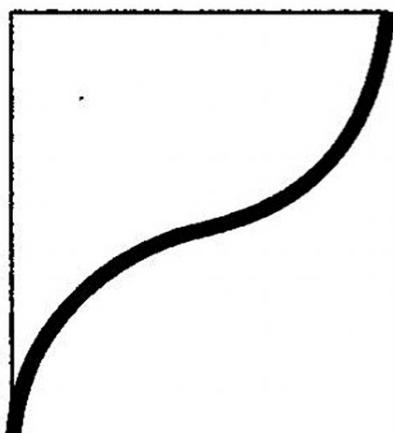


Техническое руководство

ВОЛОКОННАЯ  
ОПТИКА

Дональд Дж. Стерлинг

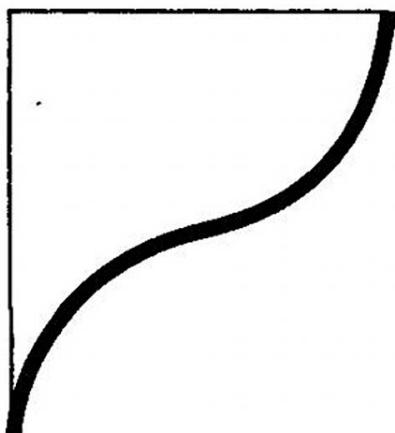


*Technician's Guide  
to Fiber Optics*

**Second Edition**

**Donald J. Sterling, Jr.**





*Техническое руководство  
по волоконной оптике*

Дональд Дж. Стерлинг, младший



Technician's Guide to Fiber Optics  
Donald J. Sterling, Jr Second Edition  
Copyright 1993 All rights reserved

Техническое руководство по волоконной оптике  
Дональд Дж. Стерлинг, младший Переводчик А.  
Московченко Корректоры М. Аверьянова, М. Ромашова  
Научный редактор М. Кузьмин Верстка М.Алиевой

Copyright © 1993 DELMAR PUBLISHERS INC. ©

Издательство «ЛОРИ», 1998

Изд. № : ОАІ (03)  
ЛР № : 070612 30.09.97 г.  
ISBN 5-85582-030-0

Подписано в печать 01.01.98 Формат 70x100/16  
Бумага офсет №1 Гарнитура Нью-Баскервиль Печать офсетная  
Печ.л. 19 Тираж 5500 Заказ № 684  
Цена договорная

Издательство «ЛОРИ». Москва, ул. А. Живова, д. 10, стр. 1  
Телефон для оптовых покупателей: (095)259-01-62 Отпечатано в  
типографии ИПО Профиздат: 109044, Москва, ул. Крутицкий вал  
д. 18



*Посвящается Лунни и Меган*

# *Содержание*

<i>Предисловие</i>	xiii
<b>Часть 1 Основы</b>	<b>1</b>
<b>Глава 1 Революция в области коммуникаций</b>	<b>2</b>
История волоконной оптики	3
Информационная эра	6
Кабельная сеть Америки	8
Телекоммуникации и компьютеры	9
Волоконно-оптическая альтернатива	10
Заключение	10
<b>Глава 2 Передача информации</b>	<b>13</b>
Коммуникации	13
Аналоговый и цифровой сигналы	16
Основы цифрового сигнала: биты и байты	16
Преимущества цифровых систем	19
Информационная емкость	20
Импульсная модуляция и мультиплексирование	21
Дебибел	22
Заключение	24
<b>Глава 3 Преимущества волоконной оптики как коммуникационной среды</b>	<b>27</b>
Широкая полоса пропускания	28
Низкие потери	29
Нечувствительность к электромагнитным полям	31
Малый вес	33
Малый размер	33
Безопасность	34
Секретность	34
Выводы	35
Заключение	35
<b>Глава 4 Свет</b>	<b>37</b>
Электромагнитный спектр	38
Волны и частицы	39
Световые лучи и оптика	40
Отражение и преломление	40
Френелевское отражение	43

Закон Снелла	44
Практический пример	44
Заключение	45
<b>Часть 2 Волоконно-оптические компоненты 47</b>	
<b>Глава 5 Оптическое волокно</b>	48
Принципиальное устройство волокна	48
Классификация волокон	50
Моды	52
Профиль индекса преломления	52
Волокно со ступенчатым индексом	53
Волокно со сложенным индексом	54
Одномодовое волокно	55
Волокна со смещенной дисперсией	57
Коротковолновые одномодовые волокна	57
Пластиковые волокна	58
Количество мод в волокне	58
Сравнение волокон	60
Заключение	61
<b>Глава 6 Характеристики волокна</b>	63
Дисперсия	63
Модовая дисперсия	63
Молекулярная дисперсия	64
Волноводная дисперсия	66
Ширина полосы пропускания и дисперсия	66
Затухание	67
Рассеяние	69
Поглощение	70
Потери, связанные с микроизгибами	70
Равновесное распределение мод	71
Численная апергурра	72
Прочность волокна	74
Радиус изгиба	75
Радиационная прочность	75
Заключение	76
<b>Глава 7 Волоконно-оптические кабели</b>	79
Основные компоненты волоконно-оптического кабеля	80
Буферная оболочка	81
Силовая оболочка	82
Внешняя оболочка	82
Внутренние кабели	84
Симплексные кабели	87
Дуплексные кабели	87
Многожильные кабели	88
Условия эксплуатации	88

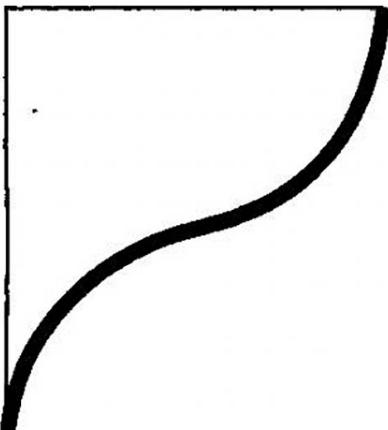
Разделяемые кабели	89
Внешние кабели	89
Дополнительные характеристики кабелей	92
Комбинированные кабели	92
Кабельные спецификации	93
Заключение	96
<b>Глава 8 Источники</b>	<b>97</b>
Немного об атомной структуре вещества	97
Переход р-п типа в полупроводниках	99
СИД	102
Лазеры	104
Безопасность	105
Характеристики источников	105
Выходная мощность	106
Выходная диаграмма	106
Спектральная ширина	108
Скорость	109
Длительность эксплуатации	109
Простота использования	109
Подключение	111
Примеры источников	112
Заключение	113
<b>Глава 9 Детекторы</b>	<b>115</b>
Основные принципы работы фотодиода	
11	11
5	5
рп фотодиоды	115
pin фотодиоды	117
Лавинные фотодиоды (APD)	118
Шум	120
Дробный шум	121
Тепловой шум	121
Отношение сигнал/шум	122
Отношение бит/ошибка	123
Характеристики детекторов	123
Чувствительность	123
Квантовая эффективность	125
Фоновый ток	125
Минимальная детектируемая мощность	
12	12
5	5
Время отклика	126
Приложенное напряжение	127
Интегрированные детекторы/предусилители	
12	12
8	8
Конструкция	129
Спецификации детекторов	130
Заключение	130
<b>Глава 10 Передатчики и приемники</b>	<b>133</b>
Фундаментальные концепции передатчика	133
Кодирование	134

## Содержание

Код NRZ	136
Код RZ	136
Код NRZI	136
Код Манчестер	137
Код Миллер	137
Код Biphasic-M	137
Кодирование 4B/5B и 4B/8B	137
Скорость передачи данных и скорость сигнала	
13	13
8	8
Уровень мощности сигнала	138
Выходная мощность передатчика	139
Основные принципы работы приемника	139
Чувствительность приемника	140
Динамический диапазон	140
Усилитель	141
Уровень мощности приемника	142
Приемопередатчики и повторители	144
Комплектация передатчиков и приемников	145
Спецификация приемников и передатчиков	145
Заключение	147
<b>Глава 11 Разъемные и неразъемные соединители</b>	<b>149</b>
Роль соединителей	150
Требования к соединителям	150
Причины возникновения потерь в соединении	
15	15
1	1
Внутренние причины	151
Внешние факторы	153
Боковое смещение	154
Зазор между сколами	154
Угловое рассогласование ориентации осей	
15	15
5	5
Гладкость поверхности скола	156
Факторы, связанные с системой	156
Потери включания	157
Дополнительные потери в соединении	158
Потери в одномодовых волокнах	159
Потери, связанные с обратным отражением	
15	15
9	9
Оконцовка волокна	161
Наконечники	161
Эпоксидный клей и полировка	162
Бесклееевая технология оконцовки	163
Совместимость	163
Примеры соединителей	165
Соединитель FC-типа	166
Соединитель B4-типа	167
Соединитель ST-типа	167
Соединитель SC-типа	168
Соединители FDDI MIC	170
ESCON-соединитель	170
SMA-соединитель	171
Соединители для пластиковых волокон	172
Неразъемные соединители	172

Сварные неразъемные соединители	172
Механические неразъемные соединители	173
Подготовка волокна	174
Примеры установки соединителей	177
Заключение	177
<b>Глава 12 Разветвители</b>	<b>187</b>
Принципы устройства разветвителей	188
Т-разветвитель	190
Разветвители типа звезда	192
Универсальные разветвители типа звезда	193
Принципы работы разветвителей	194
Сварные разветвители	194
Центрально-симметричные разветвители с отражением	195
Мультиплексоры с разделением длины волны	197
Оптические коммутаторы	200
Заключение	203
<b>Часть 3 Волоконно-оптические системы</b>	<b>205</b>
<b>Глава 13 Волоконно-оптическая линия</b>	<b>206</b>
Предварительная оценка	206
Спецификация системы	207
Энергетический баланс	208
Более сложный пример	209
Дополнительные сложности	212
Баланс временных характеристик	212
Заключение	214
<b>Глава 14 Прокладка волоконно-оптического кабеля и пассивное оборудование</b>	<b>217</b>
Радиус изгиба и максимальное натяжение	217
Зарывание в грунт	218
Подвешивание по воздуху	218
Прокладка внутри помещения	219
Прокладка в коробах и каналах	220
Прокладка в каналах	221
Протягивание волоконно-оптических кабелей	223
Держатели соединителей и организеры	225
Распределительное оборудование	225
Кроссовые панели	226
Настенные розетки	227
Заключение	228
<b>Глава 15 Волоконно-оптические системы и их применение</b>	<b>231</b>
Локальные компьютерные сети	231
Топологии локальных сетей	232

Сетевые уровни	233
Физический уровень	234
Уровень связи данных	234
Сетевой уровень	234
Транспортный уровень	235
Уровень сеанса	235
Уровень представления данных	235
Уровень приложений	235
Метод доступа	236
Пакеты	236
Ethernet и Token Ring	237
IEEE 802.5 Token Ring	238
IEEE 802.3 Ethernet	238
FOIRL	240
10BASE-T	241
Fiber Distributed Data Interface	244
Топология FDDI	245
FDDI-станции	247
Применение FDDI-сетей	249
FDDI-сеть на основе медного кабеля	251
Система IBM ESCON	251
Fiber Channel	253
Телекоммуникации	254
SONET	255
Оптический усилитель на основе добавок зербия	
Солитоны	258
Заключение	259
<b>Глава 16 Краткий обзор тестового и измерительного оборудования</b>	<b>261</b>
Тестирование волоконно-оптических систем	261
Оптический измеритель мощности	262
Управление модовым состоянием	263
Измерения потерь в волокне	264
Определение потерь включения	265
Временные и частотные интервалы	265
Оптический рефлектометр	266
Использование OTDR	269
Потери на единице длины	270
Оценка качества соединений	270
Определение места повреждения	270
Сварные соединители	270
Полировочная машина	272
Диагностический микроскоп	273
Набор инструментов для прокладки волокна	274
Заключение	275
<b>Глоссарий</b>	<b>277</b>



## *Предисловие*

Первое издание книги "Техническое руководство по волоконной оптике" представляло собой достаточно общее введение в оптическую технологию. Книга была адресована широкому кругу читателей, техническим специалистам и учащимся школ и колледжей как с техническим, так и с экономическим уклоном и могла быть использована в качестве учебного пособия по тогда еще новой технологии сотрудниками коммуникационных компаний.

Новая редакция книги сохраняет дух первого издания и содержит ряд новых разделов, посвященных успехам волоконной оптики. К ним, в частности, относится описание пассивного усиления оптического сигнала при прохождении через обогащенное эрбием волокно. Основной прогресс в волоконной оптике, достигнутый со времени выхода первого издания, может быть выражен одним словом: стандартизация. Чтобы отразить изменения в области стандартных компонент и типовых решений, глава 11 была существенно переработана, а глава 15 - написана заново. При этом наряду с волоконными линиями для локальных сетей и телекоммуникаций, была описана сеть FDDI.

По замыслу книга содержит всю необходимую для понимания материала информацию. Читателю достаточно обладать лишь элементарными знаниями по цифровой электронике и физике.

Использование математического аппарата ограничено практическими задачами, предназначенными для обучающихся, и требует только знания логарифмов и начал тригонометрии.

Книга разделена на три части. Первая часть (главы 1-4) посвящена описанию оптического волокна как перспективной передающей среды. Здесь не только дается сравнительный анализ оптических и медных кабелей, но также показана возрастающая роль телекоммуникаций и вводятся основные понятия: бит, байт, аналоговый и цифровой сигналы, а также свет.

Во второй части книги (главы 5-12) подробно описаны различные виды оптических волокон, детекторы, источники света, разветвители, разъемные и неразъемные соединители. Особое внимание уделено теоретическим основам и практике использования волоконно-оптических кабелей и соединителей, которые в значительной степени отличаются от своих медных аналогов. Понимание принципов работы этих компонент необходимо для всех, кто собирается работать в данной области.

В третьей части (главы 13-16) говорится о совместной работе различных компонент волоконно-оптических систем. Описываются оптические линии (с акцентом на расчет энергетического баланса и полосы пропускания), специфическое пассивное волоконно-оптическое оборудование, а также их установка и обслуживание.

Каждая глава содержит краткое заключение и перечень контрольных вопросов. Дополняет книгу гlosсарий.

Мне еще раз хотелось бы поблагодарить Дэниса Форстера (BT&D), Стива Даусона (Tektronix), Сюзан Арч (Digital Equipment Corporation) и Митча Стробина (Network Peripherals), любезно предоставивших фотографии для этой книги.

Среди большого числа сотрудников компании AMP Incorporated, помогавших автору книги полезными замечаниями и советами, особую благодарность хочется выразить Кристину и Мэрилин Арнольд, Крису Шройеру, Брегу Маглу, Майку Бауму, Бобу Соугарду, Майку Пепплеру, Кевину Монроу, Джеку Хаймису, Тому Боллу, Дэnnису Хесу, Рэйю Капани, Тэрри Боувену и Дэйву Хаббарду.

## **Благодарности**

Во-первых, хочется поблагодарить Ховарда Гриффина, Джери Харшмана, Харбенса Б. Матура, Ли Розенталя и Джери Вескотта, прочитавших рукопись и высказавших ряд ценных замечаний. За помощь, оказанную при выходе первого издания книги, выражая свою признательность Элиасу А. Аваду, Карлу Стэнсилю, Питеру Вангелю, Сэму Конну, Тому Герваттовски и , Брюсу Ботчалиту.

Я также адресую свою благодарность всем компаниям, предоставившим автору книги новейшую информацию, иллюстрации и образцы. Особенно мне хочется отметить помочь Лоретты Колтране (GTE), Элейн Хикс (Sic-sor), Нэнси Сью и Джона Сикотте (Cottting), Мелиссы А. Хэк (Anritsu America), Эллен Филлипс (Lytel), Карла Блоша (AT&T Bell Laboratories), Маргарит Г. Шапалис (ITT Electro-Optical Products), Ричарда Риана (Buchler), Андрю Гураксани и А.Ф.Нелсона (Hewlett-Packard), Роберта Шоу (Fujitsu Microelectronics).

Я благодарю Ричарда Аурэ, сотрудника компании Sapoda Data Systems, за разрешение использовать материалы инструкции "Методы прокладки волоконно-оптических кабелей" в основной части главы 14.

Компания AMP любезно предоставила множество иллюстраций для этой книги, а также разрешила свободное использование материалов, написанных автором во время работы в этой компании.

## **Торговые марки**

При использовании терминов, являющихся известными автору запатентованными торговыми марками, в тексте книги делалась ссылка. Автор заранее приносит свои извинения за пропуски указаний на неизвестные ему торговые марки.

## **Предисловие переводчика**

Эта книга посвящена одному из новых, бурно развивающихся направлений телекоммуникации. Она занимает особое место в немногочисленном ряду книг по волоконно-оптической технологии. Книга написана бывшим ведущим специалистом американской компании AMP, стоявшим у истоков становления и развития волоконной оптики, и рекомендуется как основное учебное пособие всеми ведущими компаниями мира. В отличие от обычных книг по технологии материал книги является самодостаточным для ознакомлением с предметом и содержит большое количество практических примеров использования оптики в телекоммуникациях.

Выход русского перевода книги стал возможен благодаря поддержке российской компании "СОНЕТ ТЕКНОЛОДЖИС", которая давно и успешно работает в области волоконно-оптических технологий.

# **Часть 1**

*Основы*

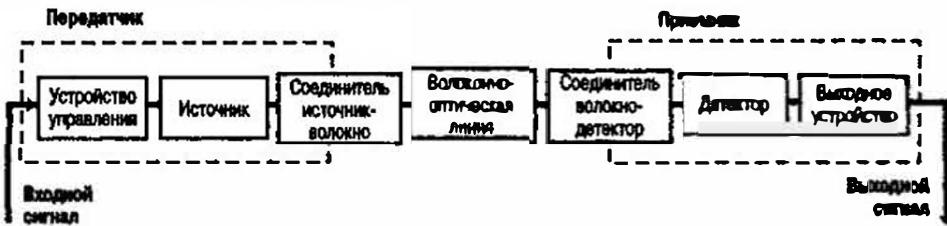
# *Революция в области коммуникаций*



Волоконная оптика в данной книге рассматривается как метод передачи информации из одной точки пространства в другую. При этом переносящей информацию средой является оптическое волокно (тонкая стеклянная или пластиковая нить). Оптическое волокно играет ту же роль, что и медный провод, используемый для передачи телефонных разговоров или компьютерных данных. Но в отличие от медного провода по волокну переносится свет, а не электрический сигнал. В связи с этим появляется множество преимуществ, что позволяет использовать оптическое волокно как несущую среду в различных областях техники — от телефонии до компьютеров и систем автоматизации.

Волоконно-оптическая система представляет собой линию, связывающую две электрические цепи. На рис. 1.1 представлены основные компоненты такой системы:

- *Передатчик*, который преобразует электрический сигнал в световой. Более точно, данное преобразование выполняет источник, представляющий собой либо светоизлучающий, либо лазерный диод. Управляющее устройство преобразует входной сигнал в сигнал определенной формы, необходимой для управления источником.
- *Волоконно-оптический кабель* — среда, по которой распространяется световой сигнал. Кабель состоит из волокна и запитных оболочек.
- *Приемник* предназначен для приема светового сигнала и его обратного преобразования в электрический сигнал. Двумя основными частями приемника являются детектор, непосредственно выполняющий функцию преобразования сигналов, и выходное устройство, которое при необходимости усиливает сигнал и изменяет его форму.
- *Соединители (коннекторы)* предназначены для подключения волокон к источнику, детектору и для соединения волокон между собой.



**Рис. 1.1.** Основные элементы волоконно-оптической линии связи (рисунок предоставлен AMP Incorporated)

Как и большинство других электронных устройств, передатчик и приемник могут быть реализованы как очень простое, так и достаточно сложное устройство. Четыре компонента ВОЛС (волоконно-оптической линии связи), перечисленные выше, являются основными элементами такой системы. В данной книге рассматриваются и другие элементы, входящие в состав более сложных линий и коммуникационных сетей, такие как разветвители, мультиплексоры и распределительные устройства. Но в любой волоконно-оптической линии обязательно используются передатчик, волокно, приемник и соединители.

## История волоконной оптики

Использование света для передачи информации имеет давнюю историю. Моряки применяли сигнальные лампы для передачи информации с помощью кода Морзе, а маяки в течение многих веков предупреждали мореплавателей об опасностях.

Клауд Чапп в девяностых годах XVIII века построил оптический телеграф во Франции. Сигнальщики располагались на вышках, расположенных от Парижа до Лилля по цепочке длиной 230 км. Сообщения передавалось из одного конца в другой за 15 минут. В Соединенных Штатах оптический телеграф соединял Бостон с островом Марта Вайньярд, расположенным недалеко от этого города. Все эти системы со временем были заменены электрическими телеграфами.

Английский физик Джон Тиндалл в 1870 году продемонстрировал возможность управления светом на основе внутренних отражений. На собрании Королевского общества было показано, что свет, распространяющийся в струе очищенной воды, может огибать любой угол. В эксперименте вода протекала над горизонтальным дном одного желоба и падала по параболической траектории в другой желоб. Свет попадал в струю воды через прозрачное окно на дне первого желоба. Когда Тиндалл направлял свет по касательной к струе, аудитория могла наблюдать зигзагообразное распространение света внутри изогнутой части струи. Аналогичное зигзагообразное распространение света происходит и в оптическом волокне.

Десятилетием позднее Александр Грэхем Белл запатентовал фотофон (рис. 1.2), в котором направленный свет использовался для передачи голоса. В этом устройстве с помощью системы линз и зеркал свет направлялся на плоское зеркало, закрепленное на рупоре. Под воздействием звука зеркало колебалось, что приводило к модуляции отраженного света. В приемном устройстве использовался детектор на основе селена, электрическое сопротив-

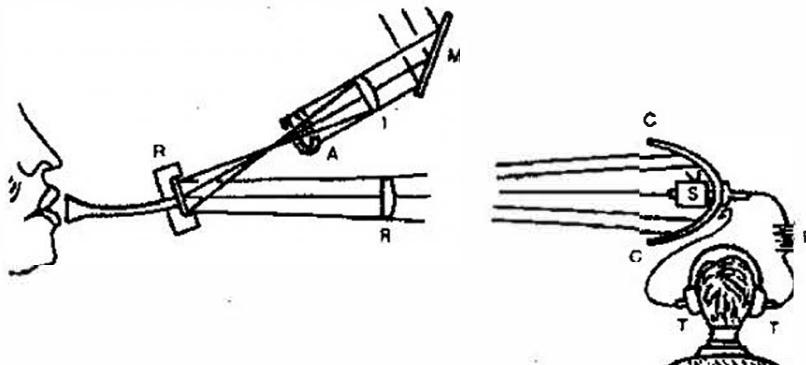


РИС. 1.2. Фотофон Александра Белла (рисунок предоставлен AMP Incorporated)

ление которого меняется в зависимости от интенсивности падающего света. Модулированный голосом солнечный свет, падающий на образец селена, изменял силу тока, протекающего через контур приемного устройства, и воспроизводил голос. Данное устройство позволяло передавать речевой сигнал на расстояние более 200 м.

В начале XX века были проведены теоретические и экспериментальные исследования диэлектрических волноводов, в том числе гибких стеклянных стержней.

В 50-е годы волокна, предназначенные для передачи изображения, были разработаны Брайеном О'Бриеном, работавшим в Американской оптической компании, и Нариндером Капани с коллегами в Императорском научно-технологическом колледже в Лондоне. Эти волокна нашли применение в световодах, используемых в медицине для визуального наблюдения внутренних органов человека. Доктор Капани был первым, кто разработал стеклянные волокна в стеклянной оболочке и ввел термин "волоконная оптика" (1956 год). В 1973 году доктор Капани основал компанию Kapton, специализирующуюся в области волоконно-оптических разветвителей и коммутаторов, рассматриваемых в главе 12.

В 1957 году Гордон Голд, выпускник Колумбийского университета, сформулировал принципы работы лазера как интенсивного источника света. Теоретические работы Чарльза Таунса совместно с Артуром Шавловым в Bell Laboratories способствовали популяризации идеи лазера в научных кругах и вызвали бурный всплеск экспериментальных исследований, направленных на создание работающего лазера. В 1960 году Теодор Маймен в Hughes Laboratories создал первый в мире рубиновый лазер. В этом же году Таунс продемонстрировал работу гелий-неонового лазера. В 1962 году лазерная генерация была получена на полупроводниковом кристалле. Именно такой тип лазера используется в волоконной оптике. Голду с большим опозданием, только в 1988 году, удалось получить четыре основных патента по результатам работ, выполненных им в 50-е годы и посвященных принципу работы лазера.

Использование излучения лазера как носителя информации не было оставлено без внимания специалистами по коммуникации. Возможности лазерного излучения для передачи информации в 10 000 раз превышают возможности радиочастотного излучения. Несмотря на это, лазерное излу-

чение не вполне пригодно для передачи сигнала на открытом воздухе. На работу такого рода линии существенно влияют туман, смог и дождь, равно как и состояние атмосферы. Лазерному лучу гораздо проще преодолеть расстояние между Землей и Луной, чем между противоположными границами Манхэттена. Таким образом, первоначально лазер представлял собой коммуникационный световой источник, не имеющий подходящей среды передачи.

В 1966 году Чарльз Као и Чарльз Хокхэм, работавшие в английской лаборатории телекоммуникационных стандартов, опубликовали статью о том, что оптические волокна могут использоваться как среда передачи при достижении прозрачности, обеспечивающей затухание (определенное потерей при передаче сигнала — прим. ред.) менее 20 дБ/км (децибел на километр). Они пришли к выводу, что высокий уровень затухания, присущий первым волокнам (около 1000 дБ/км), связан с присутствующими в стекле примесями. Был также указан путь создания пригодных для телекоммуникации волокон, связанный с уменьшением уровня примесей в стекле.

В 1970 году Роберт Маурер со своими коллегами из Corning Glass Works получил первое волокно с затуханием менее 20 дБ/км. К 1972 году в лабораторных условиях был достигнут уровень в 4 дБ/км, что соответствовало критерию Као и Хокхэма. В настоящее время лучшие волокна имеют уровень потерь в 0.2 дБ/км.

Не менее крупный успех был достигнут в области полупроводниковых источников и детекторов, соединителей, технологии передач, теории коммуникаций и других связанных с волоконной оптикой областях. Все это вместе с огромным интересом к использованию очевидных преимуществ волоконной оптики обусловило в середине и конце 70-х годов существенные продвижения на пути создания волоконно-оптических систем.

Военно-морские силы США внедрили волоконно-оптическую линию на борту корабля Little Rock в 1973 году. В 1976-м в рамках программы ALOFT военно-воздушные силы заменили кабельную оснастку самолета А-7 на волоконно-оптическую. При этом кабельная система из 302 медных кабелей, имевшая суммарную протяженность 1260 м и весившая 40 кг, была заменена на 12 волокон общей длиной 76 м и весом 1.7 кг. Военные были первыми и в деле внедрения волоконно-оптической линии. В 1977 году была запущена 2-км система со скоростью передачи информации 20 Мб/сек (мегабит в секунду), связавшая наземную спутниковую станцию с центром управления.

В 1977 году компании AT&T и GTE установили коммерческие телефонные системы на основе оптического волокна. Эти системы превзошли по своим характеристикам считавшиеся ранее незыблемыми стандарты производительности, что привело к их бурному распространению в конце 70-х и начале 80-х годов. В 1980-м AT&T объявила об амбициозном проекте волоконно-оптической системы, связывающей между собой Бостон и Ричмонд. Реализация проекта воочию продемонстрировала скоростные качества новой технологии в серийных высокоскоростных системах, а не только в экспериментальных установках. После этого стало ясно, что в будущем ставку надо делать на волоконно-оптическую технологию, показавшую возможность широкого практического применения.

По мере развития технологии столь же быстро расширялось и крепло производство. Уже в 1983 году выпускался одномодовый волоконно-оптический кабель (см. главу 4), но его практическое использование было связано со множеством проблем, поэтому на протяжении многих лет полностью ис-

пользовать такие кабели удавалось лишь в некоторых специализированных разработках. К 1985 году основные организации по передаче данных на большие расстояния, компании AT&T и МО, не только внедрили одномодовые оптические системы, но и утвердили их в качестве стандарта для будущих проектов.

Несмотря на то, что компьютерная индустрия, технология компьютерных сетей и управление производством не столь быстро, как военные и телекоммуникационные компании, брали на вооружение волоконную оптику, тем не менее и в этих областях также производились экспериментальные работы по исследованию и внедрению новой технологии. Наступление эры информации и возникшая в связи с этим потребность в более производительных телекоммуникационных системах только подхлестнули дальнейшее развитие волоконно-оптической технологии. Сегодня эта технология находит широкое применение и вне области телекоммуникаций.

Например, компания IBM, лидер в производстве компьютеров, объявила в 1990 году о выпуске нового быстродействующего компьютера, использующего контроллер канала связи с дисковыми и ленточными внешними накопителями на основе волоконной оптики. Это стало первым применением волоконной оптики в серийном оборудовании. Внедрение волоконного контроллера, получившего название ESCON, позволило передавать информацию с большей скоростью и на большие расстояния. Предшествующая модель контроллера на основе медных проводников имела скорость передачи данных 4.5 Мб/сек с максимальной длиной линии передачи в 400 футов. Новый контроллер работает со скоростью 10 Мб/сек на расстоянии в несколько миль.

В 1990 году Линн Моллинар, сотрудник Bellcore, продемонстрировал возможность передачи сигнала без регенерации со скоростью 2.5 Гб/сек на расстояние около 7500 км. Обычно волоконно-оптический сигнал необходимо усиливать и периодически восстанавливать его форму — примерно через каждые 25 км. При передаче волоконно-оптический сигнал теряет мощность и искажается. В системе Моллинара лазер работал в солитонном режиме и использовалось самоусиливающееся волокно с добавками эрбия. Солитонные (в очень узком диапазоне спектра — прим. ред.) импульсы не рассеиваются и сохраняют свою первоначальную форму по мере распространения по волокну. В то же самое время японской компанией Nippon Telephone & Telegraph была достигнута скорость 20 Гб/сек, правда, на существенно более короткое расстояние. Ценность солитонной технологии заключается в принципиальной возможности прокладки по дну Тихого или Атлантического океана волоконно-оптической телефонной системы, не требующей установки промежуточных усилителей. Однако с 1992 года солитонная технология остается на уровне лабораторных демонстраций и не находит пока коммерческого применения. Солитоны и легированые эрбием волокна будут обсуждаться в главе 15.

## Информационная эра

Как уже говорилось, Америка вступила в информационную эру, что в свою очередь влечет наступление века электроники. Четыре процесса, связанные с манипулированием информацией, основаны на применении электроники:

1. Сбор
2. Хранение
3. Обработка и анализ
4. Передача

Для реализации этих процессов используется достаточно современное оборудование: компьютеры, электронные офисы, разбросанные телефонные сети, спутники, телевидение и т.д. Оглянувшись вокруг, можно обнаружить массу подтверждений наступления новой эры. Ежегодный прирост услуг в области информационной индустрии составляет сейчас около 15%, и не наблюдается признаков замедления этого роста.

Мир быстро охватывается объединенной глобальной сетью. Сейчас можно послать данные со своего компьютера через всю страну так же легко, как позвонить из Нью-Йорка в Сан-Франциско. В офисах большие и малые компьютеры, вместе с другими электронными устройствами, объединены в сети. Инженеры используют компьютеры для создания новых компьютеров. Прочу вошли в жизнь домашние и персональные компьютеры. Эта книга написана на компьютере. Стало возможным написание и публикация книги без прикосновения к бумажному листу. Содержание книги в электронном виде просто передается из текстового редактора на принтер.

Ниже приводятся факты, свидетельствующие о важности и перспективности электроники в современной жизни.

- В США в 1988 году насчитывалось 165 миллионов телефонных аппаратов, тогда как в 1950-м их было только 39 миллионов. Кроме того, услуги, предоставляемые телефонными компаниями, стали гораздо разнообразнее.
- С 1950 по 1981 годы протяженность проводов телефонных систем возросла с 147 миллионов миль до 1.1 миллиарда.
- В 1990 году общая протяженность оптических волокон в телефонных системах США составила около 5 миллионов миль. К 2000 году она возрастет до 15 миллионов миль. При этом возможности каждого волокна соответствуют возможностям нескольких медных кабелей.
- В 1989 году в США было продано около 10 миллионов персональных компьютеров. Еще в 1976 году персональных компьютеров не было вообще. Сейчас это обычный элемент оборудования любого офиса и промышленного производства.
- В настоящее время в США через персональный компьютер и обычную телефонную сеть открыт доступ к тысячам компьютерных баз данных.
- Факсимильные сообщения (факсы) стали преобладать в деловой переписке.
- Первая телефонная система на волоконно-оптическом кабеле, установленная в 1977 году, позволяла передавать информацию со скоростью 44.7 Мб/сек и проводить переговоры одновременно по 672 каналам. Сегодня система Sonet, являющаяся стандартной системой в оптичес-

кой телефонии, позволяет передавать информацию с максимальной скоростью 10 Гб/сек, что примерно в 200 раз превосходит возможности первой оптической системы. Предполагается достижение и стандартизация существенно более высоких скоростей, которые пока не доступны на современных электроптических компонентах.

Во всех приведенных выше примерах фигурируют источники информации и средства их объединения. Под информацией здесь можно понимать как содержание телефонного разговора с другом, так и любой проект. Средства передачи информации из одного места в другое важны с точки зрения обладания полным объемом информации в любом месте страны. В качестве примера передачи информации можно привести как телефонный разговор с абонентом, находящимся на другом конце страны, так и разговор между соседними офисами, разделенными парой дверей. Телефонные компании все более широко используют одинаковые цифровые технологии как для передачи голоса, так и для передачи компьютерных данных. Это непривычно, но с точки зрения цифровых технологий передачи информации наш голос становится практически неотличимым от компьютерных данных. Перед передачей голос преобразуется в цифровые импульсы или числа, вид которых в точности соответствует компьютерным данным. Такого рода преобразования звукового сигнала в цифровой позволяют телефонным компаниям с меньшими искажениями передавать разговор. В большинстве новых телефонных систем используется именно цифровая технология. В 1984 году около 34% центральных телефонных станций использовали цифровое передающее оборудование. К 1994 году эта величина возросла до 82%. Волоконная оптика исключительно удобна для цифровых телекоммуникаций. Повышение требований к эффективности, надежности, скорости и экономичности передачи данных обеспечивается характеристиками волоконно-оптических систем.

## Кабельная сеть Америки

Становление кабельной сети Америки началось с телефонной сети. В самом начале кабельная сеть использовалась исключительно для передачи голоса, теперь же по ней передают не только голос, но и компьютерные данные, электроптические послания и видеоизображения.

Вторым примером кабельной сети является сеть кабельного интерактивного телевидения. Эта сеть не только распространяет телевизионные сигналы, но также позволяет пользователям участвовать в опросах общественного мнения, заказывать товары на дом, резервировать авиабилеты и столики в ресторанах, а также многое другое. Короче говоря, интерактивное кабельное телевидение становится двухсторонней коммуникационной линией. В будущем оно позволит не только принимать телевизионные программы, но и посыпать информацию прямо из дома. Такого рода системы тестировались в США, Европе, Японии, и в некоторых случаях использовалась волоконно-оптическая технология. Установка волоконно-оптической телевизионной кабельной системы в районе Квинс Нью-Йорка, начатая в 1991 году, обеспечивает передачу 150 каналов.

Банковские и финансовые услуги на дому, предоставляемые крупными банками в некоторых городах, также стали возможны благодаря наличию в США всеохватывающей кабельной сети. Работая за своим домашним компьютером или терминалом, можно проконтролировать наличие средств на

счете, осуществить перевод денег с одного счета на другой, купить акции, оплатить налоги и т.д.

Другой сферой внедрения кабельной сети является офис, оборудованный компьютерами. Здесь текстовые процессоры заменили печатные машинки. Компьютеры вытеснили бухгалтерские книги и инженерские кульманы. Потребность в обеспечении связи между различными электронными устройствами в офисе и за его пределами выполняют локальные компьютерные сети (LAN). Кроме того, многие локальные компьютерные сети подключены к обычной телефонной сети. И снова волоконная оптика является наиболее эффективной средой для обмена информацией по компьютерной сети.

В настоящее время электроника достаточно интенсивно используется в производстве. Управляемые с помощью компьютеров работы выполняют монотонную, опасную или тяжелую работу. В современном производстве требуется согласование различных операций, что возможно только на основе объединения управляющих электронных устройств в единую сеть. При этом возникает проблема влияния на управляющие сигналы электромагнитных шумов, появление которых неизбежно при работе агрегатов большой мощности. Для уменьшения вредного влияния электромагнитных шумов используются системы по экранированию медью кабеле. Кроме того, принимаются специальные меры по прокладке информационной кабельной сети в стороне от силовых кабелей. Поскольку оптическое волокно совершенно невосприимчиво по отношению к электромагнитному шуму, его применение в производстве будет расширяться.

## Телекоммуникации и компьютеры

До недавнего времени существовало четкое разграничение между тем, что составляло часть телефонной системы, и тем, что относилось к компьютерной системе. Например, телефонным компаниям было запрещено участие на рынке компьютерной технологии. Сегодня запрет формально остается в силе, но действие его в существенной мере ослаблено. Компьютеры могут теперь передавать данные по телефонным линиям, а телефонные системы преобразуют голос в цифровой (подобный компьютерному) сигнал перед передачей. Телефонные и компьютерные компании все чаще конкурируют на рынке информационных технологий.

Причины, приведшие к ослаблению данного запрета, понятны. Развитие электронной технологии подразумевает тесное взаимодействие ее различных направлений. Различие между компьютерной и телефонной технологиями ослаблено еще более в 1982 году после распада компании AT&T, самой крупной корпорации в мировом масштабе. Информационная сеть становится единой системой. Сейчас все труднее определить, за какую часть сети ответственны телефонные компании, какая часть сети принадлежит компьютерным компаниям, а какая находится в собственности домовладельца.

Развитие кабельной сети в США, вместе с включением передачи компьютерных данных в сферу услуг, оказываемых телефонными компаниями, являются лучшим доказательством преимуществ, связанных с наступлением информационной эры. Ранее телефонные компании обеспечивали двустороннюю связь между абонентами, называемую POTS (Plain Old Telephone Services — обычные старые телефонные услуги). В настоящее время появилось множество других услуг, таких как автоматический "дозвон", автоответ-

чик и т.д. (эти услуги называют PANS — Pretty Amazing New Services — просто удивительные новые услуги). Телефонные компании нацелены на создание интегрированных цифровых сетей (Integrated Services Digital Network, ISDN), предназначенных для передачи по телефонной сети голоса, данных и видеоизображения. Такого рода сети представляют возможность передать любого вида информацию куда угодно и в любое время.

## **Волоконно-оптическая альтернатива**

Обсуждаемая в этой главе глобальная сеть требует эффективной среды для передачи информации. Традиционные технологии, основанные на применении медного кабеля или микроволновой передаче, имеют недостатки и существенно уступают по характеристикам волоконной оптике. Например, медные кабели характеризуются ограниченной скоростью передачи информации и подвержены влиянию внешних полей. Микроволновая передача, хотя и может обеспечить достаточно высокую скорость передачи информации, требует использования дорогостоящего оборудования и ограничивается зоной прямой видимости. Волоконная оптика позволяет передавать информацию с существенно более высокими скоростями по сравнению с медными кабелями и имеет гораздо более приемлемую стоимость и меньше ограничений, чем микроволновая технология. Возможности волоконной оптики только начинают реализовываться. Уже сейчас волоконно-оптические линии превосходят по своим характеристикам аналоги, основанные на медном кабеле, и нужно учитывать, что технологические возможности медных кабелей имеют меньший потенциал развития, чем начинаяющая развиваться волоконно-оптическая технология. Волоконная оптика обещает стать неотъемлемой частью информационной революции, равно как и частью всемирной кабельной сети.

