон пропускаемых длин волн, мкм	Длина волны измерения, мкм	Плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Звуковые волны				Световые волны			Добротность $M$ , 10 <sup>-7</sup> см <sup>2</sup> ·с/г
				тип, направление движения	скорость звука, 10 <sup>5</sup> см/с	коэффициент затухания, дБ/см·ГГц	поляризация	коэффициент преломления $n$			
<b>в. Вещества с коэффициентом затухания больше 10</b>											
TeO <sub>2</sub>	0,35—5	0,633 0,633 0,633 0,633	6,00	L [001]	4,20	15	⊥ (d)       Y (=b)       (f)	2,260 2,412 2,260 2,275 2,281 2,183 2,302 2,351 ≈2,351	138 109 68,0 137 78,6 242 162 27 13,6		
Pb <sub>5</sub> ((GeO <sub>4</sub> )VO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	0,52—5,5	0,633	7,15	S [110](c) L [001] L [010]	0,616 3,45 3,11	290 23 19	    	2,260 2,260 2,275	138 109 68,0		
Pb <sub>2</sub> MoO <sub>5</sub>	0,4—5	0,633	7,10	LX(e) LZ(e)	2,96 3,28	25 50	 	2,183 2,302	242 162		
$\alpha$ -ZnS	0,4—12	0,633 0,633	4,09	L [001] S [001]	5,82 2,63	27 130	 (f)	2,351 ≈2,351	27 13,6		
$\beta$ -ZnS	0,4—12	0,633	4,10	L [110]	5,51			2,35	24,3		
Ge	2—20	10,6 10,6	5,33	L [111] S [100]	5,50 3,51	30 9	 arb*	4,00 4,00	10200 1430		
GaAs	1—11	1,153 1,153	5,34	L [110] S [100]	5,15 3,32	30 50	 arb*	3,37 3,37	925 155		
Pb-GeO <sub>3</sub>	0,32—5	0,633	6,54	LX(e)	3,25			2,02	57,5		
Te	5—20	10,6	6,24	L [100]	2,2	~60		4,8	10200		
ADP	0,13—1,7	0,633	1,803	L [100]	6,15			1,58	16,0		
KDP	0,25—1,7	0,633	2,34	S [100](g)	1,83		arb(h)	1,58	3,34		
CdS	0,5—11	0,633	4,82	L [100]	5,50	90		1,51	8,72		
ZnTe	0,55—20	0,633	5,67	L [100]	4,17	130		2,44	51,8		
Pb <sub>5</sub> Ge <sub>3</sub> O <sub>11</sub>	0,5—4	1,153 0,633	7,33	L [100]	3,87	150	    [1010]	2,983 2,765 2,116	201 74,5 42,6 39,9		

\* Произвольная.

## Нелинейные параметры кристаллов

Кристалл	Точечная группа	Длина волны $\lambda$ , мкм	$d_{ij}^{2\omega}$ ( $1/9 \cdot 10^{-22}$ МКС)
GaAs	$\bar{4}3m$	2,12 10,6	$d_{14} = 138$ 107
GaP	$\bar{4}3m$	1,064 1,318 2,12 3,39 10,6	$d_{14} = 80 \pm 14$ 65 62 53 46
GaSb	$\bar{4}3m$	10,6	$d_{14} = 311$
InAs	$\bar{4}3m$	10,6	$d_{14} = 207$
InSb	$\bar{4}3m$	28	$d_{14} = 462$
ZnSe	$\bar{4}3m$	10,6	$d_{14} = 64$
ZnTe	$\bar{4}3m$	10,6	$d_{14} = 72$
CdTe	$\bar{4}3m$	28	$d_{14} = 48$
Bi <sub>4</sub> Ge <sub>3</sub> O <sub>12</sub>	$\bar{4}3m$	1,064	$d_{14}$   = 1,6 $d_{33} = 52$ 44 $d_{31} = -23$   $d_{15}$   = 25
CdSe	6 mm	2,12 10,6	
SiC	6 mm	1,064	
AgI	6 mm	1,318	$d_{33} = -18$ $d_{31} = 11$ $d_{15} = 10$
GaSe	$\bar{6}m2$	10,6	$d_{33} = -21$ $d_{31} = 10$ $d_{22} = 64$
LiIO <sub>3</sub>	6	1,064	$d_{31} = -5,7$ $d_{33} = -5,6$   $d_{14}$   = 0,25
LiNbO <sub>3</sub>	3 m	1,06	$d_{31} = -4,7$ $d_{33} = -27$ $d_{22} = 3,2$
LiTaO <sub>3</sub>	3 m	1,058	$d_{31} = -1,4$ $d_{33} = -21$ $d_{22} = 2,2$
Ag <sub>3</sub> AsS <sub>3</sub> (прустит)	3 m	10,6 10,6	$d_{31}$   = 14 $d_{22} = 22$
$\alpha$ -кварц (SiO <sub>2</sub> )	3 m	1,064	$d_{11} = 0,4$ $d_{14} = -0,0036$
Te	3 m	10,6 28	$d_{11}$   = 733   $d_{11}$   = 454
HgS	3 m	10,6 1,32	$d_{11}$   = 40   $d_{11}$   = 56
Se	3 m	10,6	$d_{11}$   = 77



Кристаллы	Точечная группа	Длина вол-ны $\lambda$ , мкм	$d_{ijk}^{2\omega}$ (1/9·10 <sup>-22</sup> МКС)
AgGaSe <sub>2</sub>	$\bar{4}2 m$	2,12 10,6	$ d_{36}  = 54$ $ d_{38}  = 46$
CdGeAs <sub>2</sub>	$\bar{4}2 m$	10,6	$ d_{36}  = 280$
CdGeP <sub>2</sub>	$\bar{4}2 m$	10,6	$ d_{36}  = 129$
ZnSiAs <sub>2</sub>	$\bar{4}2 m$	10,6	$ d_{36}  = 87$
ZnGeP <sub>2</sub>	$\bar{4}2 m$	10,6	$d_{14} = 88$
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> (KDP)	$\bar{4}2 m$	1,318 0,6328 0,6943 1,06 1,15	$d_{36} = 0,48$ 0,57 0,56 0,50 0,49
NH <sub>4</sub> H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> (ADP)	$\bar{4}2 m$	1,064 0,6328 0,6943 1,318	$ d_{36}  = 0,61$ 0,69 0,68 0,57
BaTiO <sub>3</sub>	4 mm	1,058	$d_{33} = -7,03$ $d_{31} = -18$ $d_{15} = -18$
PbTiO <sub>3</sub>	4 mm	1,064	$ d_{15}  = 41,7 \pm 0,6$ $ d_{31}  = 47,1 \pm 0,3$ $ d_{33}  = 9,3 \pm 0,2$
Sr <sub>0,5</sub> Ba <sub>0,5</sub> Nb <sub>2</sub> O <sub>6</sub> (SBN)	4 mm	1,064	$ d_{31}  = 5,3 \pm 0,5$ $ d_{33}  = 14,1$ $ d_{15}  = 7,5$
Ba <sub>2</sub> NaNb <sub>5</sub> O <sub>15</sub>	4	1,064	$d_{31} = -16$ $d_{32} = -16$ $d_{33} = -22$ $d_{15} = -16$ $d_{24} = -15$
KNbO <sub>3</sub>	4	1,064	$ d_{31}  = 12$ $ d_{32}  = 14$ $ d_{33}  = 22$ $ d_{15}  = 13$ $ d_{24}  = 14$
$\alpha$ -HIO <sub>3</sub>	222	1,064	$ d_{14}  = 6,6$

## Постоянная Верде V ряда веществ, мин/см·Э

Вещество	V	Вещество	V
<b>Газы при 0 °С и давлении 760 мм рт. ст. <math>\lambda=546,1</math> нм</b>		<b>Жидкости при 20 °С <math>\lambda=589,3</math> нм</b>	
Воздух	$6,27 \cdot 10^{-6}$	Ацетон	0,0113
Кислород	$6,046 \cdot 10^{-6}$	Метанол	0,0093
Азот	$7,051 \cdot 10^{-6}$	Этанол	0,0112
Водород	$7,056 \cdot 10^{-6}$	Хлороформ	0,0164
Углекислый газ	$10,52 \cdot 10^{-6}$	Дисульфид углерода	0,0426
Метан	$19,22 \cdot 10^{-6}$	Вода	0,0131
Пропан	$39,83 \cdot 10^{-6}$		
Гелий	$0,531 \cdot 10^{-6}$		
<b>Твердые тела при 20 °С, <math>\lambda=589,3</math> нм; *: <math>\lambda=546,1</math> нм</b>			
Хлорид калия (KCl)	0,0328*	Тяжелый флинтглас	
Хлорид натрия (NaCl)	0,0345*	( $n_d=1,920$ )	0,1060
Хлористая медь (CuCl)	0,20*	Алмаз	0,0233
Стекла:		Кварц (параллельно кри- сталлическим осям)	0,01952
кронглас ( $n_d=1,519$ )	0,0190	Флюорит	0,00897
флинтглас ( $n_d=1,623$ )	0,0520	Кварцевое стекло (25 °С)	0,01731*
		Сульфид цинка (ZnS)	0,226

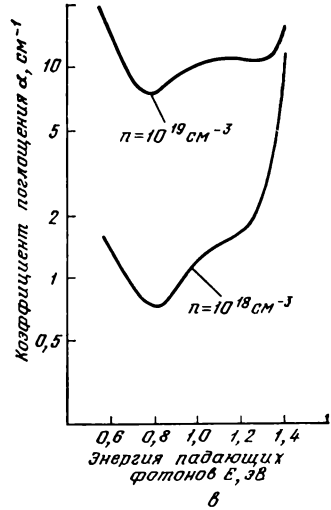
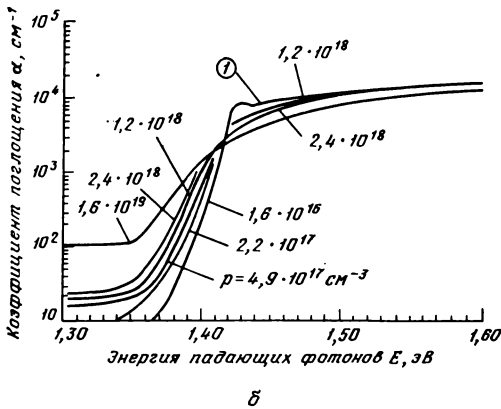
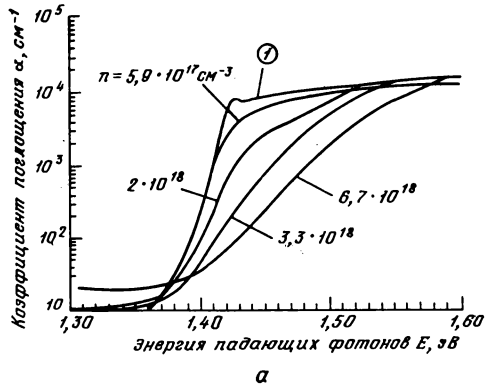


Рис. П.1.1. Зависимость оптических потерь на поглощение от концентрации примеси в полупроводниках.  $n$ ,  $p$  означают соответственно концентрацию доноров и акцепторов. а —  $n$ -GaAs ( $T=297$  К); б —  $p$ -GaAs ( $T=297$  К); в —  $n$ -InP ( $T=77$  К); 1 — высокая степень очистки.

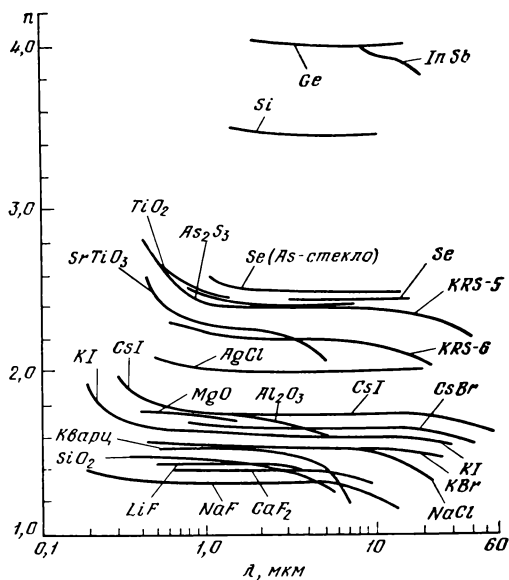


Рис. П1.2. Зависимость коэффициента преломления  $n$  от длины волны  $\lambda$  в основных оптических материалах.

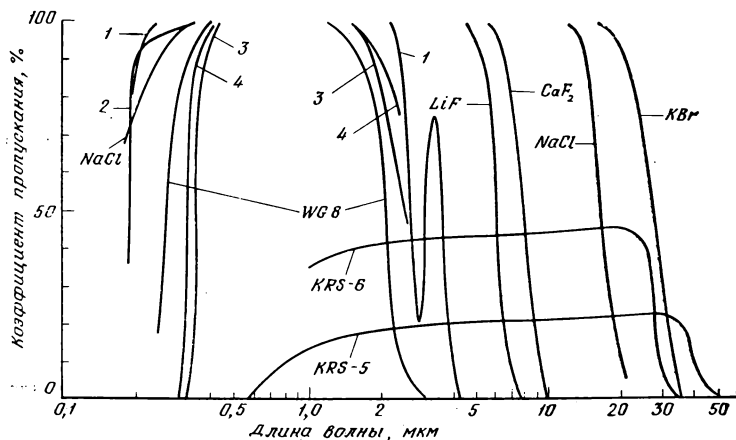


Рис. П1.3. Спектральный коэффициент пропускания (приведен для оптических материалов толщиной 1 см без учета потерь, обусловленных поверхностным отражением): 1 — кристаллический кварц; 2 — дистиллированная вода; 3 — флинтглас; 4 — кронглас; WG8 — бесцветное стекло фирмы «Шотт»; KRS-5 — бромид таллия; KRS-6 — бромхлорид таллия.

## Оптоэлектронные приборы

При взаимодействии света и электрона в полупроводниках электрон, поглощая световую энергию, переходит из состояния с низким энергетическим уровнем в состояние с высоким энергетическим уровнем. При излучении света электрон переходит на более низкий энергетический уровень. Эти явления используются в фотоприемных и светоизлучающих приборах путем преобразования световой (оптической) энергии в электрическую и наоборот. При инжекции тока, а также для получения фототока и усиления используется *pn*-переход. Такие полупроводниковые структуры с *pn*-переходом позволяют создать простые приборы, обладающие высокими функциональными характеристиками.

Из множества оптоэлектронных приборов в данной главе рассмотрим такие, которые в последнее время приобретают первостепенное значение, а именно полупроводниковые лазеры, светоизлучающие диоды (СИД), фотодиоды и лавинные фотодиоды.

### 2.1. Классификация и принцип действия оптоэлектронных приборов

#### 2.1.1. Полупроводниковые лазеры и СИД

Существуют следующие разновидности светоизлучателей:

- 1) полупроводниковые лазеры;
- 2) СИД, которые в зависимости от назначения подразделяются на СИД, используемые в устройствах оптической связи, индикаторные СИД и СИД большой излучаемой мощности;
- 3) электролюминесцентные ячейки.

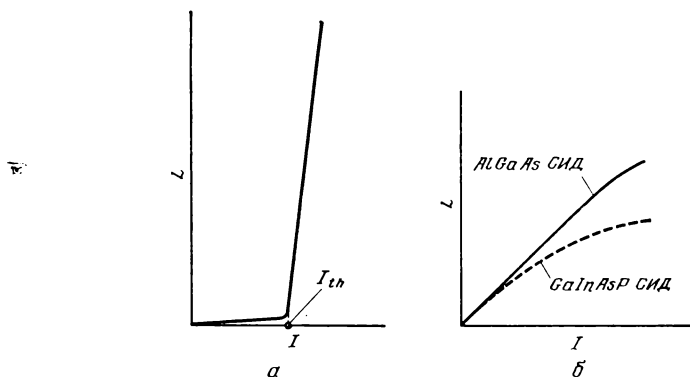


Рис. 2.1. Зависимость мощности оптического излучения  $L$  на выходе полупроводникового лазера (а) и СИД (б) от тока.

Полупроводниковые лазеры и СИД представляют собой оптоэлектронные приборы, в которых осуществляется преобразование электрической энергии в оптическую (световую). В основе этого процесса лежит излучение света, обусловленное электронным переходом из зоны проводимости полупроводника в валентную зону. Для возбуждения электронов в зону проводимости, или, как говорят, для накачки, используется инжекция носителей. С этой целью обычно формируют  $pn$ -переход, для чего в  $n$ -область вводят больше донорной примеси, а в  $p$ -область больше акцепторной. С помощью инжекции обеспечивается создание неравновесных носителей заряда, что обеспечивает генерацию оптического излучения в  $pn$ -переходе полупроводника. Получение оптической энергии на выходе оптоэлектронных устройств оказывается очень простым: для этого достаточно подать напряжение на вход прибора и обеспечить протекание по нему тока. Путем изменения тока инжекции можно менять оптическую энергию на выходе прибора, т. е. простыми средствами осуществлять оптическую модуляцию. Этот способ называется прямой (непосредственной) модуляцией. Простота осуществления оптической модуляции является одной из причин использования полупроводниковых лазеров и СИД в системах оптической связи.

На рис. 2.1 приведены типичные примеры зависимости между током и мощностью оптического излучения на выходе оптоэлектронного прибора.

Полупроводниковый лазер является «пороговым прибором». Как видно из рис. 2.1, а, если увеличивать ток инжекции, то при превышении некоторого порогового значения  $I_{th}$  возникает резко линейное увеличение оптического выхода лазера. В окрест-

ности порогового значения тока  $I_{th}$  наблюдается качественное изменение процесса: медленный рост вынужденного излучения переходит в режим генерации излучения. При  $I < I_{th}$  излучение лазера подобно свету обычной электрической лампы и представляет собой сумму случайных световых потоков или некогерентный свет. В области  $I > I_{th}$  при переходе в режим генерации происходит упорядочение фазы и возникает когерентное световое излучение. СИД конструируют таким образом, чтобы в них не возникал режим генерации. Поэтому в них, как показано на рис. 2,1, б, по мере увеличения тока инжекции происходит монотонное нарастание оптического выхода.

Различие характеристик оптического выхода полупроводниковых лазеров и светоизлучающих диодов обусловлено лежащими в их основе различиями процессов излучательной рекомбинации. При излучательной рекомбинации, как было изложено в гл. 1, имеют место процесс вынужденного излучения и процесс спонтанного излучения. При вынужденном излучении рекомбинация возникает в результате облучения светом. При этом вероятность рекомбинации пропорциональна интенсивности падающего света, а частота и фаза излучаемого света равны частоте и фазе падающего света, т. е. возникает усиление света.

Полупроводниковый лазер, так же как обычный лазер, представляет собой лазерный резонатор с помещенной внутри него активной средой. Поскольку коэффициент преломления полупроводника большой, то плоскости спайности лазерного кристалла служат отражающими зеркалами резонатора. Слабый свет, возникающий в лазере под действием спонтанных переходов, усиливается активной средой при многократном отражении от резонаторных зеркал, расположенных в торцах резонатора. В конечном счете образуется лавина вынужденно испущенных фотонов, которая и образует лазерный луч. Это режим генерации излучения. Лазерная генерация возникает тогда, когда оптическое усиление компенсирует потери энергии внутри резонатора, складывающиеся из потерь в активной среде и потерь на отражение. Это соответствует пороговому току инжекции  $I_{th}$ . При дальнейшем увеличении тока инжекции усиление остается почти неизменным и равным пороговому усилению. Значение тока инжекции, превышающее  $I_{th}$ , сопровождается резким увеличением выхода оптического излучения из лазера, что видно из рис. 2.1, а.

В отличие от этого в СИД используется спонтанное излучение. В этом случае инжектированные в область светового излучения носители излучают свет с различной случайной фазой, т. е. генерируется некогерентный свет. Насыщение оптического выхода, показанное на рис. 2.1, б, связано с выделением теп-

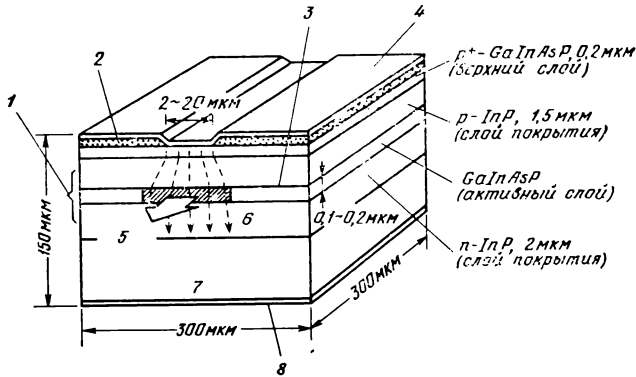


Рис. 2.2. Структура контактного полоскового лазера на  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}/\text{InP}$ : 1 — двойная гетероструктура; 2 — диэлектрик; 3 — поверхность  $pn$ -перехода; 4 — контакт  $\oplus$ ; 5 — оптический выход; 6 — ток; 7 —  $n$ - $\text{InP}$ -подложка; 8 — контакт  $\ominus$ .

ла, т. е. по мере увеличения концентрации носителей в области светового излучения падает светоотдача диода.

На рис. 2.2 показана конструкция полупроводникового лазера, носящего название контактного полоскового лазера, в котором ток инжекции ограничен в  $pn$ -переходе сравнительно узкой областью порядка  $2 \sim 20$  мкм. Лазеры такой конструкции изготавливаются методом эпитаксиального наращивания полупроводниковых слоев на подложке из арсенида галлия  $\text{GaAs}$  или фосфида индия  $\text{InP}$ . Первые полупроводниковые лазеры были контактными с общей шириной поверхности порядка 100 мкм. Создание лазеров полосковой конструкции позволило уменьшить величину рабочего тока. Например, полоске шириной 10 мкм, длиной — 300 мкм соответствует пороговое значение тока 100 мА, т. е. в 10 раз меньше, чем в прежних контактных лазерах. Поперечная мода имеет одnogорбое распределение, и нестабильная генерация, наблюдаемая в контактных лазерах, в полосковых лазерах подавляется. Однако при ширине полоски порядка 10 мкм и менее имеет место значительное уширение (расползание) тока в поперечном направлении.

Как видно из рис. 2.2, лазерный свет излучается из обоих торцов в направлении, перпендикулярном плоскости стороны. Торцы представляют собой плоскости спайности. Коэффициент отражения  $R$  связан с коэффициентом преломления лазерного кристалла соотношением  $R = (n-1)^2 / (n+1)^2$  и имеет значение порядка 30%.

Область светового излучения полупроводниковых лазеров изготавливается из полупроводников с прямыми переходами, об-



ладающими большой вероятностью перехода и высокой светоотдачей.

В электролюминесцентных ячейках световое излучение возникает при приложении электрического поля к люминофору; они применяются только в индикаторных панелях и в данной главе специально не рассматриваются.

### 2.1.2. Фотоприемные устройства

Фотоприемники представляют собой приборы, в которых оптическая (световая) энергия преобразуется в электрическую. Существуют следующие разновидности фотоприемников: фотодиоды, солнечные батареи, лавинные фотодиоды, фототранзисторы, фоторезисторы.

Принцип действия этих фотоприемников заключается в использовании: 1) фотогальванического эффекта; 2) фоторезистивного эффекта (внутреннего фотоэффекта); 3) внутреннего усиления.

Фотогальванический эффект используется в солнечных батареях, в которых под действием светового облучения на границах  $pn$ -перехода возникает ЭДС. Как видно из рис. 2.3, электроны и дырки, образовавшиеся при поглощении света, под действием градиента потенциала в  $pn$ -переходе, разделяясь, собираются в  $n$ - и  $p$ -областях. В фотодиодах между областями  $p$ - и  $n$ -типов вводят промежуточную  $i$ -область с собственной проводимостью. При достаточно больших обратных напряжениях смещения сильное и почти однородное электрическое поле распространяется на всю  $i$ -область. Поскольку эта область может быть сделана достаточно широкой, то на основе такой структуры можно изготовить быстродействующие фотоприемники типа  $pin$ -фотодиода.

Внутреннее усиление наблюдается в лавинных фотодиодах и фототранзисторах. Лавинное усиление представляет собой явление, при котором в обедненном слое обратносмещенного  $pn$ -перехода под действием сильного электрического поля фотовозбужденные носители в результате повторяющейся ударной ионизации создают новые пары электрон — дырка, т. е. их число лавинно умножается. Это явление возникает при большом напряжении обратного смещения, при этом напряжение, прикладываемое к лавинному фотодиоду, обычно возрастает. В фототранзисторах применяется световое облучение базовой области и усиление фототока осуществляют в виде усиления тока базы. В фоторезисторах путем фотовозбуждения достигается увеличение числа свободных носителей и тем самым модулируется проводимость полупроводников.

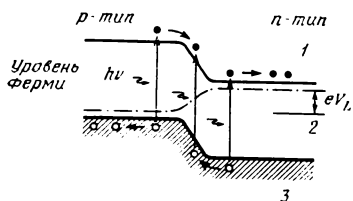


Рис. 2.3. Принцип действия фотогальванического эффекта: 1 — зона проводимости, 2 — фото-ЭДС; 3 — валентная зона.

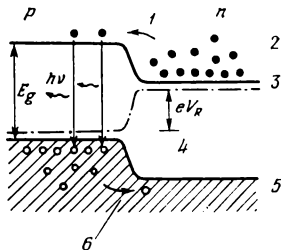


Рис. 2.4. Инжекция носителей в  $pn$ -переход: 1 — инжекция электронов; 2 — зона проводимости; 3 — уровень Ферми; 4 — приложенное напряжение; 5 — валентная зона; 6 — инжекция дырок.

В данной главе будут рассмотрены только фотодиоды и лазерные фотодиоды.

Но сначала познакомимся с полупроводниковыми лазерами.

## 2.2. Полупроводниковые лазеры

### 2.2.1. Гомоструктурный переход и полупроводниковые лазеры

Если к  $pn$ -переходу полупроводника приложить прямое напряжение (напряжение в прямом направлении)  $V_R$ , то, как показано на рис. 2.4, в  $p$ -область будет происходить инжекция электронов, а в  $n$ -область — инжекция дырок. Эти инжектированные неосновные носители, встречаясь с основными носителями, будут рекомбинировать, излучая свет длиной волны, соответствующей энергетической ширине запрещенной зоны  $E_g$ . Так как в этом случае концентрация неосновных носителей уменьшается в  $\exp(-x/L_d)$  раз (где  $L_d$  — диффузионная длина), то ширина области светового излучения достигает порядка диффузионной длины, т. е. нескольких микрометров. Поскольку диффузионная длина электрона много больше диффузионной длины дырки, то световое излучение возникает в основном в  $p$ -области. Поэтому прибор, использующий  $pn$ -переход полупроводника шириной, равной ширине запрещенной зоны, называют полупроводниковым лазером с гомоструктурным переходом.

Работа полупроводникового лазера на кристалле из GaAs впервые наблюдалась в 1962 г. Это был гомолазер, изготовленный при помощи диффузии акцепторной примеси в кристалле GaAs. В этой конструкции инжектированные носители занимают область ограниченную диффузионной длиной, малую по

сравнению с областью распространения светоизлучения в кристалле. Вследствие чего эффективное взаимодействие со светом затрудняется. Пороговое значение плотности тока оказывается высоким (более  $50 \text{ кА/см}^2$ ), и из-за выделения тепла на постоянном токе при комнатной температуре лазерная генерация не возникает. Такой лазер обычно не работает в непрерывном режиме.

Практическая реализация непрерывного режима работы полупроводникового лазера при комнатной температуре впервые была достигнута в США в «Белл лабораториз» докторами И. Хаяси и М. Б. Панишем в 1970 г. Был изготовлен лазер на двойной гетероструктуре  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  и  $\text{GaAs}$  с различной шириной запрещенной зоны, что позволило уменьшить пороговую плотность тока при комнатной температуре до  $1,6 \text{ кА/см}^2$ \*).

Одновременно с этим достижением удалось снизить потери при передаче света по оптическому волокну с нескольких сот дБ/км до 20 дБ/км. Поскольку диапазон длин волн излучения  $\text{AlGaAs/GaAs}$ -лазера около 0,8 мкм совпадает с диапазоном длин волн высокоэффективного кремниевого фотоприемника излучения, то неожиданно стала реальной задача практической реализации системы оптической связи, объединяющей в себе полупроводниковые лазеры, оптическое волокно и кремниевые фотоприемники. В настоящее время многие исследовательские центры в различных странах мира ведут исследования и разработки полупроводниковых лазерных источников светового излучения для оптической связи, результат которых уже сейчас отмечен стремительным прогрессом в этой области. В последнее время помимо оптической связи ведутся многочисленные исследования лазеров видимой области спектра для лазерных запоминающих устройств на дисках, лазерных печатающих устройств и т. д.

### 2.2.2. Лазеры на двойной гетероструктуре

Двойная гетероструктура, как это видно на примере  $\text{GaInAsP/InP}$ -лазера, показанного на рис. 2.2, представляет собой два слоя  $\text{GaInP}$  с узкой шириной запрещенной зоны, разделенных слоем  $\text{InP}$  с большей шириной запрещенной зоны. Лазерное усиление возникает в  $\text{GaInAsP}$ -слое, который назы-

---

\* Снижение порогового тока в гетеролазерах достигается за счет каналирования инжектированных носителей в узкой области, ограниченной потенциальными барьерами гетероструктуры, а также за счет каналирования спонтанного излучения в этой же области под действием волноводного эффекта, возникающего из-за различия в показателях преломления материалов гетероструктуры (см. далее раздел 2.2.2). — *Прим. ред.*

вается активным слоем (активной средой), а InP-слой называется обычно слоем покрытия (материалом покрытия). Если в активном слое четырехкомпонентного  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$  полупроводникового кристалла путем изменения соотношения Ga ( $x$ ) и As ( $y$ ) осуществить согласование постоянной решетки с кристаллом InP, то оказывается возможным в широких пределах изменять ширину запрещенной зоны  $E_g$ . Длина волны излучения полупроводникового лазера  $\lambda$  приближенно определяется шириной запрещенной зоны  $E_g$  кристалла активного слоя

$$\lambda \text{ (мкм)} = \frac{1,2398}{E_g \text{ (эВ)}}. \quad (2.1)$$

Длины волн излучения GaInAsP/InP-лазера, приведенного на рис. 2.2, лежат в области 1,3—1,67 мкм.

Так как в  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ -лазере при увеличении составляющей алюминия  $x$  увеличивается ширина запрещенной зоны, то слой AlGaAs с небольшим значением  $x$  берут в качестве активного слоя, а слой AlGaAs с большим значением  $x$  — в качестве слоя покрытия. Длины волн излучения лазера по мере увеличения значения  $x$  активного слоя смещаются в область коротких волн. Однако поскольку при  $x \geq 0,45$  запрещенная зона становится не прямой, то лазерное излучение прекращается. Так как обычно в области длин волн, меньших 0,8 мкм, возникает ухудшение характеристик, то практической областью длин волн излучения лазера считается область длин волн 0,75—0,88 мкм.

В примере, приведенном на рис. 2.2, активный слой GaInAsP расположен между поверхностями гетероперехода, состоящего из InP. На рис. 2.5 показана структура энергетических зон. Так как на поверхности гетероперехода возникает гетеробарьер с энергией  $\Delta E$ , равной разности энергетической ширины запрещенных зон, то этот гетеропереход будет препятствовать проникновению инжектированных носителей в слой покрытия. Это явление называется эффектом удержания носителей.

Обычно коэффициент преломления полупроводников, как уже говорилось в разделе 1.2.3, для света с энергией, меньшей энергетической ширины запрещенной зоны, монотонно уменьшается с увеличением длины волны. Поэтому, если рассматривать длины волн излучения лазера, коэффициент преломления в слое покрытия с большой шириной запрещенной зоны оказывается меньше коэффициента преломления активного слоя и на границах гетероперехода возникает разность  $\Delta n$  в коэффициенте преломления (рис. 2.5, б). Так как свет концентрируется в месте с более высоким коэффициентом преломления, то, как видно из рис. 2.5, в, он будет заключен внутри активного слоя. Это явление называется эффектом удержания света.

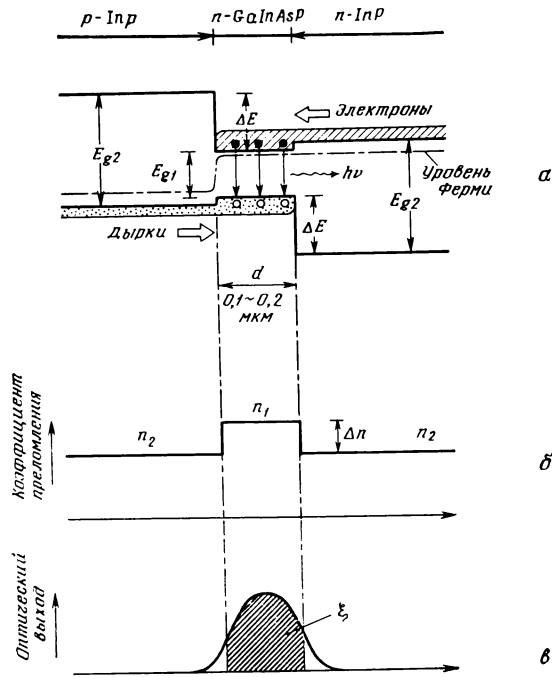


Рис. 2.5. Структура энергетических зон гетероперехода: а — инжекция электронов и дырок в активный слой; б — распределение коэффициента преломления; в — распределение светового излучения;

Поскольку при использовании двойной гетероструктуры свет и носители удерживаются в активном слое и эффективно взаимодействуют, то оказывается возможным получение полупроводникового лазера с низким пороговым значением тока.

При низком гетеробарьере из-за проникновения носителей возникает ухудшение температурной характеристики порогового значения тока. В AlGaAs/GaAs-лазере необходимо иметь значение  $\Delta E > 0,3$  эВ.

Структуру, в которой гетеропереход имеется только с одной стороны активного слоя, называют просто гетероструктурой.

### 2.2.3. Порог генерации и КПД полупроводникового лазера

*Handwritten notes:* + ...

Выведем формулы для порога генерации и КПД полупроводникового лазера. Так как активный слой представляет собой диэлектрический световод, то толщина активного слоя  $d$ , при ко-

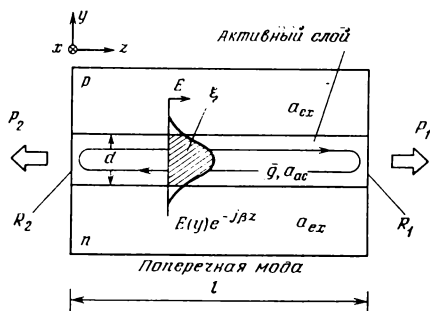


Рис. 2.6. Резонатор полупроводникового лазера:

торой имеет место распространение только одной поперечной моды, должна удовлетворять условию

$$d \leq \frac{\lambda}{2\sqrt{2\Delta} \cdot n_1}, \quad (2.2)$$

где  $\Delta$  — относительная разность коэффициентов преломления  $\Delta = (n_1^2 - n_2^2) / (2n_1^2)$ . Значение  $d$ , при которой имеет место только одна поперечная мода, в случае  $\lambda = 1,55$  мкм,  $n_1 = 3,54$ ,  $\Delta = 0,1$  оказывается менее 0,5 мкм.

Условие возникновения генерации оптического лазера является условием равенства оптического усиления потерям энергии при однократном прохождении света туда и обратно между двумя отражающими гранями резонатора (рис. 2,6) и представляется в виде

$$\bar{g}_{th} \cdot \xi = \alpha + \frac{1}{l} \ln \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2}}, \quad (2.3)$$

где  $\bar{g}_{th}$  — коэффициент усиления активного слоя, необходимый для лазерной генерации,  $\xi$  — коэффициент удержания света, представляющий собой отношение энергии, заключенной внутри активного слоя, к оптическому выходу поперечной моды. Произведение  $\bar{g} \cdot \xi$  называется коэффициентом усиления моды.  $l$  — длина резонатора,  $R_1$  и  $R_2$  — коэффициенты отражения от граней резонатора,  $\alpha$  — потери на поглощение внутри резонатора.  $(1/l) \ln 1/\sqrt{R_1 R_2}$  называются потерями на отражение и соответствуют величине оптического выхода лазера во внешнее пространство. Используя коэффициент поглощения  $\alpha_{ac}$  активного слоя и коэффициент поглощения  $\alpha_{ex}$  слоя покрытия, получаем следующее значение для потерь моды:

$$\alpha = \alpha_{ac} \cdot \xi + \alpha_{ex} (1 - \xi). \quad (2.4)$$

Коэффициент усиления  $\bar{g}$  возрастает пропорционально концентрации носителей  $N$  в активном слое и, если коэффициент пропорциональности обозначить через  $A_0$ , имеет вид

$$\bar{g} = A_0 (N - N_g) = A_0 \cdot N - \alpha_{in}, \quad (2.5)$$

где  $N_g$  — концентрация носителей, при которой гасится поглощение между зонами и возникает усиление. В данном случае она входит в состав  $\alpha_{in}$ .

Если время жизни носителей обозначить через  $\tau_s$ , то концентрация носителей  $N$  в активном слое будет выражаться следующей формулой:

$$N = \frac{\tau_s}{e \cdot d} J, \quad (2.6)$$

где  $J$  — плотность тока инжекции, а  $e$  — заряд электрона.

В соответствии с изложенным ранее в разд. 1.1  $\tau_s$  обратно пропорционально  $N$ , а именно  $\tau_s = (B_{eff} N)^{-1}$ . Принимая это во внимание, на основании формул (2.5) и (2.6) получаем следующее выражение:

$$\bar{g} = \frac{A_0}{\sqrt{e B_{eff}}} \sqrt{\frac{J}{d}} - \alpha_{in}, \quad (2.7)$$

представляющее собой зависимость между коэффициентом усиления и плотностью тока инжекции.  $B_{eff}$  называется эффективным коэффициентом рекомбинации.

Так как плотность тока при  $\bar{g} = \bar{g}_{th}$  становится равной пороговой плотности тока  $J_{th}$ , то на основании формул (2.3) и (2.7) для пороговой плотности тока  $J_{th}$  получаем следующее выражение:

$$J_{th} = \frac{e B_{eff}}{A_0^2} \cdot \frac{d}{\xi^2} \left[ \alpha_{in} \xi + \alpha + \frac{1}{l} \ln \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2}} \right]^2. \quad (2.8)$$

Пороговая плотность тока  $J_{th}$ , как видно из формулы (2.8), падает с уменьшением толщины  $d$  активного слоя. Это объясняется тем, что, как видно из формулы (2.7), коэффициент усиления связан с объемной плотностью  $J/d$  тока. Однако, как показывает пример расчета, показанный на рис. 2.7, при толщине активного слоя  $d$  менее 0,1 мкм имеет место резкое возрастание пороговой плотности тока  $J_{th}$ . Причина этого заключается в том, что с уменьшением толщины активного слоя уменьшается эффект удержания света, распределение энергии поперечной моды распространяется на слой покрытия, коэффициент усиления поперечной моды падает. Это уменьшение коэффициента удержания света становится особенно заметным при толщине активного слоя  $d$  менее 0,1 мкм. Минимальная по-

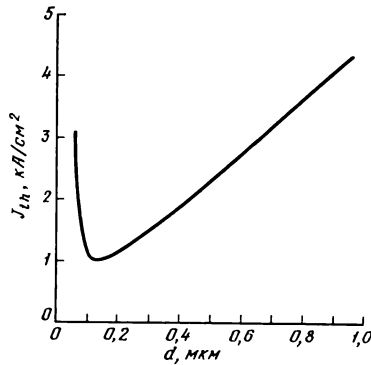


Рис. 2.7. Зависимость пороговой плотности тока  $J_{th}$  от толщины активного слоя  $d$  GaInAsP/InP-лазера ( $\lambda=1,3$  мкм) при комнатной температуре (контакт по всей поверхности).

роговая плотность тока  $J_{th}$  имеет место при значениях  $d=0,1—0,15$  мкм, поэтому толщину активного слоя полупроводникового лазера обычно выбирают в этих пределах. Поскольку  $J_{th}$  меняется в зависимости от  $d$ , то для оценки возможностей лазера во многих случаях используют отношение  $J_{th}/d$ . Если это значение порядка  $4...5$  кА/см<sup>2</sup>/мкм, то лазер считается хорошего качества.

Другим важным параметром, характеризующим качество полупроводникового лазера, является дифференциальный квантовый выход. Дифференциальный квантовый выход  $\eta_d$  задается крутизной линейной части характеристики  $L—I$ , приведенной на рис. 2.1, а и определяется формулой

$$\eta_d = \frac{\Delta L/\hbar\omega}{\Delta I/e}, \quad (2.9)$$

где  $\Delta I/e$  — число носителей, инжектированных в единицу времени в активную область, а  $\Delta L/\hbar\omega$  — число фотонов, излучаемых лазерным резонатором в единицу времени.

Если  $\eta_d$  выразить через параметры резонатора, то получаем

$$\eta_d = \frac{\eta_{stim} (1 - R_1)}{(1 + \sqrt{R_1/R_2})(1 - \sqrt{R_1/R_2})} \cdot \frac{\frac{1}{l} \ln \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2}}}{\alpha + \frac{1}{l} \ln \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2}}}. \quad (2.10)$$

Здесь оптический выход рассматривается со стороны  $R_1$ . Обычно  $\eta_{stim}=1$ .



Из формулы (2.10) видно, что  $\eta_a$  с уменьшением  $R_1$  возрастает. Поскольку энергия излучается с обоих торцов резонатора, то при  $R_1=R_2$  может быть использована половина оптического выхода, другими словами, максимальное значение  $\eta_a$  составляет 50%. В реальных лазерах это значение лежит в пределах 30—45%. Однако если поддерживать постоянным произведение  $R_1R_2$  и увеличивать коэффициент отражения с одной стороны, делая конструкцию асимметричной, то при неизменном пороговом значении оказывается возможным повысить  $\eta_a$ . Это ясно видно из формул (2.8) и (2.10). В последнее время начата разработка лазеров такой конструкции.

Полупроводниковый лазер представляет собой «пороговый прибор», поэтому даже при неизменном токе смещения изменение температуры окружающей среды может привести к изменению порогового значения, а вместе с тем к изменению оптического выхода лазера. Эти изменения особенно заметны в приборах с высоким дифференциальным квантовым выходом. Следовательно, при использовании этих приборов в системах оптической связи, к ним необходимо добавить схему автоматической регулировки мощности, которая обеспечивала бы постоянство оптического выхода. Оптический выход с одной стороны используется в качестве монитора. Температурная зависимость порогового значения приближенно выражается следующей формулой:

$$I = I_0 \exp\left(-\frac{T}{T_0}\right), \quad (2.11)$$

где  $T_0$  — характеристическая температура, которая у AlGaAs/GaAs-лазера лежит в пределах 130—180 К, а у GaInAsP/InP-лазера — при комнатной температуре лежит в пределах 50—70 К.

#### 2.2.4. Лазеры с селекцией поперечных мод и с полосковой геометрией

Полупроводниковый лазер, в котором область генерации (активная область) выполнена в виде полоски, называется полосковым лазером. Такая конструкция обеспечивает уменьшение рабочего тока и осуществление селекции поперечной моды в направлении, параллельном *pn*-переходу.

Как и в контактном полосковом лазере (см. разд. 2.1), состав лазерного кристалла однороден в горизонтальном поперечном направлении, а свет распространяется в соответствии с распределением усиления. Такая конструкция носит название полоскового лазера с управляемым усилением. Существуют две

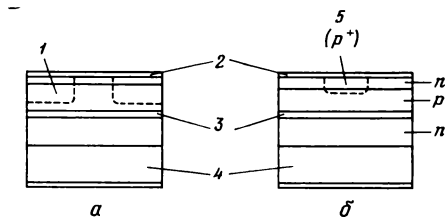


Рис. 2.8. Полосковые лазеры с управляемым усилением с полоской, изготовленной инъекцией протонов (а), и с планарной полосковой (б): 1 — область инъекции протонов; 2 — электрод; 3 — активный слой; 4 — подложка; 5 —  $p^+$ -область диффузии Zn.

конструкции полосковых лазеров с управляемым усилением: лазеры, полоска которых изготовлена методом протонной бомбардировки, и лазеры с планарной полосковой структурой, приведенные на рис. 2.8.

В лазерах первой конструкции ограничение тока достигается путем протонного облучения всех частей, кроме полоски, которые становятся полуизолирующими. Планарная полосковая структура формируется таким образом, что верхний слой ее представляет собой слой  $n$ -типа и только часть полоски путем селективной диффузии цинка преобразуется в  $p$ -тип. При приложении напряжения в прямом направлении между верхним слоем  $n$ -типа и покрытием  $p$ -типа возникает обратное смещение, благодаря чему ток будет протекать только в области диффузии цинка.

Зависимость между током и оптическим выходом лазера с управляемым усилением и шириной полоски 10—20 мкм нелинейна — видны изломы в характеристике. В окрестности этих точек излома возникают различные нестабильные явления, которые являются большой помехой при практическом использовании лазеров. До 1976 г. причины этих явлений были недостаточно выяснены. Нелинейность характеристики проявляется главным образом в виде: 1) изменения направления оптического выхода в зависимости от значения тока, 2) резкого увеличения шумов, 3) ухудшения модуляционной характеристики и возникновения релаксационных колебаний в виде всплесков. В результате проведенных исследований было установлено, что источником этих неприятностей является нестабильность поперечных мод. Введение распределения коэффициента преломления в горизонтальном поперечном направлении и стабилизация поперечных мод позволили получить линейную характеристику  $L—I$ , показанную на рис. 2.1, а, и достигнуть устойчивой лазерной генерации. Можно сказать, что это был большой шаг в истории развития полупроводниковых лазеров.

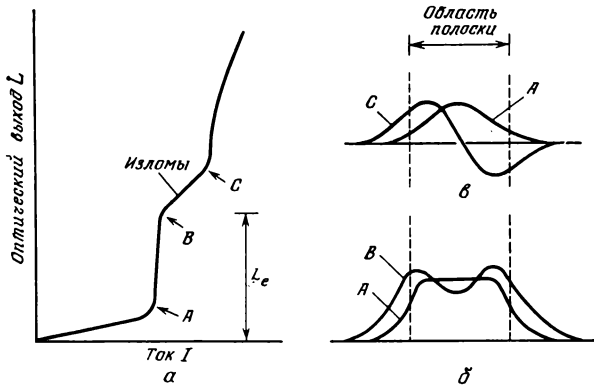


Рис. 2.9. Изломы в  $L-I$ -характеристике лазера (а), распределение усиления (б) и распределение мод (в).

Как видно из рис. 2.9, б, распределение усиления для точки А, расположенной в окрестности порогового значения, постоянно по всей длине полоски, а для точки В это распределение имеет провал, обусловленный искажениями; в окрестности этой точки возрастает коэффициент усиления моды первого порядка большой интенсивности света, возникает переход генерирующей поперечной моды с основной моды в моду первого порядка. При этом процессе поперечное сечение основной моды сужается, свободно перемещаясь в поперечном направлении либо вправо, либо влево и вбирая окружающие потери, в результате чего оптический выход лазера достигает насыщения.

В соответствии с распределением мод в центральной части полоски возникает резкое увеличение вынужденного излучения, что вызывает локальное уменьшение концентрации носителей в этой части полоски и приводит к искажению распределения усиления. Это явление носит название пространственного выгорания дырок.

Если сузить ширину полоски  $W$ , то даже в лазере с управляемым усилением оказывается возможным повысить оптический выход  $L_c$ , при котором возникают изломы. Это обусловлено тем, что при диффузии носителей в поперечном направлении образуется неоднородность концентрации носителей. Если  $W \leq 5$  мкм, то  $L_c \geq 10$  мВт и получается практически линейная характеристика  $L-I$ .

Лазер, имеющий распределение коэффициента преломления, сосредоточенное в направлении, параллельном поверхности перехода, называется лазером с управляемым коэффициентом преломления. Путем усиления световодного эффекта по срав-

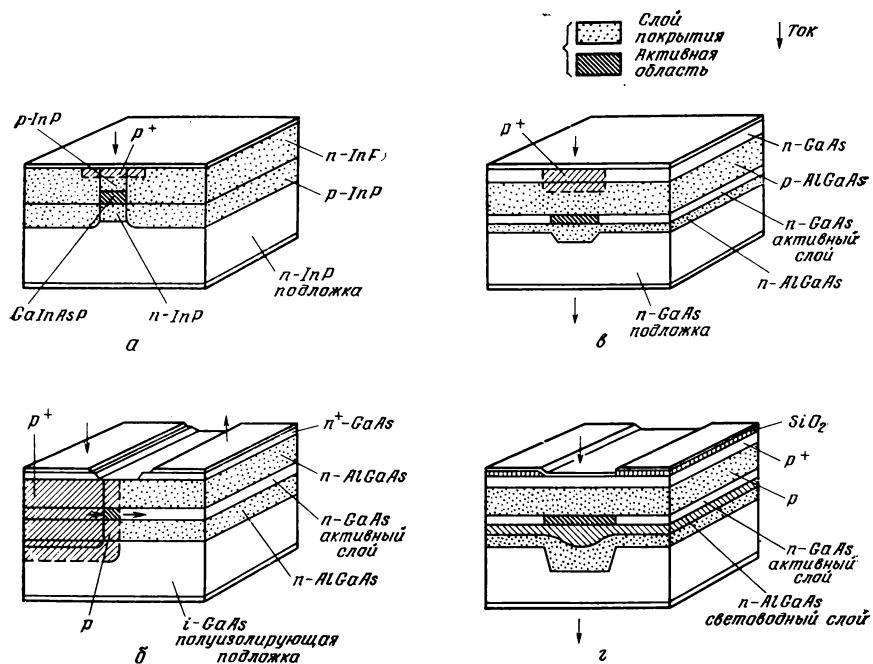


Рис. 2.10. Структура лазеров с селекцией поперечных мод: *а* — ВН-лазер со скрытой гетероструктурой; *б* — ТJS-полосковый лазер с поперечным  $pn$ -переходом; *в* — планарный полосковый CSP-лазер с канализированной подложкой; *г* — плосковыпуклый PCW-лазер.

нению с искажениями в распределении усиления и отсечки высших мод достигается получение и поддержание одной устойчивой основной поперечной моды вплоть до высокого уровня инжекции. Существуют различные конструкции лазеров с управляемым коэффициентом преломления. На рис. 2.10 приведены четыре основные конструкции таких лазеров.

Лазер со скрытой гетероструктурой (ВН-лазер) представляет собой конструкцию, в которой активную область в виде полоски шириной 1—3 мкм со всех сторон окружают материалом с большой шириной запрещенной зоны. В результате разности в коэффициентах преломления активной области и слоя покрытия образуется световод. Полученный гетеробарьер удерживает инжектированные носители, другими словами, не происходит растекания их в поперечном направлении, благодаря чему достигается снижение порогового значения тока и повышение КПД. Пороговое значение тока обычно составляет 10—30 мА.

В полупроводниковом полосковом лазере с поперечным *pn*-переходом (TJS-лазер) в направлении толщины пленки формируют не *pn*-переход, а двойную гетероструктуру *n*-типа, а *pn*-переход формируют в поперечном направлении путем диффузии цинка. Так как инжекция носителей в *pn*-переход на GaAs возникает при более низком напряжении по сравнению с *pn*-переходом в слое покрытия из AlGaAs, то ток будет втекать в активный слой из GaAs. С помощью двойной гетероструктуры и *pn*-перехода свет будет удерживаться в области размером  $1 \times 3$  мкм<sup>2</sup>. Пороговое значение тока составляет порядка 20 мА.

Планарный полосковый лазер с канализированной подложкой (CSP-лазер) изготавливается путем вырезания в подложке канавки, на которой затем осуществляют эпитаксиальное выращивание из жидкой фазы с достаточно тонким слоем покрытия во внешней части канавки. Так как подложка из GaAs непрозрачна для генерируемых длин волн, то вне канавки имеет место сильное поглощение света, возникает разность потерь. Используя эту разность потерь, формируют поперечную моду. Пороговое значение тока равно 60—80 мА.

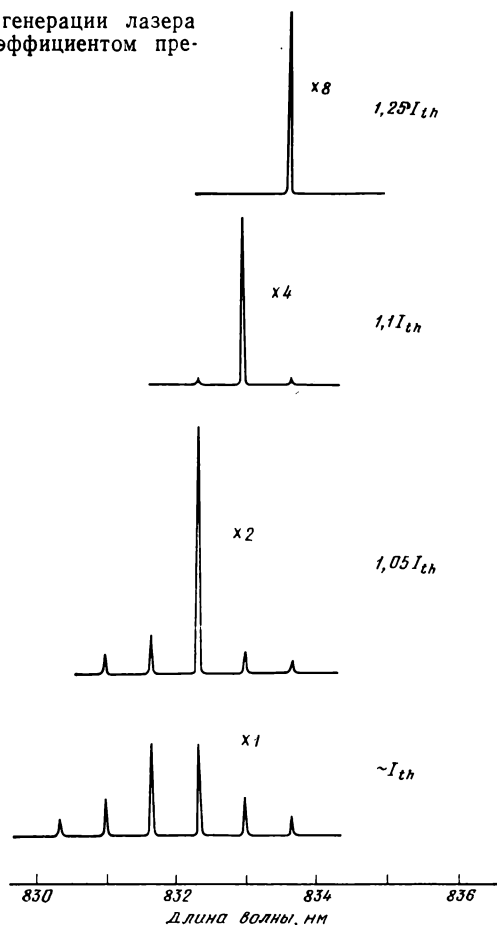
Плосковыпуклый световодный лазер (PCW-лазер) представляет собой конструкцию с плоским активным слоем, но со ступенчатым или линзообразным изменением толщины соседних световодных слоев. Так как с увеличением толщины световода эквивалентным образом возрастает коэффициент преломления, то в горизонтальном поперечном направлении возникает распределение эквивалентного коэффициента преломления.

К этому семейству лазеров наряду с лазерами с управляемым коэффициентом преломления относится и лазер с ограничением тока для эффективной инжекции тока в область светового излучения.

Конструкции лазеров, приведенные на рис. 2.10, *а*, *б* и *г* не зависят от вида материала. Однако конструкция, приведенная на рис. 2.10, *в*, принципиально должна иметь подложку, изготовленную из материала, поглощающего лазерное излучение. Кроме того, в CSP- и PCW-лазерах можно в некоторой степени уменьшить светопроводимость в горизонтальном поперечном направлении, что позволяет в отличие от лазеров со скрытой гетероструктурой увеличить ширину полоски до 5—8 мкм и получить большую мощность излучения, которая достигает порядка 10 мВт без сокращения срока службы лазера.

Теоретически если можно в достаточной степени стабилизировать одну поперечную моду, то можно надеяться на создание лазеров и с одной только продольной модой. В практически используемых сейчас лазерах с управляемым коэффициентом преломления стало достаточно легко получить одномодовый спектр генерации как это видно из рис. 2.11.

Рис. 2.11. Спектр генерации лазера с управляемым коэффициентом преломления.



В заключение, в табл. 2.1 приводятся основные характеристики лазеров с управляемым усилением и управляемым коэффициентом преломления.

### 2.2.5. Статические характеристики полупроводниковых лазеров

В спектре лазера с управляемым коэффициентом преломления в окрестности порогового тока, как видно на рис. 2.11 появляются многочисленные продольные моды, однако при оптическом выходе свыше 1—2 мВт возрастает интенсивность только одной

Таблица 2.1

## Сравнение характеристик лазеров с управляемым усилением и управляемым коэффициентом преломления

	Лазер с управляемым усилением	Лазер с управляемым коэффициентом преломления
Поперечная мода	Из-за искажения волнового фронта в горизонтальном направлении, обусловленного изменением усиления, появляется астигматическая разность	На поверхности зеркал имеет место горизонтальный волновой фронт, не зависящий от изменения усиления
Картина поля в дальней зоне	Имеют место случаи появления двугорбости, изменяющейся в зависимости от оптического выхода	Одногорбое изображение, не зависящее от оптического выхода
Пороговый ток	Довольно большой	Небольшой
Спектр	Легко возникают многочисленные моды	Легко получить одну моду
Зависимость между током и оптическим выходом	Имеют место случаи возникновения изломов (линейна для узкой полоски)	Изломы не возникают (хорошая линейность)
Шумовая характеристика	Из-за возникновения большого числа мод, шумы несколько возрастают, однако шумовая характеристика малочувствительна к изменениям температуры и тока, а также к отраженному свету	В рабочей одномодовой области шумы небольшие, однако при перескоке с одной моды на другую появляются большие шумы, а также оптический шум отраженного света

продольной моды и возникает генерация только одной продольной моды, т. е. происходит сужение спектра. На рис. 2.12 приведены зависимости тока инжекции от интенсивности света для моды генерации и соседней резонансной моды. В области выше порогового тока интенсивность основной моды генерации монотонно возрастает, а интенсивность света соседней резонансной моды в окрестности порогового тока достигает насыщения и в дальнейшем в зависимости от типа лазера, как показано на рисунке, постепенно уменьшается. Это связано с тем, что при

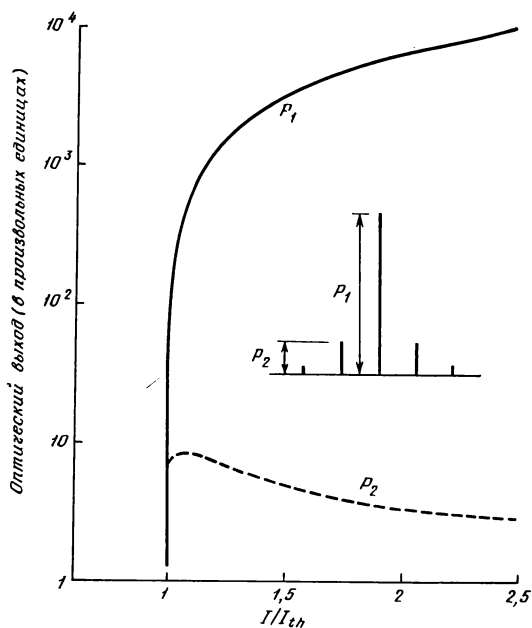


Рис. 2.12. Зависимость интенсивности света для моды генерации и соседней резонансной моды от тока инжекции.

возникновении генерации усиление соседней моды сдерживается действием фотоэлектрического поля моды генерации. При высоком уровне инжекции отношение интенсивностей света моды генерации и соседней моды достигает порядка  $10^3$ , т. е. резко возрастает монохроматичность света. В отличие от этого в спектре генерации узкополоскового лазера с управляемым усилением возникают многочисленные продольные моды. Это можно объяснить тем, что доля спонтанного излучения в моде генерации у лазеров с управляемым усилением оказывается больше по сравнению с лазерами с управляемым коэффициентом преломления.

Если увеличивать ток инжекции, то, как видно из спектра, приведенного на рис. 2.11, мода генерации совершает последовательный перескок на продольную моду с большей длиной волны. Это обусловлено тем, что при повышении температуры активного слоя кривая усиления сдвигается в сторону более длинных волн. На рис. 2.13 показана температурная характеристика длин волн излучения лазера. Длина волны излучения при изменении температуры окружающей среды периодически перескакивает на несколько десятых долей нанометра в направлении



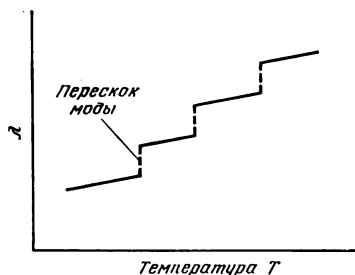


Рис. 2.13. Температурная зависимость длины волны  $\lambda$  излучения лазера.

более длинных волн. Усредненное изменение длины волны для AlGaAs-лазеров составляет  $0,3 \text{ нм}/^\circ\text{C}$ , а для GaInAsP-лазеров —  $0,4\text{—}0,5 \text{ нм}/^\circ\text{C}$ . Даже в области отсутствия перескока моды длина волны излучения лазера понемногу смещается в сторону более длинных волн. Это зависит от температурного коэффициента показателя преломления и составляет приблизительно  $0,1 \text{ нм}/^\circ\text{C}$ .

Длина волны продольной моды определяется условием резонанса лазерного резонатора, которое представляется в виде

$$\beta \cdot l = m\pi \quad (m\text{—целое число}), \quad (2.12)$$

где  $\beta$  — постоянная распространения, равная  $(2\pi/\lambda) \cdot n_{eq}$ ,  $n_{eq}$  — эквивалентный коэффициент преломления.

Таким образом, величина скачка продольной моды составляет

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2n_{eff}l}, \quad (2.13)$$

где  $n_{eff}$  — эффективный коэффициент преломления, который, если принять во внимание дисперсию показателя преломления в зависимости от длины волны, будет представляться следующим выражением:  $(n_{eq} - \lambda \cdot \partial n_{eq} / \partial \lambda)$ . Можно считать, что для AlGaAs-лазера  $n_{eff} = 4,2$ , а для GaInAsP-лазера  $n_{eff} = 3,8$ .

Картина поля в дальней зоне для выходного пучка полупроводникового лазера, символически показанная на рис. 2.14, представляет собой эллипсоид, расширяющийся в направлении, перпендикулярном поверхности перехода. Это связано с тем, что ширина полоски, равная  $2\text{—}20 \text{ мкм}$ , много больше толщины  $d$  активного слоя, которая меньше  $0,5 \text{ мкм}$ . Угол расходимости светового пучка в направлении, перпендикулярном поверхности перехода,  $\theta_{\perp} = 30\text{—}60^\circ$ , а в направлении, параллельном поверхности перехода,  $\theta_{\parallel} = 10\text{—}30^\circ$ . Поэтому для осуществления связи с оптическим волокном необходимо использовать цилиндрические линзы и другие приборы, которые будут описаны в гл. 3.

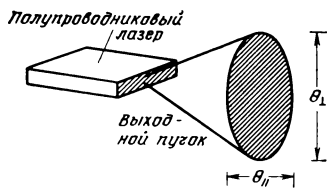


Рис. 2.14. Выходной пучок полупроводникового лазера.

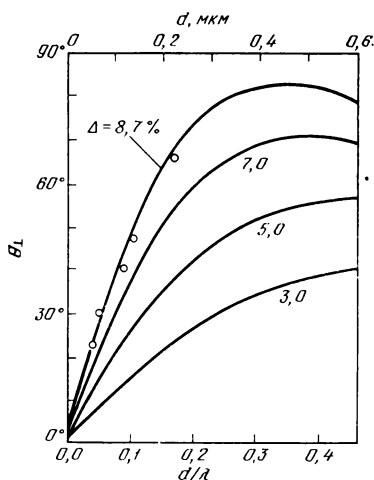


Рис. 2.15. Пример расчета угла расходимости  $\theta_{\perp}$  выходного пучка полупроводникового лазера по уровню половинной мощности. Кружком отмечены экспериментальные значения при  $\lambda=1,31$  мкм.  $d/\lambda$  — отношение толщины активного слоя к длине волны.

вертикальном. Другими словами, изображение в вертикальном направлении лежит на торце прибора, так как световодное распространение происходит за счет разности в коэффициенте преломления, что же касается горизонтального направления, то в этом случае световой пучок кажется выходящим из торца на глубине 15—30 мкм в результате искажения волнового фронта, обусловленного управлением усиления. При наличии астигматической разности с помощью только одной сферической линзы невозможно свести выходной пучок в точку, требуется наличие корректирующей линзы. В лазерах с управляемым коэффициентом преломления положение выхода излучения совпадает с торцом прибора, поэтому никаких проблем не возникает.

На рис. 2.15 показаны зависимости между углом расходимости лазера  $\theta_{\perp}$  в направлении, перпендикулярном поверхности перехода, и толщиной активного слоя, где параметром является относительная разность коэффициентов преломления  $\Delta$ . При существенном уменьшении толщины активного слоя поперечные моды расползаются в слой покрытия, возрастает диаметр пятна, поэтому с уменьшением  $d$  будет уменьшаться угол расходимости. Например, если  $\Delta$  положить равным 8,7%, то при  $d=0,05$  мкм  $\theta_{\perp}$  оказывается равным  $30^{\circ}$ . Кроме того, при  $\theta_{\perp}=30^{\circ}$  толщина  $d$  с уменьшением  $\Delta$  будет возрастать. Так как в ВН-лазере со скрытой гетероструктурой  $\theta_{\parallel} \approx 30^{\circ}$ , то оказывается возможным получить картину поля в дальней зоне в виде круга.

В лазерах с управляемым усилением возникает астигматическая разность, обусловленная различием в положении наблюдения выходного пучка в направлениях, параллельном и перпендикулярном *pp*-переходу, т. е. в горизонтальном и

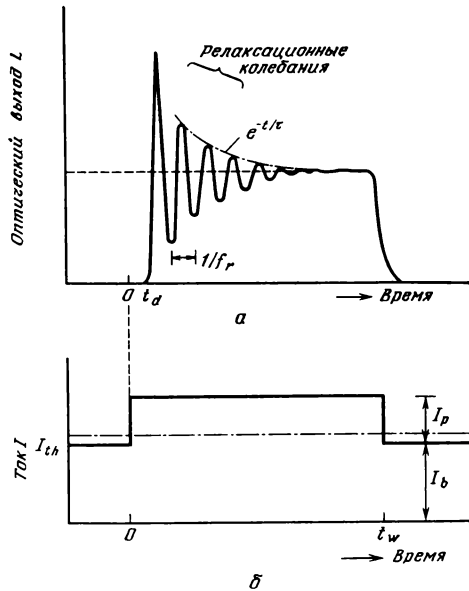


Рис. 2.16. Импульсная модуляция излучения в полупроводниковом лазере: *а* — оптический отклик; *б* — импульс тока.

### 2.2.6. Характеристики прямой модуляции

При осуществлении импульсной модуляции путем инжекции импульса тока в полупроводниковом лазере на форму выходного сигнала лазера, как показано на рис. 2.16, *а*, накладываются затухающие колебания с частотой порядка нескольких ГГц. Это связано с возникновением фазового запаздывания при взаимодействии света и носителей. Такие релаксационные колебания очень сильно ограничивают область модуляции полупроводникового лазера и представляют на практике большую проблему. Следует отметить, что эта проблема существовала только на начальном этапе разработки полупроводниковых лазеров. Благодаря использованию узкополосковых лазеров удалось подавить эти релаксационные колебания, так что в настоящее время почти нет никаких проблем, связанных с ними. В данном разделе кратко рассматриваются основные моменты, связанные с непосредственной модуляцией.

Частотный отклик промодулированного света полупроводникового лазера при слабом сигнале имеет вид

$$\frac{S_m(\omega)}{S_m(0)} = \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_{r0}}\right)^2 + j \left(\frac{\omega}{\omega_{r0}}\right) \left(\frac{1}{\omega_{r0}\tau_s} + \omega_{r0}\tau_p\right)}, \quad (2.14)$$

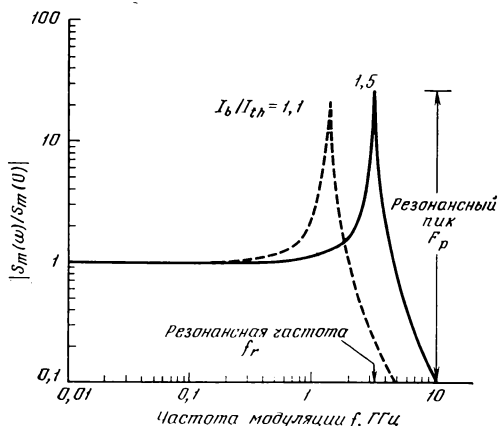


Рис. 2.17. Пример расчета частотной зависимости модуляционной чувствительности  $(S_m(\omega)/S_m(0))$  ( $\tau_p=1$  пс,  $\tau_s=3$  нс,  $N_g=2 \cdot 10^8$  см $^{-3}$ ,  $\xi=0,5$ ,  $A_0=5 \cdot 10^{-17}$  см $^2$ ).

где

$$\omega_{го}^2 = (1 + \xi \tau_p N_g A_0 \bar{c}) \left( \frac{1}{\tau_s \tau_p} \right) \left( \frac{I_b}{I_{th}} - 1 \right), \quad (2.15)$$

т. е. имеет такой же вид, как у LCR-резонансного контура электрической цепи, где  $\tau_s$  и  $\tau_p$  — соответственно время жизни носителей и фотонов,  $c$  — скорость света.

На рис. 2.17 приведены примеры расчета частотной характеристики модуляционной чувствительности  $|S_m(\omega)/S_m(0)|$ . Явление резонанса наблюдается, когда модуляционная чувствительность принимает максимальное значение  $F_p$  на частоте  $f_r$ ,  $f_r$  называется резонансной частотой. При  $f > f_r$  модуляционная чувствительность резко падает. Это значение  $f_r$  становится критерием верхней частоты непосредственной модуляции полупроводникового лазера.  $F_p$  называют резонансным пиком. Частота релаксационных колебаний, показанная на рис. 2.16, а, почти совпадает с частотой  $f_r$ . Это связано с тем, что релаксационные колебания возникают под влиянием лазерного резонанса. Высокая модуляционная чувствительность относительно составляющей частоты  $f_r$ , заключенной в импульсном токе, приводит к выделению составляющей  $f_r$  в промодулированном свете. Следовательно, если окажется возможным уменьшить  $F_p$ , то тем самым будут подавляться релаксационные колебания. Так как обычно  $\omega_{го} \tau_p \ll 1$ ,  $\omega_{го} \tau_s \gg 1$ , то из формулы (2.14) получаем следующее приближенное выражение:

$$f_r \approx \sqrt{1 + \xi \tau_p N_g A_0 \bar{c}} \left( \frac{1}{2\pi} \right) \frac{1}{\sqrt{\tau_s \tau_p}} \sqrt{\frac{I_b}{I_{th}} - 1}. \quad (2.16)$$

Для удобства первое подкоренное выражение в вышеприведенной формуле полагают равным единице, хотя в полупроводниковых лазерах обычно не выполняется условие  $\xi \tau_p N_g A_0 \bar{c} \ll 1$ . Поэтому будем использовать вышеприведенную формулу (2.16) в неизменном виде.