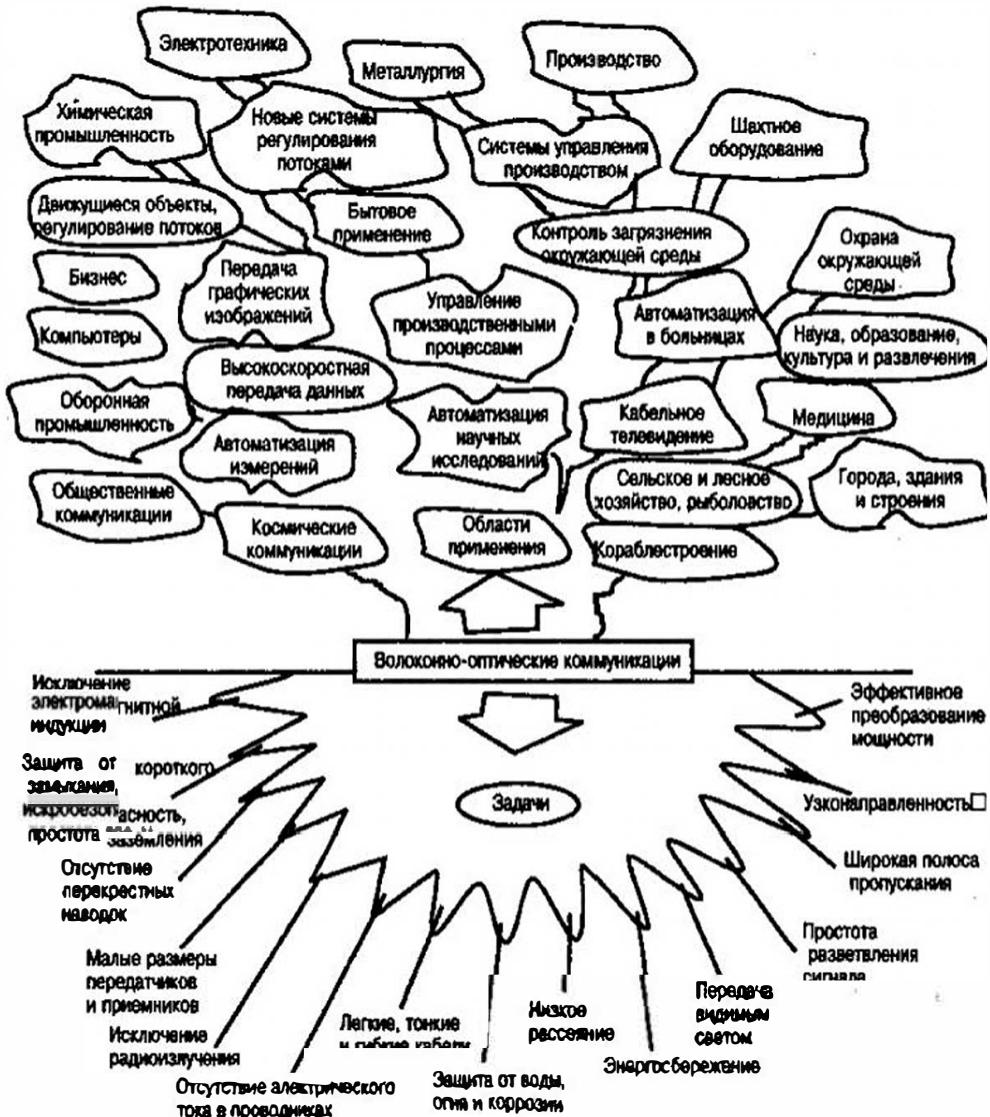
Волоконная оптика будет влиять на жизнь каждого человека, порой практически незаметно. Приведем несколько примеров незаметного вхождения волоконной оптики в нашу жизнь: трансляция голоса через всю страну; распространение по кабелю телевизионного изображения в ваш дом по кабелю; соединение электронного оборудования в вашем офисе с оборудованием в других офисах; соединение электропитых блоков в вашем автомобиле; управление производственным процессом в промышленности.

На рис. 1.3 изображены в виде дерева области применения волоконной оптики и решаемые ею задачи. Ветви дерева представляют собой основные направления использования, а причины применения именно волоконной оптики показаны в виде питающих дерево корней. Из рисунка видно, что волоконная оптика используется в различных областях, и на это имеются важные причины.

Волоконная оптика является новой технологией, только начинаяющей свое развитие, но уже доказана необходимость ее применения как среды передачи для различных прикладных задач, а характеристики волоконной оптики позволяют в будущем существенно расширить область ее применения.

## **Заключение**

- Передатчик, кабель, приемник и соединители — четыре основные части волоконно-оптической линии.



**Рис. 1.3.** Применение волоконной оптики (рисунок предоставлен Hitachi America Ltd).

Современная электроника является важной частью информационной технологии.

Использование электроники с целью сбора, хранения, обработки и передачи информации привело к созданию кабельных сетей.

Практическое использование волоконной оптики в области коммуникаций началось в середине — конце 1970-х годов с экспериментальных проектов. Сейчас эта технология вполне утвердилась.

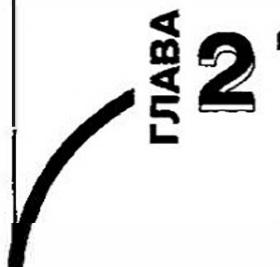
- Расширение кабельной сети страны будет продолжаться.
- Волоконная оптика играет важную роль в сетевых технологиях информационной эры.
- Возможности современной волоконной оптики превосходят возможности традиционных технологий передачи информации, что делает ее привлекательной в эпоху развития информационных технологий.

### Контрольные вопросы



1. Волоконно-оптическая система передает информацию в виде: А. Электричества В. Света С. Звука Д. Изображения
2. Назовите четыре основные части волоконно-оптической линии.
3. Перечислите три из четырех задач процесса обработки информации.
4. В каком из четырех направлений обработки информации использование волоконной оптики наиболее выгодно?
5. (Да/Нет) Волоконная оптика является настолько специальной технологией, что большинство людей в своей жизни вряд ли будут сталкиваться с ее прямыми или косвенными проявлениями.
6. Назовите пять направлений использования волоконной оптики, по возможности связанные в вашей работой.
7. В 1970-х интерес к волоконно-оптическим технологиям впервые возник в двух из ниже перечисленных областей:
  - А. Вооруженные силы/правительство
  - В. Компьютерная индустрия
  - С. Авиационная промышленность
  - Д. Телефонная индустрия
  - Е. Автоматизация
  - Ф. Робототехника
  - Г. Медицина
  - Н. Энергетика
8. (Да/Нет) Передача информации с помощью света получила широкое распространение после появления лазеров и оптического волокна.

# *Передача информации*



В предыдущей главе говорилось о важности электронной информации в современном мире. В этой главе представлены основные характеристики сигналов и принципы их передачи, без понимания которых трудно оценить роль оптического волокна в процессе современной электронной передачи данных. Идеи, изложенные ниже, являются фундаментальными не только для применения оптического волокна, но и для любой электронной передачи данных. Здесь не ставится задача глубокого анализа теории коммуникаций и ее применения в электронике. Цель главы — вводное изложение тех принципов этой теории, без которых невозможно обсуждение применения волоконной оптики.

## **Коммуникации**

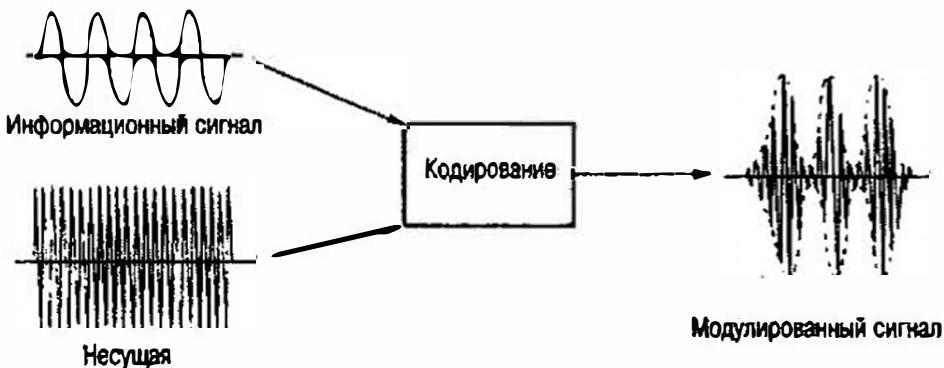
Коммуникация — это процесс установления связи между двумя точками пространства и передачи информации между ними. Информация передается в виде сигнала. В электронике сигналом может быть все, от компьютерных цифровых импульсов и до импульсов, модулированных радиоволнами УКВ-диапазона. Передача информации включает три этапа: кодирование, непосредственно передачу и декодирование.

Кодирование — это процесс записи информации на языке несущей среды. Колебание голосовых связок приводит к кодированию голоса в виде модулированной плотности воздуха, являющегося в данном случае средой, переносящей информацию. Пока голосовые связки неподвижны, никакая информация по воздуху не передается. Колебания, не являясь информационным сигналом, на определенной частоте могут переноситься из одной точки пространства в другую, но не передавать никаких данных до тех пор, пока информация не будет каким-либо способом в них закодирована. Перенесение информации на несущую среду предполагает модификацию несущей среды и называется модуляцией.

На рис. 2.1 схематически представлен процесс переноса информации на несущую среду. Огибающая высокочастотного сигнала, который сам по себе не несет никакой информации, приобретает форму низкочастотного инфор-

**модионного сигнала.** Форма несущей будет отражать передаваемую информацию. Представленный на рисунке простой пример иллюстрирует запись небольшого количества информации, по основанныя па нем концепция позволяет записывать достаточно большой объем данных. На показанном примере описан код Морзе. На немодулированный несущий сигнал накладываются **низкочастотные участки одинарной или двойной длительности**, соответствующие точкам и тире кода Морзе.

Как только информация закодирована в виде модуляции несущей среды, она может быть передана по воздуху, по медным кабелям, через космическое пространство па спутник или по оптическому волокну.



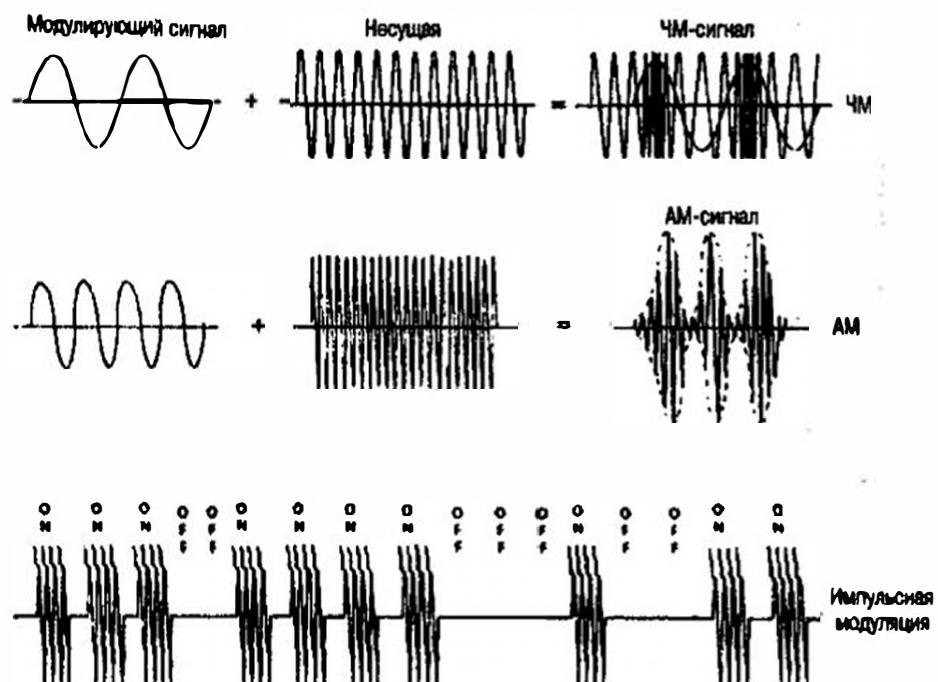
**Рис. 2.1.** Сигнал

В процессе **декодирования** на другом конце линии передачи приемник отделяет информационный сигнал от несущей. Человеческое ухо анализирует колебания воздуха и переводит их в нервные сигналы. Радиоприемник также отделяет информационный сигнал от несущей. В закодированном сигнале, представленном па рис. 2.1, приемник вырезает высокочастотный сигнал, сохраняя при этом низкочастотный для дальнейшей обработки. По оптическому волокну информация переносится светом.

Представьте, что вы пишите письмо своему другу, используя компьютер. Набирая буквы па клавиатуре, вы кодируете их в виде цифровых импульсов, используемых в компьютере. Когда письмо написано, его необходимо отправить на компьютер вашего друга. Для этого потребуется **модем** — устройство, преобразующее цифровые импульсы в аудиоимпульсы, легко передаваемые по телефонным линиям па телефонную станцию (узел).

Центральный телефонный узел принимает сообщение, переведит его обратно в цифровые импульсы и передаст их вместе с множеством других сигналов по оптическому волокну па другой центральный узел. Данный узел декодирует цифровые импульсы в аудиосигнал и передает сообщение вашему другу, чей модем, в свою очередь, преобразует аудиосигнал в компьютерные данные. Теперь ваш друг сможет прочесть письмо на экране своего компьютера, либо распечатав его на принтере.

Существует много способов модуляции несущей среды. На рис. 2.2 представлены три основных варианта модуляции.



**Рис. 2.2.** Примеры модуляции (рисунок предоставлен AMP Incorporated)

1. **Амплитудная модуляция (AM).** Используется в средневолновом радиодиапазоне. При этом амплитуда несущей волны варьируется в соответствии с амплитудой информационного сигнала.
2. **Частотная модуляция (ЧМ).** В данном случае модулируется частота несущей волны в зависимости от изменения амплитуды передаваемого сигнала. Таким образом, сигнал модулирует частоту несущей, а не ее амплитуду. В коротковолновом радиодиапазоне применяется именно этот способ модуляции.
3. **Импульсная модуляция (ИМ).** Технология импульсной модуляции основана на переводе аналогового сигнала (такого, например, как голос) в цифровые импульсы. Голос может быть представлен серией чисел. При этом величина каждого числа находится в строгом соответствии с амплитудой голоса. Импульсная модуляция в основном используется для передачи голосового сигнала вдоль волоконно-оптических телефонных линий. Ниже ИМ будет рассмотрена более подробно.

## Аналоговый и цифровой сигналы

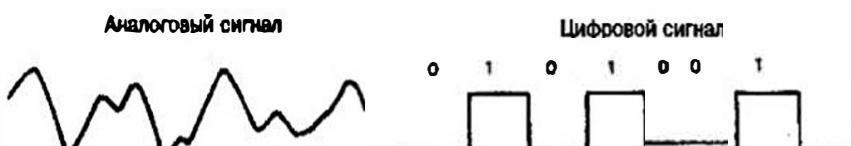
Мы живем в мире аналоговых сигналов. *Аналоговый* сигнал подразумевает непрерывное изменение своих параметров, подобное движению конца секундной стрелки вдоль окружности циферблата часов. Голос является аналоговым сигналом, поскольку голосовые колебания могут иметь различную амплитуду в любой точке звукового диапазона. Звук также является аналоговым сигналом, поскольку может изменяться в широком диапазоне. Электронное оборудование типа передающих и принимающих устройств использует аналоговые цепи для обеспечения непрерывного изменения параметров. Аналоговое электронное оборудование было распространено до появления компьютеров.

Рассмотрим электрический свет, яркость которого регулируется с помощью реостата. Вращение ручки реостата для установления необходимой яркости света является аналоговой операцией, причем яркость изменяется непрерывно. У системы отсутствуют какие-либо дискретные состояния, так что можно легко регулировать яркость, резко прибавляя или убавляя ее.

Напротив, *цифровой* сигнала подразумевает дискретность значений параметров системы, проявляющуюся, например, в высвечивании значений времени на электронных часах. В цифровых системах вся информация существует в виде цифровых импульсов.

В отличие от ламп с реостатными регуляторами яркости, лампы с трехкнопочным переключателем яркости являются цифровыми устройствами. Каждому положению переключателя этих ламп соответствует определенный уровень яркости. *Никаких других промежуточных уровней яркости не существует*. На рис.2.3 представлены примеры аналогового и цифрового сигналов.

В электронных коммуникациях фундаментальной является возможность преобразования аналогового сигнала в цифровой и наоборот. Цифровые стереосистемы используют запись музыкальных произведений в цифровой форме в виде серии чисел, представляющих собой кодировку информации об аналоговом музыкальном сигнале. Электронные проигрывающие устройства



**Рис. 2.3. Аналоговая и цифровая информация**

ства цифровых стереосистем преобразуют цифровой сигнал в аналоговый, соответствующий звучанию музыки.

## Основы цифрового сигнала: биты и байты

В основе любой цифровой системы лежит понятие бита (сокращение от английского *binary digit* — двоичный разряд). Бит является основной единицей цифровой информации, принимающей одно из двух значений: 1 или 0.

Существует много способов представления бита. В электронике достаточно общим является наличие или отсутствие некоторого уровня напряжения: наличие напряжения соответствует 1, а его отсутствие — 0. Значение одного бита 1 или 0 может представлять только одно состояние системы — такое как "включено" или "выключено". Например, состояние лампы может быть представлено 0, если она выключена, и 1 во включенном состоянии:

Выключена = 0

Включена = 1

Один бит информации, таким образом, имеет достаточно ограниченную емкость. Для описания состояний лампы с переключателем на три уровня яркости мы можем использовать 2 бита:

Выключена = 00

Включена = 01

Средний уровень яркости = 10

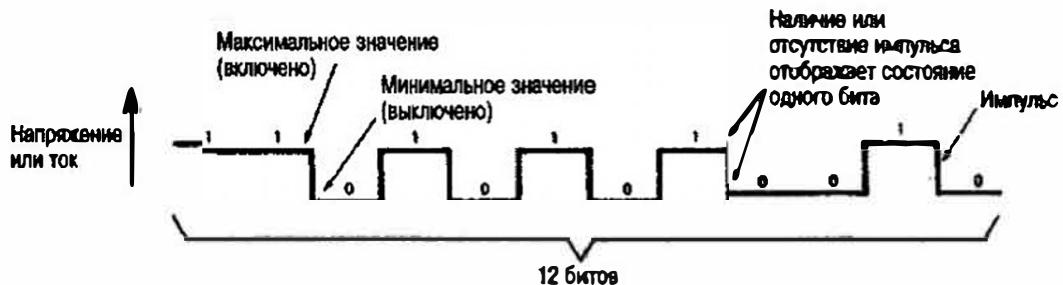
Максимальный уровень яркости = 11

Два бита позволяют воспроизводить больший объем информации, чем один бит. В примере с лампой 2 бита позволяют различать четыре различных состояния лампы. Чем больше битов используется в одном блоке, тем больше его информационная емкость. В компьютерах обычно применяют блоки из 8 битов (либо с числами, кратными 8, такими как 16 или 32).

Восьмибитовый блок называется *байтом*. В одном байте можно с запасом хранить цифровую информацию о всех буквах, числах и других символах печатной машинки или клавиатуры компьютера. Использование 8 битов допускает 256 различных вариантов цепочек из 1 и 0. Число различных комбинаций или значений цепочек длиной в  $n$  бит равно  $2^n$ . Например, 16 битов дают 65536 комбинаций. При добавлении одного бита число возможных комбинаций удваивается.

Схематическое изображение цепочки импульсов представлено на рис. 2.4. Переход из одного состояния в другое вдоль цепочки импульсов происходит мгновенно. Подобного рода упрощенные диаграммы отражают характеристики цепочек импульсов и дают инженерам и техникам возможность сравнивать их между собой.

Цепочка импульсов соответствует последовательности 1 и 0 цифровой информации и может представлять собой чередование интервалов высокого и низкого уровней напряжения, либо его наличие и отсутствие. На языке

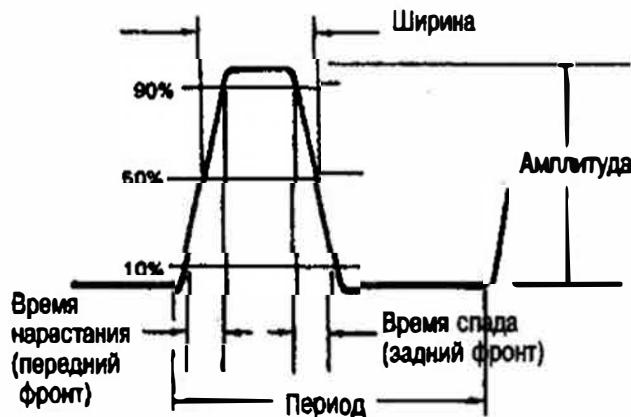


**Рис. 2.4.** Идеальная последовательность импульсов  
(рисунок предоставлен AMP Incorporated).

электроники цифра 1 представляет наличие напряжения, либо его максимальное значение. Цифра 0 — отсутствие напряжения, либо его минимальное значение. Таким образом, можно говорить о 1 как о состоянии *включено*, или *максимуме*, а о 0, как о состоянии *выключено*, или *минимуме*.

В действительности изменение амплитуды импульса не происходит мгновенно, как показано на рис. 2.4. Электронные системы имеют конечное время срабатывания — требуется определенное время для того, чтобы значение напряжения или мощности светового сигнала перевести из состояния включено в состояние выключено, либо осуществить переключение между максимальным (высокое) и минимальным (низкое) значениями. Имеется также ограничение на длительность импульса. Даже в компьютерных системах, допускающих переключение от тысячи до миллиона импульсов в секунду, требуется одна миллионная или одна миллиардная доля секунды на процесс переключения.

При решении инженерных задач, связанных с цифровыми системами, необходимо учитывать форму импульса. Рис. 2.5 показывает различные характеристики импульса.



**Рис. 2.5.** Форма импульса

**Амплитуда** характеризует высоту импульса и уровень энергии в импульсе. Величина энергии может определяться напряжением в цифровых системах или оптической мощностью в волоконно-оптических системах. Отметим, что в различных системах используются разные виды энергии.

**Время нарастания** — время, в течение которого импульс увеличивается от 10% до 90% уровня максимальной амплитуды.

**Время спада**, противоположное времени нарастания, соответствует интервалу уменьшения амплитуды от 90% до 10%. Время нарастания и спада в ряде случаев может различаться.

- *Ширина импульса* соответствует временному интервалу, в течение которого амплитуда импульса превосходит уровень в 50% от максимальной амплитуды.
- *Длительность бита (период)* — временной интервал, приходящийся на один импульс. Большинство цифровых систем используют импульсы определенной длительности или специальные тактирующие импульсы. Импульс может существовать в течение заложенной в системе длительности бита. Например, представим последовательность из пяти 0. Как узнать, что это не четыре или, скажем, шесть 0? По системным часам определяется время, в течение которого ничего не происходит, и по его длительности можно судить о прохождении именно пяти бит, а не четырех или шести.

Системные часы (таймер) обеспечивают импульсы постоянной длительности (тактирующие импульсы) для определения длительности информационного бита. Каждый период (длительность) бита определяется одним или несколькими длительностями тактирующих импульсов. Тактирующие импульсы напоминают колебания метронома: в обоих случаях необходимо провести определенную операцию за заданный интервал времени (извлечь из музыкального инструмента ноту или распознать электрический импульс в электронном устройстве).

Время нарастания является очень важным параметром в электронике и волоконной оптике, поскольку оно ограничивает скорость работы системы. Действительно, скорость, с которой импульс может быть включен и выключен, будет определять максимальную частоту возникновения импульсов. Наиболее простой путь увеличения скорости работы системы — уменьшение времени нарастания и спада импульса, ускоряя тем самым процесс включения и выключения импульсов. При этом через систему проходит большее количество импульсов в течение заданного интервала времени. Даже если амплитуда импульса и его ширина остаются без изменений, уменьшение времени нарастания приводит к увеличению скорости работы. Уменьшение времени нарастания и спада импульса позволяет уменьшить и ширину импульса, что приводит к еще большему увеличению скорости работы. Наоборот, при увеличение времени нарастания импульса снижается скорость работы системы.

Ниже, в главе 10 будет рассмотрено, что биты 1 и 0 могут быть сформированы не только простым включением и выключением напряжения, но и другими способами. Различные форматы кодировки 1 и 0 имеют собственные преимущества и недостатки при передаче информации. Выше использовано представление 1 и 0 в виде состояний высокого и низкого напряжения, совпадающих по длительности с заданной длительностью одного бита. В других кодировках возможно использование обоих состояний высокого и низкого напряжения в течение интервала один бит для задания 1 или 0. Таким образом, общими чертами кодировки в цифровых системах является использование 1 и 0, то есть высокого и низкого состояний.

## Преимущества цифровых систем

Применение цифровых сигналов в компьютерах естественно: они являются цифровыми по природе. Использование цифровой технологии и дво-

ичного представления чисел необязательно. Тем не менее с точки зрения компьютерного проектирования этот способ наиболее приемлем. Транзисторы и интегральные схемы, включающие в себя тысячи транзисторов, работают как очень быстрые переключающие устройства.

Телефонные компании также используют цифровые технологии при передаче голоса в виде цифрового сигнала. В чем преимущество такого решения? Сигнал при передаче на любое расстояние испытывает искажения. Даже если голос без искажений переводится в электронный аналоговый сигнал, за время, пока он достигнет приемного устройства, он будет искажен. К сожалению, приемное устройство не в состоянии исправить эти искажения, так как не обладает информацией о его первоначальной форме.

При использовании цифровых импульсов ситуация меняется. Цифровой импульс имеет строго заданную форму. Приемное устройство знает, как выглядят импульсы, ему достаточно получить информацию о числе импульсов и порядке их следования. Таким образом, приемное устройство может исправлять искажения цифрового сигнала, правильно восстанавливая его первоначальную форму.

## Информационная емкость

Любая среда, переносящая импульсы, имеет ограничение на объем передаваемой информации. Объем информации, который можно передать по данному каналу, характеризует его информационную емкость. Существует несколько способов определения данного параметра. В телефонных линиях емкость определяется числом голосовых каналов. Голосовой канал — это частотный диапазон, достаточный для передачи голоса. Поскольку верхняя частотная граница человеческого голоса соответствует примерно 4 КГц, то голосовой канал должен иметь пропускную способность, равную 4 КГц. На заре становления телефонных линий каждый телефонный провод предназначался для передачи одного голоса. Сегодня одна телефонная линия служит для одновременного соединения тысяч абонентов. Она, таким образом, характеризуется тысячами голосовых каналов.

Пропускная способность (bandwidth, частотная ширина канала, полоса пропускания) определяется скоростью передачи информации по каналу. Например, если оптическое волокно имеет пропускную способность 400 Мгц, то оно позволяет передавать сигналы вплоть до этого предела.

В цифровых системах емкость измеряется в битах в секунду (бит/сек) или бодах. В телефонных системах один цифровой звуковой канал требует 64000 бит/сек. Цифровая система, таким образом, занимает более широкий частотный диапазон, чем соответствующая аналоговая система. Аналоговая телефонная система занимает 4 КГц для передачи голоса; цифровая система потребляет в 16 раз больше — 64 КГц. Простые цифровые телефонные системы, передающие 672 голоса по одной линии, имеют скорость 44.7 мегабита в секунду (Мб/сек).

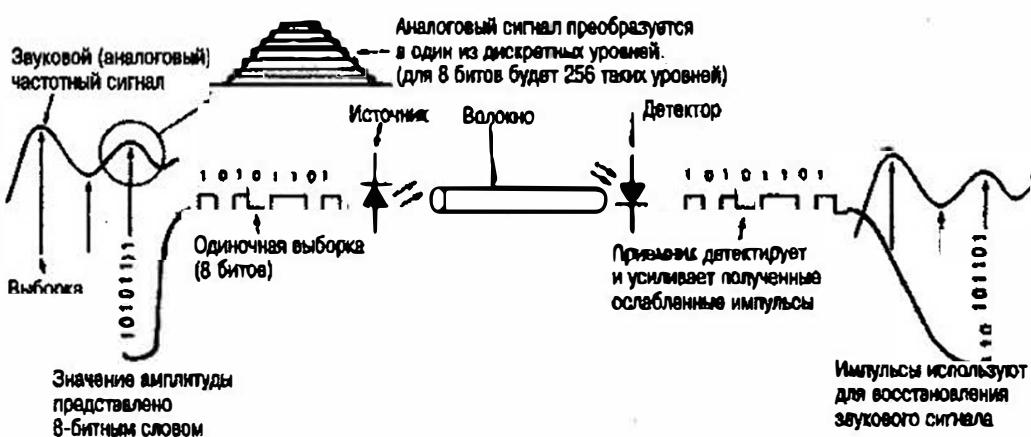
Технологии, позволяющие построить такие системы, — импульсная модуляция (ИМ) и мультиплексирование.

## Импульсная модуляция и мультиплексирование

Технология преобразования аналогового звукового сигнала в цифровой сигнал называется импульсной модуляцией (ИМ). Мультиплексирование с разделением по времени позволяет передавать по одной линии несколько звуковых каналов.

Теория коммуникаций утверждает, что аналоговый сигнал, подобный голосу, может быть преобразован в цифровой, если частота выборки по крайней мере в два раза превосходит его максимальную частоту. Верхняя частотная граница звукового сигнала в телефонии составляет 4000 Гц, что соответствует частоте выборки устройства ИМ 8000 раз в секунду. Выборка представляет собой процесс считывания амплитуды звукового сигнала. Результат каждого считывания записывается в виде 8-битового числа. Восьми битов достаточно для записи информации о 256 различных результатах считывания амплитуды. Поскольку каждое считывание записывается в виде 8-битового числа и каждую секунду происходит 8000 считываний, то информационная емкость одного звукового канала составляет 64000 бит/сек (8000 считываний x 8 бит/считывание = 64000 бит). На приемном конце аналогичные правила выполняются для обратного процесса декодирования и восстановления звукового сигнала. На рис. 2.6 схематически представлена идея ИМ. Существует много способов конструирования и использования ИМ-систем, общими для которых является изложенная выше идея.

Передача 64 000 битов в секунду не представляет большой проблемы для стандартной линии. Для полного использования информационной емкости линии телефонные компании передают несколько телефонных каналов по Одной линии. Может возникнуть впечатление, что каналы используются



**Рис. 2.6.** Импульсное модулирование  
(рисунок предоставлен AMP Incorporated)

одновременно, хотя это не так. Сначала передается часть первого разговора, затем часть второго, часть третьего и так далее. Устройство, позволяющее комбинировать передачу различных сигналов по одной линии, называется **мультиплексором**. Скорость передачи системы при этом позволяет передавать все сигналы по очереди. *Демультиплексор* производит обратную операцию и разделяет поступающие сигналы.

*Мультиплексированием с разделением по времени* (*Time-division multiplexing, TDM*) называется технология мультиплексирования, отводящая каждому звуковому каналу определенную временную квоту. Существуют также другие виды мультиплексирования, такие как: *мультиплексирование с частотным разделением* (*Frequency-division multiplexing, FDM*) и *мультиплексирование с разделением по длиной волны* (*Wave-division multiplexing, WDM*). FDM приписывает различным информационным каналам несущие с различной частотой. Кабельное телевидение использует именно FDM. WDM используется исключительно в оптических коммуникациях и будет обсуждаться в главе 12.

Волоконная оптика крайне важна для подобных телефонных систем, так как ее возможности по передаче информации превосходят возможности систем на медном кабеле.

## Децибел

Децибел (dB) — важная величина, которая используется как в волоконной оптике, так и в электронике для выражения усиления или затухания в системе в целом или в ее компонентах. Транзистор, например, может усиливать сигнал, увеличивая амплитуду его напряжения, тока или мощности. Это **увеличение называется усилением**. Аналогично, затухание — это **уменьшение напряжения, тока или мощности**. Основные уравнения, определяющие децибел, следующие

$$dB = 20 \log_{10} \left( \frac{V_1}{V_2} \right)$$

$$dB = 20 \log_{10} \left( \frac{I_1}{I_2} \right)$$

$$dB = 10 \log_{10} \left( \frac{P_1}{P_2} \right)$$

где  $V$  — напряжение,  $I$  — ток и  $P$  — мощность. Децибел, таким образом, характеризует отношение двух напряжений, токов или мощностей. Отметим, что в случае напряжения и тока отношение логарифмов умножается на 20, а в случае мощности — на 10.

В основном децибел используется для сравнения входной и выходной мощности системы, электрической цепи или отдельного компонента устройства. Количество децибел говорит о влиянии устройства на сигнал. Транзистор, как правило, усиливает сигнал. Другие компоненты могут приводить к затуханию сигнала. Если  $P_{out}$  — выходная мощность и  $P_{in}$  — входная мощность, то:

$$dB = 10 \log_{10} \left( \frac{P_{out}}{P_{in}} \right)$$

$$P_{in} \rightarrow \text{устройство} \rightarrow P_{out}$$

Децибелами описывается, как влияют на систему различные включаемые в нее компоненты. Иногда, например, требуется разрезать кабель и установить на свободные концы соединители для стыковки и расстыковки отдельных отрезков кабеля. Включение соединителей вносит некоторое затухание, которое выражается в децибелах. В других случаях для обеспечения затухания в систему специально включается устройство, называемое *аттенюатор*.

В волоконной оптике, как правило, имеют дело с затуханием оптической мощности. (Электронные устройства в передающем и принимающем устройствах могут обуславливать усиление напряжения и тока.) Источник испускает оптическую мощность. По мере перемещения по волокну свет теряет свою мощность. Эти потери выражаются в децибалах. Например, если источник имеет мощность 1000 микроватт (мкВт) и приемник принимает сигнал мощностью 20 микроватт, то затухание в системе составляет 17 дБ:

$$\begin{aligned} \text{Loss} &= 10 \log_{10} \left( \frac{P_r}{P_s} \right) \\ &= 10 \log_{10} \left( \frac{20}{1000} \right) \\ &= -16.989 \text{ дБ} \end{aligned}$$

где  $P_r$  — мощность испускаемая источником, а  $P_s$  — мощность принимаемого сигнала.

Таблица 2.1 демонстрирует долю сохраняющейся энергии при различных величинах затухания. Потери в 10 дБ (-10 дБ) соответствуют 90% энергии, и только 10% достигают приемника. Дополнительное увеличение затухания на 10 дБ приводит к увеличению потерь на порядок. Заметим, что уровень потерь в 3 дБ соответствует потере половины мощности.

Волоконно-оптические линии обычно допускают потери на уровне в 30 дБ, что соответствует 99.9% потери мощности при передаче сигнала. Если источник имеет мощность 1000 мкВт, то в этом случае только 1 мкВт достигнет приемника. Поэтому в волоконной оптике большое внимание уделяется мощности источника, потерям в системе и чувствительности приемника по отношению к слабым сигналам.

Напомним, что затухание, выраженное в децибалах, имеет отрицательную величину. В волоконной оптике обычной практикой является опускание отрицательного знака и оперирование с затуханием, скажем, в 6 дБ. В действительности затухание равно -6 дБ. Эта величина получается из решения уравнения, определяющего затухание. Но в речи и даже в сводной таблице отрицательный знак опускается, не приводя к существенной неопределенности. Если выражение затухания используется в каком-либо уравнении, не забывайте приписывать ему отрицательный знак! (Неопределенность может возникнуть из-за того, что некоторые уравнения адаптированы с учетом отрицательной величины затухания.)

**Таблица 2.1. Затухание и децибелы.**

Затухание (дБ)	Оставшаяся мощность (%)	Затухание (дБ)	Оставшаяся мощность (%)
0.1	97.7	4	39.8
0.2	95.5	5	31.6
0.3	93.3	6	25.1
0.4	91.2	7	19.9
0.5	89.1	8	15.8
0.6	87.1	9	12.6
0.7	85.1	10	10.0
0.8	83.2	20	1.0
0.9	81.1	30	0.1
1	79.4	40	0.01
2	63.1	50	0.001
3	50.1	60	0.001

Иногда в соотношении, используемом для определения затухания или усиления, используется постоянное значение  $P_{in}$ . В волоконной оптике обычно используется величина в 1 милливатт (мВт).

$$\text{dB} = 10 \log_{10} \left( \frac{P_1}{1\text{mW}} \right)$$

дБм (dBm) означает "децибел, соотнесенный к милливатту". В этом случае, как правило, используется отрицательная величина. Величина -10 дБм означает, что Р на 10 дБ меньше, чем 1 мВт, или равна 100 мкВт. Аналогично, -3 дБм соответствует 500 мкВт. Единицы дБм часто используются инженерами и техниками.

На рис. 2.7 представлены соотношения дБм с различными величинами мощности милливаттного и микроваттного диапазонов. Отметим, что относительно небольшой диапазон значений дБм позволяет охватить достаточно большой диапазон мощностей.

Иногда используется другая величина — дБмк, децибелы соотнесенные с 1 Вт. Эта величина полностью соответствует дБм, различие только в относительной величине мощности (1 Вт вместо 1 мВт).

## Заключение

- Коммуникация включает в себя процессы кодирования, декодирования и передачи информации.
- В цифровых системах используются биты, представляющие единицы и нули двоичного кода.

10 мВт = +10дБм 5 мВт  
= +7дБм 1 мВт = 0 дБм  
500мкВт = -3дБм  
100мкВт = -10дБм  
50мкВт = -13дБм  
10мкВт = -20дБм 5  
мкВт = -23 дБм 1 мкВт =  
-30 дБм 100нВт = -  
40дБм 10нВт = -50дБм  
1 нВт = -60 дБм  
100пВт = -70дБм  
10пВт = -80дБм 1пВт  
= -90дБм

РИС. 2-7. Соотношение мощности и единиц дБм.

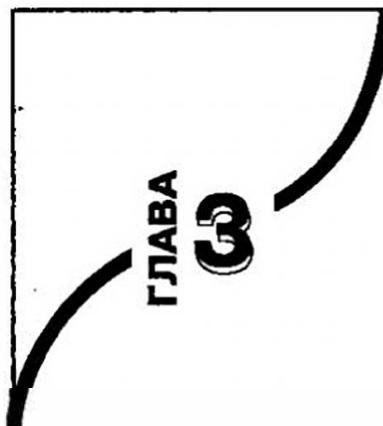
- Информационная емкость определяет объем информации, который может быть передан по коммуникационной линии.
- Импульсная модуляция преобразует аналоговый сигнал в цифровой.
- Мультиплексирование осуществляет передачу нескольких сигналов по одной коммуникационной линии.
- Децибелы используются для выражения усиления или затухания сигнала в линии.



### Контрольные вопросы

- Назовите три направления развития коммуникаций. Представьте примеры каждого из них.
- Дайте определение модуляции.
- Опишите аналоговый сигнал. Опишите цифровой сигнал.
- Является ли следующая информация аналоговым или цифровым сигналом: 1101101.
- Опишите импульс. Укажите на амплитуду, время нарастания, время спада и ширину импульса.
- Каковы емкости аналогового звукового канала и цифрового звукового канала?

7. Какое количество бит в секунду необходимо передавать в ИМ системе, описанной в данной главе, для организации пяти звуковых каналов, 50 звуковых каналов?
8. Назовите технологию, позволяющую передавать пять звуковых каналов по одному оптоволоконному кабелю.
9. В каком случае требования к полосе пропускания строже, для аналогового или цифрового канала?
10. Сколько милливатт имеет сигнал, мощность которого в относительных единицах составляет 0 дБм?