На рис. 2.18 приведен пример расчета резонансной частоты. Поскольку значение  $\sqrt{\tau_s \tau_p}$  составляет порядка 0,05 нс, т. е. невелико, то частота  $f_r$  равна нескольким гигагерцам и возрастает с увеличением тока смещения.

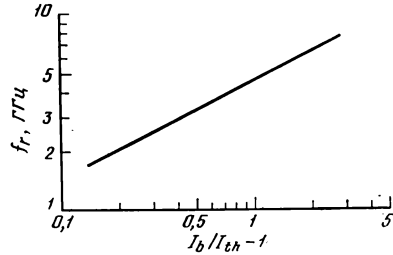


Рис. 2.18. Зависимость резонансной частоты  $f_r$  от тока смещения.

В примерах расчета, приведенных на рис. 2.17, не учитывалось спонтанное излучение и диффузия носителей в горизонтальном поперечном направлении. Роль этих эффектов возрастает с уменьшением ширины полосы, способствуя затуханию релаксационных колебаний, т. е. эти эффекты становятся силами, подавляющими релаксационные колебания. Влияние спонтанного излучения обычно мало и его проявление незаметно.

При генерации полупроводникового лазера концентрация носителей в центре полосы уменьшается и возникает диффузия носителей из краев полосы в горизонтальном продольном направлении к центру. При высокоскоростной непосредственной модуляции резкие изменения концентрации носителей в центре компенсируются за счет диффузионного отклика, который сдерживает изменение концентрации носителей. В результате сдерживается изменение усиления и подавляются релаксационные колебания. На рис. 2.19 (кривая *a*) приведена вычисленная зависимость между резонансным пиком  $F_p$  и шириной полосы  $W$  с учетом диффузии носителей. Длину диффузии носителей  $L_d$  полагали равной 2 мкм. С уменьшением ширины полосы резонансный пик уменьшается и при  $W \approx L_d F_p$  принимает минимальное значение. Другими словами, при ширине полосы порядка длины диффузии силы диффузионного сдерживания оказываются наиболее эффективными. На рис. 2.19 (кривая *b*) приведены результаты экспериментов относительно глубины релаксационных колебаний  $M_R$ , которые показывают, что с уменьшением ширины полосы происходит полное подавление релаксационных колебаний. При ширине полосы 10 мкм наблюдаются значительные релаксационные колебания, а при ширине полосы порядка 2 мкм релаксационные колебания полностью

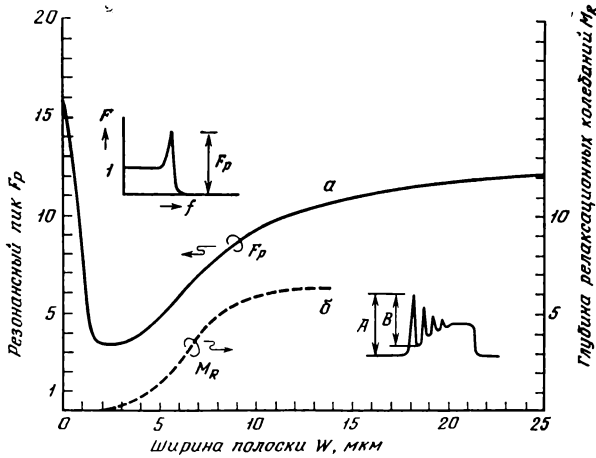


Рис. 2.19. Подавление релаксационных колебаний за счет диффузии носителей в поперечном направлении. Сплошная линия соответствует расчетным значениям  $F_p(I/I_{th}=2; \tau_s/\tau_p=10^3; L_d=2 \text{ мкм})$ , пунктирная — экспериментальным значениям  $M_R = \frac{B}{A}$ .

прекращаются и значение  $M_R$  оказывается равным нулю. На практике сама схема накачки также оказывает сдерживающее влияние на релаксационные колебания, так что подавление релаксационных колебаний нельзя отнести полностью за счет диффузии носителей. Имеет место совместное действие ряда факторов.

Если полупроводниковый лазер работает в режиме постоянного тока, легко возникает только одна продольная мода, однако если осуществлять непосредственную гармоническую модуляцию, то, как видно из примеров, приведенных на рис. 2.20, число генерируемых продольных мод увеличивается. Это связано с тем, что одновременно с модуляцией происходит резкое изменение усиления в активном слое и при большом числе продольных мод усиление постепенно превышает потери в резонаторе. Это уширение спектра называют динамическим уширением спектра. Динамическое уширение спектра зависит также от частоты модуляции, однако если рассматривать максимальное значение (значение на резонансной частоте), то для AlGaAs-лазера это уширение будет порядка 2 нм, а для GaInAsP-лазера с длиной волны 1,5 мкм оно будет порядка 10 нм.

Уширение спектра становится серьезной проблемой в случае, когда полоса передачи ограничена шириной спектра источника светового излучения, как, например, в системе оптической связи на длине волны 1,5 мкм. Для решения этой проблемы в

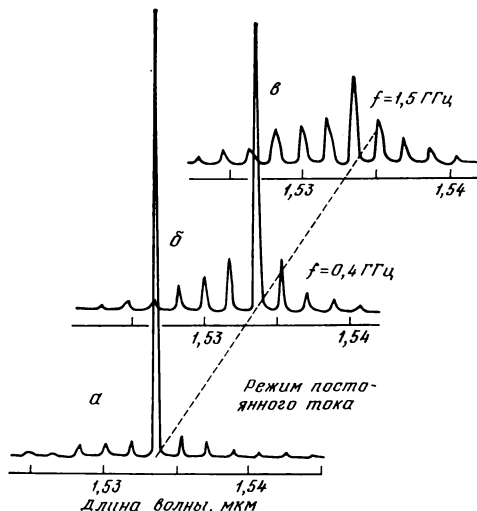


Рис. 2.20. Уширение спектра при модуляции излучения GaInAsP/InP-лазера со скрытой гетероструктурой ( $I_{th}=63$  мА;  $I/I_{th}=1,2$ ; глубина модуляции  $m=100\%$ ).

настоящее время ведутся разработки динамического одномодового лазера, в котором можно будет поддерживать одномодовый режим даже при осуществлении модуляции.

### 2.2.7. Динамический одномодовый лазер

Динамические одномодовые лазеры можно классифицировать так, как это показано на рис. 2.21. На рис. 2.21, а представлен лазер с распределенным отражением (DBR-лазер), представляющий собой конструкцию, в которой к внешнему световоду с малыми потерями, связанному с активной областью, присоединена решетка, формирующая избирательность коэффициента усиления в зависимости от длины волны. В конструкции, показанной на рис. 2.21, б, оказывается возможным осуществлять необходимую для генерации лазера оптическую обратную связь даже при формировании решетки внутри активного слоя. Эта конструкция носит название лазера с распределенной обратной связью (DFB-лазер). На рис. 2.21, в представлена конструкция двухрезонаторного лазера, в которой соединены два лазерных резонатора различной длины. В этих конструкциях добротность  $Q$  резонатора различна для разных мод и может быть повышена для нужной резонансной моды. Из-за разности в зна-

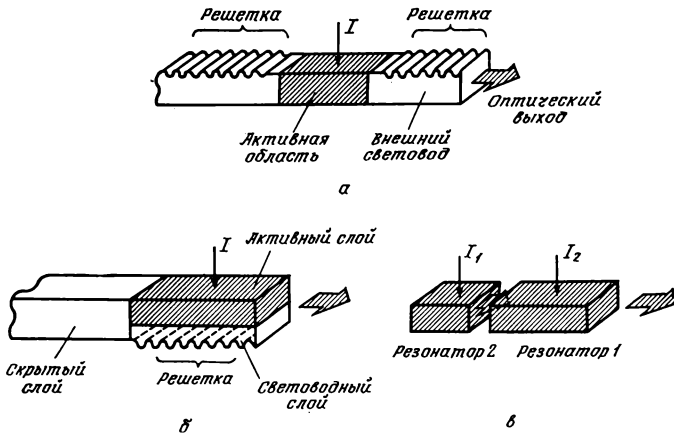


Рис. 2.21. Виды динамических одномодовых лазеров: *а* — DBR-лазер с распределенным отражением; *б* — DFВ-лазер с распределенной обратной связью; *в* — двухрезонаторный лазер.

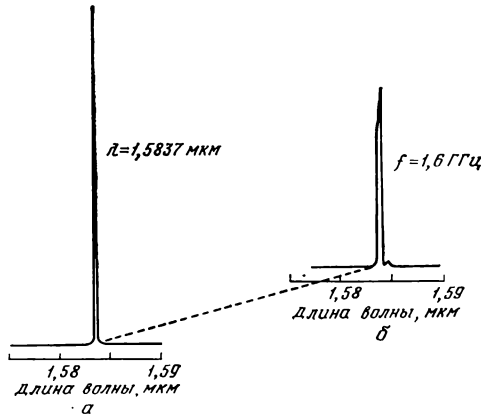


Рис. 2.22. Спектр генерации при непосредственной модуляции излучения GaInAsP/InP-лазера с распределенным отражением ( $I_b/I_{th}=1,2$ ; глубина модуляции  $m=100\%$ ): *а* — режим постоянного тока; *б* — режим модуляции.

чени добротности  $Q$  выбранной моды с соседними резонансными модами даже при резком изменении усиления при непосредственной модуляции поддерживается устойчивая одномодовая генерация. На рис. 2.22 показан спектр генерации лазера с распределенным отражением при высокоскоростной модуляции синусоидальным током частотой 1,6 ГГц. Из-за изменения коэф-



коэффициента преломления активного слоя имеет место незначительное уширение ширины линии, однако увеличения числа генерирующих мод, как это наблюдается в обычных лазерах, не происходит и остается только одна продольная мода.

### 2.2.8. Шумы в полупроводниковых лазерах

В полупроводниковых лазерах различают следующие шумы: 1) квантовый шум, 2) шум токораспределения, 3) шум, обусловленный перескоком моды, 4) шум, обусловленный отраженным светом. Квантовый шум обусловлен статистическими колебаниями в процессе случайного спонтанного излучения, имеет пик при пороговом значении тока и периодически принимает максимальные значения на резонансных частотах. В лазерах, генерирующих большое число продольных мод, как и в лазерах с управляемым усилением, возникает модуляция интенсивности света, основанная на конкуренции одной моды с отдельными генерирующими модами. Эти шумы называются шумами токораспределения. Шумы, обусловленные перескоком моды, возникают в моменты, когда продольная мода перескакивает на следующую моду, что обуславливает обмен энергией между двумя модами при перескоке. На рис. 2.23 показана характеристика интенсивности шума при неизменном смещении и изменении температуры в полупроводниковом лазере. Относительная интенсивность шума определяется следующим образом:

$$\text{RIN} \equiv \frac{(\Delta P)^2}{P^2} \cdot \frac{1}{B}, \quad (2.17)$$

где  $P$  — средний оптический выход,  $\Delta P$  — флуктуации оптического выхода,  $B$  — измеренная ширина полосы.

Нижняя граница шума, приведенного на рис. 2.23, представляет собой квантовый шум, а пикообразные всплески — шум, обусловленный перескоком генерирующей моды при изменении температуры.

Если с повышением когерентности излучения полупроводникового лазера, как показано на рис. 2.11, свет, отраженный от внешней точки, возвращается внутрь лазера, то возникает сильный шум, обусловленный флуктуацией фазы. Он называется шумом, вызванным отраженным светом. Доля света, вернувшегося после отражения от торца, по отношению к оптическому выходу лазера (коэффициент оптической обратной связи) оказывается высокой, лежащей в пределах 0,01—1%. Возникает сильный шум, достигающий  $\text{RIN} = 10^{-11}$ . При значении выше 1% уровень этого шума становится на порядок выше квантового шума, стабилизируется и никаких шумовых пиков не возникает.

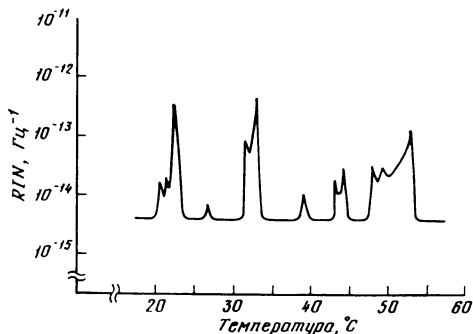


Рис. 2.23. Шум, обусловленный перескоком моды в полупроводниковом лазере (при отсутствии отраженного света).  $RIN$  — относительная интенсивность шума.

Это связано с тем, что при увеличении отраженного света возникает многомодовая генерация и когерентность ухудшается. На практике подавление шума, обусловленного отраженным светом, осуществляют путем 1) использования развязывающего устройства, 2) использования лазеров с управляемым усилением и осуществления высокоскоростной модуляции.

## 2.3. Светоизлучающие диоды для оптической передачи

### 2.3.1. Конструкция

Среди светоизлучающих диодов (СИД) различают диоды для индикации, для оптической связи, а также обладающие высокой мощностью излучения. В данной главе рассматриваются диоды, используемые в оптической связи. СИД по сравнению с полупроводниковыми лазерами обладают более широким спектром излучения, полоса модуляции у них уже, а эффективность связи с оптическим волокном ниже. Однако не будучи «пороговым прибором», они имеют также ряд преимуществ: высокая надежность (большой срок службы), простота изготовления, низкая себестоимость. Поэтому они находят широкое применение в качестве источников света в системах передачи на небольшие расстояния с шириной полосы до нескольких десятков МГц, например для внутренней связи в пределах здания, самолета, корабля, автомобиля и так далее.

По способу вывода излучения СИД подразделяются на диоды с поверхностными излучателями и на диоды с торцевыми излучателями. В полупроводниковых лазерах обычно использу-

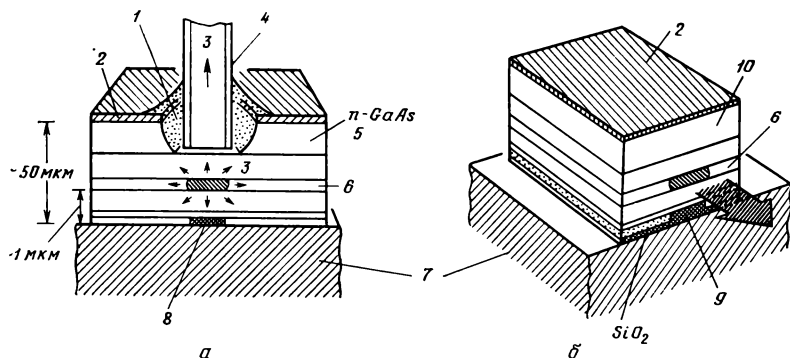


Рис. 2.24. Структура СИД с поверхностным излучателем (а) и с торцевым излучателем (б): 1—эпоксидная смола; 2—омический контакт; 3—излучение; 4—оптическое волокно; 5—подложка на  $n\text{-GaAs}$ ; 6—активный слой; 7—теплоотвод; 8—нижний омический контакт (диаметром 50 мкм), 9—нижний омический контакт (ширина 65 мкм); 10—подложка.

ется двойная гетероструктура. СИД с целью упрощения конструкции и технологии изготовления строятся на структурах с гомопереходами.

В СИД с поверхностным излучателем свет излучается в направлении, перпендикулярном поверхности перехода (рис. 2.24, а). Для улучшения отвода тепла от активного слоя одна сторона выращенного слоя прижимается к теплоотводу, а вывод излучения осуществляется со стороны подложки. Для вывода излучения через поглощающую подложку на арсениде галлия в  $\text{AlGaAs}$  СИД в подложке вырезается круглое отверстие и вводится оптическое волокно, как это показано на рис. 2.24, а. Такую конструкцию диода называют диодом Баррасса. Известна также конструкция диода, в которой в ущерб характеристике теплоотвода вывод излучения осуществляют из выращенного слоя. В  $\text{GaInAsP}$  СИД подложка из  $\text{InP}$  является прозрачным окном, и при выводе излучения из  $\text{GaInAsP}$  активного слоя можно и не делать специального отверстия. Область светового излучения обычно представляет собой круг диаметром 50—75 мкм. Так как площадь светового излучения большая, то для увеличения яркости излучения плотность тока должна быть высокой, в пределах от нескольких  $\text{kA/cm}^2$  до  $15 \text{ kA/cm}^2$ .

В СИД с торцевыми излучателями вывод излучения, выходящего из активного слоя, осуществляется с торца, как в полупроводниковых лазерах. Так как в этом случае генерируемое излучение при выводе наружу проходит через активный слой, то имеет место сильное самопоглощение и КПД вывода излучения не может быть таким же высоким, как у ранее рассмот-

ренного типа диодов. Поэтому применяется следующий способ: по соседству с активным слоем формируется световодный слой с малыми внутренними потерями, активный слой делается тонким, порядка 0,03—0,1 мкм. В результате свет, распространяясь в слое покрытия, имеет небольшие потери на поглощение. Кроме того, для предотвращения лазерной генерации предпринимается ряд мер: 1) увеличивается толщина активного слоя, повышается пороговая плотность тока  $J_{th}$ ; 2) формируется область, в которой отсутствует оптическое излучение; 3) на торце наносится просветляющее покрытие. Так как площадь светового излучения небольшая, размером несколько квадратных микрометров, то и оптический выход не может быть высоким. Однако по сравнению с диодами с поверхностным излучателем яркость оказывается в 5—10 раз большей.

### 2.3.2. Характеристика мощности оптического излучения

Если ток инжекции обозначить через  $I$ , то мощность оптического излучения СИД  $P$  выражается в виде

$$P = \eta_{ex} h\nu \left( \eta_{spont} \frac{I}{e} \right), \quad (2.18)$$

где  $\eta_{ex}$  — КПД вывода излучения,  $h\nu$  — энергия фотона,  $\eta_{spont}$  — КПД светового излучения,  $I/e$  — число носителей, инжектированных в активный слой в единицу времени,  $e$  — заряд электрона.

Если время жизни излучательной и безызлучательной рекомбинации обозначить соответственно через  $\tau_r$  и  $\tau_{nr}$ , то КПД светового излучения будет представляться в виде

$$\eta_{spont} = \frac{1}{1 + \tau_r/\tau_{nr}}. \quad (2.19)$$

То есть с увеличением составляющей безызлучательной рекомбинации КПД светового излучения падает\*.

В  $\eta_{ex}$  учитывается эффект уменьшения выводимого излучения за счет самопоглощения в активном слое, френелевского отражения от граней кристалла и полного внутреннего отражения. Так как  $P/h\nu$  соответствует числу излученных фотонов в единицу времени, то произведение  $\eta_{ex} \times \eta_{spont}$  выражает внешнюю квантовую эффективность. При этом внешняя квантовая эффективность в СИД с поверхностными излучателями состав-

\* Вероятность рекомбинации пропорциональна обратному времени жизни. — Прим. ред.

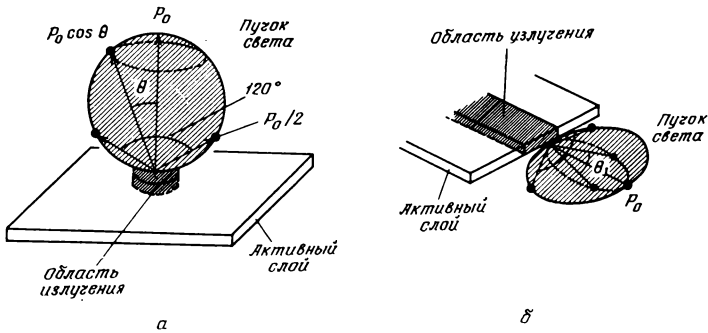


Рис. 2.25. Формы пучка излучения СИД с поверхностным излучателем (а) и с торцевым излучателем (б).

ляет около 3%, а в СИД с торцевыми излучателями — 0,5—1%, т. е. меньше по сравнению с лазерами.

Зависимость между током и мощностью оптического излучения в СИД, как видно из формулы (2.18), при постоянном  $\eta_{\text{вход}}$  носит линейный характер. Практически с увеличением тока инжекции из-за возрастания безызлучательной рекомбинации возникает нелинейность в виде выпуклости, как показано на рис. 2.1, б, которая особенно заметна в GaInAsP СИД. Причиной нелинейности являются следующие механизмы безызлучательной рекомбинации: 1) рекомбинация на границе раздела гетеропереходов, 2) утечка (просачивание) инжектированных зарядов через гетеробарьер, 3) оже-рекомбинация. В частности, в GaInAsP СИД ширина запрещенной зоны небольшая и значителен эффект Оже. Этот эффект возрастает пропорционально квадрату концентрации носителей, поэтому даже в AlGaAs СИД с уровнем легирования, большим  $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , он станет весьма значительным, что приведет к резкому уменьшению КПД светового излучения.

### 2.3.3. Эффективность связи с волоконным световодом

Спонтанное оптическое излучение СИД является изотропным. Пучок света, исходящий из поверхностного излучателя, как видно из рис. 2.25, а, имеет форму (картину поля в дальней зоне), расширяющуюся в плоскости, и для заданного угла  $\theta$  (угол между данной точкой и нормалью к светоизлучающей поверхности) может быть приближенно представлен косинусоидальной зависимостью, как в законе Ламберта. Интенсивность падает вдвое при угле  $120^\circ$ . При таких больших углах расходимости эффективность связи с волоконным световодом мала.

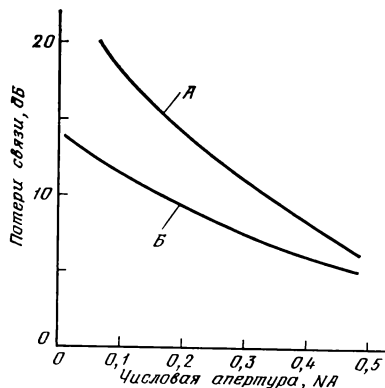


Рис. 2.26. Расчетные значения потерь при непосредственной связи СИД с оптическим волокном: А — СИД с поверхностным излучателем; Б — СИД с торцевым излучателем.

левским отражением также имеют место. В результате значение  $\eta_{\text{ex}}$  теоретически приближается к 3%.

В СИД с торцевым излучателем в направлениях, лежащих в плоскости перехода, как показано на рис. 2.25, б, имеет место расширение пучка излучения в соответствии с законом Ламберта. Вертикальное направление определяется распределением поперечных мод, поэтому угол излучения оказывается сравнительно небольшим. В связи с этим потери связи с волоконным световодом у СИД с торцевым излучателем оказываются на несколько децибел меньше по сравнению с СИД с поверхностным излучателем, как это показано на рис. 2.26. Однако абсолютные значения мощности оптического излучения, вводимые внутрь волоконного световода, оказываются небольшими, порядка 1—2 мВт, т. е. того же порядка, что и у СИД с поверхностным излучателем.

Потери связи СИД с волоконным световодом, как видно из рис. 2.26, снижаются пропорционально квадрату числовой апертуры оптического волокна. Поэтому в оптических системах передачи с использованием СИД применяется оптическое волокно с большой числовой апертурой.

Если в СИД с поверхностным излучателем диаметр  $D_1$  источника оптического излучения будет больше диаметра  $D_f$  сердцевинки оптического волокна, то потери связи будут расти пропорционально  $(D_f/D_1)^2$ , поэтому оптимальным является  $D_1 \leq D_f$ . Кроме того, эффективность связи можно улучшить путем использования линз. Если диаметр источника оптического излучения сделать меньше диаметра сердцевинки оптического

Поэтому при мощности оптического излучения 2—5 мВт ввод в волокно даже при использовании линз оказывается порядка 100—300 мкВт.

Так как в СИД с поверхностным излучателем имеет место непосредственное оптическое излучение, то никаких проблем, связанных с вторичным поглощением в активном слое, здесь не возникает. Однако из-за большого угла излучения заметную роль приобретает составляющая, обусловленная полным отражением от границы раздела с кристаллом (критический угол около  $17^\circ$ ). Потери, обусловленные френе-

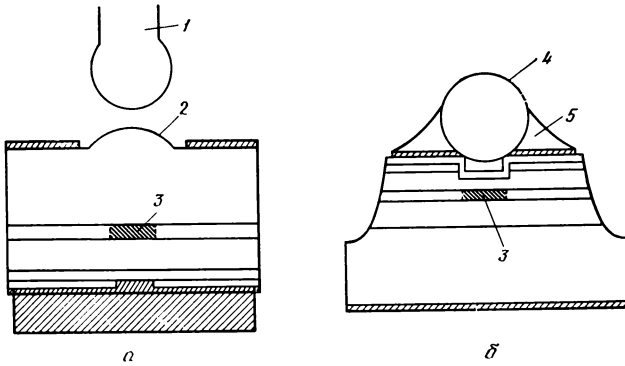


Рис. 2.27. Типы СИД с линзами: 1 — оптическое волокно; 2 — линза из InP; 3 — область оптического излучения; 4 — сферическая линза; 5 — эпоксидная смола.

волокна, использовать линзу с кратностью увеличения  $M = D_f/D_1$  и увеличить диаметр светового пучка до диаметра сердцевины, то эффективность связи окажется максимальной и приближенно будет представляться следующими выражениями:

$$\eta_f = \begin{cases} M^2 \cdot NA^2 & \text{(волокно со ступенчато-изменяющимся} \\ & \text{показателем преломления)} \\ \frac{1}{2} M^2 \cdot NA^2 & \text{(волокно с распределенным показате-} \\ & \text{лем преломления).} \end{cases} \quad (2.20)$$

Так как  $M=1$  соответствует случаю отсутствия линзы, то из вышеприведенных формул видно, что эффективность связи возрастает пропорционально квадрату кратности увеличения линзы. На рис. 2.27, а и б приведены конструкции СИД, в которых используется вышеописанный линзовый эффект.

Таким образом, с точки зрения оптической связи желательно иметь СИД с небольшим диаметром источника оптического излучения.

### 2.3.4. Ширина спектральной полосы

Если предположить, что в распределении инжектированных носителей внутри энергетической зоны наибольший вклад в излучение СИД вносят носители в энергетической полосе шириной  $3kT$ , тогда полная ширина спектральной полосы на полувысоте будет иметь вид

$$\Delta\lambda = \frac{3kT}{hc} \lambda^2, \quad (2.21)$$

где  $h$  — постоянная Планка,  $k$  — постоянная Больцмана,  $T$  — абсолютная температура.

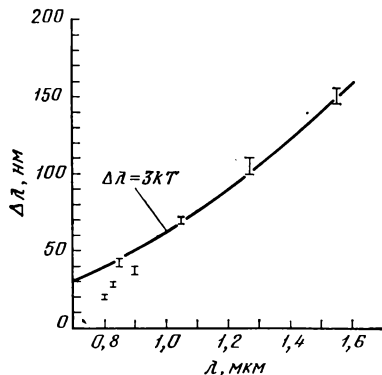


Рис. 2.28. Зависимость ширины спектральной полосы  $\Delta\lambda$  на полувысоте от длины волны  $\lambda$  (сплошная линия соответствует расчетным значениям).

На рис. 2.28 представлена зависимость между шириной спектральной полосы и длиной волны излучения, при этом сплошной линией представлена кривая, рассчитанная по вышеприведенной формуле. Как видно из рисунка, данные расчета и эксперимента совпадают. Так, для GaInAsP СИД на длине волны 1,3 мкм  $\Delta\lambda$  составляет 100—110 нм, а для AlGaAs СИД на длине волны 0,85 мкм  $\Delta\lambda$  оказывается равной 30—45 нм.

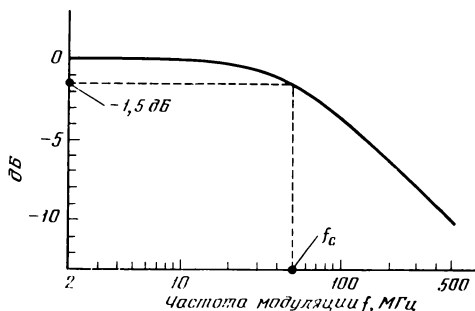


Рис. 2.29. Модуляционная характеристика СИД. Ось ординат соответствует значениям  $|L_m(\omega)/L_m(0)|$  в децибелах.

### 2.3.5. Модуляционная характеристика

Модуляция интенсивности излучения в СИД осуществляется путем модуляции тока инжекции, причем полоса модуляции\* ограничивается временем жизни инжектированных носителей. Промодулированная мощность оптического излучения описывается следующим выражением:

$$L_m(\omega) = \frac{L_m(0)}{\sqrt{1 + (2\pi\tau_s f)^2}}. \quad (2.22)$$

На рис. 2.29 приведена модуляционная характеристика СИД.

Полоса модуляции обычно определяется по частоте, на которой обнаружительная способность ( $\sim L_m^2(\omega)/L_m^2(0)$ ) уменьшается вдвое, другими словами, когда имеет место следующее соотношение:

$$f_c = \frac{1}{2\pi\tau_s} = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{1}{\tau_r} + \frac{1}{\tau_{Nr}} \right), \quad (2.23)$$

\* Под полосой модуляции здесь и далее подразумевается верхняя граничная частота модуляционной характеристики. — *Прим. ред.*



При модуляции на частоте, превышающей  $f_c$ , концентрация носителей в активном слое меняется не только в зависимости от времени жизни носителей  $\tau_s$ , поэтому модуляционная чувствительность, как показано на рис. 2.29, будет падать. Далее, следует обратить внимание на то, что в соответствии с вышеприведенной формулой полоса модуляции определяется влиянием двух составляющих: излучательной и безызлучательной рекомбинациями.

Составляющая излучательной рекомбинации  $1/\tau_r$  пропорциональна сумме концентраций легирующей примеси  $p_0$  и инжектированных носителей  $n$  и выражается следующей формулой:

$$\frac{1}{\tau_r} = B(p_0 + n), \quad (2.24)$$

где  $B$  — коэффициент рекомбинации.

Если здесь положить  $n = \tau_r J / ed$ , то время жизни  $\tau_r$  можно представить как функцию концентрации легирующей примеси  $p_0$  и плотности тока инжекции  $J$ :

$$\frac{1}{\tau_r} = \frac{2J/ed}{[p_0^2 + 4J/edB]^{1/2} - p_0}. \quad (2.25)$$

В активном слое  $n$ -типа вместо  $p_0$  в этой формуле будет  $n_0$ .

При незначительной безызлучательной рекомбинации полоса модуляции определяется формулой (2.25), т. е. она является функцией  $p_0$ ,  $J$  и  $d$ . Значение  $B$  определяется экспериментально и оказывается равным  $5 \cdot 10^{-11} - 2 \cdot 10^{-10}$  см<sup>-3</sup>/с. На рис. 2.30 приведены рассчитанные полосы модуляции при  $B = 10^{-10}$  см<sup>3</sup>/с. При небольшой концентрации примесей в активном слое полоса модуляции возрастает пропорционально  $\sqrt{J/d}$ . В этом случае  $f_c$  приближенно определяется выражением

$$f_c \approx \sqrt{\frac{BJ}{ed}}. \quad (2.26)$$

Для обеспечения быстродействия следует либо увеличивать ток инжекции, либо уменьшать толщину активного слоя СИД. Однако плотность тока  $J$  из-за теплового излучения обычно не превышает 15 кА/см<sup>2</sup>. Это значение в СИД с диаметром источника излучения 50 мкм и толщиной  $d = 1$  мкм соответствует току  $I \approx 300$  мА. Частота  $f_c$  при этом равна 50 МГц.

С другой стороны, при высокой концентрации примеси полоса модуляции расширяется. В этом случае, как видно из рис. 2.30, зависимость  $f_c$  от  $J/d$  исчезает и  $f_c \approx (B/2\pi)p_0$ . На рис. 2.31 показана зависимость между  $f_c$  и концентрацией примеси. Если концентрация примеси  $p_0 \geq 10^{19}$  см<sup>-3</sup>, то быстродействие СИД может достичь частот порядка нескольких сотен МГц.

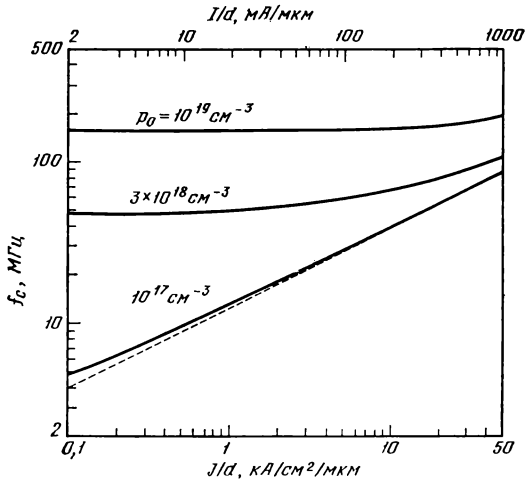


Рис. 2.30. Зависимость полосы модуляции от плотности тока инжекции. Пунктирная кривая получена на основании формулы (2.26):  $B=10^{-10}$  см<sup>3</sup>/с;  $d$  — толщина активного слоя; диаметр источника излучения 50 мкм.

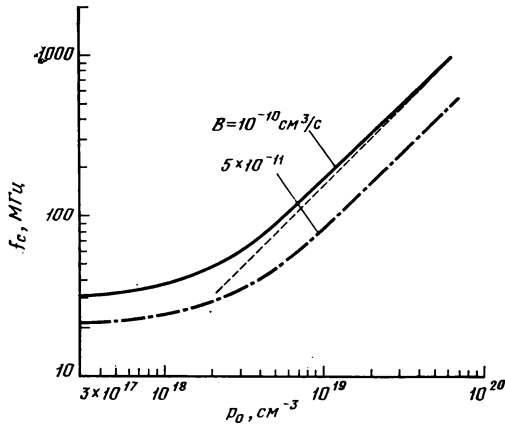


Рис. 2.31. Зависимость полосы модуляции  $f_c$  от концентрации примеси  $\rho_0$  ( $J/d=5$  кА/см<sup>2</sup>/мм; пунктирная линия построена по приближенной формуле  $f_c \approx (B/2\pi)\rho_0$ ).

Однако с повышением концентрации примеси возникают проблемы, связанные с резким возрастанием безызлучательной рекомбинации и уменьшением КПД источника излучения. Имеется сообщение о том, что при использовании Ge в качестве примеси значение произведения  $f_c \cdot \eta_{\text{спон}}$ , которое может быть названо

показателем добротности, достигает максимума при концентрации примеси  $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ .

Приведенная на рис. 2.32 зависимость максимальной мощности излучения от полосы модуляции для реальных СИД с поверхностными излучателями показывает, что в быстродействующих диодах с увеличением полосы мощность излучения резко падает. Поскольку в СИД и эффективность связи с волокном также оказывается низкой, то стремление иметь по возможности большую мощность излучения, приводит к изготовлению таких диодов, в которых  $f_c$  составляет несколько десятков мегагерц.

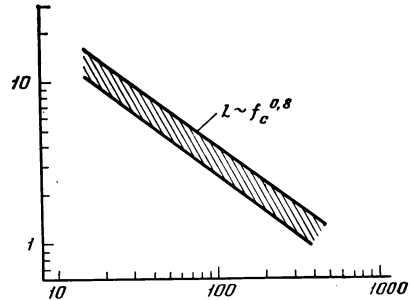


Рис. 2.32. Зависимость между максимальной мощностью излучения  $L$ , мВт и полосой модуляции  $f_c$ , МГц ( $I = 300 \text{ мА}$ ,  $D_1 = 50 \text{ мкм}$ ).

## 2.4. Индикаторные СИД и СИД большой мощности излучения

Индикаторный светодиод, как показано на рис. 2.33, представляет собой конструкцию, размещенную внутри линзообразной эпоксидной смолы (компаунда). Эффективный вывод излучения осуществляется с помощью отражательной пластины. Такие СИД в большинстве случаев применяются как миниатюрные элементы индикации в виде точек и цифр. Простая структура кристалла с *pn*-переходом обеспечивает низкую стоимость индикаторных СИД, которая является одним из важнейших предъявляемых к ним параметров.

Для индикации используется видимый свет. Как видно из таблицы 2.2, в настоящее время разработаны или имеются на рынке СИД с видимым излучением от зеленого до красного цвета. Цвет излучения определяется применяемым материалом: GaP (красный, желтый, а также зеленый), GaAs<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub> (красный, оранжевый), Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As (красный), GaN (голубой) и так далее.

Механизм излучения различен в двух случаях, приведенных на рис. 2.34: когда инжектированный электрон рекомбинирует непосредственно с дыркой и когда инжектированный электрон рекомбинирует с дыркой после захвата на центр люминесценции (центр рекомбинации). Так как в полупроводниках с непрямыми переходами типа GaP вероятность рекомбинационно-

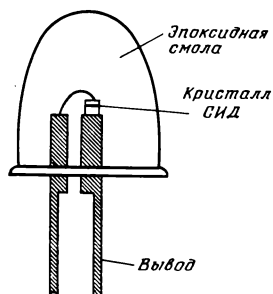


Рис. 2.33. Конструкция индикаторного СИД.

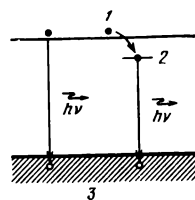
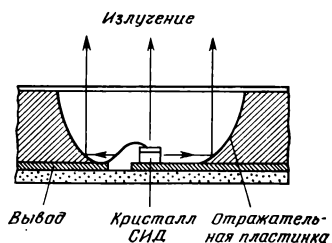


Рис. 2.34. Механизм излучения в СИД (область излучения  $p$ -типа): 1 — зона проводимости; 2 — центр люминесценции (излучения); 3 — валентная зона.

го излучения, вызванного межзонным переходом, мала, то для повышения КПД источника излучения часто применяется введение примеси азота, цинка, кислорода, становящихся центрами люминесценции (излучения).

В GaP СИД красного свечения длина волны, соответствующая максимуму и равная 700 нм, определяется рекомбинационным излучением экситонов, захваченных нейтральной парой примесной пары цинк — кислород, замещающих соседние узлы решетки GaP. Если при выращивании кристалла в водородную газовую среду осуществлять инжекцию  $\text{NH}_3$ , т. е. вводить примесь азота, то получается GaP СИД зеленого свечения. Азот в кристалле замещает фосфор и представляет собой нейтральную примесь. Однако из-за большого электронного сродства происходит захват электрона, под действием кулоновских сил захваченного электрона происходит захват дырки и возникает экситон. Зеленый цвет свечения обусловлен рекомбинацией этих экситонов, а длина волны, соответствующая максимуму зеленого цвета свечения, равна 565 нм. Химические элементы такой же природы как элементы кристалла, будучи центрами излучения, называются изоэлектронными ловушками. GaP СИД чисто зеленого цвета излучения длиной волны 555 получается путем улучшения метода выращивания кристалла. В этом случае примесь азота не вводится, а используется рекомбинационное излучение межзонного перехода.

Резкое повышение вероятности рекомбинационного излучения при наличии центра излучения в полупроводниках с непрямыми переходами заключается в том, что когда электроны захватываются на центр излучения, то они локализируются в его окрестности. В пространстве импульсов такие электронные состояния будут содержать широкую область волновых чисел,

Таблица 2.2

Типы индикаторных светодиодов

Цвет	Материал	Подложка	Пиковая длина волны*, нм	Внешняя квантовая эффективность, %	КПД источника излучения, лм/Вт
Красный	GaP: Zn, O	GaP	700	2~4	0,4~0,8
Красный	Ga <sub>0,65</sub> Al <sub>0,35</sub> As	GaAs	665	1~2	0,4~0,7
Красный	GaAs <sub>0,6</sub> P <sub>0,4</sub>	GaAs	650	0,2	0,15
Оранжевый	GaAs <sub>0,35</sub> P <sub>0,65</sub> : N	GaP	630	0,2~0,3	0,38
Желтый	GaAs <sub>0,15</sub> P <sub>0,85</sub> : N	GaP	590	0,12	0,66
Желтый	GaP: N	GaP	590	0,1	0,45
Зеленый	GaP: N	GaP	565	0,4	(0,3~) 2,4
Чисто зеленый	GaP	GaP	565	0,1	0,7
Голубой	GaN (МДП-структура)	Сапфир	490	3·10 <sup>-4</sup>	1,3·10 <sup>-3</sup>
Голубой	SiC	SiC	480	1·10 <sup>-4</sup>	1,4·10 <sup>-6</sup>
Голубой	ZnSe (МДП-структура)	ZnSe	465(?)		0,49·10 <sup>-3</sup>
Голубой	ZnS (МДП-структура)	ZnS	456	5·10 <sup>-4</sup>	2,5·10 <sup>-3</sup>

\* Длина волны светового излучения, соответствующая максимуму спектральной характеристики излучения СИД.

включая окрестность точки Г, как показано на рис. 2.35. Поэтому появляется составляющая прямого перехода, в которой удовлетворяется правило отбора по волновому числу и повышается вероятность перехода\*.

В GaAs<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub> СИД в области прямого перехода при x=0,4 КПД источника излучения оказывается максимальным, а длина волны, соответствующая максимуму, — равной 650 нм. При x>0,45 увеличивается ширина запрещенной зоны, образуется непрямозонный полупроводник, поэтому КПД источника излучения повышают путем введения примеси азота. В GaAs<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub>: N СИД, изменяя значения x, можно непрерывно менять цвет свечения от красного до зеленого.

\* Волновую функцию глубокого центра в полупроводнике можно представить в виде суперпозиции блоховских волн. Тогда вероятность рекомбинационного перехода в состояние с волновым вектором k будет пропорциональна квадрату амплитуды при соответствующей блоховской волне. — Прим. ред.

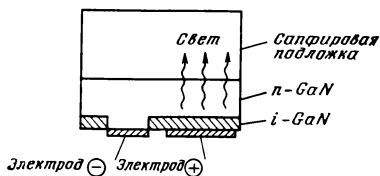
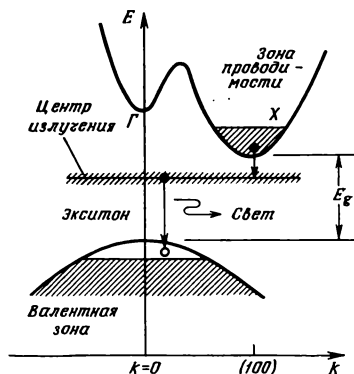


Рис. 2.36. GaN СИД с МДП-структурой.

←  
Рис. 2.35. Безызлучательная рекомбинация с участием центра излучения.

В  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  СИД при  $x=0,35$  образуется полупроводник с прямыми переходами с красным цветом свечения длиной волны 665 нм.

Для светодиодов синего цвета свечения требуются материалы с очень большой шириной запрещенной зоны. К ним относятся кристаллы  $\text{ZnSe}$ ,  $\text{ZnS}$  II—VI групп,  $\text{GaN}$ ,  $\text{SiC}$  и др. Обычно при увеличении ширины запрещенной зоны из-за эффекта автокомпенсации в большинстве случаев не удается получить кристалла  $p$ -типа. Поэтому изготавливают СИД с МДП-структурой, как показано на рис. 2.36. Длина волны излучения для  $\text{GaN}$  равна 490 нм, для  $\text{ZnS}$  — 456 нм. В  $\text{SiC}$  СИД с  $pn$ -переходом длина волны излучения составляет 490 нм. Во всех случаях

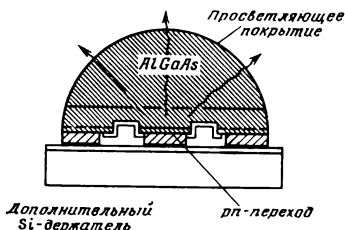


Рис. 2.37. Конструкция светодиода большой мощности.

КПД источника излучения оказывается низким, порядка  $10^{-3}$ . В последнее время внимание исследователей привлекает СИД с  $pn$ -переходом на  $\text{ZnSe}$ .

В светодиоде большой мощности излучения, как показано на рис. 2.37, на слой  $\text{AlGaAs}$ -диафрагмы, сошлифованной в виде полусферы, наносят неотражающее покрытие с целью повышения КПД вывода излучения из расположенного в средней части  $pn$ -перехода. В этой конструкции внешний квантовый

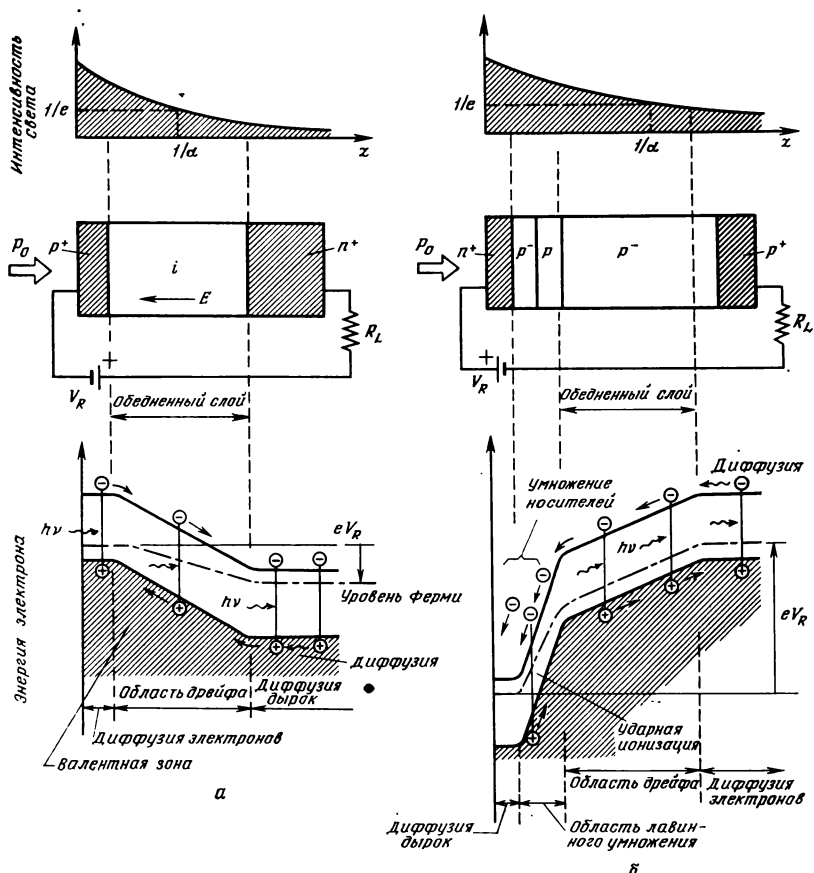


Рис. 238. Принцип действия p-i-n-ФД (а) и ЛФД (б).  $E$  — электрическое поле;  $P_0$  — падающий свет;  $eV_R$  — приложенное напряжение. Интенсивность света изменяется по закону  $P_0(1-R)e^{-\alpha z}$ .

выход составляет 15—25%, мощность излучения при непрерывном режиме работы равна 30—70 мВт, быстродействие — порядка 10 нс.

## 2.5. Фотоприемники

### 2.5.1. Лавинный и p-i-n-фотодиоды

В быстродействующих фотоприемниках с полосой частот до нескольких гигагерц применяются фотодиоды (ФД) с p-i-n-структурой и лавинные фотодиоды (ЛФД).

ФД с *pin*-структурой состоит, как показано на рис. 2.38, а, из  $n^+$ -подложки, слаболегированного слоя (*i*-слоя) и тонкого  $p^+$ -слоя толщиной до 0,3 мкм. При приложении обратного смещения обедненный слой распространяется на весь *i*-слой собственной проводимости. В результате уменьшается емкость перехода, расширяется область поглощения света и повышается чувствительность ФД. Падающий свет, затухая по экспоненциальному закону в зависимости от значения коэффициента поглощения  $\alpha$ , вызывает появление фотовозбужденных носителей заряда. Фотовозбужденные носители, появившиеся в обедненном слое, ускоряются электрическим полем обедненного слоя ( $\geq 10^3$  В/см) до скорости насыщения дрейфа ( $\sim 10^7$  см/с). Эту область называют областью дрейфа. Так как фотовозбужденные носители за пределами обедненного слоя в  $p^+$ - и  $n^+$ -слоях движутся за счет диффузии, то их скорость движения, равная  $\approx 10^4$  см/с, оказывается на три порядка ниже скорости дрейфа. Этот диффузионный ток является причиной ухудшения быстродействия ФД, которое проявляется в виде «хвоста» импульсной характеристики. Поскольку эти фотовозбужденные носители перемещаются на расстояние порядка диффузионной длины и рекомбинируют, то тем самым уменьшается квантовый выход. Чтобы одновременно удовлетворить требованиям быстродействия и высокого квантового выхода, необходимо, чтобы область поглощения света находилась в обедненном слое. Для этого при проектировании фотодиода делают  $p^+$ -слой как можно тоньше, а толщину *i*-слоя выбирают большей длины поглощения света (величина  $1/\alpha$ ). При этом, как показано на рис. 2.39, длина поглощения для кремния на длине волны 0,8 мкм составляет 10—20 мкм, а величина рабочего напряжения, необходимая для получения достаточно широкого обедненного слоя, оказывается сравнительно низкой — порядка 10—20 В.

В ЛФД обедненный слой, возникающий при приложении обратного напряжения, также необходимо рассматривать как область поглощения света; однако для создания ударной ионизации с помощью фотовозбужденных носителей рядом с *pn*-переходом создают область с высоким значением напряженности электрического поля (более  $10^5$  В/см), которую рассматривают как область лавинного умножения. Если фотовозбужденные носители, возникшие в результате поглощения света в области дрейфа, инжектировать в область лавинного умножения, то под действием непрерывной ударной ионизации возникнет лавинное умножение фотовозбужденных носителей. Обычно ЛФД, благодаря эффекту лавинного умножения, обладают большей чувствительностью по сравнению с обычными ФД. Если напряжение смещения обозначить через  $V$ , а напряжение пробоя — через  $V_b$ , то коэффициент умножения  $M$  приближенно может быть



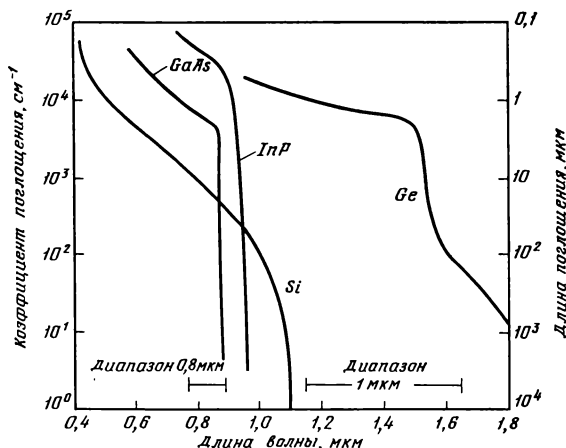


Рис. 2.39. Зависимости коэффициента поглощения и длины поглощения от длины волны.

представлен эмпирической формулой Миллера:

$$M = \frac{1}{1 - (V/V_B)^n} \quad (n = 2 \sim 6). \quad (2.27)$$

Он принимает различные значения в зависимости от напряжения смещения. При  $V \approx V_B$  с повышением напряжения происходит резкое увеличение коэффициента умножения, который может принимать высокие значения порядка  $M = 1000$ . С другой стороны, коэффициент умножения сильно изменяется при изменении напряжения и температуры, что является недостатком. При этом температурный коэффициент изменений напряжения пробоя составляет  $\approx 0,2\% / ^\circ\text{C}$ . В схеме смещения ЛФД необходимо предусмотреть меры, которые бы устраняли влияние этих изменений.

На рис. 2.40 приведены конструкции ЛФД и *pin*-ФД. Эти конструкции могут изменяться в зависимости от свойств материалов. Для предотвращения отражения света от поверхности все ФД покрываются просветляющей пленкой. Защитное кольцо по периметру *pn*-перехода служит для повышения напряжения пробоя, предупреждения локального лавинного пробоя (микроплазмы) и осуществления равномерного лавинного усиления. В кремниевом ЛФД из-за расширения обедненного слоя до 20 мкм и более рабочее напряжение падает. Поэтому область обедненного слоя формируют в виде *p*<sup>-</sup>( $\pi$ )-слой низкой концентрации, а лавинную область, требующую большой напряженности электрического поля, — как *p*-слой с высо-

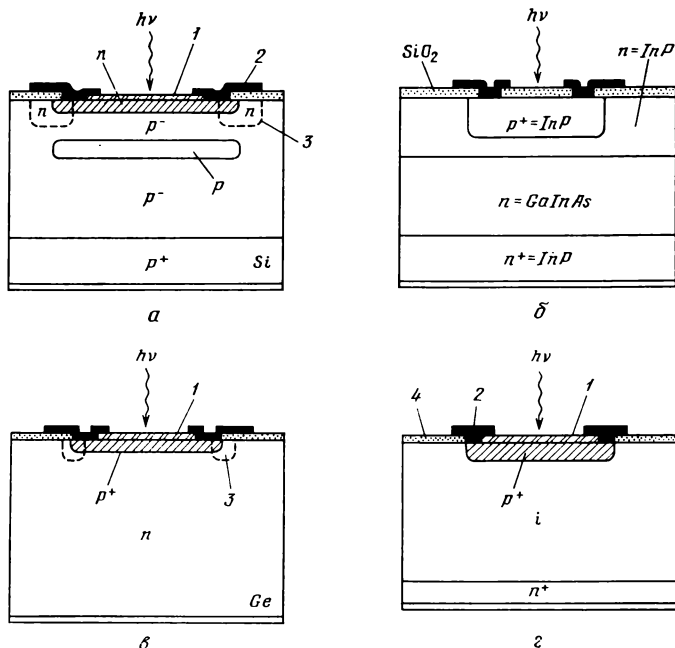


Рис. 2.40. Конструкция ЛФД и *pin*-ФД: *а* — кремниевый ЛФД; *б* — GaInAs-ЛФД; *в* — германиевый ЛФД; *г* — *pin*-ФД. 1 — просветляющая пленка; 2 — электрод (омический контакт); 3 — защитное кольцо; 4 — изоляция.

кой концентрацией носителей. На рис. 2.40, *а* приведена конструкция ЛФД со структурой  $n^+p^+prp^+$  и  $n^+prp^+$ . В первом случае умеренным сдерживанием напряженности электрического поля в области лавинного умножения оказывается возможным получить широкий обедненный слой с высоким квантовым выходом. При этом напряжение пробоя оказывается низким, а быстродействие — высоким. Например, при  $V_B = 100\text{--}150\text{ В}$  быстродействие оказывается равным приблизительно 300 пс. В Ge, как видно из рис. 2.39, на длинах волн, меньших 1,5 мкм, значение  $\alpha$  оказывается высоким и равным  $10^4\text{ см}^{-1}$ , а длина поглощения становится ниже нескольких микрометров. Поэтому в Ge ЛФД не требуется широкого обедненного слоя, как в Si ЛФД, и он может быть выполнен в виде простой  $p^+n$ -структуры, как показано на рис. 2.40, *в*. Однако на длинах волн, близких к 1,55 мкм,  $\alpha$  уменьшается и возникает необходимость в расширении обедненного слоя, поэтому ФД изготавливают в виде  $p^+n$ -структуры. Напряжение пробоя при этом составляет порядка 30 В, а быстродействие — порядка 200—250 пс. В GaInAs ЛФД *pn*-переход отделен от области погло-

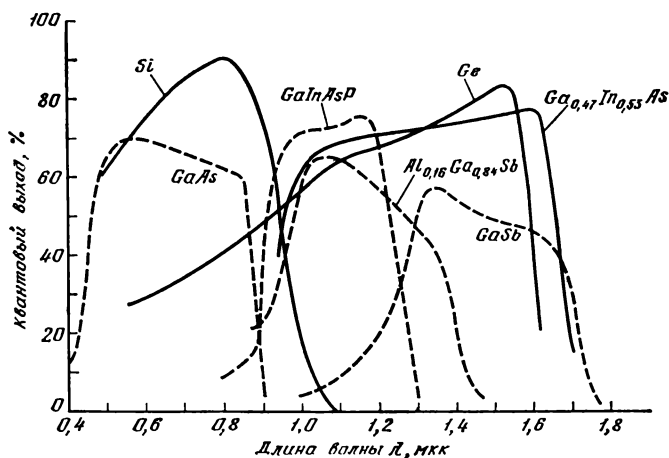


Рис. 2.41. Характеристика спектральной чувствительности фотоприемника.

нения света и сформирован внутри слоя InP-диафрагмы. Лавинное умножение осуществляют внутри InP. Это связано с тем, что в *pn*-переходе в GaInAs легко возникает туннельный пробой. Диапазон воспринимаемых длин волн лежит в пределах 0,95—1,65 мкм, а квантовый выход составляет 70—80%.

### 2.5.2. Характеристика спектральной чувствительности

Если мощность оптического излучения обозначить через  $p_0$  то число падающих фотонов будет равно  $p_0/h\nu$ , а число носителей, возбужденных этими квантами света, составит  $I_{p0}$ , где  $I_{p0}$  — фототок. Следовательно, если квантовый выход обозначить через  $\eta$ , то

$$I_{p0} = \eta \cdot \frac{e}{h\nu} p_0. \quad (2.28)$$

Квантовый выход  $\eta$  представляется в виде следующего простого выражения:

$$\eta = (1 - R)(1 - e^{-\alpha L_a}), \quad (2.29)$$

где  $L_a$  — ширина области поглощения света.

По мере уменьшения коэффициента отражения от поверхности кристалла и увеличения ширины области поглощения света по сравнению с длиной поглощения повышается квантовый выход. На рис. 2.41 приведен пример спектральной чувствительности фотоприемника. Граница чувствительности в обла-

сти больших длин волн определяется шириной запрещенной зоны материала  $E_g$ , а падение чувствительности в области коротких волн объясняется уменьшением длины поглощения, поглощением света вблизи поверхности и возрастанием потерь за счет поверхностной рекомбинации фотовозбужденных носителей. При наличии слоя диафрагмы с большим значением ширины запрещенной зоны, как, например, в GaInAs ЛФД, можно получить почти постоянную чувствительность вплоть до края поглощения в слое диафрагмы.

### 2.5.3. Быстродействие

Быстродействие ограничено временем пробега фотовозбужденных носителей и постоянной времени  $RC$ -цепочки. В области дрейфа скорость дрейфа достигает  $\sim 10^7$  см/с, так что время пробега при ширине обедненного слоя 100 мкм оказывается небольшим, около 1 нс. При ширине несколько десятков микрометров и ниже получается быстродействие порядка нескольких ГГц. Электростатическая емкость определяется суммой паразитной емкости корпуса и емкости перехода, зависящей от диаметра фотоприемной части и обедненного слоя. Она составляет 1—2 пФ. Следовательно, если сопротивление нагрузки положить равным 50 Ом, то постоянная времени  $RC$ -цепочки будет составлять 50—100 пс. Однако при увеличении сопротивления нагрузки с целью повышения отношения сигнал/шум происходит снижение быстродействия.

В дополнение к этому следует заметить, что в ЛФД быстродействие ограничивается также временем пробега в области лавинного пробоя  $\tau_{eff}$  и коэффициент умножения  $M(f)$  принимает вид

$$M(f) = \frac{M_0}{\sqrt{1 + (2\pi f M_0 \tau_{eff})^2}}, \quad (2.30)$$

где  $M_0$  — коэффициент умножения при постоянном токе.

Ширина полосы  $f_c$ , при которой  $M^2(f) = M_0^2/2$ , равняется

$$f_c = \frac{1}{2\pi \tau_{eff} M_0}, \quad (2.31)$$

и уменьшается обратно пропорционально коэффициенту умножения. В кремниевом ЛФД при  $M=100$   $f_c$  оказывается порядка 1,5 ГГц. Произведение  $\tau_{eff} M_0$  можно рассматривать как время нарастания коэффициента умножения, необходимое для достижения им значения  $M_0$  в результате повторяющейся ударной ионизации.

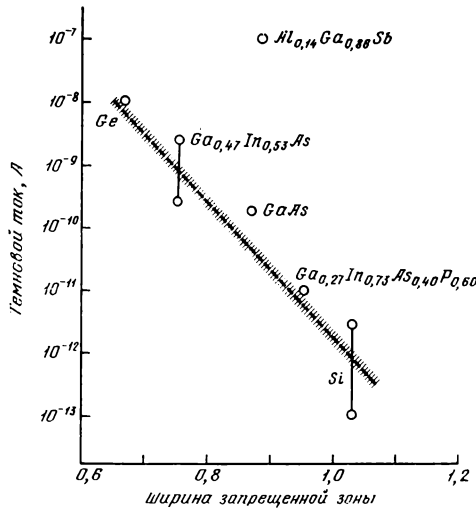


Рис. 2.42. Темновой ток фотоприемников (площадь фотоприемной части  $4 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2$ ) в зависимости от ширины запрещенной зоны  $E_g$ , эВ.

### 2.5.4. Темновой ток и шум лавинного умножения

Ток, протекающий в фотоприемнике независимо от фототока, называется темновым током. Темновой ток представляет собой сумму обратного тока  $I_d$ , протекающего через переход, и тока поверхностной утечки  $I_{SL}$ . Так как темновой ток вызывает дробовой шум и тем самым ухудшает отношение сигнал/шум, то желательно, чтобы он был возможно меньшим. На рис. 2.42 приведены зависимости измеренных значений темнового тока от ширины запрещенной зоны материала в области поглощения, полученные для различных фотоприемников. Из рисунка видно, что при увеличении ширины запрещенной зоны уменьшается составляющая  $I_d$ , и поэтому темновой ток резко падает.

Дробовой шум возникает при образовании фотоносителей за счет поглощения квантов света, а также в процессе лавинного умножения в ЛФД. Поэтому среднеквадратичное значение полного тока фотоприемника, обусловленного дробовым шумом, будет представляться в виде

$$\bar{i}_s^2 = 2e [(I_{p0} + I_d) M^2 F(M) + I_{SL}] B_f, \quad (2.32)$$

$F(M)$  определяется по формуле Макинтайра

$$F(M) = M \left[ 1 - (1 - k) \left( \frac{M - 1}{M} \right)^2 \right], \quad (2.33)$$

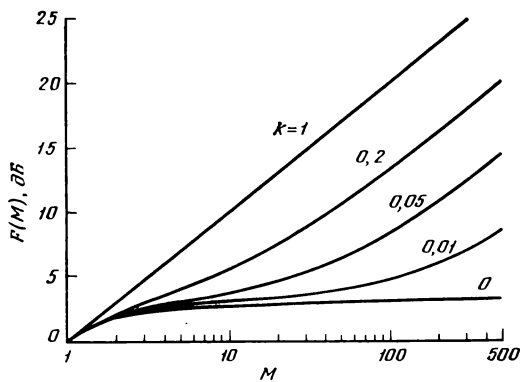


Рис. 2.43. Зависимость коэффициента шума лавинного умножения  $F(M)$  от коэффициента умножения  $M$ .

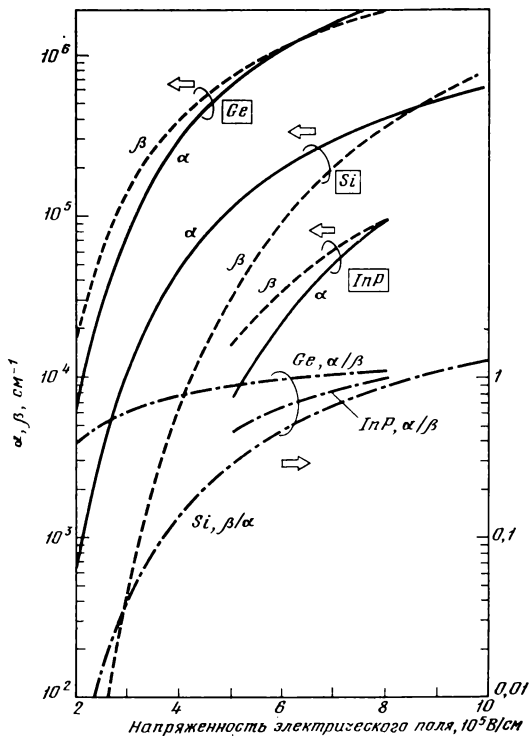


Рис. 2.44. Зависимость коэффициента ионизации электронов  $\alpha$ , коэффициента ионизации дырок  $\beta$  и их отношения  $k$  от напряженности электрического поля.

где  $F(M)$  — коэффициент шума лавинного умножения (коэффициент избыточного шума),  $B_f$  — ширина полосы пропускания усилителя,  $k$  — отношение коэффициентов ионизации электронов и дырок; знаменатель представляет собой коэффициент ионизации носителей, инжектированных в область лавинного умножения. В случае фотодиода в вышеприведенной формуле можно положить  $M=1$ .

Так как в процессе лавинного умножения число столкновений ограничено, то коэффициент лавинного умножения достигает некоторого предельного значения, а статистический разброс числа столкновений проявляется в виде дробового шума (шума лавинного умножения). Величина шума лавинного умножения определяется  $F(M)$ . На рис. 2.43 приведены характеристики  $F(M)$ , вычисленные по формуле (2.33), из которых видно, что  $F(M)$  возрастает с увеличением коэффициента лавинного умножения, но в целом имеет более низкий уровень в материалах с меньшим значением отношения коэффициентов ионизации. Поэтому для уменьшения шума необходимо, чтобы разность между коэффициентом ионизации электронов  $\alpha$  и коэффициентом ионизации дырок  $\beta$  была по возможности большей и чтобы носители, инжектированные в область лавинного умножения, обладали большим коэффициентом ионизации. На рис. 2.44 приведены зависимости коэффициентов ионизации  $\alpha$ ,  $\beta$  и отношения  $k$  — коэффициентов ионизации носителей, инжектированных в Si, Ge и InP, от напряженности электрического поля. В кремнии область лавинного умножения формируется инжекцией электронов в  $p$ -область при  $\alpha > \beta$ . Коэффициенты ионизации  $\alpha$ ,  $\beta$  сильно зависят от напряженности электрического поля. Кроме того, по мере снижения напряженности разность между  $\alpha$  и  $\beta$  возрастает. Поэтому для уменьшения шума желательно иметь умеренно низкую напряженность электрического поля области лавинного умножения.

В кремнии темновой ток небольшой, порядка  $10^{-12}$  А, и при  $k$  в пределах 0,05—0,1 шум лавинного умножения тоже невелик. Ge ЛФД в области больших длин волн характеризуется большим значением темнового тока, значением  $k$ , близким к единице, а также большим шумом лавинного умножения. Все это ограничивает возможность уменьшения уровня шума. Поэтому в настоящее время ведется разработка GaInAs ЛФД, в которых значение  $k$  примерно такое, как у InP.

### 2.5.5. Отношение сигнал/шум

Максимальное значение напряжения сигнала составляет  $(2I_{p0}M)^2R$ . Если через  $F_i$  обозначить коэффициент шума усилителя, то получим следующее выражение для отношения сиг-

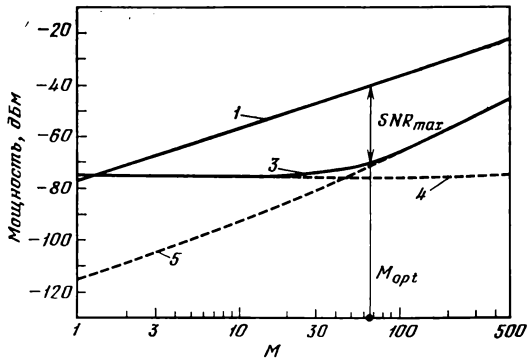


Рис. 2.45. Зависимости мощности выходного сигнала и мощности шумов от коэффициента умножения  $M$  в лавинном фотодиоде ( $\lambda=0,85$  мкм,  $R=50$  Ом,  $I_d=I_{SL}=0$ ,  $P_0=-30$  дБм,  $F_t=5$ ,  $B_f=400$  МГц,  $k=0,1$ ): 1 — мощность сигнала  $\sim M^2$ ; 2 —  $SNR_{max}$  (максимальное значение отношения сигнал/шум); 3 — суммарная мощность шумов; 4 — мощность теплового шума; 5 — мощность дробового шума  $\sim M^2F$ .

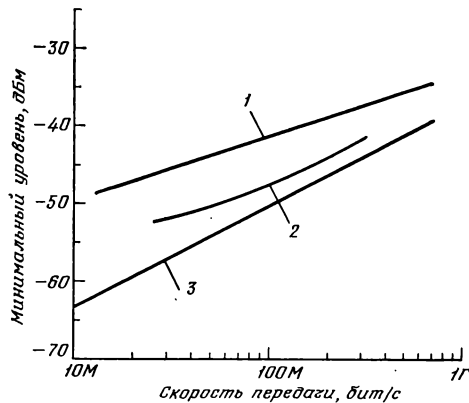


Рис. 2.46. Минимальный уровень принимаемого сигнала различных фотоприемников (частота ошибок по битам  $BER=10^{-9}$ ): 1 — на германиевом лавинном фотодиоде (1,3 мкм); 2 — на GaInAs-полевом транзисторе с *pin*-структурой (1,3 мкм); 3 — на кремниевом лавинном фотодиоде (0,83 мкм).

нал/шум:

$$\frac{S}{N} = \frac{(2I_{p0}M)^2 \cdot R}{2e[(I_{p0} + I_d) M^2 F(M) + I_{SL}] B_f R + 4k_B T B_f F_t}, \quad (2.34)$$

где  $4k_B T B_f F_t$  представляет собой тепловой шум.