# *Преимущества волоконной оптики как коммуникационной среды*

В самом простом случае волоконная оптика является коммуникационной средой, соединяющей два электронных устройства. Волоконно-оптическая связь может быть организована между компьютером и его периферийными устройствами, между двумя телефонными станциями или между станком и его контроллером на автоматизированном заводе. Напраливаются вопросы, связанные с применением волоконной оптики: зачем преобразовывать сигнал в световой и обратно? почему нельзя использовать только медный кабель? Ответы на эти вопросы скрыты в следующих преимуществах волоконной оптики:

- Широкая полоса пропускания
- Низкие потери
- Нечувствительность к электромагнитным помехам
- Малый вес
- Малый размер
- Безопасность
- Секретность

Важность каждого из этих преимуществ зависит от конкретного применения. В некоторых случаях широкая полоса пропускания и низкие потери являются определяющими факторами. В других случаях важнее безопасность и секретность, достижимые при использовании волоконной оптики. Ниже каждое из перечисленных преимуществ обсуждается более детально.

## Широкая полоса пропускания

В предыдущих главах говорилось о растущей потребности в передаче все больших и больших объемов информации электронным способом. Потенциальные возможности передачи информации возрастают с увеличением полосы пропускания передающей среды и частоты несущей. За время существования радио используемые для передачи частоты выросли на пять порядков, от примерно 100 КГц до приблизительно 10 ГГц. Частоты светового сигнала на несколько порядков превосходят максимальные частоты радиоволн. Изобретение лазера, в котором свет используется в качестве несущей, за один шаг увеличило потенциальный диапазон на четыре порядка — до 100 000 ГГц (или 100 терагерц, ТГц). Волоконная оптика теоретически может работать в диапазоне до 1 ТГц, однако используемый в настоящем времени диапазон еще далек от этого предела. Тем не менее применяемая полоса пропускания волоконной оптики превосходит аналогичный параметр медного кабеля. Можно добавить, что коммуникационные возможности волоконной оптики только начинают развиваться, в то время как возможности медного кабеля достигли своего предела.

Как упоминалось ранее, телефонные компании все чаще используют цифровую связь. Более широкая полоса пропускания оптических систем обуславливает более высокую скорость передачи битов и, следовательно, большее количество звуковых каналов, приходящихся на одну линию. Совместимость различных телефонных линий достигается согласованием скоростей передачи информации в соответствии со стандартом, известным как North American Digital Telephone Hierarchy (Цифровая телефонная иерархия США).

В таблице 3.1 представлена иерархия коаксиальных и оптических кабелей. Системы на коаксиальном кабеле известны достаточно давно. Возможности волоконной оптики представлены для сетей типа Sonet, или синхронной оптической сети. В главе 15 эта система обсуждается более детально.

К достоинствам волоконной оптики относится широкая полоса пропускания, значительно перекрывающая полосу пропускания, необходимую для передачи звуковых сигналов, что обеспечивает передачу телевизионного сигнала или организацию телеконференций, для которых требуется информационная емкость в 14, а иногда и в 100 раз большая, чем для цифрового кодирования звуковых сигналов. Полоса пропускания волоконной оптики допускает мультиплексирование различных сигналов, например звуковых, видео или передачу данных. Поэтому волоконно-оптические линии связи начинают применяться не только для передачи на большие расстояния, но и в коммерческих и бытовых системах.

Как пример перспектив использования уникальных возможностей оптического волокна приведем возможности передачи информации со скоростью 10 Гб/сек за время в одну секунду:

- 1000 книг
- 130 000 звуковых каналов
- 16 телевизионных каналов высокого разрешения (HDTV) или 100 каналов HDTV при использовании сжатия информации. (Канал HDTV

использует существенно более широкую частотную полосу, чем обычные телевизионные каналы.)

**Таблица 3.1. Скорости передачи в цифровой телефонии**

Носитель	Название	Скорость передачи (МБ/сек)	Количество запущенных каналов	Расстояние между повторителями (км)
Коаксиальный кабель	DS-1	1.544	24	1-2
	DS-1C	3.152	48	
	DS-2	6.312	96	
	DS-3	44.736	672	
Волокно (Sonet)	OC-1	51.84	672	25 (Лазер)
	OC-3	155.52	2016	2 (Светодиодный диод)
	OC-9	466.56	6048	
	OC-12	622.08	8064	
	OC-18	933.12	12 096	
	OC-24	1244.16	16 128	
	OC-36	1866.24	24 192	
	OC-48	2488.32	32 256	
	OC-96	4976.64	64 512	
	OC-192	9953.28	129 024	

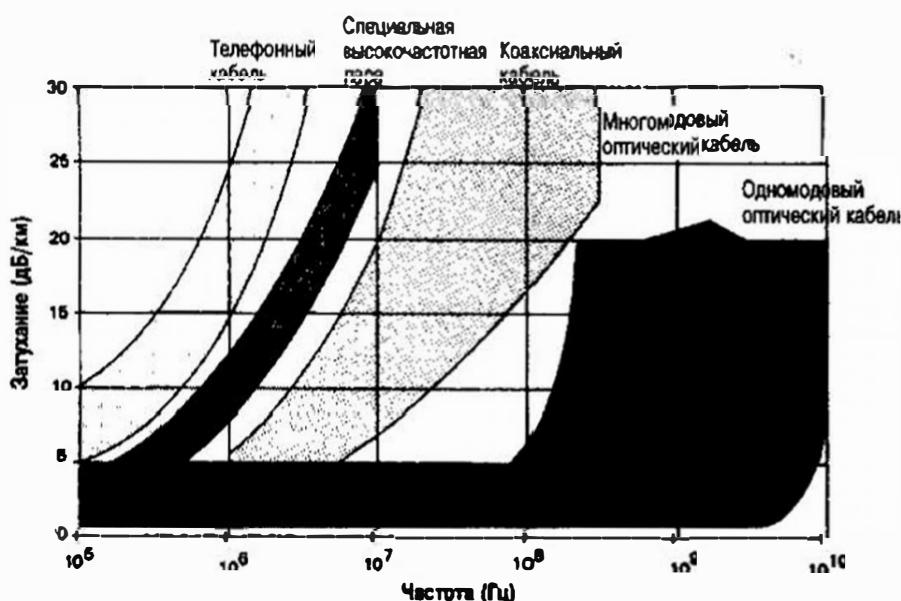
Для систем на коаксиальном кабеле подобные перспективы отсутствуют, поэтому оптические системы становятся незаменимыми для передачи сигналов на большие расстояния и с большой скоростью.

## **Низкие потери**

Ширина полосы пропускания связана со скоростью передачи информации. Потери (затухание) определяют расстояние, на которое может передаваться сигнал. По мере того как сигнал перемещается по передающей линии, будь это медный кабель или оптическое волокно, его амплитуда уменьшается. Это уменьшение амплитуды называется затуханием. В медном кабеле затухание увеличивается с ростом частоты модуляции. Чем выше частота сигнала, тем больше потери. Напротив, в оптическом кабеле затухание не зависит частоты и остается постоянным в определенном диапазоне частот, вплоть до очень высоких, и как правило, неиспользуемых частот. Таким образом, проблема затухания более характерна для медного кабеля, особенно при увеличении объема передаваемой информации.

Рис. 3.1, представляя характеристики волоконно-оптического кабеля, витой пары и коаксиального кабеля, демонстрирует применимые для использования диапазоны этих сред передачи сигналов. Потери в коаксиальном кабеле и витой паре увеличиваются с частотой, в то время как потери волоконно-оптического кабеля остаются постоянными в широком частотном диапазоне. Потери в области очень высоких частот не связаны с дополнительным затуханием света в волокне. Затухание остается постоянным. Потери скорее связаны с потерей информации, чем с потерей оптической мощности. Информация кодируется в виде вариации оптической мощности. При очень высоких частотах потеря информации связана именно с искажением сигнала, приводящим к потере мощности.

Смысль заключается в том, что влияние потерь, возникающих в системе, зависит от частоты сигнала. При этом система, хорошо работающая на оп-



**Рис. 3.1.** Влияние частоты сигнала на затухание (рисунок предоставлен Siecor Corporation)

ределенной скорости передачи информации, может быть непригодной для работы в другом частотном диапазоне. Необходимость работы системы в различных скоростных режимах усложняет ее устройство. Например, конструкция высокочастотной системы сложнее, чем низкочастотной системы. Нельзя просто увеличить скорость работы системы, не изменяя ее конструкции для увеличения скорости работы и производительности. В волоконно-оптических системах потери неизменны на всех скоростях передачи во всем специфицированном частотном диапазоне.

Существенное затухание приводит к необходимости установки повторителей в промежуточных точках передающей линии. В медном кабеле расстояние между повторителями уменьшается по мере увеличения рабочей

скорости. В оптическом волокне верно обратное: расстояние между повторителями увеличивается по мере роста скорости, поскольку высокие скорости передачи данных требуют использования волокна с меньшим затуханием.

Первая трансатлантическая волоконно-оптическая телефонная линия, установленная компанией AT&T в 1988 году, одновременно поддерживала 37 800 одновременных звуковых каналов в обоих направлениях на основе одной пары волокон. Расстояние между повторителями составляло 35 км. Напротив, лучшая трансатлантическая линия на коаксиальном кабеле поддерживала 4200 каналов и требовала установки повторителей через каждые 9,4 км. Существует теоретическая возможность создания волоконно-оптической системы, передающей 200 Мб/сек на расстояния от 80 до 100 км без повторителей.

Сочетание в волоконно-оптических системах широкой полосы пропускания с низкими потерями приводит к их широкому использованию в телефонной индустрии. Такие системы позволяют не только передавать больший объем информации, но и требует меньшего количества повторителей — дорогостоящих электронных устройств, требующих существенных затрат на установку и обслуживание. Уменьшение количества повторителей приводит к снижению стоимости системы.

## **Нечувствительность к электромагнитным полям**

В отличие от медных кабелей, оптоволокно не излучает и не воспринимает электромагнитные волны. Любой медный проводник действует подобно антенне, которая излучает и принимает электромагнитную энергию. Каждая часть электронного устройства может создавать электромагнитные наводки (ЭМН), влияющие на работу других частей устройства. Примеры влияния наводок:

- Военные отмечали столь высокую концентрацию электронных устройств во Вьетнаме, что любое дальнейшее увеличение числа устройств делало их концентрацию критической, не позволяя оборудованию нормально работать.
- Электронный кассовый аппарат интерферирует с передачей сигнала на частоте 113 МГц.
- Игровые видеоавтоматы пересекались с работой полицейской радиосвязи в 42 МГц диапазоне.
- Некоторые персональные компьютеры, протестированные в 1979 году Федеральной комиссией по коммуникациям (Federal Communication Commission, FCC), излучали настолько сильно, что мешали приему телевизионных программ на расстоянии нескольких сотен футов.
- Электростатические разряды между компьютерными терминалами и операторами, приводят к искажению данных, записанных в память компьютера, мешают текущей работе и даже выводят из строя некоторые электронные элементы. (Электростатические разряды представ-

ляют собой удары, которые можно испытать в сухой день, пройдясь по ковру и коснувшись дверной ручки. Такие разряды соответствуют напряжению от 15 до 25 Киловольт.)

- Взрыв, вызванный статическим электричеством, убил трех рабочих на мысе Кеннеди в 1960 году.
- Рабочие газонасосных станций обнаружили, что средневолновые радиопередачи влияли на показания датчиков утечки.
- Радары аэропортов искали записи об уплате налогов в компьютерном банке данных.

Электромагнитные наводки загрязняют окружающую среду и могут быть как несущественными, так и смертельно опасными. По мере возрастания плотности электронных устройств (что является неотъемлемой чертой информационного века) влияние электромагнитных наводок становится все более существенным. Для борьбы с такого рода проблемами FCC разработала в 1979 году рекомендации, лимитирующие уровень электромагнитных наводок, обусловленных работой компьютеров. Европейские агентства стандартов предложили аналогичные рекомендации.

Существует простой способ демонстрации влияния ЭМН от компьютера или терминала. Нужно разместить радиоприемник, работающий в средневолновом диапазоне, недалеко от работающего компьютера. При вращении ручки частотной настройки легко определить на какой частоте вы почувствуете влияние работающего компьютера на прием радиопередач. Чтобы услышать разницу, нужно перенастроиться на другую программу. Шумы, которые были слышны, являются ЭМН.

Кабели, соединяющие оборудование, могут быть одним из главных источников ЭМН. Они также наиболее восприимчивы к приему внешних сигналов, являющихся ЭМН от других устройств. В представленных примерах проявления ЭМН кабели работали подобно радиоантенне.

Поскольку оптические волокна не излучают и не воспринимают электромагнитные волны, они являются идеальной средой с точки зрения ЭМН. Некоторые производства использует волоконную оптику именно по этой причине. При этом, как правило, нет необходимости в широкой полосе пропускания и низком затухании оптического волокна. В частности, при включении и выключении моторов возникают ЭМН, которые влияют на работу сигнальных линий управляющего оборудования. Использование оптического волокна вместо медного кабеля позволяет избежать данной проблемы.

Высоковольтные линии приводят к аналогичному эффекту\* поскольку они также излучают электромагнитную энергию. Медные сигнальные кабели нельзя прокладывать вблизи от этих линий без специальной защиты, поскольку наводки от высоковольтной линии будут искажать передачу сигнала. Волоконно-оптические линии могут быть проложены совместно с высоковольтными без каких-либо негативных эффектов, поскольку наводки от высоковольтных линий на них не влияют.

Важнейший результат нечувствительности оптического волокна к наводкам от электромагнитного излучения заключается в том, что световые сигналы не искажаются под влиянием ЭМН. Цифровая передача предполагает пересылку сигнала без ошибок. ЭМН могут быть причиной ошибок в электронных системах передач. Всплеск ЭМН может привести к возникновению

пика, в то время, как в исходном сигнале никакого пика не было. Таким образом, оптические волокна открывают новые возможности для передачи сигналов без искажений.

## Малый вес

Оптическое волокно весит значительно меньше медного проводника. Волоконно-оптический кабель той же информационной емкости, что и медный, весит меньше медного, поскольку последний требует большего количества линий. Например, обычный одножильный волоконно-оптический кабель имеет вес 9 фунтов/1000 футов. Для сравнения, коаксиальный кабель весит в 9 раз больше — 80 фунтов/1000 футов. Оптимальный вес крайне важен в самолетостроении и автомобилестроении.

## Малый размер

Оптический кабель меньше по размеру, чем его медный аналог. Кроме того, достаточно часто одно оптическое волокно может заменить несколько медных проводников. На рис. 3.2 сравниваются коаксиальный и волоконно-оптический кабели, используемые в цифровой телефонии. Медный кабель диаметром 4.5 дюйма может передавать 40300 двухсторонних разговоров на короткие расстояния. Волоконно-оптический кабель диаметром 0.5 дюйма, содержащий 144 волокна, обеспечивает 24192 разговора на каждую волоконно-оптическую пару или около 1.75 миллионов звонков на весь кабель в целом. Таким образом, емкость волоконно-оптического кабеля существенно превосходит емкость коаксиального, несмотря на то, что его диаметр почти в 10 раз меньше.

Малый размер оптоволоконного кабеля делает его использование привлекательным в следующих областях:



**Рис. 3.2.** Сравнение размеров коаксиального и волоконно-оптического кабелей (фотография предоставлена AT&T Bell Laboratories)

- Самолеты и подводные лодки, где использование каждого квадратного дюйма является критическим. Применение волоконно-оптического кабеля обусловлено не только экономией места, но также невозможностью применения его медного аналога. Волоконная оптика позволяет эффективно использовать ограниченное пространство.
- Подземные телефонные кабельные каналы, особенно городские. В этом случае не только экономится место в кабельных каналах, но также учитывается высокая стоимость строительства новых каналов. При этом старые медные кабели заменяются оптическими кабелями, предоставляющими большие информационные возможности при экономии места. Толстый медный кабель, занимающий большой объем в кабельном канале, заменяется тонким оптическим кабелем, при этом остается место для прокладки новых кабелей в будущем.
- Компьютерные помещения, в которых кабели прокладываются в фальшполах. Как правило, эти кабели являются твердыми, что усложняет процесс прокладки. Добавление новых кабелей также затруднительно. И здесь малый размер и гибкость оптического волокна устраняют эти проблемы. В ряде случаев можно обойтись настолько малым количеством волоконных кабелей, что отпадает потребность в использовании фальшполов.

## Безопасность

Волокно является диэлектриком и не проводит ток. Его использование безопасно с точки зрения искро- и пожаробезопасности. Более того, волокно не притягивает молнии. Волоконно-оптический кабель может также использоваться в опасных местах, в которых из соображений безопасности вообще не применялись кабели. Например, волокно можно проложить прямо через топливный бак.

## Секретность

Один из путей подслушивания заключается в подсоединении к проводу. Другой путь — перехват радиоволн, излучаемых работающим оборудованием или кабелем. Несколько лет назад Соединенные Штаты обнаружили такого рода прослушивание переговоров своих посольств. Чувствительная антенна, спрятанная в близко стоящем здании, улавливала радиоволны, излучаемые электронным оборудованием, работающим в посольстве. Данная антенна воспринимала ЭМН как в примере с радиоприемником, обсуждавшемся ранее. Улавливаемый радиосигнал содержал сверхсекретные данные. Бизнесмены каждый год затрачивают миллионы долларов на защиту своих секретов, например на шифрование передаваемых сообщений.

Оптическое волокно является сверхбезопасной средой для передачи информации. Оно не излучает волны, которые могут быть получены близкорасположенной антенной. Кроме того, подсоединиться к оптоволокну крайне тяжело. Правительства и деловые круги рассматривают оптическое волокно как информационную среду, обеспечивающую секретность передачи информации.

## Выводы

Широкая полоса пропускания, низкие потери и невосприимчивость к электромагнитным полям характерны для волоконной оптики. Эти особенности органично согласовываются, позволяя передавать данные с высокой скоростью на большие дистанции и с небольшим числом ошибок. Волоконно-оптическая связь предоставляет возможность передавать текст 30-ти томной Энциклопедии на 100 миль за 1 секунду. При этом уровень ошибок составляет один-два неверных символа за все время передачи.

В действительности, не все оптические кабели имеют низкие потери и широкую полосу пропускания. В тех случаях, когда потери и высокие скорости не являются критическими, например, в автомобилестроении, достаточно хорошо работают более дешевые оптические линии. В автомобиле главным является защита от шума, источником которого является система впрыска. Другие уникальные характеристики оптоволокна делают его наиболее подходящей передающей средой во множестве различных областей техники.

## Заключение

- Волоконная оптика имеет много преимуществ по сравнению с медным кабелем.
- Оптоволокно предоставляет широкую полосу пропускания.
- Оптоволокно характеризуется меньшими потерями.
- Широкая полоса пропускания и низкие потери приводят к сокращению числа повторителей.
- Оптическое волокно имеет малую восприимчивость к ЭМН.
- Волокно оптимально соответствует целям соблюдения секретности при передаче информации.
- Волокно имеет меньшие размеры и вес по сравнению с медным кабелем.
- Поскольку волокно не передает электрический сигнал и не приводит к замыканиям и возгораниям, то оно безопасно и может быть использовано во взрывоопасной среде.
- Таким образом, использование оптического волокна обусловливается рядом преимуществ, таких как низкие потери, широкая полоса пропускания, секретность и невосприимчивость по отношению к ЭМН.

## Контрольные вопросы



1. Назовите шесть преимуществ оптического волокна. Приведите примеры каждого из них.

2. Приведите три примера скорости и информационной емкости из Цифровой телефонной иерархии СПИА.
3. Что из ниже перечисленного является наиболее важным следствием широкой полосы пропускания оптического волокна:
  - A. Высокая скорость и информационная емкость линий передачи
  - B. Секретность передачи
  - C. Меньшее число повторителей
  - D. Невосприимчивость по отношению к ЭМН
4. Увеличиваются, уменьшаются или остаются без изменений потери в медном кабеле по мере увеличения частоты сигнала? В оптическом волокне?
5. Как называется явление, приводящее к появлению искажений телевизионного изображения, потрескиванию радиоприемника, а также к другим проблемам с электронным оборудованием? Почему оптическое волокно не подвержено влиянию этого явления?
6. Для передачи информационного сигнала на частоте 200 КГц на расстояние 50 метров в условиях промышленного объекта определите наиболее важные факторы, влияющие на качество передачи сигнала. Наименее важные? Поясните свой ответ.
  - A. Полоса пропускания
  - B. Низкие потери
  - C. ЭМН
  - D. Безопасность
  - G. Низкий уровень ошибок
7. Чем обусловлен интерес к использованию оптического волокна для передачи информации?
  - A. Волокно занимает меньше места в кабельных каналах по сравнению с коаксиальным кабелем
  - B. Волокно дешевле, чем коаксиальный кабель
  - C. Передача осуществляется на большей лазерной частоте с меньшими потерями
  - D. ЭМН, секретность и совместимость с цифровой технологией обуславливают использование оптического волокна на военных объектах
8. (Да/Нет) Информационная емкость зависит от физического размера несущей среды.

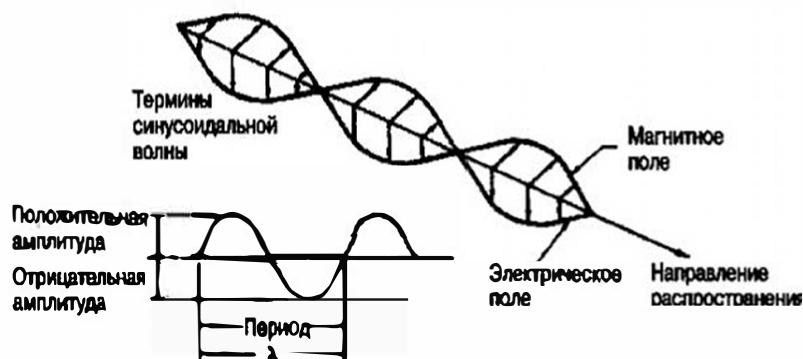
# ГЛАВА 4

## *Свет*

Свет представляет собой один из видов электромагнитной энергии, также как радиоволны, телевизионные и радиолокационные сигналы, рентгеновские лучи и, наконец, электронные цифровые импульсы. Электромагнитная энергия — это энергия излучения, распространяющаяся в свободном пространстве со скоростью около 300 000 км/сек. Электромагнитные волны представляют собой переменные магнитные и электрические поля, перпендикулярные друг другу и направлению распространения. Часто электромагнитной волны изображаются синусоидальной кривой, как на рис. 4.1.

Главное отличие различных электромагнитных волн заключается в их частоте или длине волны. Частота определяется числом синусоидальных колебаний за секунду и выражается в герцах (Гц). Длина волны — это расстояние между идентичными точками двух последовательных волн (или расстояние, которое проходит волна за один цикл колебаний). Длина волны и частота взаимосвязаны. Длина волны ( $\lambda$ ) равна скорости волны ( $v$ ), деленной на ее частоту ( $f$ ):

$$\lambda = \frac{v}{f}$$



**Рис. 4.1.** Электромагнитная волна

В свободном пространстве или воздухе скорость электромагнитной волны равна скорости света.

Из приведенного уравнения следует, что чем выше частота, тем короче длина волны. Например, 60-герцевое переменное напряжение, используемое в быту, имеет длину волны, равную 3100 милям. Сигнал 55.25 МГц, соответствующий передаче изображения на втором телевизионном канале, имеет длину волны — 17.8 фута. Частота видимого красного света составляет 430 ТГц ( $430 \times 10^{12}$  Гц) и длину волны, равную всего лишь 700 нм (нанометр равен одной миллиардной доле метра).

В электронике принято говорить о частоте сигнала, в то время как в волоконной оптике чаще говорят о длине волны. Отметим, однако, что частота и длина волны однозначно соответствуют друг другу.

## Электромагнитный спектр

Электромагнитное излучение образует непрерывный частотный спектр, простирающийся от ультразвука к радиоволнам, микроволновому излучению, рентгеновским лучам и далее. (Электромагнитное излучение существует в ультразвуковом частотном диапазоне, однако, звук сам по себе представляет скорее колебание плотности воздуха, чем электромагнитное излучение.) На рис. 4.2 представлен рассматриваемый спектр. Отметим, что радиочастоты, обычно используемые для передачи информации, находятся в этом спектре чуть ниже световых частот.

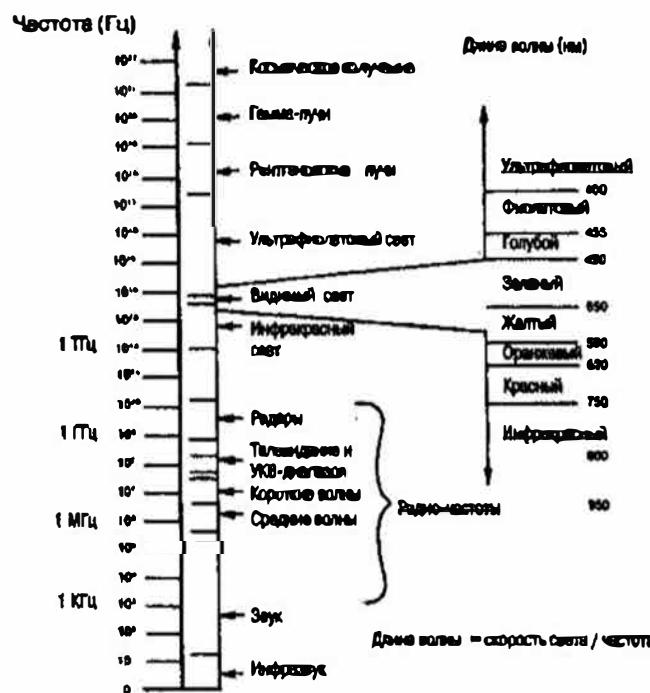


Рис. 4.2. Электромагнитный спектр (рисунок предоставлен AMP Incorporated)

Таким образом, свет представляет собой электромагнитное излучение с большей частотой и более короткой длиной волны по сравнению с радиоволнами. На рисунке видно, что видимая область спектра составляет лишь малую часть всего светового диапазона. Она имеет длины волн в диапазоне от 380 нм (темнофиолетового) до 750 нм (тёмнокрасного). Длины волн инфракрасного света большие длин волн видимого света. В то же время ультрафиолетовый свет имеет более короткие длины волн. Большинство волоконно-оптических систем используют инфракрасный свет с длинами волн в диапазоне между 800 и 1500 нм, поскольку стекло является более прозрачным для инфракрасного излучения, чем для видимого света.

Высокие частоты света представляют большой интерес с точки зрения коммуникационной технологии. Как было показано в главе 2, более высокие частоты несущей волны означают большую скорость передачи информации. Технология волоконной оптики позволяет использовать потенциальную возможность света и обеспечивать высокую скорость передачи информации.

## Волны и частицы

До сих пор мы рассматривали свет в виде колебаний электромагнитных волн. Они распространяются во всем пространстве, не имея определенной пространственной локализации. В физике все виды материи разделяются по природе либо на волны, либо на частицы. Обычно свет представляется в виде волн, а электроны — в виде частиц. Однако современные физические исследования показали, что четкой границы между частицами и волнами не существует. Поведение как частицы, так и волны может быть и корпускулярным, и волновым.

Частицы света называются *фотонами*. Фотоны представляют собой *квант*, или пакет излучения. Квант является элементарной единицей излучения — нельзя наблюдать половину или 5.33 кванта. Количество энергии, переносимое фотоном, зависит от его частоты. Количество энергии увеличивается с ростом частоты: большие частоты соответствуют большему количеству энергии. Длинам волн фиолетового диапазона соответствует большее количество энергии, чем красному свету, так как фиолетовому диапазону соответствуют большие частоты. Энергия  $E$  (в ваттах), запасенная в одном фотоне, равна

$$E = hf$$

где  $f$  — его частота и  $h$  — постоянная Планка, равная  $6.63 \times 10^{-34}$  Дж-сек (джоуль-секунда). Из этого уравнения видно, что энергия фотона зависит только от его частоты (или длины волны). Энергия фотона пропорциональна частоте. Квант энергии света, заключенной в одном фотоне, равен  $hf$ .

Существует несколько уровней энергии для различных высокочастотных длин волн. Отметим, что чем выше частота, тем большую энергию имеет квант.

Инфракрасный свет ( $10^{13}$ Гц)	$6.63 \times 10^{-20}$	Дж-сек
Видимый свет ( $10^{14}$ Гц)	$6.63 \times 10^{-19}$	Дж-сек
Ультрафиолетовый свет ( $10^{15}$ Гц)	$6.63 \times 10^{-18}$	Дж-сек
Рентгеновские лучи ( $10^{18}$ Гц)	$6.63 \times 10^{-15}$	Дж-сек

Фотон является странной частицей с нулевой массой покоя. Если он не движется, то он не существует. В этом смысле фотон не является частицей,

такой как камень или капля чернил. Он служит вместилищем энергии, но ведет себя как частица.

В волоконной оптике свет рассматривают и как частицу, и как волну. Обычно в зависимости от смысла используют либо одно, либо другое понятие. Например, многие характеристики оптического волокна основаны на длине волн и свет рассматривается как волна. С другой стороны, испускание света источником или его поглощение детектором лучше описывается теорией частиц. Описание работы детектора основано на фотонах, попадающих на детектор и поглощаемых им. Выделяемая энергия обеспечивает электрический ток в цепи. Светодиодающие диоды (СИД) работают на принципе передачи энергии от электронов к фотонам, энергия которых определяется длине волны излучаемого света.

## Световые лучи и оптика

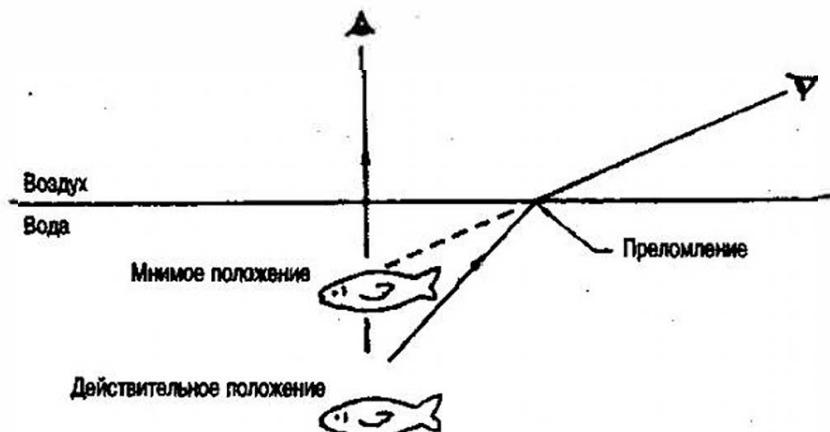
Простейшим способом описания света в волоконной оптике является анализ прохождения лучей света. В этом случае свет рассматривается как прямые лучи, отображаемые прямыми линиями. Луч от источника света показывает направление распространения. Перемещение света по волоконно-оптической системе анализируется геометрическими построениями. Это не только упрощает анализ, но и помогает понять процессы в оптических волокнах.

## Отражение и преломление

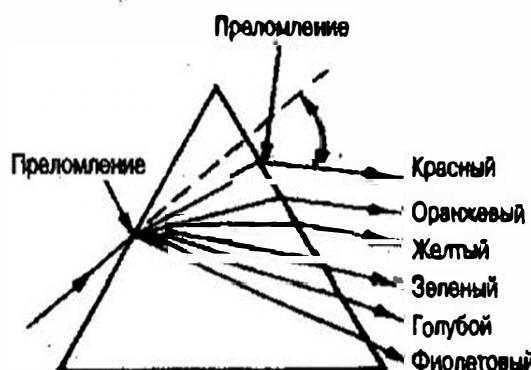
В общем случае, говоря о *скорости света*, имеют в виду скорость электромагнитной энергии в вакуме. В других материалах (например, в стекле) свет распространяется с меньшей скоростью. При перемещении из одного материала в другой изменяется скорость распространения, что, с точки зрения волновой теории, приводит к изменению направления движения. Отклонение света от прямого направления называется *преломлением*. Кроме того, волны с различными длинами распространяются с различными скоростями в одном и том же материале. Изменение скорости от длины волны имеет важное значение в волоконной оптике.

С преломлением часто сталкиваются рыбаки, которые видят не реальность, а минимум положение рыбы под водой (рис. 4.3). Если смотреть на рыбу вертикально вниз, то преломление света не происходит и рыба видна на своем настоящем месте. Если же смотреть на рыбу под углом, то появляется преломление и рыбак будет видеть минимум положение рыбы на прямой, продолжающей направление взгляда. В результате рыба обычно находится гораздо глубже под водой, чем ее видит человеческий глаз.

Призма на рис. 4.4 показывает более интересное преломление. Поступающий на призму белый свет содержит все цвета радуги. Призма преломляет свет, и он изменяет свою скорость при переходе внутрь призмы. Поскольку различные цвета имеют разные скорости распространения, то и преломляются они по-разному. Красный цвет отклоняется сильнее и имеет меньшую скорость распространения. Падающий на призму свет разлагается на цвета радуги. Отметим, что преломление присутствует как при входе, так и при выходе из призмы.



**Рис. 4.3.** Преломление света



**Рис. 4.4.** Преломление света на призме (рисунок предоставлен AMP Incorporated)

Показатель преломления, обозначаемый  $n$ , является безразмерной величиной, выражаемой через отношение скорости света в вакууме ( $c$ ) к скорости света в материале ( $v$ ):

$$n = \frac{c}{v}$$

В таблице 4.1 представлены показатели преломления различных веществ и скорости распространения света.

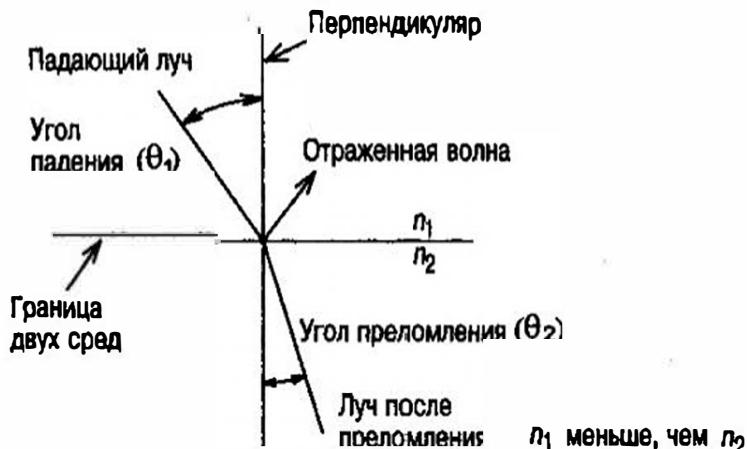
**Таблица 4.1.**  
**Показатели преломления различных материалов.**

Материал	Показатель преломления	Скорость света (км/сек)
Вакуум	1.0	300 000
Воздух	1.0003(1)	300 000
Вода	1.33	225 000
Кварц	1.46	205 000
Стекло	1.5	200 000
Алмаз	2.5	120 000

Особый интерес с точки зрения волоконной оптики представляет тот факт, что показатель преломления стекла может изменяться в зависимости от его состава. Количество отраженного света от границы двух сред зависит от их показателей преломления. Но прежде чем рассмотреть механизм преломления, нужно определить некоторые основные понятия предстоящего обсуждения. На рис. 4.5 представлено несколько основных понятий, касающихся света и его преломления.

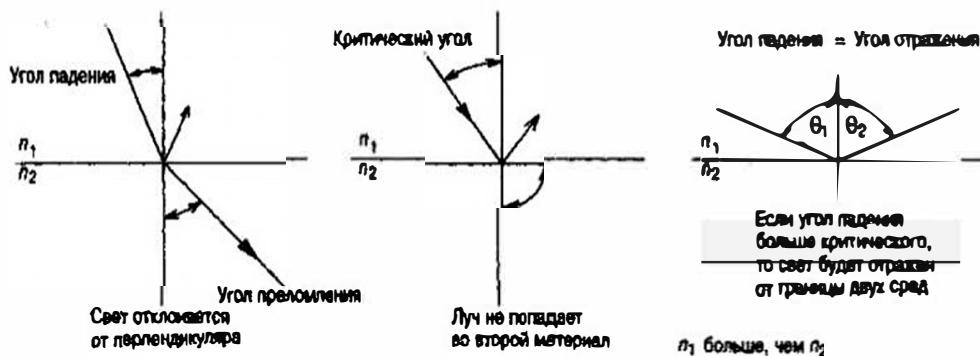
- *Перпендикуляр* к границе двух сред представляет собой воображаемую линию.
- *Угол падения* — угол между перпендикуляром и падающим лучом.
- *Угол преломления* — угол между перпендикуляром и отраженным лучом.

Свет, проходящий из среды с более низким значением показателя преломления в среду с более высоким, отклоняется к перпендикуляру. Наобо-



**Рис. 4.5.** Угол падения и преломления (рисунок предоставлен AMP Incorporated)

рот, при переходе из более плотной среды в менее плотную свет отклоняется от перпендикуляра, как изображено на рис. 4.6. По мере увеличения угла падения угол преломления стремится к значению 90 градусов. Угол падения, при котором угол преломления равен 90 градусов, называется критическим углом. Если угол падения становится больше критического, то свет полностью отражается в исходную среду, не проникая во второй материал. При этом угол падения равен углу отражения.



**Рис. 4.6.** Отражение (рисунок предоставлен AMP Incorporated)

## Френелевское отражение

Даже когда свет проходит в более плотную среду, некоторая его часть отражается назад в исходную среду. Этот эффект получил название *отражение Френеля*. Чем больше разница показателей преломления сред, тем большая доля света отражается назад. Показатель Френелевского отражения  $\rho$  на границе с воздухом равен

$$\rho = \left( \frac{n-1}{n+1} \right)^2$$

В децибелах потери переданного света составляют

$$dB = 10 \log_{10} (1-\rho)$$

Для света, падающего из воздуха на границу стекла (с  $n=1.5$  для стекла), Френелевское отражение равно примерно 0.17 дБ. Это значение будет меняться в зависимости от состава стекла. Поскольку такого рода потери происходят как при входлении света в стекло, так и при выходе из него, то потери на соединении двух стекол составляют 0.34 дБ. Первое Френелевское отражение возникает при попадании света из первого волокна в воздушный зазор между волокнами. Второе Френелевское отражение возникает на границе воздушного зазора и второго волокна. Френелевское отражение не за-

висит от направления прохождения границы двух сред, иными словами, оно остается тем же, когда свет выходит из стекла в воздух или входит в стекло.

## Закон Снелла

Закон Снелла устанавливает соотношение между падающим и отраженным лучами:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

где  $\theta_1$  и  $\theta_2$  определены в соответствии с рис. 4.5 и 4.6.

Из данного закона следует, что углы зависят от показателей преломления двух сред. Зная любые три величины, входящие в данное соотношение, можно определить четвертую путем элементарного преобразования уравнения.

Критический угол падения  $\theta_c$ , когда  $\theta_2 = 90^\circ$ , равен

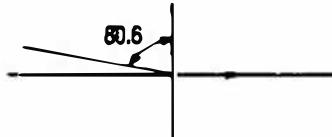
$$\theta_c = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

При углах, больших критического, свет отражается. Поскольку в случае отражения показатели  $n_1$  и  $n_2$  равны (как соответствующие одному и тому же веществу), то и также равны  $\theta_1$  и  $\theta_2$ . При этом угол падения равен углу отражения. Эти простые законы преломления и отражения лежат в основе распространения света по оптическому волокну.

## Практический пример

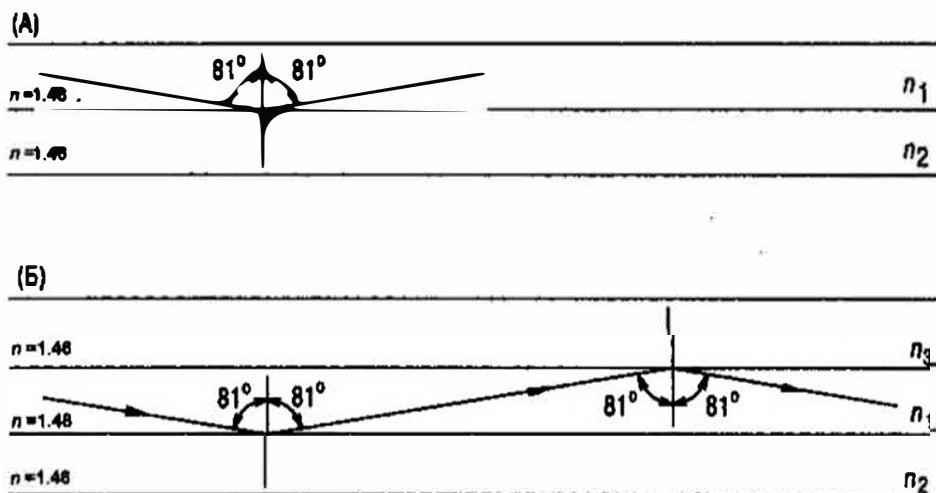
На рис. 4.7 представлен пример отражения, имеющий практическое применение в волоконной оптике. Представьте себе два слоя стекла, изображенных на рис. 4.7А. Первый слой имеет показатель преломления 1.48; второй — 1.46. Эти величины являются типичными для оптического волокна. Используя закон Снелла, можно вычислить значение критического угла:

$$\begin{aligned} \theta_c &= \arcsin\left(\frac{1.46}{1.48}\right) \\ &= \arcsin(0.9864) \\ &= 80.6^\circ \end{aligned}$$



Свет, падающий на границу между  $n_1$  и  $n_2$  под углом более 80.6 градуса, будет отражаться назад в исходную среду. При этом угол отражения будет равен углу падения.

На рис. 4.7Б показан пример цепочки отражений. Представьте себе, что третий слой стекла, обозначенный  $n_3$ , с показателем преломления, равным  $n_2$ , помещен сверху слоя материала  $n_1$ . Таким образом, вещество  $n_1$  помещено между веществами  $n_2$  и  $n_3$ . Мы снова имеем те же условия для границ среды, что и ранее. Однако в этом случае отраженный луч становится лучом, падающим на новую границу. Критический угол остается равным 80.6 градуса. Условия для границы остаются теми же. В результате падающий луч вновь отражается в исходную среду. Луч, отраженный от  $n_3$ , вновь возвращается и становится падающим лучом для среды  $n_2$ . Ситуация повто-



**Рис. 4.7.** Практический пример отражения света

ряется. Мы имеем дело с лучом, захваченным между слоями  $n_2$  и  $n_3$ . До тех пор, пока угол падения больше  $80.6$  градуса, свет будет возвращаться назад при отражении в исходную среду. Итак, закон Снелла показывает на данном упрощенном примере, что последнее утверждение всегда выполняется. Свет будет распространяться вдоль слоя исходной среды благодаря полному внутреннему отражению.

Аналогичный принцип лежит в основе работы оптического волокна. Основное отличие заключается в том, что волокно имеет цилиндрическую форму, так что среда  $n_2$  окружает среду  $n_1$  со всех сторон. В последующей главе процесс распространения света по волокну будет рассмотрен более детально.

## Заключение

- Свет представляет собой электромагнитное излучение с большей частотой и меньшей длиной волны, чем радиоволны.
- Свет имеет как волновую, так и корпускулярную природу.
- На границах двух сред с различными показателями преломления свет испытывает как отражение, так и преломление.
- Френелевское отражение происходит вне зависимости от значения угла падения.
- Закон Снелла описывает соотношение между падающим и отраженным светом.

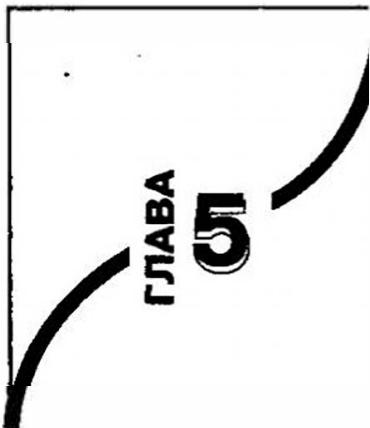


### Контрольные вопросы

1. Охарактеризуйте частоты и длины волн света относительно радиочастот.
2. Как называются частицы света?
3. Нарисуйте картину преломления света. Обозначьте падающий луч, преломленный луч и перпендикуляр.
4. Нарисуйте картину отражения света. Обозначьте падающий луч, отраженный луч и перпендикуляр.
5. Каков угол отражения в случае падения света под углом 75 градусов на границу воздух/вода?
6. Какова длина волны 300 МГц электромагнитной волны в свободном пространстве?
7. Определите Френелевское отражение.
8. Определите критический угол.
9. Где скорость света больше: в воздухе или в стекле?

## **Часть 2**

*Волоконно-оптические  
компоненты*



## *Оптическое волокно*

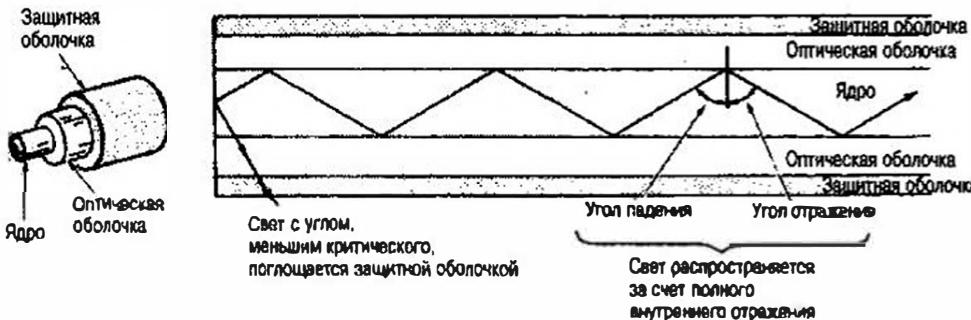
В предыдущей главе обсуждались наиболее важные с точки зрения работы оптического волокна характеристики процесса распространения света. Отражение и преломление зависят от показателей преломления граничащих сред и угла падения света на границу. Работа волокна основана на тех же принципах. В нормальных условиях свет, захваченный волокном, продолжает отражаться от его границ по мере распространения. В этой главе описывается распространение света вдоль различных оптических волокон. В следующей главе будет продолжено обсуждение свойств волокон.

Следует помнить о различии между оптическим волокном и волоконно-оптическим кабелем. *Оптическое волокно* представляет собой элемент, переносящий сигнал, подобный металлическому проводнику в проводе. Как правило, волокно используется в виде кабеля, то есть окружено защитной оболочкой, предохраняющей его от механических повреждений и воздействий окружающей среды. В этой главе в основном будет рассматриваться само волокно.

### **Принципиальное устройство волокна**

Оптическое волокно имеет два концентрических слоя — ядро (сердцевина) и оптическая оболочка. Внутреннее ядро предназначено для переноса света. Окружающая его оптическая оболочка имеет отличный от ядра показатель преломления и обеспечивает полное внутреннее отражение света в ядро. Показатель преломления оптической оболочки менее чем на 1% меньше показателя преломления ядра. Характерные величины показателей преломления — 1.47 для ядра и 1.46 — для оптической оболочки. Производители волокна строго контролируют разность показателей для получения нужных характеристик волокна.

Волокна имеют дополнительную защитную оболочку вокруг оптической оболочки. Защитная оболочка, представляющая собой один или несколько слоев полимера, предохраняет ядро и оптическую оболочку от воздействий, которые могут повлиять на их оптические свойства. Защитная оболочка не влияет на процесс распространения света по волокну, а всего лишь предохраняет от ударов.



**Рис. 5.1.** Полное внутреннее отражение в оптическом волокне (рисунок предоставлен AMP Incorporated)

На рис. 5.1 представлена схема распространения света по волокну. Свет заводится внутрь волокна под углом, большим критического, к границе ядро/оптическая оболочка и испытывает полное внутреннее отражение на этой границе. Поскольку углы падения и отражения совпадают, то свет и в дальнейшем будет отражаться от границы. Таким образом, луч света будет двигаться зигзагообразно вдоль волокна.

Свет, падающий на границу под углом, меньшим критического, будет проникать в оптическую оболочку и затухать по мере распространения в ней. Оптическая оболочка обычно не предназначен для переноса света, и свет в ней достаточно быстро затухает.

Отметим, что в ситуации, представленной на рис. 5.1, свет будет также преломляться на границе воздух/волокно. И только после этого его распространение будет происходить в соответствии с законом Снелла и значениями индексов преломления ядра и оптической обложки.

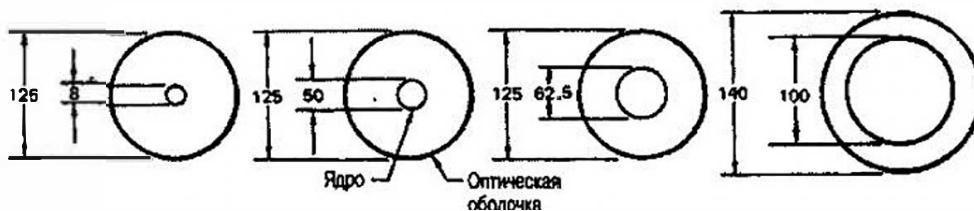
Внутреннее отражение служит основой для распространения света вдоль обычного оптического волокна. В этом анализе, однако, учитываются только *меридианные лучи*, проходящие через центральную ось волокна после каждого отражения. Другие лучи, называемые *асимметричными*, движутся вдоль волокна, не проходя через его центральную ось. Траектория асимметричных лучей представляет собой спираль, накрученную вокруг центральной оси. Асимметричные лучи, как правило, игнорируются в анализе большинства волоконно-оптических процессов.

Специфические особенности движения света вдоль волокна зависят от многих факторов, включая:

- Размер волокна
- Состав волокна
- Процесс инъекции света внутрь волокна

Понимание взаимного влияния этих факторов проясняет многие аспекты волоконной оптики.

Волокна сами по себе имеют чрезвычайно малый диаметр. На рис. 5.2 представлены поперечные сечения и диаметры для ядра и оптической об-



**Рис. 5.2.** Типичные диаметры ядра и оптической оболочки

лочки четырех наиболее распространенных видов волокон. Диаметры ядер и оптических оболочек следующие:

Ядро (мкм)	Оптическая оболочка (мкм)
8	125
50	125
62.5	125
100	140

Для наглядного представления мизерности этих размеров укажем, что человеческий волос имеет диаметр около 100 микрон. При указании размеров волокна вначале приводится значение диаметра ядра, а затем оптической оболочки: итак, 50/125 означает диаметр ядра 50 микрон и диаметр оптической оболочки 125 микрон; 100/140 означает диаметр ядра 100 микрон и оптической оболочки 140 микрон. Таким образом, именно столь малые размеры позволяют передавать тысячи телефонных переговоров.

## Классификация волокон

Оптические волокна могут быть классифицированы по двум параметрам. Первый — материал, из которого сделано волокно:

- Стеклянные волокна имеют как стеклянное ядро, так и стеклянную оптическую оболочку. Поскольку данный тип волокон получил наибольшее распространение, основное место в данной книге будет посвящено именно этому типу волокон. Стекло, используемое в данном типе волокон, состоит из сверхчистого сверхпрозрачного диоксида кремния или плавленого кварца. Если бы морская вода была столь прозрачной, как волокно, то можно было бы увидеть дно самой глубокой, 33.177 футовой Марианской впадины, расположенной в Тихом океане. В стекло добавляют примеси, чтобы получить требуемый показатель преломления. Германий и фосфор, например, увеличивают показатель преломления, а бор и фтор, напротив, уменьшают его. Кроме того, в стекле присутствуют другие примеси, не извлеченные в процессе очистки. Они также влияют на свойства волокна, увеличивая затухание, обусловленное рассеянием и поглощением света.
- Стеклянные волокна с пластиковой оптической оболочкой (PCF) имеют стеклянное ядро и пластиковую оптическую оболочку. Их ха-

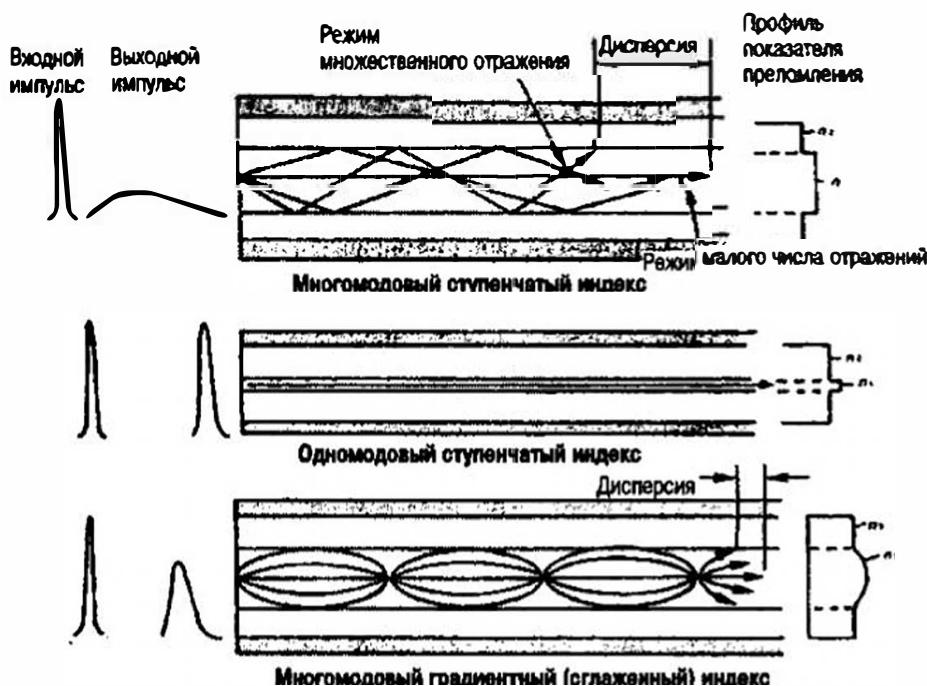
рактеристики, хотя и не столь хорошие, как у полностью стеклянного волокна, являются вполне приемлемыми.

- Пластиковые волокна имеют пластиковое ядро и пластиковую оптическую оболочку. По сравнению с другими видами волокон пластиковые имеют ограниченные возможности с точки зрения затухания и полосы пропускания. Однако низкая себестоимость и простота использования делают их привлекательными там, где требования к величинам затухания и полосе пропускания не столь высоки. Электромагнитная невосприимчивость и секретность передачи информации по пластиковым волокнам делают их применение оправданным.

Пластиковые и PCS волокна не имеют защитных оболочек вокруг оптической оболочки.

Второй способ классификации волокон основан на индексе преломления ядра и модовой структуре света. На рис. 5.3 показаны три основные особенности волокон в соответствии с этой классификацией.

Первая особенность — различие входного и выходного импульсов. Уменьшение амплитуды импульса связано с затуханием его мощности. Расширение импульса связано с конечной полосой пропускания волокна и ограниченной информационной емкостью. Вторая особенность — траектории лучей, возникающих при распространении света. Третья особенность — распределения значений показателей преломления в ядре и оптической оболочке для



**Рис. 5.3.** Типы распространения света в волокне (рисунок предоставлен AMP Incorporated)

различных типов волокон. Важность каждой из перечисленных особенностей будет ясна после рассмотрения всех видов волокон.

## Моды

*Мода* представляет собой математическое и физическое понятие, связанное с процессом распространения электромагнитных волн в среде. В своей математической формулировке модовая теория возникает из уравнений Максвелла. Джеймс Клерк Максвелл, шотландский физик прошлого века, первым получил математическое выражение для соотношения между электрической и магнитной энергией. Он показал, что они являются лишь различными формами одного вида электромагнитной энергии, а не различными видами энергии, как полагали ранее. Из его уравнений также следует, что распространение этого вида излучения подчиняется строгим правилам. Уравнения Максвелла являются основой электромагнитной теории.

Мода представляет собой возможное решение уравнений Максвелла. В рамках излагаемого в данной книге материала под модой достаточно понимать вид траектории, вдоль которой может распространяться свет. Число мод, допускаемых волокном, колеблется от 1 до 100 000. Таким образом, волокно позволяет свету распространяться по множеству траекторий, число которых зависит от размера и свойств волокна.

## Профиль индекса преломления

*Профиль индекса преломления* отображает соотношение между индексами ядра и оптической оболочки. Существуют два основных вида профиля: ступенчатый и сглаженный (градиентный). Волокно со ступенчатым профилем имеет ядро с однородным показателем преломления. При этом показатель преломления испытывает резкий скачок на границе между ядром и оптической оболочкой. Напротив, в случае сглаженного профиля показатель преломления ядра не является однородным: показатель максимальен в центре и постепенно спадает вплоть до оптической оболочки. Кроме того, на границе между ядром и оптической оболочкой отсутствует резкий скачок показателя преломления.

В соответствии с данной классификацией существует три вида оптических волокон:

1. Многомодовое волокно со ступенчатым индексом (обычно называемое волокном со ступенчатым индексом).
2. Многомодовое волокно со сглаженным индексом (волокно со сглаженным индексом).
3. Одномодовое волокно со ступенчатым индексом (одномодовое волокно).

Характеристики каждого из типов волокон в существенной степени определяются областью применения. Важность каждого из типов волокон будет понятна из дальнейшего изложения.

## Волокно со ступенчатым индексом

Многомодовое волокно со ступенчатым индексом — наиболее простой тип волокон. Оно имеет ядро диаметром от 100 до 970 микрон и может быть чисто стеклянным, PCS, или пластиковым. Данный тип волокна является наиболее распространенным, хотя и не обеспечивает максимальную полосу пропускания и минимальные потери.

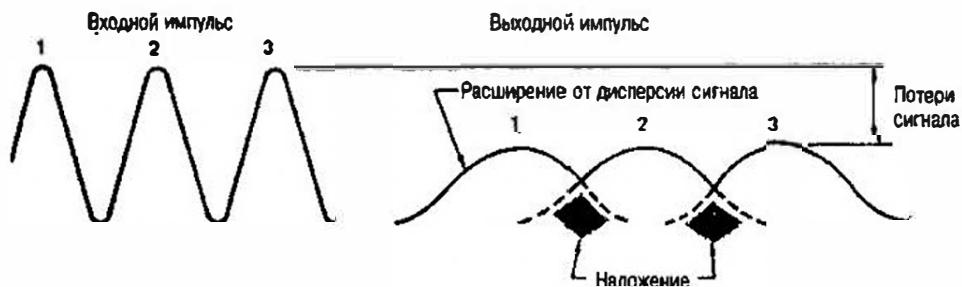
Поскольку свет испытывает отражение под разными углами на разных траекториях (в различных модах), длина пути, соответствующая различным модам, также отличается. Таким образом, различные лучи затрачивают меньше или больше времени на прохождение одной и той же длины волокна. Лучи, которые движутся вдоль центральной оси ядра без отражений, достигают противоположного конца волокна первыми. Косые лучи появляются позднее. Свет, попадающий в волокно в одно и то же время, достигает противоположного конца в различные моменты времени. Световой импульс расплывается во времени.

Это расплывание называется *модовой дисперсией*. Импульс света, который имел первоначально узкий, строго определенный профиль, в дальнейшем расширяется во времени. Дисперсия может быть обусловлена несколькими причинами. Модовая дисперсия возникает в результате различных длин траекторий, соответствующих различным модам волокна.

Представьте три гоночных автомобиля, двигающихся с одной и той же скоростью. Первая машина движется по прямой линии, соответствующей моде нулевого порядка, в траектории которой отсутствуют отражения. Вторая машина движется по наиболее длинному пути, соответствующему моде максимального порядка. Поскольку ее скорость совпадает со скоростью первого автомобиля, она постоянно будет сзади, проходя много поворотов. Третий автомобиль движется по промежуточной траектории. Если все три автомобиля в одно и то же время начинают двигаться к финишной линии, находящейся на расстоянии одной мили, то, очевидно, что они достигнут ее в различные моменты времени. Аналогичное утверждение справедливо и для лучей, распространяющихся в волокне.

Типичное значение модовой дисперсии для волокна со ступенчатым профилем показателя преломления составляет от 15 до 30 н сек/км. Это означает, что лучи света, попадая в волокно одновременно, достигают противоположного конца волокна длиной в один километр с интервалом от 15 до 30 наносекунд. При этом первыми приходят лучи, двигающиеся вдоль центральной оси.

Пятнадцать или тридцать наносекунд могут показаться не столь уж большим интервалом времени, однако, именно модовая дисперсия ограничивает возможную полосу пропускания оптического волокна. Расплывание импульса приводит к перекрыванию крыльев соседних импульсов, как изображено на рис. 5.4. Вследствие этого импульсы трудно отличить один от другого, а заключенная в них информация теряется. Уменьшение дисперсии приводит к увеличению полосы пропускания.



**Рис. 5.4.** Расширение импульса

## Волокно со сглаженным индексом

Одна из возможностей уменьшения модовой дисперсии — использование сглаженного профиля показателя преломления. В этом случае ядро состоит из большого числа концентрических колец, похожих на годовые кольца дерева. При удалении от центральной оси ядра показатель преломления каждого слоя снижается. На рис. 5.5 представлена структура волоконного ядра.



**Рис. 5.5.** Концентрические уровни уменьшения показателя преломления в волокне со сглаженным индексом (фотография предоставлена AT&T Bell Laboratories)

Напомним, что свет движется быстрее по среде с меньшим показателем преломления. Поэтому чем дальше расположена траектория светодового луча от центра, тем быстрее он движется. Каждый слой ядра отражает свет. В отличие от ситуации со ступенчатым профилем показателя преломления, когда свет отражается от резкой границы между ядром и оптической об-

лочкой, здесь свет постоянно и более плавно испытывает отражение от каждого слоя ядра. При этом его траектория отклоняется к центру и становится похожей на синусоидальную. Лучи, которые проходят более длинные дистанции, делают это большей частью по участкам с меньшим показателем преломления, двигаясь при этом быстрее. Свет, распространяющийся вдоль центральной оси, проходит наименьшую дистанцию, но с минимальной скоростью. В итоге все лучи достигают противоположного конца волокна одновременно. Использование сглаженного профиля показателя преломления приводит к уменьшению дисперсии до 1 н сек/км и менее.

Популярные виды данного типа волокон имеют диаметры ядер 50, 62.5 и 85 микрон, а диаметр оптической оболочки 125 микрон. Эти волокна используются там, где требуется широкие полосы пропускания, в частности, в передаче телевизионного сигнала, локальных сетях, компьютерах и т.д. Волокно 62.5/125 является наиболее популярным и широко распространенным.

## Одномодовое волокно

Другой путь уменьшения модовой дисперсии заключается в уменьшении диаметра ядра до тех пор, пока волокно не станет эффективно передавать только одну моду. Одномодовое волокно имеет чрезвычайно малый диаметр — от 5 до 10 микрон. Стандартный диаметр переходного слоя составляет 125 микрон и выбран, исходя из следующих соображений:

1. Оптическая оболочка должна быть в 10 раз толще, чем ядро одномодового волокна. Для ядра в 8 мкм она должна быть не менее 80 мкм.
2. Данный размер совпадает с размером оптической оболочки для волокна со ступенчатым профилем показателя преломления, что обеспечивает стандартизацию размеров волокон.
3. Данный выбор облегчает монтажные работы, так как делает волокно менее хрупким, а его диаметр достаточно большим, что позволяет обрабатывать волокно вручную.

Поскольку данное волокно переносит только одну моду, модовая дисперсия в нем отсутствует.

Одномодовое волокно позволяет легко достичь ширины полосы пропускания от 50 до 100 ГГц·км. В настоящее время волокна имеют полосы пропускания в несколько гигагерц и позволяют передавать сигнал на десятки километров. До 1985 года наиболее крупными были коммерческие волоконно-оптические системы передачи цифровой телефонии, имевшие скорость передачи информации 417 Мб/сек. Эти системы позволяли обслуживать одновременно 6048 телефонных переговоров и работали на одномодовом волокне, позволявшем передавать сигнал на 35 километров без повторителя. К концу 1992 года возможности телефонных линий выросли до 10 Гб/сек и 130 000 звуковых каналов.

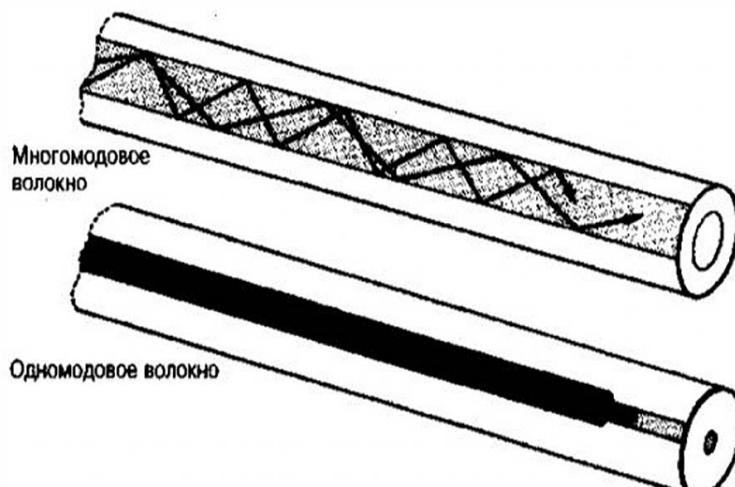
Такой рост возможностей волоконных линий происходил за счет улучшения электронных систем, работающих на обоих концах, а не за счет улучшения кабельной системы. Характеристики одномодовой системы ограничены возможностями электроники, а не волокна. Еще одно преимущество одномодового волокна заключается в том, что оно может быть про-

ложено один раз, с тем чтобы в дальнейшем возможности передающей линии возрастили по мере развития и замены электронных устройств. Это позволяет экономить средства на прокладке новой более современной передающей линии и добиваться увеличения скорости передачи наиболее экономным способом.

Границочные значения параметров, начиная с которых волокно работает в одномодовом режиме, зависят от длины волны несущего света. Пусть длина волны 820 нм соответствует многомодовому режиму работы волокна. По мере роста длины волны света все меньшее количество мод выживает, пока не остается только одна. Одномодовый режим работы волокна начинается, когда длина волны света приближается к диаметру ядра. При 1300 нм, например, в волокне остается только одна мода и волокно становится одномодовым.

В зависимости от конструкции различные виды волокон имеют специфические длины волн, называемые *пороговыми* длинами. Излучение с длиной волны, превосходящей пороговую длину, распространяется в одномодовом режиме. Волокно, предназначенное для работы в одномодовом режиме на длине волны в 1300 нм, имеет пороговую длину около 1200 нм.

Принцип работы одномодового волокна ненамного сложнее обычного распространения луча вдоль ядра. Использование геометрической оптики для описания работы данного вида волокна не совсем корректно, так как в данном подходе не учитывается распределение электромагнитной энергии внутри волокна. Некоторая часть электромагнитного излучения переносится в оптической оболочке, как показано на рис. 5.6. Кроме того, диаметр светового пучка, вводимого в волокно, превышает диаметр его ядра. Для определения поперечного размера светового пятна в волокне используется термин — диаметр модового поля. В отличие от многомодового, в одномодовом волокне излучение присутствует не только внутри ядра. Поэтому диаметр модового поля лучше характеризует излучение, чем диаметр ядра.



**Рис. 5.6.** Оптическая мощность в многомодовом и одномодовом волокне (рисунок предоставлен Corning Glass Works)

Особенность распространения излучения в одномодовом режиме подчеркивает еще одно отличие одномодового волокна от многомодового. В одномодовом волокне излучение переносится не только внутри ядра, но и в оптической оболочке, в связи с этим возникает дополнительное требование к эффективности переноса энергии в этом слое. В многомодовом волокне прозрачность оптической оболочки практически не имеет никакого значения. Действительно, в этом случае возникновение мод в оптической оболочке является даже нежелательным, поэтому требования к ее прозрачности достаточно умерены. Для одномодового волокна это утверждение будет неверно.

## Волокна со смещенной дисперсией

Далеко не во всех одномодовых волокнах используется ступенчатый профиль показателя преломления. Некоторые имеют более сложную структуру, позволяющую оптимизировать работу волокна на какой-либо одной длине волны. Например, волокно со ступенчатым профилем имеет нулевую макромолекулярную дисперсию на длине волны 1300 нм. Нулевая дисперсия, обсуждаемая в следующей главе, важна для создания волокна с максимальной информационной емкостью. При длине волны 1550 нм дисперсия примерно в пять раз сильнее. Однако уровень затухания существенно ниже именно на длине 1550 нм:

- от 0.35 до 0.50 дБ/км при 1300 нм
- от 0.20 до 0.30 дБ/км при 1550 нм

Отличие в затухании и дисперсионных характеристиках волокна на двух приведенных длинах волн может быть использовано для дальнейшего улучшения его свойств. Волокно может работать в режиме с большей скоростью передачи на длине 1300 нм, но на меньшие расстояния, или при меньших скоростях, но на большие расстояния при 1550 нм.

Новейшие одномодовые волокна имеют структуру, которая позволяет достигать низких потерь и малой дисперсии на одной и той же длине волны. Таким образом, у системы появляется возможность работать на больших скоростях и на более дальние расстояния. Волокна со сдвигом дисперсии имеют структуру, позволяющую сдвинуть значение длины волны с нулевой дисперсией, обычно с 1300 к 1550 нм. Производятся также волокна с плоским профилем дисперсионной зависимости от длины волны, которые имеют низкую дисперсию в широком диапазоне длин волн.

## Коротковолновые одномодовые волокна

Одномодовые волокна могут изготавливаться с более короткой пороговой длиной волны. Известны волокна с пороговой длиной волны, равной 570 нм, и работающие на длине волны в 633 нм (что соответствует видимому красному свету). При этом диаметр ядра достаточно мал, меньше чем 4 микрона. Другие волокна имеют пороговую длину волны 1000 нм, рекомендованную рабочую длину волны 1060 нм и диаметр ядра 6 микрон. Эти волокна используются в специальных телевизионных, компьютерных и управляющих системах. Данный тип волокон ни в коей мере не заменяет

обычное одномодовое волокно, работающее на длинах волн 1300 и 1550 нм. Причина прежде всего в том, что более высокое значение затухания, до 10 дБ/км при 633 нм волокне, ограничивает его использование на больших расстояниях.

## Пластиковые волокна

Основная часть этой книги посвящена стеклянным волокнам, но и пластиковые волокна нельзя оставить совсем без внимания. Самая высокая производительность пластиковых волокон составляет 50 Мб/сек на расстоянии более 100 метров. Этот уровень производительности является вполне конкурентным по сравнению с медными скрученными парами. Пластиковые волокна имеют относительно большие размеры ядер и очень тонкие оптические оболочки. Типичные размеры составляют 480/500, 735/750 и 980/1000 микрон, при этом допустимые отклонения от геометрических характеристик у пластиковых волокон намного большие, чем у стеклянных. Пластиковое волокно с диаметром ядра 480 микрон и 500-микронной оптической оболочкой в действительности допускает отклонения от указанных параметров на 15 микрон в ту или другую сторону.

Пластиковые волокна имеют несколько уникальных особенностей, делающих их привлекательными там, где важно снижение затрат.

Пластиковые волокна и соответствующие им компоненты, такие как источники света, приемники и соединители, гораздо дешевле, чем их аналоги для стеклянного волокна.

Пластиковое волокно использует красный свет в диапазоне 660 нм. Использование света видимого диапазона облегчает диагностику волокна и определение места повреждения, поскольку свет в волокне виден визуально. Кроме того, в отличие от систем, основанных на стеклянном волокне, здесь не возникает проблема безопасности использования инфракрасного лазерного излучения и ограничения мощности.

Пластиковые волокна являются достаточно прочными, с малым радиусом изгиба и способностью восстанавливать первоначальную форму после снятия нагрузки. Электромагнитная невосприимчивость пластиковых волокон делает их привлекательными для использования при наличии высокого уровня помех во внешнем среде.

И наконец, технологические операции с этими волокнами просты и доступны. Соединение пластикового волокна производится без особых затруднений в течение одной минуты или даже быстрее.

Из-за своей низкой стоимости, хороших характеристик и прочности пластиковые кабели находят применение в автомобилестроении, музыкальных системах, различной бытовой технике. В Японии, например, был разработан стандарт для использования пластиковых волокон в бытовых электронных системах, таких как цифровые тюнеры и CD-проигрыватели.

## Количество мод в волокне

Число мод, допускаемых волокном, в известной степени определяет его информационную емкость. В частности, модовая дисперсия приводит к расширению импульсов и их перекрытию, что в свою очередь ограничивает

скорость передачи данных по оптическому волокну. Дисперсия зависит от длины волны и диаметра ядра.

Введем число  $V$ , нормированную частоту, которая выражается через диаметр ядра, длину волны распространения света и волоконную характеристику NA (смысл данной характеристики будет пояснен в следующей главе):

$$V = \frac{2\pi d}{\lambda} (\text{NA})$$

Данное число  $V$  полностью определяет число мод, допускаемых волокном. Для простого волокна со ступенчатым индексом количество мод приблизительно определяется выражением

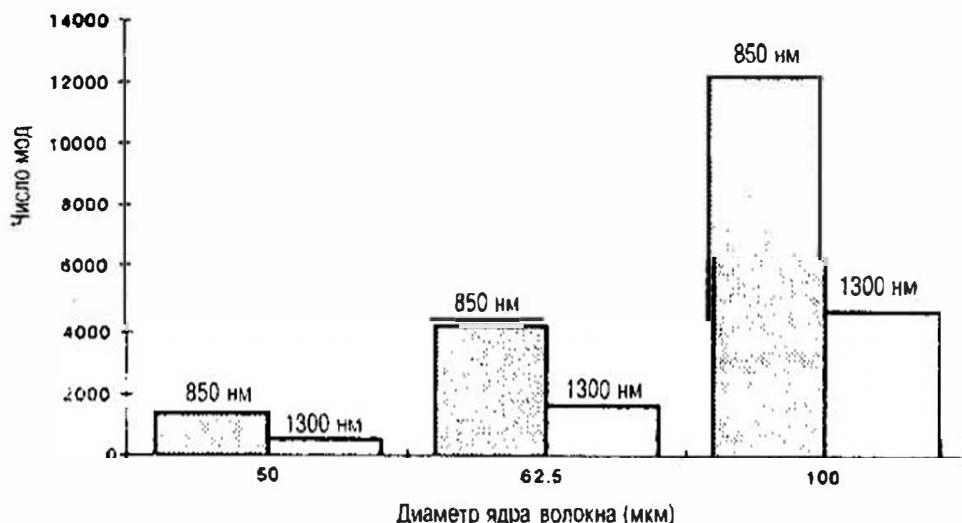
$$N = \frac{V^2}{2}$$

Для волокна со сглаженным профилем показателя преломления число мод равно

$$N = \frac{V^2}{4}$$

Из уравнений видно, что число мод определяется диаметром ядра, волоконным коэффициентом NA и длиной распространения волны. Число мод в волокне со сглаженным индексом примерно в два раза меньше числа мод в волокне со ступенчатым индексом, имеющим те же значения NA и диаметра ядра. Волокно с диаметром ядра 50 микрон поддерживает около 1000 мод.

Когда число  $V$  волокна со ступенчатым индексом становится равным 2.405, волокно поддерживает только одну моду. Число  $V$  может быть уменьшено за счет уменьшения диаметра ядра, увеличения рабочей длины волны



**Рис. 5.7.** Число мод волокон для двух длин волн

или уменьшения НА. Таким образом, одномодовый режим передачи сигнала по волокну может быть обеспечен настройкой этих параметров.

Рис. 5.7 демонстрирует число мод, поддерживаемых тремя различными видами распространенных волокон, работающих на двух различных длинах волн. Для одного и того же волокна переход с рабочей длины волны 1300 нм на длину волны 850 нм приводит к увеличению числа поддерживаемых волокном мод почти в два раза. Аналогично, уменьшение диаметра ядра также существенно уменьшает число мод.

## Сравнение волокон

В таблице 5.1 представлены типичные характеристики различных волокон. Напомним, что смысл параметра НА будет в целях удобства изложения пояснен в следующей главе. Сейчас же отметим, что, качество и физические свойства волокон могут значительно различаться. Термин "качество" рассматривается в широком смысле: лучшее качество означает более широкую полосу пропускания, большую информационную емкость и низкие потери. Низкая стоимость и безопасность делают более конкурентными другие типы волокон. Таблица содержит также некоторое обобщение, касающееся низких потерь и полосы пропускания:

- Волокна в соответствии с их качеством могут быть расставлены в следующем порядке:
  - Пластиковые PCS
  - Стекло со ступенчатым индексом
  - Волокно со сглаженным индексом
  - Одномодовое волокно
- Чем меньше размер ядра, тем лучше качество.
- Стеклянное волокно лучше пластикового.

Отметим, что такого рода классификация ни в коей мере не исключает более детальной классификации и не претендует на исчерпывающее изложение предмета. Волоконно-оптический кабель должен соответствовать конкретным требованиям. При передаче только нескольких тысяч битов в секунду на несколько метров достаточно использовать пластиковый кабель. Пластиковое волокно дешевле, так же как и совместимые с ним компоненты: источники, детекторы и соединители. Использование одномодового волокна для таких задач походило бы на использование "Феррари" для поездки в соседний магазин. Выбор волокон с заведомо худшими характеристиками определяется конкретной задачей. Каждое волокно хорошо по-своему.

**Таблица 5.1. Типичные характеристики волокон.**

Тип волокна	Диаметр ядра (мкм) <sup>1</sup>	Диаметр оптической оболочки (мкм)	NA	Максимальное затухание (дБ/км)					Максимальная полоса пропускания (МГц/км)
				650	790	850	1300	1550	
Одномодовое	3.7	80 или 125	10						
	5.0	85 или 125		2.3					5000 при 850 нм
	9.3	125	0.13			0.4	0.3		6 дисп./км <sup>2</sup>
	8.1	125	0.17			0.5	0.25		
Сглаженный индекс	50	125	0.20		2.4	0.6	0.5		600 при 850 нм 1500 при 1300 нм
	62.5	125	0.275		3.0	0.7	0.3		200 при 850 нм 1000 при 1300 нм
	85	125	0.26		2.8	0.7	0.4		200 при 850 нм 400 при 1300 нм
	100	140	0.29		3.5	1.5	0.9		300 при 850 нм 500 при 1300 нм
Ступенчатый индекс	200	380	0.27		6.0				6 при 850 нм
	300	440	0.27		6.0				6 при 850 нм
PCS	200	350	0.30	10					20 при 790 нм
Пластик	485	500	0.5	240					5 при 680 нм <sup>3</sup>
	735	750	0.5	230					
	960	1000	0.5	220					

<sup>1</sup> Диаметр моды приведен для одномодового волокна, реальный диаметр меньше. <sup>2</sup> Дисперсия на нанометр ширины источника. <sup>3</sup> Пластиковые волокна обычно используют на расстояния до 100 м, со скоростью передачи 50 Мб/сек.

## Заключение

- Существует три вида волокон: со ступенчатым индексом, со сглаженным индексом и одномодовое.
- Дисперсия — это один из факторов, ограничивающих качество волокна. Для уменьшения дисперсии используют волокна со сглаженным индексом или одномодовые волокна.