На рис. 2.45 приведены примеры изменения мощности сигнала и мощности различных шумов в зависимости от коэффициента умножения  $M$ . При небольших значения коэффициента



умножения  $M$  дробовой шум лавинного умножения меньше теплового шума. Поэтому с увеличением коэффициента умножения сигнал будет расти, а шум будет оставаться почти неизменным, благодаря чему при умножении будет улучшаться отношение сигнал/шум. С другой стороны, если при увеличении коэффициента умножения, дробовой шум лавинного умножения превысит тепловой шум и достигнет большой величины, которая зависит к тому же от коэффициента умножения, то дальнейшее увеличение коэффициента умножения приведет к ухудшению отношения сигнал/шум. При равенстве дробового и теплового шумов имеет место оптимальный коэффициент умножения  $M_{\text{opt}}$ , при котором отношение сигнал/шум является максимальным. Для получения в ЛФД оптимального коэффициента умножения  $M = M_{\text{opt}}$  обычно пользуются регулировкой напряжения смещения. Минимальный уровень принимаемого сигнала в фотоприемнике определяют в виде средней мощности оптического излучения, попадающей в фотоприемник и необходимой для получения отношения сигнал/шум с вероятностью ошибки  $10^{-9}$ , равного 21,59 дБ. Значения минимального уровня сигнала можно рассчитать по формулам (2.28) и (2.34). На рис. 2.46 приведены минимальные уровни принимаемого сигнала для различных фотоприемников, применяемых в настоящее время. В фотоприемнике на Ge ЛФД из-за высокого уровня шума минимальный уровень принимаемого сигнала также оказывается высоким. В фотоприемнике на GaInAs полевом транзисторе с *pin*-структурой, представляющем собой комбинацию фотодиода с *pin*-структурой и малошумящего полевого транзистора, можно получить минимальный уровень принимаемого сигнала, лучший, чем в фотоприемнике на Ge ЛФД в полосе шириной несколько сотен МГц.

## Компоненты оптических схем и световоды

Основными частями оптической линии связи являются: светоизлучающее устройство, преобразующее электрический сигнал в оптический (полупроводниковый лазерный диод ЛД или светоизлучающий диод СИД), тракт передачи оптического сигнала, обеспечивающий возможность его распространения на определенное расстояние (световод) и фотоприемное устройство, служащее для обратного преобразования оптического сигнала в электрический (лавинный фотодиод *pin*-фотодиод и др.). Кроме того, оптическая линия связи должна быть оснащена дополнительными оптическими компонентами, в частности фокусирующими линзами для эффективного ввода излучения источника света в светодиод, оптическими ответвителями для отвода оптического сигнала в другой световод и мультиплексорами-демультиплексорами волны, обеспечивающими возможность передачи через один световод оптических сигналов с различными длинами волн. В данной главе рассмотрены основные принципы и характеристики тракта передачи оптического сигнала и пассивных оптических компонентов линии оптической связи.

### 3.1. Основы фокусировки и распространения света

#### 3.1.1. Фокусировка с помощью линз

Анализируя распространение света, можно выделить два типичных случая — распространение света в пространстве, которым является вакуум или однородная среда, и распространение света в волноводе, удерживающем излучение. В первом

случае луч света испускаемый полупроводниковым лазером или выходящий из световода, претерпевает расширение. Поэтому для более эффективного ввода света в световод или фотоприемное устройство необходима собирающая линза, концентрирующая свет в определенной точке. Роль собирающей линзы заключается в фокусировке параллельного или расходящегося светового пучка в точке фокуса (рис. 3.1, *a* и *б*). Рассмотрим поверхность равной фазы, нормальную к лучам света (называемую волновой поверхностью). На рис. 3.1, *a* и *б* показано преобразование в сходящуюся сферическую волну, когда длина волны падающего света  $\lambda$ , фокусное расстояние  $f$  и фаза падающего света  $\varphi$  связаны соотношением

$$\varphi(r) \approx \varphi(0) - k \frac{r^2}{2f} \quad (3.1)$$

$$\left( k = \frac{2\pi}{\lambda} \right),$$

т. е. фаза волны уменьшается пропорционально квадрату радиуса  $r$ . Изменение фазы прямо пропорционально произведению показателя преломления  $n$  и расстояния  $S$ , пройденного в среде световым лучом. Это произведение называется «оптический путь  $L$ ». Как показано на рис. 3.2, *a*, при совпадении сферической волновой поверхности и поверхности линзы оптический путь  $L$  сокращается почти пропорционально  $r^2$  и изменение фазы вычисляется по формуле (3.1). С другой стороны, как это видно из рис. 3.2, *б*, в среде, где показатель преломления  $n$  уменьшается пропорционально  $r^2$ , изменение фазы тоже определяется формулой (3.1), т. е. образец материала с такими свойствами может быть использован в качестве собирающей линзы. Такая фокусирующая среда называется средой с изменяющимся по сечению показателем преломления. Как будет показано позже в разд. 3.3, образец из

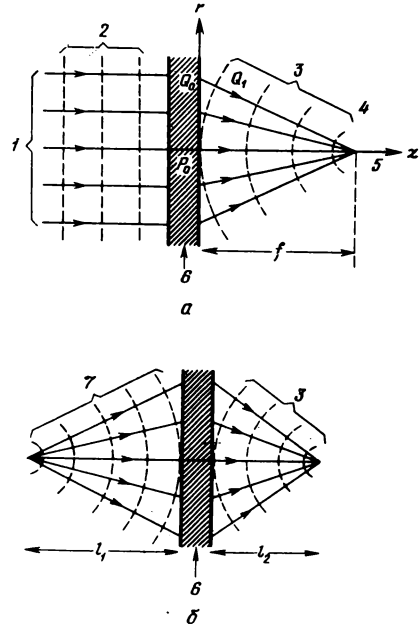


Рис. 3.1. Преобразование линзой плоской волны (*a*) и расходящейся сферической волны (*б*) в сходящуюся сферическую волну: 1 — параллельный пучок света; 2 — плоская волна; 3 — сходящаяся сферическая волна; 4 — показатель преломления в среде  $n$ ; 5 — сфокусированный пучок света; 6 — линза; 7 — расходящаяся сферическая волна.

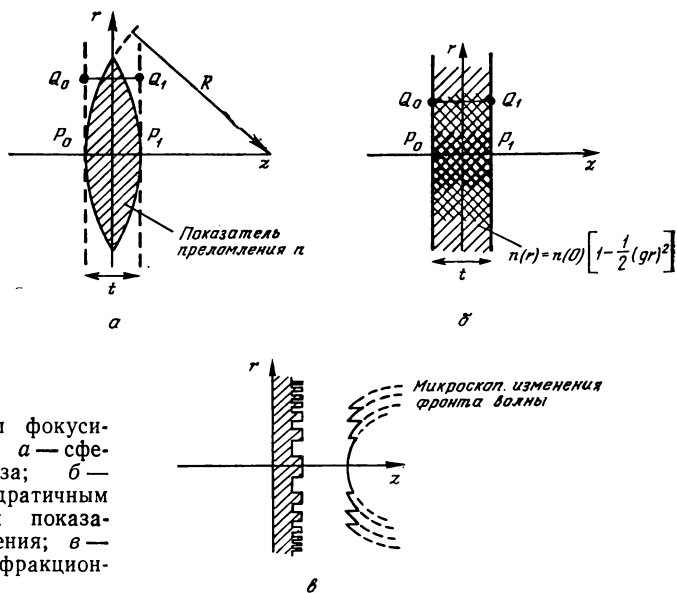


Рис. 3.2. Виды фокусирующих линз: а — сферическая линза; б — линза с квадратичным распределением показателя преломления; в — линза типа дифракционной решетки.

такого материала с плоскопараллельными поверхностями образует линзу. Изменяя шлифовкой толщину образца материала с градиентом показателя преломления, можно управлять фокусным расстоянием, что делает линзу из такого материала очень удобной для использования в оптической связи. Линза на основе дифракционной решетки, представленная на рис. 3.2, в называется микролинзой Френеля. Ее принцип действия отличается от предыдущих двух собирающих линз. В этой линзе период дифракционной решетки уменьшается от центра к краям и в результате оптический путь дифрагированной волны изменяется пропорционально  $r^2$ .

Рассмотрим основные параметры линзы. Фокусное расстояние линзы  $f$  определяется так, как это показано на рис. 3.1, а. В то же время, как видно из рис. 3.1, б, фокусное расстояние  $f$  связано с  $l_1$  и  $l_2$  соотношением

$$\frac{1}{l_1} + \frac{1}{l_2} = \frac{1}{f}. \quad (3.2)$$

Следующий параметр характеризует способность линзы фокусировать пучок определенной ширины и, как видно из рис. 3.3, определяется углом преломления падающего на линзу луча света. С другой стороны, этот параметр можно рассматривать и как способность преобразования расходящегося пучка света, излучаемого источником, в параллельный пучок. Величина,

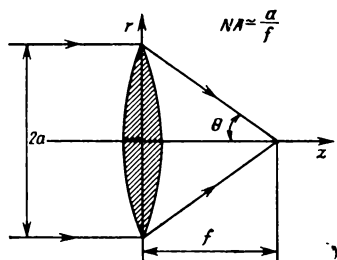


Рис. 3.3. Определение числовой апертуры  $NA$ .

равная синусу угла  $\theta$ , называется числовой апертурой  $NA$

$$NA = \sin \theta$$

$$\simeq \operatorname{tg} \theta = a/f \quad (\text{при малых значениях } \theta). \quad (3.3)$$

Апертура  $NA$  является важным параметром, определяющим фокусирующие возможности линзы и предельное разрешение при формировании изображения.

И наконец, последний параметр — предельная фокусировка. В случае идеальной фокусировки линзой входной параллельный пучок света (плоская волна) собирался бы в точку (в фокус). Однако на практике добиться фокусировки в бесконечно малой точке не позволяют две физические причины — aberrации в линзе и дифракционные ограничения.

Аберрации в линзе могут быть определены как отклонения от идеального преобразования волны в линзе, которое выражается формулой (3.1). Сейдедем выделено пять видов aberrаций, которые могут возникать при восстановлении изображения. Это сферическая aberrация, кома, астигматизм, искривление плоскости изображения, дисторсия. При использовании линзы для фокусировки света имеют место случаи фокусировки параллельного пучка света (рис. 3.1, а) или расходящегося пучка света, излучаемого точечным источником, лежащим на оптической оси линзы (рис. 3.1, б). При этом возникают сферические aberrации. Суть их заключается в том, что положение точки фокуса изменяется в зависимости от удаления падающего луча света от оптической оси, как это показано на рис. 3.4. Известны 3 метода определения aberrаций. 1) Определение продольных aberrаций  $LA$ . Они выражаются в отклонении точки пересечения преломленного луча с оптической осью от парааксиального фокуса и зависят от высоты точки пересечения линзы падающим пучком. 2) Определение поперечных aberrаций  $TA$  по положению точки пересечения преломленного луча с фокальной плоскостью.  $TA$  также зависят от

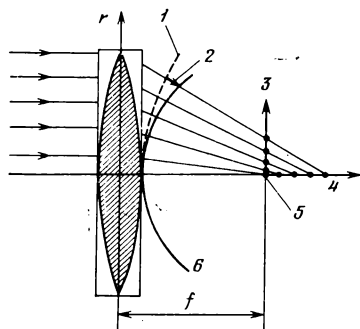


Рис. 3.4. Три метода определения сферических aberrаций: 1 — реальный фронт волны; 2 — сферическая aberrация WA; 3 — поперечная aberrация TA; 4 — продольная aberrация LA; 5 — параксиальный фокус; 6 — идеальная сферическая волна.

высоты  $r$  точки пересечения линзы падающим пучком. 3) Определение aberrаций волновой поверхности по разнице оптического пути идеальной волновой поверхности сферической волны и реальной волновой поверхности при фокусировке в параксиальном фокусе. Эти aberrации также являются функцией высоты  $r$  точки пересечения падающего пучка и линзы. В оптике количественная оценка сферических aberrаций производится в большинстве случаев по продольным aberrациям. Однако при расчете эффективности ввода луча в многомодовые световоды более удобен метод поперечных aberrаций. При вычислении эффективности ввода луча в одномодовый световод, когда используются линзы с чрезвычайно малыми aberrациями, применяется метод aberrаций волновой поверхности.

Еще одной причиной, ограничивающей возможности точечной фокусировки, является дифракция. Именно из-за дифракционных ограничений волна, преобразованная линзой, свободной от aberrаций, не является идеально сферической и вместо фокусировки света в идеальной точке в фокусе линзы возникает распределение интенсивности, показанное на рис. 3.5. Диаметр сфокусированного пучка  $2r_0$  в случае плоской падающей волны определяется формулой

$$2r_0 = 2,44 \frac{f}{2a} \lambda = 1,22 \frac{\lambda}{NA}. \quad (3.4)$$

Из формулы (3.4) видно, что даже в случае применения линзы без aberrаций наименьший диаметр сфокусированного пучка не может быть меньше порядка  $\lambda$ . Понятно также, что чем больше числовая апертура линзы  $NA$ , тем меньше получается диаметр пучка при фокусировке.

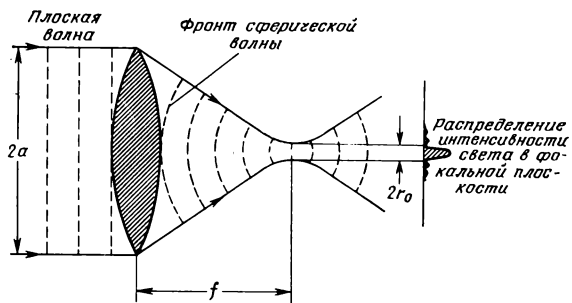


Рис. 3.5. Дифракционные ограничения фокусировки.

### 3.1.2. Волна с распределением Гаусса в пучке

Плоская волна является простейшим случаем пространственного распространения волн. В идеальном случае распределение электромагнитного поля при распространении плоской волны должно быть постоянным. Однако в области оптической связи и обработки оптических сигналов применяются лазерные источники и различные компоненты оптических схем (например, линзы), что накладывает на излучаемый и распространяющийся в пространстве свет определенные ограничения. В результате распределение поля при распространении в пространстве *ТЕМ*-волны, учитывающее амплитудно-фазовые изменения в пространстве, в приближении плоской волны практически имеет вид

$$\mathbf{E} = \mathbf{e} \cdot u(x, y, z) \cdot \exp[j(\omega t - kz)], \quad (3.5)$$

где  $\mathbf{e}$  — единичный вектор, отражающий направление поляризации волны, а  $z$  — направление распространения света. Если не рассматривать явления, связанные с поляризацией, то для анализа можно ограничиться скалярной формой равенства (3.5).

В формуле (3.5) распределение интенсивности электрического поля  $u(x, y, z)$  для света лазерного когерентного источника принимает вид, близкий к функции распределения Гаусса:

$$u(x, y, 0) = E_0 \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{r^2}{S^2}\right]^*, \quad (3.6)$$

где  $r^2 = x^2 + y^2$ ,  $S$  — называется размером пятна и представляет

\* Предполагается работа лазера в одномодовом режиме  $ТЕМ_{00}$  — Прим. ред.

собой радиус, при котором распределение интенсивности света ( $\sim |u(x, y)|^2$ ) составляет  $1/e$  часть от величины интенсивности на оптической оси. Вблизи выхода лазера пучок с гауссовым распределением интенсивности в результате дифракции изменяет свою форму. На расстоянии  $z$  от лазерного источника распределение интенсивности света определяется уравнением Френеля — Киргофа

$$u(x, y, z) = E_0 \frac{S}{W} \exp \left[ -jkz - \frac{1}{2} \left( \frac{1}{W^2} + j \frac{k}{R} \right) r^2 + j \arctg \left( \frac{z}{kS^2} \right) \right]. \quad (3.7)$$

Параметры  $W$  и  $R$  определяются формулами

$$W = S \sqrt{1 + \left( \frac{z}{kS^2} \right)^2}; \quad (3.8)$$

$$R = z \left[ 1 + \left( \frac{kS^2}{z} \right)^2 \right]. \quad (3.9)$$

Действительная часть показателя в функции (3.7) аналогична формуле (3.6). Из сопоставления с формулой (3.8) видно, что при увеличении расстояния  $z$  размер пятна увеличивается, а распределение интенсивности света определяется функцией Гаусса. Мнимая часть формулы (3.7) содержит функциональный член  $\arctg(z/kS^2)$ , дающий максимальный сдвиг фазы  $\pi/2$ , которым можно пренебречь, и оставшийся член, аналогичный формуле (3.1). Тем самым мнимая часть представляет собой сферическую волну с радиусом кривизны  $R$ , который меняется с изменением расстояния  $z$  согласно формуле (3.9). Распространение волны света с гауссовым распределением в пучке представлено на рис. 3.6. На рисунке  $2\theta$  — угол расходимости пучка, который определяется по формуле

$$2\theta = 2 \lim_{z \rightarrow \infty} \frac{W}{z} = \frac{2}{kS} = 0,64 \frac{\lambda}{2S}. \quad (3.10)$$

Ясно, что при расширении гауссова пучка света в результате дифракции характер распределения интенсивности в пучке по Гауссу сохраняется. Остается выяснить, каким будет распределение интенсивности света после преобразования волны, например, линзой. Ответ на этот вопрос может быть легко найден, если рассмотреть волну с распределением Гаусса в отрицательной области параметра  $z$  (слева от участка сужения пучка на рис. 3.6), где волновая поверхность соответствует сходящейся сферической волне, а также случай преобразования линзой расходящейся сферической волны в сходящуюся, который по-



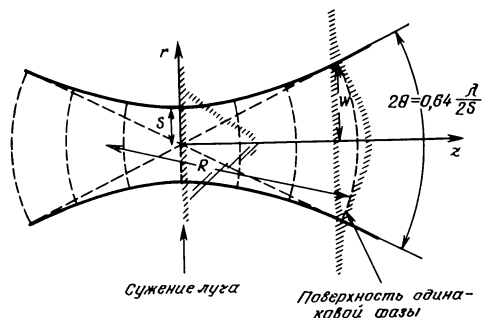


Рис. 3.6. Распространение гауссова пучка в пространстве.

казан на рис. 3.1, б. Расходящаяся волна с гауссовым распределением интенсивности преобразуется в сходящуюся гауссову волну выпуклой линзой. Вообще излучение лазера имеет распределение интенсивности, близкое к гауссовому, поэтому с помощью собирающей линзы его можно сфокусировать на участке с размерами, равными ширине пучка на участке сужения, показанном на рис. 3.6.

В случае использования светодиода светоизлучающая поверхность испускает свет из различных точек во всевозможных направлениях, причем излучаемые световые волны имеют самые различные фазы. Поэтому в данном случае получение ровной поверхности одной фазы невозможно так же, как и фокусировка. Возможно лишь получение изображения неточечного источника света. Следовательно, при соединении светодиодов с другими оптическими элементами эффективность оптического соединения низка (несколько процентов).

### 3.1.3. Световоды

Обычно конструкция световода, как показано на рис. 3.7, включает внутреннюю область, называемую сердцевинкой, с высоким показателем преломления, однородную в направлении  $z$ , а также окружающую ее оболочку с меньшим показателем преломления. При этом свет распространяется по сердцевине в направлении  $z$ . Световоды отличаются по форме поперечного сечения в зависимости от применяемых материалов и способов изготовления. Рассмотрим распространение волны в световоде на примере простейшей конструкции — плоского волновода, показанного на рис. 3.7, б. Световод с круглым сечением, представленный на рис. 3.7, г, будет описан позже в разд. 3.2.

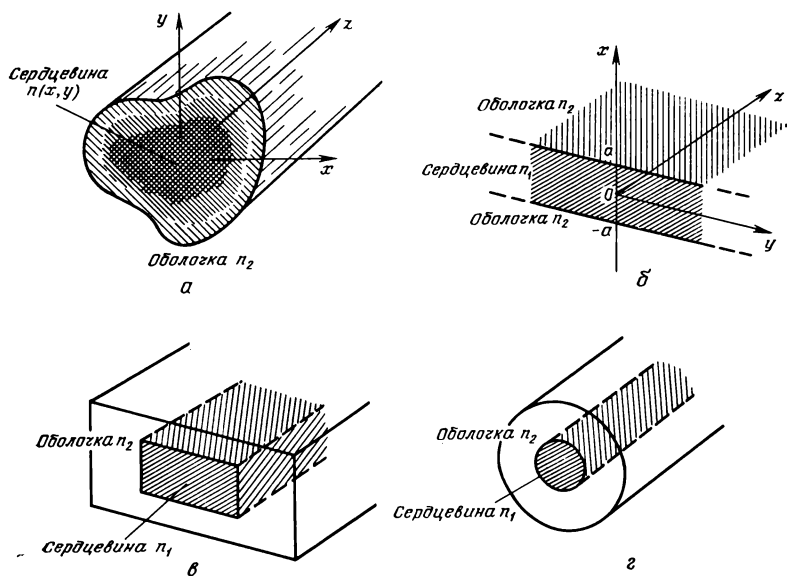


Рис. 3.7. Виды диэлектрических световодов; *а* — диэлектрический световод в общем виде; *б* — плоский световод; *в* — скрытый световод (прямоугольного сечения); *г* — волоконный световод.

Свет, распространяющийся по световоду, представляет собой электромагнитную волну, поэтому для проведения строгого анализа необходимо решить волновое уравнение (например, относительно электрического поля), вытекающее из уравнений Максвелла:

$$\nabla^2 \mathbf{E} + \omega^2 \epsilon \mu \mathbf{E} = 0. \quad (3.11)$$

Для решения этого волнового уравнения требуется привлечение множества формул, причем получить точный результат довольно трудно. Поэтому рассмотрим распространение волны в волноводе, исходя из представлений обычной оптики. При этом мы в той или иной степени пренебрегаем строгостью в подходе к решению, однако обеспечиваем большую простоту и доступность изложения.

На рис. 3.8 показано сечение плоского волновода, представленного на рис. 3.7, *б*, в плоскости *xz*. Оптический луч, как видно из рисунка, распространяется по световоду, испытывая многократное полное отражение от границы раздела между сердцевинной и оболочкой, однако, когда угол  $\theta$  становится слишком велик, полного отражения не происходит и свет проникает в оболочку. Максимальный угол  $\theta_c$ , при котором проис-

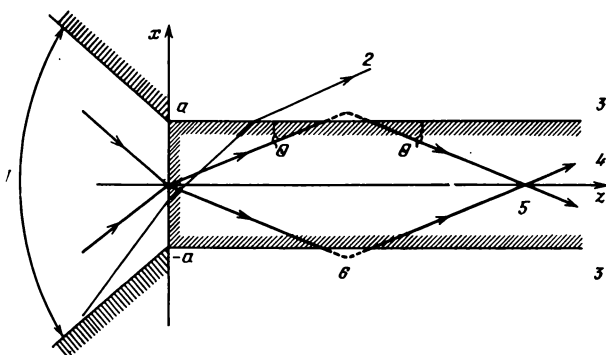


Рис. 3.8. Распространение света, падающего на световод: 1 — угол приема лучей  $2\theta_{\max}$ ; 2 — свет, который не передается по световоду ( $\theta > \theta_c$ ); 3 — оболочка  $n_2$ ; 4 — сердцевина  $n_1$ ; 5 — распространяемый свет; 6 — фазовый сдвиг при отражении.

ходит полное отражение, определяется формулой

$$\theta_c = \arccos\left(\frac{n_2}{n_1}\right) = \arcsin \sqrt{\frac{n_1^2 - n_2^2}{n_1^2}} = \arcsin \sqrt{2\Delta}. \quad (3.12)$$

Параметр  $\Delta$ , который имеет большое значение, называется удельной разностью показателей преломления и определяется через показатели преломления сердцевины и оболочки

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \simeq \frac{n_1 - n_2}{n_1}. \quad (3.13)$$

Луч света, который распространяется в световоде, отражаясь от границы раздела под максимальным углом  $\theta_c$  (формула (3.12)), при вводе в световод падает на его торец под еще большим углом  $\theta_{\max}$ , как это видно из изображения преломления луча при вводе в световод:

$$\theta_{\max} = \arcsin(n_1 \sin \theta_c) = \arcsin \sqrt{n_1^2 - n_2^2}. \quad (3.14)$$

Этот угол является максимальным углом, при котором возможен ввод света в световод или вывод из него. В формуле (3.14) величина, стоящая в скобках, называется числовой апертурой  $NA = n_1 \sqrt{2\Delta}$ , которая является еще одним важным параметром наряду с  $\Delta$ .

Оптический луч распространяется в световоде, испытывая многократное полное отражение от границы раздела сердцевины и оболочки. Однако из этого вовсе не следует, что угол  $\theta$  может быть практически произвольным. Наоборот, угол распространения луча  $\theta$  является некоторым особенным, характе-

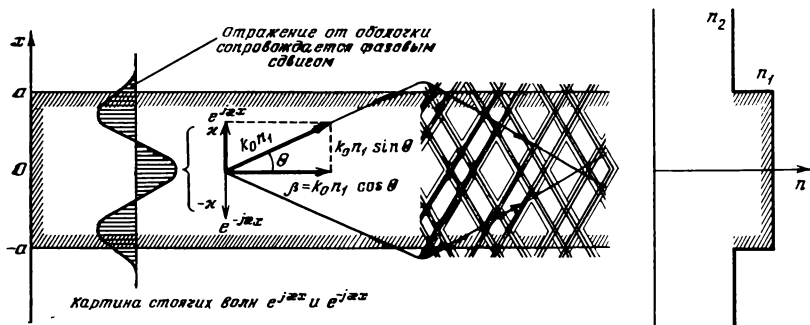


Рис. 3.9. Коэффициент распространения в продольном направлении  $\beta$ , коэффициент распространения в поперечном направлении  $\kappa$  и картина поперечной стоячей волны.

ристическим углом. Рассмотрим, каким образом он связан с распространением волны. Представим оптический луч в виде вектора, ортогонального волновой поверхности (поверхности равной фазы) плоской волны. Волновая функция  $f(x, y, z)$  плоской волны, распространяющейся в вакууме, с длиной волны  $\lambda$ , а также величина вектора распространения  $\mathbf{k}_0$  определяются формулами

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}; \quad (3.15)$$

$$f(x, y, z) = A \exp [j(\omega t - \mathbf{k}_0 \cdot \mathbf{r})]. \quad (3.16)$$

В среде с показателем преломления  $n_1$  длина волны изменяется, принимая значение  $\lambda/n_1$ , поэтому вектор распространения волны становится равен  $k_0 n_1$ . Вектор распространения также ортогонален поверхности равной фазы. Поэтому лучше рассматривать свет, распространяющийся в световоде, в виде плоской волны с вектором распространения  $\mathbf{k} = \mathbf{k}_0 n_1$ , совпадающим с направлением оптического луча, как это показано на рис. 3.9. Коэффициент распространения света в направлении  $z$  равен

$$\beta = k_0 n_1 \cos \theta. \quad (3.17)$$

С другой стороны, понятно, что коэффициент распространения света в направлении  $x$

$$\kappa = k_0 n_1 \sin \theta. \quad (3.18)$$

Свет испытывает в волноводе многократное отражение, поэтому в отрицательном направлении  $x$  коэффициент распространения принимает отрицательное значение  $-\kappa$ . Чтобы «зам-

кнуть» свет, ограничив его распространение по оси  $x$ , необходимо сформировать стоячую волну. Из этого условия следует, что  $\kappa$  принимает дискретные собственные значения. Коэффициент распространения  $\beta$  в направлении  $z$  также имеет дискретные значения. Таким образом, для некоторого определенного коэффициента распространения обеспечивается характерное распределение электромагнитного поля в направлении  $z$ , называемое собственной модой. Мода, которая соответствует замкнутому в сердцевине свету, называется волноводной модой. Из формул (3.17) и (3.12) следует, что коэффициент распространения волноводной моды  $\beta$  находится в диапазоне

$$k_0 n_2 \leq \beta \leq k_0 n_1. \quad (3.19)$$

Коэффициент распространения волноводной моды определяется из условия формирования двух стоячих плоских волн  $e^{i\kappa x}$  и  $e^{-i\kappa x}$  с коэффициентом распространения  $\kappa$  в направлении  $x$ . Однако диапазон формирования стоячей волны не ограничивается в точности областью от  $-a$  до  $+a$ . Он увеличивается на расстояние, соответствующее величине фазового сдвига, который образуется при отражении наклонного пучка света от границы раздела. Уравнение собственных значений для данного случая записывается следующим образом:

$$\operatorname{tg} \left( \kappa a - N \frac{\pi}{2} \right) = \frac{\sqrt{k_0^2 n_1^2 - \kappa^2}}{\kappa}, \quad (3.20)$$

где  $N$  — номер моды, возрастающий с увеличением коэффициента распространения. Число волноводных мод  $M (= N + 1)$  задается новым параметром, который обозначается  $V$ :

$$V = k_0 n_1 a \sqrt{2\Delta}. \quad (3.21)$$

Число волноводных мод  $M$  вычисляется через  $V$  как

$$M = \left[ \frac{2}{\pi} V \right] + 1. \quad (3.22)$$

Выражение в скобках называется скобками Гаусса и определяет максимальное целое число, не превышающее  $2V/\pi$ .  $V$  — это параметр, который определяется через отношение длины волны  $\lambda$  и толщину сердцевины световода  $2a$ , а также из формулы (3.21), если известны показатели преломления сердцевины и оболочки  $n_1$  и  $n_2$ . Можно сказать, что  $V$  отображает оптическую толщину волновода и наряду с  $\Delta$  и  $NA$  относится к основным параметрам световода.

Если коэффициент распространения света  $\beta$  меньше значения, вычисляемого по (3.19), то из сравнения формул (3.12) и (3.17) следует, что  $\theta > \theta_c$ . Если  $\beta$  меньше, чем  $k_0 n_2$ , то свет вы-

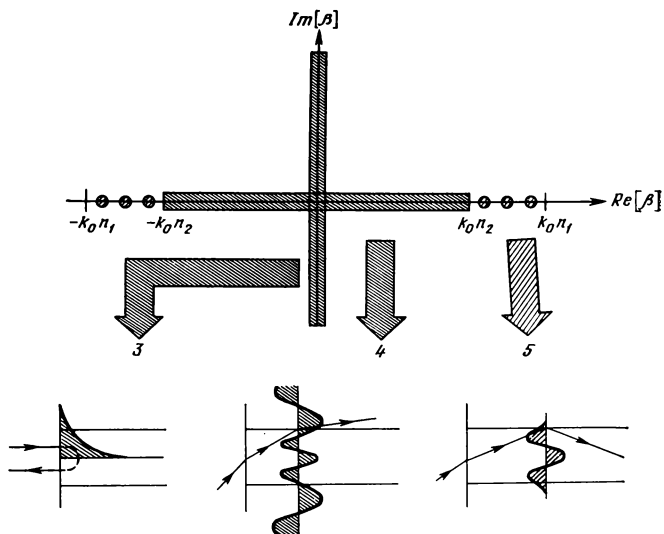


Рис. 3.10. Волноводная мода и излучающая мода в световоде: затухающая излучающая мода (слева); вытекающая мода (в центре); волноводная мода (справа).

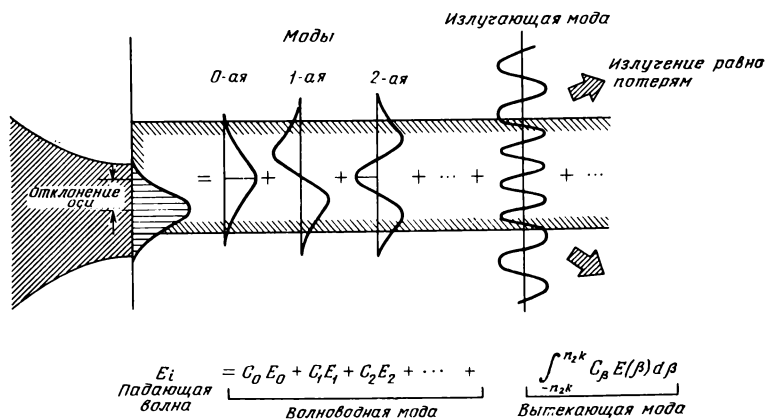


Рис. 3.11. Развитие собственных мод, соответствующих одной падающей волне. Показаны три моды: 0, 1 и 2-го порядка с близким распределением интенсивности, а также моды высшего порядка и мода излучения.

ходит из сердцевинны в оболочку, как это показано на рис. 3.8. Этот случай называется вытекающей модой. Если  $\beta$  — чисто мнимое число, то это означает, что в направлении  $z$  происходит затухание электромагнитного поля, и в этом случае говорят о затухающей моде. На рис. 3.10 показан диапазон изменения

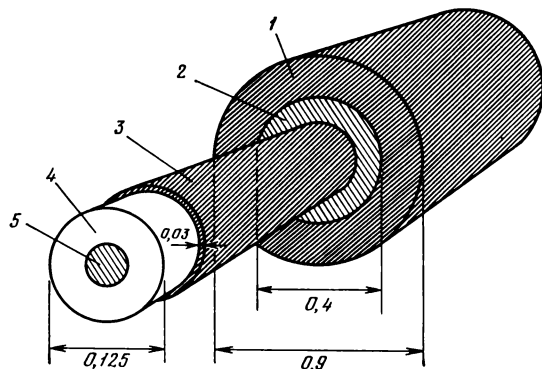


Рис. 3.12. Конструкция волоконного кабеля (размеры указаны в миллиметрах): 1 — второе покрытие (нейлон); 2 — амортизирующий слой; 3 — первое покрытие; 4 — оболочка; 5 — сердцевина.

коэффициента распространения, в котором наблюдаются указанные выше моды. Рассмотрим случай ввода гауссова пучка света в световод с отклонением от его центральной оси. Входная волна, как это показано на рис. 3.11, возбуждает сначала основную 0-ю моду, затем 1-ю моду, после чего поочередно следуют моды более высоких порядков. Все моды должны распространяться одновременно, при этом происходит разложение произвольной временной формы волны в волноводе в ряд Фурье. Та часть волноводных мод, которая не укладывается в световод, образует вытекающую моду и излучается за пределами световода. Эта часть света образует потери при вводе излучения в волновод. Изгибы световода, а также различные неровности границы раздела также приводят к потерям излучения при распространении света в волноводе, к выходу излучающей моды за его пределы.

## 3.2. Волоконный световод

Волоконный световод является одним из видов световода. Это волновод, в котором свет удерживается в пределах тонкого стекловолокна и передается на большое расстояние. Как показано на рис. 3.12, волоконные световоды имеют цилиндрическую конструкцию. Внешний диаметр оболочки световода имеет стандартный размер 125 мкм (согласно международному стандарту ССИТТ). Волоконный световод имеет недостаточную механическую прочность и может быть легко поврежден. Поэтому после формирования центральной части волоконного световода он, как это показано на рис. 3.12, защищается меха-

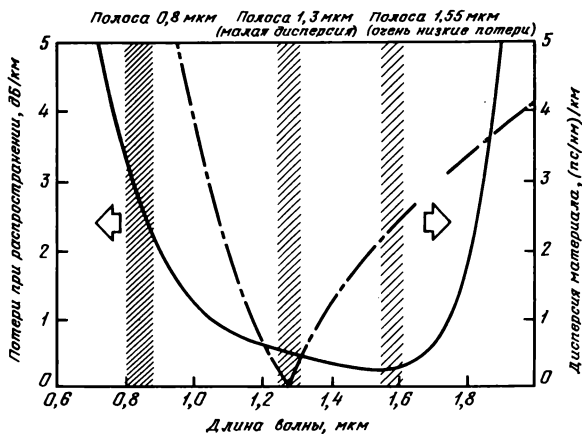


Рис. 3.13. Спектральные характеристики потерь излучения в кварцевом волоконном световоде.

нически прочным покрытием. Или же, как это показано на рис. 3.17, несколько световодов объединяются в световодный кабель.

Распространение света в волоконном световоде характеризуется множеством параметров, но самыми важными из них являются параметры, характеризующие потери на распространение и спектральную полосу пропускания. Потери при распространении характеризуются величиной затухания световой энергии на единичной длине световода (дБ) и зависят от длины волны излучения (рис. 3.13). На самом первом этапе исследований волоконных световодов (до 1975 г.) использовались светоизлучающие и фотоприемные элементы только для ближней ИК-области около 0,8 мкм. Хотя из-за наличия примесей поглощение в световоде было довольно большим, минимум потерь излучения приходится на эту область спектра. По этой причине самая первая система оптической связи действовала в спектральной области вблизи 0,8 мкм. Позже в более длинноволновой части спектра была обнаружена область волн, в которой можно получить крайне низкие потери и широкую полосу пропускания. Благодаря развитию технологии был изготовлен почти не содержащий примесей волоконный световод с очень низкими потерями 0,2 дБ/км на длине волны 1,55 мкм (рис. 3.13).

Волоконный световод как среда распространения сигнала в связи имеет следующие основные особенности:

1. Низкие потери. Потери на 2 порядка меньше, чем в применявшихся раньше медных линиях, что позволяет удлинить участки между ретрансляторами.



2. Широкая полоса пропускания. Полоса пропускания свыше 1 ГГц·км обеспечивает одновременное увеличение протяженности участков между ретрансляторами и объема передаваемой информации.
3. Малая толщина и вес. Световодные линии легко прокладывать.
4. Не подвержены влиянию электромагнитной индукции. Можно прокладывать вблизи электрических кабелей и электрифицированных железнодорожных путей. Устойчивы к ударам молний.
5. Малые утечки излучения делают возможной высокую степень секретности передачи информации.

Классификация волоконных световодов по диаметру сердцевины и характеру распределения показателя преломления в ней представлены в табл. 3.1. Ниже обсуждаются их основные характеристики.

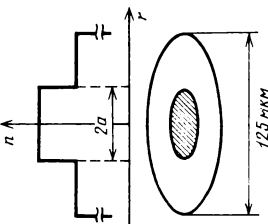
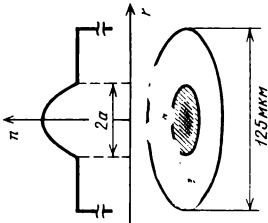
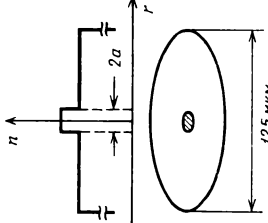
### **3.2.1 Многомодовый волоконный световод со ступенчатоизменяемым показателем преломления (или со ступенчатым профилем показателя преломления)**

Этот тип волоконного световода имеет постоянный показатель преломления по всему сечению сердцевины. Свет распространяется, испытывая многократное полное отражение от границы раздела между сердцевиной и оболочкой световода (рис. 3.14, *a*). При этом картина распространения света, наблюдаемая в сечении световода, содержащем оптическую ось (ось  $z$ ), аналогична случаю распространения света в плоском волноводе (рис. 3.8). Согласно международному стандарту для средств связи (стандарт ССИТ), диаметр волоконного световода со ступенчатым профилем показателя преломления 125 мкм, диаметр его сердцевины 50 мкм. Оболочка световода изготавливается из кварцевого стекла ( $\text{SiO}_2$ ) с показателем преломления 1,45, а сердцевина — из кварцевого стекла с добавками  $\text{GeO}_2$  и  $\text{P}_2\text{O}_5$  и имеет показатель преломления примерно на 1% выше — 1,465. В этом случае числовая апертура  $NA$  составляет примерно 0,2.

Распространяющийся в таком световоде свет, как видно из рис. 3.14, *a* содержит два типа мод: моду, которая распространяется почти вдоль оптической оси 1 и группу мод 2, которые распространяются под углом к оптической оси, многократно отражаясь от границы раздела. Эти моды имеют различную групповую скорость, поэтому, возбуждаясь одновременно на входе, они разделяются при распространении в световоде, так что на выходе (рис. 3.11) между ними образуется временной

Таблица 3.1

Классификация волоконных световодов

	Многомодовый волоконный световод со ступенчатым профилем показателя преломления *	Многомодовый градиентный волоконный световод	Одномодовый волоконный световод
Конструкция			
Диаметр сердцевины 2a	50 мкм	50 мкм	8 - 10 мкм (стандартный диаметр пучка)
Разница показателей преломления Δ	1%	1%	~0,3%
Полоса пропускания	Несколько десятков МГц·км	~1 ГГц·км	Свыше 1 ТГц·км (1,3 мкм) ~200 ТГц·км (1,55 мкм)

\* В многомодовом волоконном световоде внешний диаметр световода (125 мкм) и диаметр его сердцевины (50 мкм) остаются великими, а разница показателей преломления превышает 1%.

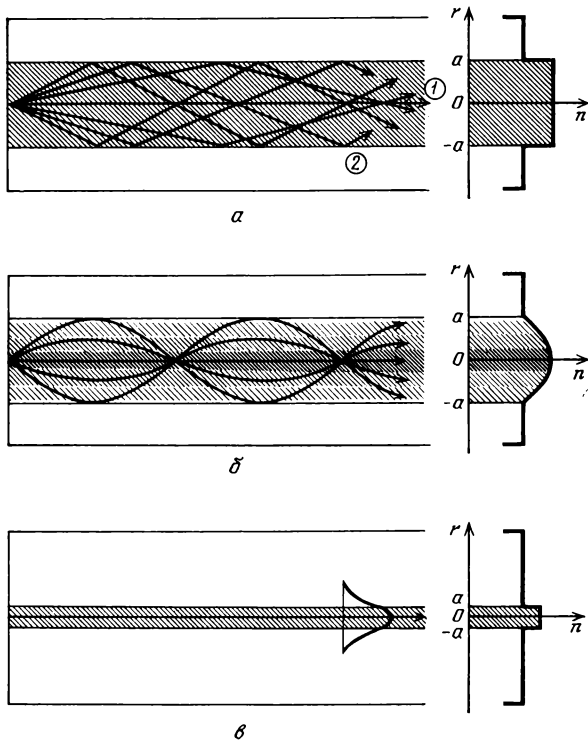


Рис. 3.14. Распространение света: *a* — в волоконном световоде со ступенчатым профилем показателя преломления; *б* — в градиентном световоде; *в* — в одномодовом световоде.

сдвиг. Следовательно, при распространении короткого светового импульса в таком световоде ширина импульса, как показано на рис. 3.15, возрастает. Возникновение временного сдвига между различными модами в этом случае называется дисперсией мод. На практике при распространении света в волоконном световоде из-за изгибов и микронеоднородностей между модами возникает взаимодействие, происходит обмен энергии между медленной и быстрой модой, поэтому временной сдвиг между модами несколько уменьшается. В многомодовом волоконном световоде со ступенчатым профилем показателя преломления имеет место связь между шириной полосы пропускания и протяженностью распространения излучения  $L$ :

$$BL\gamma \simeq c/(n_1\Delta), \quad (3.23)$$

где  $c$  — скорость света,  $\gamma$  — параметр, отражающий степень связи между модами. Если связь между модами отсутствует,  $\gamma = 1$ ,

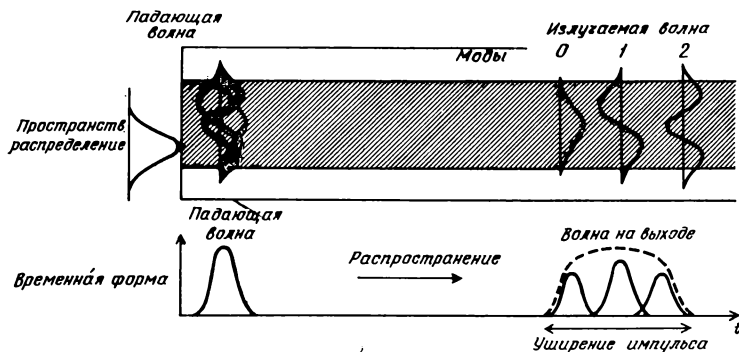


Рис. 3.15. Дисперсия мод в многомодовом волоконном световоде.

при полной связи между модами  $\gamma = 1/2$ , но обычно параметр  $\gamma$  принимает некоторое промежуточное значение. При отсутствии связи между модами в многомодовом волоконном световоде со ступенчатым профилем показателя преломления при  $n_1 \approx 1,5$  и  $\Delta = 1\%$  полоса пропускания оказывается порядка 20 МГц·км. Эта величина намного меньше, чем в многомодовом градиентном волоконном световоде, который будет рассмотрен позже. Это показывает, что световод со ступенчато изменяемым показателем преломления непригоден для использования в том случае, когда необходимо обеспечить достаточно широкую полосу пропускания.

### 3.2.2. Многомодовый волоконный световод с градиентом показателя преломления (градиентный световод)

Это волоконный световод, в котором распределение показателя преломления в сердцевине является функцией расстояния  $r$  от оптической оси:

$$n^2(r) = \begin{cases} n^2(0) [1 - 2\Delta (r/a)^\alpha] & (|r| \leq a), \\ n_2^2 & (|r| > a). \end{cases} \quad (3.24)$$

При  $\alpha = 2$  распределение показателя преломления, как показано в табл. 3.1, подчиняется параболическому закону. В волоконном световоде с квадратичным распределением показателя преломления траектория светового луча, как это видно из рис. 3.14, б, имеет вид синусоид или косинусоид. Прямолинейное распространение моды низшего порядка происходит по короткому пути, зато в области с большим показателем преломления, поэтому групповая скорость становится меньшей. Моды выше-

го порядка распространяются криволинейно по большому пути, но в периферийной области, где показатель преломления принимает меньшие значения, поэтому их групповая скорость становится выше. Следовательно, групповые скорости различных мод примерно одинаковы и временное расширение светового импульса при распространении по такому световоду невелико. По этой причине градиентный световод обеспечивает более широкую полосу пропускания, чем световод со ступенчатым профилем показателя преломления.

Если рассмотреть спектральные характеристики показателя преломления, то можно убедиться, что оптимальное значение коэффициента  $\alpha$  ( $\alpha_{\text{opt}}$ ), соответствующее максимальной ширине полосы пропускания многомодового градиентного волоконного световода, несколько отклоняется от  $\alpha=2$  на величину  $\varepsilon$ :

$$\alpha_{\text{opt}} = 2 + \varepsilon. \quad (3.25)$$

Параметр  $\varepsilon$  зависит от длины волны света и отражает дисперсию материала волоконного световода. На длине волны 0,85 мкм  $\alpha_{\text{opt}}=2,3$ , а вблизи 1,3 мкм  $\alpha_{\text{opt}} \approx 1,9$ . В случае оптимального распределения показателя преломления сердцевины световода ( $\alpha_{\text{opt}}$ ) связь ширины полосы пропускания и протяженности распространения излучения определяется формулой

$$BL \approx 2 \frac{c}{n_1 \Delta^2}. \quad (3.26)$$

При  $n_1 \approx 1,5$ ,  $\Delta = 1\%$  получаем  $BL = 4$  ГГц·км, что почти на два порядка больше, чем в многомодовом волоконном световоде со ступенчатым профилем показателя преломления. При наличии связи между модами, как и в случае использования волоконного световода со ступенчатым профилем показателя преломления, зависимость ширины полосы пропускания от протяженности распространения излучения приобретает характер  $L^{-1}$

### 3.2.3. Одномодовый волоконный световод

Число волновых мод, распространяющихся в световоде, зависит от параметра  $V$ , определяемого формулой (3.21). В случае плоского волновода число мод можно установить по формуле (3.22). Из (3.22) следует, что при  $V < \pi/2$  получаем  $M=1$ , т. е. можно сделать вывод, что в плоском волноводе распространяется только основная мода. Такой волновод принято называть одномодовым волноводом. Существуют также цилиндрические одномодовые волоконные световоды. Условие распространения в волноводе только основной моды в случае ступенчатого рас-

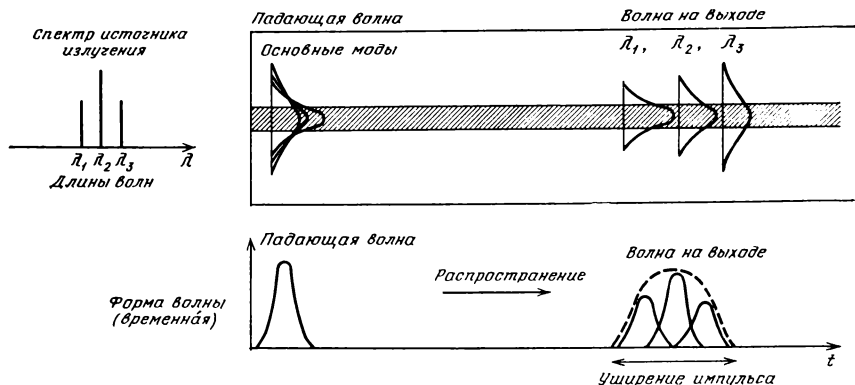


Рис. 3.16. Дисперсия конструкции и дисперсия материала в одномодовом волоконном световоде.

предела показателя преломления имеет вид

$$V \leq 2,405. \quad (3.27)$$

При  $n_1 \approx 1,5$ ,  $\Delta = 0,3\%$  и длине волны свыше 1 мкм условие распространения только одной моды в соответствии с формулами (3.21) и (3.27) выполняется при диаметре сердцевин  $2a < 6,6$  мкм. Таким образом, волоконный световод с малым диаметром сердцевин (порядка длины волны) является одномодовым световодом.

Поскольку в одномодовом световоде распространяется только одна мода, то дисперсия мод не проявляется. В принципе при этом обеспечивается широкая полоса пропускания. Однако из-за спектральной зависимости ширины полосы пропускания оказывается связанной с шириной спектральной полосы источника излучения (см. рис. 3.16), что ограничивает ширину полосы пропускания. Спектральная зависимость групповой скорости основной моды определяется дисперсией материала и дисперсией конструкции. Дисперсия материала обусловлена спектральной зависимостью показателя преломления. Дисперсия конструкции определяется соотношением длины волны излучения и диаметра сердцевин световода в условиях, когда основная мода не выходит за пределы сердцевин. Следовательно, в одном и том же световоде для излучения различных длин волн коэффициенты распространения различны. Все эти виды дисперсии присутствуют и в многомодовых световодах. Причем дисперсия мод значительно больше, чем дисперсия материала, которая в свою очередь больше, чем дисперсия конструкции. Поэтому в многомодовых световодах ширина полосы пропускания ограничивается дис-

персией мод. В одномодовом волоконном световоде дисперсия конструкции ввиду слабой спектральной зависимости значительно меньше дисперсии материала, поэтому можно считать, что ширина полосы пропускания ограничивается дисперсией материала. На рис. 3.13 показаны спектральная зависимость дисперсии материала и спектральная зависимость потерь излучения на распространение в световоде. Из рисунка видно, что в спектральной области вблизи 1,3 мкм дисперсия материала почти равна нулю. Понятно, что это позволяет получить очень широкую полосу пропускания. На длине волны 1,55 мкм наблюдается минимум потерь излучения на распространение в световоде 0,2 дБ/км, однако при этом дисперсия материала отлична от нуля. Уширение импульса в результате дисперсии материала определяется спектром излучения источника, поэтому, используя полупроводниковый лазер с очень хорошей монохроматичностью, можно обеспечить связь на большом расстоянии и с большой пропускной способностью.

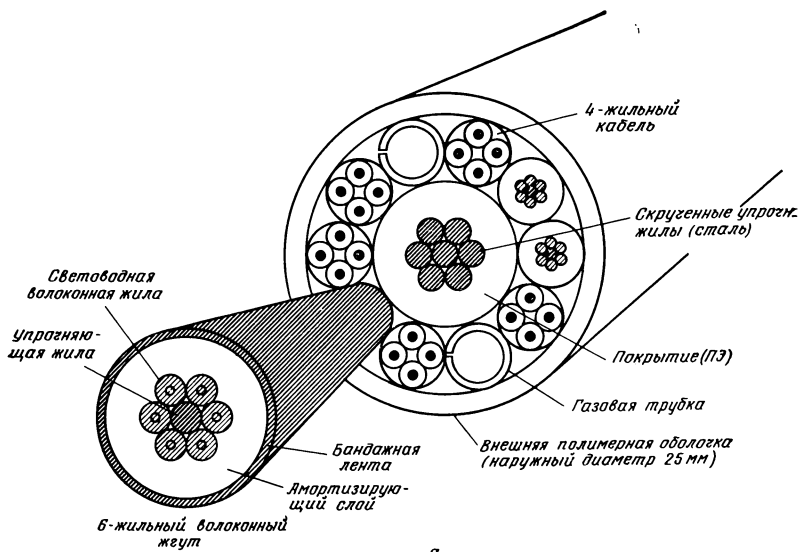
#### **3.2.4. Волоконно-оптический кабель**

Волоконные световоды, представленные на рис. 3.12, обладают недостаточной механической прочностью и стойкостью к окружающей среде. Поэтому при прокладке их объединяют по несколько жил в многожильный кабель, куда входят упрочняющие жилы и жилы для питания ретрансляторов. На рис. 3.17 показан пример конструкции такого волоконно-оптического кабеля, а на рис. 3.18 представлены для сравнения по толщине волоконно-оптический и традиционный коаксиальный кабели.

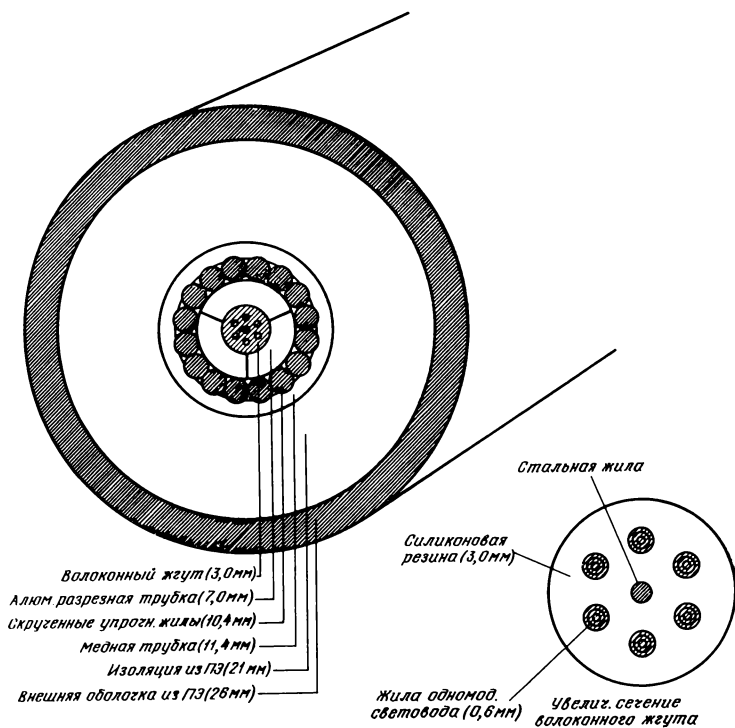
При сборке в кабель давление на боковые поверхности волоконных световодов в периферийной области в случае жесткой конструкции приводит к небольшим искривлениям (микроизгибам), что увеличивает потери излучения, обусловленные рассеянием. Поэтому при изготовлении кабеля световоды окружаются амортизирующим упругим слоем, что позволяет свести к минимуму неоднородные механические нагрузки.

#### **3.2.5. Соединение волоконных световодов**

При прокладке волоконно-оптических кабелей применяют разъемное (полупостоянное) соединение участков кабеля. Соединение между оптическими компонентами или приборами осуществляется отрезками световодов с соединителями. Потери излучения на участках соединений зависят от точности совме-



а



б

Рис. 3.17. а — конструкция 18-жильного волоконно-оптического кабеля. Магистральная ретрансляционная линия соединения фирмы NTT. Число жил может изменяться от 6 до 24; б — конструкция морского волоконно-оптического кабеля для прокладки на больших глубинах. Цифры в скобках указывают размер внешнего диаметра.



щения сердцевин световодов. Поэтому при соединении многомодовых волоконных световодов с большим сечением сердцевины сравнительно легко обеспечить соединение с низкими потерями. При соединении одномодовых волоконных световодов с малым сечением сердцевины необходима очень высокая точность совмещения.

В месте соединения с конца световодной жилы снимается защитное покрытие, оболочка световода оголяется, световод натягивается, слегка изгибается и режущим инструментом на его торце формируется плоская поверхность, ортогональная оптической оси световода. Две такие поверхности на концах соединяемых световодов совмещаются и, как показано на рис. 3.19, а, производится нагрев и расплавление области контакта в электрическом разряде. Во время расплавления стекла световода за счет небольшого механического прижима создается оптический контакт с чрезвычайно низкими потерями излучения (в одномодовом волоконном световоде менее 0,1 дБ). Этот способ соединения участков световодного кабеля при его прокладке реализован в малогабаритном соединительном устройстве, показанном на рис. 3.20. Существует еще один способ соединения, который показан на рис. 3.19, б. Концы волоконных световодов помещаются в V-образную канавку и совмещаются по оболочкам, после чего производится их оптическое соединение клеем с согласующим показателем преломления (силиконовая смола). Описанный метод соединения прост и позволяет обеспечить потери излучения на участке соединения до 0,1 дБ в случае использования многомодовых волоконных световодов. Соединители волоконных световодов будут рассмотрены в разд. 3.4.1.

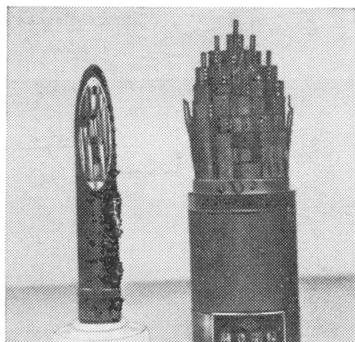


Рис. 3.18. Волоконно-оптический кабель и традиционный коаксиальный кабель.

### 3.2.6. Многожильный световод

В многожильном световоде объединяются несколько регулярно расположенных волоконных световодов. Для того чтобы обеспечить передачу изображения по многожильному световоду, он конструируется таким образом, что расположение концов световодов на выходе точно соответствует их расположению на входе. Как показано на рис. 3.21, для ввода изображения

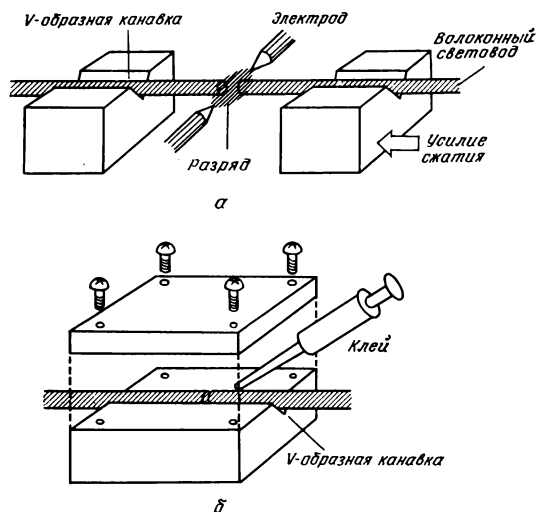


Рис. 3.19. Методы соединения волоконных световодов: а — сплавление в электрическом разряде; б — соединение с помощью V-образных канавок.

в световод применяется линза. Элементы передаваемого изображения формируются в сердцевинах волоконных световодов, поэтому применяются световоды более тонкие, чем в оптической связи и с более тонкими оболочками. Кроме того, в последние годы для передачи изображения вместо многожильных световодов стали применяться световоды с диаметром свыше 1 мм, содержащие множество тонких регулярно расположенных сердцевин.

Устройства передачи изображения на основе многожильных световодов применяются для исследования объектов, прямое наблюдение которых невозможно, например в медицинских исследованиях (исследование желудка), а также для визуального контроля внутренних частей двигателей самолетов, атомных реакторов и др.

### 3.3. Компоненты фокусирующей системы

Луч света, излучаемый источниками, например полупроводниковыми лазерами или светодиодами, а также выходящий из световода, является расходящимся, поэтому в большинстве случаев для ввода таких световых пучков в световод или оптический соединитель необходимы фокусирующие линзы. Основ-

ные принципы действия фокусирующих линз рассмотрены в разд. 3.1. Здесь описаны отличительные особенности разных типов линз.

### 3.3.1. Цилиндрические и сферические линзы

Пучок света полупроводникового лазера имеет форму вытянутого по вертикали эллипса. Это обусловлено малым ( $0,1-0,2$  мкм) размерами активного слоя по вертикали в сравнении с длиной волны, что приводит к сильному увеличению расходимости пучка в вертикальном направлении. В горизонтальном направлении активный слой имеет ширину в несколько микрометров, поэтому и расходимость пучка в горизонтальном на-

правлении значительно меньше. Для коррекции эллиптического пучка до почти круглой формы и введения его в многомодовый волоконный световод, как показано на рис. 3.22, между полупроводниковым лазером и световодом устанавливается цилиндрическая линза, которая позволяет сократить расходимость пучка в вертикальном направлении. В этом случае эффективность ввода излучения в многомодовый световод достигает  $\approx 30\%$ .

С другой стороны, сферическая линза имеет большую числовую апертуру  $NA$ , что является удобным для приема света полупроводникового лазера с широким углом расходимости. В этом случае, как показано на рис. 3.23, использование сферической линзы позволяет преобразовать свет полупроводникового лазера в почти параллельный пучок. Этот пучок затем вводится в линзу в виде стержня с градиентом показателя преломления и фокусируется ею в пучок, сходящийся под углом для лучшего согласования с числовой апертурой волоконного световода. Такая оптическая система позволяет вводить в волоконный световод излучение полупроводникового лазера с высокой эффективностью. Указанная система может состояться из модуля лазерных диодов ЛД, в который входят лазер и сферическая линза, и оптического соединительного модуля, состоящего из линзы с градиентом показателя преломления и

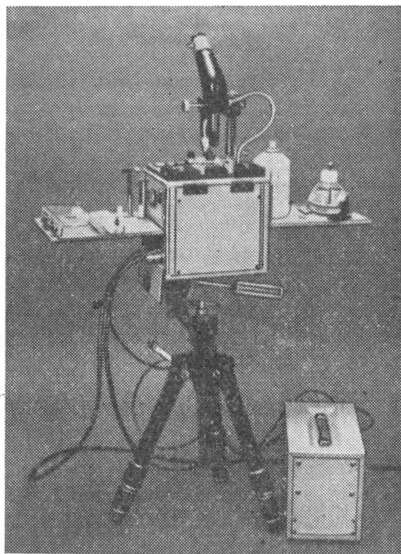


Рис. 3.20. Установка для сплавления волоконных световодов.

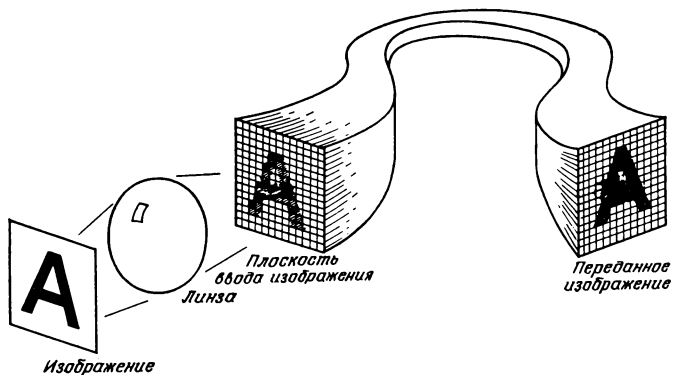


Рис. 3.21. Передача изображения по многожильному волоконному световоду.

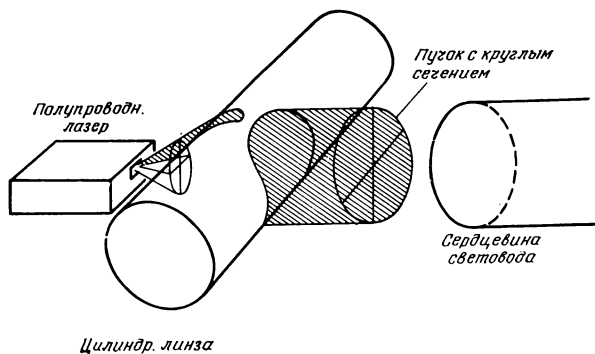


Рис. 3.22. Система соединения полупроводникового лазера и волоконного световода с помощью цилиндрической линзы.

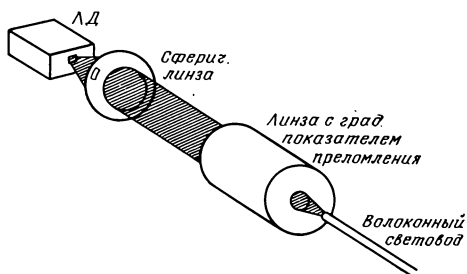


Рис. 3.23. Соединение лазерного диода и волоконного световода, с помощью оптической системы, состоящей из сферической линзы и линзы с градиентом показателя преломления.

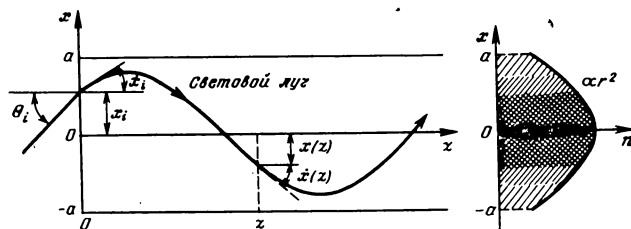


Рис. 3.24. Траектория светового пучка в среде с квадратичным распределением показателя преломления.

световода. Высокую эффективность соединения (средние потери излучения менее 6 дБ) можно получить и для одномодового волоконного световода. При этом в так называемых «коаксиальных» конструкциях достигается высокая температурная стабильность соединения.

### 3.3.2. Линзы с градиентом показателя преломления (градиентные линзы)

Линза этого типа упоминалась в разд. 3.1.1. В такой линзе используется среда, обеспечивающая изменение фазы входной волны (плоской или сферической) пропорционально квадрату расстояния от центральной оси. Иными словами, как видно из рис. 3.2, б, показатель преломления среды уменьшается пропорционально квадрату радиуса  $r$ . Такая линза изготавливается в виде цилиндрического стержня и называется фокусирующей линзой с градиентом показателя преломления. Траектория распространения света в этой линзе, как и в градиентном световоде (см. рис. 3.24), имеет форму синусоиды. Правда, в отличие от световода линза с градиентом показателя преломления имеет больший диаметр (1—2 мм) и не имеет оболочки. Кроме того, методы изготовления линзы и световода различны. Линза с градиентом показателя преломления изготавливается с использованием метода ионного замещения.

Распределение показателя преломления линзы определяется параметром  $g$  (который называется степенью фокусирования):

$$n^2(r) = \begin{cases} n^2(0) [1 - (gr)^2 + h_4(gr)^4 + \dots] & (|r| \leq a), \\ 1 \text{ (воздух)} & (|r| > a), \end{cases} \quad (3.28)$$

$$r^2 = x^2 + y^2,$$

где  $h_4 \dots$  — коэффициент, отображающий абберации, возникающие при отклонении распределения показателя преломления

от идеального. Рассмотрим наиболее простой случай, когда  $h_4=0$ . Траектория света в меридиональной плоскости, содержащей ось  $x$  (в сечении, содержащем оптическую ось), выражается через связь отклонения от оптической оси  $x(z)$  и наклона траектории  $\dot{x}(z)$ , что определяется из значений параметров  $x_i$  и  $\dot{x}_i$  на входе линзы (точка  $\dot{\phantom{x}}$  означает производную по  $z$ ):

$$\begin{pmatrix} jk\dot{x}_i \\ x_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos gz & jkg \sin gz \\ j \frac{1}{kg} \sin gz & \cos gz \end{pmatrix} \begin{pmatrix} jk\dot{x}(z) \\ x(z) \end{pmatrix}. \quad (3.29)$$

В формуле (3.29) содержится коэффициент распространения  $k(=nk_0)$ , что соответствует случаю, когда линза окружена воздухом с показателем преломления  $n=1$ . Из вышеприведенной формулы следует, что синусоидальная траектория распространения света имеет период

$$L_p = 2\pi/g, \quad (3.30)$$

называемый также шагом. На рис. 3.25 показана реальная траектория распространения светового пучка в линзе с градиентом показателя преломления.

Вводя параллельный пучок света в линзу с градиентом показателя преломления, можно, как показано на рис. 3.26, сфокусировав пучок, вывести его из линзы вновь в виде параллельного пучка. Так, на рис. 3.26, а показано, что вырезав линзу длиной  $(1/4) L_p$ , можно сфокусировать параллельный пучок, а на рис. 3.26, б представлен случай фокусировки расходящегося пучка света полупроводникового лазера, в котором вырезается линза длиной от  $(1/2) L_p$  до  $(1/4) L_p$ . Таким образом, путем изменения длины можно управлять фокусным расстоянием линзы с градиентом показателя преломления. Путем шлифовки торцевых поверхностей линзу с градиентом показателя преломления можно изготовить очень тонкой, что чрезвычайно удобно для применения. Такие линзы используются в качестве компонентов для оптической связи и малогабаритных копировальных аппаратов.

Максимальный угол падения луча на линзу с градиентом показателя преломления определяется из формулы (3.29) с учетом преломления на торцевой поверхности

$$\theta_i^{\max} \simeq \pm \arcsin [n(0)g \sqrt{a^2 - x_i^2}]. \quad (3.31)$$

Таким образом, максимальный угол падения луча на поверхность линзы с градиентом показателя преломления зависит от положения падающего пучка на торцевой поверхности. Так, на

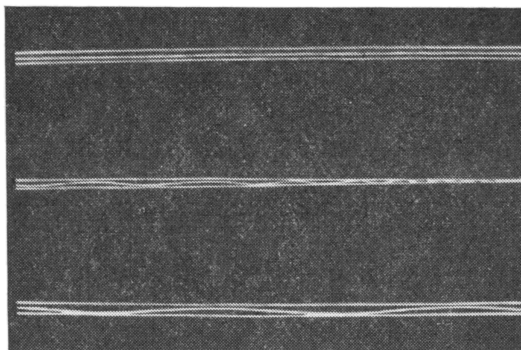


Рис. 3.25. Траектория светового пучка в линзе с градиентом показателя преломления. Прямолинейное распространение света при падении в область центральной оси (вверху). Синусоидальное распространение света при падении пучка с отклонением от центральной оси (внизу). При падении пучка с отклонением от центральной оси на линзу, имеющую форму ленты, период синусоиды уменьшается (в середине).

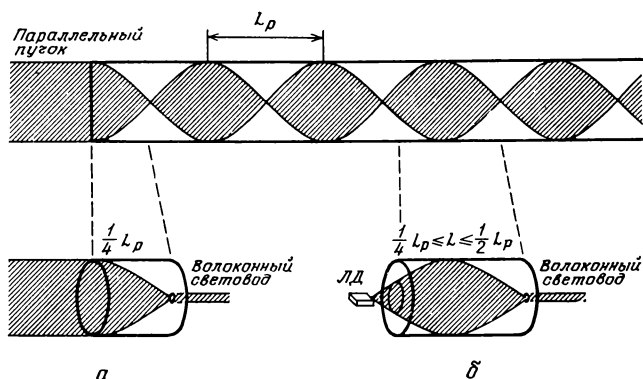


Рис. 3.26. Фокусировка пучка линзой с квадратичным распределением показателя преломления: а — при вводе параллельного пучка света в волоконный световод; б — при соединении полупроводникового лазера и волоконного световода (потери излучения 3 дБ).