Диаметр ядра позволяет грубо оценить качество волокна: чем меньше диаметр, тем шире полоса пропускания и меньше потери.

Существуют волокна разного качества, находящие применение в различных областях техники.

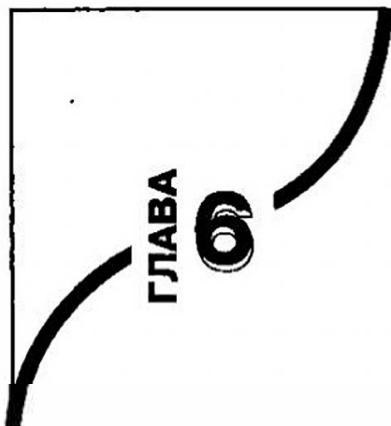
Диаметр модового поля определяет поперечный размер излучения, передаваемого по одномодовому волокну.

Одномодовое волокно использует как ступенчатый индекс, так и более сложные профили показателя преломления.

### Контрольные вопросы



1. Назовите две основные части оптических волокон.
2. Назовите три вида волокон в зависимости от их состава.
3. В соответствии с каким принципом свет распространяется вдоль волокна со ступенчатым профилем показателя преломления?
4. Каким будет качество волокна при уменьшении размера ядра? В случае его увеличения?
5. Как называется путь сохранения энергии в волокне?
6. Как называется волокно с единственной возможной траекторией распространения света?
7. Как называется волокно с переменным показателем преломления ядра?
8. В какой части волокна индекс преломления выше: в ядре или в оптической оболочке?
9. (Да/Нет) Модовая дисперсия постоянна для всех длин волн.
10. (Да/Нет) Преимущество волокна со сглаженным индексом заключается в том, что длины волн, соответствующие минимуму потерь и минимуму дисперсии, всегда совпадают.



# Характеристики волокна

В этой главе рассматриваются наиболее важные для пользователей и конструкторов характеристики оптических волокон и продолжается начатое в предыдущей главе их обсуждение.

## Дисперсия

Как отмечалось в предыдущей главе, дисперсия — это расплывание светового импульса по мере его движения по оптическому волокну. Дисперсия ограничивает ширину полосы пропускания и информационную емкость кабеля. Скорость передачи битов должна быть при этом достаточно низкой, чтобы избежать перекрытия различных импульсов. Чем ниже скорость передачи сигналов, тем реже располагаются импульсы в цепочке и тем большая дисперсия допустима. Существует три вида дисперсии:

1. Модовая дисперсия
2. Молекулярная дисперсия
3. Волноводная дисперсия

## Модовая дисперсия

Модовая дисперсия свойственна только многомодовым волокнам. Она возникает из-за того, что лучи проходят различные пути и, следовательно, достигают противоположного конца волокна в различные моменты времени. Модовая дисперсия может быть уменьшена тремя способами:

1. Использование ядра с меньшим диаметром, поддерживающим меньшее количество мод. Ядро диаметром 100 микрон поддерживает меньшее число мод, чем ядро в 200 микрон.

2. Использование волокна со сглаженным индексом, чтобы световые лучи, прошедшие по более длинным траекториям, двигались со скоростью, превышающей среднюю, и достигали противоположного конца волокна в тот же момент времени, что и лучи, движущиеся по коротким траекториям.
3. Использование одномодового волокна, позволяющего избежать модовой дисперсии.

## Молекулярная дисперсия

Различные длины волн (цвета) также движутся с различными скоростями по волокну, даже в одной и той же моде. Ранее мы видели, что показатель преломления равен

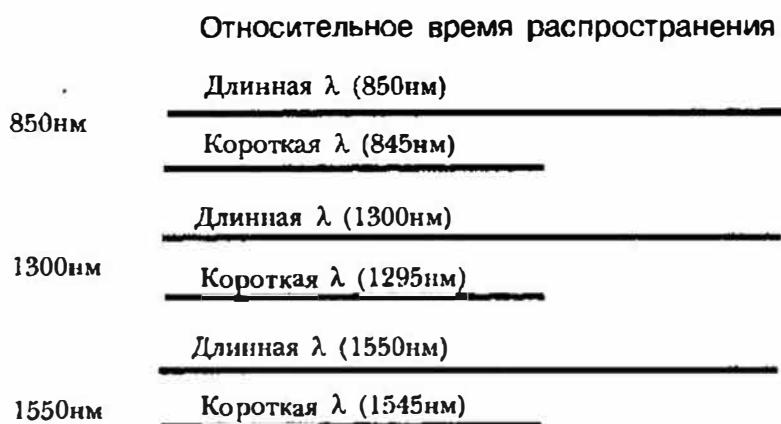
$$\frac{c}{n} = \nu$$

где  $c$  — скорость света в вакууме и  $\nu$  — скорость, соответствующая длине волны в веществе.

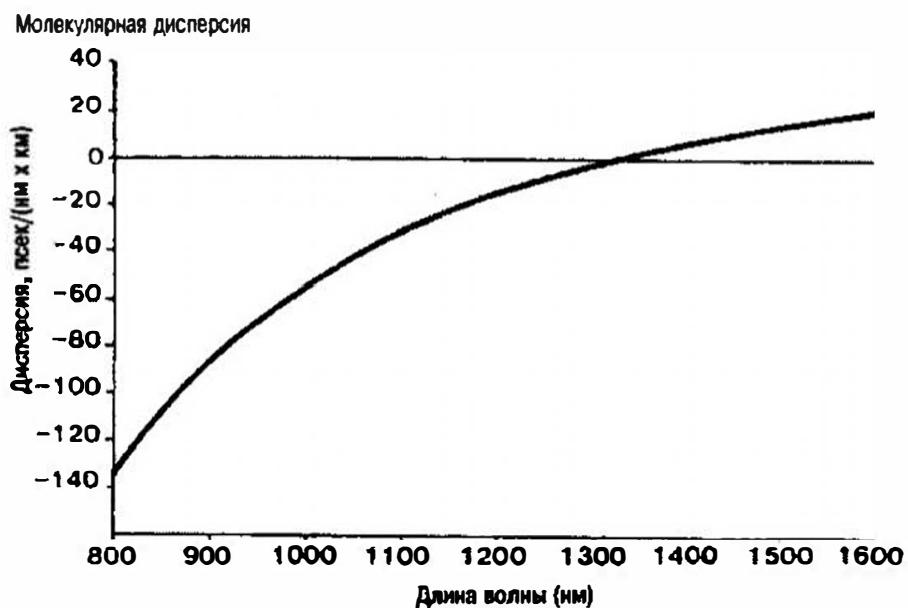
Поскольку каждая длина волны движется с разной скоростью, то величина скорости  $\nu$  в этом уравнении изменяется для каждой длины волны. Таким образом, показатель преломления изменяется в зависимости от длины волны. Дисперсия, связанная с этим явлением, называется *молекулярной дисперсией*, поскольку зависит от физических свойств вещества волокна. Уровень дисперсии зависит от двух факторов:

1. Диапазон длин волн света, инжектируемого в волокно. Как правило, источник не может излучать одну длину волны; он излучает несколько. Диапазон длин волн, выраженный в нанометрах, называется спектральной шириной источника. Светодиод (СИД) характеризуется большей спектральной шириной, чем лазер — около 35 нм для светодиода и от 2 и до 3 нм для лазера.
2. Центральная рабочая длина волны источника. В области 850 нм более длинные волны (более красные) движутся быстрее по сравнению с более короткими (более голубыми) длинами волн. Волны длиной 860 нм движутся быстрее по стеклянному волокну, чем волны длиной 850 нм. В области 1550 нм ситуация меняется: более короткие волны движутся быстрее по сравнению с более длинными; волна 1560 нм движется медленнее, чем волна 1540 нм. В некоторой точке спектра происходит совпадение, при этом более голубые и более красные длины волн движутся с одной и той же скоростью. Это совпадение скоростей происходит в области 1300 нм, называемой длиной волны с нулевой дисперсией. Рис. 6.1 отражает данную идею. Длина стрелок соответствует скорости длин волн; следовательно, более длинная стрелка соответствует более быстрому движению.

Рис. 6.2 показывает типичную картину дисперсии вещества одномодового волокна. На длине волны 1300 нм дисперсия равна нулю. В области длин волн, меньших 1300 нм, дисперсия отрицательна — волны отстают и прибывают позднее. В области свыше 1300 нм волны опережают и прибывают раньше.



**Рис. 6.1.** Молекулярная дисперсия и длина волны



**Рис. 6.2.** Молекулярная дисперсия и длина волны нулевой дисперсии (рисунок предоставлен Corning Glass Works)

Молекулярная дисперсия является основным видом дисперсии в однодомовых системах. Напротив, в многомодовых системах наиболее существенной является модовая дисперсия, так что молекулярной дисперсией можно пренебречь. Во многих случаях модовая дисперсия не играет никакой роли при конструировании волоконных систем. Скорости слишком малы или расстояния слишком незначительны.

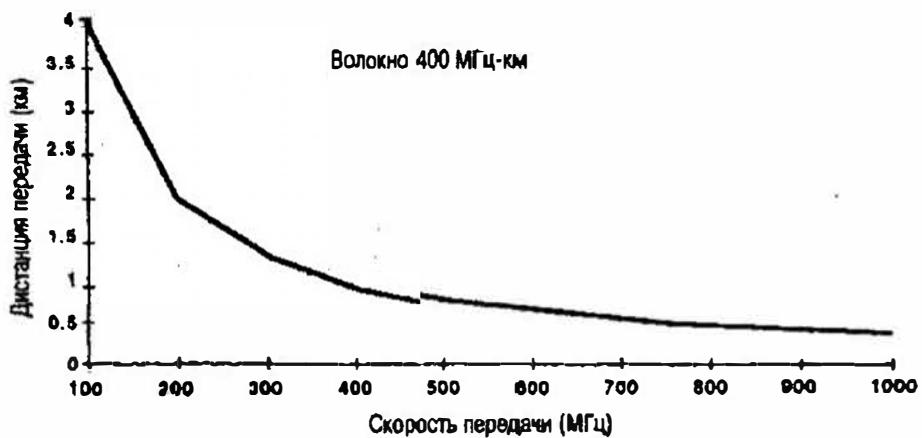
Диапазон длин волн от 820 до 850 нм часто используется для передачи во многих волоконно-оптических системах. В этом диапазоне длина волн молекулярная дисперсия равна примерно 0.1 нсек/нм ширины спектра.

## Волноводная дисперсия

*Волноводная дисперсия* (наиболее важный вид дисперсии в одномодовых волокнах) обусловлена тем, что оптическая энергия движется как по ядру, так и по оптической оболочке, имеющим различные показатели преломления. Излучение движется со слегка различающимися скоростями в ядре и оптической оболочке, что связано с разными показателями преломления. Изменение внутренней структуры волокна позволяет существенно влиять на волноводную дисперсию, тем самым изменения специфицированную общую дисперсию волокна. Это является одним из перспективных направлений разработки одномодовых систем, которые будут рассмотрены в последней главе.

## Ширина полосы пропускания и дисперсия

Многие производители волокна и оптического кабеля не специфицируют дисперсию в многомодовых изделиях. Вместо этого они указывают производство ширину полосы пропускания на длину, или просто полосу пропускания, выраженную в мегагерцах-километрах. Полоса пропускания в 400 МГц·км означает возможность передачи сигнала в полосе 400 МГц на расстояние 1 км. Это также означает, что производство максимальной частоты сигнала на длину передачи может быть меньше или равно 400. Другими словами, можно передавать сигнал более низкой частоты на большее расстояние или более высокой частоты на меньшее расстояние, как показано на рис. 6.3.



**Рис. 6.3.** Зависимость дистанции передачи от ширины полосы пропускания для 400 МГц·км волокна

В одномодовых волокнах спецификация дисперсии необходима. В этом случае дисперсия выражается в пикосекундах на километр и на нанометр спектральной ширины источника (псек/км/нм). Иначе говоря, для заданного одномодового волокна дисперсия в основном определяется спектральной шириной источника: чем шире полоса излучения источника, тем больше дисперсия. Выражение полосы пропускания через одномодовую дисперсию является сложным, его приблизительная оценка может быть получена на основе следующего уравнения:

$$BW = \frac{0.187}{(Disp)(SW)(L)}$$

где

Disp = дисперсия на рабочей длине волны в сек на нанометр и на километр

SW = ширина спектра источника в нм

L = длина волокна в км

Например, при значениях:

Дисперсия = 3.5 сек на нм на км Ширина

спектра = 2 нм Длина волокна = 25 км

будет получено следующее значение:

$$BW = \frac{0.187}{(3.5 \times 10^{-12} \text{ с/нм/км})(2 \text{ нм})(25 \text{ км})}$$
$$= 1068 \text{ МГц или грубо } 1 \text{ ГГц}$$

Удвоение полосы излучения источника до 4 нм существенно уменьшает полосу пропускания примерно до 535 МГц. Таким образом, спектральная ширина источника оказывает заметное влияние на качество одномодовых систем.

## Затухание

**Затуханием** называется потеря оптической энергии по мере движения света по волокну. Измеряемое в децибелах на километр, оно изменяется от 300 дБ/км для пластикового волокна до примерно 0.21 дБ/км для одномодового волокна.

Затухание зависит от длины волны света. Существуют окна прозрачности, в которых свет распространяется вдоль волокна с малым затуханием. На заре своего развития оптические волокна работали в окне прозрачности от 820 до 850 нм. Второе окно относится к области нулевой дисперсии вблизи 1300 нм. Третье окно находится в области 1550 нм. Типичное волокно со структурой показателя преломления 50/125 имеет затухание 4 дБ/км при 850 нм и 2.5 дБ/км при 1300 нм, что соответствует увеличению эффективности передачи в 30%.

Области высокого затухания находятся вблизи 730, 950, 1250 и 1380 нм. Лучше избегать работы в этих диапазонах. Регулирование потерь в волокне может быть достигнуто выбором соответствующей длины волны для передачи. На рис. 6.4 представлена типичная кривая затухания для многомодового



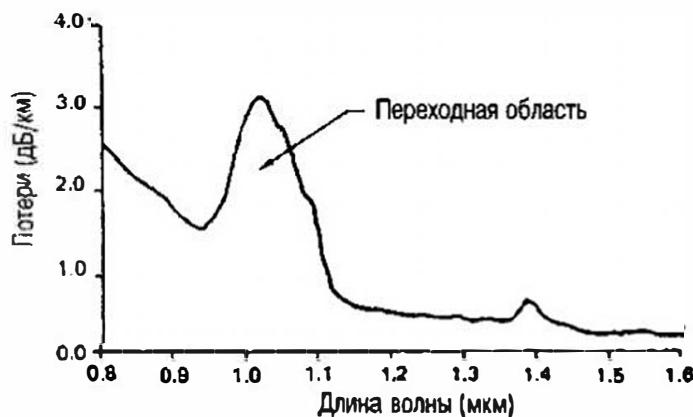
**Рис. 6.4.** Зависимость затухания от длины волны в многомодовом волокне (рисунок предоставлен Corning Glass Works)

волокна с низкими потерями. Рис. 6.5 представляет ту же кривую для одномодового волокна. Отметим высокие потери в переходной области, в которой многомодовый режим работы волокна изменяется и становится одномодовым.

Снижение потерь в волокне требует, чтобы источник света работал в области длин волн с наименьшим затуханием.

Пластиковое волокно лучше всего работает в видимом диапазоне около 650 нм.

Важнейшей особенностью затухания в оптическом волокне является его независимость от частоты модуляций внутри полосы пропускания. В медных кабелях затухание увеличивается с частотой сигнала: чем больше частота, тем большее затухание. Сигнал с частотой 25 мегагерц имеет большое зату-



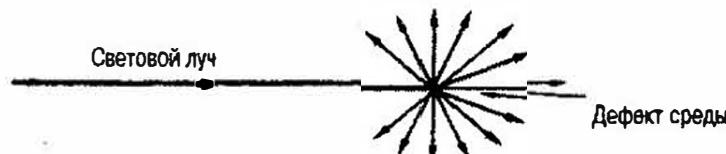
**Рис. 6.5.** Зависимость затухания от длины волны в одномодовом волокне (рисунок предоставлен Corning Glass Works)

хание в медном кабеле, чем сигнал с частотой 10 мегагерц. В результате частота сигнала ограничивает расстояние, на которое может быть послан сигнал. Для увеличения этого расстояния требуется повторитель, осуществляющий регенерацию сигнала. В оптическом волокне оба эти сигнала будут иметь одинаковое затухание. Затухание в волокне определяется двумя эффектами:

1. Рассеяние
2. Поглощение

## **Рассеяние**

*Потери, связанные с рассеянием оптической энергии, обусловлены неоднородностью волокна и его геометрической структурой. Рассеяние на неоднородностях происходит во всех направлениях (рис. 6.6). Свет перестает быть направленным.*



**Рис. 6.6.** Рассеяние

*Релеевское рассеяние* знакомо нам по эффекту покраснения небосвода на закате. При этом более короткие голубые длины волн рассеиваются и поглощаются сильнее, чем красные длины волн. В результате только красные длины волн достигают наших глаз, и мы видим красный закат.

Релеевское рассеяние обусловлено вариациями состава и плотности волокна, неизбежными в процессе его производства. В идеале чистое стекло имеет совершенную молекулярную структуру и, как следствие, однородную плотность. В действительности же плотность стекла не является однородной. В результате этого и возникает рассеяние.

Поскольку интенсивность рассеяния обратно пропорциональна длине волны в четвертой степени, то она быстро уменьшается по мере роста длины волны. Рассеяние определяет минимальный теоретический предел затухания, равный

- 2.5 дБ при 820 нм
- 0.24 дБ при 1300 нм
- 0.012 дБ при 1550 нм

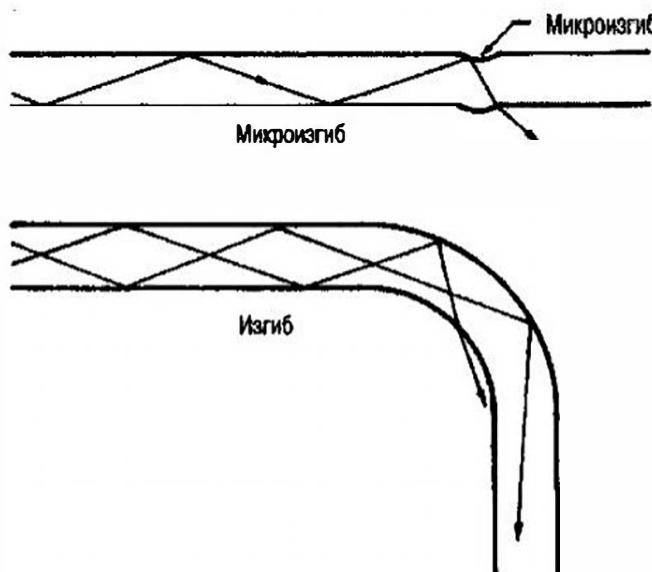
## Поглощение

*Поглощением* называется процесс, при котором неоднородности волокна поглощают оптическую энергию и преобразуют ее в тепло. При этом свет становится более тусклым. Области существенного затухания сигнала волокна связаны с молекулами воды и большим поглощением света гидроксильными молекулами. К другим неоднородностям, обусловливающим поглощение, относятся ионы железа, меди, кобальта, ванадия и хрома. Для обеспечения низких потерь производители волокна должны поддерживать концентрацию этих ионов на уровне одной миллиардной. Современная технология производства волокна позволяет добиваться этого в контролируемых условиях особо чистого окружения. Поэтому проблема поглощения света в волокне не столь важна, как несколько лет назад.

## Потери, связанные с микроизгибами

Этот вид затухания связан с небольшими вариациями профиля границы ядро/оптическая оболочка. На рис. 6.7 показано, что данные вариации границы могут приводить к отражению мод высокого порядка под углами, не допускающими дальнейших отражений. При этом свет покидает волокно.

Микронеоднородности границы могут возникнуть при производстве волокна. Развитие технологий производства волокна и кабеля направлено на уменьшение этих микронеоднородностей.



**Рис. 6.7.** Потери и изгибы волокна

## Равновесное распределение мод

*Равновесное распределение мод (PPM)* является важной концепцией в волоконной оптике. Несмотря на то, что свет в волокне переносится большим количеством мод, не все они переносят одинаковое количество энергии. Эффективность различных мод различна. В некоторых модах свет вообще не переносится. Более того, энергия может переходить из одной моды в другую; траектории света могут меняться.

В идеальном волокне первоначально существующая в какой-либо моде энергия сохраняется в ней. Но в действительности энергия переходит между модами, что связано с изгибами волокна, вариациями диаметра и показателя преломления ядра или неоднородностями волокна.

По мере движения свет будет переходить из одной моды в другую, пока не будет достигнуто PPM. После этого дальнейшее распределение энергии между модами в нормальных условиях не происходит. Оно может происходить только в экстраординарных условиях, обусловленных повреждением волокна или существенным изгибом кабеля. При PPM в неэффективных модах будет потеряна оптическая энергия.

При отсутствии PPM волокно называется *переполненным или ненаполненным*. В переполненном волокне неэффективные моды участвуют в переносе оптической энергии. Свет, переносимый этими модами, быстро затухает или теряется на небольшом расстоянии. Это явление можно рассматривать как избыток энергии и не учитывать его в большинстве случаев. Некоторые источники света, особенно СИД, могут переполнять волокно. Это означает, что они излучают свет в модах, перенос которых вдоль волокна неэффективен. Некоторые из этих мод существуют в оптической оболочке. Другие существуют в ядре и являются модами высокого порядка, перенос которых неэффективен.

В ненаполненном волокне свет распространяется только в модах низкого порядка. Например, лазер с узконаправленным интенсивным пучком может закачивать свет только в моды низкого порядка, движущиеся с малым количеством отражений. По мере движения часть энергии, заключенной в этих модах, перейдет в моды высокого порядка, и PPM будет достигнуто.

Представим волокно в виде шланга для поливки. Если мы попытаемся запустить слишком большой поток воды в шланг, только некоторая часть воды попадет в него. Остальная часть воды будет двигаться по внешней поверхности шланга (вдоль оптической оболочки) и только на небольшое расстояние. Если с другой стороны мы запускаем в шланг узкий поток воды, то вода вначале не будет заполнять его целиком. Однако это произойдет на некотором расстоянии. Таким образом, поток воды в шланге достигнет по мере движения своего равновесного состояния или PPM.

Модовое распределение в волокне короткой длины зависит от характеристик источника света. СИД, как правило, переполняет волокно. С расстоянием, однако, модовое распределение становится независимым от источника.

Расстояние, на котором достигается PPM, зависит от вида волокна. В пластиковом волокне для достижения PPM требуется всего лишь несколько метров, в стеклянном волокне высокого качества — десятки километров.

Понимание равновесного распределения мод важно по двум причинам.

Во-первых, потери оптической энергии — затухание — в оптическом волокне зависят от модового распределения. На коротких расстояниях, когда PPM еще не достигнуто, потери пропорциональны длине. После достижения PPM потери пропорциональны квадратному корню длины.

Во-вторых, модовое распределение зависит от ряда других характеристик волокна. Рассмотрим следующий пример в качестве иллюстрации. Предположим, что волокно длиной один метр соединено с переполняющим его источником света. Измеряя оптическую энергию на другом конце волокна, мы получаем значение, равное 750 микроваттам. Однако эта энергия включает энергию неэффективных мод, которая будет теряться по мере достижения PPM. Теперь изменим условия эксперимента и обмотаем волокно вокруг сердечника малого диаметра. При этом мы инициируем достижение PPM на небольшом расстоянии. В этом случае, возможно, наше измерение энергии даст значение, равное лишь 500 микроваттам.

Куда уходят недостающие 250 микроватт? Разница в 250 микроватт связана с потерями энергии, происходящими в волокне до достижения PPM.

Для того, чтобы аккуратно сравнить два волокна, два источника света или два соединителя, нужно знать условия, при которых производители тестировали их. Если один производитель использовал полностью наполненное волокно, а другой использовал волокно, находящееся в условиях PPM, то соответствующие результаты измерения могут существенно отличаться, даже если оба волокна полностью идентичны. Большинство современных волоконно-оптических тестовых измерений выполняются в условиях PPM для облегчения корректного сравнения результатов.

Эффект PPM также важен с точки зрения других характеристик волокна: численной апертуры и эффективного диаметра.

## Численная апертура

*Численной апертурой* (*Numeric aperture, NA*) называется способность волокна собирать лучи. Только лучи, которые инжектируются в волокно под углами, большими критического, смогут распространяться вдоль него. NA зависит от свойств материалов волокна и определяется показателями преломления ядра и оптической оболочки:

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

Отметим, что NA является безразмерной величиной.

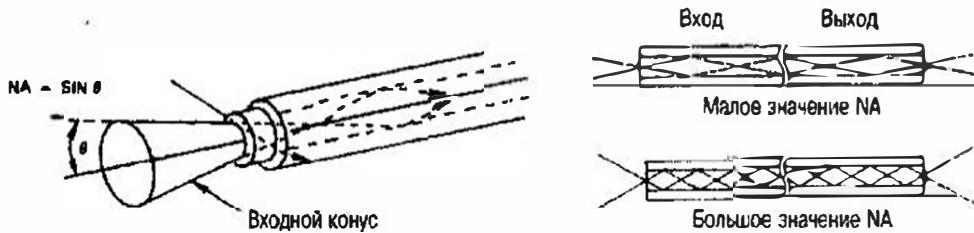
Также можно определить величину углов, при которых свет распространяется вдоль волокна. Эти углы образуют конус, называемый *входным конусом*, угловой радиус которого определяет максимальный угол ввода света в волокно. Входной конус связан с NA:

$$\theta = \arcsin(NA)$$

$$NA = \sin\theta$$

где  $\theta$  (тета) — половина угла ввода (рис. 6.8).

NA волокна является важной характеристикой, так как она указывает на то, как свет вводится в волокно и распространяется по нему. Волокно с



**Рис. 6.8.** Числовая апертура (рисунок предоставлен AMP Incorporated)

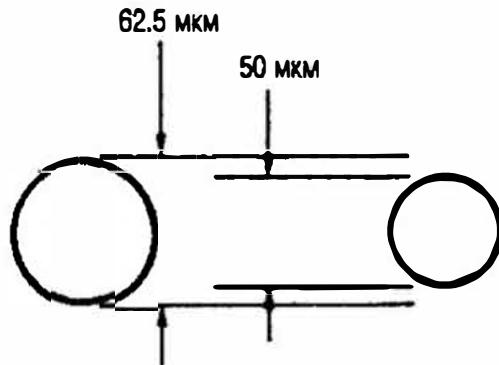
большим значением НА хорошо принимает свет, в то время как в волокно с малым значением НА можно ввести только узконаправленный пучок света.

Как правило, волокна с широкой полосой пропускания имеют малые значения НА. Таким образом, они допускают существование малого числа мод, означающее малую дисперсию и более широкую рабочую полосу. Значения НА изменяются от 0.5 в пластиковом волокне до 0.2 в волокне со слаженным профилем показателя преломления. Большое значение НА подразумевает большую модовую дисперсию и, как следствие, большее количество возможных световых траекторий.

Производители волокна обычно не специфицируют это значение для одномодовых волокон (типичное значение НА в этом случае равно 0.11), так как НА не является критическим параметром для пользователей и разработчиков. Свет в одномодовом волокне не испытывает отражения или преломления. Таким образом, он не распространяется под углом к границе волокна. Аналогично в случае одномодового волокна свет не заводится под углами внутри входного конуса до полного внутреннего отражения. С учетом последнего можно констатировать, что в одномодовом волокне НА может быть определена чисто формально, особенного значения для практики она не имеет. В последующих главах будет показана важность значения НА для повышения производительности систем на многомодовом волокне и оценки ожидаемой эффективности работы системы.

НА волокна изменяется с расстоянием. Моды высокого порядка, которые распространяются под большими углами, близкими к критическому, быстро покидают волокно. Например, после достижения РРМ в волокне со слаженным профилем индекса его значение НА может уменьшиться до 50%. Это означает, что на выходе из волокна свет распространяется под углами существенно меньшими, чем определяет входной конус. На рис. 6.9 представлены диаметр светового пучка внутри ядра размером 62.5 микрон в условиях полного наполнения и РРМ. Когда волокно наполнено, свет заполняет ядро целиком. При достижении состояния РРМ диаметр светового пучка составляет лишь 50 микрон. При этом НА света в свою очередь также уменьшается.

Источники и приемник также имеют свои апертуры. НА источника определяет угловую апертуру выходного света. НА детектора определяет рабочий диапазон углов для приемника. Для источника особенно важно иметь НА, согласованную с НА волокна, чтобы весь свет, излучаемый источником,



**Рис. 6.9.** Активная область передачи оптической мощности для 62.5 мкм ядра и состояния PPM (рисунок предоставлен AMP Incorporated)

проникал в волокно и распространялся по нему. Рассогласование НА приводит к дополнительным потерям при передаче света от устройства с меньшим значением НА к устройству с большим значением.

## Прочность волокна

Стекло принято считать хрупким. Оконное стекло действительно не гнется. Однако стеклянные волокна можно согнуть в виде окружности небольшого диаметра или завязать в свободный узел, не повреждая их. (Затягивание тугого узла может повредить волокно.)

*Предел прочности* характеризует способность волокна или провода противостоять нагружению или изгибу без повреждения. Предел прочности волокна на разрыв превосходит ту же величину для стальной нити идентичного размера. Более того, медный проводник должен иметь вдвое больший диаметр, чтобы обеспечить тот же предел прочности, что и волокно.

Основная причина, обусловливающая хрупкость волокна, — наличие микротрецчин на поверхности и дефектов внутри волокна. При этом поверхностные трещины более существенны. Поверхностные дефекты могут возрастать под воздействием растягивающей нагрузки, возникающей во время прокладки кабеля. Температурные изменения, механические и химические воздействия, обычное старение также приводят к появлению дефектов.

Расширяющиеся дефекты приводят к случайному обрыву волокна. Для разрезания стекла делается узкая царапина на его поверхности. Затем, в результате резкого надлома, стекло трескается вдоль царапины. Аналогичный процесс происходит и в волокне. Скрытые дефекты действуют аналогично царапине на поверхности стекла. Как только к волокну прикладывается достаточно сильное растягивающее напряжение, дефекты растут внутри волокна до тех пор, пока оно не разрывается.

## Радиус изгиба

Несмотря на то, что волокно может быть согнуто в окружность, оно имеет минимальный радиус изгиба. Достаточно резкий изгиб может разорвать волокна. Изгибы также приводят к двум другим эффектам:

1. Слегка увеличивается затухание. Этот эффект должен быть интуитивно понятен. Изгибы изменяют углы падения и отражения света внутри волокна настолько, что часть его, заключенная в модах высокого порядка, может покидать волокно (подобно случаю с микроизгибами),
2. Уменьшается предел прочности волокна на разрыв. Если растяжение сопровождается изгибом волокна, оно может разорваться при меньшем значении растягивающей нагрузки, чем в случае выпрямленного волокна.

Необходимо запомнить, что минимальный радиус кривизны равен пяти диаметрам кабеля при *отсутствии растягивающих напряжений* и 10 диаметрам кабеля при их наличии.

## Радиационная прочность

*Радиационная прочность* определяет способность оборудования противостоять ядерным эффектам. Влияние радиации на проводники находится под пристальным вниманием американских военных (в особенности, с точки зрения защиты и поддержания их командных, управляющих и коммуникационных систем), атомной индустрии и специалистов других направлений, сталкивающихся с высоким уровнем радиации. Волокна в отличие от проводников не накапливают статические заряды под воздействием радиации. Волокна также не повреждаются мгновенно после расплавления их кабельной оболочки под тепловым воздействием радиационного источника.

Волокна действительно противостоят росту затухания в условиях постоянного радиоактивного облучения высокой интенсивности. Радиационное облучение усиливает поглощение на неоднородностях волокна. Рост затухания зависит от величины накопленной дозы и интенсивности облучения. Всплеск радиационного облучения в 3700 рад в течение 3 наносекунд обуславливает резкий рост затухания до тысяч децибел на километр. Этот всплеск затухания спадает до 10 дБ/км через 10 секунд после облучения и до менее 5 дБ/км в течение последующих 100 секунд. Таким образом, волокна восстанавливают способность передачи информации в течение одной минуты после радиационного облучения, связанного с ядерным взрывом.

Существует другое следствие ядерного взрыва — электромагнитный импульс, хотя его воздействие скорее ближе к электромагнитной невосприимчивости волокна, чем к радиационным эффектам. Два-три ядерных устройства, взорванных на высоте нескольких сотен километров» могут вывести из строя все незащищенное электронное оборудование на территории страны.

Гамма-лучи, возникающие в течение первых наносекунд после взрыва, распространяются в верхних слоях атмосферы до тех пор, пока не поглощаются электронными оболочками газовых молекул. Возникающие при этом

свободные быстрые электроны движутся в магнитном поле земли вдоль искривленных траекторий, обусловливая поперечный электрический ток. Ток приводит к возникновению электромагнитного импульса, излучаемого вниз. Импульс будет улавливаться любым металлическим проводником и приводить к протеканию через него тока. Взрыв боеголовки мощностью в 1 мегатонну может привести к возникновению пикового поля 50 КВ/м с мгновенным значением плотности мощностью в 6 Мвт/кв. м. Этот уровень воздействия находится далеко за границами возможности сохранения незащищенного оборудования. Таким образом, вся система электропитания и коммуникации страны может быть выведена из строя в результате воздействия электромагнитного всплеска, сопровождающего ядерный взрыв.

## Заключение

- Дисперсия лежит в основе явления расплывания импульса света по мере его распространения вдоль волокна.
- Существует три вида дисперсии: модовая, молекулярная и волноводная.
- Дисперсия ограничивает ширину полосы пропускания.
- Дисперсия в многомодовом волокне делится на модовую и молекулярную.
- Дисперсия в одномодовом волокне делится на волноводную и молекулярную. Более существенна молекулярная дисперсия.
- Затухание проявляется в потере мощности сигнала.
- Затухание изменяется в зависимости от частоты света.
- Затухание не зависит от скорости распространения сигнала по волокну.
- Численная апертура определяет собирательную способность волокна. Она определяет величину углов, под которыми свет может вводиться и распространяться в волокне.
- Волокна имеют более высокий предел прочности на разрыв по сравнению с медными проводниками.

## Контрольные вопросы



1. Назовите три вида дисперсии.
2. Какие виды дисперсии не существуют в одномодовом волокне?
3. Информационная емкость многомодового волокна определяется дисперсией или шириной полосы пропускания?
4. Информационная емкость одномодового волокна определяется дисперсией или шириной полосы пропускания?

5. Если многомодовое волокно имеет полосу пропускания в 250 МГц·км, то на какое расстояние оно может обеспечить передачу 750-МГц сигнала?
6. Назовите два основных механизма затухания в волокне
7. На какой длине волны затухание минимально: 850, 1300 или 1550 нм? Почему?
8. Какая специфическая характеристика ограничивает скорость передачи сигнала в одномодовом волокне?
9. Действительно ли волокно восстанавливает свои свойства после кратковременного радиационного облучения и через какое время: секунды, минуты, часы, или дни?
10. (Да/Нет) Текущее значение апертуры всегда указывает на модовые условия распространения света внутри волокна.

# ГЛАВА 7

## Волоконно- оптические кабели

Как правило, волокна перед использованием должны быть снабжены защитной оболочкой, называемой кабельной или защитной. Кабельная оболочка — это внешняя заплитающая структура, окружающая одно или более волокон. Оно схожа по назначению с изоляцией, применяемой в медных кабелях. Кабельная оболочка защищает медные проводники и волокна от внешних агрессивных и механических воздействий, способных привести к повреждению или ухудшению их характеристик. (Дополнительные виды защиты от электрических разрядов, замыканий и пламени, важные для медных кабелей, не требуются для диэлектрических волокон.) Цель данной главы — описание некоторых типичных структур кабелей.

Подобно своим медным аналогам, оптические кабели имеют весьма разнообразную структуру (рис. 7.1). Для любого кабеля важными характеристи-



**Рис. 7.1.** Волоконно-оптические кабели (фотография предоставлена Berk-Tek)

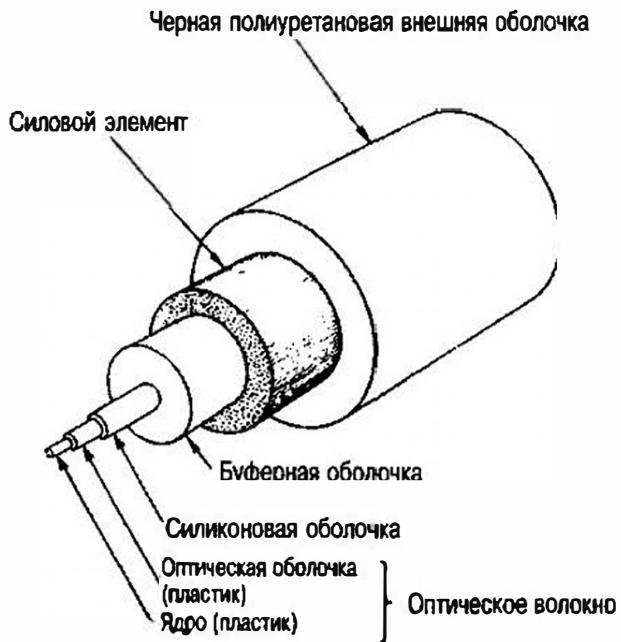
ками являются предел его прочности на разрыв, твердость, срок службы, гибкость, защищенность от внешних воздействий, диапазон рабочих температур и даже внешний вид.

Оценка этих характеристик зависит от конкретного применения. Внешний телефонный кабель находится в экстремальных условиях. Он противостоит меняющимся температурным условиям, налипанию льда, сильному ветру и грызунам, повреждающим его при подземной проводке. Очевидно, что он должен быть прочнее кабеля, соединяющего оборудование внутри телефонного узла и работающего в контролируемых условиях. Кабель, прокладываемый под ковром в офисе, по которому ходят люди, двигают кресла, должен выдерживать дополнительную нагрузку по сравнению с кабелем внутри стен того же офиса.

## Основные компоненты волоконно-оптического кабеля

На рис. 7.2 представлены основные компоненты простого оптического кабеля с одним волокном. Конструкция кабелей может быть достаточно разнообразной, но общими являются следующие компоненты:

- Оптическое волокно



**Рис. 7.2.** Конструкция волоконно-оптического кабеля (рисунок предоставлен Hewlett-Packard)

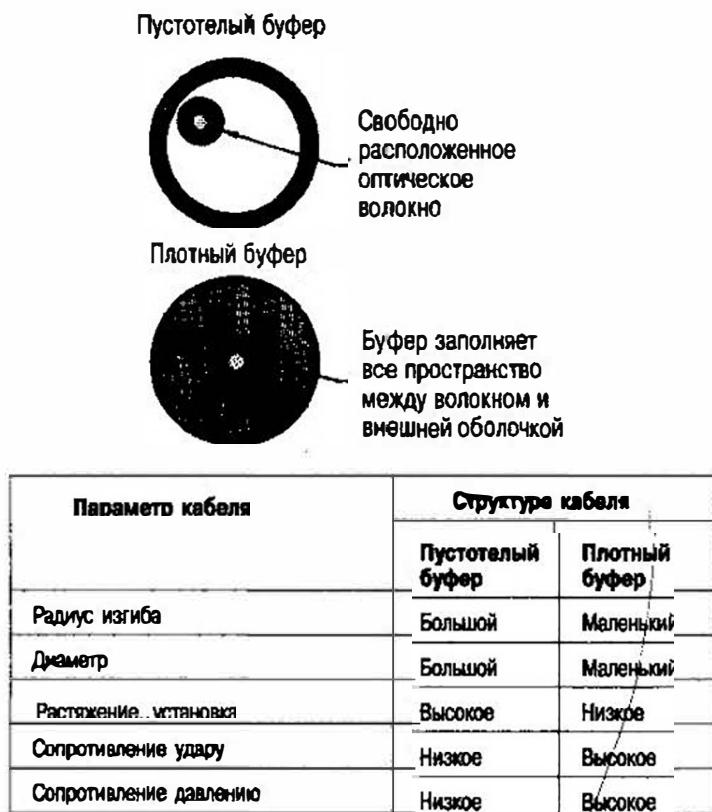
- Буферная оболочка
- Силовой элемент
- Внешняя оболочка

Поскольку мы уже достаточно подробно обсудили устройство оптических волокон, то остановимся на буферной оболочке, силовом элементе и внешней оболочке.

## Буферная оболочка

Наиболее простой вид буфера, упомянутый в главе 5, представляет собой пластиковую оболочку, расположенную поверх оптической оболочки. Данный буфер является частью волокна и наносится производителями волокна. Дополнительный буфер наносится производителями кабелей. (Большинство производителей и дистрибуторов кабелей не занимаются непосредственно производством волокон.)

Существует два вида кабельных буферов: пустотелый и плотный. На рис. 7.3 представлены обе эти конструкции и их качественное сравнение.



**Рис. 7.3.** Пустотелый и плотный буфер (рисунок предоставлен Belden Electronic Wire and Cable)

*Пустотелый буфер* использует твердую пластиковую трубку с внутренним диаметром, в несколько раз превосходящим размер волокна. Одно или несколько волокон укладывается в этой трубке. Буферная трубка изолирует волокно от остальной части кабеля и от механических воздействий. Таким образом, буферная трубка становится элементом, принимающим на себя нагрузку. Если кабель расширяется или сжимается при изменении температуры, это не оказывает заметного влияния на волокно. Волокно имеет более низкое значение коэффициента теплового расширения по сравнению с другими кабельными компонентами, что приводит к меньшему его расширению или сжатию при изменении температуры. Обычно предусматривается некоторый избыток длины волокна по сравнению с длиной трубки, так что кабель может свободно расширяться, не оказывая при этом никакого растягивающего воздействия на волокно.

*Плотный буфер* предполагает непосредственный контакт пластикового элемента с волоконной оболочкой. Эта конструкция обеспечивает лучшую защиту от механических воздействий, но не так хорошо защищает волокно от изменения температуры. Поскольку пластик расширяется и сжимается в различной степени по сравнению с волокном, то сжатие, обусловленное падением температуры, может приводить к образованию микроизгибов.

Кроме того, следует отметить, что кабель с плотным буфером более гибкий и изгибается с меньшим радиусом кривизны. Последнее преимущество делает кабель с плотным буфером особенно ценным для внутренней проводки, когда влияние температуры не столь существенно, а гибкость кабеля позволяет легко укладывать его внутри стен.

## Силовая оболочка

*Силовые элементы* повышают механическую прочность кабеля. В ходе и после прокладки силовые элементы принимают на себя растягивающие напряжения, защищая от них волокно. Наиболее распространенными силовыми элементами являются кевларовая нить, стальные и эпоксидные стержни. Кевлар используется тогда, когда каждое волокно помещается внутри индивидуальной оболочки (рис. 7.2). Стальные нити и стекловолокна применяются в многожильных кабелях. Сталь характеризуется лучшей механической устойчивостью по сравнению с стекловолокном, но в ряде случаев требуется изготовление полностью диэлектрических кабелей. Сталь, например, притягивает разряды молнии, а стекло избавлено от этого недостатка.

## Внешняя оболочка

*Внешняя оболочка*, подобно изоляции провода, обеспечивает защиту от механического трения, масла, озона, кислот, щелочей, растворителей и т.д. Выбор материала внешней оболочки зависит от степени необходимой защиты и стоимости. Таблица 7.1 представляет сравнительные свойства различных наиболее популярных материалов для внешней оболочки.

Когда кабель имеет несколько оболочек и защитных элементов, внешний слой часто называется *экраном*. Тогда внешняя оболочка защищает непосредственно волокно, а экран становится дополнительным слоем. Эта терминология является устоявшейся в телефонной индустрии.

Столбцы таблицы обозначены следующим образом:

- А — Поливинилхлорид (ПВХ)
- Б — Мягкий полиэтилен
- С — Армированный полиэтилен
- Д — Твердый полиэтилен
- Е — Полипропилен
- Ф — Полиуретан
- Г — Нейлон
- Н — Тefлон

**Таблица 7.1. Свойства материалов внешней оболочки  
(данные предоставлены Belden Electronic Wire and Cable).**

	A	B	C	D	E	F	G	H
Сопротивление окислению	3	3	3	3	3	3	3	8
Сопротивление нагреванию	X-3	X	X	3	3	X	3	8
Невосприимчивость к воздействию масла	Д	X	X	X-3	Д	3	3	8
Гибкость при низких температурах	П-Х	X-3	3	3	П	X	X	8
Сопротивление погоды, солнечному свету	X-3	3	3	3	3	X	3	8
Сопротивление озону	3	3	3	3	3	3	3	3
Аbrasивное сопротивление	Д-Х	Д-Х	Д	3	Д-Х	В	3	3
Электрические свойства	Д-Х	3	3	3	3	П	П	3
Сопротивление пламени	3	П	П	П	П	3	П	В
Сопротивление ядерному излучению	X	X	X	Д	X	Д-Х	П	
Сопротивление воде	3	3	3	3	3	П-Х	П-Д	3
Сопротивление кислотам	X-3	X-3	X-3	X-3	3	Д	П-Д	3
Сопротивление алкалоидам	X-3	X-3	X-3	X-3	3	Д	3	3
Сопротивление бензину, керосину и т.д.	П	П-Д	П-Д	П-Д	П-Д	X	X	3
Сопротивление бензолу, толуолу и т.д.	П-Д	П	П	П	П-Д	П	X	3
Сопротивление гидрокарбонатам гвоздичных	П-Д	П	П	П	П	П	X	П
Сопротивление алкоголя	X-3	3	3	3	3	П	П	3

П = плохо, Д = допустимое, X = хорошее, З = замечательное и В = выдающееся. Свойства указаны на основе типовых свойств серийных компонентов. Все свойства могут быть улучшены при подборе компонентов.

## Внутренние кабели

К кабелям, предназначенным для внутренней проводки, относятся:

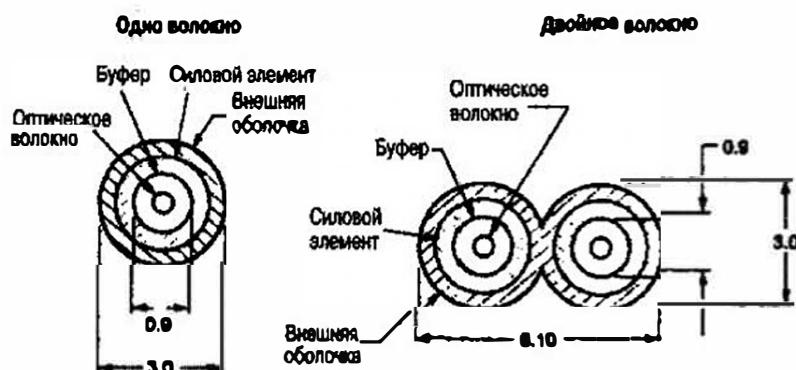
- Симплексные кабели
- Дуплексные кабели
- Многожильные кабели
- Кабели для тяжелых, легких условий эксплуатации или работы под давлением.
- Пожаробезопасные кабели

Волоконно-оптические кабели обычно подразделяют в соответствии с этой классификацией, хотя некоторые категории частично совпадают. На рис. 7.4а-7.4д показаны сравнительные характеристики нескольких типов кабелей.

### Кабели для легких условий эксплуатации

Применение:

- Соединение оборудования
- Соединение оборудования в пределах одного помещения
- Соединение рабочих станций с настенными или напольными розетками и
- Прокладка в зданиях на короткое расстояние
- Объединение в коммутационные панели и распределительные щиты



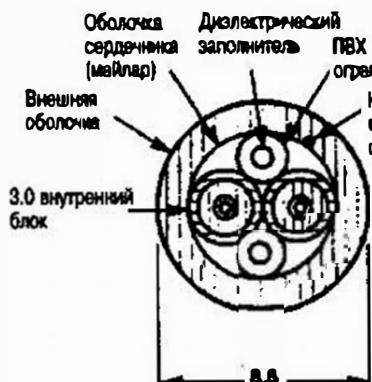
**Рис. 7.4а.** Кабели для прокладки внутри помещений (рисунок предоставлен AMP Incorporated)

### Пожаробезопасные кабели

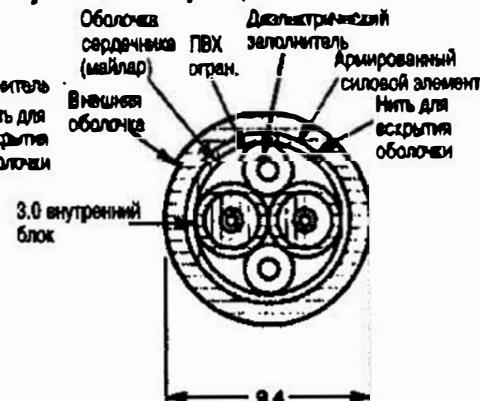
Применение:

- Вертикальная и горизонтальная междуетажная прокладка
- Использование вне помещения при определенных условиях
- Применение при размещении соединителей непосредственно на устройствах в шкафах и коммутационных панелях

#### Стандартное двойное волокно



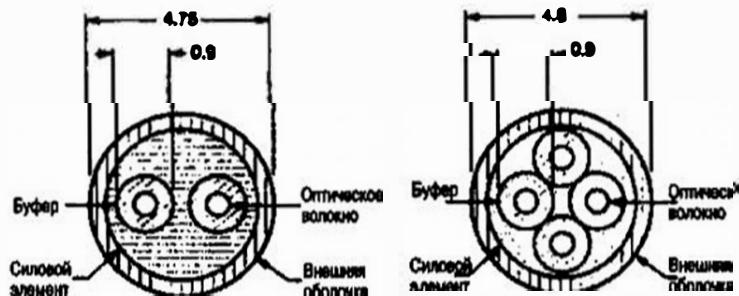
#### Двойное волокно для тяжелых условий эксплуатации



### Двойные и счетверенные кабели для локальных сетей

Применение:

- Офисы и помещения для оборудования
- Соединители с настольными устройствами
- Рекомендуются соединители OPTIMATE PSD



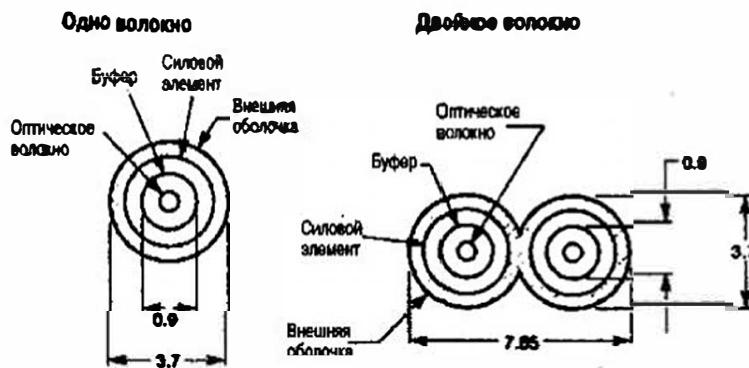
Примечание: размеры в миллиметрах.

**Рис. 7.4b.** Кабели для прокладки внутри помещений (рисунок предоставлен AMP Incorporated)

### Кабели для тяжелых условий эксплуатации

Применение:

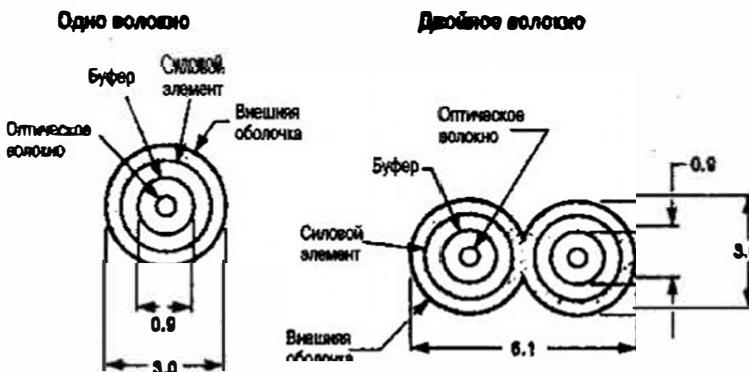
- Соединение оборудования в пределах одного помещения
- Использование вне помещений при определенных условиях
- Кабельные сети зданий



### Кабели для прокладки в полостях

Применение:

- Прокладка между помещениями и в фальшполах
- Кабельные сети зданий, междуетажные соединения и коммутационные центры
- Прокладка внутри зданий



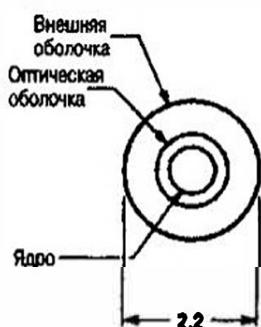
**Рис. 7.4с.** Кабели для прокладки внутри помещений (рисунок предоставлен AMP Incorporated)

## Пластиковые кабели

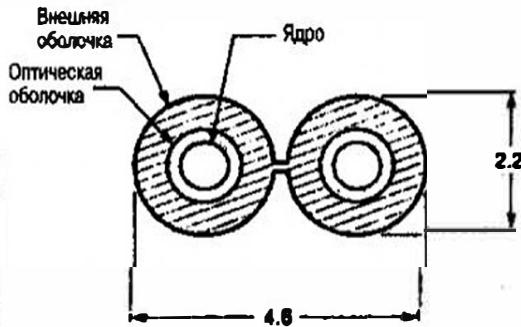
Применение:

- Оптическое наблюдение
- Дешевые волоконно-оптические соединения
- Подключение внешнего оборудования
- Промышленные системы управления

### Одно волокно



### Двойное волокно



**Рис. 7.4d.** Кабели для прокладки внутри помещений (рисунок предоставлен AMP Incorporated)

## Симплексные кабели

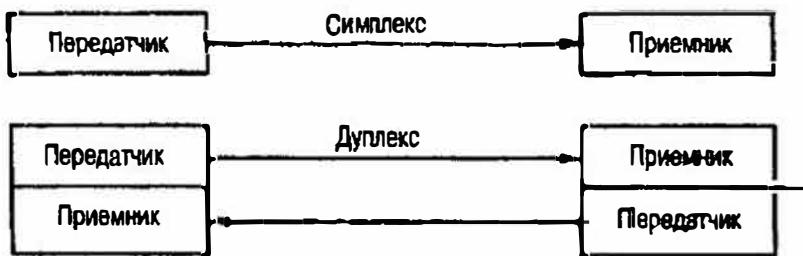
Симплексные кабели содержат одно волокно. Симплекс — термин, используемый в электронике для обозначения одностороннего канала передачи. Поскольку одно волокно позволяет передавать сигнал только в одном направлении от передатчика до приемника, симплексный кабель служит только для одноканальной передачи.

## Дуплексные кабели

Дуплексные кабели содержат два оптических волокна. Дуплекс означает наличие двух каналов передачи. Одно волокно передает сигнал в одном направлении, а другое — в противоположном. (Дуплексный режим работы можно создать с помощью двух симплексных кабелей.) На рис. 7.5 приведено сравнение работы симплексных и дуплексных кабелей.

В действительности дуплексный кабель представляет собой два симплексных кабеля с объединенной внешней оболочкой и подобен известному электрическому кабелю для прокладки внутри помещений, часто называемому "лапшой". Специальная нить для разделения двух жил дуплексного кабеля позволяет легко разделить его на симплексные кабели.

Использование дуплексного кабеля вместо двух симплексных обусловлено также соображениями удобства и эстетики. Проводка дуплексного кабеля также гарантирует большую надежность кабельной системы, поскольку вероятность того, что оба канала выйдут из строя, минимальна. Напомним, что силовой кабель типа "лапша", используемый в настольной лампе, также яв-



**Рис. 7.5.** Симплексный и дуплексный режимы

ляется дуплексным и позволяет легко разделить его на два провода. Однако одна жила такого кабеля не может обеспечить работы электрической лампочки, равно как и в дуплексном волоконно-оптическом кабеле.

## Многожильные кабели

*Многожильные* кабели содержат более двух волокон. Они позволяют передавать сигнал внутри здания. Волокна обычно используются попарно, что позволяет передавать сигнал в обоих направлениях. Десятижильный кабель, например, позволяет организовать пять дуплексных линий передачи сигнала.

Многожильные кабели часто состоят из нескольких полых кабельных трубок, содержащих одно или несколько волокон. Идентификация волокон в такого рода кабелях производится по трубкам, имеющим цветовую маркировку. Данные трубы располагаются в кабеле вокруг центрального силового элемента из стали или стекловолокна. Такое устройство обеспечивает защиту волокон при изгибе кабеля.

## Условия эксплуатации

Конструкция кабеля зависит от его применения. Существует четыре основных вида:

- Для легких условий эксплуатации
- Для тяжелых условий эксплуатации
- Для прокладки в полостях
- Для вертикальной проводки

Кабели для тяжелых условий эксплуатации имеют более плотную внешнюю оболочку по сравнению с кабелями для легких условий, что не выдвигает жестких ограничений при прокладке.

Полости — узкое пространство между стенками, под полом и в потолочным перекрытии, часто используемое для проводки сигнальных, силовых и телефонных линий. Обычно в полостях может легко распространяться пламя во время пожара в здании.

Определенные материалы, применяемые для изготовления внешних оболочек, выделяют во время горения вредный дым. Национальный электрический кодекс (статья 770) требует, чтобы кабели, прокладываемые в полости, были либо защищены от пламени специальными средствами, либо имели внешнюю оболочку, изготовленную из плохо воспламеняющихся и выделяющих при горении минимальное количество дыма материалов. Underwriters Laboratories (UL) составили спецификацию тестовых испытаний, называемых UL 910 Steiner Tunnel. Эта спецификация позволяет определить пожароустойчивость кабелей. Кабели, используемые для прокладки в полости, должны пройти эти испытания и получить сертификат UL на соответствие типу OFNP кабели.

Кабели для вертикальной проводки используются для прокладки между этажами здания. Такие кабели имеют конструкцию, предотвращающую распространение пламени между этажами, и должны проходить тестирование типа UL 1666. Они сертифицируются UL как OFNR кабели.

## Разделяемые кабели

Данный тип кабеля состоит из нескольких симплексных кабелей, заключенных в общий экран. Кабель, изображенный на рис. 7.4, содержит две диэлектрические вставки, позволяющие зафиксировать симплексные кабели внутри внешнего экрана, и майларовую оболочку, охватывающую как симплексные кабели, так и диэлектрические вставки. Внешний экран имеет вытяжной нейлоновый трос, что позволяет легко и быстро его снимать. Особенность разделяемого кабеля заключается в независимом использовании составляющих его симплексных кабелей, которые могут иметь различную длину. Кабель данного типа обычно имеет два или четыре симплексных кабеля, хотя возможно и большее их количество.

## Внешние кабели

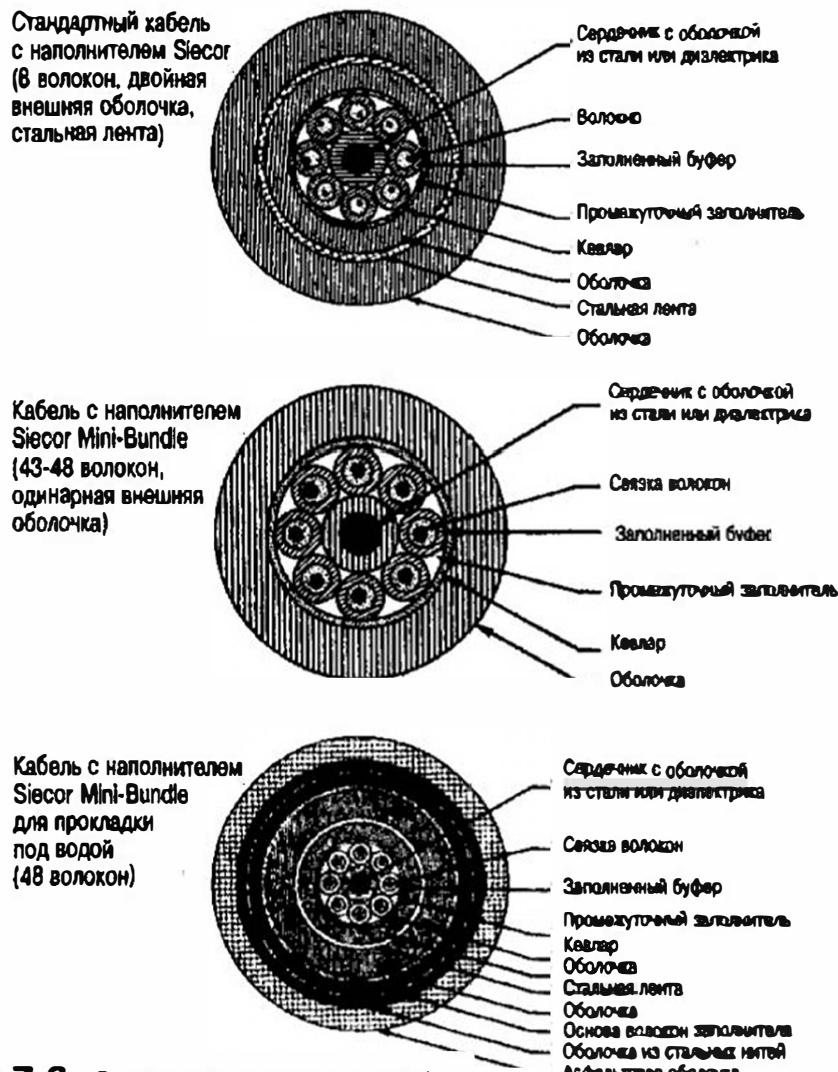
Кабели для внешней прокладки должны соответствовать более жестким окружающим условиям, чем внутренние кабели. Монтаж внешних кабелей производится несколькими способами:

- *Подвеска*: кабель натягивается между телефонными столбами.
- *Непосредственное закапывание*: кабель укладывается в открытую траншею и засыпается землей.
- *Косвенное закапывание*: кабель также закапывается в землю, но в специальных кабельных каналах.
- *Подводная прокладка*: кабель укладывается под водой, возможно и трансокеаническое применение.

Кабели данного типа должны быть более прочными и долговечными, так как они подвергается различным экстремальным воздействиям. Большинство кабелей имеет дополнительные защитные экраны. Например, стальная оболочка используется для предохранения от грызунов, которые могут повредить как внешний экран, так и само волокно. В других конструкциях в качестве наполнителя полых кабельных трубок используется гель для вытес-

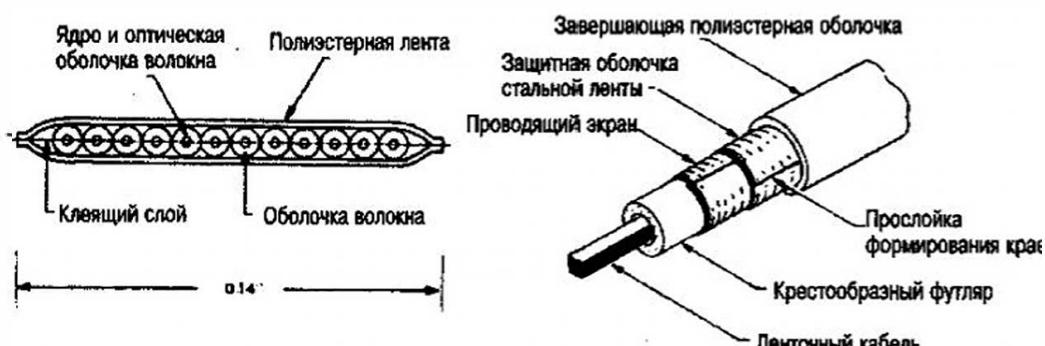
нения воздуха. Кроме того, наполнение кабельной трубы гелем предохраняет от просачивания воды внутрь кабеля. В отсутствие геля вода может попасть внутрь кабеля, а при замерзании расширится и повредит кабель. Чтобы избежать этого, волокно помещается в "плавающем" состоянии внутри трубы, наполненной незамерзающим гелем.

Большинство внешних кабелей содержит несколько волокон. Силовой элемент обычно представляет собой мощный стальной или стекловолоконный сердечник, хотя иногда используются и тонкие стальные тросы, запаянные во внешнем экране. Большинство многожильных кабелей имеет несколько кабельных трубок. На рис. 7.6 представлены поперечные сечения нескольких типичных кабельных конструкций.



**Рис. 7.6.** Внешние многожильные кабели  
(рисунок предоставлен Siecor Corporation)

Другое направление в кабельном конструировании представляют ленточные кабели. В ленточной конструкции 12 параллельных волокон располагаются в виде сэндвича между полиэстерными лентами, имеющими двустороннее kleящее покрытие. Каждая кабельная лента может быть склеена с другими, образуя тем самым прямоугольный массив. Например, склеивание 12 кабельных лент образует массив из 144 волокон. Этот массив размещается в полой трубке, которая в свою очередь окружается двумя слоями полистирила. Каждый слой полистирила содержит 14 стальных нитей, играющих роль силовых элементов. В зависимости от назначения возможны дополнительные защитные слои, например, стальные рукава, охватывающие полистирил. В первых промышленных волоконно-оптических системах, выпущенных компанией AT&T в 1977 году, использовали ленточную конструкцию. На рис. 7.7 представлен вид ленточного кабеля.



**Рис. 7.7. Ленточный кабель (рисунок предоставлен AT&T Bell Laboratories)**

При прокладке многожильных кабелей первоначально не предполагается использование всех волокон. Некоторое количество их рассматривается как резерв, чтобы иметь возможность в будущем заменить ими вышедшие из строя. Другой причиной прокладки кабеля с избыточным числом волокон является учет необходимости расширения каналов передачи, неизбежно возникающей в будущем. Прокладка кабеля является дорогостоящим мероприятием. Наличие избыточного числа волокон в местах, где они нужны, экономит будущие затраты, связанные с прокладкой дополнительных кабелей. Это плата за отсутствие "головной боли" в будущем.

## Дополнительные характеристики кабелей

### Длина

Кабели поставляются потребителю на катушках различной емкости, от 1 до 2 км, хотя для одномодовых кабелей возможны длины от 5 до 6 км. Большие длины требуются для систем передачи на дальние расстояния, когда число спlicingов концов кабелей, смотанных с разных катушек, велико. Кроме того, каждое спlicingание привносит в систему дополнительные потери. Большие длины кабельных сегментов предполагают меньшее количество спlicingов и меньшие потери.

### Цветовая кодировка

При изготовлении оболочек волокон или буферных трубок, или тех и других часто используется цветовая маркировка, позволяющая легко идентифицировать каждое волокно. В длинной линии нужно быть уверенными, что волокно А из первого отрезка кабеля соединяется с волокном А из второго отрезка, В с В, С с С и т.д. Цветовая маркировка облегчает идентификацию волокон.

### Нагрузки

Большинство поставщиков кабеля специфицируют максимально допустимые растягивающие нагрузки. Обычно указываются две нагрузки. Нагрузка при прокладке представляет собой кратковременный вид нагрузки, которая может быть приложена к кабелю во время его размещения. Эта нагрузка включает усилия, необходимые для протягивания кабеля в кабельных каналах, вокруг углов и т.д. Максимальное значение специфицированной нагрузки в зависимости от применения ограничивает длину отрезка кабеля при прокладке. При этом необходимо заранее аккуратно просчитывать процесс прокладки, чтобы не допустить перенапряжения в волокне.

Второй вид специфицированной нагрузки называется рабочей, или долговременной нагрузкой. После завершения прокладки кабель не может продолжительно выдерживать столь же высокий уровень нагрузки как при прокладке. Поэтому специфицированная рабочая нагрузка меньше нагрузки при прокладке. Рабочая нагрузка также называется статической.

Нагрузка при прокладке и рабочая нагрузки указываются в фунтах или ньютонах. Допустимые нагрузки зависят от устройства кабеля и его планируемого применения. Типичные специфицируемые значения для симплексного внутреннего кабеля составляют 250 фунтов (1112 ньютонов) в процессе прокладки и 10 фунтов (44 ньютона) в рабочем режиме.

## Комбинированные кабели

Волоконно-оптические кабели иногда содержат медные провода такие, как витая пара. Данные провода могут быть использованы для обычной коммуникации, но они также имеют два других достаточно популярных применения. Во-первых, для связи между персоналом во время прокладки,

особенно в местах, удаленных от телефонных линий. Персонал, занимающийся тестированием качества оптического соединения, должен постоянно иметь связь с офисом, удаленным порой на несколько миль. В офисе находится тестирующая аппаратура, которая позволяет проанализировать качество устанавливаемых соединений. Во-вторых, для подвода питания к удаленным электронным устройствам таким, как повторители.

## Кабельные спецификации

В таблице 7.2 представлены типичные спецификации волоконно-оптических кабелей. Таблица содержит перечень параметров, наиболее важных для построения волоконно-оптических систем.

В большинстве кабельных систем используются оптические волокна различных видов и размеров. Например, диаметр буферной волоконной оболочки составляет 250 или 900 микрон. Эта оболочка позволяет использовать волокна типа: 8/125, 50/125, 62.5/125, 85/125 или 100/140 микрон. Каждый из этих типов волокон может быть рассчитан на различные затухания и ширину полос пропускания, удовлетворяющие конкретным требованиям. В кабелях с полой трубкой в качестве буферной оболочки в одной трубке может находиться не только одно, но и несколько волокон. Ни один из этих факторов не оказывает существенного влияния на конструкцию кабеля. Любая конструкция может быть легко видоизменена.

По мере развития волоконно-оптической технологии все чаще возникал вопрос о наиболее универсальных характеристиках многомодовых волокон. В центре внимания находились затухание, частотная полоса пропускания, НА, простота и стоимость устройств для ввода светового сигнала в кабель и т.д.

"Победителем" стало волокно 62.5/125 мкм, которое является специфицированным и наиболее предпочтительным для практических всех областей применения, включая бытовую технику, локальные компьютерные сети, соединения между серверами и т.п.

Одномодовые волокна до сих пор являются наиболее предпочтительными для передачи сигнала на дальние расстояния, где требуется высокая скорость передачи информации, в то время как волокна типа 50/125 и 100/140 микрон тоже находят достаточно широкое применение.

**Таблица 7.2. Типичные спецификации кабелей (данные предоставлены AMP Incorporated)**

Размер волокна (мкм)	Описание	Макс. затухание на 850 нм (дБ/км)	Макс. затухание на 1300 нм (дБ/км)	Мин. полоса пропускания на 850 нм (Мбит/с·км)	Мин. полоса пропускания на 1300 нм (Мбит/с·км)	Ном. Дом. (нм)	Вес (кг/км)	Раб. $t^*$ (Цельсия)	Нагрузка растяжения при прокладке (Ньютон)	Мин. радиус изгиба при прокладке (см)	Сопр. разрыву (Н/см)	Пожаробезопасность
	Одинарный для легких условий	9.5	2.0	400	400	3.0	7.5	-40/+70	98	4.5	200	OFNR
	Одинарный для тяжелых условий	3.5	2.0	400	400	3.7	12.0	-40/+70	797	5.6	200	OFNR
50/125	Двойной для легких условий	3.5	2.0	400	400	3.0 x 3.6	15.0	-40/+70	1196	4.5	200	OFNR
	Двойной для тяжелых условий	3.5	2.0	400	400	3.7 x 7.8	27.0	-40/+70	1595	4.8	200	OFNR
	Одинарный градиентный для прокладки в полостях	3.5	2.0	400	400	3.0	7.5	-40/+70	598	4.5	200	OFNP
	Двойной градиентный для прокладки в полостях	3.5	2.0	400	400	3.0 x 6.0	15.0	-40/+70	1196	4.5	200	OFNP
	Двойной для локальных сетей	3.5	2.0	400	400	4.75	17.0	-40/+70	1595	7.0	200	OFNR
	Одинарный для легких условий	3.5	1.5	160	500	3.0	7.5	-40/+70	598	4.5	200	OFNA
	Одинарный для тяжелых условий	3.5	1.5	160	500	3.7	12.0	-40/+70	979	4.5	200	OFNA
	Двойной для легких условий	3.5	1.5	160	500	3.0 x 6.0	15.0	-40/+70	1196	5.5	200	OFNA
62.5/125	Двойной для тяжелых условий	3.5	1.5	160	500	3.7 x 7.8	27.0	-40/+70	1595	5.8	200	OFNP
	Одинарный градиентный для прокладки в полостях	3.5	1.5	160	500	3.0	7.5	-40/+70	598	4.5	200	OFNP
	Двойной градиентный для прокладки в полостях	3.5	1.5	160	500	3.0 x 6.0	15.0	-40/+70	1196	4.5	200	OFNP
	Двойной для локальных сетей	3.5	1.5	160	500	4.75	17.0	-40/+70	1595	7.0	200	OFNA
	Двойной для локальных сетей и прокладки в полостях	3.5	1.5	160	500	4.75	17.0	-40/+70	1595	7.0	200	OFNP
	Семиверхний для локальных сетей	3.5	1.5	160	500	4.75	17.0	-40/+70	1595	7.0	200	OFNR

**Таблица 7.2. Типичные спецификации кабелей (данные предоставлены AMP Incorporated)**

Размер волокна (мкм)	Описание	Макс. затухание на 850 нм (дБ/км)	Макс. затухание на 1300 нм (дБ/км)	Мин. полоса пропускания на 850 нм (МГц·км)	Мин. полоса пропускания на 1300 нм (МГц·км)	Ном. Дом. (нм)	Вес (кг/км)	Раб. $T^*$ (Цельсия)	Нагрузка растяжения при прокладке (Ньютоны)	Мин. радиус изгиба при прокладке (см)	Сопр. разрыву (Н/см)	Поверхность
	Одинарный для легких условий	3.5	2.0	400	400	3.0	7.5	-40/+70	98	4.5	200	OFNR
	Одинарный для тяжелых условий	3.5	2.0	400	400	3.7	12.0	-40/+70	797	5.6	200	OFNR
50/125	Двойной для легких условий	3.5	2.0	400	400	3.0 x 3.6	15.0	-40/+70	1196	4.5	200	OFNP
	Двойной для тяжелых условий	3.5	2.0	400	400	3.7 x 7.8	27.0	-40/+70	1595	4.6	200	OFNP
	Одинарный градиентный для прокладки в полостях	3.5	2.0	400	400	3.0	7.5	-40/+70	598	4.5	200	OFNP
	Двойной градиентный для прокладки в полостях	3.5	2.0	400	400	3.0 x 6.0	15.0	-40/+70	1196	4.5	200	OFNP
	Двойной для локальных сетей	3.5	2.0	400	400	4.75	17.0	-40/+70	1595	7.0	200	OFNR
	Одинарный для легких условий	3.5	1.5	160	500	3.0	7.5	-40/+70	598	4.5	200	OFNR
	Одинарный для тяжелых условий	3.5	1.5	160	500	3.7	12.0	-40/+70	979	4.5	200	OFNR
	Двойной для легких условий	3.5	1.5	160	500	3.0 x 6.0	15.0	-40/+70	1196	5.5	200	OFNR
62.5/125	Двойной для тяжелых условий	3.5	1.5	160	500	3.7 x 7.8	27.0	-40/+70	1595	5.6	200	OFNP
	Одинарный градиентный для прокладки в полостях	3.5	1.5	160	500	3.0	7.5	-40/+70	598	4.5	200	OFNP
	Двойной градиентный для прокладки в полостях	3.5	1.5	160	500	3.0 x 6.0	15.0	-40/+70	1196	4.5	200	OFNP
	Двойной для локальных сетей	3.5	1.5	160	500	4.75	17.0	-40/+70	1595	7.0	200	OFNR
	Двойной для локальных сетей и прокладки в полостях	3.5	1.5	160	500	4.75	17.0	-40/+70	1595	7.0	200	OFNP
	Скрученный для локальных сетей	3.5	1.5	160	500	4.75	17.0	-40/+70	1595	7.0	200	OFNR

**Таблица 7.2. Типичные спецификации кабелей (данные предоставлены AMP Incorporated) (продолжение)**

Размер полюса (мм)	Описание	Макс. затухание на 850 нм (дБ/км)	Макс. затухание на 1300 нм (дБ/км)	Мин. полоса пропускания на 850 нм (МГц·км)	Мин. полоса пропускания на 1300 нм (МГц·км)	Ном. Дом. (нм)	Вес (кг/км)	Раб. $t^{\circ}$ (Цельсия)	Нагрузка растяжения при прокладке (Н/мм)	Мин. радиус изгиба при прокладке (см)	Сопр. изгибу (Н/см)	Пожаро- заследность
	Симметричный для локальных сетей и телекоммуникаций в полостях	3.5	1.5	160	500	4.75	18.0	-40/+70	1253	7.0	200	OFNP
	Одинарный для легких условий	5.0	4.0	100	200	3.0	7.5	-40/+70	598	4.5	200	OFNR
	Одинарный для тяжелых условий	5.0	4.0	100	200	3.7	12.0	-40/+70	797	5.6	200	OFNR
	Двойной для легких условий	5.0	4.0	100	200	3.0 x 6.0	15.0	-40/+70	1196	4.5	200	OFNR
100/140	Двойной для тяжелых условий	5.0	4.0	100	200	3.7 x 7.8	27.0	-40/+70	1595	5.6	200	OFNR
	Одиночный градиентный для прокладки в полостях	5.0	4.0	100	200	3.0	7.5	-40/+70	598	4.5	200	OFNA
	Двойной градиентный для прокладки в полостях	5.0	4.0	100	200	3.0 x 6.0	15.0	-40/+70	1196	4.5	200	OFNR
	Двойной для локальных сетей и прокладки в полостях	5.0	4.0	100	200	4.75	17.0	-40/+70	1595	7.0	200	OFNP
	Одинарное для легких условий	-	1.0	-	-	3.0	7.5	-40/+70	598	4.5	200	OFNR
Одиночно- двойное блокир.	Двойное для локальных сетей	-	1.0	-	-	4.75	17.0	-40/+70	1595	7.0	200	OFNR
	Двойное для локальных сетей и прокладки в полостях	-	1.0	-	-	4.75	17.0	-40/+70	1595	7.0	200	OFNP

Внешние оболочки всех кабелей из ПВХ 50/125 кабели имеют NA:  $20 \pm 0.02$  65.5/125 кабели имеют NA:  $275 \pm 0.15$  100/140 кабели имеют NA:  $29 \pm 0.02$  Загод кабеля производится на стандартную длину 1.0 или 2.0 км (по специальному запросу возможна поставка кабеля на стандартной длины).

## Заключение

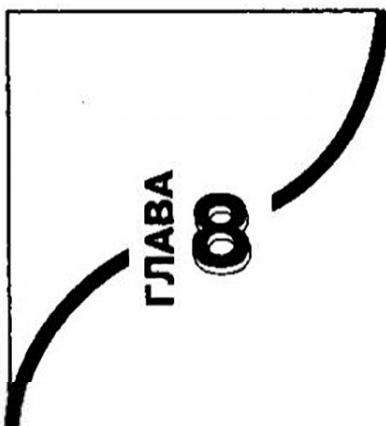
- Размещение волокон в кабеле зависит от предполагаемого использования.
- Основными компонентами кабеля являются буфер, силовой элемент и внешняя оболочка.
- Кабели пригодны для использования практически в любой окружающей среде.