центральной оси получается наибольшее значение угла  $\theta = \arcsin[n(0)ga]$ , а на самом краю ( $x = \pm a$ ) возможно введение в линзу только параллельного пучка. Поэтому при фокусировке пучка света, излучаемого полупроводниковым лазером, как видно из рис. 3.26, б, берется линза длиной  $(1/2)L_p$ . Для уменьшения потерь излучения при вводе в линзу полупроводниковый лазер должен быть приближен к ее торцевой поверхности. В градиентной линзе, имеющей числовую апертуру  $NA = 0,37 - 0,6$ , сферическая абберация почти отсутствует, что позволяет

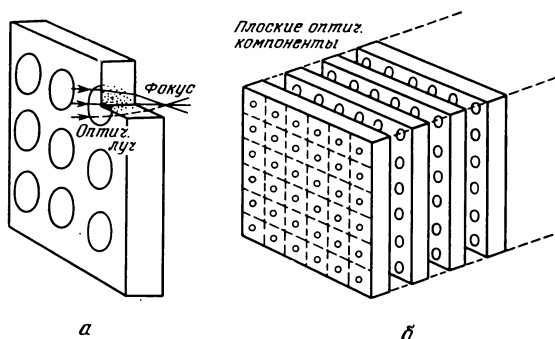


Рис. 3.27. Плоская матрица микролинз (а) и многослойная оптическая схема (б).

сфокусировать плоскую волну практически до пределов, определяемых дифракционными ограничениями. Такие линзы в настоящее время выпускаются для продажи.

Как уже отмечалось выше, линзы с градиентом показателя преломления изготавливаются очень тонкими с плоскими торцами. Такие линзы изготавливают нарезанием из одного длинного стеклянного стержня с последующей доводкой длины каждой из линз путем шлифовки торцов. Оптические оси линзы и используемого совместно с ней световода должны совпадать. Процесс изготовления таких линз содержит много технологических этапов, не позволяющих организовать их массовое производство. По этой причине в настоящее время разрабатывается конструкция плоской матричной линзы (рис. 3.27), отличающейся большей технологичностью. При изготовлении плоской матричной линзы на поверхности стеклянной пластины в процессе фотолитографии (который используется в полупроводниковой технологии) наносится маска, содержащая множество окон. Через указанную маску в процессе диффузии в стеклянную пластину вводятся примесные ионы, что создает в легированных областях высокий показатель преломления. С помощью метода фотолитографии можно, таким образом, производить целые массивы линз с хорошей воспроизводимостью свойств. Изготавливая этим методом массивы с множеством окон для соединения с оптическим волокном, фильтры и другие элементы оптических схем и наслаивая их, как это показано на рис. 3.27, б, можно производить в одном технологическом процессе сразу множество линз с согласованными со световодом оптическими осями. Это открывает возможность массового производства оптических схем.



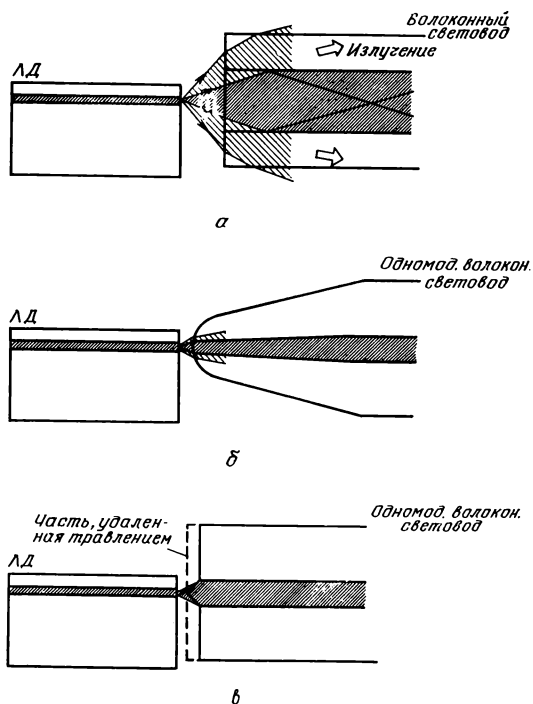


Рис. 3.28. Методы соединения полупроводникового лазера и волоконного световода: *a* — непосредственное соединение (потери излучения 7 дБ); *б* — соединение путем утоньшения конца световода (потери излучения 5,8 дБ); *в* — соединение с помощью микролинзы, изготовленной локальным травлением конца световода (потери излучения 3 дБ).

### 3.3.3. Согласование оптических приборов и световодов

В разд. 3.3.2 уже рассматривалось согласование полупроводникового лазера и световода с помощью различных видов линз. Кроме этого разрабатывается несколько методов согласования, не использующих линзы. Некоторые из них представлены на рис. 3.28.

В простейшем из них — методе непосредственного согласования (рис. 3.28, *a*) — оптические оси световода и полупроводникового лазера совмещаются. Угол расходимости луча полупроводникового лазера в вертикальной плоскости достигает примерно  $50^\circ$ , а максимальный угол ввода в световод — только  $24^\circ$ . В результате, несмотря на совмещение оптических осей лазера и световода, в световод вводится лишь часть излучения. Потери излучения здесь составляют примерно 7 дБ.

На рис. 3.28, *б* и *в* представлен способ согласования лазера и световода, при котором с целью расширения угла входа торцевая поверхность световода формируется в виде линзы. Этот способ позволяет уменьшить потери излучения и при вводе излучения в одномодовый волоконный световод. Однако добиться воспроизводимости при обработке концов световодов довольно трудно.

Вышеописанные способы относятся к согласованию полупроводникового лазера и световода. Условия согласования других оптических приборов и световодов достаточно общие: 1) совмещение оптических осей (по положению и углу наклона); 2) согласование по распределению интенсивности (размер пучка) и числовой апертуре  $NA$  (так же как в случае ввода излучения в линзу); 3) устранение отражения за счет просветляющих покрытий. Самый последний пункт уже описан в разд. 2.3.3, поэтому здесь не рассматривается.

### **3.4. Компоненты оптических схем**

В настоящем разделе рассматривается принцип действия и применение различных компонентов оптических схем.

#### **3.4.1. Световодный оптический соединитель**

Световодный оптический соединитель относится к основным компонентам и служит для соединения различных элементов оптических схем со световодами. Внешне он похож на BNC-соединитель коаксиального кабеля, однако с целью обеспечения высокоточного совмещения оптических осей в него введены различные усовершенствования.

Принцип соединения с помощью соединителя заключается во введении световода в осевое отверстие муфты (рис. 3.29), после чего муфта вставляется внутрь внешней втулки с прорезью. В этом случае если сердцевина световода не совпадает с осью соединителя, то точно совместить оптические оси соединяемых компонентов уже невозможно. По этой причине разработано несколько способов позиционирования сердцевины световода в центре втулки оптического соединителя. В одном из способов внутренний диаметр втулки формируется несколько больше внешнего диаметра световода. После того как световод покрывается для удобства кожухом, его сердцевина под микроскопом совмещается с центральной осью втулки, затем световод фиксируется с помощью клея. Такая система (так называемого С-типа) позволяет обеспечить высокую точность совмещения,

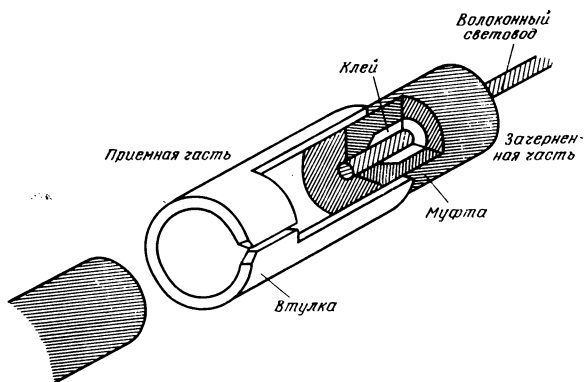


Рис. 3.29. Конструктивная схема оптического соединителя волоконного световода.

однако она требует применения установок индивидуального позиционирования и потому не годится для использования в производстве. Другой способ предполагает, что сердцевина и оболочка световода соосны. В этом случае световод вставляется в отверстие втулки почти без зазора и закрепляется клеем. Этот способ носит название системы FC-типа. Использование технологии высокоточной обработки при изготовлении втулки позволяет обеспечить соединение оптических компонентов с низким уровнем потерь излучения: для многомодового волоконного световода — в среднем 0,31 дБ, для одномодового волоконного световода — в среднем 0,55 дБ. На рис. 3.30, а показана конструкция световодного оптического соединителя FC-типа, используемого в общественной связи, а на рис. 3.30, б — его фото.

### 3.4.2. Многослойные фильтры

В тех случаях, когда из смешанного света с различными длинами волн необходимо выделить свет с одной определенной длиной волны, используются оптические фильтры. В системах оптической связи в качестве фильтров применяются дифракционные решетки и многослойные диэлектрические структуры.

Дифракционная решетка, как хорошо известно, представляет собой пластину, на которой сформирована структура выступов и выемок в виде периодически расположенных чередующихся линий, равно отстоящих друг от друга. При прохождении через дифракционную решетку излучение с различными длинами волн отклоняется на разные углы. Многослойная диэлектрическая структура изображена на рис. 3.31, а. Многослой-

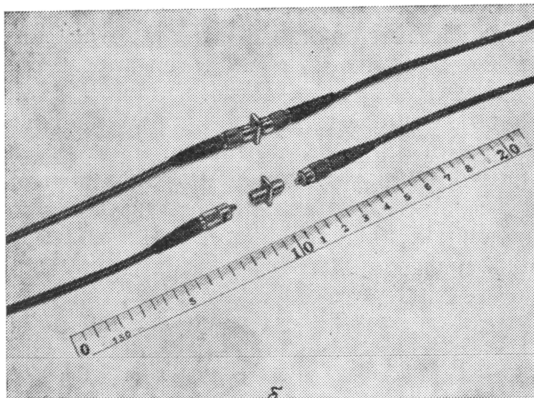
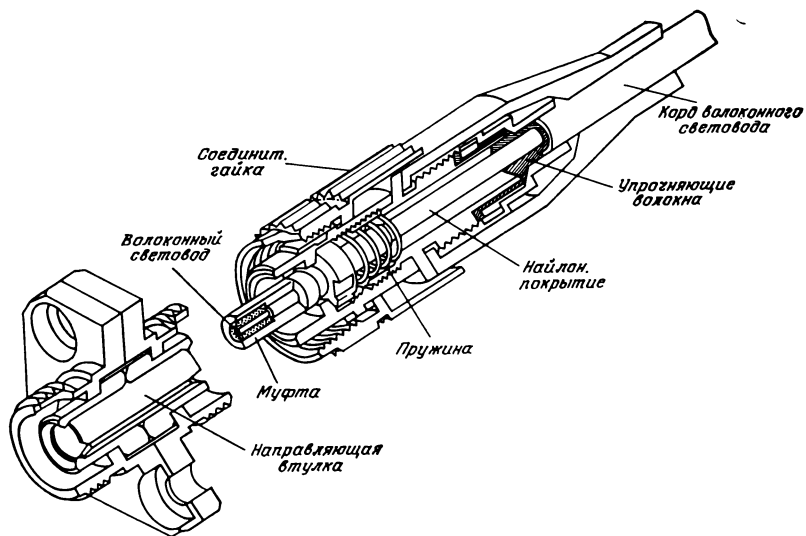


Рис. 3.30. Соединитель волоконных световодов: а — конструкция соединителя FC-типа фирмы NTT; б — соединитель фирмы «Сумитомо», взаимозаменяемый с соединителем FC-типа.

ная сэндвич-структура содержит два вида диэлектриков с разными показателями преломления, расположенные попеременно. Каждый слой имеет толщину, равную четвертьволновому отрезку (при наклонном падении луча под углом  $\theta$ , толщина изменяется в  $(\cos \theta)$  раз). Падающий на структуру свет частично отражается от границ раздела между слоями с различными показателями преломления. Часть излучения с длиной волны в  $\pi/4$  раз большей толщины слоя, ввиду синфазности излучения интерферирует и почти полностью отражается, как показано на рис. 3.31, б (коэффициент отражения близок к 1). Свет других длин волн имеет меньший коэффициент отражения и частично

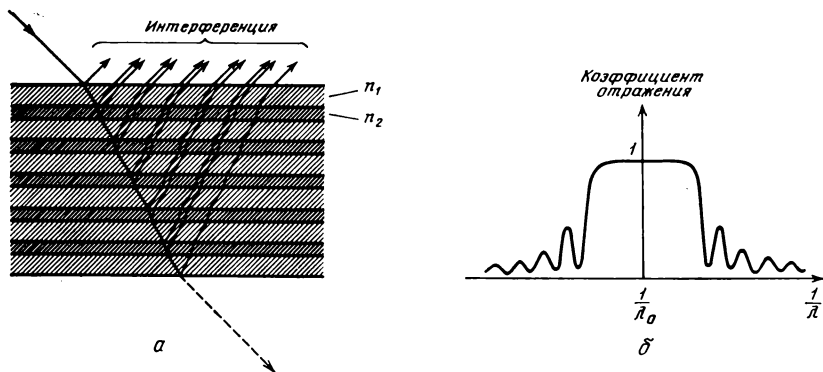


Рис. 3.31. Принцип действия многослойного диэлектрического фильтра: *а* — многослойная диэлектрическая структура; *б* — спектральная зависимость коэффициента отражения.

проникает через структуру. Таким образом, изменяя толщину слоев многослойной диэлектрической структуры, можно влиять на спектральную зависимость коэффициента отражения (или коэффициента пропускания).

### 3.4.3. Оптические ответители, однонаправленные соединители, смесители

В оптической связи часто требуются устройства, позволяющие разделять световой поток на множество частей и, наоборот, смешивать множество световых потоков.

Оптический ответитель дробит световой поток на множество частей. Как видно из рис. 3.32, *а*, он представляет собой стержневую линзу с градиентом показателя преломления, имеет клинovidное сечение и отражатели. Разделение светового пуч-

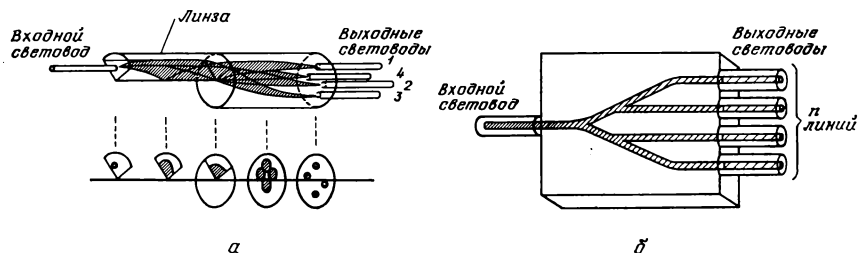


Рис. 3.32. Схема оптического ответителя: *а* — типа калейдоскопа, использующая линзу с градиентом показателя преломления; *б* — волноводного типа.

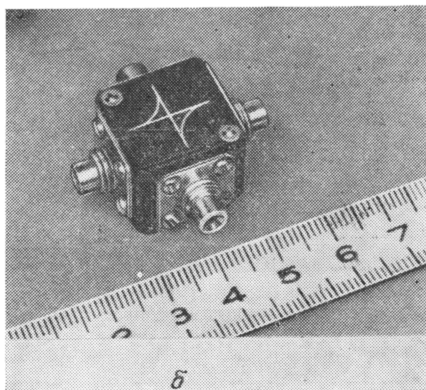
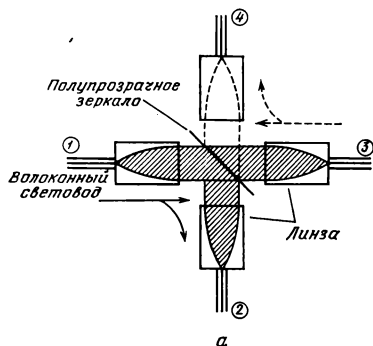


Рис. 3.33. Оптическая схема (а) и общий вид (б) однонаправленного соединителя с полупрозрачным зеркалом.

ка производится по принципу калейдоскопа по схеме, показанной на рис. 3.32, б и соответствующей случаю разделения света в одной плоскости по нескольким световодам. Если использовать эту оптическую схему в обратном направлении, то получается оптический смеситель различных световых сигналов.

Оптический однонаправленный соединитель представляет собой схему, объединяющую двухвходовый смеситель и ответвитель. Как видно из рис. 3.33, а, свет входит в световод, проходя по пути 1, и выходит по путям 2 и 3. Но если свет входит через световод по пути 3, то выходит из схемы по путям 1 и 4. В схему однонаправленного соединителя (рис. 3.33) кроме стержневой линзы с градиентом показателя преломления и полупрозрачного зеркала входят два одномодовых волновода, уложенные рядом для разделения светового пучка. Изменяя коэффициент отражения полупрозрачного зеркала, можно варьировать коэффициент деления, устанавливая произвольное соотношение вплоть до 1 : 1.

Оптический смеситель аналогичен однонаправленному соединителю, но допускает более 3 возможных путей распространения излучения. В общем случае оптический смеситель допускает смешение  $m$  световых пучков и ответвление  $n$  пучков. Как показано на рис. 3.34, а, световоды скручиваются, нагреваются и растягиваются, так что на участке сплавления световодов происходит объединение оптических каналов. На рис. 3.34, б приведен другой случай, когда свет многократно отражается в очень тонком длинном волноводе, что обеспечивает его почти однородное распределение.

Рассмотренные выше оптические компоненты — соединители, ответвители, смесители — находят применение в оптических

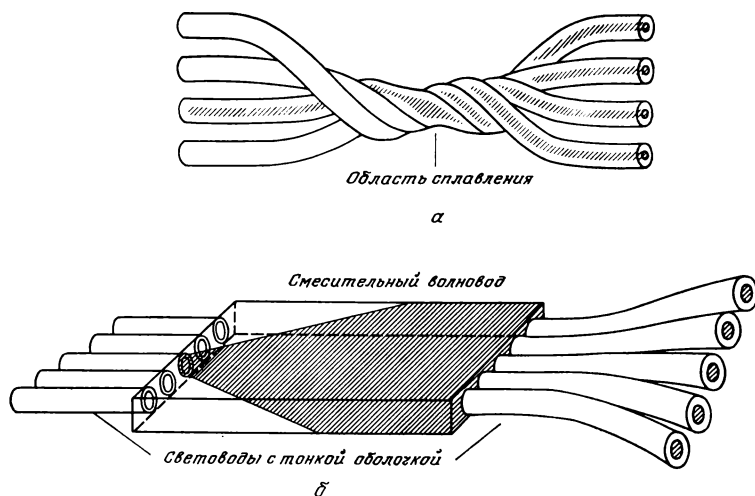


Рис. 3.34. Построение оптического смесителя: *а* — на сплавленных волоконных световодах; *б* — на смешивании света в волноводе.

системах связи, которые будут рассмотрены в разд. 3.5. Они используются для смешения или ответвления сигналов в оптических линиях передачи данных и локальных сетях.

#### 3.4.4. Оптические изоляторы

Оптические изоляторы — это элементы оптических схем, которые обеспечивают пропускание света от входа элемента к выходу почти без потерь, но почти не пропускают свет в обратном направлении. Оптические изоляторы применяются в быстродействующих передающих системах, где требуется устранение отраженного света. Если свет полупроводникового лазера, отражаясь от поверхности линзы или торца световода, возвращается в лазер, он нарушает стабильность условий генерации в активной области лазера и тем самым способствует повышению уровня шумовых сигналов.

Конструкция оптического изолятора, которая показана на рис. 3.35, содержит поляризатор и анализатор, оптические оси которых скрещены под углом  $45^\circ$ . Между поляризатором и анализатором размещена ячейка Фарадея из магнитооптического материала (см. разд. 1.4). Если поляризация входного пучка совпадает с оптической осью поляризатора, то свет проходит через ячейку Фарадея, что вызывает поворот плоскости поляризации излучения на угол  $45^\circ$ , и выходит через анализа-

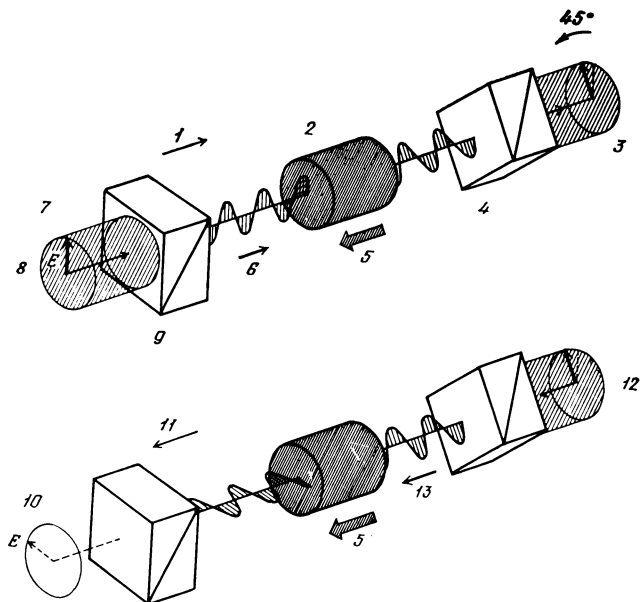


Рис. 3.35. Принцип действия оптического изолятора: 1 — прямое направление; 2 — ячейка Фарадея; 3 — пучок, прошедший через систему; 4 — призма анализатора; 5 — магнитное поле  $H$ ; 6 — входная волна; 7 — коллимированный входной пучок; 8 — поляризация; 9 — призма поляризатора; 10 — поляризация света, не пропущенного через систему в обратном направлении; 11 — обратное направление; 12 — пучок отраженного света; 13 — отраженная волна.

тор. При распространении отраженного света та его часть, поляризация которой совпадает с оптической осью анализатора, возвращается в оптический изолятор и снова проходит через ячейку Фарадея, но в обратном направлении. При этом плоскость поляризации отраженного света вновь поворачивается на угол  $45^\circ$ , так что плоскость поляризации отраженного света, падающего на поляризатор, оказывается ортогональной его оптической оси. Таким образом, поляризатор на входе оптического изолятора экранирует отраженный свет.

Магнитооптическим материалом ячейки Фарадея служат материалы с высоким отношением угла вращения Фарадея на единицу длины ячейки к потерям на поглощение (показатель качества). В спектральной области вблизи  $0,85 \text{ мкм}$  для этой цели применяется стекло, а в спектральной области вблизи  $1,3 \text{ мкм}$  — ферромагнитные кристаллы YIG ( $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  — железиттриевый гранат).

Качество оптического изолятора тем выше, чем меньше потери излучения при прохождении излучения в прямом направ-



лении и чем выше потери излучения при прохождении света в обратном направлении. В последнее время изготавливают оптические изоляторы с потерями в прямом направлении до 1 дБ и потерями в обратном направлении свыше 30 дБ. Разрабатываются также оптические изоляторы с конструкцией типа волноводов, в которых пропускание не зависит от поляризации света.

### 3.4.5. Оптический переключатель

Оптические переключатели — это элементы оптических схем, в которых распространение света прерывается под действием внешних электрических сигналов. Оптические переключатели используются в качестве прерывателей света между светозлучающими и фотоприемными элементами.

Оптические переключатели могут иметь механическую систему (рис. 3.36, *a*), когда, например, распространение излучения в световодах переключается механически управляемой призмой. Известны также оптические переключатели немеханического типа, использующие электрооптический (см. разд. 1.3), акустооптический или магнитооптический эффекты. Конструкции оптических переключателей механического типа проще, однако они имеют недостаточное быстродействие — несколько десятков миллисекунд, — кроме того, в случае их использования повышение надежности работы и стабильности характеристик является проблематичным.

На рис. 3.36, *б* показана конструкция электрооптического переключателя. В электрооптическом кристалле  $\text{LiNbO}_3$  или  $\text{LiTaO}_3$  путем диффузии примеси  $\text{Ti}$  сформированы одномодовые волноводы. На локальном участке, где волноводы сближаются к ним прикладывается электрическое поле, что позволяет влиять на связь между волноводами, электрически управляя изменением показателя преломления, т. е. структура служит в качестве однонаправленного соединителя. Кроме того, электрооптический переключатель оснащен электродной структурой улучшенного типа с более мягкими требованиями к точности изготовления. Она позволяет изменять показатель преломления на участке пересечения X-образных волноводов и создавать условия полного внутреннего отражения, прерывая связь между волноводами. Переключатель управляется напряжением в несколько вольт при высокой скорости переключения (время переключения порядка 1 мкс). Из-за влияния поляризации света на характеристики электрооптического переключателя необходимо поддерживать постоянное направление поляризации падающего света.

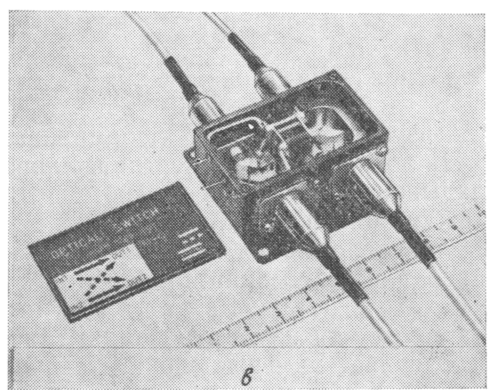
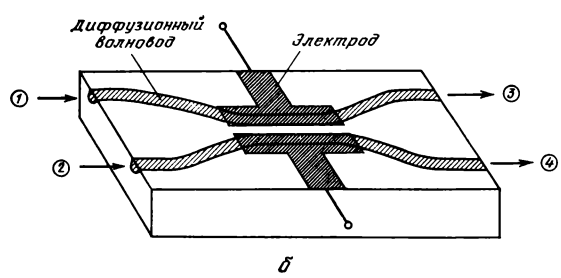
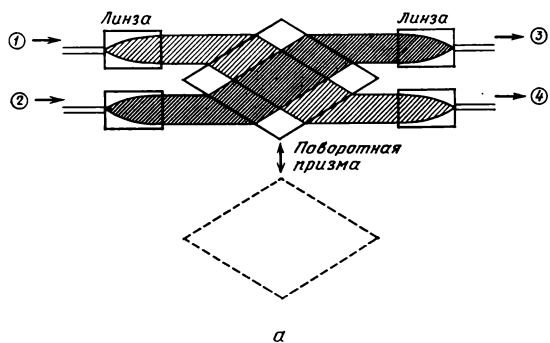


Рис. 3.36. Виды оптических переключателей: *а* — оптический переключатель с поворотной призмой; *б* — волноводный оптический переключатель с электрооптическим кристаллом; *в* — оптический переключатель с самоудержанием состояния на основе магнитооптического эффекта.

На рис. 3.36, в показан оптический переключатель, построенный на магнитооптическом эффекте. Переключатель имеет поляризационную разделяющую призму, которая изменяет направление пропускания в зависимости от поляризации света аналогично поляризатору и анализатору на рис. 3.35. Направление вращения плоскости поляризации света изменяется в зависимости от положительного или отрицательного направления магнитного поля электромагнита. В этом случае два ортогонально поляризованных пучка распространяются по двум различным оптическим путям. Каждый из пучков, проходя через магнитооптическую среду, подвергается действию эффекта вращения плоскости поляризации отдельно от другого пучка, поэтому зависимость характеристик магнитооптического переключателя от поляризации падающего света не проявляется. Электромагнит изготавливается из полужесткого магнитного материала, благодаря чему даже в случае отключения питания определенное состояние переключателя сохраняется за счет остаточной намагниченности. Таким образом, магнитооптический переключатель обладает способностью самоудержания состояния.

Разрабатываются, кроме того, оптические переключатели волноводного типа из тех же полупроводниковых материалов группы  $A^{III}B^V$ , которые применяются в полупроводниковых лазерах GaInAsP/InP, GaAs/AlGaAs и др.

### **3.4.6. Оптические мультиплексоры и демультиплексоры**

Оптический мультиплексор служит для введения в один световод множества оптических сигналов различных длин волн. Оптический демультиплексор, наоборот, применяется для разделения смешанного оптического излучения на сигналы, соответствующие различным длинам волн. Оптические мультиплексоры и демультиплексоры применяются (см. разд. 3.5.2) в многоканальной оптической связи. В качестве мультиплексоров могут быть также использованы оптические смесители, хотя в двухсторонней многоканальной связи они не применяются.

Как показано на рис. 3.37 оптические мультиплексоры и демультиплексоры объединяют в своей конструкции стержневую линзу с градиентом показателя преломления, многослойный диэлектрический фильтр. Благодаря использованию дифракционной решетки мультиплексоры позволяют передавать до 6 оптических сигналов различных длин волн. Указанные компоненты оптических схем обеспечивают низкие потери излучения (потери ввода) при разделении оптических сигналов (практически

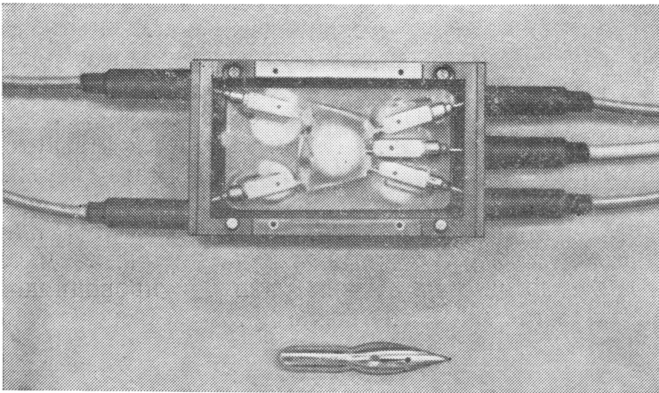
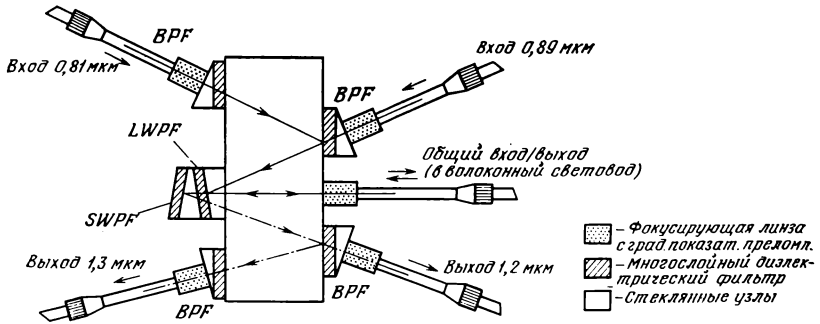


Рис. 3.37. Схема двунаправленного оптического 4-канального мультиплексо-ра-демультиплексо-ра: *BPF*-полосовой фильтр; *SWPF*-полосовой ФВЧ; *LWPF*-полосовой ФНЧ.

несколько дБ), а также исключают паразитное смешивание полезных сигналов с сигналами других длин волн (хорошая изоляция).

### 3.4.7. Модуляторы

Оптические модуляторы — это компоненты оптических схем, в которых модуляция излучения светового потока осуществляется внешним электрическим сигналом. Одни оптические модуляторы просто модулируют яркость света на выходе, другие изменяют направление распространения излучения. В первом случае оптические модуляторы применяются в сверхбыстродействующей оптической связи (несколько Гбит/с и выше) для модуляции излучения полупроводниковых лазеров, когда становится

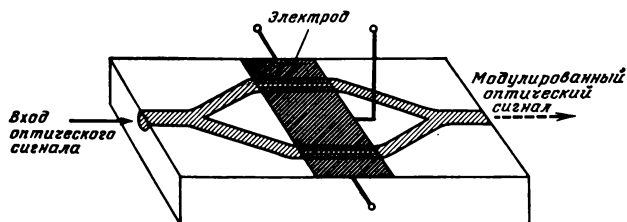


Рис. 3.38. Оптический модулятор интерференционного типа с электрооптическим кристаллом.

сложно осуществить ее в самом лазере. Во втором случае модуляторы используются в лазерных печатающих устройствах и устройствах лазерного сканирования.

На рис. 3.38 показан пример оптического модулятора световодного типа на кристалле  $\text{LiNbO}_3$ , легированном примесью  $\text{Ti}$ . В структуре сформировано два разделенных световода, показатель преломления которых меняется при изменении направления приложенного электрического поля на обратное. В результате появляется соответствующий сдвиг фаз и интерференция световых пучков. Оптический модулятор, имеющий конструкцию, подобную оптическому переключателю (рис. 3.36, б), и сделанный по типу «бегущей волны», обеспечивает высокую частоту модуляции порядка 18 ГГц.

В модуляторах, изменяющих направление распространения света, используется акустооптический эффект, действие которого основано на дифракции Брэгга на ультразвуковых волнах.

### 3.5. Волоконно-оптические линии связи

В предыдущих разделах рассмотрены различные компоненты оптических схем. В этом разделе описываются системы оптической связи, в которых используются указанные компоненты.

#### 3.5.1. Сфера применения волоконно-оптической связи

Сначала, пользуясь табл. 3.2, проанализируем ширину полосы пропускания сигнала современных систем связи, не ограничиваясь при этом волоконно-оптической связью. Поскольку волоконно-оптическая связь удобна для передачи сигналов в цифровой форме, для случаев применения импульсно-кодовой модуляции (ИКМ) аналоговых сигналов в таблице приводится также скорость передачи информации. Из таблицы видно, что по сравнению с обычной телефонной связью, телевизионным вещанием или передачей движущегося изображения с небольшим

Таблица 3.2

**Ширина полосы пропускания и скорость передачи данных для различных видов сигналов**

Вид информации	Ширина полосы пропускания основного сигнала	Основная частота	Квантизация (число битов)	ИКМ. Скорость передачи данных
Звук (телефон)	4 кГц	8 кГц	7 бит <sup>2</sup> +1 (синхронизирующий)	64 кбит/с
Звук (DAD <sup>1</sup> )	22,05 кГц	44,1 кГц	16 бит	2,03 Мбит/с <sup>3</sup>
ТВ-изображение	4 МГц	8 МГц	8 бит	32 Мбит/с <sup>4</sup>
Высококачественное ТВ-изображение	30 МГц	60 МГц	8 бит	504,3 Мбит/с <sup>5</sup>

Данные общественной связи 100, 200, 1200, 2400, 4800, 9600, 48000 бит/с

<sup>1</sup>) Цифровые аудиодиски. Конструкция имеет только запоминающую среду, передающей среды нет. Представлены для сравнения как пример Hi-Fi-звукозаписи\*.

<sup>2</sup>) При прямой квантизации по 7 бит ( $2^7=128$  уровней квантизации) за счет квантизации шума качество передачи ухудшается, однако за счет уплотнения квантизации шум снижается.

<sup>3</sup>) Ввиду использования избыточного кодирования получается более чем  $44,1 \times 16 = 705,6$  кбит/с.

<sup>4</sup>) Из-за сжатия полосы пропускания получается полуширина 8 МГц  $\times$  8 бит = 64 Мбит/с.

<sup>5</sup>) Практически еще не реализовано. Даны оценки скорости передачи при использовании ИКМ в случае, когда сигналы яркости и цвета кодируются вместе, звуковой сигнал передается с использованием аналоговой системы.

\* Международный стандарт качества бытовой звуковоспроизводящей — звукозаписывающей аппаратуры.

числом элементов, где предъявляются минимальные требования к качеству связи, системы передачи Hi-Fi звукозаписей, удовлетворяющих требованиям музыкальных критиков, а также сложного тонкого изображения должны обладать чрезвычайно большой пропускной способностью. Волоконно-оптическая связь, построенная на оптических волокнах с низкими потерями и широкой полосой пропускания, отвечает требованиям передачи больших объемов информации.

Следует отметить, что в волоконно-оптической связи выделяют три различные по скорости передачи информации и дальности связи группы линий связи, в которых используются разные виды светоизлучающих и фотоприемных элементов, а также световодов. К первой группе относятся волоконно-оптические линии связи с небольшой скоростью передачи информации (до нескольких десятков Мбит/с). В этом случае в качестве светоизлучающих и фотоприемных элементов в линиях использу-

ются светодиоды (СИД) и *pin*-фотодиоды (ФД). Хотя в таких линиях применяются многомодовые световоды, но мощность излучения, вводимого в световод, составляет несколько десятков микроватт, поэтому максимальная дальность связи не превышает 10 км. Однако волоконно-оптические линии связи можно сделать и более рациональными. Так, линии, которые относятся ко второй группе, обеспечивают скорость передачи информации более чем несколько десятков мегабитов в секунду при дальности связи свыше нескольких десятков километров. В этих линиях в соответствии с высокой скоростью передачи информации и дальностью связи светоизлучающими элементами являются полупроводниковые лазеры, а средой распространения служат градиентные и одномодовые световоды. В качестве фотоприемных элементов главным образом используются лавинные фотодиоды, работающие в полосе 1,3 мкм. К третьей группе относятся волоконно-оптические линии связи с высокой скоростью передачи информации и большой дальностью связи, использующие морские волоконно-оптические кабели. При этом применяется излучение с длиной волны 1,55 мкм, так как в этом случае потери излучения при передаче по световоду минимальны (0,2 дБ/км). Для того чтобы снизить ограничения полосы пропускания, связанные с рассеянием в материале световода (рис. 3.13) в указанном спектральном диапазоне, в качестве источника света применяют динамический одномодовый лазер DFB-типа с распределенной обратной связью и DBR-типа с распределенными брэгговскими отражателями. Линии связи, которые относятся к третьей группе, в настоящее время находятся на стадии исследований (надежных и прочих), направленных на скорейшее достижение практической реализации.

Проектирование волоконно-оптических линий связи производится в соответствии с требованиями, предъявляемыми к скорости передачи информации и дальности связи. При этом выбираются наиболее экономичные виды оптических приборов и световодов и определяется длина волны источника излучения. На рис. 3.39 показаны технические данные (дальность связи — по оси абсцисс, скорость передачи информации — по оси ординат) волоконно-оптических линий связи, применяемых на практике в различных областях.

### **3.5.2. Системы модуляции излучения и мультиплексная передача информации**

Как и в случае электрической связи, в волоконно-оптической связи применяют две системы модуляции — аналоговую и цифровую, блок-схемы которых представлены на рис. 3.40.

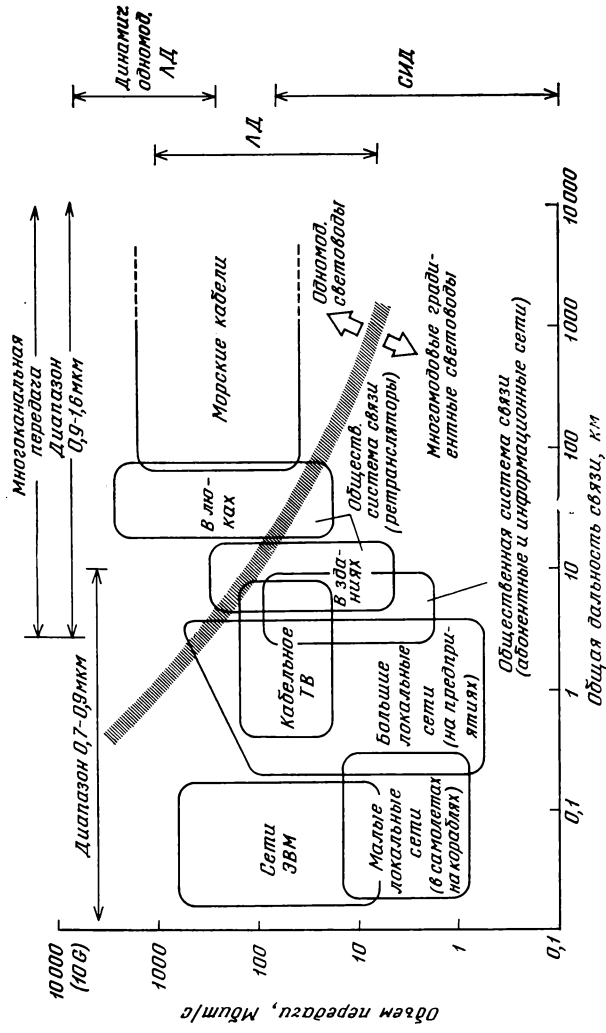


Рис. 3.39. Области применения волоконно-оптической связи.



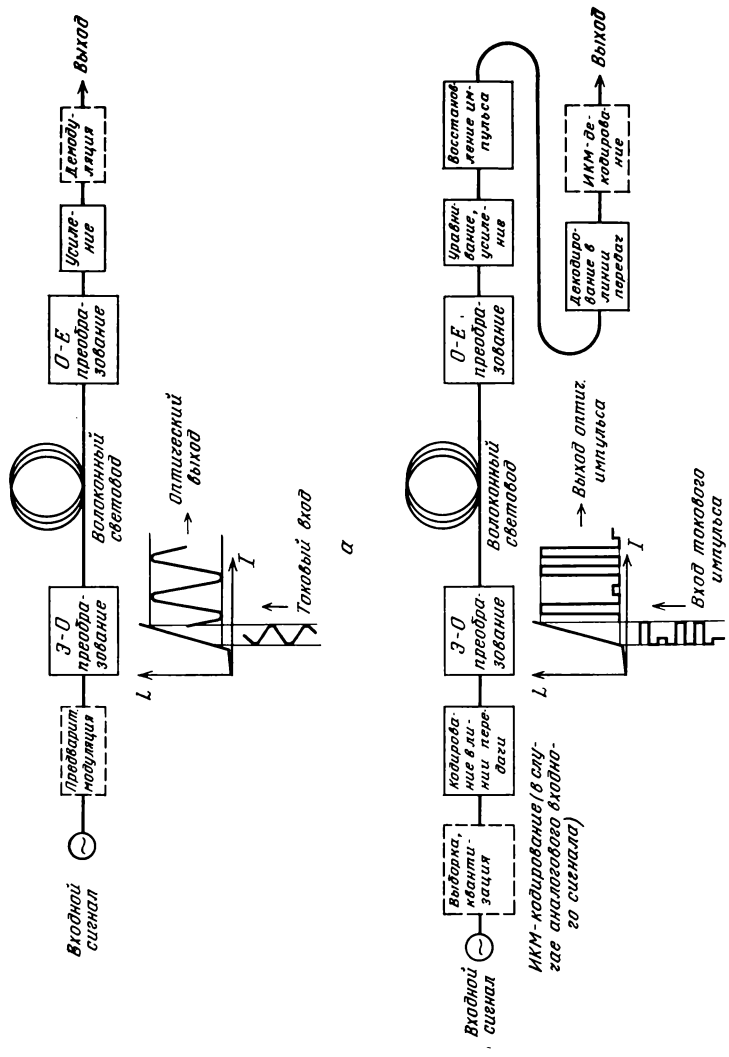


Рис. 3.40. Блок-схемы аналоговой и цифровой систем передачи информации. Пунктирной линией показаны устройства, применение которых не обязательно: *а* — аналоговая система; *б* — цифровая система.

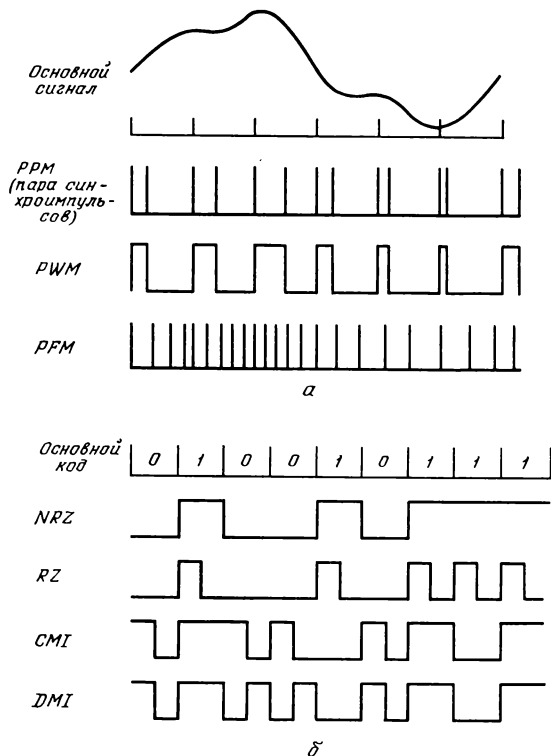


Рис. 3.41. Системы модуляции, применяемые в волоконно-оптической связи: **а** — аналоговые системы предварительной модуляции; **б** — цифровые системы кодирования.

Аналоговая система проста и заключается в модуляции интенсивности излучения, что означает преобразование электрического сигнала в сигнал интенсивности излучения. Преимуществом аналоговой системы модуляции является простота и экономичность оборудования, однако в этом случае необходимо использование схем компенсации влияния нелинейности вольт-амперных характеристик светоизлучающих элементов СИД и лазерных диодов. При использовании аналоговой системы модуляции в волоконно-оптической линии связи дальность связи без ретрансляторов не превышает 10 км, притом в линии не может применяться более одного ретранслятора. В случае необходимости увеличения расстояния между ретрансляторами и числа ретрансляторов, как показано на рис. 3.41, **а**, предваритель-

но производится импульсно-кодовая модуляция положения основных сигналов (*PPM*), ширины импульсов (*PWM*) и частоты следования импульсов (*PFM*), после чего полученная последовательность импульсов используется для модуляции интенсивности света. Аналоговая система модуляции проста, не требует использования кодирующих схем и применяется при передаче изображения на небольшие расстояния.

Цифровая система модуляции, как видно из рис. 3.40, б, предполагает передачу световых импульсов, интенсивность которых модулируется электрическими импульсами. В случаях когда на вход поступает аналоговый сигнал, он кодируется в результате импульсно-кодовой модуляции, мультиплексируется, затем кодируется в передающей схеме и после этого производится модуляция интенсивности излучения. Существует несколько методов кодирования в передающей схеме (рис. 3.41, б). В методе без возвращения к нулю (*NRZ*) логическая 1 соответствует состоянию с сильной интенсивностью света, а логический 0 — состоянию со слабой интенсивностью света, однако если нули и единицы следуют непрерывно, то получить синхронизированную информацию трудно. В методе с возвращением к нулю (*RZ*) через время, соответствующее положению периода после начала прохождения сигнала «1», производится возврат к нулевому состоянию. Еще одним видом кодирования является кодирование независимых последовательностей битов (*BSI*), позволяющее получить синхронизированную информацию при наличии непрерывно следующих нулевых состояний. Применяются также *СМ1*-метод кодирования, в котором период делится на две части и производится попеременное инверсное преобразование «0» в «10», а «1» в «11» или «00» и *DM1*-метод кодирования, в котором при инвертировании нулей и единиц период изменяется в 2 раза.

Волоконно-оптические линии связи являются широкополосными линиями передачи, однако поскольку применяемые в них светоизлучающие элементы имеют нелинейные вольт-амперные характеристики, то для реализации широкополосной передачи более удобны линии, передающие цифровые данные.

В электрической связи для передачи большого количества информации по одной линии (например, многоканальная телефонная связь) пользуются системами мультиплексной передачи, в частности с частотным уплотнением каналов (*FDM*) и временным уплотнением каналов (*TDM*). В волоконно-оптической связи повышение объема передаваемой информации и обеспечение двухсторонней связи по одной волоконно-оптической линии можно осуществить за счет мультиплексной передачи оптических сигналов различных длин волны, излучаемых разными оптическими источниками (рис. 3.42). Оптические мультиплексоры и

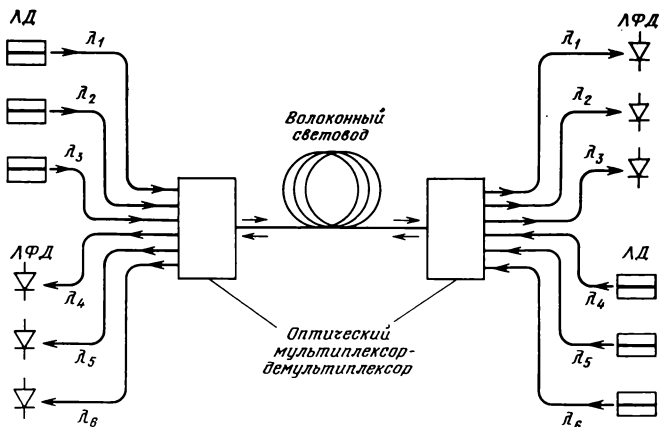


Рис. 3.42. Принцип многоканальной передачи (WDM).

демultipлексоры, рассмотренные в разд. 3.45, являются оптическими компонентами, необходимыми для организации такой многоканальной связи.

### 3.5.3. Примеры волоконно-оптических линий связи

Как видно из рис. 3.39, волоконно-оптическая связь может быть использована в самых различных областях. В качестве примера рассмотрим используемые в настоящее время японской компанией NTT межстанционные волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) и локальные сети, разработки которых развиваются сейчас очень быстро.

Многоканальные системы с ИКМ компании NTT включают 5 групп: от первой группы (1,5 Мбит/с, 24 канала) до пятой (400 Мбит/с, 5760 каналов). Однако практически в настоящее время реализованы волоконно-оптические линии от второй до пятой групп: от F-6M до F-400 M. Основные технические данные этих линий представлены в табл. 3.3.

При больших расстояниях между ретрансляторами — до 25 км — последние устанавливаются в зданиях, что упрощает их монтаж и техническое обслуживание по сравнению с установкой ретрансляторов в подземных люках. Система F-32M более экономична в сравнении с ранее используемыми системами. Система с цифровой передачей информации F-6M конкурирует с металлической кабельной линией (DP-1,5 M) по своей экономичности. Планируется повышение экономичности системы путем введения мультиплексной передачи информации.

Волоконно-оптические линии, применяемые в настоящее время в общественной системе связи компании NTT

Таблица 3.3

	F-6 M	F-32 M	F-100 M	F-400 M
Скорость передачи информации	ин- 6,312 Мбит/с	32,064 Мбит/с	97,728 Мбит/с	397,200 Мбит/с
Система кодирования	СМ1	СМ1	8В1С <sup>1)</sup>	10В1С <sup>1)</sup>
Скорость передачи линии	по 12,624 Мбит/с	62,128 Мбит/с	111,689 Мбит/с	445,837 Мбит/с
Объем передачи	96 телефонных каналов	480 телефонных каналов и 1 ТВ-канал	1440 телефонных каналов и 3 ТВ-канала	5760 телефонных каналов и 12 ТВ-каналов
Волоконный световод	Многомодовый градиентный			
Светозлучающий элемент	Полупроводниковый лазер на GaInAsP/InP			
Рабочая длина волны	1,2; 1,3 мкм <sup>2)</sup>			
Фотоприемный элемент	ЛФД на основе Ge			
Максимальное расстояние между ретрансляторами	25 км		25 км	25 км
Частота ошибок кодирования ретранслятора	Менее 10 <sup>-10</sup> на 1 ретранслятор		Менее 10 <sup>-11</sup> на 1 ретранслятор	

<sup>1)</sup> Общий случай — кодирование mB1C — кодирование по m двойных чисел с одним дополнительным вводом.  
<sup>2)</sup> Мультиплексная передача на двух длинах волн.

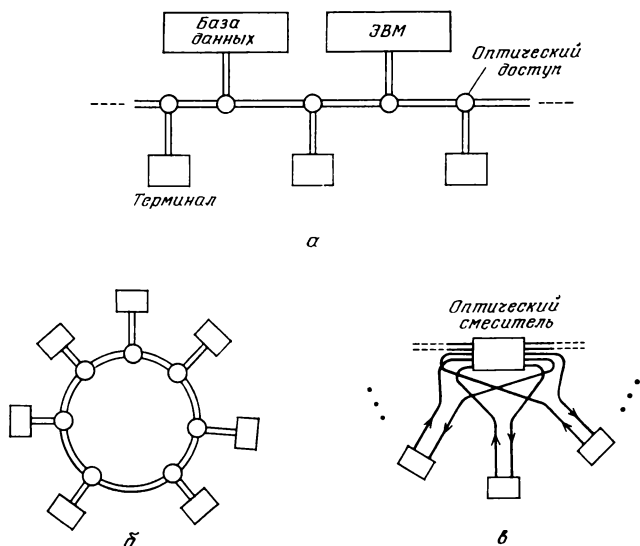


Рис. 3.43. Типы локальных сетей: а — линейный тип; б — кольцевой; в — радиальный.

В настоящее время система F-6M вводится в городские телефонные сети.

Продолжается разработка идеи новой информационной службы (двухсторонняя связь с передачей изображения), которая предполагает введение волоконно-оптических линий в систему абонентной связи.

Кроме того, в последнее время в системе общественной связи как средства АСУ предприятием и учреждением быстро развиваются локальные сети, оснащенные большими и малыми компьютерами для обработки и запоминания данных с быстрым выводом на печать. Локальные сети органично связывают различные устройства обработки информации, способствуя повышению эффективности их использования. В этой сфере начали появляться оптические локальные сети, использующие волоконно-оптическую связь. Вообще говоря, локальные сети, как показано на рис. 3.43, бывают линейного, кольцевого и радиального типов. Оптические локальные сети также могут быть и линейного и кольцевого типа. В локальных сетях линейного типа в узлах, соединяющих различные устройства с волоконно-оптической линией связи, оптический сигнал преобразуется в электрическую форму, затем подвергается определенной обработке, после чего полученный электрический сигнал преобразуется обратно в оптическую форму и передается в следующий

узел — это так называемые активные системы. Локальные сети линейного типа с пассивной системой, в узлах которых используются оптические мультиплексоры и демультимплексоры, обеспечивают прием сигналов в световод. Локальные сети радиального типа используют звездообразные соединители, что позволяет распределить сигнал, который поступил из одного узла, по всем остальным.

Указанные выше системы предполагают подсоединение множества оконечных устройств к одной линии передачи. При этом по одной линии распространяется множество сигналов одновременно, что может приводить к столкновению сигналов. Для предотвращения таких столкновений используются системы управления доступом, в частности для локальных сетей линейного и кольцевого типов CSMA/CD-системы подтверждения открытого состояния линии связи и начала передачи сигнала. Применяют также системы «пропускания разговора», в которых пакеты импульсов последовательно транслируются между узлами и передаются по линии только во время прохождения специального сигнала. В локальных сетях радиального типа применяют систему временного разделения, в которой для передачи сигналов от каждого оконечного пункта линии выделен специальный временной интервал.

Таким образом, описанные выше волоконно-оптические линии связи применяются в различных областях — от общественных сетей связи на дальних расстояниях с большими объемами передачи информации до локальных сетей сравнительно малого радиуса действия. В последнее время благодаря разработке новых материалов световодов с очень малыми потерями излучения и повышению быстродействия светоизлучающих приборов дальность связи и объемы передаваемой по линиям информации продолжают возрастать. Сфера применения волоконно-оптической связи, вероятно, будет расширяться и в дальнейшем.

## Датчики и преобразователи

Микроэлектроника — это сердце современной электроники. Микроэлектроника — область техники, которая благодаря применению твердотельных материалов, главным образом полупроводников, использованию сверхтонкой технологии позволяет обеспечить чрезвычайно широкие функциональные возможности приборов. Функции приборов и устройств микроэлектроники можно разделить на два основных вида — обработку электрических сигналов и преобразование какого-либо внешнего физического воздействия в электрические сигналы. Во втором из этих двух случаев подразумеваются датчики и преобразователи. В данной главе рассматриваются датчики и преобразователи на основе полупроводниковых материалов.

Полупроводники — это материалы, электрические характеристики которых чувствительны к изменениям внешней среды. Например, под действием тепла, света, давления, магнитного поля и др. значительно изменяется электропроводность полупроводников. Анализируя эти изменения, можно понять физическую природу и внутреннюю структуру полупроводника. Данный метод в настоящее время используется при исследовании свойств полупроводниковых материалов.

Работа полупроводниковых датчиков базируется на способности полупроводников к преобразованию сигналов. В данной главе речь идет о датчиках, где используются полупроводниковые материалы, причем не только однородные полупроводники, но и полупроводниковые структуры с локальными изменениями электрических свойств. В таких датчиках путем применения сверхтонкой технологии легко реализуются удивительно широкие функциональные возможности и отличные рабочие характеристики.



Ранее в технике использовались датчики, основанные на механическом или магнитоэлектрическом принципе. Такие датчики имели многообразные формы и сложные конструкции, для их применения нужны были обширные специальные знания. Кроме того, они перестали соответствовать все возрастающим требованиям. По сравнению с прежними нынешние полупроводниковые датчики миниатюрны, на их основе легко конструировать интегральные устройства и к тому же эти датчики просты в обращении. Развитие полупроводниковой техники и технологии открывает перспективу разработки новых датчиков с еще более высокими рабочими показателями и широкими функциональными возможностями. В этой главе описаны важнейшие моменты современной техники датчиков.

#### 4.1. Функции и роль датчиков

*Система и датчик.* Со времени изобретения транзистора техника устройств обработки электрических сигналов получила быстрое развитие. Компьютеры также являются системами обработки электрических сигналов, и где бы они ни использовались — в науке, производстве или общественной сфере, — для их применения необходимы устройства, осуществляющие связь компьютеров с внешним миром. Многообразные эффекты внешнего мира не ограничиваются в своих проявлениях лишь электрическими сигналами. Чрезвычайно многочисленны различные физические явления (например, звук, свет, температура, давление, перемещение и т. д.), их можно насчитать несколько десятков и более. Для преобразования информации о физических явлениях в форму электрического сигнала в электронных системах необходимы чувствительные устройства — датчики, о которых и пойдет речь в этой главе.

На рис. 4.1 показано положение датчика в электронной системе, содержащей компьютер, и их взаимосвязи. Из рисунка понятно, что какова бы ни была мощность компьютера и его возможности в плане обработки информации, но если система в целом не способна точно воспринять и преобразовать в электрические сигналы информацию об изучаемом явлении, она не сможет выполнить своего назначения. С этой точки зрения роль датчика в системе не менее важна, чем роль компьютера или выходного устройства. Это позволяет лучше понять роль датчика в электронной системе.

*Формы преобразования.* Существуют две формы преобразования внешней информации, характеризующей различные физические явления, в электрические сигналы. В первом случае, ког-

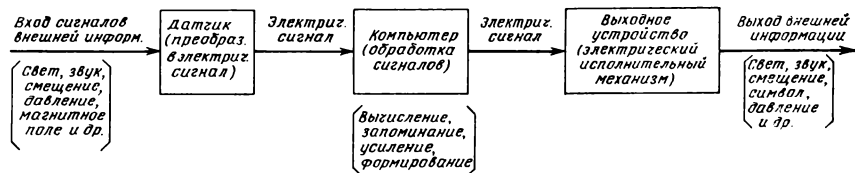


Рис. 4.1. Электронная система на базе компьютера и датчика.

да датчиком является неактивный элемент, под действием внешнего возмущения изменяются характеристики датчика. Но так как при этом питание самого датчика осуществляется от электрического источника, то при изменении его характеристик в цепи питания датчика возникает электрический сигнал, соответствующий внешней информации. Термисторы, где изменение температуры приводит к изменению сопротивления материала, тензодатчики, внутреннее сопротивление которых изменяется за счет деформаций, вызываемых внешней нагрузкой, магниторезистивные элементы, сопротивление которых меняется под действием магнитного поля, фоторезисторы, изменение сопротивления которых вызывается действием внешнего освещения, и др. — все это многочисленные примеры датчиков, питающихся от источника фиксированного напряжения. Изменение сопротивления датчика под действием внешнего сигнала вызывает соответствующее изменение тока в цепи питания, которое и регистрируется как выходной сигнал. Во множестве подобных случаев непосредственно сам датчик энергии от источника внешнего воздействия почти не потребляет и генерирует электрические сигналы за счет работы источника питания. По этой причине датчики такого типа не могут функционировать при отсутствии источника питания.

Для повышения чувствительности датчиков формируют структуры второго типа на основе однородного полупроводникового материала, в котором формируются неоднородности, а именно диодные структуры с  $pn$ -переходом и транзисторные структуры с возможностью усиления сигнала. Для этого типа датчиков в случаях, когда серьезное значение придается только высокой чувствительности, пропорциональная связь между внешней информацией и преобразованным электрическим сигналом, т. е. точность преобразования, часто утрачивается. И наоборот, в случаях использования только резистивных свойств однородного полупроводникового материала чувствительность датчика ниже, но зато гарантирована точность преобразования.

Датчики, в которых используется однородный полупроводниковый материал, называются датчиками объемного типа, а дат-

чики на диодных и транзисторных структурах — датчиками на переходах. В табл. 4.1 приведены сравнительные характеристики структур объемного типа и структур на переходах, использующих одинаковый полупроводниковый материал (например, Si и др.) для одного и того же вида внешней информации (оптическая информация). Зависимость между сигналом внешней информации и выходным электрическим сигналом, вольт-амперные характеристики и пр. для структур объемного типа являются линейными, а для структур на переходах — нелинейными. Поэтому, если сигнал внешней информации изменяется в широком динамическом диапазоне, применяются датчики объемного типа. В частности, эти датчики используются при необходимости получения на выходе аналогового сигнала.

С другой стороны, когда более серьезное внимание уделяется высокой чувствительности, а не линейности, при формировании на выходе цифровых сигналов предпочтительнее датчики на переходах. При этом динамический диапазон изменений сигнала внешней информации, в котором обеспечивается линейность преобразования, узок, получение же линейных характеристик в широком диапазоне невозможно. Однако в последнее время разработаны интегральные датчики, содержащие структуры объемного типа с улучшенной линейностью преобразования, к которым подключены усилительные устройства.

Из анализа данных табл. 4.1 понятно, что по форме преобразования полупроводниковые датчики могут быть разделены на две категории — датчики-преобразователи сигнала и датчики-преобразователи энергии. Если, например, рассматривать фотодатчики, то фотодиод преобразует энергию света в электрический сигнал, тогда как солнечный элемент преобразует энергию света в электроэнергию. Хотя в данном случае используется один и тот же полупроводниковый материал (Si), конструкции подобных датчиков и их характеристики отличаются. Таким образом, в зависимости от цели применения датчика и формы преобразования разработаны и используются датчики всевозможных конструкций.

*Многомерные датчики.* Известно много случаев, когда возникает необходимость восприятия трехмерных объектов внешнего мира. Когда мы переходим от точки к линии, от линии к плоскости, от плоскости к объему, информация как бы расширяется в пространстве, а ее объем возрастает. Следовательно, когда термпарный датчик преобразует информацию о точке на температурной шкале, когда при использовании факсимильного оптического считывающего устройства на странице возникает информация линейного характера или когда при применении телевизионной камеры — информация на плоскости, то можно

Таблица 4.1

## Полупроводниковые датчики

Форма преобразования сигнала	Полупроводниковый датчик	Тип датчика	Полупроводниковый материал	Физический эффект
Магнетизм	→ электричество (напряжение)	Объемный ( <i>n</i> -тип)	InSb, InAs, Ge, Si	Эффект Холла
	→ электричество (сопротивление)	Объемный ( <i>n</i> -тип)	InSb, InAs	Магниторезистивный эффект
	→ электричество (сопротивление)	На <i>p</i> -переходе	Ge, Si	Изменение поверхностной рекомбинации инжектированных носителей
Давление	→ электричество (напряжение)	Объемный	CdS, ZnO	Пьезоэлектрический эффект
	→ электричество (сопротивление)	Объемный ( <i>p</i> -тип)	Ge, Si, InSb	Пьезорезистивный эффект
	→ электричество (сопротивление)	На <i>p</i> -переходе или контакте Шоттки	Si	Изменение кристаллической структуры
Тепло (температура)	→ электричество (напряжение)	Объемный ( <i>n</i> -тип и <i>p</i> -тип)	PbTe, Bi <sub>2</sub> Te <sub>3</sub>	Эффект Зеебека
	→ электричество (сопротивление)	Объемный (поликристаллический)	NiO, CoO, FeO	Изменение числа носителей под действием температуры
	→ электричество (ток)	Объемный (поликристаллический) На <i>p</i> -переходе	Se, CdS Si, GaAs	Фото-ЭДС Фото-ЭДС
Свет	→ электричество (сопротивление)	Объемный (поликристаллический)	CdS	Увеличение числа носителей под действием света

→ электричество (ток)	Фототранзистор	На <i>pn</i> -переходах	Si, Ge	Увеличение числа носителей под действием света
Радияция (жесткое излучение)	Датчик радиации	На <i>pn</i> -переходе	Si	Генерация электронно-дырочных пар
→ электричество (ток)	Полупроводниковый счетчик	На <i>pn</i> -переходе	Ge, Si	Генерация электронно-дырочных пар
→ электричество (ток)	Тензодатчик	Объемный	Ge, Si	Передача деформации
Перемещение (смещение)	Диодный тензодатчик	На <i>pn</i> -переходе или контакте Шоттки	Si	Передача давления
	Элемент Холла	Объемный	InSb, InAs, Ge, Si	Передача магнитного поля
	Магниторезистивный элемент	Объемный	InSb, InAs	То же
	Магнитодиод	На <i>pn</i> -переходе	Ge, Si	→
	Фоторезистор	Объемный (поликристаллический)	CdS	Передача света
	Солнечный элемент	На <i>pn</i> -переходе	Si	→
Влажность	Датчик влажности	Объемный (на базе поверхностного слоя)	Ge	Адсорбция на лицевой поверхности
Газ	Датчик газа	Объемный (на базе поверхностного слоя)	ZnO, SnO <sub>2</sub>	То же

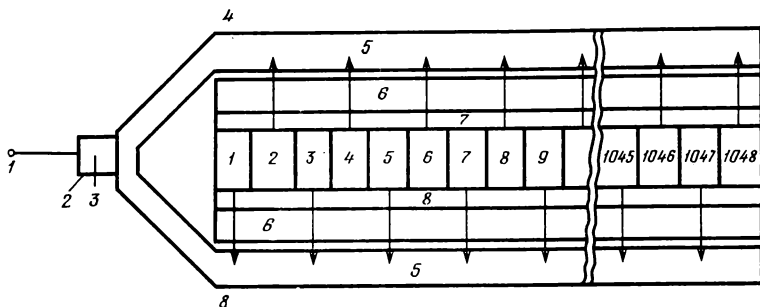


Рис. 4.2. Линейный датчик на ПЗС: 1 — выход; 2 — зануляющий электрод; 3 — выходной затвор; 4 — для четных; 5 — сдвиговый регистр на ПЗС; 6 — затвор сдвига; 7 — электрод накопления; 8 — для нечетных.

сказать, что имеет место повышение размерности информации, воспринимаемой датчиком.

При конструировании быстродействующих датчиков, преобразующих информацию одномерного и двумерного характера, широко применяется технология микроэлектроники. Для множества датчиков интегрального типа, в которых осуществляется переход от преобразования информации о точке к преобразованию информации двумерного характера, появляется необходимость во временной развертке преобразованных электрических сигналов. Примерами таких датчиков могут служить устройства с безлучевым электронным сканированием — одномерные твердотельные передающие приборы (линейные датчики), двумерные твердотельные приборы (приборы с зарядовой связью ПЗС) и др. Возможен также другой способ получения одномерной и двумерной информации путем многократного перемещения отдельных фотодатчиков (фотодиодов), их одномерного и двумерного вращения.

На рис. 4.2 изображена блок-схема линейного датчика на основе ПЗС. В его центральной части содержится линейный массив фотодиодов (ФД) (номера от 1 до 1048), сверху и снизу от которого размещены сдвиговые регистры на ПЗС. В процессе действия датчика ФД преобразуют внешний оптический сигнал в электрический заряд. Затем этот сигнальный заряд передается от ФД с четными и нечетными номерами на верхний и нижний сдвиговые регистры на ПЗС соответственно. Подключение синхроимпульсов к сдвиговым регистрам на ПЗС обеспечивает передачу сигнального заряда на левую сторону регистров. В результате на выход датчика через выходной затвор поступает ряд разделенных во времени импульсов. Массив ФД и передающая часть на основе ПЗС формируются с использованием технологии микроэлектроники.

На рис. 4.3 изображен двумерный датчик изображения на ПЗС, использующий межстолбцевой перенос заряда. Датчик содержит фотоприемные секции — линейные массивы из 400—500 ФД, причем к каждой из фотоприемных секций справа примыкает передающая секция (сдвиговый регистр на ПЗС). Фотоприемные секции преобразуют оптический сигнал в электрический заряд, который передается одновременно из всех ФД в передающие секции. Затем заряд переносится поочередно из каждой секции в размещенный ниже регистр вывода на ПЗС, по которому электрические импульсы передаются налево, на выход устройства. Таким образом, оказывается возможным за счет безлучевого электронного сканирования оптической информации двумерного характера (оптического изображения) получить на выходе датчика ряд разделенных во времени импульсов.

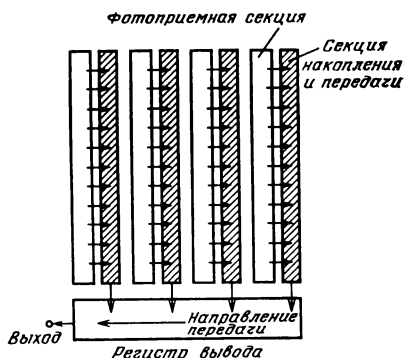


Рис. 4.3. Датчик изображения на ПЗС.

В настоящее время один элемент изображения, содержащий соединенные ФД и ПЗС-элемент, размещается на площади  $100 \text{ мкм} \times 100 \text{ мкм}$ . Технология микроэлектроники позволяет формировать на подложке размером  $6 \text{ мм} \times 8 \text{ мм}$   $500 \times 650$  элементов изображения. Кроме описанных видов датчиков существуют также структуры, в которых вместо ПЗС в каждом элементе изображения используется МОП-транзистор, что позволяет осуществлять переключательную координатную адресацию.

Помимо регистрации амплитудно-модулированной многомерной оптической информации в настоящее время производится также регистрация цветного изображения и в том числе в длинноволновой части спектра. Показательным примером таких датчиков являются цветные телевизионные камеры. В этих устройствах на основе уже рассмотренных нами двумерных датчиков на ПЗС поверх каждого элемента изображения формируются три цветных фильтра (красный, зеленый и синий), а иногда и дополнительный фильтр, что позволяет получить на выходе датчика информацию о цвете. Вслед за этим вступает в действие схема обработки сигналов, которая формирует и выдает информацию о двумерном цветном изображении объекта.

В процессе регистрации объемного изображения фотоэлектрическое преобразование производится двумерными датчиками

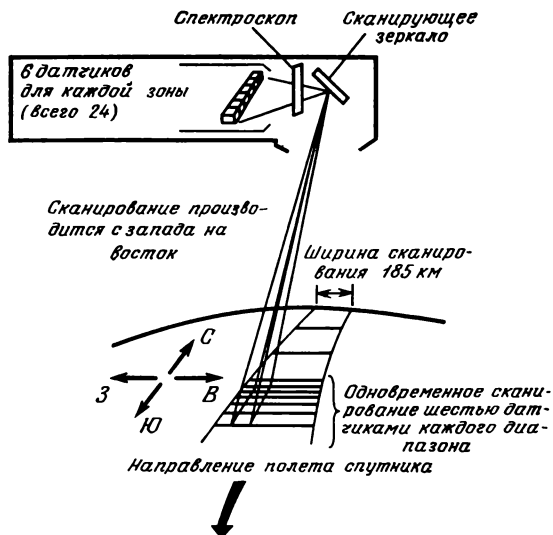


Рис. 4.4. Система многозонного сканирования на спутнике «Ландсат-1».

изображения. При этом используются два двумерных датчика изображения, расположенные на некотором расстоянии друг от друга (соответственно расстоянию между глазами человека), и информация трехмерного характера получается в результате ее восстановления схемой обработки сигналов. Понятно, что для получения дополнительной информации о цвете объемного изображения потребуется создание с помощью технологии микроэлектроники сложного многофункционального устройства, интегрально объединяющего систему датчиков объемного изображения и компьютер для обработки сигналов.

Показательным примером механического типа сканирования является многомерный датчик с дистанционным управлением, детектирующий с искусственного спутника Земли данные о температуре на поверхности Земли и цветное изображение. Как показано на рис. 4.4, система многозонного сканирования (МЗС) размещается на искусственном спутнике Земли или целевом аппарате. Данные по четырем диапазонам сканирования по поверхности Земли приведены в табл. 4.2. С помощью сканирующего зеркала точечные данные непрерывно разворачиваются в линейную информацию, и за счет движения всей системы в заданном направлении получается информация о поверхности Земли, снятая в определенной полосе. На каждый диапазон сканирования имеется шесть детектирующих устройств (датчиков), перед которыми в системе встроен спектро-



Таблица 4.2

## Спектральные диапазоны сканирования

Наименование диапазона	Длина волны, мкм
4	0,5—0,6
5	0,6—0,7
6	0,7—0,8
7	0,8—1,1

Таблица 4.3

## Технические данные

Мгновенный угол обзора	0,0049° (0,086 мрад)
Разрешение	79 м (при наиболее благоприятных условиях)
Частота сканирования	13,62 Гц
Эффективность сканирования	65%
Выходной сигнал	Цифровой, скорость передачи 15 Мбит/с
Вес, потребляемая мощность	56 кг, 60 Вт

скоп. Технические данные системы МЗС спутника «Ландсат-1» приведены в табл. 4.3. Функции датчиков выполняют фотоэлектронные умножители.

На исследовательской станции «Скайлэб» в качестве датчиков использовались изображенные на рис. 4.5 структуры на основе CdHgTe, детектирующие в девяти зонах в спектральной полосе 0,41—112 мкм, в трех зонах в спектральной полосе 1,2—2,35 мкм, в двух зонах в спектральной полосе 10,2—12,5 мкм. С использованием спектральной системы на призмах и фильтрах на МЗС спутника «Ландсат-1» в этом диапазоне выделя-

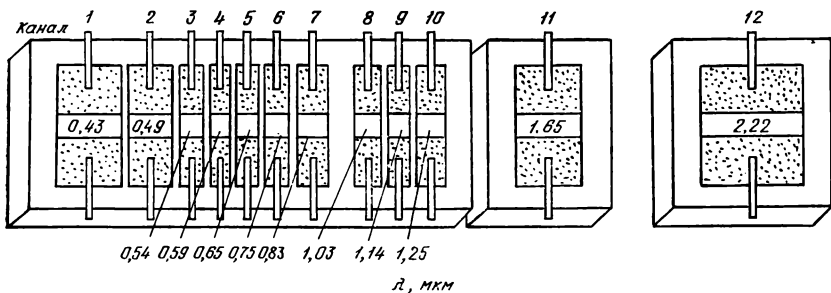


Рис. 4.5. Матрица полупроводниковых чувствительных элементов.

лось 12—13 зон. Аналогично осваиваются на практике интегральные датчики для ИК спектрального диапазона, в том числе и многомерные.

## **4.2. Миниатюризация датчиков, уменьшение размеров элементов**

Технология микроэлектроники вносит значительный вклад в миниатюризацию датчиков и уменьшение размеров их элементов. Миниатюризация датчиков приводит не только к уменьшению их размеров, снижению веса и сокращению потребления энергии, но также и к расширению возможностей датчиков. Например, для датчиков изображения на основе ПЗС миниатюризация позволяет не только сократить размеры фотоприемной поверхности, но и повысить разрешающую способность устройства.

Подобно тому как это произошло при переходе от вакуумных ламп к транзисторам, благодаря миниатюризации датчиков стало возможным их массовое производство, что сыграло большую роль в снижении стоимости датчиков. Так, например, применение технологии микроэлектроники и особенно фотолитографии обеспечило миниатюризацию, массовое производство и существенное снижение стоимости магнитных датчиков, которые в последние годы нашли широкое распространение при электронизации двигателей. В Японии магнитные датчики нашли применение в видеомагнитофонах и звуковой аппаратуре.

Тот факт, что при миниатюризации датчиков повышается пространственное разрешение, имеет очень большое значение. Например, для магнитных датчиков, в качестве которых раньше использовались катушки, миниатюризация затруднена, так как при этом уменьшается также магнитный поток внутри катушки, а следовательно, и чувствительность датчика. В полупроводниковых магнитных датчиках, как это видно на фото, приведенном на рис. 4.6, для регистрации магнитного поля могут быть использованы элементы с эффективной площадью  $2 \text{ мкм} \times 2 \text{ мкм}$ . Для практического использования формируются миниатюрные тонкослойные элементы магнитных датчиков с высокой чувствительностью.

Важным моментом является и то, что миниатюризация датчиков способствует повышению их надежности и увеличению выхода годных при производстве. Миниатюризация датчиков позволяет производить множество датчиков из одного образца однородного материала, что приводит к стабилизации свойств датчиков в одной производственной партии и повышению надежности датчиков. Свойства датчиков в одной производствен-

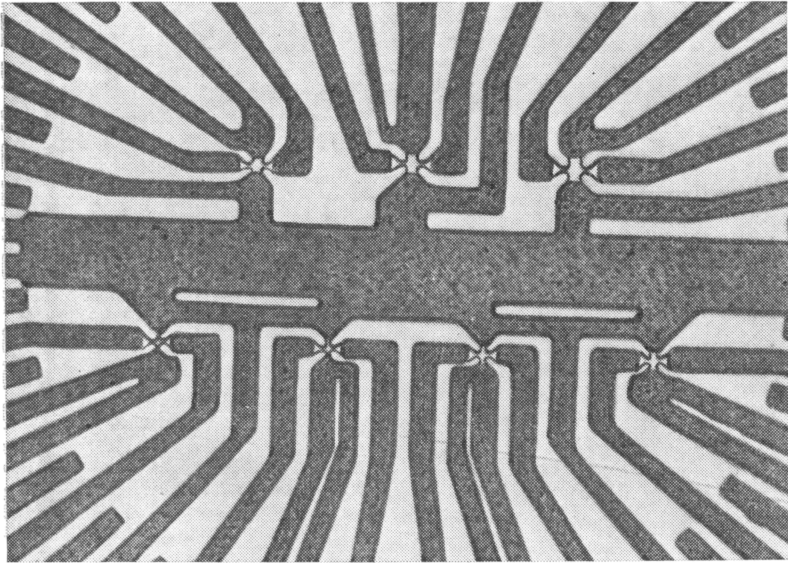
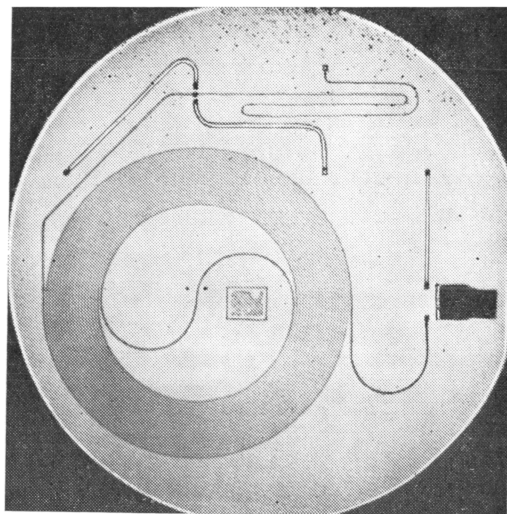


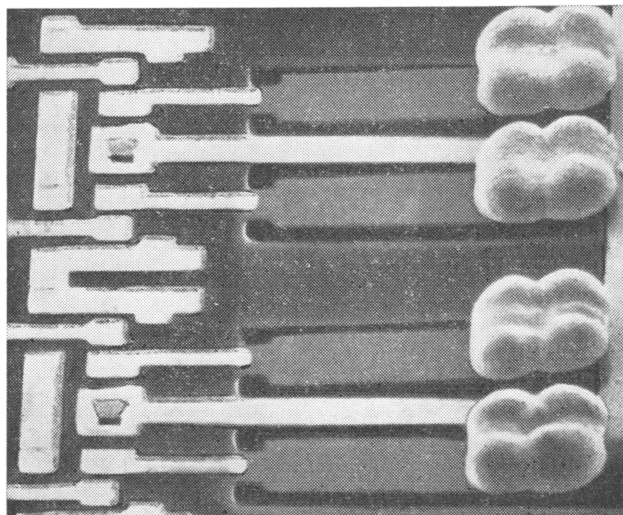
Рис. 4.6. Полупроводниковый магнитный датчик (микроэлементы Холла).

ной партии близки, и это способствует повышению выхода годных в производстве. Миниатюризация эффективна и с точки зрения повышения производительности технологического процесса.

В наибольшей степени миниатюризация и уменьшение размеров элементов проявляются в микроприборах, использующих новую технологию и полупроводниковые материалы. Полупроводники в этом случае выступают в основном в качестве конструктивных материалов. Производство таких микроприборов требует применения сверхтонкой технологии. На фото, приведенном на рис. 4.7, показана капиллярная трубка для газовой хроматографии диаметром несколько микрометров, сформированная на поверхности Si-пластины. Поверх двухдюймовой (50,8 мм) пластины формируется трубка диаметром 5 мкм и различные клапаны. Для формирования такой сверхтонкой структуры, в которой совмещаются механическая и электронная подструктуры, необходима очень высокая точность. На фото рис. 4.8 показана консоль, в которую встроен тензодатчик, и таким образом изготовлен датчик для регистрации ускорения. Функциональные возможности, которыми обладают указанные структуры, не могли быть реализованы в старых механических датчиках. Новые датчики с широкими функциональными возможностями появились благодаря развитию технологии микроэлектроники.



**Рис. 4.7.** Микроструктура для газохроматографии.



**Рис. 4.8.** Датчик ускорения.

### 4.3. Повышение чувствительности датчиков

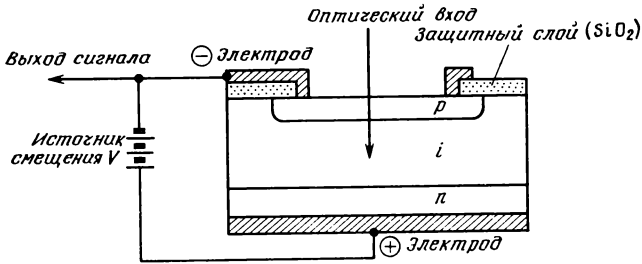
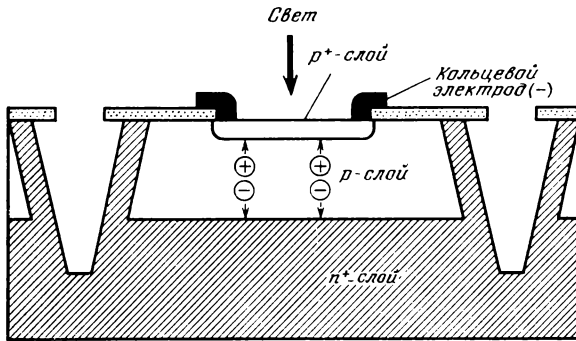
Датчики являются приборами, обладающими возможностью преобразования сигналов, причем желательно, чтобы чувствительность преобразования была высокой. При решении задачи повышения чувствительности датчиков важную роль играет технология микроэлектроники.

*Новые материалы.* Повышение чувствительности может быть достигнуто за счет применения вместо Si новых полупроводниковых материалов — многокомпонентных полупроводников и, в частности, GaAs. Рассмотрим, например, полупроводниковые магнитные датчики. Типичными магнитными датчиками являются элементы Холла или магниторезистивные элементы, принцип действия которых основан на отклонении движения электронов от заданного направления за счет ортогонально приложенного магнитного поля. Этот эффект зависит от подвижности электронов в полупроводнике. В полупроводниках с высокой подвижностью электронов отклонение от направления тока, обусловленное магнитным полем, больше, поэтому выше и чувствительность к магнитному полю. Значение электронной подвижности в GaAs и InSb соответственно в 6 и в 50 раз выше, чем в Si. Следовательно, используя InSb или GaAs, можно добиться повышения чувствительности датчиков.

*Тонкослойные структуры.* При заданной площади элемента его выходные характеристики обратно пропорциональны толщине. Уменьшая толщину структуры, можно повысить чувствительность элемента. Раньше с помощью механической обработки полупроводников можно было получать образцы толщиной около 100 мкм, а в последние годы благодаря развитию сверхтонкой технологии стало возможным работать со слоями толщиной 1—5 мкм. В результате чувствительность датчиков повысилась в 20—100 раз.

*Новые структуры.* Как уже отмечалось, структуры с *pn*-переходами позволяют получить более высокую чувствительность по сравнению со структурами на основе однородных полупроводников. Использование новых структур на основе *pn*-переходов позволяет достичь значительного повышения чувствительности.

Рассмотрим, например, фотодатчики. Полупроводниковые фотодатчики на основе фоторезисторного эффекта, используемые для автоматического отключения уличного освещения, различают день и ночь. Типичные фотодатчики — это элементы на

Рис. 4.9. Фото диод с  $pin$ -структурой.Рис. 4.10. Конструкция ЛФД. На поверхности подложки  $n$ -типа нанесен слой  $p$ -типа, в приповерхностной области которого сформирован слой  $p^+$ -типа. Внешнее освещение проникает через тонкий  $p^+$ -слой, вызывая генерацию электронов и дырок в  $p$ -слое. К  $p$ -слою прикладывается поле напряженностью свыше  $10^5$  В/см, что вызывает лавинный эффект.

основе  $CdS$ . Полупроводник  $CdS$  несложен в изготовлении, технологичен и раньше использовался очень широко. Однако в последние годы в качестве фотодатчиков с высокой чувствительностью применяют датчики на  $pn$ -переходах — кремниевые ФД. А для тех случаев, когда требуется также высокое быстродействие, разработан ФД  $pin$ -типа, представленный на рис. 4.9. В фото диодах  $pin$ -типа к электродам прикладывается обратное смещение, что позволяет уменьшить емкость перехода и тем самым обеспечить высокое быстродействие. Повышенной чувствительностью обладают и лавинные фото диоды (ЛФД). Структура ЛФД показана на рис. 4.10. Этот прибор является однопереходным фото диодом, в котором используется явление генерации в области  $pn$ -перехода под действием внешнего света потока электронов и дальнейшего усиления этого потока. В случае если требуется высокое быстродействие, периферийный участок прибора строится в форме однородного кольца. Коэффи-

коэффициент усиления колеблется от 40 до 200, причем изменения величины внешнего напряжения, приложенного к прибору, влияют на коэффициент усиления, что необходимо учитывать при использовании ЛФД.

Следует отметить, что для повышения чувствительности фотодатчиков используются новые полупроводниковые материалы и сверхтонкая технология. В последние годы быстро развиваются фотодатчики, содержащие целые матрицы элементов, что можно рассматривать как очередной этап «микроэлектронизации» техники датчиков. Разработаны высокочувствительные фотодатчики на основе сверхрешеток. Эти датчики содержат до 50 слоев  $\text{GaAl}_{0,45}\text{As}_{0,55}$  и  $\text{GaAs}$  толщиной 55,0 и 45,0 нм соответственно и имеющих различную ширину запрещенной зоны. Такие датчики находят применение в оптической связи и содержат в своей конструкции *pin*-структуры, причем слои *i*-типа проводимости разделяют фотогенерированные электроны и дырки. Эти виды фотодатчиков требуют использования, можно сказать, супертонкой технологии при производстве.

*Новые эффекты.* Использование новых физических эффектов позволяет быстро повысить чувствительность датчиков. Например, новым эффектом, который в последние годы обращает на себя внимание, является эффект Джозефсона. Вольт-амперные характеристики перехода Джозефсона, образованного двумя сверхпроводниками, разделенными очень тонким изолирующим слоем, изменяются под действием слабого магнитного поля. Магнитные датчики на основе СКВИДов также изготавливаются с использованием технологии микроэлектроники и имеют чувствительность в  $10^5$ — $10^6$  раз выше, чем полупроводниковые магнитные датчики, позволяя регистрировать магнитные поля до  $10^{-8}$  Гс. Кроме того, переходы Джозефсона чрезвычайно чувствительны к электромагнитному полю и в качестве микроволновых датчиков обеспечивают чувствительность на несколько порядков выше, чем у ранее применявшихся болометров. Таким образом, использование новых физических явлений в датчиках, как и развитие технологии, имеет очень большое значение.

#### **4.4. Разработка интегральных датчиков**

В разработке интегральных датчиков связь между микроэлектроникой и техникой датчиков проявляется наиболее отчетливо. Фактически возникла особая технология изготовления полупроводниковых интегральных датчиков, в которой можно выделить три следующих основных направления.

#### **4.4.1. Интеграция одномерных и двумерных датчиков**

Как уже отмечалось выше, для точной регистрации двумерной или даже трехмерной пространственной информации необходимы двумерные датчики, способные выполнить функцию преобразования сигналов. Вообще говоря, на практике формируют двумерные матрицы датчиков по принципу шахматной доски. Такие устройства фактически являются интегральными схемами датчиков, при изготовлении которых используется технология фотолитографии. Типичным примером интегрального датчика может служить датчик изображения. Обычно в конструкции такого датчика интегрально объединяются двумерная матрица фотодатчиков и схема электронного сканирования. В последние годы разработаны новые двумерные интегральные передающие ТВ-устройства, в которых интегрально объединены в одной кремниевой подложке матрицы фотодиодов, ПЗС-элементы для переноса заряда, накопленного фотодиодами, и переключающая схема на МОП-структурах.

Техника преобразования двумерной пространственной информации с помощью матричных датчиков не ограничивается регистрацией оптических сигналов. Так, на фото рис. 4.11 представлена двумерная матрица полупроводниковых магнитных датчиков для считывания двумерного распределения цилиндрических магнитных доменов (ЦМД).

В случае когда для регистрации двумерной информации технически невозможно использовать двумерные интегральные датчики, обычно прибегают к механическому сканированию одномерного интегрального датчика. Например, таким образом используются передающие ТВ-элементы с высоким разрешением, служащие для передачи с искусственного спутника изображения Земли и факсимиле.

#### **4.4.2. Интеграция характеристик датчиков**

При интегральном объединении датчиков одного вида, но с отличающимися характеристиками функциональные возможности могут резко увеличиться. Типичным примером является интегральное объединение тензодатчиков в датчик давления, конструкция которого показана на рис. 4.12. На центральном участке структуры формируется тонкослойная мембрана из монокристаллического Si, окруженная периферийной областью большей толщины. В мембране методом диффузии легирующей примеси формируются четыре тензодатчика. При приложении внешнего давления в центральной области датчика возникает остаточная деформация, на периферийном участке происходит



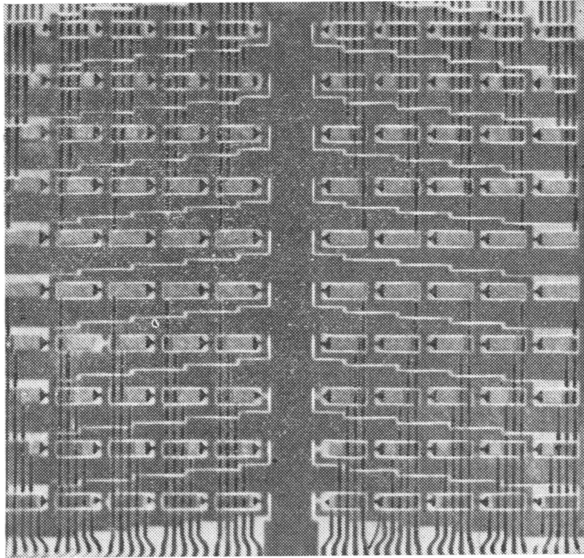


Рис. 4.11. Массив датчиков Холла для регистрации ЦМД.

растяжение. Используя анизотропию пьезорезистивного эффекта в кремнии и подключив вышеуказанные 4 тензодатчика в мостовую схему, можно минимизировать влияние неоднородного температурного распределения и других посторонних факторов и получить максимальный рабочий сигнал на выходе.

На рис. 4.13 показана структура, интегрально объединяющая в одной полупроводниковой подложке два расположенных один над другим фотодатчика. Спектральные характеристики фотодатчика, лежащего вблизи лицевой поверхности, и фотодатчика, расположенного в глубине структуры, отличаются, что позволяет, совместно считывая выходные сигналы фотодатчиков, обеспечивать цветоразличение входных сигналов.

Кроме того, разработана конструкция фототиристора, способного управлять переключением больших токов под воздействием внешнего светового сигнала. Как показано на рис. 4.14, четырехслойная тиристорная структура образуется последовательным формированием *npp*-областей в кремниевой подложке *p*-типа. Эквивалентная схема этого прибора представлена на рис. 4.15. Из рисунка видно, что фототиристор в эквивалентной схеме отображается двумя транзисторами  $Q_1$  и  $Q_2$ . Для транзистора  $Q_1$  базовый ток  $I_{B1}$  и коэффициент усиления  $\alpha_1$  связаны соотношением

$$I_{B1} = (1 - \alpha_1) I_A - I_{CBO1}. \quad (4.1)$$

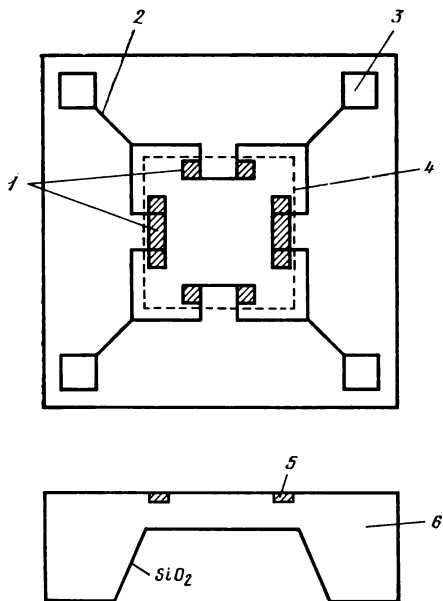


Рис. 4.12. Структура пьезорезистивного датчика давления с тонкослойной мембраной, изготовленная по кремниевой ИС-технологии: 1 — пьезорезистор; 2 — внутренний монтаж и металлический слой контактных площадок; 3 — контактная площадка; 4 — край мембраны; 5 — диффузионный пьезорезистор; 6 — толстый слой Si *n*-типа, служащий опорой.

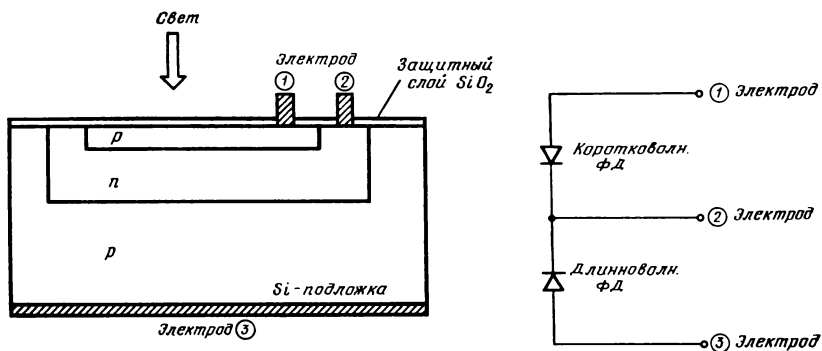


Рис. 4.13. Структура полупроводникового датчика цвета.

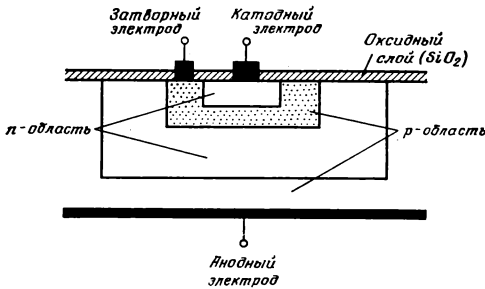


Рис. 4.14. Структура фототристора.

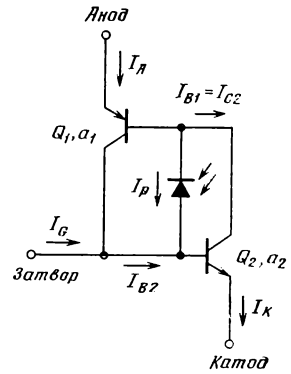


Рис. 4.15. Эквивалентная схема фототристора.

Для транзистора  $Q_2$  коллекторный ток  $I_{C2}$  выражается через коэффициент усиления  $\alpha_2$ :

$$I_{C2} = \alpha_2 I_K + I_{CBO2}. \quad (4.2)$$

Поскольку

$$I_K = I_A + I_G + I_P, \quad (4.3)$$

то

$$I_A = \frac{\alpha_2 (I_G + I_P) + I_{CBO1} + I_{CBO2}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)}. \quad (4.4)$$

Если выполняется условие  $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ , то ток  $I_A$  быстро увеличивается.  $I_P$  — это базовый ток транзисторов, величина которого определяется интенсивностью внешнего освещения.  $I_P$  связан с изменениями коэффициентов  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ , поэтому когда выполняется  $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ , прибор переходит в проводящее состояние. Между затворным электродом и катодом подключается резистор, что содействует оптическому переключению по затвору. Описанный прибор часто применяется в качестве фотореле. Прибор также изготавливается на базе технологии микроэлектроники. На основе фотопереключателных элементов такого типа создаются интегральные устройства, объединяющие в одной кремниевой подложке кроме фотоприемной части схемы усилителей — формирователей и стабилизированных источников питания. Пример такой ИС представлен на рис. 4.16.

Среди интегральных устройств на основе датчиков следует также выделить группу, содержащую полупроводниковые термодатчики. Это, в частности, полупроводниковые термочувстви-

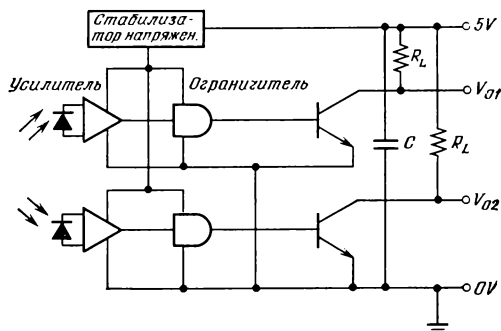


Рис. 4.16. Оптическая ИС.

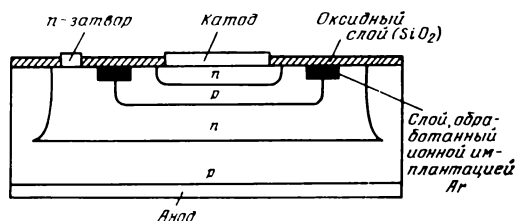


Рис. 4.17. Термодатчик с тиристорной структурой.

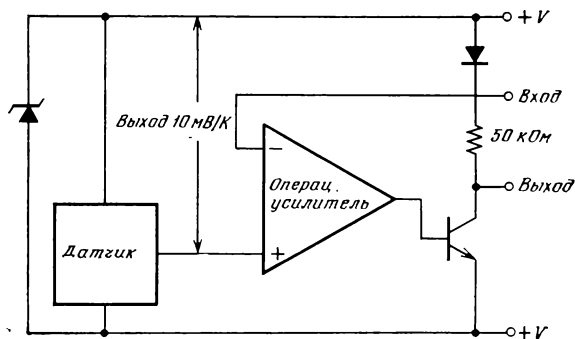


Рис. 4.18. ИС со встроенным термодатчиком.

тельные переключатели с *pnpn*-структурой, подобной упомянутому выше фототиристорам, в которой эффективно используется явление термовключения. Эти *pnpn*-структуры (рис. 4.17) проектируются и изготавливаются с таким расчетом, чтобы термовключение было возможным при более низких по сравнению с обычными тиристорами температурах. На участке перехода

формируется промежуточный, обработанный ионной имплантацией слой, что способствует усилению термогенерации электронно-дырочных пар. Размеры таких элементов составляют  $0,5 \text{ мм} \times 0,5 \text{ мм}$  при толщине  $0,15 \text{ мм}$ .

На рис. 4.18 показана ИС, содержащая термодатчик. Принцип действия схемы, включающей транзистор с определенным коэффициентом передачи коллекторного тока, основан на детекции изменения  $V_{be}$  под действием температуры, дальнейшем усилении и регистрации этого изменения. Разумеется, в других схемах также необходима компенсация температурных изменений. Изготовление термодатчиков производится с использованием технологии микроэлектроники.

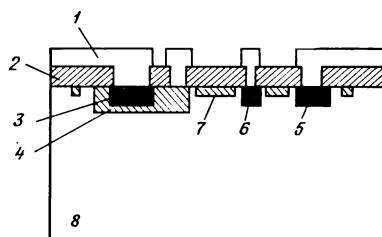


Рис. 4.19. Структура интегрального магнитного датчика биполярного типа (ИС Холла) на кремнии: 1 — алюминиевый электрод; 2 — защитный слой  $\text{SiO}_2$ ; 3 — эмиттер ( $n^+$ ); 4 — база ( $p$ ); 5 — коллектор ( $n^+$ ); 6 — электрод Холла ( $n^+$ ); 7 — стоп-слой канала ( $p^-$ ); 8 — Si-подложка ( $n^-$ );

#### 4.4.3. Интеграция датчиков и устройств с различными функциональными возможностями

Датчики являются приборами, которые служат для обработки информации и поэтому неразрывно связаны со схемами обработки сигналов. В случае применения отдельных дискретных датчиков обычно имеется необходимость сочетания их функций с усилением, переключением, логическими функциями и другими возможностями электрической обработки сигналов. С развитием технологии ИС появилась возможность создания интегральных устройств, объединяющих на одном кристалле датчики и схемы обработки сигналов.

Первыми из таких устройств появились так называемые холловские ИС (рис. 4.19). В конструкции ИС Холла на одном кремниевом кристалле объединены элементы Холла, чувствительные к магнитному полю, а также усилительная и переключающая схемы. В таких устройствах низкая чувствительность к магнитному полю, обусловленная малой подвижностью электронов в кремнии, компенсируется включением усилительной схемы. В настоящее время холловские ИС нашли широкое применение в качестве переключателей, обеспечивающих возможность автоматической регулировки бесщеточных двигателей. Они сыграли важную роль в решении задачи стабилизации числа оборотов и устранения влияния изменений в нагрузке и дру-

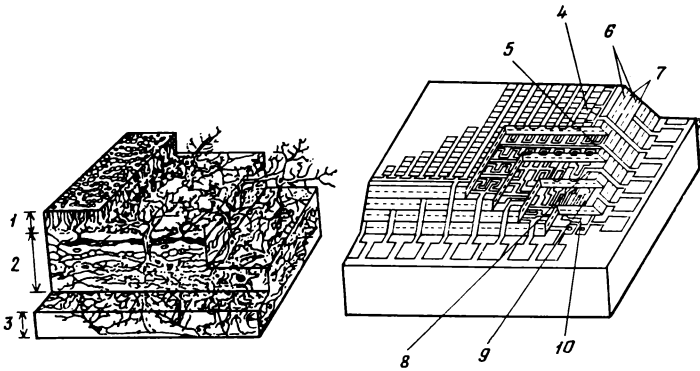


Рис. 4.20. Многофункциональные интегральные датчики изображения: *a* — структура зрительной сетчатки; *b* — интеллектуальный датчик изображения. 1 — зрительные рецепторы; 2 — мелкозернистый слой (интегрирование, пространственное дифференцирование, временное дифференцирование); 3 — слой нервных рецепторов; 4 — фотоэлектрический преобразователь; 5 — передающий элемент; 6 — слой монокристаллического полупроводника; 7 — изолирующий слой; 8 — элемент памяти; 9 — счетная часть схемы; 10 — источник питания, возбуждаемая часть схемы.

гих изменений в видеомэгнитофонах и звуковой аппаратуре. Часть ИС, содержащая магнитные датчики, служит для детекции вращения двигателя, а другая часть схемы управляет его стабильным вращением.

Датчики и устройства обработки информации объединяются интегрально подобно тому, как это происходит в органах восприятия живых существ. На рис. 4.20, *a* показана сетчатка глаза животного в разрезе. На поверхности сетчатки расположены рецепторные клетки, которые в сущности являются фотоприемными элементами. Глубже расположены нервные клетки — нейроны, интегрирующие информацию и устанавливающие определенные корреляции. В результате обработки, проводимой нейронами, информация в электрической форме передается от рецепторных клеток в головной мозг.

Структуры подобного типа на основе полупроводниковых датчиков разрабатываются и исследуются в настоящее время. В трехмерных многофункциональных ИС в одном кристалле объединяются расположенные на поверхности ПЗС-элементы и матрица фотодиодов, образующие устройство регистрации оптического двумерного изображения, а также размещенные в толще подложки и отделенные от поверхностной структуры изолирующим слоем передающие затворы, логические элементы и память. Такие конструкции по аналогии со зрительной сетчат-

кой в живой природе не очень серьезно называют однокристалльными интеллектуальными процессорами изображения.

Подобные интегральные конструкции изготавливаются с использованием новых технологических методов, в частности по КНИ (кремний на изоляторе)-технологии. Основной особенностью указанных устройств является тот факт, что они совмещают функции с обработкой информации. Сигналы, воспринятые датчиками на лицевой поверхности, передаются в глубь структуры в обрабатывающую часть схемы. Регистрируемая датчиками информация носит двумерный характер, и обработка сигналов в устройстве производится параллельно. Эта особенность очень близко копирует функционирование органов восприятия в живой природе. Указанные интегральные конструкции привлекают к себе внимание как прообраз датчиков будущего. Конструкция интеллектуального датчика изображения показана на рис. 4.20, б.

•

## Запоминающие устройства

### 5.1. Краткий обзор существующих запоминающих устройств (ЗУ)

#### 5.1.1. Информация и память

Разговор, естественно, пойдет не о способности человеческого мозга запоминать какую-либо информацию, а о наборе технических средств, при помощи которых можно осуществлять прием, хранение и выдачу в нужный момент полезной для человека информации. В широком смысле обыкновенный камень или лист бумаги, на которых человек вырезал или записывал необходимую для него информацию в виде символов или букв, являются в данном случае не чем иным, как первыми примерами построения человеком технических средств, предназначенных для хранения данных. Дальнейшим их развитием явилось изобретение печатающих устройств, фотографии и звукозаписи. Все перечисленные средства запоминания хранят информацию в виде, доступном для непосредственного восприятия человеком.

С развитием вычислительной техники появились новые формы представления информации, удобные для ввода и обработки ее в ЭВМ. Способов представления информации в ЭВМ существует уже достаточно много; более того, внутренние формы представления данных постоянно модифицируются, однако все они пока недоступны для непосредственного восприятия человеком.

На рис. 5.1 дана классификация технических средств записи и хранения информации и области их применения. Справа



расположены технические средства, при помощи которых строится память ЭВМ, слева — средства регистрации информации. В середине — средства записи и хранения информации, которые строятся в основном на электронных схемах.

На начальном этапе развития вычислительной техники ЗУ главным образом предназначались для временного хранения информации в ЭВМ. В настоящее время такая память, как правило, строится на полупроводниковых больших интегральных схемах (БИС) и представляет собой функционально законченное устройство. ЗУ широко используются не только в вычислительной технике, но и в различного рода устройствах управления, контроля и измерения.

Устройства записи и воспроизведения информации, в которых физической средой хранения являются магнитные материалы, появились сначала в технике звуко- и видеозаписи, а потом уже пришли в вычислительную технику.

Для ввода данных в ЭВМ достаточно широко используются перфокарты и перфоленты из специальной бумаги. Для них существует своя форма представления информации.

Печать и фото первоначально являлись средствами записи информации, предназначенной для непосредственного восприятия человеком. Оформленные специальным образом они могут служить для непосредственного ввода информации в компьютер.

В настоящее время существует очень много всевозможных технических средств хранения информации, причем их число уже настолько велико, что сказать о каждом не представляется возможным. Основная цель данной главы состоит в том, чтобы дать краткий обзор средств хранения информации, наиболее распространенных в системах обработки информации в различных областях науки и техники. Бурное развитие систем обработки информации обусловлено прогрессом в микроэлектронике, что естественно нашло свое отражение в развитии запоминающих устройств (ЗУ). Под запоминающим устройством будем подразумевать функционально законченное устройство для хранения информации, представленной в кодовой форме, а также для ее приема и выдачи по требованию (запросу).

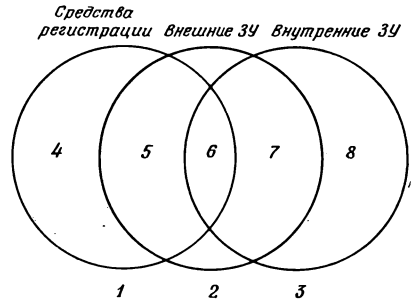


Рис. 5.1. Классификация способов записи информации: 1 — бумага; 2 — магнитные материалы; 3 — БИС; 4 — регистрирующие документы, ксерокопии, фото; 5 — видеозапись, звукозапись; 6 — перфокарты, ПЗУ; 7 — магнитные ленты, магнитные диски; 8 — память ЭВМ (ЗУПВ).

### **5.1.2. Типы запоминающих устройств и основные физические принципы, используемые при их построении**

Информация, хранимая в памяти ЭВМ, представляется в двоичной системе исчисления цифрами 0 и 1. Таким образом, элемент памяти ЭВМ, который служит для хранения единицы информации, должен иметь два различных устойчивых состояния, которым сопоставляются значения 0 и 1.

Если рассматривать эволюцию элементной базы ЭВМ, то в одной из самых первых вычислительных машин, а именно ENIAC, которая была создана в 1945 г. для записи и хранения информации, используемой в промежуточных расчетах, применялись электрические цепи на триггерах, основным элементом в которых была радиолампа. В EDVAC, которая явилась модернизацией ENIAC, в устройстве памяти хранили уже не только данные, представленные в двоичном виде, но и программы, при помощи которых стало возможным управлять работой ЭВМ. Это послужило дальнейшему развитию ЗУ. Они стали использоваться не только для хранения исходных, промежуточных и результирующих данных, но и для программ пользователей, управляющих программ, архивной информации, набора программ для организации работы ЭВМ при решении на ней одной или нескольких задач, т.е. так называемых операционных систем. В связи с этим на смену ЗУ на ламповых триггерах пришли новые типы памяти: память, построенная на электронно-лучевых трубках (ЭЛТ), память на линиях задержки, матричная память на магнитных сердечниках, память, выполненная на основе магнитных барабанов.

По мере роста числа областей, в которых использовалась вычислительная техника, все больше возрастали требования к увеличению объема памяти. Внутренней памяти ЭВМ стало уже не хватать, поэтому возникла идея о создании специальных устройств памяти, за счет которых планировалось в некоторой степени разгрузить внутреннюю память ЭВМ. Сначала это были ЗУ на магнитной ленте. В дальнейшем появились магнитные диски, которые отличались существенно большим быстродействием.

В настоящее время уже существует огромное число реализаций типов памяти, причем каждая из них не похожа на другую по своему принципу действия. В этой главе физические явления, положенные в основу процесса запоминания информации, будут рассмотрены лишь в объеме, достаточном для понимания работы бистабильного элемента памяти (ЭП), хранящего 1 бит информации. Кроме функции хранения информации, па-

Таблица 5.1

## Основные физические свойства, используемые при построении памяти

Физические явления	Типы памяти
Намагничивание	Память на магнитных сердечниках, магнитных проводниках, магнитных доменах, магнитных лентах, магнитных дисках, магнитных барабанах, магнитных картах; магнитооптическая память
Поляризация	Память на сегнетоэлектриках
Кристаллизация	Память на жидких кристаллах и на аморфных материалах
Изменение химических свойств	Память, построенная на принципах фотографии
Механические изменения	Память на перфокартах, перфолентах.
Электрический заряд	Различные типы ПЗУ. Оптическая память (на термопластиках и терморазрушающихся пленках) Память на приборах с зарядовой связью. Динамические ЗУПВ. Перепрограммируемые ЗУ. Память на ЭЛТ.
Схемные решения	Статические ЗУПВ. Память на триггерах
Временная задержка	Память на ультразвуковых магнитоотрицательных и электромагнитных линиях задержки

мать ЭВМ должна обладать возможностью записи и считывания данных.

Такие условия работы памяти можно также определить как возможность извне фиксировать и анализировать состояние каждого элемента памяти. Кроме этого число элементов памяти должно быть достаточно большим, чтобы обеспечить требуемый объем памяти. Таким образом, ЭП характеризуется тем, что он может находиться в двух устойчивых состояниях и должен быть легко управляем внешними цепями, входящими в состав устройства управления памятью. Нельзя забывать и о том, что одним из основных требований, предъявляемых к массовой памяти, является снижение стоимости 1 бит информации, которая должна быть минимальной.

Определив таким образом память, используемую в вычислительной технике, отметим, что память, выпускаемая в настоящее время либо которая будет выпускаться в дальнейшем, обязательно должна удовлетворять всем вышеперечисленным требованиям. Очевидно, что память постоянно будет модернизироваться и совершенствоваться. Поэтому полезно провести анализ существующих типов памяти с точки зрения основных физических принципов, исходя из которых строится тот или иной ее тип.

В табл. 5.1 приведена классификация памяти по типу используемой в ней физической среды, а также с учетом физиче-

ских принципов, позволяющих реализовать хранение информации.

В настоящее время память на ферромагнетиках, магнитные характеристики которых позволяют достаточно эффективно хранить данные, нашла широкое распространение. Память на сегнетоэлектриках, у которых диэлектрические свойства в значительной степени подобны магнитным свойствам ферромагнетиков и которые часто называют ферроэлектриками, в настоящее время пока почти не встречается. На основании физических явлений, вызванных изменением кристаллической структуры у некоторых материалов, созданы различные типы устройств, например дисплеи на жидких кристаллах, нашедшие широкое применение в часах и микрокалькуляторах. В дальнейшем, возможно, появится память на аморфных материалах.

Память на основе материалов, где необходимая информация хранится за счет химического изменения структуры, издавна применялась при изготовлении фотографий. В настоящее время в вычислительной технике фотографическая память используется в виде микрофильмов, микрофотографий и др. Однако запись информации на такой носитель возможна только один раз и модификация ее уже невозможна. Поэтому использование такого типа памяти достаточно ограничено. Память, построенная на механическом принципе запоминания информации, например перфокарты, перфоленты, постоянные запоминающие устройства (ПЗУ) и другие, с точки зрения вычислительной техники практически идентична памяти, построенной на материалах, которые хранят информацию за счет своих химических изменений.

Как известно, любая вычислительная машина состоит из набора электронных схем. Поэтому представляют интерес ЗУ, построенные по принципу хранения электрического заряда, т. е. те ЗУ, хранение информации в которых возможно за счет определенных схемных решений, а также ЗУ на линиях временной задержки. Развитие полупроводниковых БИС привело к доминирующей роли ЗУ на их основе. Развитие такого рода устройств в последнее время достаточно велико, а темпы роста их модификации и усовершенствования значительны. Благодаря этому они нашли широкое распространение не только в вычислительной, но и в других областях техники.

### **5.1.3. Основные параметры и функции ЗУ**

К основным функциям ЗУ следует отнести:

1. Запись информации.
2. Хранение информации.
3. Считывание информации.

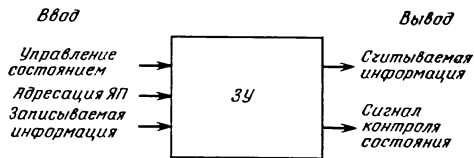


Рис. 5.2. Интерфейс запоминающего устройства.

Для того чтобы лучше разобраться в основных функциях ЗУ, представим его в виде так называемого «черного ящика» с сигналами на входе и выходе. ЗУ с этой точки зрения представляет собой некое интерфейсное устройство, позволяющее определенным образом преобразовывать сигналы (рис. 5.2). Причем конкретная его реализация может быть совершенно произвольной. Рассмотрим сигналы на входе-выходе этого устройства.

1. Управление состоянием ЗУ (установка ЗУ на выполнение одной из перечисленных ниже функций).
2. Установление местоположения требуемого элемента памяти (адресация к любому элементу памяти).
3. Запись информации в ЗУ.
4. Считывание информации, хранящейся в ЗУ.
5. Анализ состояния устройства (выдача сигналов о завершении выполняемых устройством действий на данном этапе).

Основными параметрами ЗУ являются *емкость памяти и быстродействие*. Помимо этих параметров существует еще множество других, например потребляемая мощность, внешние факторы, определяющие его работоспособность, надежность работы, вес, размеры и множество других. Однако здесь эти параметры рассматриваться не будут.

За единицу емкости памяти приняты *бит, символ, байт, слово*. На практике, как правило, редко пользуются битом информации, хотя эта единица является минимальной. Обычно используют набор битов, называемый ячейкой памяти. Однако адресоваться к биту информации можно. На рис. 5.3 в общем виде представлена схема организации памяти. На рис. 5.3, *а* изображен элемент памяти, как правило, реализованный в виде триггера. Триггер позволяет хранить один бит информации. На рис. 5.3, *б* — регистр из набора триггеров. В регистре хранится несколько битов информации, которые представляют собой либо одно слово, либо один символ информации. Для того чтобы адресоваться к отдельному биту информации, необходимо указать его порядковый номер в регистре. На рис. 5.3, *в* — устройство памяти из нескольких регистров. Для того чтобы обратиться к какому-либо регистру, необходимо указать его *адрес*. Если память состоит не из одного регистра, а из нескольких,

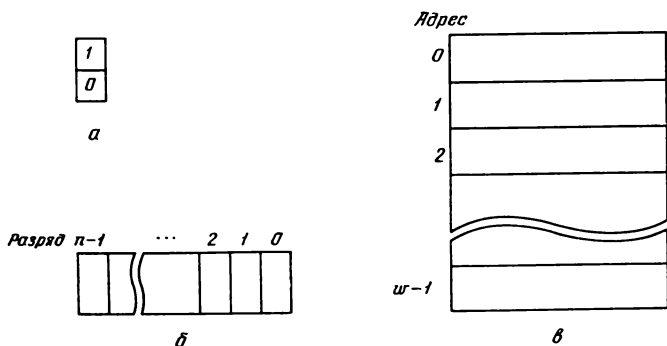


Рис. 5.3. Общее представление структуры памяти: *a* — триггер; *b* — регистр (1 символ или 1 слово из  $n$  бит); *v* — ЗУ (1 слово из  $n$  бит,  $w$  слов).

то невозможно адресоваться сразу к нескольким (пусть даже к двум) регистрам, так как они имеют разные адреса.

Технические средства, с помощью которых можно адресоваться к любой ячейке ЗУ, характеризуются следующими признаками:

### 1. Механическое позиционирование ЗУ.

Примером механического позиционирования ЗУ является поиск и установка определенной дорожки на поверхности магнитного диска, с помощью перемещения считывающей головки устройства.

### 2. Время позиционирования.

Позиционирование магнитного диска или магнитного барабана на заданную дорожку определяется временем, необходимым для того, чтобы искомая ячейка памяти оказалась под головкой считывания. В магнитных лентах время позиционирования не является абсолютным, так как оно определено текущей позицией ее относительно считывающей головки. Позиционирование ленты зависит от местоположения первой записи на ней.

### 3. Выбор нужной группы схем.

Данный выбор определяет, какую группу схем в таких ЗУ, как полупроводниковая память или память, построенная на магнитных сердечниках, необходимо задействовать для того, чтобы правильно адресоваться к нужной информации.

На основании вышесказанного введем такое понятие, как *доступ* к ЗУ. Доступ — процедура установления связи с ЗУ с целью выборки либо записи данных. На рис. 5.4 представлены основные способы считывания данных из памяти, которые обычно называют методами доступа к данным, хранимым в ЗУ. Далее будут рассмотрены основные методы доступа, которые используются в настоящее время.

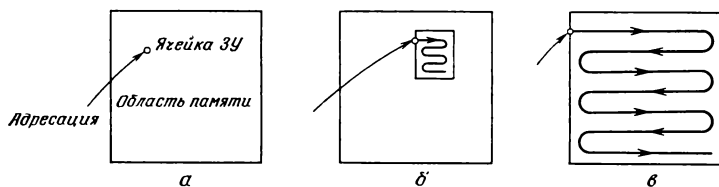


Рис. 5.4. Методы доступа: а — прямой; б — блочно-прямой; в — последовательный.

1. *Прямой доступ* (произвольная выборка) состоит в том, что можно непосредственно установить место определенной информации в памяти. Выборка информации задается внешними условиями, кроме того, она выполняется при помощи системы управления ЗУ. Прямой доступ широко используется практически во всех типах полупроводниковой памяти БИС, а именно в ЗУ с произвольной выборкой (ЗУПВ), в постоянных запоминающих устройствах (ПЗУ), в программируемых постоянных запоминающих устройствах (ППЗУ), в стираемых программируемых постоянных запоминающих устройствах (СППЗУ). Кроме того, он применяется в памяти на магнитных сердечниках, а также памяти на магнитных проводниках.

2. *Блочно-прямой доступ* заключается в том, что за единицу информации, выбираемую прямым доступом, принят набор или блок данных. После того как искомым блок найден прямым доступом, нужная информация выбирается из него путем последовательного просмотра каждой записи. Примером этого метода доступа является поиск нужной дорожки или цилиндра на поверхности магнитного диска. Однако, после того как дорожка выбрана, необходимая информация считывается последовательно по мере вращения диска. Блочно-прямой доступ нашел широкое распространение в ЗУ на цилиндрических магнитных доменах (ЦМД), а также в ЗУ, построенных на приборах с зарядовой связью (ПЗС). Такие ЗУ обычно называют твердотельными запоминающими устройствами.

3. *Последовательный доступ*. Основной принцип этого метода состоит в том, что необходимая информация считывается по мере последовательного просмотра всех данных, например при считывании информации с магнитных лент.

Быстродействие каждого из методов доступа определяется на основании оценки следующих двух временных параметров.

1. *Время выборки* представляет временной интервал от момента поступления команды считывания данных до момента появления информации на выходе запоминающего устройства. Необ-

ходимо иметь в виду, что время выборки определяется только после того, как была выдана команда считывания, и продолжается до того момента, пока не будет получена первая запись информации.

2. *Скорость передачи информации* характеризуется объемом информации, переданным в единицу времени, и измеряется в бит/с.

Кроме того, для определения быстродействия ЗУ существует так называемый период обращения к ЗУ — минимальный временной интервал между последовательными обращениями к ЗУ, в течение которого устройство осуществляет полный цикл записи информации в ЗУ или же полный цикл считывания. Если требуется время на восстановление информации, оно также учитывается. Если время записи и считывания информации неодинаково (например, в СПЗУ), то период обращения необходимо указать отдельно для каждой операции.

## **5.2. Запоминающие устройства с прямым доступом**

### **5.2.1. Что такое ЗУПВ**

ЗУПВ — сокращенное название ЗУ с прямой произвольной выборкой, а в зарубежной научно-технической литературе они называются RAM (random access memory).

Характерной их чертой является то, что скорость считывания и записи информации является практически одинаковой. Время доступа к данным не зависит от места расположения данных в памяти. ЗУПВ широко используются в качестве основной памяти вычислительных машин, а также в различных системах обработки информации, например, при обработке речевых сигналов и изображения, в устройствах линий связи и др.

Нельзя путать ЗУПВ (RAM) с постоянными запоминающими устройствами (ПЗУ), которые в зарубежной научно-технической документации называются ROM (read-only memory), поскольку в ПЗУ существуют различного рода ограничения. Так, в ЗУПВ запись и считывание данных осуществляются произвольно с практически одинаковой скоростью. В ПЗУ модификация информации или вообще невозможна, или ограничена, т. е. ПЗУ позволяет пользователю только считывать необходимые ему данные.

В настоящее время подавляющее число ЗУПВ строится на полупроводниковых БИС. Поэтому обычно когда говорят о ЗУПВ, то подразумевают под этим память, выполненную в одном корпусе микросхемы, которая изготавливается по техноло-



гии БИС. Однако еще до создания БИС широко использовалась память на магнитных проводниках и на магнитных сердечниках, построенная по типу ЗУПВ.

### 5.2.2. Полупроводниковые ЗУПВ

В зависимости от технологии БИС различают ЗУПВ на биполярных и на МОП (металл — окисел — полупроводник)-транзисторах. В технической литературе МОП-транзисторы известны еще как полевые. Функционально же ЗУПВ делятся на статические (SRAM) и динамические (DRAM).

Интегральной схемой (ИС) называют набор элементов и межэлементных соединений, расположенных на одной пластине из монокристаллического кремния толщиной не более 1 мм. Такие пластины получают путем нарезания кремниевого цилиндрического монокристалла. На рис. 5.5 представлен внешний вид пластины. На пластине изготавливают по специальной технологии одинаковые по функциональному действию ИС. После того как ИС изготовлены, пластина нарезается на отдельные мелкие пластинки, которые обычно называют либо *кристаллом*, либо чипом микросхемы.

Диаметр пластины достаточно велик, он составляет порядка 5 дюймов ( $\sim 130$  мм). Превышение этого размера нежелательно, так как существуют определенные ограничения, связанные с обработкой кристаллических структур. Размер кристалла выбирается достаточно большим, чтобы на нем можно было поместить функционально законченный узел, состоящий из набора элементов, объединенных между собой. Однако коэффициент выхода годных кристаллов в настоящее время недостаточно высок из-за различного рода дефектов, вносимых при обработке кристаллической структуры. Типичный размер одного кристалла равен нескольким квадратным миллиметрам. Число элементов, расположенных на одном кристалле, называют *степенью интеграции*. Степень интеграции служит для указания стандарта БИС. Однако в том случае, если БИС используют для памяти, то под степенью интеграции, как правило, понимают информационную емкость, т. е. число битов информации, которое можно записать на кристалл. Для этого введена специальная единица информации, которая называется 1К, т. е. 1 килобит, равный 1024, или  $2^{10}$ , бит информации. В настоящее время изготавливаются кристаллы емкостью 64К, 128К, 256К.

Одной из основных задач в производстве БИС является повышение степени интеграции. Повышение степени интеграции выгодно по трем причинам:

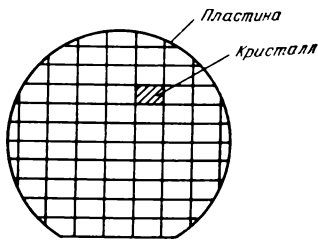


Рис. 5.5. Пластина и кристалл.

- 1) понижение стоимости функции микросхемы (для БИС памяти это означает снижение стоимости хранения одного бита информации);
- 2) сокращение габаритных размеров;
- 3) расширение функциональных возможностей БИС.

Расширение функциональных возможностей предполагает, например, сокращение потребления электроэнергии, повышение быстродействия и надежности работы. Это естественно объясняет то, что в настоящее время, несмотря на достаточно высокую степень интеграции, в этом направлении постоянно ведутся работы и исследования. На рис. 5.6 представлены темпы роста степени интеграции.

На кристалле располагаются не только элементы памяти (ЭП), в которых хранится информация, но также и схемы управления памятью. На рис. 5.7 показана функциональная схема и ЭП динамического ЗУПВ на МОП-структурах. Каждый ЭП определен в матрице координатами  $X$  и  $Y$ . Управляющие сигналы, определяющие режим работы микросхемы, задаются извне. При помощи данных сигналов синхронизируется работа памяти и задается адрес ЭП. Выборка элемента осуществляется при помощи дешифраторов адреса  $X$  и  $Y$ , определяющих столбцы и строку матрицы. Искомый ЭП находится в точке их пересечения.

Как уже упоминалось, существует множество типов ЭП. Среди ЗУ с произвольной выборкой для пользователя важно их деление на статические и динамические. Статические ЗУПВ характерны тем, что информация, записанная в каждом ЭП, может храниться сколь угодно долго при включении питания. Динамический тип ЗУПВ строится на принципе переходных состояний заряда в элементах. Поэтому, для того чтобы поддерживать в нем информацию в неизменном виде, необходимо через определенные интервалы осуществлять ее перезапись в каждый элемент. Такой процесс в динамических ЗУПВ называется *регенерацией памяти*. Во время регенерации запись и считывание информации невозможны. Это накладывает определенные ограничения на синхронизацию работы памяти. Однако при этом необходимо отметить, что динамическая структура построения ЗУПВ более компактна и проще по сравнению со статической, поэтому имеет большую степень интеграции, а значит, и дешевле. Все это делает динамические ЗУПВ широко популярными среди пользователей.

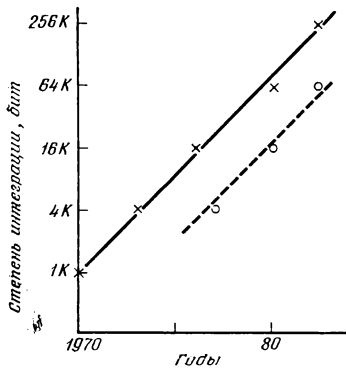


Рис. 5.6. Темпы роста степени интеграции запоминающих устройств (X — динамические ЗУ, O — статические ЗУ).

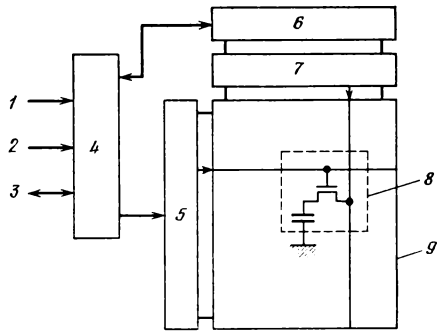


Рис. 5.7. Функциональная структура кристалла памяти: 1 — адрес; 2 — синхронизация; 3 — данные; 4 — буфер ввода-вывода; 5 — дешифратор X; 6 — дешифратор Y; 7 — дешифратор линии; 8 — элемент памяти; 9 — матрица элементов памяти.

Ячейка статического ЗУПВ представляет собой триггер. Такой тип ячеек памяти по сравнению с ячейками динамического ЗУПВ имеет меньшие ограничения по синхронизации в работе. Одним из основных достоинств данного типа памяти является высокое быстродействие. Но наряду с этим структура статической ячейки памяти является достаточно сложной, так как в нее входит большое число элементов, выполняющих вспомогательную функцию, например управление. Тем самым достичь высокой степени интеграции оказывается довольно сложно.

С точки зрения использования элементной базы, биполярные транзисторы, за исключением особых случаев, применяются только в статических ЗУПВ. Полевые МОП-транзисторы широко используются как в статических, так и в динамических ячейках ЗУПВ.

На рис. 5.8 показан пример построения статической ячейки ЗУПВ на комплементарных (взаимодополняющих) МОП-структурах (сокращенно КМОП-структурах). По типу основных носителей МОП-транзисторы делятся на *n*-тип и *p*-тип. В *n*-структурах основными носителями заряда являются электроны, т. е. отрицательно заряженные частицы, в *p*-структурах — дырки, т. е. положительные частицы. МОП-транзисторы *n*-типа обычно называют *n*-канальными, а транзисторы *p*-типа — *p*-канальными. В элементах памяти, построенных на КМОП-транзисторах, присутствуют оба типа структур: *n*-тип и *p*-тип. Это позволяет снизить расход электроэнергии. На рис. 5.8 элементы Q<sub>1</sub>, Q<sub>2</sub>, Q<sub>5</sub>,

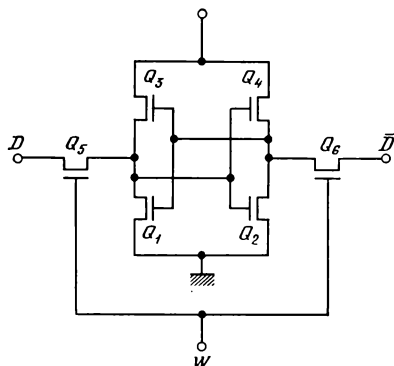


Рис. 5.8. Элемент памяти статического ЗУПВ на КМОП-транзисторах.

$W$  подать импульс, то линия замкнется и через цепь пойдет ток. Таким образом транзисторы  $Q_5$  и  $Q_6$  позволяют управлять работой ячейки при помощи соответствующих цепей управления и контролировать извне состояние триггера.

Триггерный ЭП является энергозависимой схемой, т. е. при отключении питания записанная информация пропадает. Однако, тот факт, что триггерный ЭП в нерабочем режиме потребляет мало энергии, позволяет устранить этот недостаток введением батарейной поддержки.

На рис. 5.9 изображена ячейка памяти, построенная на биполярных многоэмиттерных транзисторах. Такие схемы широко используются при построении схем ТТЛ (транзисторно-транзисторной логики). Многоэмиттерный транзистор позволяет реализовать функцию «И». ЭП представляет собой триггер на транзисторах  $Q_1$  и  $Q_2$ . Логика работы данного триггера является стандартной, т. е. когда открыт один транзистор, другой соответственно закрыт и наоборот. Состояние элемента памяти задается подачей импульса на шины  $D$  или  $\bar{D}$  и вход  $W$ . Анализ состояния триггера осуществляется путем подачи импульса на вход  $W$  и оценки величины потенциала на входах  $D$  и  $\bar{D}$ .

*Ячейка динамического ЗУПВ.* В настоящее время существует несколько вариантов построения ЭП, используемых в динамических ЗУПВ. На рис. 5.10 показан один из возможных вариантов. Он представлен транзистором  $Q$  и емкостью  $C$  и называется однотранзисторным ЭП. Кодирование информации в данном случае определяется величиной потенциала на емкости  $C$ , т. е. высокий потенциал на емкости свидетельствует о наличии заряда и соответствует логической 1, низкий потенциал соответствует логическому 0. Транзистор  $Q$  выполняет в данном

$Q_6$  являются транзисторами с каналом  $n$ -типа, а  $Q_3, Q_4$  являются  $p$ -канальными транзисторами.

На транзисторах  $Q_1$  и  $Q_2$  построен триггер. Если один из них открыт, то другой соответственно закрыт, и наоборот. Схема имеет два различных устойчивых состояния, позволяет хранить один бит информации.  $Q_3$  и  $Q_4$  находятся в состояниях, противоположных по отношению к транзисторам  $Q_1$  и  $Q_2$ . На транзисторах  $Q_5$  и  $Q_6$  построен переключатель. Если на вывод

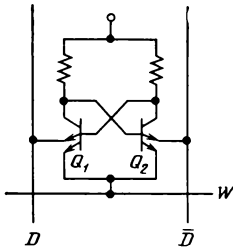


Рис. 5.9. Элемент памяти статического ЗУПВ на биполярных транзисторах.

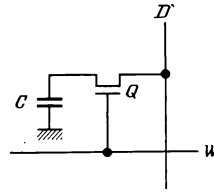


Рис. 5.10. Элемент памяти динамического ЗУПВ на МОП-транзисторе.

случае роль ключа, который стоит между емкостью  $C$  и шиной  $D$ . Если транзистор закрыт, то связи между емкостью  $C$  и шиной  $D$  нет, а если он открыт, то можно, во-первых, определить величину потенциала на емкости  $C$  с шины  $D$ , а во-вторых, можно передать заряд на емкость  $C$  с шины  $D$ . Таким образом можно определить, какая информация находится в данном элементе. Динамический ЭП построен таким образом, что через определенные промежутки времени необходимо осуществлять перезапись хранимой информации, так как в результате утечки заряда с емкости возможно искажение и потеря информации в ЭП. Такой процесс восстановления информации называется регенерацией.

Как следует из вышесказанного, регенерация информации в динамических ЭП является необходимым внутренним условием. Время, которое необходимо для проведения регенерации, называется циклом регенерации. Во время регенерации обращение к ЭП невозможно, поэтому цикл регенерации должен быть как можно короче. Цикл регенерации во многом определяется структурой построения ЭП, а также структурой построения вспомогательных цепей, представляющих собой систему управления ЗУ, и в среднем составляет 2 мс. Обычно регенерацию проводят не отдельно каждой ячейки, а выполняют сразу по всему столбцу памяти, который состоит из набора ЭП. Таким образом, в динамических ЗУПВ регенерация ведется последовательно по столбцам матрицы памяти.

*Сборка.* ЗУ в настоящее время представляет собой, как правило, набор различных микросхем. Таким образом, для получения готового ЗУ необходимо разработать технологию его сборки. Сборка включает в себя множество этапов проектирования функций и логической спецификации от определения полного функционального набора до определения размеров и реализации данного ЗУ. Из перечисленных этапов технологией сборки называется задача конструктивной реализации ЗУ.

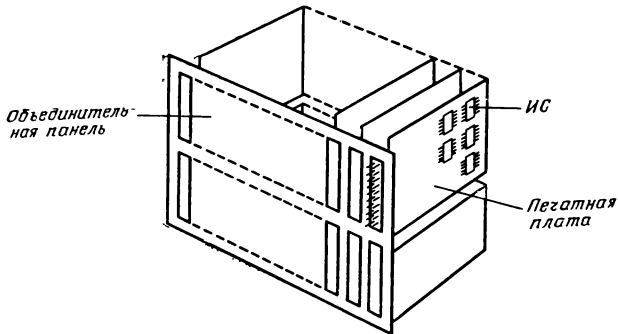


Рис. 5.11. Процесс сборки блока памяти.

Сборка полупроводниковых ЗУ на ИС состоит из следующих трех взаимосвязанных операций:

- 1) сборка ИС в корпус;
- 2) изготовление субблоков, представляющих собой отдельные печатные платы с растрассированными на них проводниками и разъемными выводами;
- 3) изготовление блоков памяти с объединительной панелью для субблоков и соединителями.

На рис. 5.11 в общем виде представлены эти единицы сборки. Кристалл ИС помещают в корпус и делают выводы. На практике в настоящее время существуют всевозможные виды корпусов микросхем. На рис. 5.12 в общем виде представлены их основные формы.

Далее корпуса микросхем устанавливают на печатную плату с растрассированными на ней проводниками, что позволяет задать определенную функцию данному субблоку. Крепление корпусов на плате осуществляют либо путем пайки выводов, либо путем специального крепления в гнездах. Полученный в результате этого субблок характеризуется числом битов, т. е. информационной емкостью. Для получения готового ЗУ определенное число таких субблоков с размещенными на них платами памяти и периферийными схемами чаще всего вставляется в соединители, укрепленные на задней панели. Субблоки коммутируются между собой при помощи разъемов, расположенных на объединительной панели.

### 5.2.3. Магнитная память

В настоящее время существуют различные типы памяти, запись информации в которой осуществляется на ферромагнитный материал. ЗУПВ, построенные на ферромагнитных материалах,

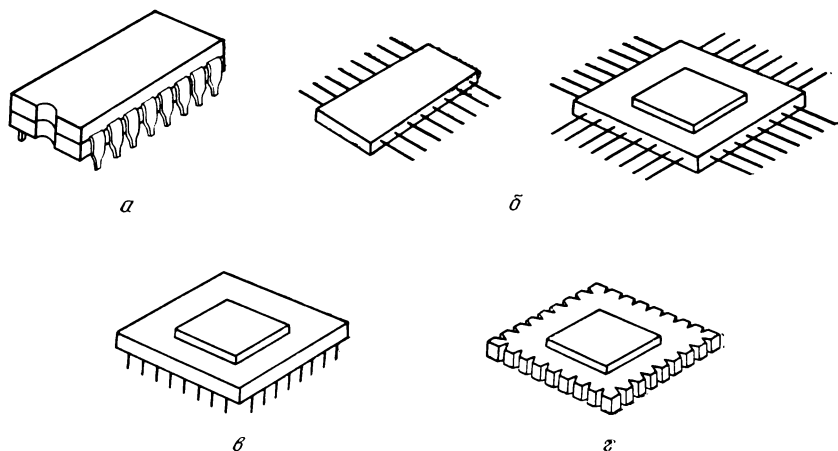


Рис. 5.12. Виды корпусов ИС: *а* — двухрядный; *б* — плоский двухсторонний и плоский четырехсторонний; *в* — корпус сменной ИС со штырьковыми выводами; *г* — кристаллодержатель.

в целом будем называть магнитной памятью. Кроме того, существуют запоминающие устройства на цилиндрических магнитных доменах, выбор и запись информации в которых построен по принципу работы сдвигового регистра, запоминающие устройства на магнитных лентах, в которых также используется магнитная запись информации. Сюда относятся магнитные диски и др.