### Контрольные вопросы



1. Назовите три материала, обычно используемых как силовые элементы.
2. Назовите два вида кабельных буферов.
3. Что больше: нагрузка при прокладке или рабочая нагрузка?
4. В чем заключается основная разница между внутренним и внешним кабелями?
  - Ширина полосы пропускания B.
  - Прочность и долговечность C.
  - Число волокон D. Затухание
5. Опишите разницу между симплексным и дуплексным кабелями.
6. Укажите два способа применения комбинированного кабеля, включающего в себя медный и оптический.

# Источники



На каждом конце волоконно-оптической линии находится преобразователь — прибор, трансформирующий энергию из одного вида в другой. Источник представляет собой электронно-оптический преобразователь, поскольку он преобразует электрический сигнал в оптический. Детектор на другом конце — оптоэлектронный преобразователь, так как он преобразует оптическую энергию в электрическую.

Источником может быть как светоизлучающей диод (СИД), так и лазер. Оба эти прибора основаны на малых полупроводниковых кристаллах размером в песчинку, которые излучают свет при пропускании вдоль них тока. Для того чтобы понять принцип действия СИД и лазера, а также фотодетектора, описанного в главе 9, предварительно нужно рассмотреть некоторые фундаментальные свойства веществ и, в частности, полупроводников.

## Немного об атомной структуре вещества

Атом состоит из ядра и вращающегося вокруг ядра облака электронов. Электронные орбиты в атоме образуют дискретные оболочки. Как показано на рис. 8.1, каждая оболочка характеризуется максимальным числом находящихся на ней электронов. Внутренняя оболочка K имеет максимум два электрона, L — максимум 8, M — максимум 18, и N — максимум 32. Для нашего

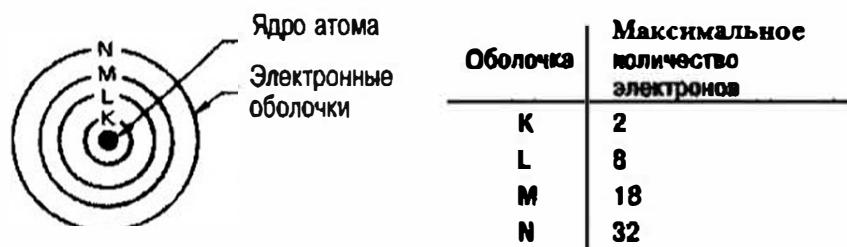


Рис. 8.1. Электронная структура атома

рассмотрения наиболее важно то, что внешняя оболочка всегда имеет максимум 8 электронов. Эта внешняя оболочка называется *валентной оболочкой, или валентной зоной*. Валентная зона ответственна за химическое соединение между элементами и обеспечивает существование различных элементов.

Для того чтобы электрон мог участвовать в токе проводимости, он должен быть освобожден от валентной связи и иметь возможность перемещаться в молекулярной структуре материала. Такого рода электрон, не связанный со своим атомом, называется *электроном проводимости*. Этот электрон свободен в том смысле, что он уже не связан со своим атомом. Возможность перемещения электрона между валентной зоной и зоной проводимости определяет, хорошим или плохим проводником является вещество.

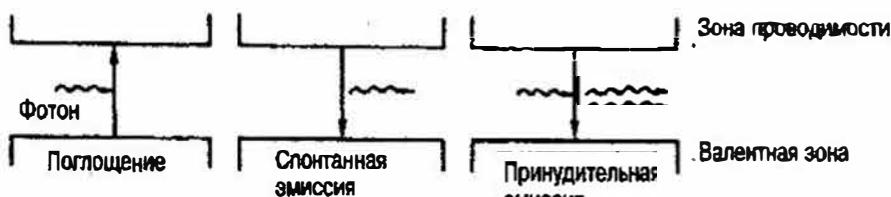
Атом, имеющий лишь один электрон в валентной зоне, является очень хорошим проводником. Только очень незначительное количество энергии необходимо, чтобы переместить электрон из валентной зоны и сделать его свободным. Медь, золото и серебро имеют лишь по одному валентному электрону и являются хорошими проводниками.

Железо, кобальт и платина — представители элементов с восемью валентными электронами. Они относятся к плохим проводникам, поскольку для превращения их электронов в свободные требуется более существенная величина внешней энергии. Атом как бы стремится к тому, чтобы иметь заполненную внешнюю оболочку. В меди внешний электрон легко отделяется от ядра, при этом оболочка, следующая за валентной, остается заполненной. В железе валентная оболочка заполнена, и атом не стремится отдать электрон.

*Полупроводник* — это вещество, чьи свойства являются промежуточными между хорошими проводниками, такими, как медь, и плохими проводниками, такими, как пластик. Отделение электрона от валентной зоны требует промежуточной величины энергии. Кремний, например, имеет четыре электрона во внешней оболочке.

Перемещение электрона между валентной зоной и зоной проводимости сопровождается энергетическим обменом между атомом и внешней средой. В частности, для перемещения электрона из валентной зоны в зону проводимости требуется подведение энергии извне. Атом, утративший валентный электрон, становится положительно заряженным и притягивает свободные электроны, стремясь заполнить свою внешнюю оболочку. Когда электрон переходит из зоны проводимости в валентную зону, он излучает энергию, величина которой зависит от разности энергетических состояний электрона в этих зонах.

На рис. 8.2 схематически представлена картина двух энергетических зон, представляющих интерес с точки зрения источников и детекторов. Как уже



**Рис. 8.2.** Излучение и поглощение

говорилось, при перемещении электрона между зонами энергия должна либо поглощаться, либо излучаться. Величина участвующей в этом процессе энергии равна разности между энергетическими уровнями:  $E_1 - E_2$ . Эта разность называется *межзонной щелью*. Величина энергии, соответствующая щели между зонами, соответствует определенному кванту света. Длина волны кванта света равна

$$\lambda = \frac{hc}{|E_1 - E_2|}$$

где  $h$  — постоянная Планка ( $6.625 \times 10^{-34}$  Дж-сек),  $c$  — скорость света, а  $E_1$  и  $E_2$  — значения энергии, соответствующие границам щели.

Спонтанное излучение, схематически изображенное на рис. 8.2, сопровождается случайным переходом электрона на более низкий энергетический уровень. СИД работает на спонтанной эмиссии. При вынужденном излучении фотоны стимулируют или вынуждают электроны изменять свои энергетические состояния. Работа лазера основана на принципе вынужденной эмиссии.

Поглощение электроном внешней энергии падающих на вещество квантов света позволяет ему перемещаться в состояние с более высоким значением энергии.

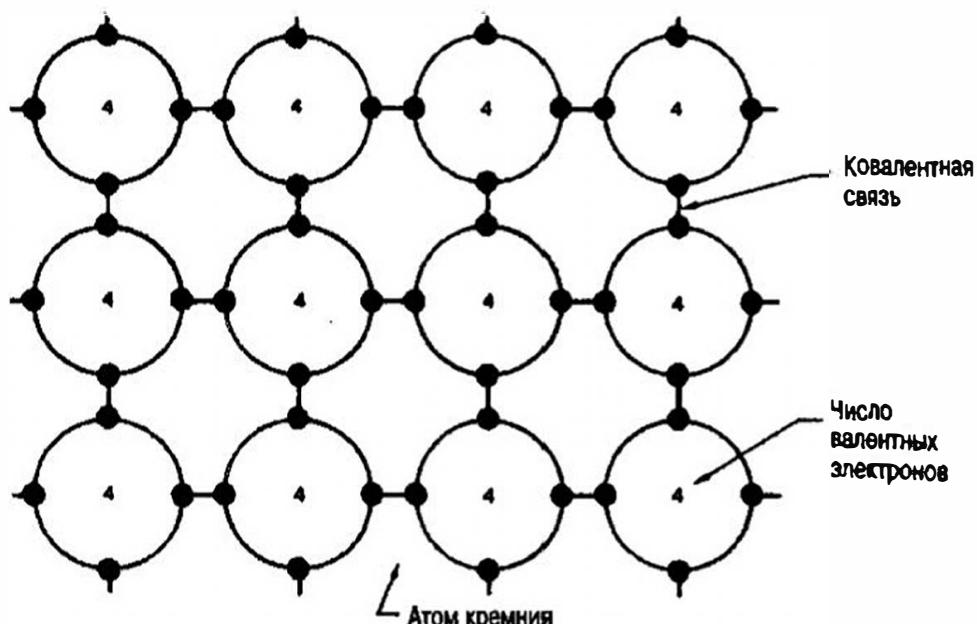
## Переход р-п типа в полупроводниках

Использование перехода р-п типа в легированных полупроводниках лежит в основе всех электронно-оптических устройств для волоконной оптики. Как лазеры, СИД, фотодиоды, так и другие полупроводниковые приборы, такие, как диоды и транзисторы, используют р-п переход. Остановимся вначале на основных принципах работы этого перехода, а затем рассмотрим работу СИД и лазеров. Более детально работа фотодиодов обсуждается в главе 9.

Как было показано ранее, атом кремния имеет четыре валентных электрона. Именно эти электроны ответственны за образование связи, удерживающей атомы вместе в кристаллической структуре. В кремнии этой связью является ковалентная связь, при образовании которой происходит обобществление электронов атомами, как показано на рис. 8.3. Видно, что каждый атом окружают восемь валентных электронов, необходимых для полного заполнения внешней орбиты, при этом четыре из них являются для атома своими и четыре принадлежат окружающим атомам. Все электроны участвуют в образовании ковалентной связи, а свободные электроны отсутствуют.

Переход р-п типа реализуется в веществах типа кремния. Предположим, что в кристалл кремния добавлено вещество, имеющее пять валентных электронов. Поскольку для образования ковалентной связи требуется только четыре электрона, то один электрон остается незанятым. Этот электрон свободен и может перемещаться по кристаллической структуре. При этом в зоне проводимости появляются свободные электроны. Вещества такого рода называются веществами *n-типа*, так как они имеют избыток отрицательно заряженных электронов.

Теперь предположим, что в кремний добавлен материал с тремя валентными электронами. При этом появится не заполненная электронами ковалентная связь. Данная электронная вакансия называется *дыркой*. Дырка в полупроводнике является достаточно необычной, так как по определению она означает отсутствие чего-то. Формально она, подобно электрону, может рассматриваться как носитель заряда, но только положительного. И в действительности дырка проявляется как положительно заряженная частица. Полупроводник, имеющий избыток положительно заряженных дырок, называется полупроводником *p-типа*.



**Рис. 8.3.** Ковалентные связи в атоме кремния

Переход *p-n* типа в диоде образуется при хорошем контакте различных участков полупроводника, легированных соответственно *p*- и *n*-типа донорами. Участок полупроводника *n*-типа имеет свободные электроны, а участок *p*-типа имеет избыток дырок. Когда данные участки приводятся в соприкосновение, то электроны и дырки начинают просачиваться через контакт и рекомбинировать. Рекомбинация означает "сваливание" свободного электрона в дырку, при этом электрон переходит из зоны проводимости в валентную зону и становится частью ковалентной структуры атома. Как электрон, так и дырка при этом прекращают свое существование в виде носителей заряда.

В результате рекомбинации, проходящей в области *p-n* перехода, в ней отсутствуют какие-либо носители заряда. При этом возникает барьер, препятствующий дальнейшей свободной (без подвода дополнительной энергии) миграции электронов и дырок через переход.

При рекомбинации электрона и дырки происходит выделение энергии. В зависимости от вещества эта энергия может соответствовать энергии све-

тогового кванта, а может и не соответствовать. В кремнии данное соответствие выполняется. Энергия выделяется в виде тепла в форме колебаний кристаллической структуры.

В лазерах и СИД используются элементы III и V групп Периодической системы элементов. Эти элементы имеют соответственно три и пять электронов в своих валентных зонах. При комбинации равного количества атомов с тремя и пятью электронами получается структура, близкая к структуре кремния. При этом атомы будут образовывать ковалентную связь, характеризующуюся заполненными валентными оболочками атомов. Никаких свободных носителей заряда присутствовать не будет. Для создания полупроводника n-типа комбинируются вещества V группы в большей пропорции с веществами III группы. В этом случае в структуре появляются свободные носители заряда в виде электронов. Аналогично увеличение пропорции веществ III группы приводит к появлению носителей заряда в виде дырок. На рис. 8.4 представлены три ситуации на примере арсенида галлия. Атом галлия имеет три валентных электрона; атом арсения имеет

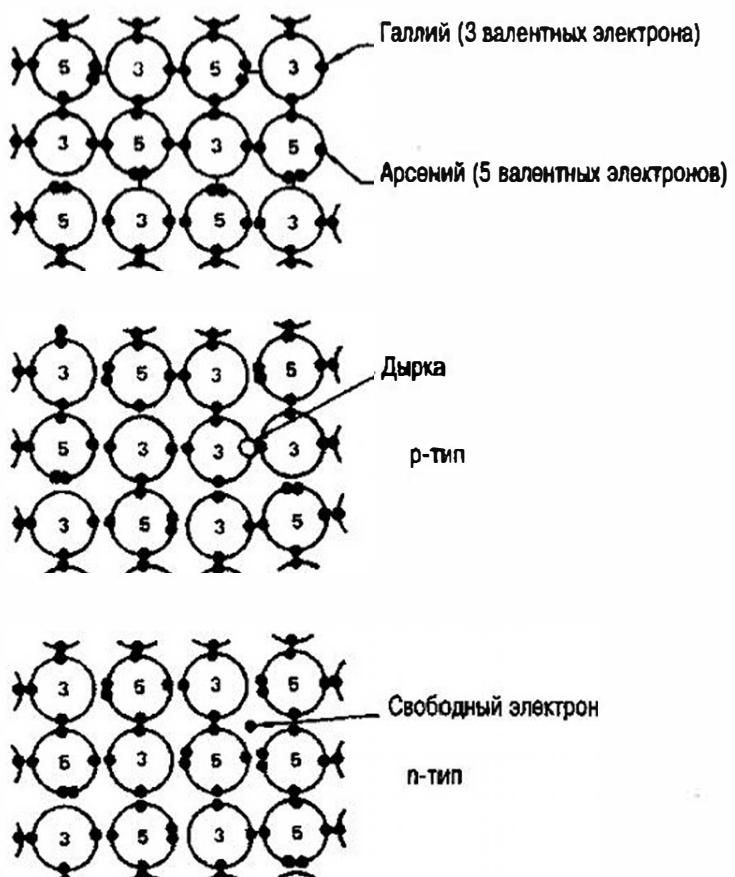
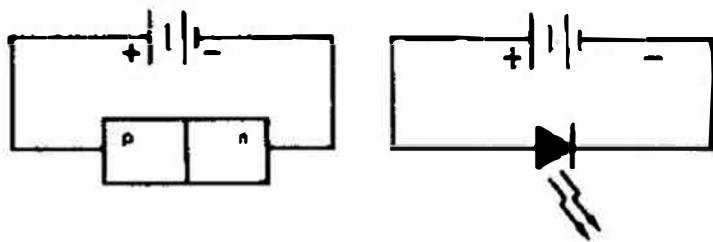


Рис. 8.4. Свободные электроны и дырки в арсениде галлия

пять свободных электронов. Структура арсенида галлия образует щели между зоной проводимости и валентной зоной так, что при рекомбинации электрона с дыркой происходит излучение света.

В основе СИД находится полупроводник р-п типа, излучающий свет в условиях, когда отрицательная клемма электрической батареи подсоединенна к участку полупроводника п-типа (прямое напряжение, положительный наклон энергетических зон). При этом электроны инъектируются в полупроводник п-типа и вытягиваются из полупроводника р-типа. (Вытягивание электронов полностью совпадает с инжекцией дырок в полупроводник р-типа.) На рис. 8.5 в схематическом виде представлен СИД и его работа.



**Рис. 8.5. Светоизлучающий диод**

Положительный наклон энергетических зон приводит к движению электронов и дырок навстречу друг другу и миграции их через обедненную носителями зону перехода. В результате захвата электронов дырками происходит излучение света. Для постоянного повторения данного процесса и уравновешивания процесса рекомбинации требуется подпитка перехода новыми носителями заряда, осуществляется при пропускании тока. При отключении тока рекомбинация приводит к восстановлению обедненной зоны в области перехода и излучение прекращается.

## СИД

Светоизлучающие диоды (СИД), используемые в волоконной оптике, являются более сложными приборами по сравнению с описанным выше, однако принцип работы у них тот же. Сложности возникают из-за того, что необходимо создать источник с заданными характеристиками какой-либо волоконно-оптической системы. Принципиальными характеристиками диода являются длина волны излучаемого света и пространственная диаграмма излучения.

Описанный выше СИД — устройство с *гомогенным* переходом, то есть с переходом, образованным единственным полупроводниковым материалом. СИД с гомогенным переходом излучает свет как с боковой границы перехода, так и со всей его плоской поверхности. Излучение при этом имеет широкую диаграмму и малую интенсивность, что не совсем пригодно для использования в оптических волокнах. В этом случае только малая часть излученного света может быть направлена в ядро волокна.

Использование *гетерогенной* структуры перехода позволяет решить данную проблему. Носители заряда оказываются ограниченными активной областью

кристалла. Гетерогенный переход является переходом р-п типа, образованным материалами с аналогичной кристаллической структурой, но с отличающимися энергетическими уровнями и показателями преломления. Эти различия обеспечивают пространственную локализацию носителей заряда и более направленное излучение света. Разница показателей преломления используется, например, для локализации и управления световыми пучками подобно тому, как это происходит в оптическом волокне. В результате получается узконаправленное излучение.

На рис. 8.6 представлены СИД, излучающие как через поверхность, так и через боковую грань. Диоды, излучающие через грань, имеют активную область в виде полоски. Из-за того, что слои выше и ниже полоски имеют различные показатели преломления, свет локализуется благодаря волноводному эффекту. (Аналогичный волноводный эффект присутствует в оптическом волокне.) Ширина излучающей полоски контролируется травлением оксида кремния на боковой грани и напылением металла. Таким образом, ток через активную область ограничивается участком под металлической пленкой. В результате получается интенсивное излучение с эллиптической выходной диаграммой.



**Рис. 8.6. СИД и лазеры**

Используемые в СИД вещества определяют длину волны выходного излучения. Обычно используются СИД на основе арсенида галлия с добавками алюминия (GaAlAs), имеющего окно прозрачности в диапазоне от 820 до 850 нанометров. Длины волн, соответствующие данному окну, удобны и с точки зрения распространения по оптическому волокну. Одна из причин выбора этого диапазона, изначально используемого в волоконной оптике, в том, что приборы, работающие в этом диапазоне, более надежные и дешевые, легко производятся. Таким образом, технология, основанная на использовании 820-микронного излучения, является родоначальной. В настоящее время все более значимой становится 1300-нм технология. Переход с 1300 на 1550 нм зависит, в частности, от развития технологии изготовления источников.

Устройства, работающие на длине волны 1300 нм, основаны на галлий-индий-арсениде фосфора (GaInAsP) и других комбинациях веществ III и V групп Периодической системы.

## Лазеры

*Лазер* — устройство, усиливающее вынужденное излучение активной среды. Слово *Laser* является аббревиатурой от *Light Amplification by the Stimulated Emission* (усиление света за счет вынужденного излучения). Одно из основных отличий лазеров (рис. 8.6) от светоизлучающих диодов именно в том, что лазер использует вынужденное излучение среды, а не спонтанное. Для усиления излучения в лазере используется специальная оптическая система, называемая *резонатором Фабри-Перо*. Она представляет собой полированные строго параллельные противоположные грани кристалла для получения отражающих поверхностей, похожих на зеркала.

При слабых управляющих токах лазер работает подобно СИД, и излучение света носит характер спонтанного. По мере усиления тока лазер достигает порога генерации, выше которого начинается вынужденное излучение и нормальная работа лазера. Таким образом, для начала работы лазера требуется достаточно высокая плотность тока (наличие большого числа электронов в небольшой рабочей области чипа). Спонтанно излученные фотоны захватываются резонатором Фабри-Перо, отражаясь от полированных боковых граней, и делают несколько проходов от одного зеркала к другому. Данные фотоны несут с собой энергию, соответствующую ширине щели полупроводникового вещества, используемого в лазере. При взаимодействии этих фотонов с электронами, находящимися в возбужденном состоянии, происходит немедленная рекомбинация последних, сопровождающаяся излучением света. Напомним, что длина волны фотона является мерой его энергии. Поскольку энергия фотонов вынужденного излучения равна энергии первоначальных спонтанных фотонов, то их длины волн также равны. Таким образом, спонтанные фотоны рождают подобные себе вынужденные фотоны: они имеют те же длины волн, фазы и направление распространения. Другими словами, падающий фотон приводит к излучению еще одного такого же фотона/При многократном повторении этого процесса число фотонов растет лавинообразно, и излучение усиливается.

Достаточно сильный управляющий ток создает инверсную *населенность электронных уровней*. Инверсная населенность представляет собой состояние, в котором основная часть невозбужденных электронов переходит в возбужденное состояние. При этом в активной области вблизи перехода образуется большое число свободных электронов и дырок. При наличии инверсной населенности более вероятен процесс стимулированного излучения другого фотона под воздействием падающего фотона. Для работы лазера требуется достижение определенного уровня инверсной населенности, определяемого пороговым значением тока.

Часть фотонов остается захваченной в резонаторе и продолжает движение между зеркалами, вызывая дальнейшее излучение, тем не менее некоторая часть излучения проходит через полированные грани, формируя интенсивный пучок света. Поскольку свет заводится в волокно только через фронтальную поверхность чипа, то его задняя поверхность покрывается отражающим материалом для уменьшения потерь света. Свет, отражаемый от задней поверхности, может быть также использован для управления излучением через фронтальную поверхность. Такого рода управление применяется для регулирования силы управляющего тока, чтобы поддерживать постоянный уровень мощности излучения на выходе.

Итак, отличия лазерного излучения от излучения СИД следующие:

- **Высокая монохроматичность:** излучение имеет узкую спектральную ширину. Идеальная монохроматичность означает наличие только одной длины волны в выходном излучении. В отличие от СИД лазерное излучение не имеет непрерывного спектра, а представляет собой дискретный набор длин волн вокруг центральной длины волны.
- **Когерентность:** излучение синхронизировано, фазы излучаемых фотонов совпадают.
- **Узкая направленность:** свет излучается в узкий диапазон углов и пучок света имеет малую поперечную дисперсию. Поперечной дисперсией называется увеличение диаметра пучка света по мере распространения от источника.

## Безопасность

Источники, используемые в волоконной оптике, — лазеры и особенно СИД — излучают интенсивное инфракрасное излучение, невидимое для человеческого глаза. Данное излучение может постепенно отрицательно воздействовать на сетчатку глаза и приводить к ее повреждению и даже к потере зрения. Никогда не допускайте попадания излучения из источника или из волокна, подключенного к источнику, в глаза. Прежде чем осматривать выходное отверстие источника или волокно, убедитесь, что источник отключен. Помните, что нельзя видеть, включен источник или нет. Будьте осторожны.

## Характеристики источников

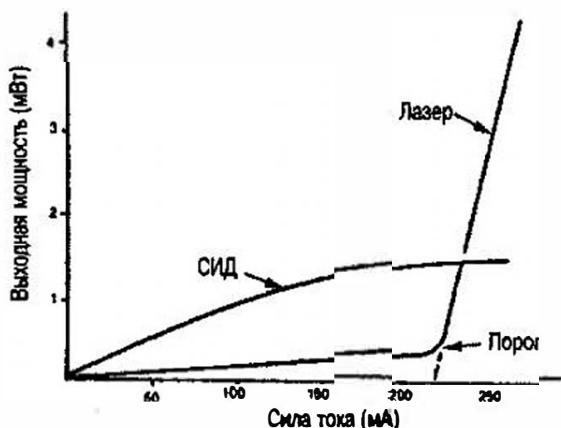
Этот раздел посвящен описанию основных характеристик источников. В ходе изложения будут сравниваться СИД и лазеры. Данное сравнение позволит определить пригодность того или другого вида источников для различных применений. В таблице 8.1 представлены характеристики лазеров и светоизлучающих диодов.

**Таблица 8.1. Сравнительные характеристики лазеров и СИД.**

Параметр	СИД	Лазер
Выходная мощность	Низкая	Высокая
Скорость	Низкая	Высокая
Выходная апертура (NA)	Высокая	Низкая
Спектральная характеристика	Широкая	Узкая
Совместимость с одномодовым волокном	Нет	Да
Применение	Простое	Сложное
Период эксплуатации	Очень длинный	Длинный
Стоимость	Низкая	Высокая

## Выходная мощность

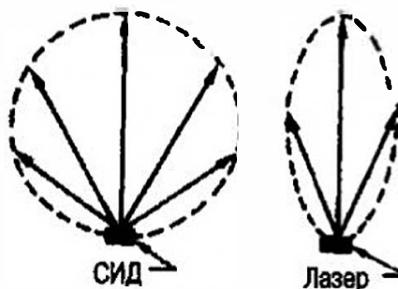
*Выходной мощностью* называется мощность излучения при специфицированном значении управляющего тока. Как показано на рис. 8.7, СИД излучает большую мощность по сравнению с лазером, работающим ниже порога генерации. Выше порога генерации мощность лазера резко возрастает и непрерывно увеличивается вместе с силой управляющего тока. В зависимости от мощности источники света могут быть расположены в следующем порядке: лазеры, диоды с выходом излучения через боковую грань кристалла, диоды с выходом излучения через всю поверхность кристалла.



**Рис. 8.7.** Зависимость выходной мощности от силы тока (рисунок предоставлен AMP Incorporated)

## Выходная диаграмма

Выходная диаграмма света является важной характеристикой для волоконно-оптических приложений. После выхода света из источника начинается расширение светового пучка, и только малая его часть в действительности попадает в волокно. Чем уже выходная диаграмма, тем большая часть света может попасть в волокно. Хорошие источники должны иметь малые диаметры выходных пучков света и малую апертуру (NA). Диаметр выходного пучка определяет величину его поперечного сечения. Апертура NA определяет диапазон углов, в которых происходит излучение света. Если диаметр выходного пучка или его апертура превышают соответствующие характеристики волокна, в которое вводится излучение, некоторая часть излучения утрачивается и не попадает в волокно. На рис. 8.8 представлены типичные угловые диаграммы излучения диодов и лазеров.



**Рис. 8.8.** Выходная диаграмма

Когда выходной диаметр источника не соответствует диаметру ядра волокна, то потери излучения, связанные с рассогласованием данных характеристик, могут быть определены на основе следующего выражения:

$$\text{loss}_{\text{dia}} = 10 \log_{10} \left( \frac{\text{dia}_{\text{fiber}}}{\text{dia}_{\text{source}}} \right)^2$$

Потери отсутствуют, когда диаметр ядра волокна превосходит диаметр источника.

Когда апертура NA источника больше, чем NA волокна, то потери, вызванные этим рассогласованием, равны

$$\text{loss}_{\text{dia}} = 10 \log_{10} \left( \frac{\text{NA}_{\text{fiber}}}{\text{NA}_{\text{source}}} \right)^2$$

Потери отсутствуют в противоположном варианте, когда большей является NA волокна.

Рассмотрим, например, источник с выходным диаметром 100 микрон и NA, равной 0.3, и подключенное к нему волокно с диаметром ядра 62.5 микрон и NA=0.275. В данном случае потери из-за рассогласования характеристик равны

$$\begin{aligned} \text{loss}_{\text{dia}} &= 10 \log_{10} \left( \frac{62.5}{100} \right)^2 \\ &= 10 \log_{10} (0.390625) \\ &= -4.1 \text{дБ} \\ \text{loss}_{\text{dia}} &= 10 \log_{10} \left( \frac{0.275}{0.30} \right)^2 \\ &= 10 \log_{10} (0.934444) \\ &= -0.8 \text{дБ} \end{aligned}$$

Общие потери составляют 4.9 дБ. Если выходная мощность источника составляет 800 мкВт, то только около 260 мкВт попадут в волокно.

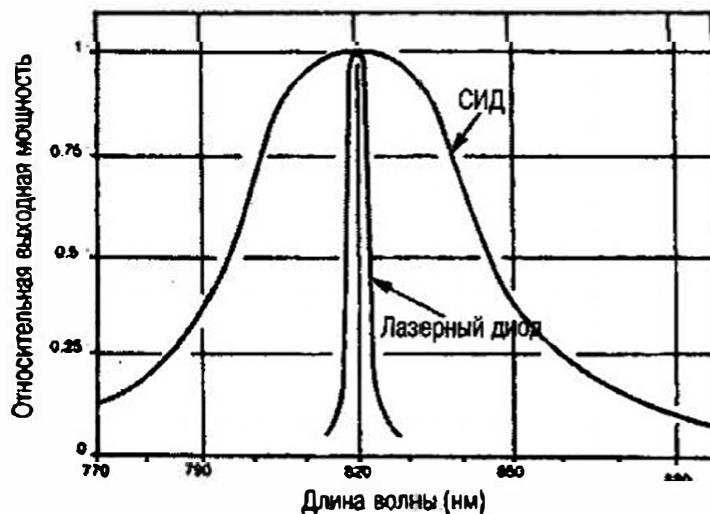
В одномодовом волокне необходимо применение лазера. Лазер обеспечивает узкий пучок света высокой интенсивности, сравнимый с малым размером ядра одномодового волокна. Угловая диаграмма лазерного излучения ближе к эллиптической форме, чем к сферической.

## Спектральная ширина

Как было показано в главе 6 при обсуждении молекулярной дисперсии, излучение с различными длинами волн имеет отличающиеся скорости распространения в волокне. Эта дисперсия ограничивает ширину рабочей полосы пропускания. Как лазеры, так и диоды не являются идеально монохроматическими, они излучают в некотором конечном диапазоне длин волн. Этот диапазон известен как *спектральная ширина источника*. Он определяется 50% уровнем мощности относительно максимума, соответствующего центральной длине волны. Например, если источник имеет центральную длину волны 820 нм и спектральную ширину 30 нм, то его выходное излучение занимает диапазон от 805 до 835 нм.

На длине волны 850 нм молекулярная дисперсия примерно равна 0,1 нс/км на один нанометр спектральной ширины источника. Использование СИД со спектральной шириной 30 нм приводит к 3 нс дисперсии на расстоянии 1 км.

На рис. 8.9 видно, что спектральная ширина лазера существенно уже по сравнению со спектральной шириной светоизлучающего диода. Спектральная ширина лазера составляет от 2 до 5 нм, в то время как аналогичная характеристика СИД составляет десятки нанометров. Как правило, спектральная ширина не оказывается на качестве линий длиной в несколько километров, работающей на частотах до 100 МГц. Спектральная ширина является критическим параметром для высокоскоростных протяженных одномодовых оптических систем. В этом случае спектральная ширина ограничивает скорость передачи информации. Напомним, что ширина полосы пропускания одномодового волокна определяется величиной дисперсии и измеряется в пикосекундах на километр и на нанометр спектральной ширины источника (псек/км/нм).



**Рис. 8.9.** Типичная спектральная характеристика (рисунок предоставлен AMP Incorporated)

Поскольку спектральная ширина лазерного источника является лимитирующей характеристикой для высокоскоростных протяженных одномодовых оптических линий, то в последнее время много усилий было направлено на создание монохромных лазерных диодов, пригодных для таких систем. Такого рода устройства имеют усовершенствованную структуру, усиливающую излучение на центральной длине волн и подавляющую излучение на боковых длинах волн. Можно привести два примера подобных устройств: лазеры с *распределенной положительной обратной связью* и лазеры с *пространственным синхронизированной генерацией* (С<sup>3</sup>). В лазере с распределенной положительной обратной связью используется встроенная дифракционная решетка, позволяющая усиливать фотоны (испытывающие полное отражение на обоих зеркалах резонатора) только на резонансной длине волн. Таким образом, вынужденное излучение становится монохромным. В лазере С<sup>3</sup> используется лазерный диод, кристалл которого разделен на две секции малым зазором. Каждая секция работает независимо, при этом излучения от каждой секции интерферируют между собой, что приводит к подавлению одних длин волн и к усилению сигнала на других длинах волн.

## Скорость

Скорость включения и выключения источника должна быть достаточно высокой, чтобы соответствовать требованиям ширины рабочей полосы пропускания оптической системы. Скорость источника определяется временем нарастания и спада сигнала. Лазеры имеют время нарастания менее 1 нс, в то время как время нарастания СИД — несколько наносекунд. Зависимость ширины рабочей полосы от времени нарастания определяется приближенной оценкой

$$BW = \frac{0.35}{t_r}$$

где время нарастания, выраженное в наносекундах, приводит к значениям ширины полосы пропускания в гигагерцах. Например, время нарастания в 1 нс позволяет работать в полосе 350 МГц, а в 5 нс — 70 МГц.

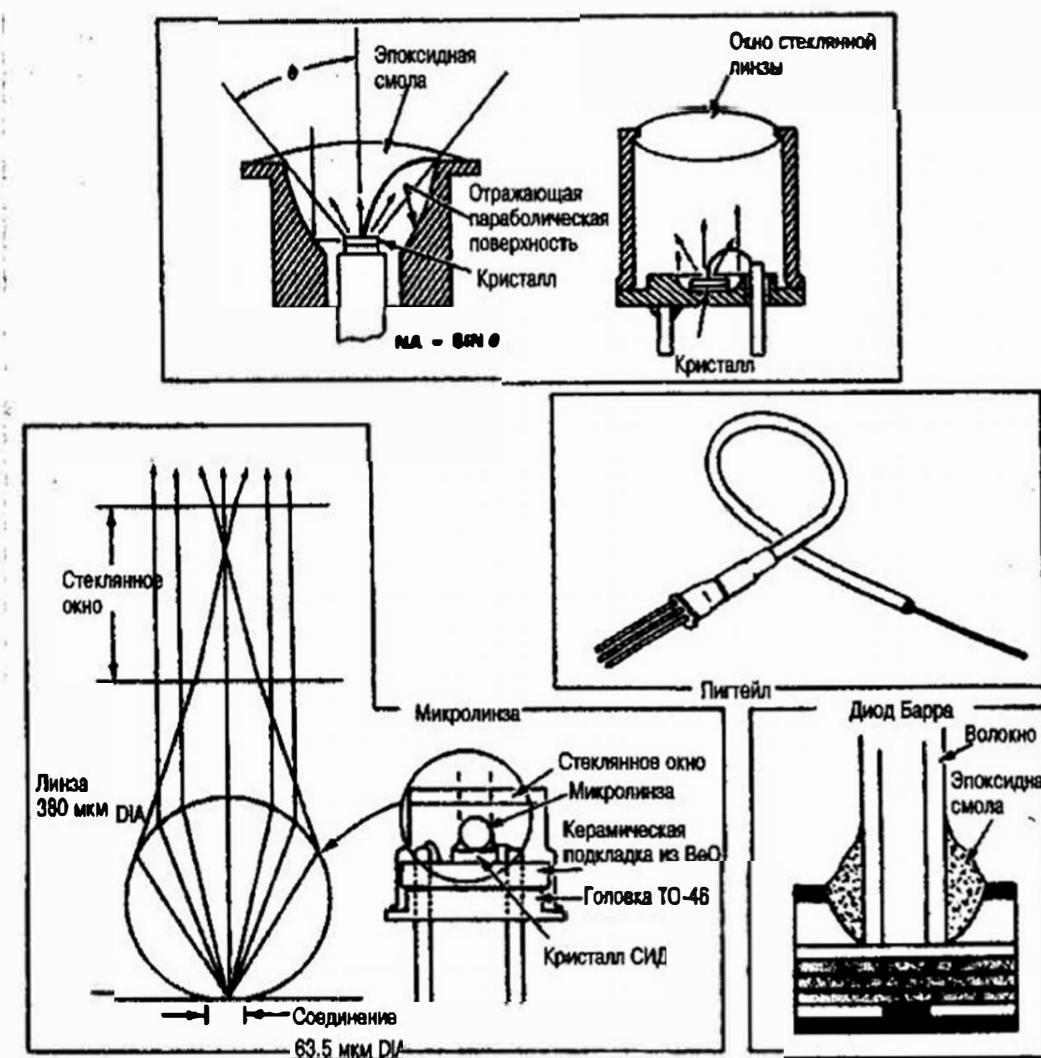
## Длительность эксплуатации

Гарантируемое время эксплуатационной службы источника измеряется миллионами часов. После этого выходная мощность источника начинает уменьшаться из-за увеличивающегося числа дефектов в кристаллической структуре полупроводникового кристалла. Гарантируемое время службы источника определяется уровнем 50% (3 дБ) уменьшения выходной мощности. Считается, что СИД, имеющий первоначальную выходную мощность 1 мВт, заканчивает свою службу при уровне мощности в 500 мкВт.

## Простота использования

Лазер имеет лучшие оптические характеристики по сравнению с СИД но он сложнее, дороже и менее надежен в эксплуатации. Срок эксплуатации

онной службы лазеров, по сравнению с СИД, меньше. Они требуют более сложного управляющего оборудования. Например, выходная мощность лазера может заметно изменяться при колебаниях температуры. Поддержание выходной мощности лазера в заданном температурном диапазоне требует специального оборудования, регулирующего силу управляющего тока, например, установки фотодиода на заднем зеркале резонатора. При этом ток от фотодиода зависит от мощности падающего на него излучения. Вариации тока фотодиода через контур обратной связи влияют на величину управляющего тока.



**Рис. 8.10.** При подключении следует обеспечить максимальную передачу энергии в волокно (рисунок предоставлен AMP Incorporated)

## Подключение

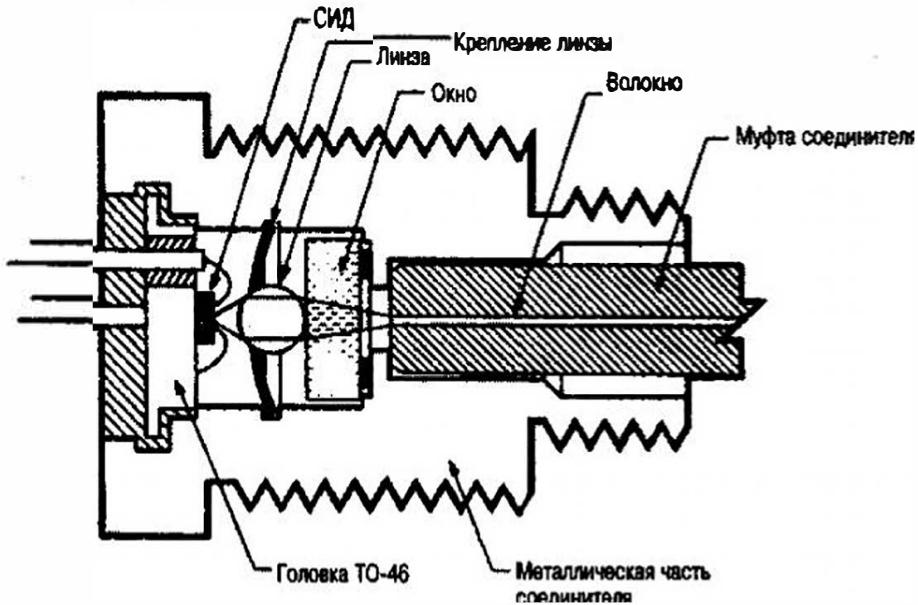
Центральным моментом в подключении источника к оптической системе является обеспечение максимально возможного уровня мощности, передаваемой от источника к оптическому волокну. Оптические характеристики источника и волокна должны быть при этом согласованы. В этом разделе рассматриваются различные методы такого рода согласования.