Среди множества типов магнитной памяти наибольшее распространение получила магнитная память на *магнитных сердечниках*. Кроме того, существует память на цилиндрических тонких магнитных пленках (ЦТМП), представляющая собой проводник с тонкими магнитными пленками на поверхности проводника. Магнитная память на сердечниках впервые появилась в конце 50-х гг. и широко использовалась в основной памяти ЭВМ. Однако в середине 70-х гг. ее заменили полупроводниковой памятью на ИС, которая нашла широкое распространение среди пользователей. Но тем не менее в настоящее время магнитная память на сердечниках продолжает использоваться в силу установившейся технологии.

*Память на магнитных сердечниках.* Принцип запоминания, используемый здесь, основан на способности ферромагнетиков сохранять два устойчивых состояния остаточной намагниченности  $+B_r$  или  $-B_r$ . На рис. 5.13 представлена кривая намагничивания ферромагнитного материала, или как ее называют петля гистерезиса, на этом же рисунке выделены состояния с остаточной индукцией  $+B_r$  и  $-B_r$ . Память данного типа строится из

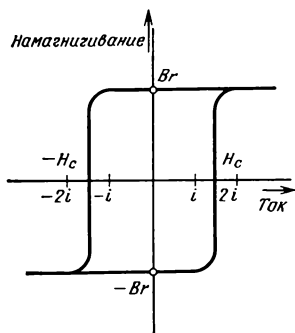


Рис. 5.13. Кривая намагничивания прямоугольной формы.

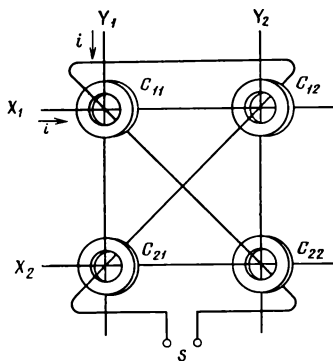


Рис. 5.14. Фрагмент матрицы памяти с выбором сердечников по принципу совпадения токов.

набора малых по размеру кольцеобразных магнитных сердечников, располагаемых в виде матрицы. Выбор информации построен по *принципу совпадения токов*.

На рис. 5.14 дана структура матрицы памяти на сердечниках с выборкой по принципу совпадения токов. Каждый сердечник, расположенный в матрице, прошивается координатными обмотками  $X$  и  $Y$  в направлении строк и столбцов матрицы. Кроме того, через каждый сердечник проходит в диагональном направлении обмотка считывания. Проанализируем работу матричной магнитной памяти путем рассмотрения характеристики намагничивания сердечника, представленной на рис. 5.13.

Величина электрического тока, пропускаемого по координатным обмоткам  $X$  и  $Y$ , определяется из соотношения

$$i < H_c < 2i.$$

Выбор нужного сердечника происходит в зависимости от того, по каким координатным обмоткам  $X_1, X_2 \dots$  и  $Y_1, Y_2 \dots$  пропускается ток. Адрес сердечника задается внешними управляющими цепями. На рис. 5.14 по обмоткам  $X_1$  и  $Y_1$  протекает электрический ток  $i$ , поэтому в данном случае выбирается сердечник  $C_{11}$ . По его обмоткам протекает суммарный ток  $2i$ , достаточный для перемагничивания сердечника. В обмотках сердечников  $C_{12}$  и  $C_{21}$  величина суммарного тока составляет  $i$ , поэтому их состояние намагниченности остается прежним. Это относится и к сердечнику  $C_{22}$ , так как по его обмоткам ток вообще не протекает. Таким образом реализуется адресация к нужному сердечнику в матрице.



По диагонали каждого из сердечников проходит обмотка  $S$  для считывания данных. В выбранном сердечнике вектор намагниченности меняет направление, т. е. происходит перемагничивание сердечника. Вследствие этого в обмотке считывания узлового сердечника наводится ЭДС. Если перемагничивание сердечника не происходит, то ЭДС в обмотке считывания не наводится. На основании этого можно определить в каком состоянии находится каждый сердечник матрицы. Необходимо отметить, что обмотка считывания меняет свое направление, проходя через соседние сердечники, т. е. прошивается в обратном направлении. Такая прошивка позволяет снизить возможные помехи.

Внешний диаметр магнитного сердечника вначале составлял приблизительно 2 мм. Однако благодаря работе, проделанной в направлении сокращения размеров памяти, а также повышения ее быстродействия, в 70-х гг. он был доведен до 0,4 мм. Наряду с этим удалось значительно повысить быстродействие памяти. Время обращения к ЗУ сократилось от 5 мкс до 0,5 мкс.

Кроме показанного на рис. 5.14, существует множество различных способов прошивки матриц на сердечниках. Если раньше память и система управления памятью находились на отдельных платах, то теперь благодаря миниатюризации сердечников и повышению плотности сборки стало возможным располагать память и систему управления ею на одной плате, т. е. получать в результате функционально законченный узел. Такая компоновка значительно удобнее, и естественно область использования этого типа памяти расширилась. В этом случае интерфейс ввода-вывода информации определен на уровне логических сигналов. При этом надо отметить, что по рабочим характеристикам этот тип памяти несколько не уступает полупроводниковой.

*Магнитная память на проводниках с ЦТМП.* Элементом памяти (ЭП) здесь является проводник с нанесенным на его поверхность гальванопокрытием из тонкой магнитной пленки. На рис. 5.15 показан принцип действия такого ЭП. При изготовлении ЭП на поверхность проводника (на рисунке это разрядная шина), не обладающего магнитными свойствами, методом электролитического осаждения наносится тонкий слой магнитного материала, например пермаллоя толщиной в несколько микрометров. На полученный проводник перпендикулярно наматывается адресная обмотка. Из набора такого рода ЭП составляется матрица ЗУ.

Хранение и запись информации обеспечивается созданием намагниченности пленки в том или ином направлении в окрестности пересечения разрядной и адресной шин. Направление намагниченности определяет соответствующий код, т. е. логиче-

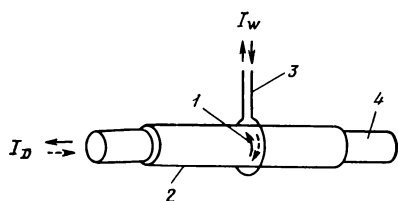


Рис. 5.15. Принцип построения элемента памяти на магнитных проводниках (на цилиндрических магнитных пленках): 1 — направление намагничивания; 2 — магнитная пленка; 3 — провод адресации; 4 — разрядный провод.

ЦТМП имеет ряд преимуществ: групповая технология изготовления, высокое быстродействие, считывание без разрушения информации. Поэтому этот тип памяти широко использовался в период 60—70-х гг. В настоящее время в качестве основной памяти ЭВМ (ОЗУ) используется главным образом полупроводниковая память. Однако благодаря сохранению информации при считывании и при отключении питания память на ЦТМП продолжает применяться в особых случаях, например в системах управления.

#### 5.2.4. Сверхпроводниковые (криотронные) ЗУПВ

Помимо рассмотренных ранее ЗУПВ на магнитной и полупроводниковой памяти, история развития техники насчитывает и множество других типов ЗУПВ, например память на диодах и емкостях. Этот тип памяти по принципу действия схож с динамическими ЗУПВ на полупроводниках. Одновременно с памятью на сердечниках велись исследования по созданию памяти на *сегнетоэлектриках*. Однако до уровня практического использования ее дело так и не дошло. Исследуется возможность использования в качестве физической среды для памяти *аморфных материалов*, способных сохранять два устойчивых состояния.

В настоящее время изучается вопрос о целесообразности использования в качестве ЭП сверхпроводящих материалов. Однако, прежде чем данный тип памяти получит широкое распространение среди пользователей, придется решить еще множество различных проблем. Эффективность применения сверхпроводников в качестве ЭП в настоящее время уже очевидна, и это конечно стимулирует дальнейшее исследование.

Теоретические исследования и ряд экспериментов со сверхпроводящими материалами применительно к ЭП начали про-

ский 0 или 1. При записи по адресной шине пропускается ток  $I_w$ , а по разрядной — либо  $+I_D$  либо  $-I_D$ , что соответствует либо записи логической 1, либо записи логического 0. При считывании по адресной шине пропускается ток  $I_w$ . В разрядном проводе наводится ЭДС, причем полярность ЭДС определяется значением информации, т. е. логическим 0, или 1.

Перед памятью на ферритовых сердечниках память на

водиться с 1950 г. Было предложено достаточно большое число различных проектов, направленных на использование сверхпроводящих ЗУ. Однако ни один из них не стал приемлемым с точки зрения практического внедрения. Экспериментальные исследования

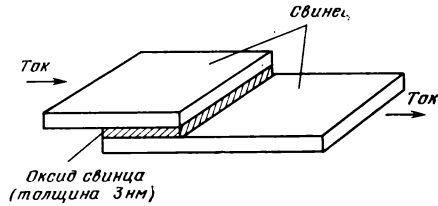


Рис. 5.16. Эффект Джозефсона.

показали, что сверхпроводниковые ЗУ, где в качестве материала был использован тантал, пока что не сравнимы по рабочим характеристикам с магнитной памятью на сердечниках и полупроводниковой памятью. Причем необходимо иметь в виду, что для полупроводниковой и магнитной памяти не требуется поддержание специальной температуры\*.

Следующим этапом развития сверхпроводниковых ЭП явилось открытие туннельного эффекта Джозефсона\*\*. Суть его представлена на рис. 5.16. Между двумя металлическими пластинами, например из свинца, располагается очень тонкий слой изоляции. Под действием туннельного эффекта через этот слой протекает электрический ток. Ожидается, что использование элементов Джозефсона в качестве переключающих устройств позволит значительно увеличить быстродействие и существенно сократить потребляемую энергию по сравнению с элементами, работающими при обычной температуре, например, с полупроводниковыми.

На рис. 5.17 показан пример построения ЭП на ключевых элементах с переходом Джозефсона  $J_1, J_2, J_3$ , в котором два устойчивых состояния, необходимые для хранения двоичной информации, соответствуют состоянию обычной проводимости и состоянию сверхпроводимости. Направление протекания тока  $I_w$  по цепи определяется состоянием проводников  $J_1$  и  $J_2$ , т. е. в зависимости от того какой из них находится в состоянии сверхпроводимости. Если проводники  $J_1$  и  $J_2$  находятся в сверхпроводящем состоянии, то ток  $I_w$  не пройдет дальше по цепи. Электрический ток идет по замкнутому контуру либо слева направо, либо наоборот. Направление тока в замкнутом контуре определяет одно из устойчивых состояний элемента памяти. Таким образом, при помощи данной цепи возможно поддержа-

\* Речь идет о поддержании низкой  $< 20$  К температуры, необходимой для возникновения эффекта сверхпроводимости. — *Прим. ред.*

\*\* Эффект протекания сверхпроводящего тока через тонкий слой диэлектрика был экспериментально обнаружен английским физиком Б. Джозефсоном в 1963 г. — *Прим. ред.*

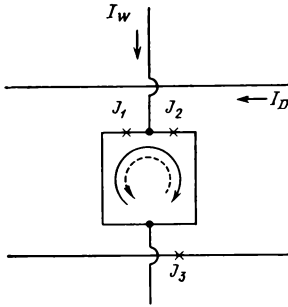


Рис. 5.17. Элемент памяти на переходе Джозефсона.

ние двух устойчивых состояний, необходимых при кодировании информации в двоичном виде. Выбор проводников  $J_1$  или  $J_2$  определяется в соответствии с полярностью тока  $I_D$ .  $J_3$  необходим для считывания информации\*.

В настоящее время существует множество различных проектов использования принципа Джозефсона для построения ЭП и логических элементов, однако практическое применение таких элементов остается пока делом будущего.

### 5.3. Постоянные запоминающие устройства (ПЗУ)

#### 5.3.1. Общие сведения о ПЗУ

Как уже говорилось, ПЗУ является устройством памяти, предназначенным для постоянного хранения и выдачи информации, заложенной при изготовлении ПЗУ. В зарубежной научно-технической литературе они имеют сокращенное название ROM (read-only memory) и ROS (read-only storage). В отличие от ЗУПВ ПЗУ не представляют возможности модифицировать хранимую в них информацию. Однако при этом они имеют следующие достоинства:

- 1) невысокая стоимость;
- 2) надежность хранения информации (информация, хранимая в ПЗУ, устойчива к разрушению, в том числе и при отключении источника питания, т. к. ПЗУ являются энергонезависимы устройствами.
- 3) высокая скорость считывания.

Как правило, информация, записанная в ПЗУ, является таковой, что нет необходимости проводить ее частую перезапись. Такой тип информации используется для символьных устройств отображения, генераторов символов, преобразователей символьной информации, устройств, при помощи которых задается порядок выполнения определенного процесса, т. е. микропрограммных устройств. Другими словами, ПЗУ необходимы там, где

\* Более подробное описание принципов работы криотронной памяти можно найти, например, в книге В. Буккеля «Сверхпроводимость». — М.: «Мир», 1975. — Прим. ред.

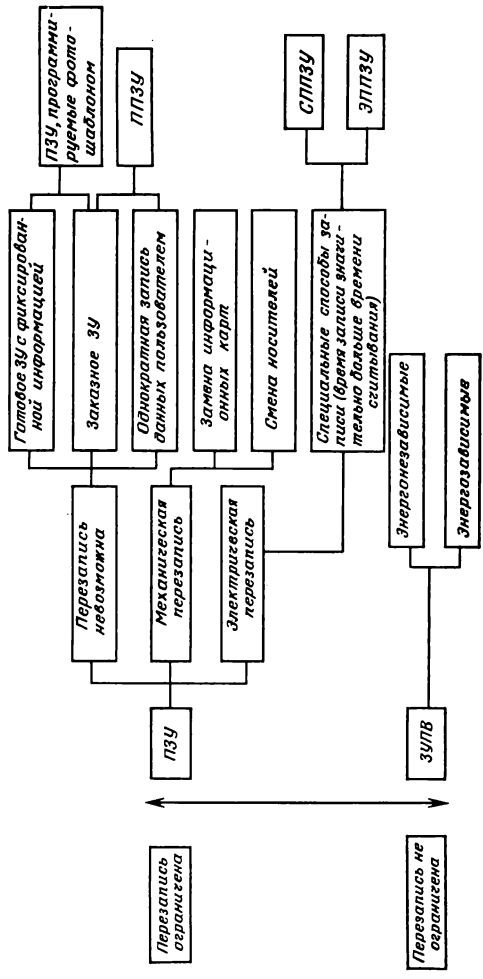


Рис. 5.18. Классификации существующих типов ЗУ в соответствии с возможностью перезаписи информации.

постоянная информация необходима для организации работы систем обработки.

Однако на практике желательно иметь возможность изменения хранимой в устройствах памяти информации. Поэтому в настоящее время во многих типах ПЗУ в большей или меньшей степени возможна модификация данных.

На рис. 5.18 представлены различные типы существующих ЗУ, которые упорядочены по возможности перезаписи хранимой в них информации от ЗУ, в которых вообще невозможна перезапись данных, до ЗУПВ, в которых можно как модифицировать и записывать, так и считывать данные по мере необходимости. Причем очередность их следования определяется возможностью перезаписи данных. На практике не очень существенно, относится ли данный тип устройства к ПЗУ либо к ЗУПВ, так как главное в данном случае — его способность модифицировать хранимую информацию.

### **5.3.2. Полупроводниковые ПЗУ и программируемые ПЗУ**

*ПЗУ, программируемые маской или фотошаблоном*, представляют собой полупроводниковые ПЗУ, в которые предназначена для хранения информация записывается на заводе-изготовителе путем масочного экспонирования в процессе изготовления.

Блоки памяти ПЗУ представляют собой матрицу памяти, в узлах которой расположены элементы связи, причем ПЗУ обычно строят по системе  $2D$ . Элементами связи в полупроводниковых ПЗУ служат биполярные и МОП-транзисторы. Для ПЗУ на МОП-транзисторах характерна более высокая плотность размещения элементов, что значительно снижает удельную стоимость каждой ИС. Поэтому они более многочисленны. На рис. 5.19 в общем виде представлена структура ПЗУ, программируемых фотошаблоном. МОП-транзистор формируется между шинами  $X$ ,  $Y$  и землей. Программирование ПЗУ ведется при помощи подбора соответствующих фотошаблонов, определяющих толщину изолирующего слоя между затвором и каналом. Если изолирующий слой толстый, то проводящий канал не образуется, если тонкий — формируется проводящий канал. Это позволяет использовать МОП-транзистор в вентильном режиме. Если изолирующий слой сделан большой толщины, то проводящего канала не образуется и вентиль разомкнут. Таким образом, кодирование информации реализуется в соответствии с тем, разомкнут или замкнут транзистор в узле матрицы.

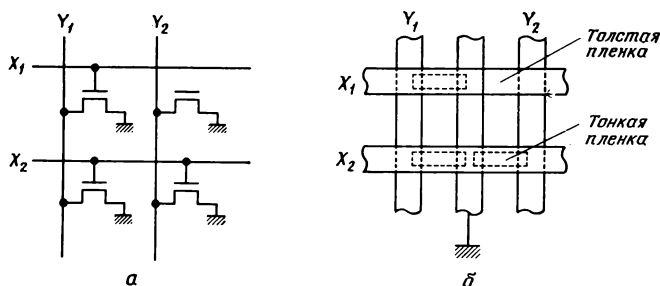


Рис. 5.19. ПЗУ, программируемое фотошаблоном: а — эквивалентная схема; б — структура.

Потребитель получает интегральные схемы ПЗУ такого типа уже в готовом виде. ПЗУ, программируемые маской, изготавливаются на заводах-изготовителях и выпускаются для таких устройств, как генераторы символов, преобразователи символов или кодов и др. Необходимость в данных типах ПЗУ испытывается там, где нет надобности часто модифицировать информацию. Примером этого может служить перечень устройств, приведенный выше. Из этого следует, что выпуск каждого типа ПЗУ, программируемого фотошаблонами, составляет небольшую серию и изготавливается по специальному заказу.

*Программируемое ПЗУ.* На рис. 5.20, а представлен основной принцип, используемый при изготовлении программируемых ПЗУ. На рис. 5.20, б показан конкретный пример части матрицы ПЗУ, построенной на биполярных транзисторах. Элементами связи являются диоды с плавкими перемычками. До программирования все элементы связи имеют соединения с адресными и разрядными шинами матрицы. Программирование состоит в том, что в определенных местах матрицы разрываются перемычки. Это, например, можно сделать за счет пропуска тока большой величины и выжигания перемычек. Перемычки разорваны — процесс программирования считается завершенным. Если в ПЗУ имеется возможность записи дополнительной информации пользователем, то их называют ПЗУ, программируемые пользователем.

*Программируемая логическая матрица (ПЛМ)* представлена на рис. 5.21. Элементами связи в ней тоже являются диоды. Обычно такую матрицу ПЗУ называют матрицей памяти или матрицей, определенной набором логических элементов. Данную матрицу можно представить в виде двух диодных матриц, одна из которых представляет собой матрицу логического умно-

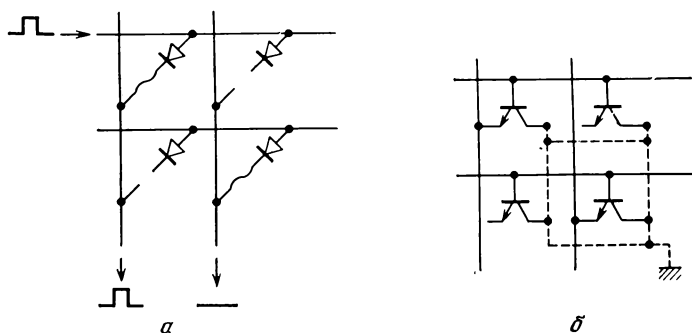


Рис. 5.20. Программируемое ПЗУ: а — матрица ППЗУ; б — матрица на биполярных транзисторах.

жения (И), а другая — матрицу логического сложения (ИЛИ). Тип логики матрицы определен ориентацией элементов связи, т. е. в данном случае диодов. Такая структура с точки зрения логических функций превосходит обыкновенные ПЗУ и применяется в устройствах управления. Кодирование логической матрицы по своей технологии ничем не отличается от программирования ПЗУ, т. е. реализуется теми же средствами.

Логическая матрица функции И представляет собой не что иное, как декодирующий блок для поступающей информации. Логическая матрица ИЛИ кодирует новым кодом информацию, поступающую с матрицы И, т. е. ПЛМ такого типа используется для преобразования кода. Однако она также может быть использована для построения устройств с микропрограммным управлением.

Идея создания устройств с микропрограммным управлением возникла на заре развития вычислительной техники. Упорядочение работы вычислительных комплексов за счет программирования устройств управления было предложено М. В. Уилксом в 1951 г. Общая структура устройства управления показана на рис. 5.22. Основными ее элементами являются блоки А и В, построенные как ПЛМ и выполняющие функцию ИЛИ. Структура этих блоков ничем не отличается от матрицы ИЛИ, которая представлена на рис. 5.21. Они выполняют функцию ПЗУ и кодирующей части устройства.

Слева на рис. 5.22 расположен дешифратор адреса, построенный как логическая матрица И. Начальный адрес поступает в дешифратор адреса и дешифрируется. Далее логическая матрица А вырабатывает управляющий сигнал, а матрица В формирует следующий адрес. Проходящий через линию задержки адрес с блока В можно рассматривать как начальный, который соответственно поступает на адресный дешифратор. Введя оп-



ределенный набор данных, можно таким образом организовать последовательность выдачи управляющих сигналов для любого процесса.

Такая структура управления называется ПЛМ. Производство микросхем ПЛМ, на базе которых строятся системы автоматического управления, оправдано и достаточно эффективно. Последовательность

управляющих сигналов, поступающих с блока А, широко используется не только для управления работой ЭВМ, но и в более простых случаях,

например для непосредственного управления специальными схемами и устройствами, действие которых должно быть определено заданной программой. Введение в различные устройства функций обработки информации резко подняло спрос на ПЛМ.

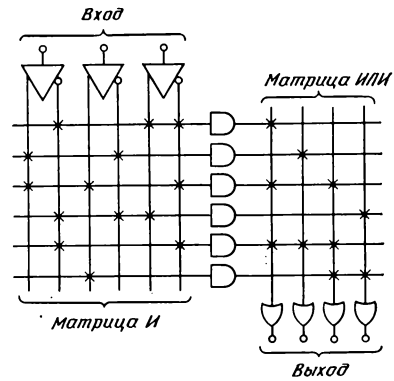


Рис. 5.21. Программируемая логическая матрица.

### 5.3.3. Энергонезависимая полупроводниковая память без регенерации

Существенным недостатком полупроводниковых ЗУПВ является разрушение информации при отключении. В настоящее время ведутся работы, направленные на создание энергонезависимых ЗУ. Одним из принципов, позволяющих реализовать энергонезависимые запоминающие устройства, является применение батарейной поддержки, которая обеспечивает работу ЗУ при отключенном внешнем питании. В данной главе такие типы памяти рассматриваться не будут. Рассмотрим типы памяти, в которых энергонезависимость хранения информации обусловлена свойствами ЭП.

Исследования в этом направлении ведутся уже давно. В настоящее время существует несколько типов энергонезависимых ЗУ. Базовым элементом в них в основном служат МОП-транзисторы с индуцированным каналом. При отсутствии управляющего напряжения на затворе транзистора канал не проводит. Таким образом, зависимость напряжения, возникающего в индуцируемом канале, от величины напряжения, подаваемого на затвор, определяется величиной накопленного заряда на границе диэлектрика, расположенного непосредственно под электродом транзистора. В таких устройствах можно проводить запись

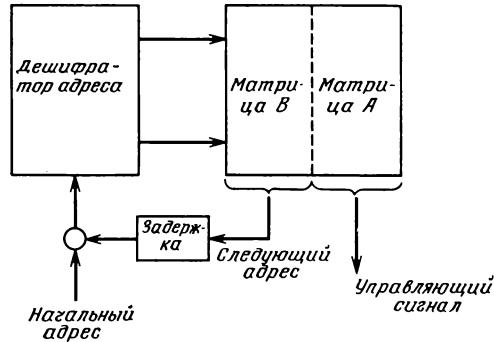


Рис. 5.22. Функциональная схема блока микропрограмного управления.

информации. Однако по сравнению со считыванием данных, операция записи имеет некоторые ограничения. Поэтому ЗУ, построенные на элементах памяти такого типа, представляют собой разновидность ПЗУ. Запись информации в запоминающие устройства, рассмотренные выше, осуществляется электрическим способом. В настоящее время существуют и другие способы записи информации.

*Электрически перепрограммируемые ПЗУ (ЭППЗУ).* Запись информации в ПЗУ занимает гораздо больше времени, чем считывание. Кроме того, в различных ЗУ такого типа существуют определенные ограничения на число перезаписей информации в памяти. Устройства, в которых эти ограничения незначительны, применяются для построения энергонезависимых ЗУПВ.

На рис. 5.23 показан ЭП, широко используемый в таких устройствах. Основу элемента памяти составляет МНОП-структура. Подзатворный изоляционный слой состоит из двух слоев: нитрида и оксида кремния. При большом напряжении между подложкой и затвором на границе поверхности раздела слоев в результате туннельного эффекта появляется электрический заряд. Заряд аккумулируется в слое нитрида кремния, обладающего свойствами сохранения заряда. Образовавшийся электрический заряд не рассеивается и сохраняется достаточно долго. Это происходит за счет того, что в канале постоянно поддерживается электрическое поле. В зависимости от наличия или отсутствия заряда транзистор находится либо в открытом, либо в закрытом состоянии. Другими словами, импульс, прикладываемый к затвору программируемого элемента памяти, в данном случае МНОП-транзистора, включает транзистор, т. е. открывает, что соответствует нулевому биту. Транзистор, который не был программирован, не имеет в слое нитрида кремния заряда и соответственно при приложении импульса к затвору остается закрытым, что соответствует логической 1 на выходе. Основное

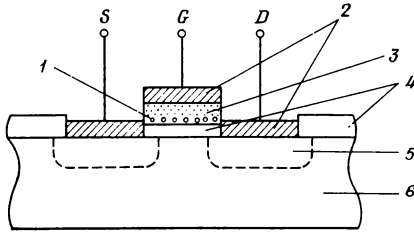


Рис. 5.23. Память на МНОП-структурах: 1 — накопленный электрический заряд; 2 — алюминиевые электроды; 3 — слой нитрида кремния; 4 — слой оксида кремния; 5 — диффузионный слой; 6 — кремниевая подложка; S — исток; G — затвор; D — сток.

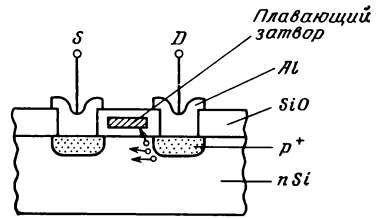


Рис. 5.24. Память, построенная на лавинно-инжекционном МОП-транзисторе с плавающим затвором из кремния.

достоинство данного типа элемента заключается в том, что он перепрограммируем. Стирание информации производится подачей на затвор транзистора импульса противоположной полярности. В результате заряд, захваченный в слое нитрида кремния, исчезает. Удаление заряда также обусловлено туннельным эффектом. В заключение следует отметить, что полупроводниковые приборы, в которых в МОП-структуру введен слой нитрида, называются транзисторами типа металл — нитрид — оксид — полупроводник, или МНОП-транзисторами.

*Перепрограммируемые ПЗУ, стирание информации в которых ведется ультрафиолетовыми лучами (СППЗУ).* Как упоминалось ранее, запись информации в ЭП ведется соответствующими электрическими способами. Однако для стирания информации требуются специальные средства, позволяющие выполнить это за счет облучения памяти ультрафиолетовыми лучами. На рис. 5.24 представлена структура ЭП, в котором стирание информации ведется таким образом. Отличительной чертой такого элемента является отсутствие внешнего вывода затвора МОП-транзистора. В слой оксида МОП-структуры имплантируется поликристаллический кремний, образующий так называемый плавающий затвор. Во время записи информации между стоком и истоком подается импульс напряжения, больший некоторого критического напряжения. Это приводит к появлению горячих носителей в результате лавинной инжекции. Носители проходят слой диэлектрика и инжектируются в плавающий затвор. Образовавшийся в результате этого заряд не рассеивается и сохраняется в течение длительного времени. Подобно механизму, описанному в предыдущем абзаце, электрическое поле в канале МОП-транзистора, образованное за счет накопления или отсутствия заряда, задает два устойчивых состояния элементу,

что соответствует условию двоичной информации. Если возникает необходимость в перепрограммировании, т. е. в уничтожении заряда, область затвора облучают ультрафиолетовыми лучами, действие которых вызывает переход всех элементов в закрытое состояние. Транзисторы такого типа обычно называются лавинно-инжекционными МОП-транзисторами с плавающим затвором или ПЛМОП-транзисторами.

### **5.3.4. Другие типы ПЗУ**

Основным способом построения ПЗУ служит построение их по системе  $2D$ , представляющей собой матрицу, в узлах которой расположены элементы связи. Элементы связи соединяют адресную и разрядную шины. Наличие элемента связи соответствует логической 1, отсутствие — логическому 0. До освоения технологии изготовления полупроводниковых ИС делались попытки использовать в качестве элементов связи и другие схемные элементы, например металлические карты, работающие на принципе взаимной индукции, а также ПЗУ с емкостными элементами связи. Следующий вариант построения емкостных элементов связи ПЗУ явился одним из самых простых. Емкостная связь создавалась между специальными площадками, соединенными с адресной и разрядной шиной. Для записи логического 0 нарушали связь с адресной шиной. Величина емкости между шинами была минимальна. В качестве элементов связи также широко использовались и многообмоточные трансформаторы. Такие ПЗУ представляли особую группу индуктивных ПЗУ. Связь между адресной и разрядной шиной была реализована с помощью магнитных сердечников. Таким образом, в каждом узле был как бы обычный трансформатор. Перечисленные ПЗУ широко использовались в вычислительной технике и различного рода электронных коммутаторах. Однако с появлением БИС область применения их стала гораздо уже, соответственно потребность в них сократилась.

## **5.4. Запоминающие устройства на цилиндрических магнитных доменах (ЗУ на ЦМД) и запоминающие устройства на приборах с зарядовой связью (ЗУ на ПЗС)**

### **5.4.1. Краткий обзор**

Итак, по способу обращения к элементу памяти ЗУ подразделяются на ЗУ с прямым доступом (ЗУПВ), ЗУ с блочно-прямым доступом и ЗУ с последовательным доступом (рис. 5.4).

Уже рассмотренные ЗУПВ и ПЗУ относятся к ЗУ с прямым доступом к данным. Магнитные ленты представляют собой ЗУ, в которых реализован последовательный доступ к информации. Информация в таких ЗУ считывается в результате последовательного просмотра всего массива накопленных данных.

Блочно-прямой метод доступа в настоящее время используется во многих ЗУ. Организация данных и доступ к ним реализованы следующим образом. Вся информация в ЗУ представлена набором отдельных блоков данных. Доступ к каждому блоку осуществляется прямым методом доступа. Внутри блока требуемая информация выбирается в результате последовательного считывания информации. Таким образом, блочно-прямой метод доступа представляет комбинацию двух методов: прямого и последовательного. Такой метод в зарубежной научно-технической литературе называется BORAM (block oriented random access memory).

Блочно-прямой доступ используется в ЗУ на магнитных дисках, на магнитных барабанах; в ЗУ на ЭЛТ, в ЗУ на линиях задержки. На этом же методе доступа построены твердотельные ЗУ, к которым относятся ЗУ на цилиндрических магнитных доменах (ЦМД) и ЗУ на приборах с зарядовой связью (ПЗС). Так как твердотельные устройства являются электронными аналогами устройств с механическими подвижными частями и используют метод доступа такой же, как в магнитных дисках, то они получили название «электронные диски» или «твердотельные диски».

#### 5.4.2. ЗУ на ЦМД

Если ферромагнитный материал, имеющий однородную структуру, поместить в постоянное однородное магнитное поле, то намагниченность материала будет одинакова в каждой его точке, другими словами, вектор магнитной индукции  $\mathbf{B}$  в любой точке материала будет иметь одно и то же значение. Если тонкую пленку, выполненную из магнитного материала, поместить в постоянное магнитное поле, направленное перпендикулярно поверхности пленки, то намагниченность, т. е. вектор магнитной индукции, будет направлен поперек пленки. В плоскости такой пленки, которая намагничена до насыщения в каком-то направлении, возникают отдельные участки (домены), имеющие форму цилиндра, с обратным направлением вектора магнитной индукции \* (рис. 5.25). Цилиндрические магнитные домены (ЦМД)

---

\* Для образования ЦМД материал пленки должен обладать достаточно большой одноосной анизотропией, причем ось легкого намагничивания должна быть перпендикулярна плоскости пленки. — *Прим. ред.*

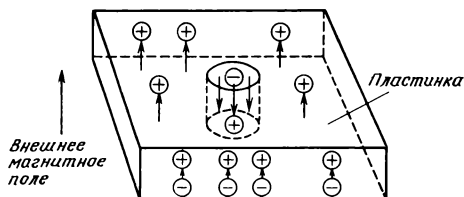


Рис. 5.25. Цилиндрические магнитные домены.

были хорошо изучены еще в 1960 г. Однако только в 1967 г. в «Белл лабораториз» были впервые сделаны попытки создания ЗУ, построенных на тонких магнитных пленках с участками обратной намагниченности. Возможность хранения и считывания информации здесь основана на том, что ЦМД сохраняют при перемещении свои размеры и форму (цилиндрическую).

Размер ЦМД определяется величиной внешнего магнитного поля, действующего на материал, толщиной магнитной пластинки и ее физическими свойствами. В среднем его величина колеблется от нескольких десятков до одного микрометра и даже меньше. Магнитные свойства цилиндрического магнитного домена характерны тем, что его намагниченность противоположна направлению внешнего магнитного поля. Физические свойства ЦМД однородны в пределах домена. Кроме того, диаметр каждого домена является стабильным. Все эти свойства ЦМД позволяют определить его как микромагнит. Такое представление о ЦМД подтверждается и тем, что если вблизи домена поместить полюс магнита, то ЦМД стремится изменить свою ориентацию в зависимости от направления его вектора намагниченности, т. е. он начнет либо притягиваться, либо отталкиваться от полюса магнита. Управление перемещением ЦМД составляет основу построения ЗУ на ЦМД.

На рис. 5.26 показан один из примеров его реализации. На тонкую пластинку наносится система тонкопленочных проводников из пермаллоя (доменопродвигающих структур), которые обычно называют аппликациями. Аппликации имеют Т-образную и шевронную форму. Если поместить пластинку в магнитное поле, вращающееся в плоскости пластинки, на концах Т-образных аппликаций формируются разнополярные полюсы, меняющиеся по мере вращения поля. Аппликации обычно имеют толщину в несколько десятых долей микрона, а их ширина и длина соизмеримы с диаметром домена. При перемагничивании аппликации домен каждый раз стремится разместиться под положительным полюсом элементарного магнита и совершает элементарное перемещение, т. е. домен движется по структуре материала. Движение ЦМД во вращающемся магнитном поле подобно

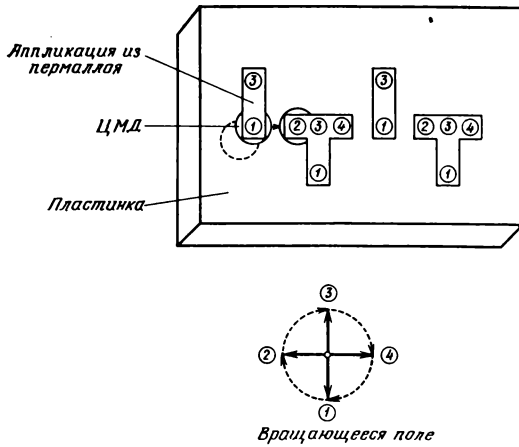


Рис. 5.26. Принцип перемещения ЦМД.

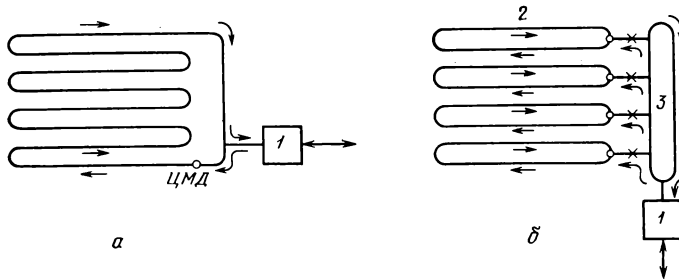


Рис. 5.27. Пример построения кольцевых регистров на ЦМД: *а* — одиночный кольцевой регистр; *б* — система из кольцевого регистра связи и набора кольцевых накопительных регистров;  $\times$  — строб перемещения; 1 — порт ввода-вывода; 2 — накопительный регистр; 3 — регистр связи.

функционированию сдвигового регистра, т. е. появляется возможность построения памяти, действие которой будет аналогично действию длинного регистра сдвига.

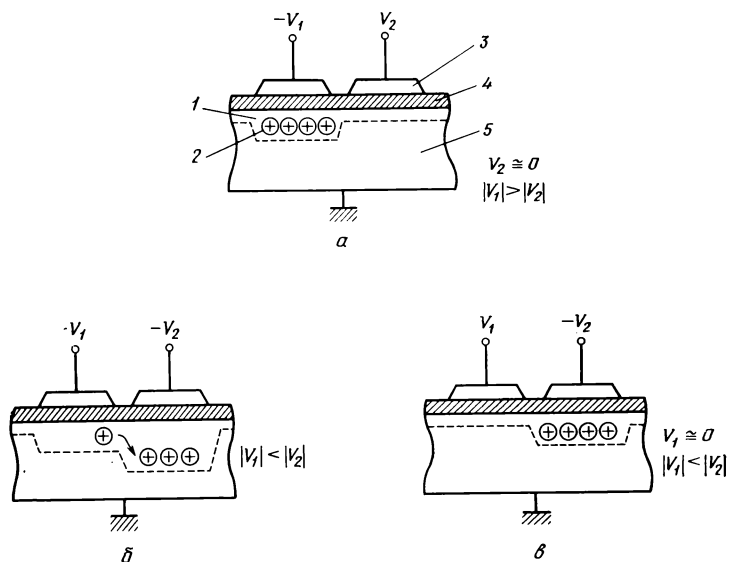
В настоящее время существует множество способов, позволяющих реализовать дешифрацию адреса в структуре памяти, построенной в виде кольцевых сдвиговых структур. На рис. 5.27 показаны два характерных примера построения систем дешифрации адреса в кольцевых структурах. На рис. 5.27, *а* показана простейшая кольцевая структура. Среднее время доступа пропорционально числу битов хранимой информации. На рис. 5.27, *б* изображена система, состоящая из набора кольцевых накопительных регистров и кольцевого регистра связи. Информация хранится в накопительных регистрах. Под действием управляю-

шего сигнала она поступает в регистр связи (внешнее кольцо). Проходя по внешнему кольцу, информация считывается или записывается. Данные считываются из внешнего кольца последовательно и составляют одно слово. Считывание данных происходит через порт ввода/вывода. По внутренним кольцевым структурам информация движется параллельно. Такая организация построения памяти во многом схожа с организацией данных на магнитном диске. Внутреннее кольцо накопительных регистров аналогично магнитной дорожке, а регистр связи (внешнее кольцо) — магнитной головке, при помощи которой выбирается соответствующий цилиндр.

#### **5.4.3. Запоминающее устройство на приборах с зарядовой связью**

Приборы с зарядовой связью (ПЗС), разработанные в 1970 г. в «Белл лабораториз», являются разновидностью полупроводниковых приборов. На рис. 5.28 представлена в общем виде структура ПЗС и показан принцип ее действия. Для получения ПЗС на поверхность кремниевой подложки напыляется слой диэлектрика из оксидной пленки. К соответствующим контактным площадкам крепятся электроды. Таким образом, ПЗС изготавливается на основе технологии ИС. Однако для изготовления ПЗС не требуется диффузия примесей в подложку и ряд других процессов технологии ИС. Структура ПЗС проще, а интеграция элементов выше, соответственно ниже стоимость бита информации. Все это дает основание считать память, построенную на ПЗС, перспективной. Принцип действия данного типа памяти состоит в следующем. Если на электрод структуры, имеющей подложку  $n$ -типа, подать отрицательное напряжение, возникают благоприятные условия для образования потенциальной ямы для дырок на границе диэлектрик — кремний в месте приложения напряжения. Другими словами, под электродом образуется обедненный слой за счет того, что основные носители заряда, в данном случае электроны, выталкиваются, и поэтому в этом месте происходит накопление положительного заряда дырок. Заряд не растекается и сохраняется достаточно долго. Если приложить высокий отрицательный потенциал к соседнему электроду, накопленный заряд перетечет в соседнюю область. Если на соседних электродах последовательно задавать отрицательные напряжения, то заряд потечет по структуре, т. е. по поверхности диэлектрика. В этом и заключается принцип действия сдвигового регистра, кодирование информации в котором задается отсутствием или наличием заряда.





5.28. Принцип действия ПЗС: 1 — обедненный слой; 2 — положительные заряды (дырки); 3 — металлический электрод; 4 — тонкий слой диэлектрика; 5 — полупроводниковая подложка *n*-типа.

Для запуска ПЗС инжекция неосновных носителей в обедненный слой может быть любой. Заряд, например, можно задать при помощи соответствующей цепи, представляющей цепочку диодов. Заряд можно задать на основе использования лавинного эффекта из соседних областей материалов, либо за счет облучения. ПЗС совместно со световыми источниками используется на различных этапах построения устройств отображения. В ЗУ инжекция неосновных носителей осуществляется главным образом электрически. Для контроля заряда в структуре применяются транзисторы и диоды, изготовленные на той же подложке. На этих элементах построены схемы дешифрации и усиления сигналов.

Как уже говорилось, технология изготовления ПЗС практически совпадает с технологией изготовления интегральных схем, имеющих высокую плотность упаковки элементов. Это ведет к тому, что ПЗС обладают как положительными, так и отрицательными свойствами, присущими технологии изготовления БИС. Говоря о положительных сторонах необходимо в первую очередь выделить высокую плотность монтажа, т. е. в одном элементе можно смонтировать как само устройство, так и его периферийные схемы. Говоря же об отрицательных сторонах, следует иметь в виду, что так как технология изготовления

ПЗС идентична технологии изготовления БИС, то уровень интеграции, а значит, и стоимость бита информации в ЗУ на ПЗС сравнимы с ЗУПВ. В связи с этим широкого распространения запоминающие устройства с ПЗС пока что не получили.

## **5.5. Внешние ЗУ с магнитной записью информации**

### **5.5.1. Обзор существующих методов магнитной записи**

Методика записи данных на магнитную поверхность материала состоит в том, что на непрерывном магнитном носителе происходит намагничивание отдельных его участков. Такая методика записи данных широко применялась и сейчас применяется в звукозаписи. Информация при этом заносится на магнитную ленту. Однако с развитием вычислительной техники область применения записи на магнитную поверхность существенно расширилась. Появились такие ЗУ, как магнитные диски и ленты, информация на которых хранится в цифровом виде.

*Основные принципы записи на магнитную поверхность.* В устройствах звукозаписи и видеозаписи данные записываются в виде аналоговых сигналов. В ЗУ компьютеров данные записываются в цифровом виде. Основной принцип и структура записи как в цифровом, так и в аналоговом виде практически не отличается, т. е. принцип записи и ее структура не зависят от формы записи. На рис. 5.29 изображен принцип записи информации на магнитную поверхность вещества. Намагничивание локального участка на поверхности носителя осуществляется при помощи магнитной головки. В качестве носителя информации обычно применяется изделие из алюминия, полиэфира или майлара, на поверхность которого наносится тонкий магнитный слой, после чего поверхность тщательно полируется. По своим физическим свойствам материал, используемый для носителя информации, может быть жестким и гибким. По форме носители изготавлиются в виде лент, карт, цилиндров, дисков и т. д.

Магнитная головка представляет собой сердечник с обмоткой, который имеет узкий зазор в магнитопроводе. Говоря иначе, магнитная головка является миниатюрным электромагнитом с узким зазором между полюсами. Если по обмотке головки пропустить электрический ток, то в магнитопроводе головки возникнет магнитный поток, выходящий за пределы зазора между полюсами. Таким образом, участок поверхности магнитного носителя в непосредственной близости от головки намагничивает-

ся. Направление вектора остаточной индукции в месте намагничивания материала зависит от направления тока, протекающего по магнитной головке. Если он положителен, то это соответствует логической 1, а если отрицательный, то логическому 0. Магнитный материал обладает свойством сохранять состояние намагниченности, в которое он был приведен, достаточно долго. На этом и основано хранение информации, занесенной на него.

Во время считывания информации весь вышеописанный процесс, протекающий во время записи, повторяется в обратной последовательности. Если на носитель записана информация, это значит, что каждый из локальных участков его поверхности имеет определенное направление вектора остаточной индукции, т. е. в непосредственной близости от каждого из участков магнитной поверхности существует магнитное поле. Магнитная головка, проходя над участком поверхности с информацией, пересекает линии магнитного потока, образуемые магнитным полем этого участка. Это приводит к тому, что в магнитной головке индуцируется магнитный поток, т. е. часть магнитного потока, создаваемого намагниченными участками поверхности, замыкаются через магнитопровод головки. Тем самым в обмотке магнитной головки наводится ЭДС. Полярность напряжения определяется направлением вектора намагниченности носителя на данном участке. Это дает возможность контроля записанной информации на каждом участке поверхности.

*Методы записи цифровой информации на магнитный носитель.* Как уже говорилось ранее, запись информации на магнитный носитель определяется направлением протекающего по магнитной головке тока, который создает либо отрицательное, либо положительное насыщение магнитного материала носителя. Во время считывания информации ЭДС, возникающая в обмотке магнитной головки, пропорциональна градиенту намагниченности. На рис. 5.30 представлены диаграммы тока записи, намагниченности материала и напряжения в обмотке при считывании.

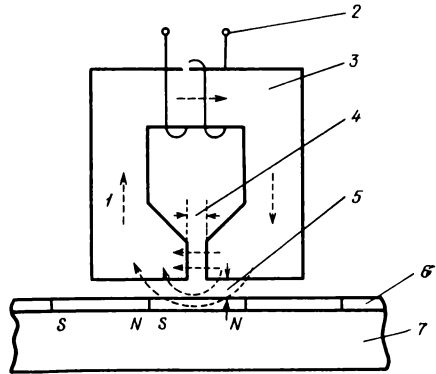


Рис. 5.29. Магнитная запись информации: 1 — магнитный поток; 2 — обмотка записи и считывания информации; 3 — сердечник магнитной головки; 4 — зазор головки; 5 — зазор головки — носитель; 6 — записываемая поверхность носителя; 7 — основа носителя.

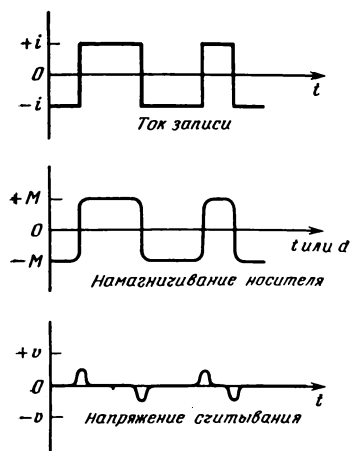
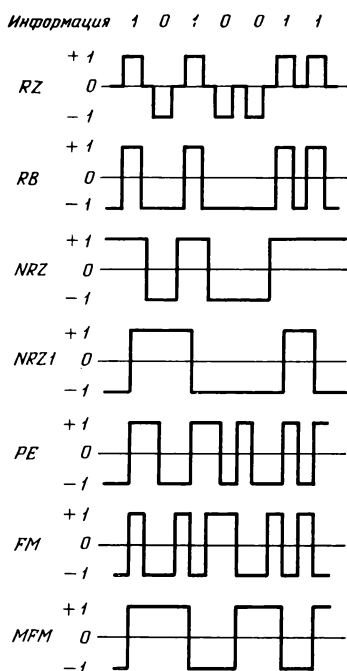


Рис. 5.30. Диаграммы тока записи, намагниченности и уровня напряжения при считывании цифровой информации, записанной на магнитном носителе.

Рис. 5.31. Методы записи цифровой информации на магнитный носитель.



Методы записи разделяются в зависимости от способа намагничивания материала при поступлении информации. Каждый метод имеет свои преимущества и недостатки. Целесообразность использования каждого зависит от конкретного случая. На рис. 5.31 представлены диаграммы, определяющие каждый из них.

1. Поляризованная запись с возвращением к нулю (*RZ*) использует три состояния намагниченности носителя, поэтому этот метод также называют записью по трем уровням. При записи логической 1 импульс, пропускаемый по обмотке магнитной головки, имеет условно положительную полярность и в носителе создается положительное насыщение намагниченности. При записи логического 0 этот импульс имеет отрицательную полярность и в носителе создается отрицательное насыщение намагниченности. Между намагниченными участками остаются участки, находящиеся в размагниченном состоянии. Перед записью информации носитель размагничивается. Из-за сложности реализации данного метода на практике его применение ограничено.

2. Запись с возвращением к смещению (*RB*). Перед записью носитель приводится в исходное состояние магнитного насыщения, определяемое направлением постоянного тока в записываю-

щей головке. Обычно это состояние соответствует логическому 0 и отсутствию информации. При записи логической 1 импульс, пропускаемый по обмотке головки, перемагничивает носитель. По сравнению с записью *RZ* в этом методе при считывании логической 1 изменение магнитного потока в два раза больше, что естественно повышает уровень сигнала считывания. Чтобы различать повторяющиеся логические нули и отсутствие информации, вводятся синхронизирующие сигналы, при помощи которых определяется логический 0 смысловой информации.

3. Записи без возвращения к нулю (*NRZ*). Положительная намагниченность носителя соответствует 1, а отрицательная — логическому 0. Состояние магнитного носителя не изменяется при отсутствии сигнала данных и определяется последним состоянием намагниченности, в котором находился носитель. В данном методе реверсивность магнитного потока незначительна, поэтому плотность записи выше. Однако наличие синхронизирующих сигналов необходимо по тем же причинам, что и в методе *RB*.

4. Запись без возвращения к нулю с инверсией (*NRZI*) является модификацией метода *NRZ* и известна еще как потенциальная запись по двум уровням. Магнитный поток меняет направление только при записи 1. Режим работы данного метода аналогичен работе триггера. При считывании 0 сигнал отсутствует, поэтому для контроля этого состояния наличие синхронизирующих сигналов обязательно.

5. Запись с фазовым кодированием (*PE*) или запись с фазовой модуляцией. Вид магнитной записи, при которой 1 записывается положительным перепадом тока записи, а 0 — отрицательным перепадом. При записи последовательности единиц или нулей в обмотке записывающей головки проводится дополнительное переключение направления тока между тактами. Поскольку направление намагничивания меняется с каждым битом, синхронизирующие сигналы не требуются, т. е. возможна автосинхронизация.

6. Запись с частотной модуляцией (*FM*). При записи 1 изменяется направление намагничивания, при записи 0 — не изменяется, т. е. носитель не перемагничивается. Реверсирование магнитного потока происходит каждый раз при прохождении импульса каждого битового элемента. В данном методе возможна автосинхронизация.

7. Запись с модифицированной частотной модуляцией (*MFM*) является модификацией метода записи *FM*. Направление намагничивания меняется при записи единиц и повторяющихся нулей. Такой метод в сравнении с *FM* позволяет сократить вдвое число изменений направления намагничивания, что существенно повышает плотность записи информации. Это и

Условное обозначение	Наименование	Классификация носителей
	<i>MSS</i> (массовая память)	
	<i>Магнитная лента</i> (на съемной бобине)	
	<i>Кассета магнитной ленты</i>	
	<i>Мини-кассета</i>	<i>Ленты</i> ↑
	<i>Магнитная карта</i>	<i>Карты</i>
	<i>Гибкий мини-диск</i>	↓ <i>Диски</i>
	<i>Гибкий диск</i>	↑ <i>Гибкий носитель</i> ↓ <i>Жесткий носитель</i> ↕ <i>Возможен демонтаж и замена носителя</i>
	<i>Компакт-кассета диска</i>	
	<i>Пакет дисков</i>	
	<i>Блок диски-головки (вингестерские диски)</i>	↑ <i>Заменяемость возможна</i>
	<i>Несъемный диск</i>	↓ <i>Заменяемость невозможна</i>
	<i>Магнитный барабан</i>	

Рис. 5.32. Типы магнитных накопителей информации.

возможность автосинхронизации обеспечило этому методу записи в настоящее время широкое распространение.

*Виды магнитных носителей цифровой информации.* На рис. 5.32 приведены основные типы носителей информации, данные в которых записываются на магнитную поверхность. В самом общем

виде они подразделяются на ленточные и дисковые. Кроме того, носители информации можно разделить на гибкие и жесткие. Большое значение придается возможности замены носителей информации.

Как следует из рис. 5.32, на первом месте классификационной таблицы находятся массовые ЗУ (*MSS*), предназначенные для хранения больших объемов информации. Устройства данного типа появились сравнительно недавно и служат главным образом в качестве библиотек на магнитных лентах. Конструктивно *MSS* представляет собой стойку с расположенными в ней в виде сот компакт-кассетами магнитных лент. Магнитные ленты в данном устройстве хранятся без внешней крышки, т. е. в развернутом виде намотанными на цилиндры. Выборка необходимой компакт-кассеты осуществляется автоматически. В автоматическом режиме реализована запись и считывание информации. Емкость одной компакт-кассеты составляет около 50 М байт. *MSS* содержит от нескольких сотен до нескольких тысяч таких компакт-кассет. Основным достоинством данного устройства является то, что оно позволяет хранить и записывать в одном месте файлы данных, имеющих большой объем.

После *MSS* в таблице помещена магнитная лента на бобине. Магнитные ленты представляют собой самые давнишние устройства памяти, используемые в вычислительной технике. В настоящее время существует большое число типов магнитных лент, начиная от высокоэффективных и модифицированных и кончая самыми простыми.

Далее следует кассета магнитной ленты. Это устройство проще в эксплуатации по сравнению с магнитной лентой на бобине. Такие кассеты по размеру, а значит, и по информационной емкости, больше мини-кассет магнитных лент. Эти устройства обычно применяют в том случае, когда памяти на кассетных лентах недостаточно. Мини-кассетные магнитные ленты широко используются в настоящее время и в бытовой технике, например в системах звукозаписи, т. е. магнитофонах. Они не отличаются по форме от мини-кассетных магнитных лент, применяемых в вычислительной технике, но некоторое различие в параметрах есть. В вычислительной технике их используют для вспомогательных запоминающих устройств памяти.

Магнитные карты по способу эксплуатации отличаются от вышерассмотренных ленточных устройств и применяются для обработки информации, организованной в виде каталога. В таких устройствах расположение магнитной записи стандартизовано.

В конце таблицы на рисунке 5.32 приведены накопители на магнитных дисках (НМД) и магнитных барабанах.

В отличие от магнитных барабанов дисковые устройства

представляют собой набор пластин. Это делается с целью расширения рабочей поверхности носителя. Первоначально диск был аналогом удлиненного барабана. Набор дисков жестко фиксируется на оси вращения, поэтому замена их практически невозможна. Такие дисковые устройства, называемые несъемными, в настоящее время широко используются в вычислительной технике благодаря их высокой эффективности в работе.

Пакетом дисков называется такая конструкция, в которой каждый из носителей может быть свободно заменен на другой. Пакет дисков составляется из отдельных дисковых компакт-кассет. Такая конструкция облегчает замену отдельных носителей, и повышает эффективность хранения информации. Все это привело к их широкому применению на практике в настоящее время.

Между пакетами дисков и фиксированными дисками, расположены так называемые винчестерские диски, или, как еще называют данную конструкцию, блок диски — головка. Магнитные накопители данного типа представляют собой единый модуль, который свободно может быть заменен аналогичным. В него входят диски и устройства привода головок. В настоящее время существует уже множество различных реализаций данной конструкции. Необходимо отметить, что винчестерские диски сейчас являются одними из наиболее популярных магнитных накопителей информации, что обусловлено высокой эффективностью работы и простотой эксплуатации. Такой тип дисковых накопителей считается началом развития третьего поколения магнитных носителей информации.

Гибкий диск, или флоппи-диск, в последнее время стал достаточно популярен и нашел широкое распространение в персональных вычислительных машинах и системах автоматизированного управления. Первоначальное его назначение в вычислительных комплексах ограничивалось тем, что на нем хранили программу начальной загрузки операционной системы. Однако со временем простота в эксплуатации, а также высокая степень надежности в работе позволили значительно расширить область его применения, т. е. он стал использоваться в качестве самостоятельного устройства внешней памяти. Поверхность гибкого диска защищена от нежелательных внешних воздействий твердым пластмассовым конвертом, в котором диск находится и во время эксплуатации. Кроме того, время, затрачиваемое на его начальное раскручивание, практически равно нулю в сравнении с кассетными лентами и др. Это позволяет пользователю сократить время доступа к информации.

Первоначально в дисковых накопителях для записи использовалась только одна поверхность. Со временем стали использовать обе поверхности, что естественно повысило плотность



информации в два раза и привело к более эффективной работе дисковых магнитных накопителей. Гибкие мини-диски есть ни что иное, как гибкие диски меньшей формы. В настоящее время такая микроминиатюризация является потребностью времени. Дальнейшее совершенствование форм записи информации еще больше расширит круг применения магнитных накопителей.

### 5.5.2. Накопители на магнитных дисках (НМД)

*Жесткие диски.* Конструкция такого ЗУ (рис. 5.33) состоит из отдельных дисков, насаженных на общую ось вращения. Если основой диска служит жесткая пластинка, например из алюминия, то такой диск называется жестким, если пластик, то такой диск называется гибким. В этом разделе будет рассмотрен жесткий диск, а в следующем — гибкий.

Итак, дисковое ЗУ представляет собой один или несколько дисковых накопителей, соответствующим образом установленных друг над другом. В зависимости от возможности замены отдельных накопителей различают разъемные, либо неразъемные НМД. Информация наносится на концентрические окружности магнитной поверхности диска, называемые магнитными дорожками. Запись осуществляется при помощи магнитной головки. Магнитные головки крепятся на пружинных консолях, которые фиксированы в суппорте. Сервопривод суппорта с головками перемещает их вдоль радиуса диска. Такое движение головок обеспечивает их позиционирование на нужной дорожке. Этот тип головок обычно называют плавающим или подвижным. Существуют также ЗУ с фиксированными головками, в которых на каждую дорожку установлено по магнитной головке.

Время доступа к информации (или время выборки) на магнитном диске во многом зависит от механической системы привода. На рис. 5.34 представлены временная диаграмма, на которой отображены те временные составляющие, из которых складывается общее время доступа. Время поиска необходимо для установки головки на соответствующую дорожку. В НМД с плавающими головками оно определяется временем на механическое перемещение суппорта и временем, которое затрачивается на выбор нужной головки, причем этот выбор выполняется электрически. В НМД с фиксированными головками время поиска затрачивается только на определение нужной головки. Следовательно, в НМД с фиксированными головками время поиска меньше, чем в НМД с плавающими головками. Время доступа включает в себя и время, затрачиваемое на вращение диска, т. е. то время, которое необходимо затратить для установки головки в нужном месте на поверхности диска, и которое зависит от

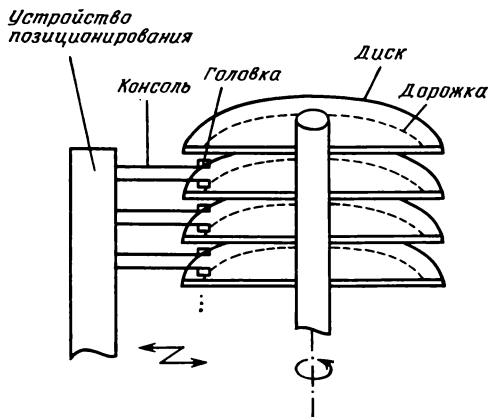


Рис. 5.33. Накопитель на магнитном диске (НМД).

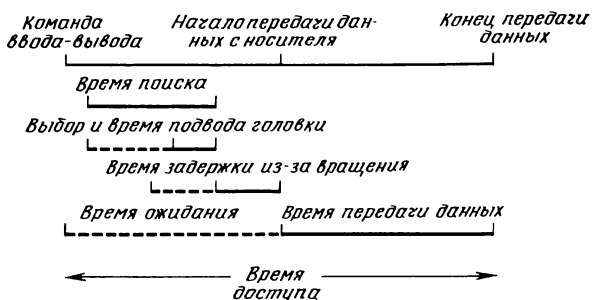


Рис. 5.34. Время доступа к данным в НМД.

скорости вращения. Среднее время позиционирования головки на дорожке составляет половину времени, затрачиваемого на полный оборот диска. Бывают случаи, когда время поиска плюс время позиционирования головки составляет только часть от общего времени, затрачиваемого на доступ к информации.

От момента поступления команды на запись или считывание данных до поступления первого бита информации проходит определенное время, называемое временем ожидания. Время выборки представляет собой время, которое требуется для получения всей необходимой информации с носителя. Такое определение времени выборки принято в терминологии Японских промышленных стандартов (JIS). Следует быть внимательным, так как часто в ЗУПВ под временем доступа (выборки) понимают время ожидания устройства.

Первоначально дисковые магнитные ЗУ представляли собой фиксированную конструкцию накопителей, т. е. отдельные нако-

пители не могли быть заменены. В 60-х гг. стали появляться пакеты дисковых накопителей с возможностью замены отдельных носителей информации. Сначала в пакет входило шесть отдельных дисков, в новейших конструкциях их число доходит до 11 и 12. Тем не менее в мини-ЭВМ широко используются дисковые кассеты с одним магнитным диском. Такая конструкция является одной из самых простых в настоящее время. В пакете дисков, состоящем из шести пластин, как правило, верхняя и нижняя поверхности не используются для хранения информации. Число рабочих поверхностей в таком пакете равно 10. В пакете из 12 пластин верхняя и нижняя пластины обычно используются для защиты информации от нежелательных внешних воздействий. Одна поверхность на десятой пластине отведена под хранение физического каталога, в котором определены адреса дорожек всего пакета. Всего используется 19 рабочих поверхностей, на которых пользователь может хранить свои данные. Информационная емкость дисковых пакетов составляет от нескольких Мбайтов до нескольких сотен Мбайтов.

При эксплуатации носителей информации в дисковом пакете желательна их взаимозаменяемость пользователями. Взаимозаменяемость предъясвляет к разбросу электрических и механических параметров отдельных носителей достаточно жесткие требования. По этим же критериям подбираются носители при расширении объема дискового пакета. Пакеты дисков существенно удобнее других носителей информации, так как способы хранения информации и способы наращивания объема в них гораздо проще. Исходя из принципа простоты заменяемости носителей, в настоящее время появились дисковые накопители, которые представляют собой единый модуль носителей и головок. Это широко известные винчестерские диски — головки, называемые еще модулем данных (рис. 5.35). Отличие типов модулей данных друг от друга состоит в способе замены механизма привода магнитных головок, т. е. какая часть привода заменяется при смене диска.

Винчестерские диски имеют высокую плотность записи информации, обладают большой емкостью и, кроме того, просты в эксплуатации. Все это позволяет использовать их в вычислительных машинах разного типа, например в мини-ЭВМ.

*Гибкие диски, или флоппи-диски*, представляют собой гибкий носитель, имеющий форму диска, на поверхность которого записывается информация. Запись и хранение информации обеспечиваются нанесением магнитного слоя на поверхность носителя, т. е. процесс записи и хранения реализуется так же, как и в других магнитных носителях информации. На практике в понятие «гибкий диск» включают не только сам диск-носитель информации, но и дисковод. Поэтому, если говорят только о магнитном

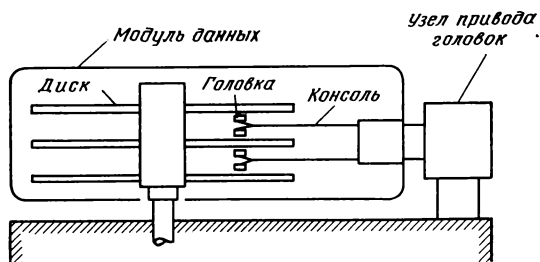


Рис. 5.35. Модуль данных.

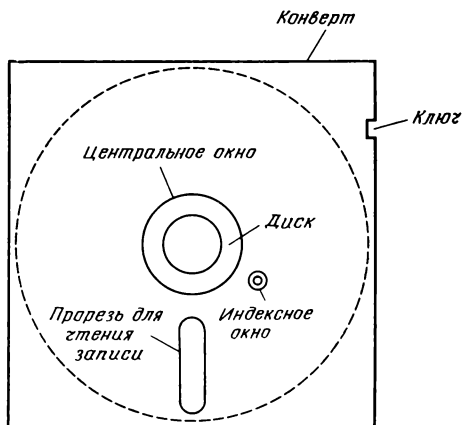


Рис. 5.36. Гибкий диск.

носителе информации, то используют такие термины, как дискета и пластина. На рис. 5.36 такой магнитный носитель или дискета показан в защитном конверте из твердого пластика.

В настоящее время выпускаются гибкие диски диаметром 200 и 130 мм. На практике также используют диски и меньших размеров. По числу рабочих поверхностей дискеты (гибкие диски) подразделяются на диски с одной рабочей поверхностью и диски с двумя рабочими поверхностями. Кроме того, гибкие диски отличаются и плотностью записи информации. В настоящее время существуют гибкие диски с простой плотностью и двойной. Необходимо также иметь в виду, что диски отличаются друг от друга и по способу их форматирования. Так как в настоящее время число способов форматирования уже достаточно велико, то разбить диски по таким группам сложно.

На рис. 5.37 представлена конструкция гибкого диска и дисковода. Диск в защитном пакете, устанавливается на шпиндель вращения и фиксируется при помощи втулки. Запись и считыва-

ние информации с носителя происходит при помощи магнитных головок через специальное отверстие в защитном пакете, называемое окном. Скорость вращения диска зависит от его габаритов. Так, например, для диска диаметром 200 мм она составляет 360 об/мин, а для диска диаметром 130 мм — 300 об/мин. Информационная емкость носителя определяется числом информационных дорожек на его поверхности. Гибкий диск, размером 200 мм, на одной поверхности имеет 77 дорожек, а на двух соответственно 77·2. У 130-мм диска число дорожек на одной поверхности равно 35. Информационная емкость одной поверхности 200-мм гибкого диска составляет приблизительно 400 К байт (1 байт соответствует 8 бит). Причем такая информационная емкость приведет на для неформатируемой записи на диск. Если применяем 200-мм диск двойной плотности, то на двух рабочих поверхностях запишется 1600 К байт данных. Для 130-мм диска объем информации равен приблизительно 100 К байт. Если поверхность диска отформатирована, то объем хранимой информации снижается до 60—80%.

Гибкий диск прост в эксплуатации, а также легко заменяем. По сравнению с кассетной магнитной лентой время доступа в нем гораздо меньше. Благодаря этому он получил широкое распространение для хранения файлов в мини-системах. В отличие от перфокарт и перфолент гибкий диск можно использовать в качестве устройства ввода-вывода несколько раз, так как он позволяет пользователю перезаписывать информацию. Кроме того, плотность записи информации в нем гораздо выше. Долговечность гибкого диска достаточно велика, число обращений превышает 1 млн. раз. Кроме того, можно повысить степень его использования, учитывая неравномерность доступа к дорожкам.

### 5.5.3. Накопитель на магнитных лентах (НМЛ)

Магнитные ленты, которые в настоящее время широко используются для хранения цифровой информации, мало чем отличаются от магнитных лент, используемых в звукозаписи и видеотехнике. Структура магнитной ленты представляет собой пластиковую основу, на поверхность которой наносится порошок окси-

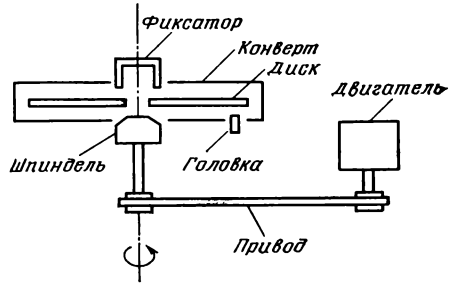


Рис. 5.37. Дисковод гибкого диска.

Таблица 5.2

## Параметры НМЛ

	Число до- рожек	Информаци- онная ем- кость, Мбайт	Скорость пе- редачи дан- ных, Кбайт/с	Скорость дви- жения лен- ты, м/с
Съемная бобина	9	88	1250	5,1
Кассета	4	2,5	6	0,76
Мини-кассета	2	0,2	1,5	0,38

да железа. Стандартная магнитная лента имеет ширину 12,7 мм и длину 730 и 370 м. Магнитная лента обычно намотана на бобине. Размер бобины и длина ленты являются совершенно произвольными, так как число их разновидностей в последнее время стало велико. Самой простой конструкцией носителя магнитной ленты является так называемая съемная бобина, которая легко может крепиться и сниматься с устройства, приводящего ее во вращение. Помимо такой конструкции существуют кассеты магнитных лент и мини-кассеты магнитных лент, в которых магнитная лента сматывается с одной катушки и наматывается на другую. Обе катушки крепятся в одном корпусе. Такая конструкция лент легко устанавливается и снимается с устройства, приводящего ее во вращение. В массовых ЗУ запись данных производится на широкую ленту по всей ее ширине или по диагонали. В табл. 5.2 представлены основные технические параметры для разных типов магнитных лент. Процедуры произведения записи и считывания цифровой информации в НМЛ требуют исполнения как минимум трех операций: движение ленты, останов ленты, перемотка ленты. Однако необходимо учитывать, что с момента выдачи команды на перемотку магнитной ленты, т. е. начала движения, и до того момента, когда скорость ленты станет постоянной, а также с момента выдачи команды на останов магнитной ленты и до того момента, когда лента полностью остановится, требуется некоторое время, в течение которого чтение и запись на ленту невозможны. Поэтому информация на ленте хранится в виде блоков. Причем расстояние между блоками данных должно быть, естественно, больше, чем то расстояние, которое требуется для того, чтобы магнитная лента смогла полностью остановиться или разогнаться. Поскольку величина межблочного зазора стандартизована, это накладывает ограничения на скорость вращения механизма магнитной ленты.

Время, затрачиваемое на разгон и остановку магнитной ленты, а также поддержка постоянной скорости вращения бобины, определяется в первую очередь стабильностью вращения оси, на которой крепится бобина, или, как ее называют, тон-ось. В на-

стоящее время уже существует несколько способов, позволяющих управлять прочностью сцепления бобины с тон-осью. Одним из них является применение прижимного ролика, при помощи которого лента прижимается к тон-оси. Другим способом служит использование вакуумной тон-оси, в которой сцепление ленты с тон-осью осуществляется вакуумным методом. В силу того что инерция бобины с лентой достаточно велика, между бобиной и движущейся частью ленты имеется свободный участок ленты, позволяющий более плавно менять скорость вращения во время разгона и останова ленты. Такой запас свободной ленты снижает таким образом ударные нагрузки при пуске и останове, причем лента для этого помещается в специальные буферные хранилища.

Работа пользователя с НМЛ сопряжена с такими операциями, как замена магнитных лент на лентопротяжных устройствах, заправка лент и установка на маркер. На все эти операции уходит время. В связи с этим были разработаны специальные средства, позволяющие осуществлять автоматическую установку и загрузку магнитных лент. Например, специальная система, построенная на использовании воздушного потока, упрощает операции, связанные с заменой магнитных лент. Пользователю достаточно только установить бобину с магнитной лентой на лентопротяжный механизм, а далее автоматически происходит загрузка магнитной ленты.

Проблема, связанная с упрощением операций по замене магнитной ленты, в настоящее время решается и за счет внедрения кассетных и мини-кассетных магнитных лент. Мини-кассетные магнитные ленты по размерам и конструкции в большинстве случаев их применения в вычислительной технике во многом схожи с обыкновенными кассетными лентами, которые широко используются в современных системах звукозаписи. ЗУ, построенные на них, нашли широкое применение в мини- и микро-ЭВМ как внешние ЗУ. Кроме того, они широко применяются в устройствах автоматизации делопроизводства.

Кассеты магнитных лент по размерам и по функциональным возможностям превосходят мини-кассетные магнитные ленты. Например, мини-кассетные магнитные ленты имеют 2 информационные дорожки, а в кассетных магнитных лентах их число равно 4. Но с другой стороны, структура и размер мини-кассетных магнитных лент уже давно стандартизованы, а в существующем многообразии кассет магнитных лент пока нет четкого стандарта.

Как уже говорилось ранее, среди устройств памяти, которые строятся по принципу записи информации на магнитный носитель, существуют так называемые массовые ЗУ MSS, предназначенные для хранения больших объемов информации. По срав-

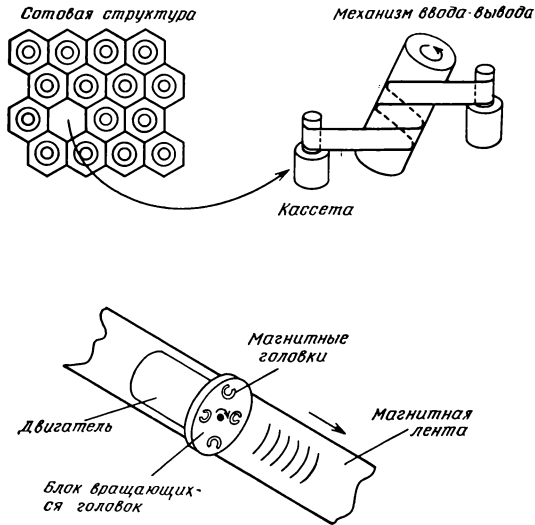


Рис. 5.38. Массовая память с записью по всей ширине ленты.

нению с НМД они обладают большей информационной емкостью, имеют меньшую себестоимость хранения одного бита. Такие ЗУ используются для организации хранения библиотек данных, расположенных на магнитных лентах, где нет необходимости смены носителей информации во время работы и позволяют пользователю строить информационные структуры большой емкости в виде файлов, доступ к которым возможен в любое время. В большинстве случаев информационная емкость устройства составляет  $10^{11}$ — $10^{12}$  бит. По структуре и действию в настоящее время существует множество способов построения массовых ЗУ. На рис. 5.38 представлен один из примеров построения устройства данного типа. Конструктивно оно представляет собой каркас, в котором находится от нескольких сотен до нескольких тысяч кассет магнитных лент. Каждая кассета представляет собой цилиндр, на котором намотана магнитная лента шириной 70 мм. При чтении и записи информации выбор соответствующей кассеты осуществляется автоматически специальными средствами. Информационная емкость одной кассеты равна 50 Мбайт, а среднее время доступа к информации составляет приблизительно 10 с. При записи информации данные заносятся по дорожкам на всю ширину ленты. В данном устройстве применяется вращающаяся головка, подобная той, которая используется для записи данных в видеосистемах.



## 5.6. Оптические запоминающие устройства

Издавна человек использовал оптические методы записи информации путем ее графического представления в виде образов и символов. Дальнейшим развитием этих методов явилось изобретение фотографии и печати. С появлением вычислительной техники возникло множество проблем, которые касались разработки специальных технических средств, способных использовать накопленные источники информации, т. е. информации, представленной в печатном и фотографическом виде, в работе информационных систем вычислительных комплексов.

Такие исследования проводились еще до 50-х гг., когда началось ускоренное развитие вычислительных комплексов. Одной из первых попыток создания таких технических средств явилась разработка микрофотографий и микрофильмов, которые представляют собой материалы с нанесенным на их поверхности фотографическим слоем, при помощи которого возможна запись информации. Плотность записи информации на таких носителях достаточно большая. Однако, в виду того что перезапись информации здесь невозможна, широкого распространения такой способ хранения данных не получил. После этого начались поиски носителя, на котором бы стала возможна перезапись данных, и надо отметить, что определенные сдвиги в этом направлении уже существуют. Но тем не менее работы не вышли за рамки эксперимента, и в практическом отношении пока таких носителей нет. Проблема перезаписи данных является в настоящее время самым слабым местом в развитии средств и методов записи и хранения информации в оптических ЗУ.

Однако с появлением лазерной техники в развитии оптических ЗУ открылась новая эра. Известно, что луч лазера обладает не только высокой интенсивностью и фокусировкой светового потока, но также представляет собой поток когерентного излучения, т. е. излучения с одной и той же длиной волны и одинаковой фазой. Появление лазерной техники дало толчок к развитию голографии. В голограмме применяется способ записи и воспроизведения информации, основанный на записи интерференционной картины образа, полученной в результате комбинации опорного светового луча и луча, отраженного от объекта.

На рис. 5.39 изображен принцип записи информации при помощи средств голографии. Источником света служит лазер. Лазерный луч расщепляется на опорный и луч, который используется для освещения объекта. На голограмме получается сложная комбинация световых волн в результате интерференции световых потоков. Полученное изображение на голографи-

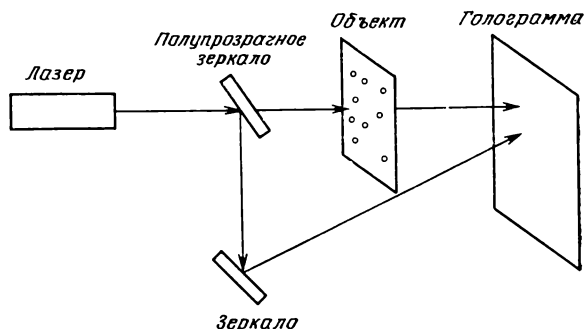


Рис. 5.39. Принцип голографической записи данных.

ческой пластинке внешне совершенно не похоже на объект записи. Для воспроизведения исходного объекта, или, как говорится, для регенерации основного объекта, пластинку с голограммой нужно осветить опорным лучом, полученным от лазерного источника.

Голография позволяет человеку видеть изображение объекта в объемном представлении, т. е. объект представляется в трех измерениях. Другими словами, в голографии теоретически возможно управление объемным изображением образа. Те или иные повреждения носителя или другие возможные дефекты, например неравномерность освещения, не приводят к потере данных, а лишь ухудшают отношение сигнал/помеха. Говоря иначе, основным достоинством голографии является независимость данного типа памяти от возможных дефектов. Однако при этом следует отметить, что для использования голографии необходимо иметь специальные средства, обеспечивающие работу и управление голографических ЗУ с высокой скоростью и разрешающей способностью. Это является в настоящее время тем условием, которое сдерживает использование голографических ЗУ в широких масштабах. Работы в данном направлении пока находятся в стадии эксперимента.

Другим направлением в развитии оптических ЗУ является возможность применения видеодисков, которые нашли широкое распространение в бытовой технике. Плотность записи на поверхности видеодиска существенно выше, чем у магнитных дисков. Это дает основание ожидать, что в дальнейшем видеодиски получат широкое распространение в вычислительной технике.

В настоящее время существует множество типов видеодисков. С точки зрения модификации информации их (включая сюда и экспериментальные) можно разделить на следующие три большие группы: 1) видеодиски только для считывания фиксированной информации; 2) видеодиски, на которых воз-

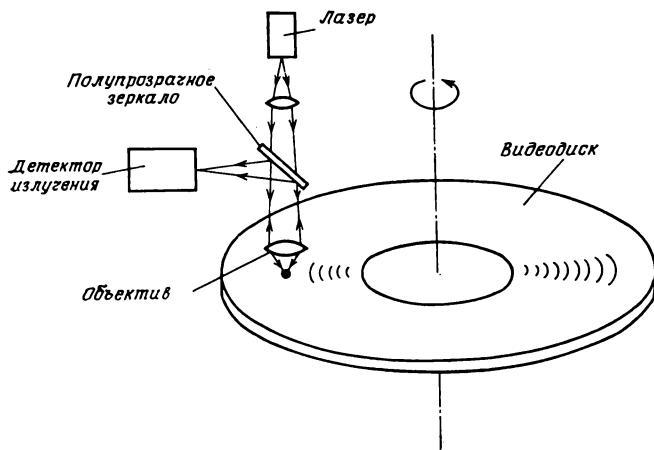


Рис. 5.40. Схема записи на видеодиск.

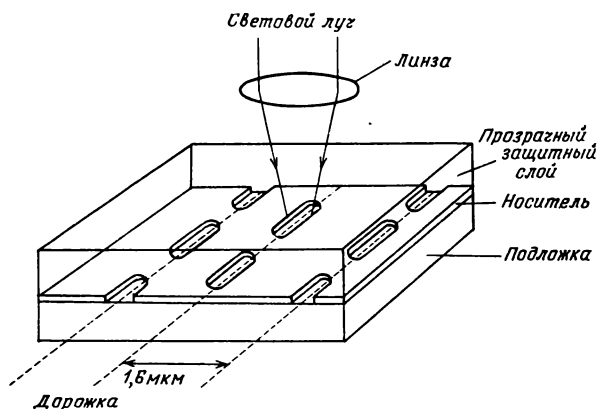


Рис. 5.41. Увеличенное изображение записывающей поверхности видеодиска.

можно запись информации; 3) видеодиски, на которых возможна перезапись информации.

Видеодиски, которые относятся к третьей группе, в настоящее время пока находятся на этапе разработки. Видеодиски первой группы с фиксированной информацией в настоящее время получили широкое распространение в бытовой технике и в цифровых аудиодисках для записи речевой и звуковой информации в цифровом виде. Видеодиски, принадлежащие ко второй группе, предполагается использовать в качестве массовых ЗУ для хранения файлов документации.

На рис. 5.40 представлен общий вид видеодиска, а на рис. 5.41 — структура и организация записывающей поверх-

ности. Размер видеодиска практически такой же, как у обыкновенной долгоиграющей пластинки. Однако расстояние между записывающими дорожками составляет всего 1,6 мкм. Дорожки на поверхности расположены по спирали. Запись информации осуществляется при помощи лазерного луча. Объектив позволяет еще больше сфокусировать луч лазера и повысить его интенсивность. После объектива луч направляют на записывающую поверхность видеодиска, в результате чего на поверхности образуются углубления размером около 1 мкм. Записывающая поверхность защищена прозрачной пленкой, которая исключает появление дефектов и загрязнение. Фокусировка луча осуществляется на записывающую пленку, причем, если даже на поверхности защитного слоя и находится пыль, то расфокусировка будет незначительна. Во время считывания информации поверхность видеодиска сканируется лазерным лучом. Специальные приемные датчики по наличию или отсутствию отраженного луча, определяют и расшифровывают информацию.

Информационные дорожки на поверхности видеодиска расположены не так, как на обыкновенной пластине диска, а идут от центра диска к его внешней стороне. Другими словами, дорожки выполнены в виде спирали, раскручивающейся изнутри наружу. Существует система с постоянной скоростью вращения диска *CAV* (постоянная угловая скорость) и система с постоянной скоростью дорожки *CLV* (постоянная линейная скорость). Единица изображения на видеодиске представляет собой кометообразное распыление светящегося пятна и называется оптической комой или простой комой. В системе *CAV* при скорости 1800 об/мин за 30 мин на одной поверхности можно записать 5400 ком изображений, причем информация может быть записана на обе стороны диска. В системе *CLV* запись может производиться в течение 1 ч при скорости дорожки 11 м/с. Существенным недостатком, который сдерживает широкое применение видеодисков в промышленности, является невозможность перезаписи информации.

Если сравнивать с магнитными дисками и лентами, видеодиски не дают пользователю возможности модифицировать информацию, что является их недостатком. Но зато они обладают высокой плотностью записи информации. Так, например, на одну пластину видеодиска можно занести до  $10^{11}$ — $10^{12}$  бит информации. Тиражирование информации, записанной на видеодиск, не представляет каких-либо трудностей. Следовательно, их можно использовать для ведения архивной документации. Думается, что со временем, когда будет получен высококачественный материал для носителя, который позволит модифицировать информацию, область применения видеодисков резко возрастет.

## Дисплей и индикаторы

### 6.1. Устройство отображения информации и микроэлектроника

Считается, что более 70% информации человек воспринимает с помощью зрения. Благодаря развитию электроники исключительно возросли возможности компьютеров и средств связи, а выведение обрабатываемой ими информации на дисплей дало возможность видеть ее. Микроэлектроника внесла также большой вклад в улучшение качества и в расширение функциональных возможностей дисплеев. Дисплеи являются весьма важным элементом диалога человека с машиной, и эта их роль постоянно возрастает.

А. Чандер в «Энциклопедическом словаре терминов по вычислительной технике» дает следующее определение: «Дисплей служит для вывода сообщений или необходимых данных для визуальной проверки оператором или пользователем, например для вывода печатного сообщения и показа в графической или буквенно-цифровой форме на экране дисплея на ЭЛТ». При выводе информации, хранящейся в памяти ЭВМ, информацию, записанную на бумагу, называют документальной копией, а информацию, выводимую на экран телевизионного дисплея (дисплея на ЭЛТ), называют недокументальной копией. Дисплеем обычно называют индикаторное устройство, которое в большинстве случаев используют для получения недокументальных копий. Слово «дисплей» мы будем использовать именно в этом смысле, включая сюда также случаи получения документальных копий посредством печатания и записи информации.

Существует много типов индикаторов различного назначения. Информация, являющаяся объектом индикации, многооб-

разна: помимо той, которая выдается компьютером, она может представлять собой подвижное изображение, как, например, на экране телевизора, сложное изображение типа трехмерного, предупредительные знаки, устанавливаемые на передней панели автомобиля и так далее. В данной главе рассматриваются устройства отображения, позволяющие осуществлять вывод двумерной информации произвольной формы.

### **6.1.1. Психофизиологические свойства зрения и дисплея**

Глазное яблоко человека, имеющее диаметр около 24 мм, с помощью хрусталика собирает видимое изображение на сетчатке глаза. Здесь расположены светочувствительные элементы, которые имеют различные свойства и способны воспринимать три основных цвета: красный, зеленый и синий посредством фотохимической реакции.

Под разрешающей способностью зрения понимается способность человека различать мелкие предметы. Она определяется на основании пространственно-частотной характеристики. Человеческому глазу трудно различать предметы с углом зрения менее одной минуты. Светочувствительные элементы сетчатки глаза имеют диаметр от 1,0 до 1,5 мкм. Линии объекта отображаются на сетчатке в виде линий толщиной от пяти до нескольких десятков микрометров. В силу этого две линии с интервалом менее 100 мкм, удаленные от глаза человека на расстояние 24 см, оказываются трудно различимыми. В факсимильных устройствах запись 16 точек на 1 мм считается достаточно высококачественной. Получаемая при этом плотность записи позволяет записывать мелкие буквы, цифры, а также теневые изображения (состоящие из света и тени). На практике в большинстве случаев плотность записи составляет восемь точек на 1 мм.

При проектировании ТВ-приемников за основу берется высота изображения на экране  $h$  и расстояние от зрителя до изображения, которое называется расстоянием прямого зрения  $d$ , причем рекомендуется, чтобы выполнялось соотношение  $d/h = 6$ . Если это условие выполняется, то линии развертки не заметны и телезритель в полной мере сможет наслаждаться просмотром действия, происходящего на экране. Однако при использовании телевизора для индикации информации с выхода персонального компьютера из-за уменьшения расстояния прямого зрения линии развертки становятся заметны.

Сигнал, воспринимаемый светочувствительными элементами сетчатки как сочетание трех цветов, можно представить

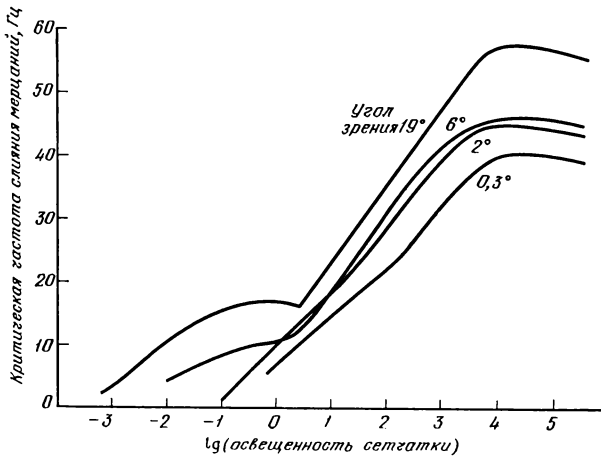


Рис. 6.1. Зависимость критической частоты мерцаний от условий зрения.

путем комбинации яркостной и цветовой информации. Причем известно, что цветовая пространственная разрешающая способность более чем в два раза хуже яркостной пространственной разрешающей способности.

Временной отклик (быстродействие) зрения не является высоким, поскольку реакция на свет светочувствительных элементов сетчатки и обработка сигнала нервной системой осуществляются на базе химической реакции. Если свет мигающий, то на нижних частотах чувствуется мерцание. На высоких частотах мерцание не заметно и свет воспринимается как непрерывный. Частота, на которой мерцание уже не чувствуется, называется критической частотой слияния мерцаний. Чувствительность к восприятию мерцаний зависит от размеров и яркости объекта. На рис. 6.1 приведены примеры измерений. На частоте 60 Гц даже при плохих условиях зрения изображение воспринимается без мерцаний, однако на частоте порядка 30 Гц возникают мерцания и смотреть становится тяжело.

### 6.1.2. Требования, предъявляемые к дисплеям

Для того чтобы дисплей был хорошим, необходимо, чтобы он удовлетворял вышеизложенным характеристикам зрения. Можно определить требования, предъявляемые к дисплею с точки зрения расширения его функциональных возможностей: 1) формата, 2) глубины, 3) быстродействия. Кроме того, желательно, чтобы он обладал небольшим весом, габаритами, по-

треблял малую мощность и тому подобное. В настоящее время выпускается много различных индикаторов, в которых учтены вышеперечисленные требования и которые находят соответствующее практическое применение.

Минимальная единица видимой информации, отображаемой на экране, называется элементом изображения. Изображение на экране индикатора обычно представляет собой прямоугольник или квадрат с расположенными по горизонтали и вертикали элементами изображения.

Требования к формату касаются размеров, разрешающей способности (или плотности) и точности. Размер изображения на индикаторе для недокументальных копий в большинстве случаев выражается через длину диагонали, измеренную в дюймах. Например, в телевизионном приемнике системы NTSC отношение размеров изображения по вертикали и по горизонтали составляет 3:4, и если задан размер по диагонали в 10 дюймов (254 мм), то это означает, что размер изображения по вертикали составляет шесть дюймов (152 мм), а по горизонтали — восемь дюймов (203 мм). Для документальных копий используются книжные форматы А4 (21,0×29,7 см) и В4 (25,7×36,4 см).

Разрешающая способность выражается через число элементов изображения по вертикали и горизонтали. Повышение точности связано с проблемами воспроизводимости положения элемента, геометрическими искажениями на экране дисплея, распылением цвета, нестабильностью цветовой фазы и так далее.

В отношении глубины предъявляются требования, связанные с градацией, цветовым тоном, яркостью, коэффициентом контрастности, отношением сигнал/шум и так далее. Для печатания книг, факсимильной записи и так далее применяется двухградационное изображение. В тех случаях, когда двухградационная индикация недостаточна, но возможна запись с высокой плотностью, путем изменения плотности записи можно искусственно осуществлять индикацию теневых изображений, т. е. изображений, содержащих светлые и темные места. При графической индикации, используемой в видеомультипликации, коммерческой деятельности и др., применяется многоградационное изображение, получаемое путем комбинации цветов из нескольких градаций. Для показа картин природы, например пейзажа, осуществляют градацию каждого из трех основных цветов: красного, синего и зеленого на 256 цветовых оттенков.



В случае черно-белого изображения вполне достаточна градация яркости на 256 уровней.

При создании цветного изображения большое значение имеет отсутствие хроматической аберрации, возможность регулировки яркости, а также повышение контрастности для снижения влияния внешнего освещения. Кроме того, для облегчения восприятия изображения важно отсутствие всяческих помех, утомляющих зрение.

Проблемы быстродействия связаны с темпом индикации и остаточным изображением. В кино для получения подвижного изображения используется скорость передачи, равная 48 кадр/с, причем каждый кадр передается дважды, т. е. на самом деле передается 24 различных кадра в секунду. В телевидении каждую секунду передается 30 кадров. Для этого необходима возможность регенерации всего изображения в течение 30 мс. При показе неподвижных изображений достаточно 1—2 с, поскольку показ неподвижных изображений дольше 10 с будет вызывать раздражение у зрителя. Таким образом, для каждого случая необходимо установить соответствующую скорость передачи изображения. При показе неподвижных изображений мерцания, связанные с регенерацией, малы, что является преимуществом неподвижных изображений; при показе подвижных изображений требуется, чтобы время регенерации изображения было коротким.

### **6.1.3. Конструкции телевизионных дисплеев**

В случае когда информация выводится из компьютера в буквенно-цифровой или графической форме, отображающий ее дисплей составляется из следующих блоков: блока визуального изображения информации, блока развертки, процессора ввода, процессора вывода, блока памяти, интерфейсного блока.

Блок визуального изображения при помощи оптических эффектов преобразует информацию, представленную в виде электрического сигнала, в буквенно-цифровую или графическую форму. В телевизионных дисплеях с помощью электронного луча вызывается свечение люминофора и осуществляется визуальная индикация.

Блок развертки служит для последовательного построения расположения на поверхности экрана элементов выводимой информации (растровая развертка). В телевизионных дисплеях растровая развертка электронного луча осуществляется с помощью электромагнитных катушек.

Обмен информацией с ЭВМ осуществляется посредством интерфейсного блока.

В блоке памяти хранится информация, получаемая из ЭВМ

и предназначенная для отображения. Дисплеи на ЭЛТ, применяемые в телевизорах, не могут накапливать и хранить информацию. Поэтому в случае применения в системах ЭВМ, их снабжают памятью, емкость которой соответствует кадру изображения (память на кадр). Хранимая в ней информация извлекается и выводится на дисплей.

В процессоре ввода информация, представленная в форме, удобной для ЭВМ, разбивается на отдельные элементы изображения и для удобства индикации записывается в памяти на кадр.

Процессор вывода обрабатывает информацию, записанную в памяти на кадр, что повышает эффективность работы дисплея. Например, при помощи процессора вывода можно с высокой скоростью увеличить сектор изображения и частично изменить цвет.

Рассмотрим теперь несколько специфических моментов, связанных с созданием дисплеев.

В фототелеграфии сигнал поступает на линию развертки, с помощью которой и осуществляется запись изображения. Основная развертка предназначена для записи информации, входящейся на одну строку, а вспомогательная — для непрерывной подачи бумаги. Таким образом происходит запись двумерного изображения. Так как основная развертка осуществляется электрически и на бумагу записывается информация каждой строки, нет необходимости в памяти на кадр. Однако декодирование переданных сигналов осуществляется построчно, для чего кодированные сигналы содержатся внутри памяти емкости, соответствующей нескольким строкам развертки.

В телевидении сигналы изображения передаются со скоростью 30 кадр/с, в приемнике сигналы изображения декодируются и с помощью развертки появляются на экране. Память на кадр здесь не требуется. В стандартной японской телевизионной системе NTSC вывод изображения осуществляется с помощью чересстрочной развертки. Полное телевизионное изображение получают путем наложения изображений, полученных четными и нечетными строками развертки, которые называются полями. Полное же изображение называется кадром (рис. 6.2). Кадр состоит из 525 строк развертки, однако практически на экране ЭЛТ изображение занимает лишь 480 строк развертки. Поскольку в одну секунду показывается 60 полей сигнала изображения, то мерцания не воспринимаются. Однако при показе неподвижных изображений по телевизору, когда выводится информация, сильно отличающаяся в соседних строках развертки, чувствуется сильное мерцание. Индикацию можно осуществить без мерцаний, если, используя память на кадр, индикацию изображения, записанного со скоростью 30 кадр/с,

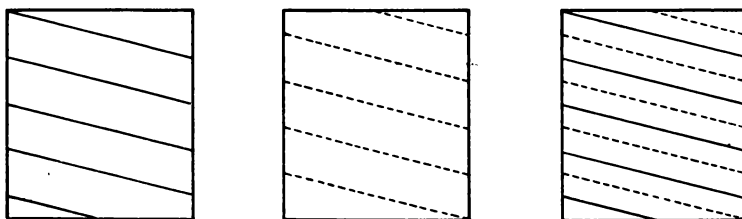


Рис. 6.2. Слева направо: картина нечетного поля (1/60 с), картина четного поля (1/60 с), картина кадра (1/30 с).

производить со скоростью 60 кадр/с. Запоминающая трубка представляет собой ЭЛТ, в которой сочетается запоминание и индикация изображения. Поскольку запоминающая трубка, применяемая в блоке визуального изображения информации, выполняет функцию памяти на кадр, то необходимость в последней отсутствует.

Развертка бывает растровая и произвольная (векторная). При растровой развертке в каждой строке производится последовательная запись изображения без чередования. Графопроектор может перемещать перо в любое место на листе бумаги и осуществлять запись с помощью произвольной развертки.

В телевизионном дисплее с произвольной разверткой вместо памяти на кадр используют сегментированную память. Кодированная информация, соответствующая прямой, дуге окружности или каким-то другим графическим элементам, а также буквам и цифрам, называется сегментированной, а устройство, служащее для запоминания сегментированной информации, называется сегментированной памятью. В процессоре вывода из сегментированной информации формируется сигнал развертки.

При использовании запоминающей трубки индикация информации осуществляется на основе содержания сегментированной памяти, и поскольку в запоминающей трубке возможна индикация без мерцаний, то ограничения на скорость индикации и число сегментов небольшие. В дисплеях на ЭЛТ без запоминания с произвольной разверткой увеличение числа сегментов сопровождается увеличением времени индикации всей информации, в результате чего появляются мерцания. В этом случае необходимо ограничение числа сегментов.

#### 6.1.4. Контроллер дисплея

Для индикации букв и цифр на экране ЭЛТ с растровой разверткой используется контроллер. Информация, посылаемая из ЭВМ в дисплей, содержит коды букв и чисел, а также инфор-

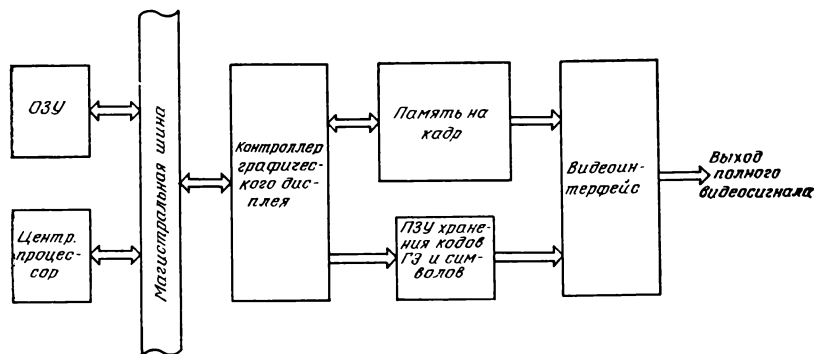


Рис. 6.3. Функциональная схема контроллера дисплея.

мацию о положении изображения. На основе этой информации контроллер дисплея путем считывания рисунка буквы или цифры осуществляет ее индикацию на экране ЭЛТ.

Таким образом, контроллером индикатора называется прибор, который с целью вывода необходимой информации осуществляет ее хранение и преобразование в форму, удобную для индикатора.

Контроллер дисплея графической информации в дополнение к функции графического управления обладает также способностью создавать контурные рисунки. Схема, составленная из отдельных элементов, может быть реализована на одном кристалле БИС. Функциональная схема такого контроллера приведена на рис. 6.3.

Графическое изображение информации формируется путем комбинации прямых, дуг окружности и других графических элементов (ГЭ). При такой индикации необходимо в память на кадр записывать все элементы изображения и вычислять их адреса. Контроллер графического дисплея осуществляет расчет адресов, по которым необходимо осуществлять выборку, и быстро воспроизводит контурный рисунок по ГЭ.

Помимо построения графических рисунков с помощью контроллера можно осуществлять управление панорамированием на экране дисплея. Оно включает в себя функции управления размерами графика и перемещения участка индикации вправо — влево и вверх — вниз.

Для управления двухградационным изображением применяется контроллер видеодисплея, который может поворачивать, уменьшать, увеличивать и перемещать двухградационное изображение.

### 6.1.5. Типы индикаторов и методы развертки

В табл. 6.1 показаны физико-химические явления, на основе которых осуществляется вывод информации в визуальной форме, типы индикаторов, а также методы развертки.

*Недокументальная копия и документальная копия.* Запись информации на листе бумаги, которую можно видеть глазами, хранить и переносить, называется документальной копией.

Недокументальной копией называют форму записи информации, которую можно видеть в течение короткого отрезка времени и которая не обладает свойством длительного хранения.

*Визуализация информации с помощью излучательных и безызлучательных приборов.* Элементы, из которых формируются дисплеи, можно разделить на излучательные и безызлучательные. К излучательным приборам относятся такие, которые используют:

- 1) электролюминесценцию:  
ударное возбуждение электронным пучком (ЭЛТ-дисплей),  
возбуждение электрическим полем в твердом теле (электролюминесцентный индикатор),  
инжекция электронов в твердом теле (светодиодный индикатор);
- 2) газовый разряд:  
плазменный разряд (газоразрядный индикатор),  
газовый лазер (лазерный индикатор).

Кроме того, существует также индикатор с плоской формой экрана в котором информация индицируется непосредственно путем проекции света на экран.

В дисплеях, построенных на безызлучательных элементах используется свойство веществ управлять внешним световым излучением. Оно проявляется в виде:

- 1) изменения коэффициента поглощения света:  
добавка красителя (запись методом пульверизации),  
дихроизм (дихроичная трубка),  
плеохроичный элемент (жидкий кристалл типа «гость — хозяин»);
- 2) поляризации света:  
ориентация молекул в жидком кристалле (жидкокристаллический индикатор),  
изменение диэлектрической проницаемости твердого тела (PLZT).

Таблица 6.1

## Типы устройств визуального отображения информации

	Физико-химические явления, используемые для индикации	Устройство отображения	Методы развертки
Возбуждение люминофора	Возбуждение электронным лучом (в вакууме)	Дисплей на ЭЛТ	Отклонение электронного луча (электростатическое или электромагнитное)
	Ионное возбуждение, возбуждение ультрафиолетовым излучением (газовый разряд)	Люминофорная индикаторная трубка Цветной газоразрядный индикатор	Электронная схема (с сеточным управлением)
	Возбуждение твердотельного прибора электрическим полем	Электролюминесцентная панель	Электронная схема, управляемая напряжением
	Возбуждение твердотельного прибора инжекцией электронов	Светодиодная панель, электролюминесцентная панель постоянного тока	Электронная схема, управляемая током
Газоразрядное свечение	Индикатор непосредственного отображения данных	Газоразрядный индикатор	Электронная схема, управляемая напряжением
	Увеличенная проекция изображения	Лазерный индикатор	Отклонение с помощью вращающегося зеркала
Обратимое изменение электрохимических и оптических свойств	Электрохромный индикатор	Электрохромный индикатор	Электронная схема
Обратимое изменение оптических свойств ЖК	ЖК-индикатор	ЖК-индикатор	Электронная схема
Увеличенная проекция оптического изображения	Светоклапанный индикатор	Светоклапанный индикатор	Возбуждение ЖК и PLZT
Нанесение слоя светополотителя	Электростатическое скрытое изображение на бумаге	Электростатическая запись	Приложение напряжения к игольчатому электроду (электронная схема)
	Ксерографирование (электростатическое скрытое изображение — электрографическое проявление — фиксация — копирование)	Электронное фотографирование	Вращение светочувствительного барабана Лазер (отклонение зеркала), светодиод (электронная схема)
	Управление электрическим полем потока заряженных частиц	Запись методом пульверизации	Вращение барабана, перемещение головки
	Плавление, сублимация	Термозапись и копирование	Термоголовка (электронная схема)

Продолжение

	Физико-химические явления, используемые для индикации	Устройство отображения	Методы развертки
	Изменение оптических свойств при пробое в результате газового разряда	Разрядная запись	Электронная схема, положение напряжения
Окрашивание	Химические изменения при повышении температуры	Термочувствительная запись	Электронная схема (тепловое излучение)
	Светочувствительный материал	Фотографии, полученные с применением солей серебра (моментальное фото)	Электронная развертка (ЭЛТ, анализатор изображения с разверткой бегущим лучом) для копирования оптического изображения
	Диазо, фотохромное, фотополимерное	Фотографии, полученные без применения солей серебра	Копирование оптического изображения

*Методы развертки* визуальной информации в двумерном пространстве делятся на:

непосредственную развертку с помощью электронной схемы, отклонение электронного луча (электрическим и магнитным полями), отклонение светового луча (механический поворот зеркала), механическая развертка (перемещение записывающей головки, перемещение объекта записи), проецирование (светоклапан).

## 6.2. Дисплеи на ЭЛТ

Электронно-лучевая трубка (ЭЛТ) была создана К. Ф. Брауном в 1897 г. и поэтому называется трубкой Брауна. ЭЛТ сначала использовалась для измерительных цепей, однако с появлением телевидения она нашла массовое применение в качестве кинескопа телевизионных приемников. С развитием телевизионных дисплеев ЭВМ область ее применения еще больше расширилась.

Достоинством ЭЛТ является многообразие выполняемых ею функций. Дисплеи на ЭЛТ в комбинации с периферийными устройствами, например памятью на кадр, обладают еще более широкими функциональными возможностями. Сюда можно отнести и возможность индикации естественных цветов, а также высокоскоростной индикации изображений.

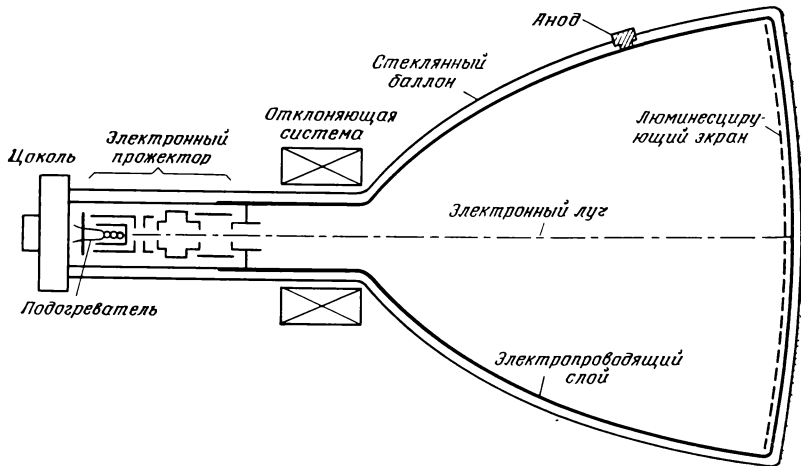


Рис. 6.4. Конструкция ЭЛТ.

Основными элементами ЭЛТ, показанной на рис. 6.4, являются стеклянная вакуумная колба, электронная пушка (прожектор), отклоняющая система и люминесцентный экран.

Электронный луч из электронного прожектора падает на люминесцирующий экран и вызывает его свечение. С помощью электронного прожектора можно управлять интенсивностью электронного луча и таким образом менять яркость свечения в соответствии с интенсивностью электронного луча. Отклоняющая система служит для изменения положения электронного луча, падающего на люминесцирующий экран.

### 6.2.1. Люминесцирующий экран

Лицевая панель стеклянного баллона называется экраном. На внутреннюю поверхность экрана наносится порошок люминофора в виде тонкой пленки с последующим напылением на нее алюминия, который образует металлическую подложку. Свечение, возникшее на люминесцирующем экране, и направленное внутрь трубки, будет отражаться от алюминиевой пленки. Тем самым благодаря металлической подложке свет будет направлен наружу и эффективная яркость увеличится. Подложка также отражает рассеянный свет, образующийся внутри трубки, препятствуя ухудшению контрастности. Помимо этого, подложка поддерживает потенциал люминесцирующего экрана на уровне потенциала анода, что также оказывается эффективным для повышения яркости. Отрицательные ионы, возникающие



Таблица 6.2

## Виды люминофоров

Люминофор	Цвет свечения	Длина волны	Время после свечения	Применение
P4 ZnS : Ag + (Zn, Cd)S : Ag	Белый	565 нм	60 мкс	Обычный черно-белый телевизор
P7 ZnS : Ag + (Zn, Cd)S : Cu	Сине-белый (Желто-зеленый)	430	40—60 мкс	Осциллограф с послесвечением
P22 Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : Eu	Красный	610—620	2,5 мс	Цветной телевизор
(Zn, Cd)S : Cu, Al	Зеленый	520—540	0,3—0,4 мс	
ZnS : Ag	Синий	450	0,3—0,4 мс	
P28 ZnS : Ag : Cu	Желто-зеленый	550	600 мс	

внутри трубки, ударяясь о люминесцирующий экран, становятся причиной его выгорания и ухудшают яркость. Наличие металлической подложки является эффективным средством против этого. Толщина алюминиевой пленки составляет около 50 мкм, и, для того чтобы электронный луч прошел сквозь эту пленку и возбудил люминофор, необходимо приложить ускоряющее напряжение 6 кВ и более.

В качестве люминофоров, как показано в табл. 6.2, применяются оксиды и сульфиды цинка, кадмия, иридия и др. в виде натуральных соединений, к которым добавляют активаторы из серебра, меди и т. д.

Меняя концентрации активатора в кристалле, можно изменять цвет свечения. Добавление активаторов из серебра и меди повышает энергетический выход от 20 до 25%. Люминофор обладает послесвечением, поэтому после выключения электронного луча свечение экрана некоторое время продолжается. В зависимости от добавки меди в люминофор характеристика послесвечения может меняться от нескольких десятков микросекунд до нескольких сотен миллисекунд.

### 6.2.2. Электронный прожектор

Электронный прожектор ЭЛТ состоит из катода, сетки и анода. Анод присоединяется к алюминиевой пленке, служащей металлической подложкой. Электронный луч, испускаемый катодом, на пути его движения к аноду модулируется и фокусируется с помощью сетки. Интенсивность электронного луча можно регулировать катодным и сеточным напряжением. Однако в теле-

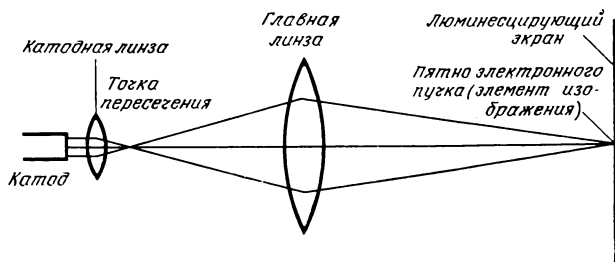


Рис. 6.5. Оптическая модель фокусировки электронного пучка.

визионных ЭЛТ сеточное напряжение, как правило, постоянно и управление осуществляется путем изменения потенциала катода.

Катод изготавливается из никеля, на который наносится оксид бария. Катод нагревается подогревателем до температуры 750—800 °С и излучает термоэлектроны.

В цветных телевизорах электронный пучок ускоряется анодным напряжением порядка 20—25 кВ.

Фокусировку электронного пучка с помощью сетки можно представить в виде оптической модели (рис. 6.5). Электронный пучок, вышедший из катода в направлении, перпендикулярном его поверхности, с помощью линз, имитирующих действие катода и сетки, собирается в одной точке на главной оси (эту точку называют точкой пересечения). Диаметр электронного пучка, включая также направления, отличные от перпендикулярного, будет наименьшим в точке пересечения. Если электронный пучок в точке пересечения рассматривать как исходный объект, то в геометрической модели ЭЛТ отображение этого объекта на флюоресцирующем экране можно рассматривать как образование изображения.

### 6.2.3. Отклоняющая система

Существуют электростатическая и электромагнитная отклоняющие системы.

При электростатическом отклонении электронный пучок проходит между двумя электродами, к которым приложено напряжение. Направление электронного пучка изменяется под действием электрического поля между электродами. Отклоняющие электроды размещаются внутри трубки. Частотная характеристика такой системы простирается до нескольких мегагерц, поэтому ее используют в основном для целей измерения. Мощность, необходимая для отклонения, небольшая, однако угол

отклонения также небольшой, а геометрические искажения изображения на экране и расфокусировка сравнительно большие.

Электромагнитное отклонение создается при помощи магнитного поля катушек, направленного перпендикулярно направлению электронного пучка. Поскольку в катушках трудно осуществить протекание высокочастотного тока, частотная характеристика ограничена несколькими сотнями килогерц. Мощность, необходимая для отклонения, большая. Но поскольку угол отклонения большой, а геометрические искажения изображения и расфокусировка небольшие, то эта система применяется для отображения информации с выхода ЭВМ и в телевидении. При растровой развертке в схеме запуска электромагнитного отклонения создается резонансный контур, согласованный с частотой развертки, и тем самым достигаются высокие значения КПД. Так как при векторной развертке невозможно осуществить запуск с помощью резонансного контура, то система запуска усложняется, а ее мощность возрастает, что является недостатком данной системы.

#### 6.2.4. Цветное воспроизведение

Для цветного изображения используются цветной кинескоп с теневой маской и кинескоп с регулировкой степени проникновения (пенетрон).

В пенетроне при изменении ускоряющего напряжения изменяется глубина проникновения электронного пучка в люминофор и тем самым изменяется цвет свечения. Два слоя люминофора равномерно наносятся на поверхность экрана, образуя структуру, показанную на рис. 6.6, а. При низком ускоряющем напряжении электронный пучок не может пройти через слой бария, поэтому возбуждается только красный люминофор и возникает красное свечение. При повышении ускоряющего напряжения электронный пучок достигает зеленого люминофора и степень зеленого свечения возрастает. На рис. 6.6, б показана зависимость между ускоряющим напряжением и яркостью. Так как в пенетроне цветное изображение осуществляется одним пикущим электронным пучком, то достигается воспроизведение с высокой разрешающей способностью. Так, при использовании пенетрона в графических дисплеях можно получать более 1500 прямых. Число воспроизводимых цветов четыре, и для их изменения необходима высоковольтная схема переключения.

В цветном кинескопе с теневой маской (рис. 6.7) три смежных электронных прожектора создают три электронных пучка,

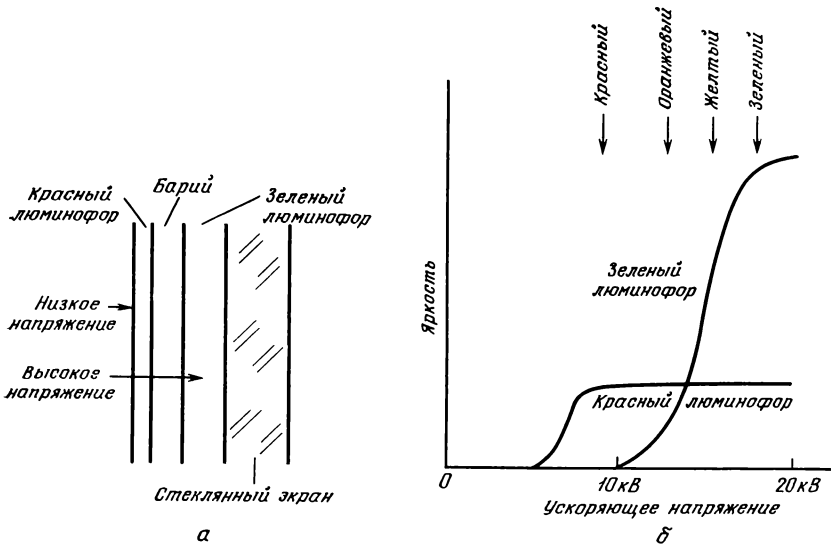


Рис. 6.6. Принцип действия пенетрона. *a* — двухслойный люминесцирующий экран; *б* — зависимость яркости от ускоряющего напряжения.

которые независимо возбуждают красный, зеленый и синий люминофоры с различными спектрами излучения. Различаются дельта-прожекторы и копланарные прожекторы. В конструкции, приведенной на рис. 6.7, три электронных пучка образуют треугольник и представляют таким образом первый тип прожектора. Во втором типе прожектора три пучка располагаются в один ряд по горизонтали или вертикали.

Для воспроизведения изображения без хроматической аберрации три электронных пучка должны пройти одновременно через отверстие в теневой маске. Эта операция называется сведением лучей. Статическое сведение пучков при отсутствии смещения осуществляется регулировкой магнитного поля постоянного магнита, расположенного вблизи электронного прожектора. Динамическое сведение пучков при наличии смещения осуществляется путем пропускания корректирующего тока синхронно с горизонтальной и вертикальной разверткой для регулирования распределения отклоняющего магнитного поля. В копланарных прожекторах до определенного значения разрешающей способности не требуется проведения динамического сведения, и поэтому число схемных элементов в нем меньше по сравнению с дельта-прожекторами, что является их несомненным преимуществом. Однако для воспроизведения изобра-

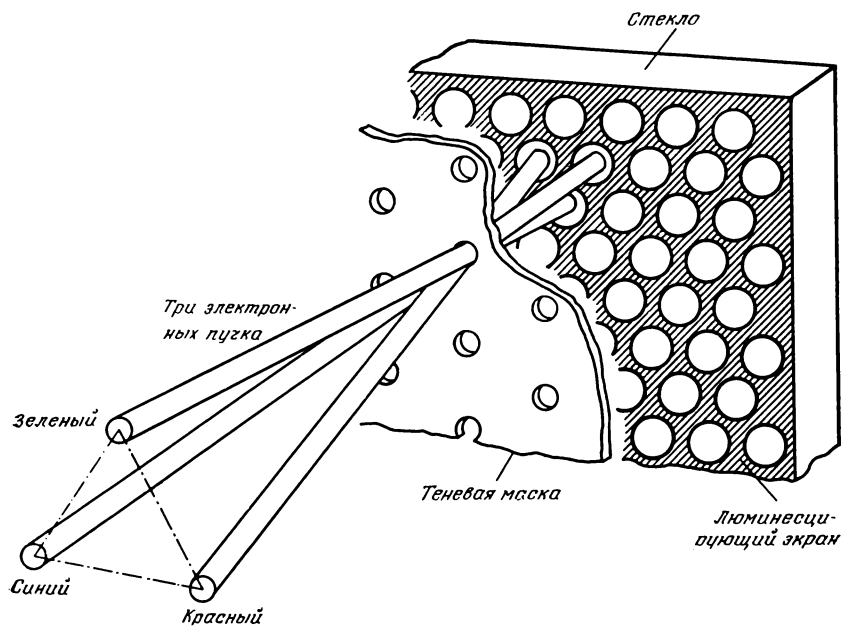


Рис. 6.7. Принцип действия цветного кинескопа с теневой маской.

жений с высокой разрешающей способностью применяются дельта-прожекторы.

Теневая маска располагается на расстоянии примерно 10 мм перед люминесцирующим экраном и определяет путь прохождения электронного пучка, причем коэффициент прохождения электронного пучка не превышает 30%. Из-за бомбардировки электронным пучком температура теневой маски повышается, и вследствие теплового расширения меняется ее положение относительно люминесцирующего экрана. Поэтому держатель теневой маски делают из биметалла. Принимаются и другие меры, обеспечивающие автоматическую коррекцию положения отверстий в теневой маске.

Промежутки между зернами люминофора, как показано на рис. 6.8, заполняются веществом черного цвета, что позволяет улучшить контрастность изображения при поглощении внешнего светового излучения. Контрастность такого экрана, называемого дымчатым, улучшается в два раза.

Для индикации без мерцаний информации, поступающей от ЭВМ, применяются люминофоры с большим временем послесвечения. Для красного цвета применяется P13 ( $\text{MgSiO}_3 : \text{Mn}$ ), для зеленого — P39 ( $\text{Zn}_2\text{SiO}_4 : \text{Mn, As}$ ).

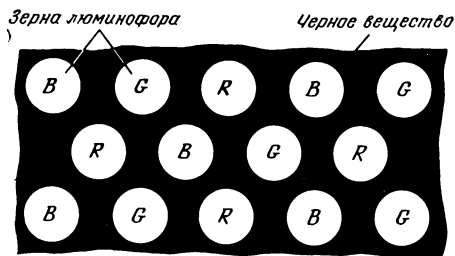


Рис. 6.8. Дымчатый экран.

### 6.2.5. Проекционная трубка

Для увеличения поверхности экрана ЭЛТ необходимо увеличить размеры стеклянного баллона, однако изготовление и обращение с такой трубкой усложняется. Поэтому для воспроизведения изображения размером более 50 дюйм (1270 мм) используется проекционная ЭЛТ. Оптическое изображение трубки увеличивается выпуклой линзой и проецируется на экран.

В проекционной трубке используют три одноцветные электронно-лучевые трубки: красную, зеленую и синюю размером порядка 7 дюйм (178 мм), соответствующие изображения синтезируются на экране, и таким образом получается цветное воспроизведение изображения размером более 50 дюйм. Для того чтобы изображение на экране могло быть воспроизведено с десятикратным увеличением, изображение, даваемое трубкой, должно быть четким и иметь высокую яркость. Поэтому применяется электромагнитная фокусировка, которая обеспечивает удовлетворительное сжатие электронного пучка в области с высокой плотностью тока. Использование направленного отражающего экрана позволяет повысить эффективную яркость изображения.

### 6.2.6. Запоминающая трубка

Запоминающей трубкой называется прибор, в котором при помощи электронного луча осуществляется накопление информации (заряда) на внутренней поверхности мишени ЭЛТ и воспроизведение ее. Запоминающие трубки подразделяются в зависимости от механизма записи (накопления), стирания и отображения информации.

Запоминающая трубка с бистабильной записью, как видно из рис. 6.9, состоит из стеклянного вакуумного баллона, внутри

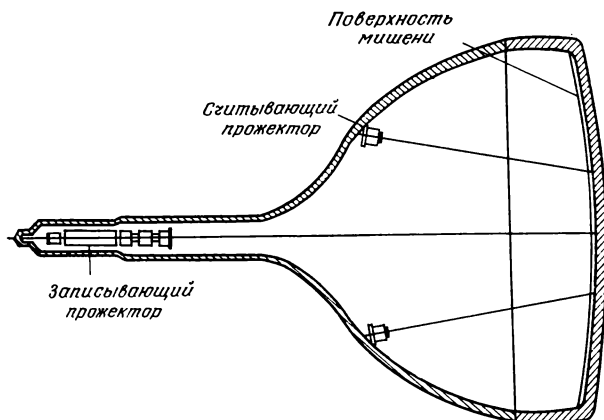


Рис. 6.9. Запоминающая трубка с бистабильной записью.

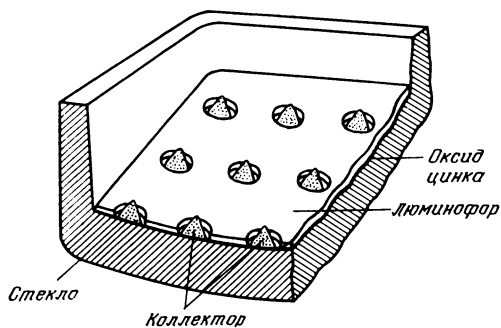


Рис. 6.10. Конструкция внутренней поверхности экрана.

которого находятся записывающий и считывающий прожекторы, а также мишень. Структура внутренней поверхности экрана (рис. 6.10) состоит из люминофора, являющегося мишенью для электронного луча, и электрода, называемого коллектором и служащего для управления электронным лучом. Потенциал мишени имеет две устойчивые точки, в соответствии с которыми и осуществляется воспроизведение информации.

Когда мишень находится в устойчивой точке с низким потенциалом, электронный луч, испускаемый считывающим прожектором, притягивается к коллектору и не возбуждает свечения люминофора. Если мишень находится в устойчивой точке с высоким потенциалом, электронный луч облучает люминофор и вызывает его свечение. Таким образом, электронный луч считывающего прожектора облучает всю поверхность экрана и

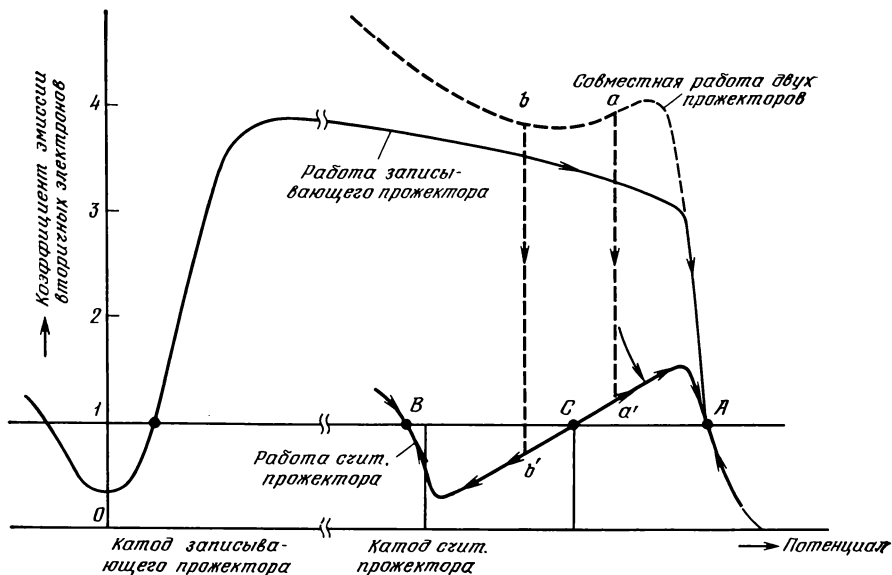


Рис. 6.11. Изменение потенциала мишени запоминающей трубки. А и В — устойчивые точки с высоким и с низким потенциалами соответственно; С — точка пересечения.

осуществляет воспроизведение (считывание) накопленной информации в соответствии с тем, в какой из устойчивых точек находится мишень.

При облучении электронным лучом доля вторичных электронов, как видно из рис. 6.11, будет меняться в зависимости от потенциала мишени. Потенциал мишени в свою очередь зависит от режима работы записывающего и считывающего прожекторов. В процессе записи потенциал изменяется согласно характеристике одновременной работы двух прожекторов. В результате работы записывающего прожектора потенциал мишени будет расти до точки *a* или *b*. По окончании записи рабочая точка при работе считывающего прожектора перейдет в точку *a'* или *b'*. Если при работе считывающего прожектора коэффициент эмиссии вторичных электронов больше единицы, потенциал мишени растет, если же он меньше единицы, потенциал мишени падает. Таким образом, под действием электронного луча и считывающего прожектора потенциал мишени переходит в одно из двух устойчивых состояний: А или В, разграниченных точкой пересечения С.

Накопление информации происходит в результате облучения электронным лучом записывающего электронного прожектора. В процессе записи, осуществляемой при совместном дей-



ствии электронных лучей записывающего и считывающего прожекторов, потенциал мишени изменяется. При малой интенсивности луча записывающего прожектора потенциал мишени по окончании записи не поднимается выше значения потенциала в точке пересечения и мишень возвращается в устойчивую точку с низким потенциалом. При достаточной интенсивности луча записывающего электронного прожектора потенциал мишени поднимается выше значения в точке пересечения и переходит в устойчивую точку с высоким потенциалом.

Стирание накопленной информации осуществляется путем снижения потенциала коллектора, поглощения зарядов мишени и принудительного возврата в устойчивую точку с низким потенциалом. Так как коллектор изготовлен с небольшим шагом порядка 20 мкм, то оказывается возможным осуществить воспроизведение информации с высокой разрешающей способностью.

### 6.3. Газоразрядный индикатор

Газоразрядный индикатор представляет собой прибор, в котором используется свечение в газовом разряде аналогично неоновой рекламе. Если на внутренние поверхности двух стеклянных пластин нанести плоские электроды, пространство между ними заполнить инертным газом, например неоном под давлением порядка 0,1—1 мм рт. ст., полученную таким образом конструкцию загерметизировать по периметру и приложить напряжение, то возникнет свечение. Области свечения, начиная от катода, носят названия: отрицательное свечение, положительный столб, катодное свечение. Положительный столб находится в состоянии плазмы, образуя ионизированный газ, в котором положительные и отрицательные ионы компенсируют друг друга, так что полное поле внутри плазмы равняется нулю. В ряде случаев с помощью положительного столба возбуждают люминофор, нанесенный на внутренние стороны стеклянных пластин для цветовой индикации. Однако в большинстве случаев источником света для индикации служит отрицательное свечение.

Как видно из рис. 6.12, вольт-амперная характеристика газового разряда нелинейна. Когда приложенное напряжение превышает напряжение возникновения разряда, образуется разряд и в окрестности катода появляется яркое отрицательное свечение. Если приложенное напряжение сделать ниже минимального напряжения поддержания разряда, то разряд прекращается.

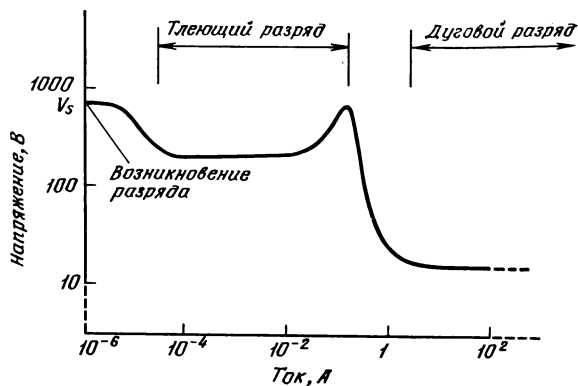


Рис. 6.12. Характеристика газового разряда.

Газоразрядное индикаторное устройство, выполненное в виде плоской конструкции, носит название индикаторной панели. Панель изготавливается в виде плоских стеклянных пластин, размер которых по диагонали может достигать 1 м. На практике используют индикаторные панели с 1212 ячейками по вертикали и 1596 ячейками по горизонтали при плотности 2 ячейки на 1 мм. Небольшая панель содержит 1024·512 ячеек плотностью 5 ячеек на 1 мм.

Время запаздывания возникновения газового разряда в газоразрядном индикаторе небольшое, однако прикладываемое напряжение лежит в пределах 100—200 В, и поэтому требуется высоковольтная управляющая схема. Газоразрядные индикаторы плоской формы уже давно находят широкое практическое применение.

### 6.3.1. Газоразрядный индикатор постоянного тока

На рис. 6.13 показана конструкция газоразрядной индикаторной панели постоянного тока. В этой конструкции в качестве анодов и катодов разрядных ячеек используются проволочные электроды в точках пересечения которых происходит индикация элементов изображения. В результате ионного распыления загрязняется катод, поэтому индикацию осуществляют со стороны анода. Для ограничения разрядного тока последовательно со схемой управления включают балластное сопротивление.

Одновременно с напряжением смещения  $V_B$  к горизонтальным и вертикальным проволочным электродам прикладывают соответственно импульсные напряжения  $+V_P$  и  $-V_P$ . Значение  $V_P$  выбирается в зависимости от соотношения между напряже-

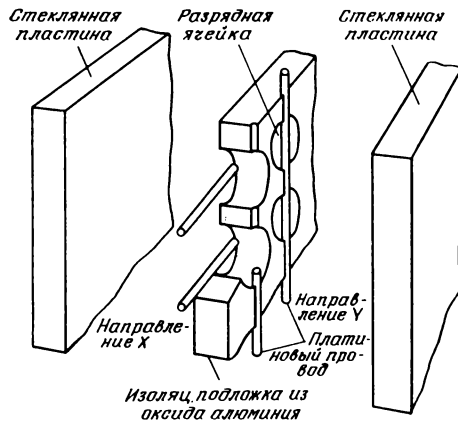


Рис. 6.13. Газоразрядная индикаторная панель постоянного тока.

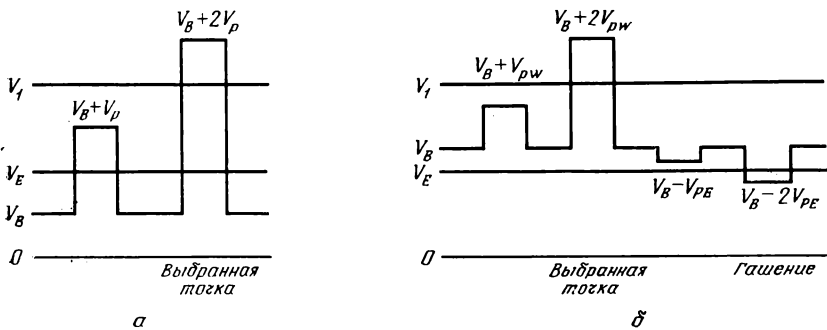


Рис. 6.14. Работа газоразрядного индикатора.

нием возникновения разряда  $V_I$  (напряжение зажигания) и минимальным напряжением поддержания разряда  $V_E$  таким образом, чтобы разряд в ячейке возникал только при подаче импульсного напряжения  $V_p$  одновременно на оба электрода, т. е. свечение будет иметь место только в той разрядной ячейке, которая находится в выбранной точке и нигде больше (рис. 6.14, а).

Время запаздывания возникновения разряда индикаторной панели постоянного тока составляет более 100 мкс. При наличии предионизации в окрестности катода возникает разряд и происходит диффузия заряженных частиц, время запаздывания возникновения разряда снижается до 5 мкс.

Яркость свечения почти пропорциональна разрядному току, поэтому, изменяя величину тока, можно регулировать яркость свечения.

На рис. 6.14, б показана работа газоразрядного индикатора постоянного тока с внутренней памятью. Если к выбранной точке пересечения горизонтальных и вертикальных электродов приложить напряжения записи  $V_{PW}$  и  $-V_{PW}$ , то полученное напряжение будет превышать напряжение возникновения разряда, что приведет к возникновению разряда (запись). Поскольку величина напряжения смещения устанавливается между значениями напряжения зажигания  $V_I$  и минимальным напряжением поддержания разряда  $V_E$ , то разряд будет поддерживаться (запоминание) только в выбранной точке и нигде больше. Для гашения разряда (стирание) прикладывают импульсные напряжения  $V_{PE}$  и  $-V_{PE}$  противоположной полярности, понижая приложенное напряжение до уровня ниже минимального напряжения поддержания разряда.

### 6.3.2. Газоразрядный индикатор переменного тока

На рис. 6.15 показана конструкция газоразрядного индикатора переменного тока, предложенная сотрудником Иллинойского университета Д. Л. Брицером в 1966 г. Его иногда называют иллинойским газоразрядным индикатором.

Две системы металлических электродов нанесены на внутреннюю поверхность стеклянных пластин перпендикулярно друг другу. Между электродами с помощью прокладок создается зазор, заполненный инертным газом или смесью инертных газов. Поверхность электродов покрыта тонким слоем диэлектрика, на который затем нанесено защитное покрытие из окиси магния, обладающее высоким значением коэффициента вторичной эмиссии при бомбардировке положительными ионами. Слоистое покрытие образует конденсаторную структуру, способную сохранять электрический заряд. Первоначально на электроды подается переменное напряжение  $\alpha V_A$ , амплитуда которого недостаточна для возникновения разряда, но обеспечивает поддержание существующего разряда. В определенные интервалы времени на выбранную пару вертикальных и горизонтальных электродов подаются импульсы записи, амплитуда которых достаточна для возникновения разряда в промежутке, образованном в перекрещивании данной пары электродов. Под действием ионной бомбардировки, вызванной протеканием разрядного тока, поверхность диэлектрического покрытия заряжается, причем разность потенциалов  $V_w$  имеет полярность, противоположную первоначальному напряжению возникновения разряда. При этом суммарное напряжение на разрядном промежутке падает и разряд прекращается. Напряжение  $V_w$  некоторое время сохраняется на конденсаторной структуре. В сле-

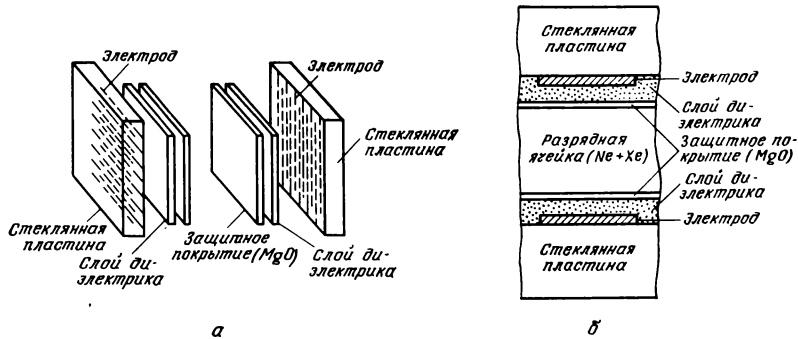


Рис. 6.15. а — конструкция газоразрядного индикатора переменного тока; б — поперечный разрез разрядной ячейки.

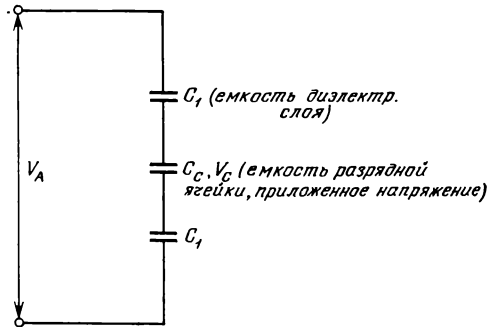


Рис. 6.16. Эквивалентная схема газоразрядной ячейки переменного тока.

дующий момент приходит очередной импульс  $\alpha V_A$  противоположного знака, теперь напряжения  $\alpha V_A$  и  $V_w$  складываются и превышают требуемое напряжение возникновения разряда  $V_I$  в данной ячейке. Вновь появляется импульсный ток разряда, происходит перезарядка конденсаторной структуры, процесс повторяется при иной полярности напряжений. Таким образом, однажды возникший разряд и его свечение сохраняются (запоминаются) элементарной ячейкой благодаря наличию заряда на диэлектрических слоях. Для прекращения разряда требуется подать на ячейку стирающий импульс, полярность которого противоположна  $V_w$  в определенный момент времени. Конденсаторная ячейка частично разряжается, напряжение уменьшается до такого уровня  $V_w$ , которого недостаточно для повторного возникновения разряда при приходе очередного импульса и разряд прекращается. Возможен и иной способ — отключения поддерживающего напряжения на такое время, пока стечет заряд, накопленный на диэлектрических слоях ячейки.

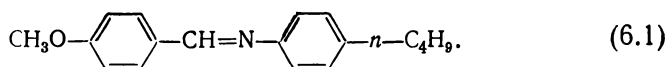
Электроды обычно изготавливаются из металлических проводников, причем предпринимаются различные способы, чтобы сделать их прозрачными для света с целью осуществления индикации с высокой яркостью свечения.

#### 6.4. Жидкокристаллический индикатор

Жидкие кристаллы (ЖК) были открыты в 1888 г. австрийским ученым-ботаником Ф. Рейницером, и после опубликования в 1968 г. исследований, проведенных Г. Х. Гейлмером, они получили широкое практическое применение в индикаторных устройствах. ЖК занимают промежуточное место между твердым и жидким телом. Молекулы жидкого кристалла движутся подобно молекулам в жидкости, однако при этом остается определенная упорядоченность в их расположении. Эти вещества представляют собой органические соединения, обладающие, подобно кристаллам, оптической анизотропией.

Жидкокристаллические молекулы имеют удлиненную палочкообразную или плоскую форму, которая геометрически способствует параллельности их взаимной укладки. ЖК, как видно из рис. 6.17, разделяются на 3 типа в зависимости от способа укладки молекул: нематические, смектические и холестерические. В индикаторах используются, в основном, нематические ЖК. Твердый кристалл в определенной области температур обладает свойствами ЖК. Сначала с повышением температуры происходит переход твердого кристалла в жидкий кристалл, а затем в обычную изотропную жидкость.

МВВА (*N*(*n*-метоксибензилиден)-*n*-(*n*-бутиланилин)) в интервале от +20° до 40°С превращается в нематический ЖК. Формула молекулы имеет вид



Сама молекула имеет удлиненную палочкообразную форму длиной несколько десятков ангстрем и шириной несколько ангстрем. На практике смешивают два различных ЖК, расширяя тем самым интервал рабочих температур.

Укладка и движение молекул ЖК под действием внешнего электрического поля, тепла и других слабых воздействий изменяется, что сопровождается также изменением его оптических свойств. ЖК-индикаторы не излучают свет. В них индикация информации осуществляется при помощи изменения оптических свойств жидкого кристалла, что приводит к модуляции падающего светового потока.

ЖК-индикаторы недостаточно эффективны с точки зрения контрастности изображения, но, с другой стороны, обладают

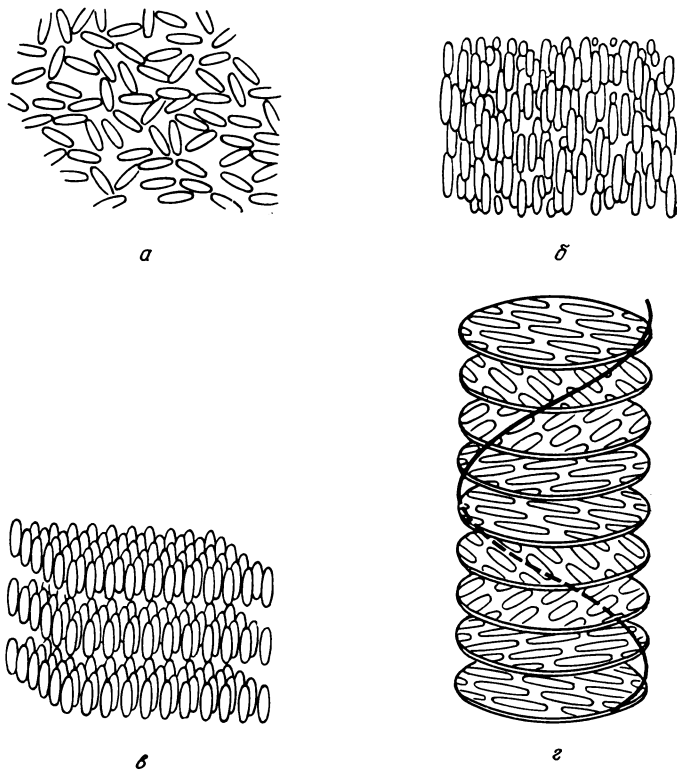


Рис. 6.17. Типы жидких кристаллов: а — жидкость; б — нематический; в — смектический; г — холестерический.

рядом достоинств: возможность исполнения в виде плоской конструкции, низкое управляющее напряжение, простота исполнения управляющей схемы в виде ИС, малая потребляемая мощность и т. д. ЖК-индикаторы применяются для буквенно-цифровой индикации в часах и настольных микрокалькуляторах. Расширяется область их применения в качестве плоских телевизионных экранов больших размеров. Получена возможность цветовой индикации.

#### 6.4.1. Оптические эффекты в жидких кристаллах

Электрооптические эффекты в ЖК подразделяются на токовые эффекты (динамическое рассеяние, эффект электрического управления двулучепреломлением, «твист-эффект») и полевые эффекты (фазовый переход, эффект «гость—хозяин»).

В большинстве ЖК-индикаторов используются электрооптические эффекты, однако имеются ЖК-индикаторы, работающие за счет изменений оптических свойств под действием температуры, как при термооптическом эффекте.

*Динамическое рассеяние света.* Если через слой нематического ЖК с отрицательной диэлектрической анизотропией пропустить постоянный или переменный ток низкой частоты, то прозрачный слой ЖК мутнеет: происходит рассеяние света. Поскольку ЖК-ячейка довольно толстая (больше 6 мкм), разрушение ранее упорядоченной структуры и перевод слоя жидкости в состояние турбулентности, в котором осуществляется рассеяние света, требует приложения сильного электрического поля. При подмешивании холестерического ЖК нематический ЖК будет испытывать влияние со стороны «закрученной» структуры его молекул. Возникает динамическое рассеяние света, которое сохраняется даже после снятия электрического поля. Это состояние устраняется приложением высокочастотного электрического поля, в котором исчезает динамическое рассеяние.

*Эффект электрического управления двулучепреломлением.* На ориентацию молекул ЖК оказывает влияние состояние поверхностей пластин ЖК-ячейки. Если пластины обработать поверхностно-активным веществом, то, как показано на рис. 6.18, можно получить гомеотропную упаковку молекул, перпендикулярную пластинам, и гомогенную упаковку молекул, параллельную пластинам. На основе молекул с отрицательной диэлектрической анизотропией создают ЖК с гомеотропной упаковкой. Вне ЖК-ячейки скрещенно размещают поляризатор и анализатор. Для индикации используется свойство двойного лучепреломления, которое возникает при приложении к электродам электрического поля, вызывающего ориентацию молекул ЖК в направлении, параллельном пластинам. Этот эффект называется также эффектом деформации вертикально ориентированной фазы. Свет, ставший линейно-поляризованным после прохождения поляризатора, становится эллиптически поляризованным после прохождения ЖК-ячейки, обладающей свойством двойного лучепреломления. Тем самым интенсивностью света, прошедшего через ЖК-ячейку, можно управлять с помощью приложенного электрического поля. Так как интенсивность проходящего света зависит от длины волны, то, изменяя напряжение, можно менять цветовой тон.

«Твист-эффект» реализуется при помощи однонаправленного натирания поверхностей пластин во взаимно перпендикулярных



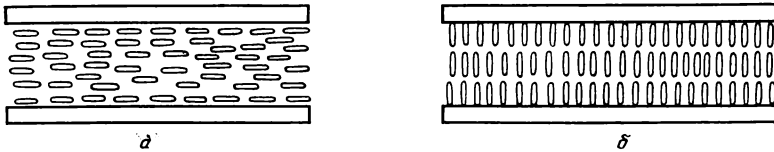


Рис. 6.18. Упаковка молекул в ЖК: а — гомогенная; б — гомеотропная.

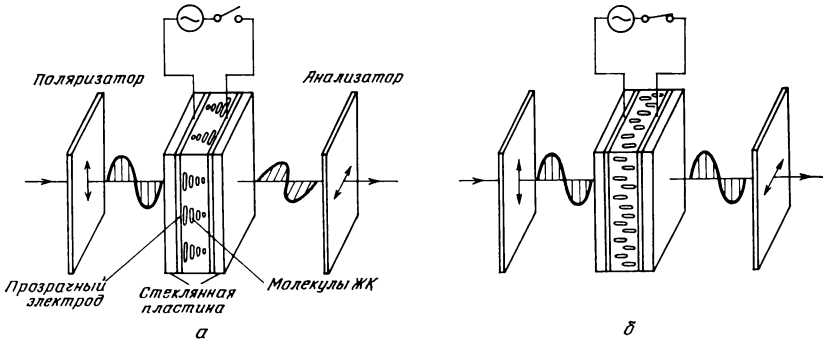


Рис. 6.19. «Твист-эффект»: а — выключенное состояние (просветленное состояние индикатора); б — включенное состояние (темное состояние индикатора).

направлениях и введения нематического жидкого кристалла с положительной диэлектрической анизотропией. Так как молекулы жидкого кристалла между двумя пластинами оказываются скрученными на  $90^\circ$ , то происходит поворот плоскости поляризации линейно-поляризованного света, прошедшего через ЖК-ячейку. Если к электродам приложить напряжение, то укладка молекул в ЖК станет гомеотропной и ориентированной перпендикулярно пластинам, и потому поляризация света, прошедшего через ЖК-ячейку, будет сохраняться. Когда плоскости поляризации поляризатора и анализатора, установленных по обеим сторонам ЖК-ячейки, параллельны (параллельный николь), приложение напряжения приводит к прохождению света, а при отсутствии напряжения свет отсекается. В случае перпендикулярного николя получается обратная характеристика (рис. 6.19). При этом получается довольно низкое рабочее напряжение (менее 1 В).

**Фазовый переход.** ЖК-ячейка с примесью холестерического ЖК с положительной диэлектрической анизотропией рассеивает свет, образуя жидкокристаллическую непрозрачную ячейку молочного цвета. При увеличении электрического поля, прикла-

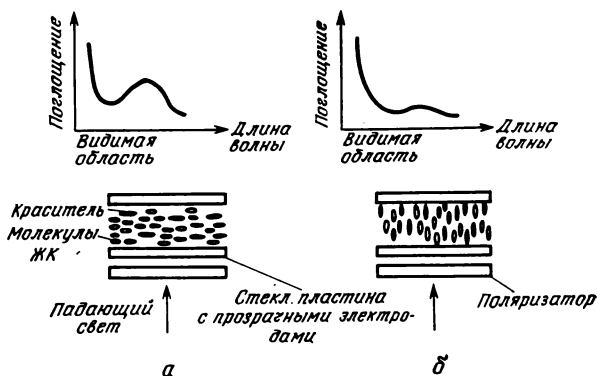


Рис. 6.20. Оптический эффект «гость — хозяин»: а — без электрического поля; б — в электрическом поле.

дываемого к электродам, все молекулы ЖК, за исключением близлежащих к пластинам, ориентируются в направлении электрического поля, образуя нематический жидкий кристалл с гомеотропной упаковкой молекул, и ЖК-ячейка становится прозрачной.

**Оптический эффект «гость — хозяин».** Краситель, обладающий свойством менять спектр проходящего света в зависимости от ориентации молекул, называется плеохроическим красителем. Если к жидкому кристаллу подмешать плеохроический краситель, тогда с помощью электрического поля оказывается возможным менять как ориентацию молекул ЖК, так и ориентацию молекул плеохроического красителя, т. е. можно изменять цвет ЖК-ячейки. В такой ЖК-ячейке ЖК называют «хозяином», а краситель — «гостем», а само явление называют оптическим эффектом «гость — хозяин». На рис. 6.20 показано превращение ЖК  $p$ -типа с гомогенной упаковкой молекул в кристалл с гомеотропной упаковкой под действием электрического поля. Аналогичная индикация осуществляется также в комбинированной системе, объединяющей в себе эффект фазового перехода и эффект «гость — хозяин».

**Термооптический эффект.** Если нагреть ЖК, то он превратится в обычную изотропную жидкость, однако если ее охладить до первоначальной температуры, то упаковка молекул в ЖК будет отличаться от первоначальной. Например, прозрачная смесь холестерического и нематического ЖК после однократного нагревания и последующего охлаждения до первоначальной

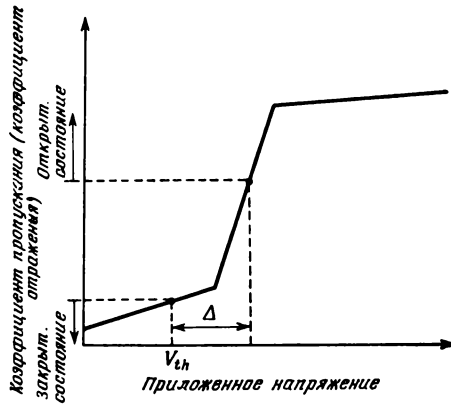


Рис. 6.21. Электрическая характеристика ЖК-ячейки.

температуры окажется непрозрачной. Если полученную непрозрачную смесь поместить в высокочастотное электрическое поле, она вернется в исходное прозрачное состояние.

#### 6.4.2. Способ возбуждения

Жидкокристаллическая индикаторная панель представляет собой двумерную матрицу ХУ управляющих электродов. Точки пересечения электродов образуют ЖК-ячейки, которые возбуждаются при приложении напряжения к соответствующей паре электродов, воспроизводя таким образом один элемент изображения. На рис. 6.21 приведена электрическая характеристика такой ЖК-ячейки. При приложении напряжения меньше порогового  $V_{th}$  ячейка находится в закрытом состоянии (не возбуждается). Если приложенное напряжение больше порогового  $V_{th} + \Delta$ , ячейка переходит в открытое состояние (возбуждается). Способы возбуждения жидкого кристалла подразделяются в зависимости от того, присоединен или не присоединен активный элемент к точке пересечения электродов. Ниже рассмотрим случай, когда такой активный элемент отсутствует.

ЖК-ячейка может быть представлена в виде эквивалентной параллельной CR-цепочки. Сопротивление составляет порядка  $10^{10} - 10^{11}$  Ом·см. При возбуждении  $i$ -го и  $j$ -го взаимно ортогональных электродов ХУ-матрицы точку пересечения ( $i, j$ ) называют выбранной точкой. При  $k \neq i, l \neq j$  точки ( $i, l$ ) ( $k, j$ ) называют полувыбранными точками, а точку ( $k, l$ ) называют невыбранной точкой. Если сопротивление в невыбранных точках матрицы возбуждения ХУ-электродов положить равным бесконечности, то эквивалентная схема со стороны ХУ-элект-

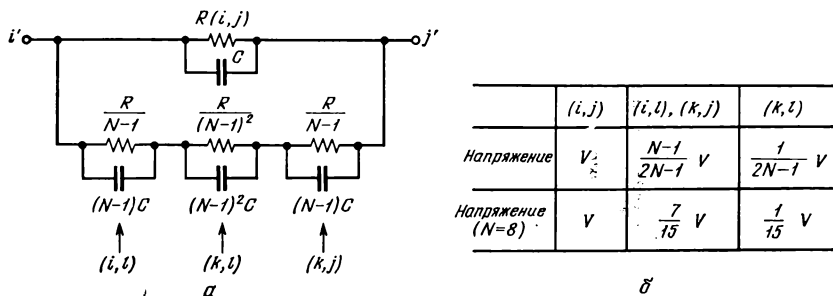


Рис. 6.22. Эквивалентная схема ЖК-ячейки (а) ( $k \neq i$ ;  $l \neq j$ ), и распределение напряжения (б).

родов будет иметь вид, показанный на рис. 6.22, а. На рис. 6.22, б приведены напряжения, соответствующие указанному состоянию ЖК-ячеек. При увеличении матрицы напряжения, приложенные к полувыбранным точкам, возрастают и становятся равными  $\frac{1}{2}V$ .

При поточечной последовательной развертке элементов изображения в выбранных точках потребуется значительное время для развертывания всего изображения. Во избежание этого применяется линейная последовательная развертка, в которой осуществляется одновременное воспроизведение всех элементов изображения на одном электроде. В случае когда половина ЖК-ячеек на одном электроде находится в открытом (возбужденном) состоянии под напряжением  $V$ , благодаря линейной последовательной развертке напряжение, приложенное к остальным ЖК-ячейкам, также будет равно  $V$ . Если используется схема возбуждения, в которой напряжение невыбранного электрода устанавливается равным нулю, а напряжения электродов в выбранной части XY-матрицы — равным  $+V$ ,  $+V$ , то напряжение, приложенное к ЖК-ячейкам в невыбранных точках будет равняться  $\frac{1}{2}V$ .

#### 6.4.3. Динамический способ возбуждения

Так как в ЖК-индикаторах используется переориентация молекул органического вещества, то их быстроедействие оказывается низким — порядка 10 мс. В индикаторах, построенных на эффекте динамического рассеяния света, зависимость между пороговым напряжением и частотой можно выразить следующим образом:

$$\overline{V_{th}^2} = r(f) V_H^2, \quad (6.2)$$

$$r(f) = 1 + \frac{(\rho - 1)(f/f_c)}{1 - (f/f_c)^2}, \quad (6.3)$$

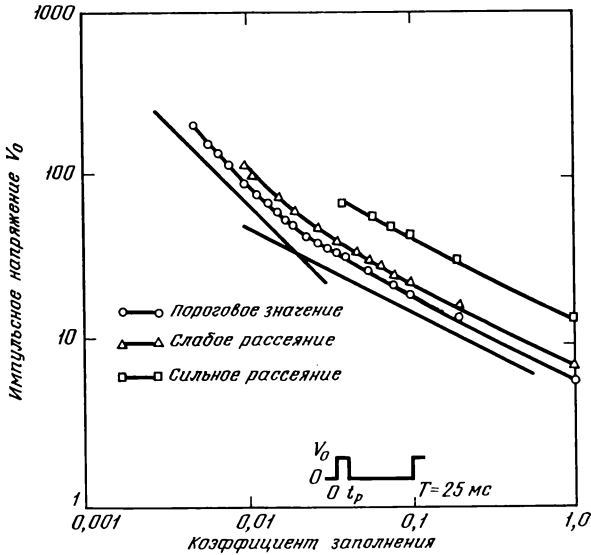


Рис. 6.23. Характеристика динамического рассеяния: коэффициент заполнения равен  $t_p/T$ .

где  $V_H$  — пороговое напряжение на низкой частоте;  $\rho$  — параметр вещества, принимающий значения от двух до пяти,  $f_c$  — граничная частота.

При импульсном возбуждении ЖК экспериментально получены результаты, показанные на рис. 6.23, причем коэффициент заполнения для последовательности импульсов равен  $1/N$ .

Для осуществления линейного последовательного возбуждения к столбцу электродов прикладывают стробированное напряжение  $V_s$ , а к каждой строке электродов в зависимости от 0 или 1 информации прикладывают импульсное напряжение  $+V_D$  или  $-V_D$ . Значок  $\wedge$  означает эффективное напряжение. Напряжения включения и выключения ЖК-индикатора определяются формулами

$$\hat{V}_{\text{off}}^2 = (V_s - V_D)^2/N + V_D^2 - V_D^2/N; \tag{6.4}$$

$$\hat{V}_{\text{on}}^2 = (V_s + V_D)^2/N + V_D^2 - V_D^2/N. \tag{6.5}$$

Рассматривая  $V_D$  в качестве параметра, получаем следующее выражение для максимального значения  $N$ :

$$N_{\text{MAX}} = \left( \frac{V_{\text{on}}^2 + V_{\text{off}}^2}{V_{\text{on}}^2 - V_{\text{off}}^2} \right)^2. \tag{6.6}$$

Так как  $V_{off}$  и  $V_{on}$  удовлетворяют условиям

$$\begin{aligned}\hat{V}_{off} &\leq \hat{V}_{th}; \\ \hat{V}_{on} &\geq \hat{V}_{th} + \hat{\Delta},\end{aligned}\quad (6.7)$$

то  $N_{MAX}$ , выраженное через параметр  $\rho = \hat{\Delta}/\hat{V}_{th}$  (характеризует повышение качества ЖК), имеет вид

$$N_{MAX} = \left( \frac{(1+\rho)^2 + 1}{(1+\rho)^2 - 1} \right)^2. \quad (6.8)$$

При условии, что  $V_D = \hat{V}_{th}$ ,  $V_S = 2\hat{V}_{th}$ , получаем следующее выражение:

$$N_{z1} = 8/(\rho^2 + 2\rho). \quad (6.9)$$

На рис. 6.24 проведены графики числа строк разложения  $N$  в зависимости от параметра  $\rho$ . При  $V_{th} = 6$  В,  $\Delta = 1$  В получаем  $N_{MAX} = 43$ ,  $N_{z1} = 22$ . С уменьшением  $\rho$  происходит резкое изменение оптических свойств жидкого кристалла и оказывается возможным увеличить число электродов матрицы.

#### 6.4.4. Возбуждение активного матричного индикатора на ЖК

Активным матричным индикатором называется прибор, в котором каждая индикаторная ячейка возбуждается независимо от других ячеек через активный элемент в точке пересечения XY-матрицы адресации, т. е. в нем нет тех ограничений, которые были ранее изложены в пунктах 6.4.2 и 6.4.3, что дает возможность улучшить характеристики индикатора. Для практической реализации активного матричного индикатора с большим экраном применяется интеграция ЖК-ячейки со схемой управления. В таком индикаторе используется матрица транзисторов, стоки которых соединены с электродами ЖК-ячейки, представляющей собой элемент отображения (рис. 6.25). Напряжение на электродах ячейки задается с помощью МОП-транзисторов, размещенных в виде матрицы на кремниевой подложке. Затворы и стоки МОП-транзисторов, как видно из рис. 6.26, присоединяются соответственно к XY-шинам возбуждения матрицы адресации. При возбуждении какой-то затворной шины отпираются МОП-транзисторы этого столбца и через шины, к которым присоединены стоки транзисторов осуществляется инжекция заряда в накопительную емкость от источника постоянного напряжения. Оптические свойства жидкокристаллической ячейки соответствуют напряжению, поддерживаемому на накопительной емкости. Так как интенсивность

отраженного света можно линейно изменять в зависимости от потенциала шин, к которым присоединены стоки транзисторов, то оказывается возможной индикация тоновых изображений.

На рис. 6.27 приведен пример активного матричного ЖК-индикатора на аморфных кремниевых тонкопленочных транзисторах. Индикаторная панель представляет собой конструкцию, в которой тонкопленочные транзисторы образуют на стеклянной подложке коммутационную матрицу адресации. ЖК-ячейка построена на эффекте «гость — хозяин». Так как при использовании кремниевой пластины имеет место ограничение на диаметр пластины, то максимальный размер изображения может составлять примерно 4 дюйма (10,0 см). При использовании аморфного кремния таких ограничений не существует и можно изготовить индикаторную панель с площадью изображения более  $130 \times 130 \text{ см}^2$ .

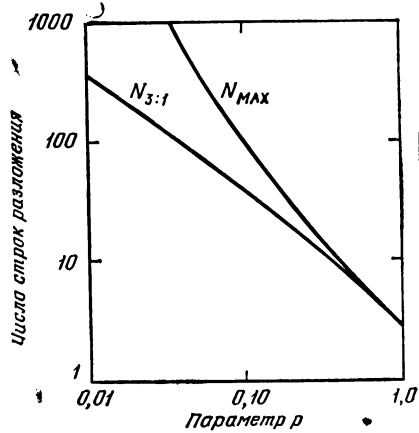


Рис. 6.24. Зависимость между параметром  $p$  и числом строк разложения.

### 6.4.5. Цветное воспроизведение

В результате действия эффекта двойного лучепреломления, управляемого электрическим полем, интенсивность света, прошедшего через анализатор будет представляться следующим выражением:

$$I = I_p \sin^2 2\theta \sin^2 \pi d \delta n / \lambda,$$

где  $\theta$  — угол между направлением поляризации падающего света и направлением проекции оси ориентации молекул ЖК на поверхность стекла. При  $\theta = \pi/4$  интенсивность света, прошедшего через анализатор, будет максимальной. Поскольку угол поворота направления поляризации зависит от длины волны  $\lambda$ , максимальное пропускание будет соответствовать определенной длине волны светового излучения, для которой этот угол составит  $90^\circ$ , что может быть использовано для цветного воспроизведения.

В ЖК-индикаторе, использующем эффект «гость — хозяин», цветное воспроизведение можно осуществлять, используя ди-

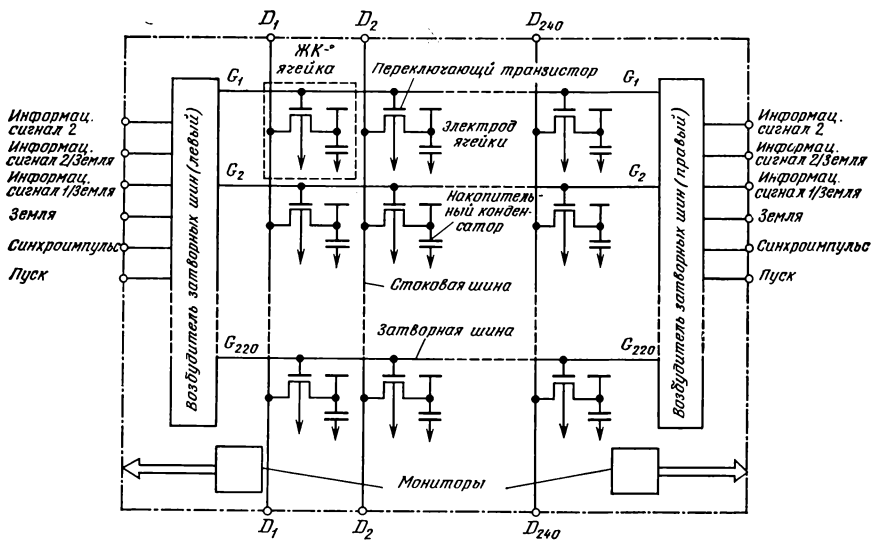


Рис. 6.25. Схема управления активного матричного ЖК-индикатора (G и D — затвор и сток тонкопленочного транзистора).

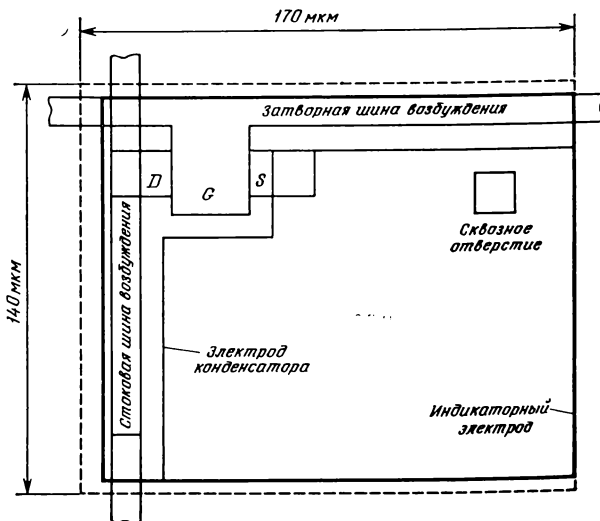


Рис. 6.26. Конструкция элемента МОП-матрицы.



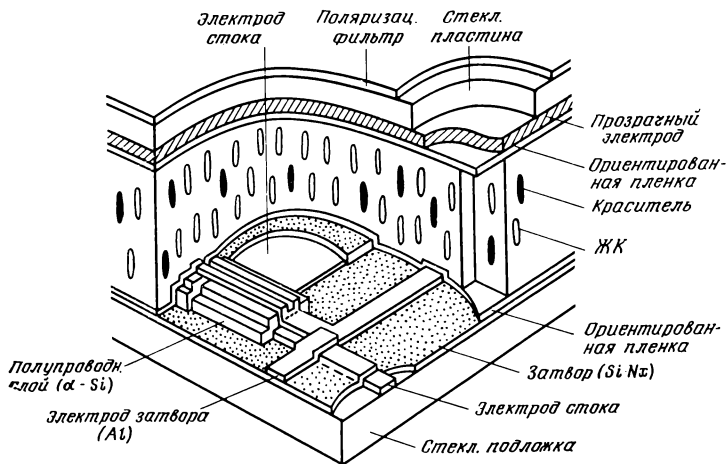


Рис. 6.27. Жидкокристаллическая индикаторная панель с матрицей тонкопленочных транзисторов.

хроизм красителя, являющегося «гостем». Краситель в этом случае определяет только цвет воспроизведения.

Цветное воспроизведение произвольного изображения любого цвета можно получить на основе комбинации трех основных цветов, управляя цветом в каждой ЖК-ячейке. Для этой цели применяются цветные светофильтры. В этой системе ЖК используется только для управления проходящим через него светом, а цвет светового излучения определяется цветными фильтрами. На рис. 6.28 показана возможность воспроизведения на индикаторе цветного телевизионного изображения на основе «твист-эффекта» в нематическом ЖК.

## 6.5. Электролюминесцентный индикатор

Электролюминесценция — это явление светового излучения, возникающее при приложении электрического поля к полупроводнику, в частности к люминофору. В 1936 г. француз Дестрио открыл явление внутренней или собственной электролюминесценции. Это явление, например, возникает в порошкообразном люминофоре типа ZnS, диспергированном в диэлектрике между обкладками конденсатора, на который подается переменное напряжение. Инжекция носителей из электродов в люминофор при этом отсутствует. Такой тип люминесценции называют дисперсной или предпробойной.

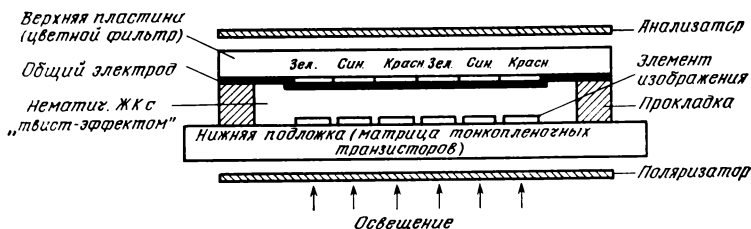


Рис. 6.28. Цветное воспроизведение изображения в индикаторе на ЖК.

В отличие от этого электролюминесценция, возникающая при напылении слоя изоляции электронным пучком или высокочастотным распылением, называется тонкопленочной электролюминесценцией.

Электролюминесценция, возникающая при рекомбинации электронов и дырок в *pn*-переходе в некоторых полупроводниках, называется инжекционной электролюминесценцией. Этот тип электролюминесценции имеет место, в частности, в световых диодах и полупроводниковых лазерах. Возникновение дисперсной и тонкопленочной электролюминесценции может быть вызвано также действием постоянного тока. Возникновение этих типов электролюминесценции объясняется тем, что часть элемента (конструкции), соприкасающаяся с люминофором, имеет диодную характеристику и благодаря инжекции носителей возникает свечение. Так как тонкопленочная электролюминесценция возникает при приложении постоянного напряжения порядка 10 В, то пусковая схема может быть простой, что является ее несомненным достоинством.

Достоинством дисперсной электролюминесценции является простота изготовления индикаторной панели, однако длительность этой электролюминесценции мала, а надежность невысокая, что является ее недостатком.

Тонкопленочная электролюминесценция переменного тока возникает при высоком пусковом напряжении порядка 100—200 В, поэтому пусковая схема оказывается сложной, что является недостатком. Однако длительность этой электролюминесценции велика, а надежность высокая, поэтому она находит практическое применение в индикаторных панелях.

### 6.5.1. Тонкопленочная электролюминесценция переменного тока

На рис. 6.29 показано поперечное сечение тонкопленочного электролюминесцентного прибора с двухслойной изоляцией, возбуждаемого переменным током. Он представляет собой кон-

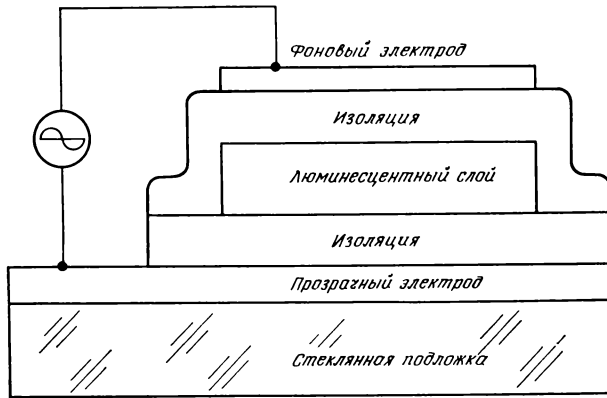


Рис. 6.29. Тонкопленочная электролюминесцентная ячейка переменного тока.

струкцию, в которой слой сульфида цинка ( $ZnS$ ) с добавкой марганца ( $Mn$ ) заключен между двумя слоями изоляции. Эта конструкция, за исключением того, что толщина излучающего слоя составляет  $0,5\text{--}1$  мкм, полностью аналогична конструкции прибора с дисперсной электролюминесценцией переменного тока. Если к электродам приложить напряжение переменного тока и создать в излучающем слое напряженность электрического поля порядка  $10^6$  В/см, то в приборе возникает свечение (электролюминесценция). Цвет свечения желтый с шириной спектра порядка  $50$  нм. Поскольку ширина спектра здесь больше, чем ширина спектра газоразрядного индикатора, то индикация оказывается более ясной.

Электролюминесцентный слой подвержен влиянию сырости, что является его недостатком. Для исключения проникновения сырости люминесцентный слой с обеих сторон покрывают слоем изоляции. Благодаря предупреждению деградации электролюминесцентного слоя после непрерывной работы прибора в течение  $15000$  ч с яркостью более  $5000$  кд/м<sup>2</sup> наблюдается лишь незначительное снижение яркости. Пусковое напряжение составляет  $200$  В, т. е. как и для газоразрядного индикатора, требуется высоковольтное возбуждение.

Используются различные приемы для снижения пускового напряжения и упрощения пусковой схемы. Так как при использовании слоя изоляции с большой диэлектрической проницаемостью реальная напряженность электрического поля в электролюминесцентном слое увеличивается, то оказывается возможным снизить пусковое напряжение.

Можно снизить пусковое напряжение, применяя однослойную изоляцию и увеличивая напряженность электрического по-

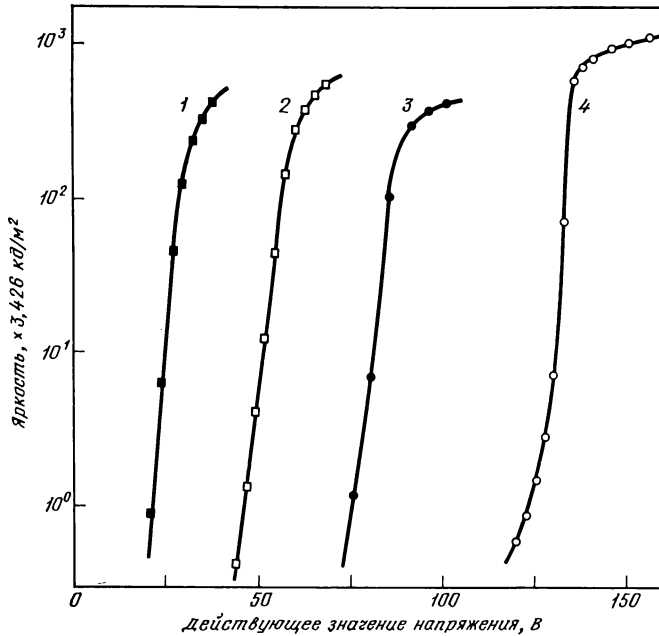


Рис. 6.30. Характеристики тонкопленочной электролюминесцентной ячейки со структурой электрод — диэлектрик — электролюминофор при различной толщине слоев структуры. Для сравнения приведена характеристика ячейки с двухслойным диэлектриком (кривая 4). 1 — ZnS: Mn — 0,25 мкм;  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  — 0,1 мкм; 2 — ZnS: Mn — 0,5 мкм,  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  — 0,2 мкм; 3 — ZnS: Mn — 0,6 мкм,  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  — 0,4 мкм; 4 —  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  — 0,4 мкм, ZnS: Mn — 0,6 мкм,  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  — 0,4 мкм.

ля в электролюминесцентном слое. Обычно при однослойной изоляции за один период возбуждающего переменного тока электролюминесценция возникает один раз. Уменьшение толщины слоя изоляции и электролюминесцентного слоя приводит к возникновению двукратного свечения в течение одного периода. Таким образом, уменьшение толщины слоев приводит к повышению напряженности электрического поля и появлению двукратного свечения за один период, т. е. к повышению яркости свечения. На рис. 6.30 приведены характеристики прибора с тонкопленочной электролюминесценцией со структурой электрод — слой изоляции — электролюминесцентный слой.

Введение в центры электролюминесценции редкоземельных фтористых соединений приводит к различным цветам свечения. Используя этот метод, можно осуществить цветное воспроизведение, однако яркость свечения цветов, за исключением желтого, пока еще низкая.

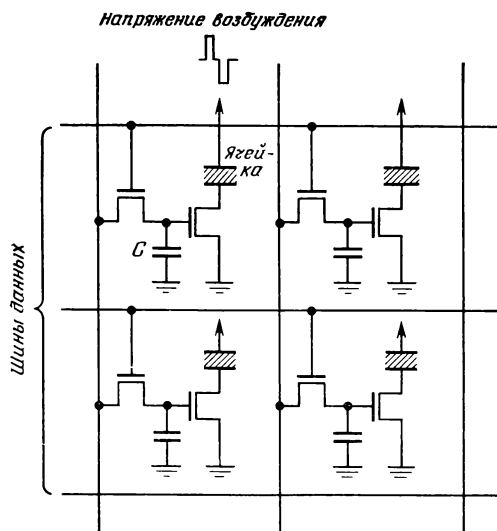


Рис. 6.31. Схема возбуждения электролюминесцентной активной матрицы.

Двухслойная структура изоляции препятствует ухудшению параметров прибора, связанных с отслаиванием пленок, смещением зависимостей между яркостью и напряжением и т. д. Поэтому индикаторная панель с такой структурой имеет высокую надежность. Тонкопленочный электролюминесцентный слой, представляющий собой люминофор из  $ZnS$  с 5%-й добавкой  $Mn$ , помещается между слоями изоляции из  $Si_3N_4$  в виде «сэндвич»-структуры. На стеклянную подложку методом электронно-лучевого напыления наносится слой  $Ip_2O_3$ , из которого фототравлением изготавливается электрод шины данных. Поверх слоя  $Ip_2O_3$  напыляется двойной слой изоляции и электролюминесцентный слой. Далее напыляется слой  $Al$ , из которого фототравлением получается электрод развертки. Над ним сверху устанавливается герметизирующее стекло. Для защиты от сырости заливается кремнийорганическое масло.

### 6.5.2. Возбуждение активного матричного индикатора

На рис. 6.31 показана схема возбуждения переменным током тонкопленочного электролюминесцентного активного матричного индикатора. Один электрод электролюминесцентной ячейки присоединяется к источнику питания для возбуждения переменным током, другой — к переключающему транзистору. Прикладывая к ячейке напряжение от источника питания, осуще-

ствляют индикацию информации в соответствии с открытым или закрытым положением переключающего транзистора. Частоту возбуждения электролюминесценции можно установить независимо от того, находится ли переключающий транзистор в открытом или закрытом состоянии. Поэтому даже при увеличении числа индицируемых элементов изображения яркость изображения не падает и возможна индикация без мерцаний. Управление транзисторами осуществляется по активной цепи возбуждения матрицы, а с помощью накопительного конденсатора, реализуется фиксация переключения.

После того как транзистор перешел из открытого состояния в закрытое, к стоку переключающего транзистора будет прикладываться максимальное напряжение в виде суммы напряжения возбуждения источника питания и межэлектродного напряжения, возникшего под действием зарядов, накопленных между электродами ячейки. Устанавливая между стоком и заземленной подложкой диод Зенера, ограничивают повышение напряжения стока и тем самым предотвращают пробой прибора.

## **6.6. Термическая запись**

Термическая запись была открыта Миллером в 1940 г. и после 1960 г. нашла практическое применение в печатающих устройствах последовательного действия. Начиная с 1976 г. в связи с быстрым распространением факсимильных копий, начались широкие исследования этого типа записи. В последнее время большая часть факсимильных копий создается на основе термозаписи.

Достоинствами термозаписи являются: простота обслуживания устройства для термозаписи, высокая надежность, отсутствие в процессе записи неприятных запахов и вибрации, первичное проявление красителя (непосредственная запись), сравнительно низкая стоимость термографической бумаги, небольшие габариты устройства и т. д. К недостаткам можно отнести необходимость в специальной бумаге, обращение с которой требует внимательности, затруднительность изготовления, ограниченная скорость записи и др. Технической особенностью термозаписи является наличие термоголовки и специальной термографической бумаги.

### **6.6.1. Термографическая бумага**

При термозаписи используются как физические методы (плавление, копирование, сублимация, испарение), так и химические (проявление красителя). Для записи изображений, как, напри-

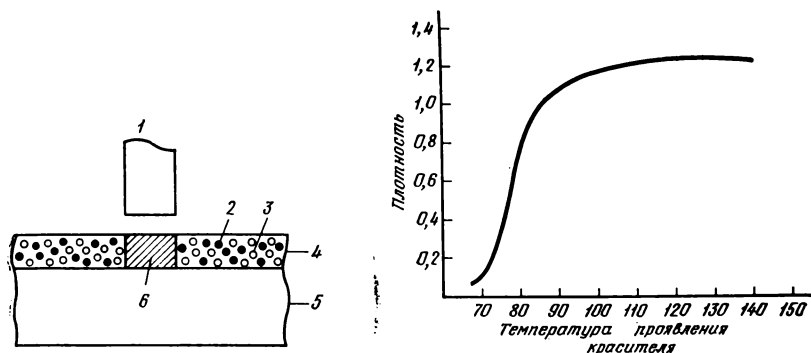


Рис. 6.32. Принцип термозаписи: 1 — нагреватель; 2 и 3 — составляющие красителя А и В соответственно; 4 — слой проявляющегося красителя; 5 — бумажная основа; 6 — участок проявления цвета.

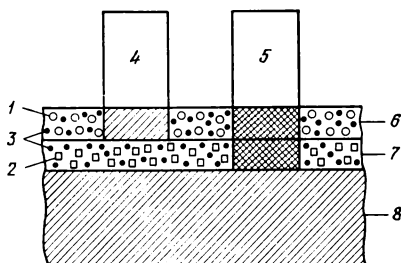


Рис. 6.33. Двухцветная термозапись: 1 и 2 — первый и второй проявляющиеся красители соответственно; 3 — инициатор проявления цвета; 4 — низкая температура; 5 — высокая температура; 6 и 7 — первый и второй термочувствительные слои соответственно; 8 — бумажная основа.

мер, в факсимильных копиях, используется копирование и проявление красителя.

При копировании материал соответствующего цвета накладывают на бумагу и осуществляют запись, тем самым получая возможность индикации цветного изображения.

Термографическая бумага представляет собой бумажную основу с нанесенным на нее слоем проявляющегося красителя. Причем окрашивается только та часть слоя, температура которой повысилась под действием нагрева со стороны нагревателя (рис. 6.32). Составной слой красителя состоит из двух химических веществ, называемых донорной и акцепторной составляющими. Эти вещества в виде микрозерен обособленно распределяются в связующем агенте, наносятся на бумагу и закрепляются на ней. При обычной температуре они являются

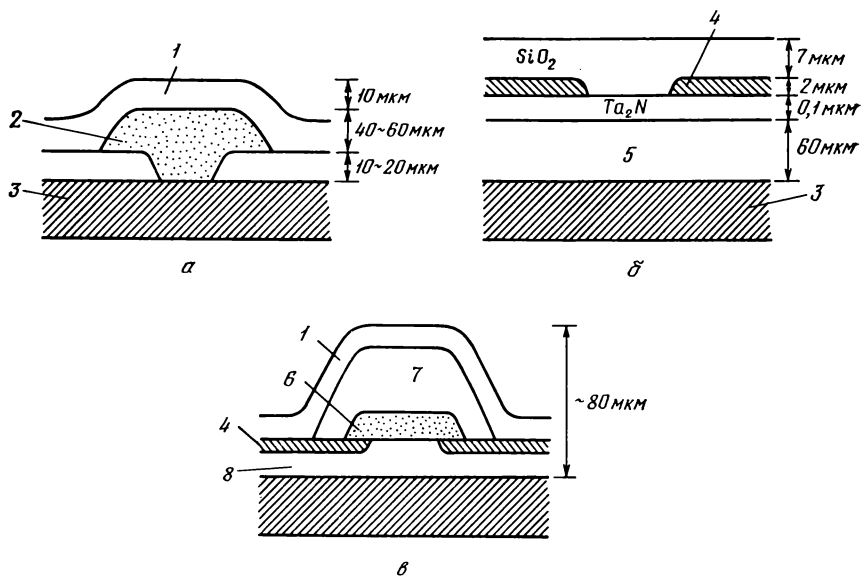


Рис. 6.34. Конструкции нагревательных элементов термоголовки: *а* — толсто- пленочный резистор; *б* — тонкопленочный резистор; *в* — полупроводниковый диффузионный резистор; 1 — износостойкое стекло; 2 — толстопленочный резистор; 3 — керамика; 4 — выводной провод; 5 — глазурованный слой; 6 — термодиффузионный резистор; 7 — монокристаллическая мезаструктура Si; 8 — эпоксидная смола.

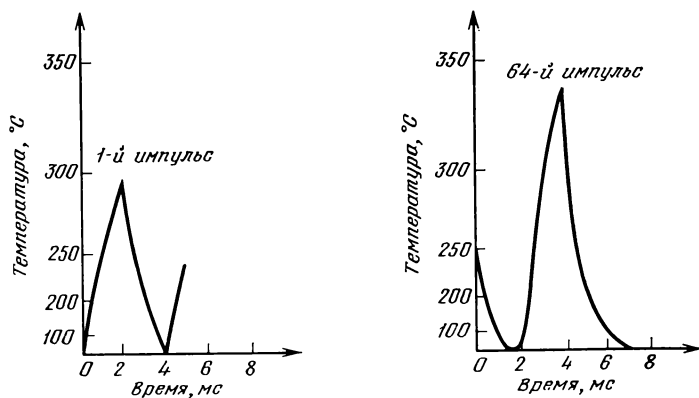


Рис. 6.35. Тепловая реакция термической головки.



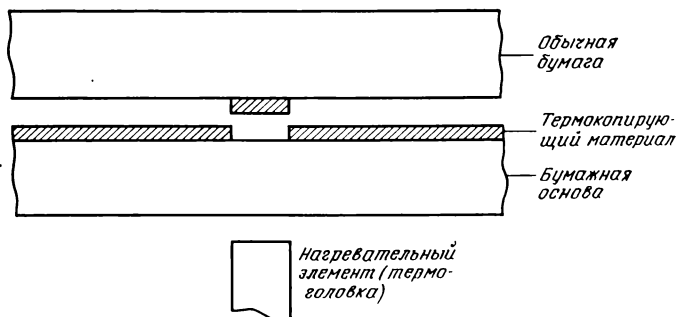


Рис. 6.36. Принцип термического копирования.

твердыми, однако при нагревании одна или обе составляющие начинают плавиться, вступают в контакт друг с другом, возникает стремительная ионно-обменная реакция, которая возбуждает красители и вызывает окрашивание. Слой проявляющегося красителя может изготавливаться: 1) из ряда металлов, сульфиды которых являются красителями, 2) из ряда красителей, в которых используется проявление окрашивания бесцветных красителей. С точки зрения качества и экономичности предпочтения заслуживает ряд красителей.

В термографической бумаге на основе красителей в качестве донора двухсоставного слоя используется бесцветный краситель ряда кубовых красителей, а в качестве акцептора — бисфенол или другая органическая кислота.

Для получения многоцветной записи на термографической бумаге проявляющийся краситель составляют из смеси красителей с различной температурой начала окрашивания (рис. 6.33). При нагревании выше необходимой температуры реагирующие компоненты испаряются, цвет пропадает и первый красочный слой становится белым.

Для повышения сохранности записи, сделанная на термографической бумаге, облучается ультрафиолетовыми лучами с целью ее закрепления.

### 6.6.2. Термоголовка

Экзотермический материал, из которого изготавливается термоголовка, может иметь вид: 1) толстопленочного резистора, 2) тонкопленочного резистора, 3) полупроводникового диффузионного резистора. Типичные конструкции этих резисторов приведены на рис. 6.34. Тепловая реакция головки показана на рис. 6.35, из которой видно, что даже в случае коротких им-

пульсов вследствие эффекта накопления температура повышается. Для устранения излишнего накопления тепла, связанного с быстрым повышением температуры резистора при высокоскоростной записи, необходимо улучшить рассеяние тепла, проходящего через керамическую подложку.

Повышение температуры в результате накопления тепла различно и зависит от предыдущей записи изображения. Поэтому возникает необходимость в регулировании температуры головки путем наблюдения за записываемым изображением и управления напряжением приложенных импульсов. Кроме того, плотность термической записи различна в зависимости от температуры, следовательно, управляя длительностью импульса в соответствии с сигналом изображения можно осуществлять градиционную запись.

### **6.6.3. Термическое копирование**

Система записи, при которой материал под действием нагрева расплавляется или сублимируется и переносится на обычную бумагу, называется термическим копированием. Принцип действия этой системы показан на рис. 6.36. В ней в качестве нагревательного элемента можно использовать термоголовку для термочувствительной записи. Материал для термического копирования в зоне с повышенной температурой под действием прикатки переносится на обычную бумагу. Путем смешения различных цветов материалов для термической записи можно получать цветные печатные копии.

## Предметный указатель

### А

- Аберрация 101, 125
- волновой поверхности 102
- поперечная 101, 102
- сферическая 101, 127
- хроматическая 233
- Адрес 181
- Анализатор 135
- Апертура 78, 101, 107, 113, 127
- Астигматизм 101
- Астигматическая разность 66

### Б

- Байт 181
- Батарея **солнечная** *см.* Элемент **солнечный**
- Бит 181
- Брюстера* окно 22
- угол 22
- Бумага **термографическая** 270—273
- Быстродействие 87
- памяти 181

### В

- Ввод данных 177
- Вектор распространения волны 108
- Вероятность перехода 49

- рекомбинации 47
- Взаимодействие параметрическое 25, 26
- Волна плоская 103, 128
- расходящаяся 104, 105
- световая 26
- стоячая 109
- сходящаяся 99, 104
- Волновод 98, 105, 106
- Волокно оптическое *см.* Волоконный световод
- Вращение плоскости поляризации 19
- удельное магнитное 27
- Время выборки 183
- жизни носителей 10
- позиционирования 182
- пробега 92
- рекомбинации носителей 11
- спонтанного излучения 11, 12
- Выгорание дырок 59
- Выход дифференциальный квантовый 56
- оптический 56—58

### Г

- Гаусса* пучок 104, 111
- скобки 109
- функция распределения 103—105
- Генерация 64

— излучения 47  
 — лазерная 51, 54, 58  
 — многомодовая 74  
 — одномодовая 72  
 Гетеробарьер 53, 60  
 Гетеропереход 52, 53  
 Гетероструктура двойная 53, 61, 75  
 Гомолазер 50  
 Градиент показателя преломления 100  
 Граница чувствительности 91  
 Грань отражающая резонатора 54

## Д

Дальность связи 146  
 Датчик влажности 157  
 — газа 157  
 — давления 168  
 — двумерный 159, 160, 168  
 — диодный 156  
 — интегральный 155, 167  
 — магнитный 162, 165, 167  
 — многомерный 155  
 — на переходах 155  
 — на ПЗС 158, 159  
 — объемного типа 154  
 — одномерный 168  
 — полупроводниковый 152  
 — пьезорезистивный 169, 170  
 — радиации 157  
 — с дистанционным управлением 160  
 — термопарный 155  
 Двухлучепреломление 26  
 Дельта-прожектор 244  
 Демультимплексор 98, 139, 148  
 Деформация упругая 25  
 Джозефсона переход 167, 195  
 — эффект 167, 195  
 Диаметр пятна 66  
 Диафрагма 92  
 Диод светоизлучающий *см.*  
 Светодиод

Диполь электрический 13  
 Дисперсия конструкции 118, 119  
 — мод 18, 115  
 — показателя преломления 65  
 Дисплей 229—274  
 — на ЭЛТ 233, 239  
 Диффузия 128  
 — акцепторной примеси 50  
 — Брегга 141  
 — носителей 69  
 — селективная 58  
 Диэлектрическая проницаемость 13  
 Длина диффузионная дырки 50  
 — — электрона 50  
 — волны излучения 13, 51, 52  
 Дно зоны проводимости 12  
 Добротность 72  
 Доступ блочно-прямой 183  
 — последовательный 183  
 — прямой 182, 183  
 Друде — Фойгта формула 15  
 Дырки 10  
 — легкие 11  
 — тяжелые 11

## Е

Емкость памяти 181  
 — электростатическая 92

## Ж

Жидкие кристаллы 254  
 Жилы упрочняющие 119

## З

Закон Ламберта 77, 78  
 — Снелля 21  
 Запись информации 176, 177

— — термическая 270  
 Запоминающее устройство 210  
 — — криотронное 194  
 — — магнитное 178, 180, 205—208  
 — — массовое 223, 224  
 — — на аморфных материалах 180  
 — — — линиях задержки 178  
 — — — ПЗС 180, 204, 208—210  
 — — — сегнетоэлектриках 180  
 — — — ЭЛТ 178  
 — — оптическое 51, 225, 227  
 — — полупроводниковое 185  
 — — постоянное 183, 196  
 — — с произвольной выборкой 184, 185  
 Заряд электрона 55  
 Зеркало резонатора 47  
 Зона валентная 9, 10, 46  
 — дальняя 65, 66  
 — запрещенная 9, 10, 46  
 — проводимости 9, 10, 46

## И

Излучение вынужденное 47, 59  
 — инфракрасное 23  
 — рекомбинационное 11  
 — спонтанное 47, 64, 69, 77  
 Изображение двойное 16  
 Изолятор оптический 135, 136  
 Изотропность 16  
 Индикатор активный матричный 269  
 — газоразрядный 249  
 — — переменного тока 252  
 — — постоянного тока 250  
 — жидкокристаллический 254, 255, 260—265  
 — электролюминесцентный 265  
 Инжекция носителей 46, 61  
 — тока 45

— электрона 10  
 Интегральная схема большая (БИС) 177  
 — — *Холла* 173  
 Интенсивность света 64  
 Интерференция 20  
 Ионизация ударная 49, 92  
 Источник света 74

## К

Кабель волоконно-оптический 112, 119, 120  
 — световодный *см.* Кабель волоконно-оптический  
 Когерентность 73, 74  
 Колебания релаксационные 67, 69, 70  
 Контроллер 236  
 Концентрация носителей 10, 48, 59, 190  
 — примеси 82  
 Коэффициент ионизации 94, 95  
 — отражения 19, 48, 57, 132  
 — поглощения 54  
 — преломления 15, 52, 65, 109, 126  
 — — магнетиков 19  
 — — металлов 19  
 — — ступенчатоизменяемый 113, 115  
 — распространения моды 109, 111  
 — рекомбинации 55, 81  
 — удержания света 54  
 — умножения 88, 89, 92  
 — усиления 54, 55, 59  
*Крамера — Кронига* соотношение 14  
 Краситель плеохроический 258  
 Кремний 12  
 Кристалл двоякопреломляющий 16  
 — двухосный 16  
 — лазерный 48, 57  
 — одноосный 16

## Л

- Лазер полупроводниковый 12, 45  
 — — двухрезонаторный 71  
 — — динамический одномодовый 71, 143  
 — — контактный полосковый 48, 57  
 — — планарный полосковый 61  
 — — — полосковый 57  
 — — с двойной гетероструктурой 51  
 — — — ограничением тока 61  
 — — — обратной связью 71  
 — — — распределенным отражением 71  
 — — — распределенной обратной связью 71  
 — — со скрытой гетероструктурой 60, 61, 66  
 — — с селекцией поперечных мод 57  
 — — — управляемым коэффициентом преломления 61—63  
 — — — — усиления 61—63, 64, 66  
 Линза градиентная 126, 127  
 — корректирующая 66  
 — плоская матричная 128  
 — собирающая 99, 100  
 — стержневая 133, 134  
 — сферическая 66, 123  
 — фокусирующая 65, 122, 123  
 — цилиндрическая 65, 123  
 Линия антистоксова 25  
 — связи волоконно-оптическая 141—143, 147, 148  
 — стоксова 25  
 Лучепреломление двойное 15  
 Луч необыкновенный 16  
 — обыкновенный 16  
 Люминофор 49, 240, 241, 243—245

## М

- Маска теневая 244, 245  
 Матрица логическая 200  
 — — программируемая 199  
 Микроизгибы 119  
 Миниатюризация 162  
 Мода быстрая 115  
 — волноводная 109  
 — вытекающая 110, 111  
 — генерации 64  
 — затухающая 110  
 — медленная 115  
 — основная 59, 111, 118  
 — первого порядка 59  
 — поперечная 48, 54, 58, 61  
 — продольная 61—65, 70  
 — резонансная 63, 71  
 Модулятор 140, 141  
 Модуляция аналоговая 143, 146, 147  
 — высокоскоростная 72, 74  
 — излучения 143  
 — импульсная 67  
 — импульсно-кодовая 147  
 — непосредственная (прямая) 46, 69, 70  
 — оптическая 46  
 — цифровая 143, 146, 147  
 — частоты следования импульсов 147  
 — ширины импульсов 147  
 Монохроматичность света 67  
 Мощность излучения 74, 76  
 Мультиплексор 98, 139, 147

## Н

- Накачка 46  
 Накопитель на магнитных дисках 217—221  
 — — — лентах 221—224  
 Напряжение пробоя 89  
 Носители инжесктированные 50, 52, 60  
 — неосновные 50

- неравновесные 46
- основные 50
- свободные 49

## О

- Область генерации 57
  - дрейфа 88, 92
  - лавинного умножения 88, 90
  - поглощения света 88, 93
  - ударной ионизации 98
- Облучение протонное 58
- Оболочка световода 105, 107, 110—113
- Объем передачи 113
- Оже-рекомбинация 76
- Окно *Брюстера* 22
- Оптическая линия связи 98
- Оптический путь 99
- Ось оптическая 113, 128
- Ответитель оптический 98, 133
- Отклик частотный 67
- Отношение сигнал/шум 92, 93, 97
- Отражение полное 76, 78, 106, 113
  - света 89
  - торцевое 21
  - *френелевское* 20, 76, 78

## П

- Память *см.* Запоминающее устройство
- Пара электрон-дырка 11, 49
- Передача оптическая 74
- Переключатель оптический 139
- Перескок моды 64, 65
- Переход гомоструктурный 50
  - *Джозефсона* 167, 195
  - межзонный 83
  - непрямой 12
  - *pn* 50, 61, 83
  - прямой 12

- спонтанный 47
- электронов 46
- Пленка просветляющая 21, 89
- Плоскость поляризации 16, 136
  - спайности 47, 48
  - фокальная 101
- Плотность тока инжекции 55
  - — объемная 55
  - — пороговая 51
- Поверхность волновая 99
  - перехода 65, 66
  - равной фазы 99
  - раздела 21
  - светоизлучающая 105
- Поглощение между зонами 54
  - света 9, 10
  - ультрафиолетовое 10
- Подложка канализированная 61
- Показатель добротности 83
  - преломления *см.* Коэффициент преломления
- Покрытие световода 112
- Полоса модуляции 74, 80, 81
  - пропускания 112, 113, 115
- Полупроводники с высокой подвижностью электронов 165
  - — непрямыми переходами 12, 83
  - — прямыми переходами 12, 48, 86
- Поляризатор 135
- Поляризация 24, 26, 137
  - атомная 15
  - волны 102
- Постоянная *Больцмана* 79
  - *Верде* 19, 27, 42
  - *Планка* 79
  - *Поккельса* 25, 33
  - распространения 65
  - решетки 52
- Потери излучения 129
  - на отражение 54
  - — распространение 112
- Потолок валентной зоны 12
- Преобразователь 152
- Прерыватель света 137

Приборы оптоэлектронные 45  
 Примесь акцепторная 46  
 — донорная 46  
 Пробой лавинный 89  
 — туннельный 91  
 Проводимость собственная 49  
 Проектор записывающий  
 247, 248  
 — копланарный 244  
 — считывающий 247, 248  
 — электронный 241, 242  
 Проницаемость диэлектриче-  
 ская 13, 25  
 — магнитная 19  
 Пучок выходной 66  
 — гауссов 103, 111  
 — параллельный 123, 126  
 — расходящийся 126  
 — сходящийся 123  
 — эллиптический 123

## Р

Радиус кривизны 103  
 Развертка произвольная 235  
 — растровая 235  
 Разность астигматическая 66  
 Разрешающая способность  
 зрения 230, 231  
 Распределение Гаусса 103, 104  
 Рассеяние света комбинацион-  
 ное 25  
 Расстояние фокусное 100  
 Расходимость пучка 123  
 Расщепление спин-орбиталь-  
 ное 11  
 Режим генерации излучения  
 11  
 Резонанс лазерный 68  
 Резонансный пик 68, 69  
 Резонатор лазерный 47, 55, 57,  
 71  
 Рекомбинация 10, 47, 71  
 — безызлучательная 76, 77,  
 81, 82  
 — излучательная 76, 81  
 поверхностная 92

## С

Самопоглощение 76  
 Сверхрешетка 167  
 Свет некогерентный 47  
 Световод 53, 98, 107, 142  
 — волоконный 51, 65, 74—78,  
 112  
 — градиентный 116, 117, 125  
 — диэлектрический 53  
 — многожильный 121, 122  
 — многомодовый 102, 121, 130  
 — одномодовый 102, 117—121,  
 125, 131  
 Светодиод 12, 45—47  
 — Барраса 75  
 — индикаторный 83—86  
 — с поверхностным излуча-  
 телем 74, 75  
 — с торцевым излучателем  
 74—78, 83  
 Светочувствительность 22, 23  
 Связь многоканальная 148  
 — оптическая 74  
 Сердцевина световода 105, 107,  
 110, 130  
 Сеть локальная 150—151  
 Символ 181  
 Синфазность излучения 132  
 Система оптической связи 51,  
 70, 78  
 Скорость групповая 113, 116,  
 118  
 — дрейфа 92  
 Слово 181  
 Слой активный 52—55, 64, 66,  
 75  
 — амортизирующий 119  
 — обедненный 89, 90  
 — световодный 61  
 Смеситель оптический 133, 134  
 Совмещение оптических осей  
 129  
 Согласование оптическое 129  
 Соединитель оптический 119,  
 122, 130



— однонаправленный 133, 134, 137  
 Солитон 25  
 Спектр генерации одномодовый 61  
 Срок службы лазера 61  
 Стекловолокно 111  
 Стирание информации 203  
 Структура многослойная 133  
 — энергетических зон 52  
 Сужение спектра 63

## Т

«Твист-эффект» 255—257  
 Тензодатчик 154, 156, 168, 173  
 Теория гармонических колебаний 15  
 Термистор 154, 156  
 Термовключение 172  
 Термогенерация электронно-дырочных пар 173  
 Термоголовка 273  
 Термопара 156  
 Ток инжекции 47, 63, 76  
 — пороговый 47, 60  
 — темновой 93, 95  
 Транзистор полевой 97  
 Трубка запоминающая 246, 247  
 — проекционная 246

## У

Угол *Брюстера* 22  
 — вращения *Фарадея* 136  
 — критический полного отражения 22  
 — падения луча 21, 22, 126  
 — распространения луча 107  
 — расходимости луча 66, 77, 103, 129  
 Умножение лавинное 95  
 Умножитель фотоэлектронный 161

Уплотнение канала связи 147  
 Усиление внутреннее 49  
 — лазерное 51  
 Условие равенства оптического усиления 54  
 — резонанса 65  
 Устройство печатающее лазерное 51  
 Уширение спектра 70

## Ф

Фильтр многослойный 139  
 — оптический 128, 131  
 Фокусировка предельная 100  
 — точечная 102  
 Фокус параксиальный 101, 102  
 Фонон 25  
 Формула *Друде* — *Фойгта* 15  
 Фотовозбуждение 49  
 Фотодатчик 155, 165—167  
 Фотодетектор 22  
 Фотодиод 45, 49, 155, 156  
 — лавинный 87, 98, 166  
 — однопереходный 166  
 Фотолитография 128  
 Фотон 56, 76, 91  
 Фотоприемник 49, 87, 93, 97  
 Фотопроводимость 22  
 Фоторезистор 49, 154  
 Фототиристор 169, 172  
 Фототранзистор 49  
 Фотоумножитель 161  
 Фотохромизм 10  
 Фотоэлемент 156  
 Фотоэффект внутренний 49  
*Френеля* микролинза 100  
 Фронт волновой 66  
 Функция волновая 11, 108  
 — распределения Гаусса 103—105

## Х

Характеристики лазера модуляционные 80

— — статические 62  
Хранение информации 176

## Ц

Центр излучения 84  
— люминесценции 84  
Цикл регенерации 181

## Ч

Частота угловая 14  
Четвертьволновый отрезок 132  
Число волновое 11  
Чувствительность датчика 154  
— модуляционная 68, 81  
— преобразования 165  
— спектральная 91

## Ш

Ширина запрещенной зоны 9,  
50—52, 60, 84  
— обедненного слоя 92  
— области поглощения 91  
— полосы пропускания 115  
— спектральной полосы 79  
Шум дробовый 95  
— квантовый 73  
— лавинного умножения 92,  
95  
— обусловленный отражен-  
ным светом 73  
— — перескоком моды 73  
— токораспределения 73

## Э

Экситон 84  
Электролюминесценция дис-  
персная 265

— инъекционная 266  
— предпробойная 265  
— тонкопленочная 266  
Электрон легкий 13  
— свободный 10  
Элемент изображения 159, 232  
— памяти 178  
— солнечный 49, 155, 156  
— Холла 156, 173  
Энергетический интервал 9  
— виртуальный уровень 12  
Эпитаксиальное выращивание  
61  
Эффект акустооптический 137,  
141  
— болометрический 23  
— Бриллюэна 25  
— «гость — хозяин» 255  
— двулучепреломления 256  
— Джозефсона 167, 195  
— Зеебека 156  
— Керра 23  
— линзовый 79  
— магнитооптический 23, 26,  
137, 139  
— нелинейный оптический 25  
— Оже 77  
— пироэлектрический 23  
— Поккельса 23  
— Рамана 25  
— световодный 59  
— удержания носителей 52  
— — света 52, 55  
— Фарадея 19, 26, 27  
— фотогальванический 22, 49  
— фоторезистивный 49  
— фотоупругий 23, 25  
— Холла 156  
— электрооптический 23, 25,  
137  
Эффективность квантовая  
внешняя 76  
— связи 74, 77—79

- Я**
- памяти 181
  - *Фарадея* 135, 136
  - электролюминесцентная
- Яркость излучения 75
- Ячейка динамического ЗУПВ 45, 49
- 188

# Оглавление

Предисловие редактора перевода . . . . .	5
Предисловие . . . . .	7
<b>Глава 1. Оптические устройства. Основные понятия . . . . .</b>	<b>9</b>
1.1. Поглощение и излучение света . . . . .	9
1.2. Коэффициент преломления . . . . .	13
1.3. Фотопроводимость и фотогальванический эффект . . . . .	22
1.4. Электрооптический и магнитооптический эффекты . . . . .	23
1.5. Приложение . . . . .	28
<b>Глава 2. Оптоэлектронные приборы . . . . .</b>	<b>45</b>
2.1. Классификация и принцип действия оптоэлектронных приборов . . . . .	45
2.2. Полупроводниковые лазеры . . . . .	50
2.3. Светоизлучающие диоды для оптической передачи . . . . .	74
2.4. Индикаторные СИД и СИД большой мощности излучения . . . . .	83
2.5. Фотоприемники . . . . .	87
<b>Глава 3. Компоненты оптических схем и световоды . . . . .</b>	<b>98</b>
3.1. Основы фокусировки и распространения света . . . . .	98
3.2. Волоконный световод . . . . .	111
3.3. Компоненты фокусирующей системы . . . . .	122
3.4. Компоненты оптических схем . . . . .	130
3.5. Волоконно-оптические линии связи . . . . .	141
<b>Глава 4. Датчики и преобразователи . . . . .</b>	<b>152</b>
4.1. Функции и роль датчиков . . . . .	153
4.2. Миниатюризация датчиков, уменьшение размеров элементов . . . . .	162
4.3. Повышение чувствительности датчиков . . . . .	165
4.4. Разработка интегральных датчиков . . . . .	167
<b>Глава 5. Запоминающие устройства . . . . .</b>	<b>176</b>
5.1. Краткий обзор существующих запоминающих устройств (ЗУ) . . . . .	176

5.2. Запоминающие устройства с прямым доступом . . . . .	184
5.3. Постоянные запоминающие устройства (ПЗУ) . . . . .	196
5.4. Запоминающие устройства на цилиндрических магнитных доменах (ЗУ на ЦМД) и запоминающие устройства на приборах с зарядовой связью (ЗУ на ПЗС) . . . . .	204
5.5. Внешние ЗУ с магнитной записью информации . . . . .	210
5.6. Оптические запоминающие устройства . . . . .	225
<b>Глава 6. Дисплеи и индикаторы . . . . .</b>	<b>229</b>
6.1. Устройство отображения информации и микроэлектроника . . . . .	229
6.2. Дисплеи на ЭЛТ . . . . .	239
6.3. Газоразрядный индикатор . . . . .	249
6.4. Жидкокристаллический индикатор . . . . .	254
6.5. Электролюминесцентный индикатор . . . . .	265
6.6. Термическая запись . . . . .	270
<b>Предметный указатель . . . . .</b>	<b>275</b>

**Уважаемый читатель!**

**Ваши замечания о содержании книги, ее оформлении, качестве перевода и другие просим присылать по адресу: 129820, Москва, И-110, 1-й Рижский пер., д. 2, изд-во «Мир»**

Ясухару Суэмацу, Сэйя Катаока, Кацуми Кисино,  
Ясуо Кокубун, Тюдзи Судзуки, Осаму Исии, Сусуму Енэдзава

## **ОСНОВЫ ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ**

Зав. редакцией Ю. А. Кузьмин  
Научный редактор Т. Г. Ходлова, Мл. научный редактор И. А. Грещова  
Художник В. С. Стуликов, Художественный редактор Н. М. Иванов  
Технический редактор И. М. Кренделева, Корректор Н. А. Гиря

**ИБ № 6383 Учебное издание**

Сдано в набор 14.10.87. Подписано к печати 28.03.88. Формат 60×90<sup>1/8</sup>. Бумага типограф-  
ская № 1. Печать высокая. Гарнитура латинская. Объем 9,00 бум. л. Усл. печ. л. 18,00.  
Усл. кр.-отт. 18,00. Уч.-изд. л. 15,89. Изд. № 8/5363. Тираж 24 000 экз. Зак. 1337.  
Цена 1 р. 60 к.

**ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»**. 129820, ГСП, Москва, И-110, 1-й Рижский пер., 2.

Московская типография № 11 Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР  
по делам издательства, полиграфии и книжной торговли. 113105, Москва, Нагатинская  
ул., д. 1.

**ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР» ВЫПУСКАЕТ  
В 1988 г.**

**Адаптивные фильтры.** Под ред. К. Коуэна и П. Гранта. Перевод с английского — 24 л. — 3 р. 80 к.

Коллективная монография, написанная ведущими специалистами США и Великобритании и посвященная теории, конструированию и применению адаптивных фильтров — устройств, автоматически меняющих частотные характеристики в зависимости от параметров принимаемых сигналов. Рассматриваются различные методы оптимального оценивания, рекурсивного оценивания по методу наименьших квадратов и синтеза решетчатых фильтров, алгоритмы адаптивной фильтрации в частотной области. Изучаются цифровые и аналоговые реализации адаптивных фильтров, а также приведены прикладные задачи адаптивной фильтрации сигналов.

Книга предназначена для инженеров и научных работников, специализирующихся в области радиотехники, средств связи и обработок информации.



**ОПЕЧАТКА**

<b>Страница</b>	<b>Строка</b>	<b>Напечатано</b>	<b>Следует читать</b>
<b>115</b>	<b>3-я снизу</b>	<b>ВЛγ</b>	<b>ВЛϑ</b>

Зак. 1337