В СИД, излучающем через боковую поверхность, размер излучающей поверхности достаточно велик. При этом лишь малая часть *излучения* передается волокну. Кроме того, угловая диаграмма данного излучения достаточно широка, и пучок света быстро расширяется с увеличением расстояния от излучающей поверхности. В связи с этим важно, что выходная мощность полупроводникового кристалла и мощность, передаваемая оптическому волокну, *могут* существенно различаться.

Модернизация структуры полупроводникового кристалла (использование диодов, излучающих через узкую боковую грань, или лазеров) приводит к улучшению выходной картины излучения, и крайне важным является хороший контакт источника с оптическим волокном. На рис. 8.10 представлено несколько методов улучшения выходной мощности излучения.

Используются источники с *микролинзами*, приклеенными с помощью эпоксидного клея непосредственно к кристаллу. Линза фокусирует свет в практически однородное пятно на выходе источника. Обычно размер этого пятна превосходит размер волокна. Волокно может помещаться в любом месте светового пятна, принимая при этом одну и ту же оптическую мощность.

Линза может также размещаться на некотором расстоянии от поверхности кристалла и фокусировать свет. Линза на рис. 8.11 является компонентом



**Рис. 8.11.** СИД с микролинзой и соединитель (рисунок предоставлен Hewlett-Packard)

приемной части источника и служит для подключения соединителя. При этом линза фокусирует свет непосредственно в волокно, закрепленное в корпусе соединителя.

Парabolическая форма приемной части источника и линза позволяют коллимировать пучок света, сужая размер излучающего пятна и угловую диаграмму излучения. При колимации световые лучи становятся однородными и перестают расходиться.

В устройствах, называемых пигтейлами (pigtail), используется короткий отрезок оптического волокна. В светодиоде Барра волокно kleевым способом закрепляется непосредственно на полированной поверхности кристалла. Преимущество данного способа заключается в максимальном приближении волокна к поверхности активной среды кристалла. В других устройствах устанавливают пигтейл в непосредственной близости от поверхности кристалла. Пигтейлы имеют два преимущества. Во-первых, закрепление пигтейла вблизи кристалла позволяет вводить свет в волокно до того, как пучок света успеет расширяться. Чем дальше от кристалла расположено волокно, тем больше успевает расширяться пучок света и тем меньшая его доля попадает в волокно. Во-вторых, выходная мощность источника с подключенным пигтейлом определяется значением мощности на выходе из пигтейла. Это облегчает проектирование оптической системы в целом, поскольку излучение, выходящее из пигтейла, достаточно легко специфицируется.

Значимость подключения источника косвенно подтверждается широким спектром различных выходных разъемов, предлагаемых производителями. Как правило, один и тот же СИД предлагается с тремя различными модификациями выходного разъема. Специфицированные выходные мощности для каждого из вариантов подключения источника следующие:

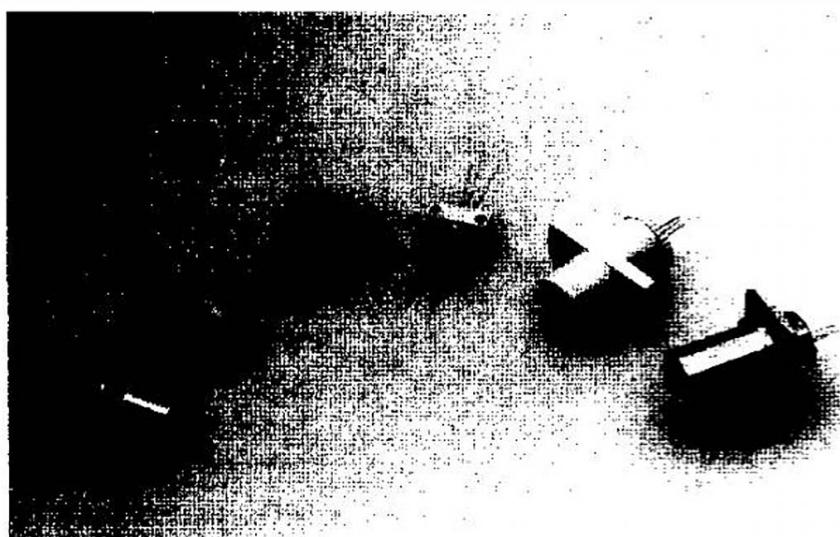
- Без пигтейла 300 мкВт
- Подключение пигтейла с волокном 100/140 250 мкВт
- Подключение пигтейла с волокном 50/125 50 мкВт

Разница в двух последних случаях объясняется малым размером волокна 50/125 и невозможностью устранения потерь при вводе света в волокно с малой апертурой и размером.

Источники очень часто укомплектовываются выходными разъемами в виде приемных частей для разного типа оптических соединителей. На рис. 8.12 представлено несколько видов такого рода приемных устройств. Комплект приемных устройств открывает перед пользователем более широкие возможности использования источника. Во-первых, производитель может специфицировать характеристики волокна для каждого из приемных устройств, что избавляет от необходимости оценивать потери соединения волокно — источник. Во-вторых, это упрощает процесс изготовления, поскольку позволяет легко установить любую приемную часть на корпусе источника. К каждому виду распространенных оптических соединителей могут быть подобраны соответствующие приемные части.

## Примеры источников

В таблице 8.2 представлены типичные характеристики СИД и лазеров.



**Рис. 8.12.** Разъемы для источников (рисунок предоставлен AMP Incorporated)

**Таблица 8.2. Типичные характеристики СИД и лазеров.**

	СИД			СИД			Лазер		
	Мин.	Ном.	Макс.	Мин.	Ном.	Макс.	Мин.	Ном.	Макс.
<b>Мощность на соединение (мкВт)</b>									
50 мкм волокно	30	55	80	25	35				
62.5 мкм волокно	44	100	175	50	75				
Одномодовое волокно				0.5	1		1	1000	
Длина волны (нм)	820	835	850	1290	1320	1350	1280	1310	1330
<b>Спектральная ширина FWHM (нм)</b>									
				75			170		5
Время нарастания (нс)	1.5	3.5	4	2	2.5	4		0.3	

## Заключение

- Источник света в оптических системах представляет собой электронно-оптический преобразователь, в котором излучение света инициируется управляющим током.
- В СИД свет излучается спонтанно; в лазерах используется вынужденная генерация света, носящая пороговый характер.

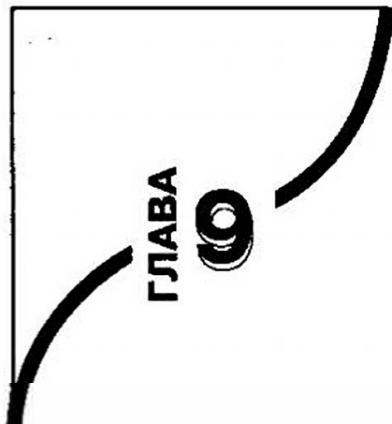
- Лазер имеет более узкую спектральную ширину излучения по сравнению с СИД.
- Лазер работает быстрее чем СИД.
- Одномодовое волокно необходимо использовать только совместно с лазерным источником.
- Светодиоды дешевле и проще в эксплуатации по сравнению с лазерами.
- Конструкция разъема источника важна с точки зрения эффективного ввода света в волокно.

### **Контрольные вопросы**



1. Для чего нужен источник?
2. Назовите два основных вида источников в волоконной оптике.
3. Что излучается при рекомбинации электрона с дыркой в полупроводнике?
4. Из каких слов возникло слово "лазер"?
5. Перечислите три конструкции разъемов источников, приводящие к повышению эффективности ввода света в волокно.
6. Если источник имеет время нарастания мощности в 7 нс, то какова частотная полоса пропускания генерируемого им сигнала?
7. Перечислите три характеристики лазерного излучения, отличающие его от излучения светодиода.
8. Как выражаются потери, связанные с рассогласованием апертур источника и волокна?

# *Детекторы*



*Детектор* выполняет противоположную функцию по сравнению с источником: он преобразует оптическую энергию в электрическую и является оптоэлектронным преобразователем. Существуют разнообразные детекторы. Наиболее известный тип детектора — фотодиод, вырабатывающий ток при попадании на него света. В волоконной оптике достаточно интенсивно используются два вида фотодиодов: *p-i-n*-типа и лавинный. В данной главе будут описаны фотодиодные детекторы и их характеристики с точки зрения применения в волоконной оптике.

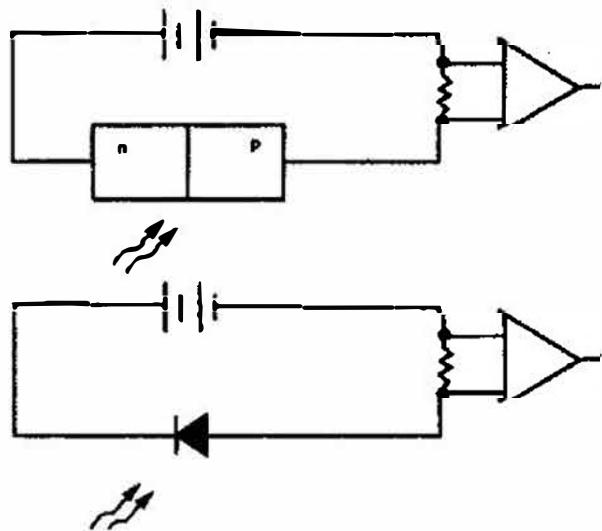
## **Основные принципы работы фотодиода**

В главе 8 обсуждалась теория энергетических связей в полупроводниках. При перемещении электрона из зоны проводимости в валентную зону в процессе электронно-дырочной рекомбинации выделяется энергия. В СИД эта энергия уносится фотоном, чья длина волны определяется шириной щели между зонами. Излучение происходит при пропускании внешнего тока через полупроводниковый кристалл СИД.

В фотодиоде происходит обратный процесс: свет, падающий на диод, приводит к генерации тока во внешнем контуре. Поглощение фотона приводит к появлению возбужденных электронов, переходящих из валентной зоны в зону проводимости. Данный процесс, в результате которого образуется пара электрон-дырка, получил название *внутреннего поглощения*. Эти носители тока при наличии приложенного смещающего напряжения дрейфуют вдоль вещества и возбуждают ток во внешнем контуре. В возникшей паре электрон-дырка в образовании тока во внешней цепи участвует электрон.

## **рп фотодиоды**

Простейшим видом фотодиода является *p-i-n* фотодиод, схематически изображенный на рис. 9.1. Данный вид фотодиода достаточно редко встречается в волоконной оптике. Он будет использоваться как основа для рассмотрения принципиального устройства полупроводникового фотодиода.



**Рис. 9.1.** рп фотодиод

Другие устройства — ріп- и лавинный фотодиоды — были разработаны с учетом недостатков рп фотодиода.

Данный тип фотодиода является простым рп устройством. Когда к нему приложено напряжение с обратным знаком (отрицательная клемма батареи подключена к участку проводника р-типа), через него начинает течь слабый ток. Приложенное электрическое поле создает обедненное пространство по обе стороны рп перехода. Носители тока — электроны и дырки — уходят из области перехода. Другими словами, электроны смещаются к отрицательному участку полупроводника (положительному контакту батареи), а дырки движутся по направлению к положительному участку (отрицательному контакту батареи). Обедненная зона не имеет свободных носителей, поэтому ее сопротивление очень велико, и практически все падение напряжения приходится на зону контакта. В результате электрические силы очень велики в области контакта и пренебрежимо малы в других областях.

При поглощении падающего фотона связанному электрону передается достаточное количество энергии для перехода из валентной зоны в зону проводимости, при этом образуется пара: свободный электрон + дырка. Если это происходит в обедненной зоне контакта, носители быстро разделяются и смещаются в противоположных направлениях. Это смещение возбуждает движение электронов и во внешнем контуре. Когда носители достигают границы обедненной зоны, где электрические поля становятся малыми, то их движение, а следовательно, и ток во внешнем контуре прекращаются.

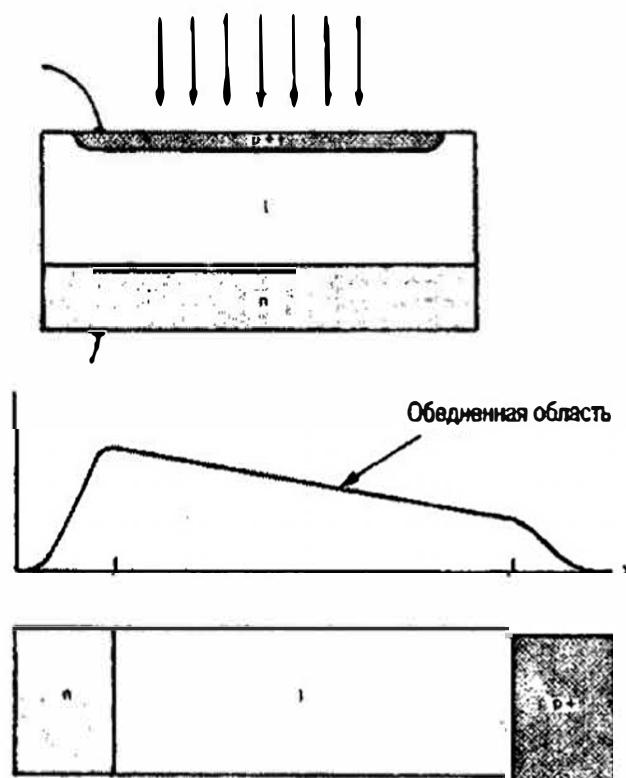
Если генерация электронно-дырочной пары происходит вне обедненной зоны, то носители начинают медленное смещение в ее сторону. Многие носители рекомбинируют прежде, чем достигают обедненной зоны. Те из них, которые достигают обедненной зоны, быстро проходят ее под действием сильного электрического поля, возбуждая при этом ток во внешнем контуре. Данный ток возникает со сдвигом во времени по сравнению с поглощением

фотона. Сдвиг во времени определяется первоначальным медленным движением носителей по направлению к обедненной зоне. В данном случае ток может возникнуть уже после отключения инициирующего света. Запаздывающий ток называется медленным откликом.

Две характеристики  $p\bar{n}$ -фотодиодов ограничивают их применение в большинстве волоконно-оптических приложений. Во-первых, обедненная зона составляет достаточно малую часть всего объема диода, и большая часть поглощенных фотонов не приводит к генерации тока во внешнем контуре. Возникающие при этом электроны и дырки рекомбинируют по дороге к области сильного поля. Для генерации тока достаточной силы требуется мощный световой источник. Во-вторых, наличие медленного отклика, обусловленного медленной диффузией, замедляет работу диода, делая его непригодным для средне- и высокоскоростных применений. Это позволяет использовать диод только в килогерцовом диапазоне.

## pin фотодиоды

Структура pin-фотодиода спроектирована так, чтобы избежать недостатков фотодиода  $p\bar{n}$ -типа. Эта структура представлена на рис. 9.2. Обедненная зона еде-



**Рис. 9.2.** pin-фотодиоды (рисунок предоставлен AMP Incorporated)

лана максимально широкой. Слаболегированный промежуточный слой разделяет более сильно легированные слои п- и р- типа. Промежуточный слой легирован в такой степени, чтобы не относиться ни к полупроводникам п-типа с электронным видом проводимости, ни к полупроводникам р-типа с дырочной проводимостью. Название данного типа диодов происходит из сокращения названий составляющих его слоев: р — positive (положительный), i — intrinsic (внутренний), п — negative (отрицательный) — pin.

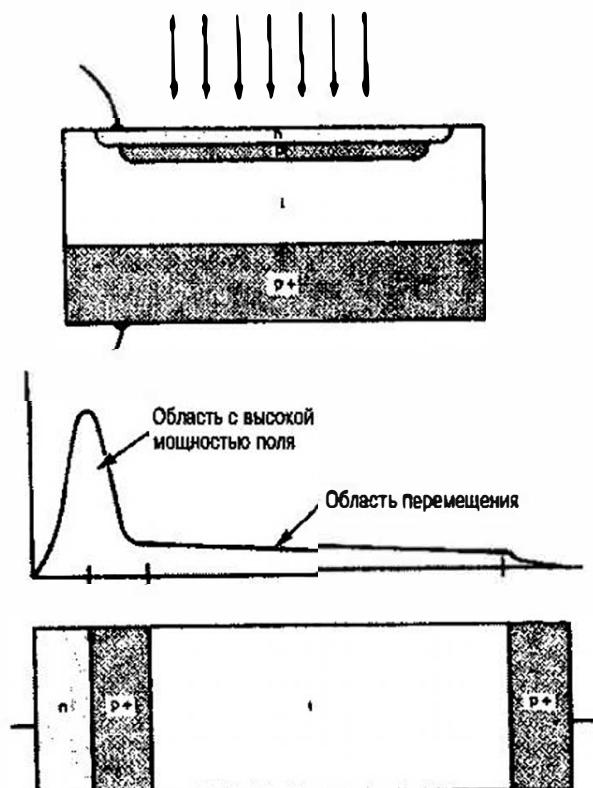
Поскольку внутренний слой не содержит свободных носителей заряда, то электрические силы в нем будут значительными. При этом образуется обедненная зона, сравнимая по ширине с размером диода. Принципиального различия в работе диода pin-типа и диода pnp-типа не существует. Широкий внутренний слой приводит к большей эффективности поглощения фотонов внутри обедненной зоны. В результате падающие фотоны возбуждают ток во внешнем контуре более эффективно и с меньшим запаздыванием. Носители, образующиеся внутри обедненной зоны, мгновенно сдвигаются в сильном электрическом поле к соответственно р- и п- областям диода.

Существует некоторый оптимум размера внутреннего слоя. Для более эффективного протекания процесса преобразования падающих фотонов в носители заряда требуется по возможности более широкий внутренний слой. С другой стороны, скорость срабатывания диода уменьшается с ростом ширины этого слоя, поскольку при этом увеличивается время смещения носителей к краям обедненной зоны. В устройстве диода учитывается баланс этих двух конфликтующих факторов для достижения большей эффективности с максимальной скоростью.

## Лавинные фотодиоды (APD)

В диодах pin-типа каждый поглощенный фотон в идеале приводит к образованию одной электронно-дырочной пары, которая в свою очередь приводит к возбуждению тока в виде смещения одного электрона во внешнем контуре. В этом смысле данный тип фотодиода похож на СИД. В основе и того, и другого лежит соотношение один к одному между фотонами, носителями заряда и током. Продолжая это сравнение, можно сказать, что лавинный фотодиод похож на лазер, в котором соотношение один к одному не выполняется. В лазере небольшое первоначальное количество носителей приводит к появлению большого числа фотонов. В лавинном фотодиоде (APD) несколько падающих фотонов приводят к появлению большого числа носителей и к существенному току во внешнем контуре.

На рис. 9.3 представлена структура APD, отличающаяся наличием очень сильного электрического поля в некоторой части обедненной зоны. *Первоначальные носители* — свободные электроны и дырки, появляющиеся после поглощения света, — под действием этого поля ускоряются, приобретая несколько электрон-вольт кинетической энергии. При столкновении быстрых носителей с нейтральными атомами происходит передача части кинетической энергии электронам валентной зоны и перемещение этих электронов в зону проводимости. В результате появляются свободные электроны и дырки. Возникающие таким образом носители, в отличие от первоначальных, называются *вторичными*.



**Рис. 9.3.** Лавинные фотодиоды (рисунок предоставлен AMP Incorporated)

Данный процесс создания вторичных носителей называется *ударной ионизацией*. Первоначальные носители порождают несколько вторичных носителей, которые в свою очередь, ускорившись в электрическом поле, порождают новые носители. Процесс в целом называется *фотомультиплексией* и представляет собой по сути некоторую форму усиления.

Число электронов, протекающих во внешнем контуре в результате поглощения одного фотона, зависит от APD-фактора мультиплексии. Типичное значение фактора мультиплексии находится в диапазоне от нескольких десятков до нескольких сотен. При значении фактора мультиплексии 70 в среднем 70 электронов протекают во внешнем контуре после поглощения диодом одного фотона. Выражение "в среднем" очень важно. Фактор мультиплексии является статистической величиной, о которой можно говорить только в смысле среднего значения. В каждом конкретном случае один первичный электрон может породить как больший, так и меньший ток во внешнем контуре.

Например, в APD с фактором мультиплексии 70 некоторый первичный носитель может породить как 67 вторичных носителей, так и 76 вторичных носителей. Такого рода вариации являются причиной возникновения шума, лимитирующего предел чувствительности детектора, работающего на основе APD. Более подробно проблема шумов будет обсуждена ниже.

Фактор мультиплексии зависит от приложенного напряжения. Из-за необходимости сильного ускорения первичных носителей требуется приложение достаточно высокого (в ряде случаев в несколько сотен вольт) напряжения, обеспечивающего появление зоны сильного поля. При низких напряжениях APD работает подобно диоду p-i-n типа без усиления.

Существует пороговое значение напряжения для инициирования лавинного процесса ударной ионизации. Выше порога по напряжению APD будет генерировать ток без наличия оптической мощности. Самого напряжения при этом достаточно для инициирования ударной ионизации.

Достаточно часто APD используют в режиме, когда приложенное напряжение чуть ниже порогового. Тогда даже незначительная оптическая мощность приводит к мгновенному реагированию и заметному выходному сигналу. К недостаткам APD можно отнести то, что шумовой ток (ток, возникающий в результате генерации пары носителей в отсутствие света) растет при увеличении приложенного напряжения и, кроме того, высокое напряжение требует специального высоковольтного питания.

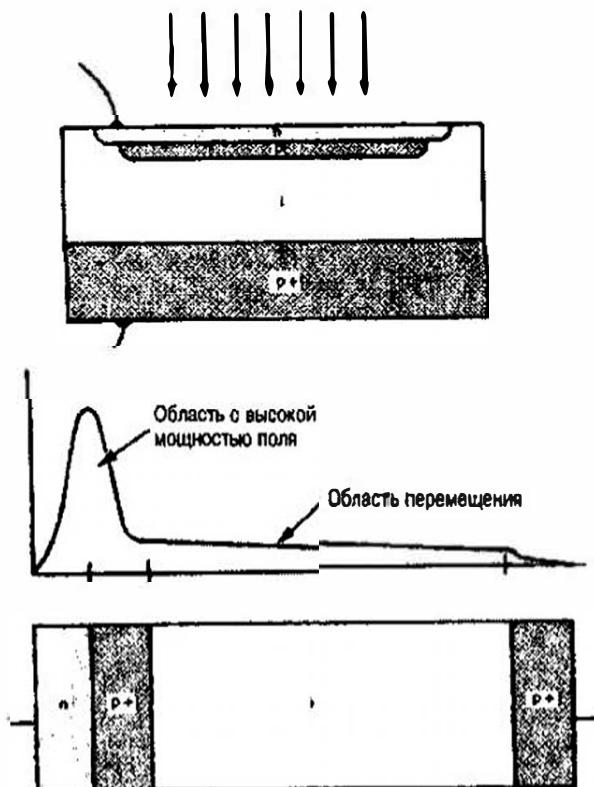
## Шум

В основе работы детектора лежит генерация электрического тока в ответ на падающие光子ы. От него требуется улавливание даже очень слабого оптического сигнала и воспроизведение заметного электрического тока. Однако в действительности электрический сигнал может быть достаточно слабым при уровне оптической мощности от нескольких десятков до нескольких сотен нановатт. Поэтому в приемнике происходит усиление электрического сигнала, полученного от детектора, и возможно искажение его формы.

Шум является неустранимым эффектом, который серьезно ограничивает чувствительность детектора. Шумом называется любое возмущение электрического или оптического характера, отличное от полезного сигнала. Сигнал несет полезную информацию, а шум является чем-то дополнительным и бесполезным. Хотя шум может присутствовать и присутствует во всех частях коммуникационной системы, особенно важен его уровень на входе в приемное устройство. Причина в том, что приемное устройство работает со слабым сигналом, потерявшим свою первоначальную мощность при передаче. Поэтому слабый в большинстве контуров по сравнению с сигналом шум становится заметным на фоне слабого сигнала. Того же уровня шум в передающем устройстве обычно несуществен, поскольку здесь уровень сигнала намного выше. Итак, шум оказывает существенное влияние на порог чувствительности детекторов. Слишком слабый оптический сигнал невозможно различить на фоне шума, для этого необходимо либо уменьшить уровень шума, либо усилить сигнал.

В процессе усиления в приемном устройстве усиливается не только сигнал, но и шум. Некоторые виды шума можно отфильтровать с помощью электронных фильтров. Удобно иметь уровень сигнала более высокий по сравнению с уровнем шума, а еще лучше иметь сильный сигнал и слабый шум.

Некоторые виды шума связаны с самим фотодетектором или приемником. Уже упоминался шум, связанный с процессом мультиплексирования в APD, объясняющийся статистической природой самого процесса. К другим



**Рис. 9.3.** Лавинные фотодиоды (рисунок предоставлен AMP Incorporated)

Данный процесс создания вторичных носителей называется *ударной ионизацией*. Первоначальные носители порождают несколько вторичных носителей, которые в свою очередь, ускорившись в электрическом поле, порождают новые носители. Процесс в целом называется *фотомультиплексией* и представляет собой по сути некоторую форму усиления.

Число электронов, протекающих во внешнем контуре в результате поглощения одного фотона, зависит от APD-фактора мультиплексии. Типичное значение фактора мультиплексии находится в диапазоне от нескольких десятков до нескольких сотен. При значении фактора мультиплексии 70 в среднем 70 электронов протекают во внешнем контуре после поглощения диодом одного фотона. Выражение "в среднем" очень важно. Фактор мультиплексии является статистической величиной, о которой можно говорить только в смысле среднего значения. В каждом конкретном случае один первичный электрон может породить как больший, так и меньший ток во внешнем контуре.

Например, в APD с фактором мультиплексии 70 некоторый первичный носитель может породить как 67 вторичных носителей, так и 76 вторичных носителей. Такого рода вариации являются причиной возникновения шума, лимитирующего предел чувствительности детектора, работающего на основе APD. Более подробно проблема шумов будет обсуждена ниже.

видам шумов, также важных для понимания работы фотодиодов и волоконной оптики, относятся дробный и тепловой шум.

## Дробный шум

Дробный шум возникает вследствие дискретной природы электронов. Электрический ток не является непрерывным однородным потоком. Это поток отдельных дискретных электронов. Напомним, что фотодиод работает благодаря поглощению фотонов, которые инициируют появление электронно-дырочных пар, а те, в свою очередь, — тока во внешнем контуре. Это трехступенчатый процесс: фотон, электрон-дырка, электрон. Падение и поглощение каждого фотона и генерация пары носителей являются частями случайного процесса. Он протекает как серия дискретных событий, а не плавно текущий однородный поток. Таким образом, в действительности ток флюктуирует в зависимости от того, насколько много или насколько мало электронно-дырочных пар возникло в данный момент времени.

Дробный шум присутствует и тогда, когда свет не падает на детектор. Даже в отсутствие света малый дребезг тока генерируется за счет тепловых флюктуаций, причем его уровень увеличивается примерно на 10% при росте температуры на 1 градус. Типичное значение шумового тока составляет 25 нА при 25 градусах.

Дробный шум определяется выражением

$$i_{\text{ш}}^2 = 2qiB$$

где  $q$  — заряд электрона ( $1.6 \times 10^{-19}$  кулон),  $i$  — средняя сила тока (включая фоновый ток и ток сигнала) и  $B$  — ширина частотной полосы приемника. Из уравнения видно, что дробный шум усиливается при росте тока и ширины полосы. Дробный шум минимален, когда присутствует только фоновый ток (когда  $i$  = фоновому току), и растет при возникновении тока, возбуждаемого оптическим сигналом. Детектор с уровнем фонового тока 2 нА, работающий в частотной полосе 10 МГц, имеет дробный шум на уровне 80 пА:

$$\begin{aligned} i_{\text{ш}}^2 &= 2qiB \\ &= (2)(1.6 \times 10^{-19})(2 \times 10^{-9})(10 \times 10^6) \\ &= 6.4 \times 10^{-21} \\ i_{\text{ш}} &= 8 \times 10^{-11} \\ &= 80 \text{ пА} \end{aligned}$$

## Тепловой шум

Тепловой шум, или шум Джонсона-Найквиста, возникает благодаря флюктуациям сопротивления детектора. Электроны в пространстве между электродами ведут себя непостоянно. Их тепловая энергия позволяет им случайным образом смещаться. В каждый момент времени суммарный поток случайного движения электронов может быть направлен к одному либо к другому электроду. Таким образом появляется постоянно меняющийся случайный ток. Он накладывается на полезный ток сигнала и изменяет его. Термический шум задается выражением

$$i_{\text{th}}^2 = \frac{4kTB}{R_L}$$

где  $k$  — постоянная Больцмана ( $1.38 \times 10^{-23}$  Дж/К),  $T$  — абсолютная температура по шкале Кельвина,  $B$  — ширина частотной полосы приемника и  $R_L$  — сопротивление нагрузки. Рассмотрим 510-Ом нагрузку, работающую при абсолютной температуре 298 К. Предположим ширину полосы в 10 МГц. Термовой шум равен

$$\begin{aligned} i_{\text{th}}^2 &= \frac{4kTB}{R_L} \\ &= \frac{(4)(1.38 \times 10^{-23})(298)(10 \times 10^6)}{510} \\ &= 3.23 \times 10^{-16} \\ &= 1.79 \times 10^{-8} \\ &= 18 \text{nA} \end{aligned}$$

Термовой и дробный шум в приемнике возникают независимо от поступающей оптической мощности. Они определяются структурой материи. Они могут быть уменьшены при улучшении устройства детектора, но избавиться от них полностью невозможно. Любой сигнал — оптический, электрический, или голосовой — обязательно существует совместно с шумом. После приема, на стадии следующей после детектирования, происходит усиление сигнала совместно с шумом. Таким образом, сигнал должен быть существенно сильнее шума. Если амплитуда сигнала равна амплитуде шума, то это следствие неадекватного детектирования. При адекватном детектировании амплитуда сигнала должна минимум в два раза превосходить амплитуду шума.

## Отношение сигнал/шум

Отношение *сигнал/шум* (SNR) — общепринятый способ выражения качества сигнала в системе. Это просто отношение средней энергии сигнала к

$$\text{SNR} = \frac{S}{N}$$

В децибелах SNR равно

$$\text{SNR} = 10 \log_{10} \left( \frac{S}{N} \right)$$

средней энергии шумов различной природы.

Если сигнал имеет мощность 50 мкВт, а мощность шума равна 50 нВт, то данное отношение равно 1000, или 30 дБ.

Большие значения SNR соответствуют ситуации, когда сигнал существенно превосходит шум. Мощность сигнала зависит от мощности поступающего оптического сигнала. В различных случаях требуются различные значения SNR. Отношение сигнал/шум для телефонных линий меньше аналогичного параметра для телевизионного сигнала, поскольку даже достаточно высокий уровень шумов на телефонной линии может остаться незамеченным. Также можно принимать большие звуковые искажения по сравнению с приемом

телеизионного сигнала. Более того, передаваемый в эфир телевизионный сигнал имеет более высокое значение отношения сигнал/шум, чем телевизионный сигнал, принимаемый дома. Почему? На передаваемый в эфире сигнал накладывается шум. Поэтому необходимо, чтобы даже после передачи и приема отношение сигнал/шум оставалось достаточно высоким и обеспечивало качественную телевизионную картинку.

## Отношение бит/ошибки

Для цифровых систем существует аналог SNR, который называется отношение бит/ошибка (BER). Данный параметр является отношением правильно переданной информации, выраженной в битах, к неправильно переданной информации. Отношение  $10^9$  означает, что при передаче одного миллиарда бит информации была допущена одна ошибка. Подобно SNR требования к величине отношения бит/ошибки зависят от области применения. Требования к цифровой телефонии ниже, чем к цифровым компьютерным данным, они соотносятся как  $10^6$  к  $10^9$ . Несколько ошибочно переданных бит не вызовут катастрофы на телефонной линии. В то же время несколько неправильных бит информации в компьютерных данных могут существенно изменить финансовые данные или данные об оценках студентов и привести к неправильной работе программы.

Параметры BER и SNR связаны. Лучшее SNR подразумевает лучшее отношение BER. Параметр BER зависит также от формата кодирования данных и устройства приемника. Существует техника детектирования и исправления ошибочных битов. Невозможно представить простую формулу, позволяющую выражать одно отношение через другое, поскольку их соотношение определяется множеством факторов, таких как устройство контура и схема коррекции ошибочных битов. В некоторой системе значению  $SNR = 22$  дБ соответствует значение BER, равное  $10^{-9}$ . В то же время значению  $SNR = 17$  дБ соответствует  $BER = 10^{-6}$ . В другом устройстве  $10^{-9}$  BER может достигаться при  $SNR = 18$  дБ.

## Характеристики детекторов

Здесь приводятся характеристики детекторов, представляющие интерес с точки зрения использования в волоконной оптике. К ним относятся чувствительность прибора по отношению к поступающей оптической мощности и скорость его срабатывания. Поскольку детекторы p-i-n типа наиболее распространены, остановимся именно на их анализе.

### Чувствительность

Чувствительностью называется отношение выходного тока к оптической энергии, она выражается в амперах/ватт. Оптическая энергия производит ток. Типичное значение чувствительности фотодиода составляет от 0.4 до 0.6 А/Вт. Чувствительность 0.6 А/Вт означает, что поступающая оптическая мощность 50 мкВт производит ток в 30 мкА:

$$I_d = 50\text{мкВт} \times 0.6\text{А/Вт} = 30\text{мкА}$$

где  $I_d$  — ток диода.

Для лавинных фотодиодов типичное значение чувствительности составляет 75 А/Вт. При этом та же оптическая мощность 50 мкВт производит ток силой в 3.75 мА.

$$I_d = 50 \text{ мкВт} \times 75 \text{ А/Вт} = 3750 \text{ мкА} = 3.75 \text{ мА}$$

Чувствительность изменяется в зависимости от длины волны, поэтому она задается либо при длине волны, соответствующей максимуму чувствительности, либо при длине волны, представляющей интерес, такой как 850 нм или 1300 нм. Кремний является наиболее распространенным материалом, используемым в детекторах в диапазоне длин волн от 800 до 900 нм. Его пиковая чувствительность составляет 0.7 А/Вт при 900 нм. При длине волны 850 нм чувствительность близка к своему максимальному значению. В оптических системах, работающих на пластиковых волокнах, обычно используется излучение видимого диапазона с длиной волны 650 нм. При этом чувствительность фотодиода далека от максимума и составляет от 0.3 до 0.4 А/Вт.

Кремниевые фотодиоды не вполне пригодны для более длинноволнового диапазона 1300 нм и 1550 нм. В этом диапазоне используются германий (Ge) и индий-галлий-арсенид (InGaAs). Фотодиод p-i-n типа на основе InGaAs имеет достаточно широкую область высокой чувствительности. Данный материал не образует ярко выраженный пик на кривой чувствительности, как кремний. В диапазоне от 900 до 1650 нм его чувствительность не опускается ниже 0.5 А/Вт, что позволяет использовать его как для длины волны 1300 нм, так и для 1550 нм. На рис. 9.4 представлены типичные кривые чувствительности для различных фотодиодов.

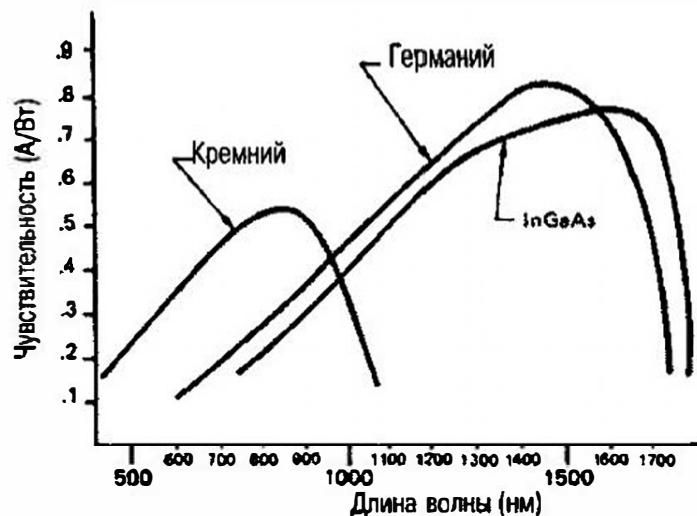


Рис. 9.4. Чувствительность

## Квантовая эффективность

Квантовой эффективностью называется отношение числа первичных пар электрон-дырка к числу падающих на материал диода фотонов. Данный параметр является либо безразмерным, либо выражается в процентах. Квантовая эффективность 1, или 100% означает, что каждый поглощенный фотон приводит к образованию электронно-дырочной пары. Типичное значение квантовой эффективности составляет около 70%, т.е. только 7 пар образуется в результате поглощения 10 фотонов. Квантовая эффективность относится только к первичным электронам, но ни в коем случае не ко вторичным, возникающим за счет ударной ионизации.

Квантовая эффективность связана с фундаментальными свойствами полупроводникового вещества диода и его способностью трансформировать поглощенные фотоны в электронно-дырочные пары. Чувствительность может быть определена на основании квантовой эффективности:

$$R = \frac{ve\lambda}{hc}$$

где  $e$  — заряд электрона,  $h$  — постоянная Планка,  $c$  — скорость света. Поскольку  $e$ ,  $c$  и  $h$  являются постоянными, то чувствительность зависит лишь от длины волны и квантовой эффективности.

## Фоновый ток

Ранее уже упоминался *фоновый (теневой) ток*, то есть ток, возникающий из-за тепловых эффектов. Он представляет собой низкий уровень теплового шума. Теневой ток возрастает примерно на 10% с ростом температуры на 1 градус. Он существенно слабее в кремниевом диоде, используемом на более коротких длинах волн, чем в германиевых или InGaAs фотодиодах, используемых на более длинных волнах.

## Минимальная детектируемая мощность

Минимальная детектируемая мощность определяет минимальный уровень оптической мощности, который может быть зафиксирован. В простейшем случае она соответствует уровню мощности теневого тока. Другие источники шума также влияют на уровень минимальной детектируемой мощности.

Уровнем шума диода *p-i-n*-типа, который непосредственно указывает на минимум детектируемой мощности, называется отношение силы шумового тока к чувствительности:

$$\text{Уровень шума} = \text{Шум} / \text{Чувствительность}$$

В качестве первого приближения используется значение теневого тока для получения оценки уровня шума. Рассмотрим диод *p-i-n*-типа с  $R=0.5$  мкА/мкВт и теневым током силой в 2 нА. Минимальная детектируемая мощность равна

$$\begin{aligned}\text{Уровень шума} &= \frac{2 \times 10^{-12} \text{ А}}{0.5 \text{ мкА/нмВт}} \\ &= 4 \times 10^{-12} \text{ Вт} \\ &= 4 \text{ нВт}\end{aligned}$$

Более точные оценки должны учитывать другие виды шумов, такие как тепловой и дробный. Итак, шум зависит от тока, температуры, сопротивления нагрузки и полосы пропускания.

## Время отклика

Временем отклика называется время, которое требуется фотодиоду для преобразования поступающей оптической энергии в электрический ток. По аналогии с источниками, время отклика задается временем нарастания и спада сигнала между точками, соответствующими 10% и 90% уровням максимальной амплитуды. Время нарастания колеблется от 0.5 нсек до десятков наносекунд и лимитировано скоростью перемещения носителей через обедненную зону. Оно также зависит от приложенного напряжения: более высокому уровню напряжения соответствует меньшее время нарастания. Диод *p-i-n*-типа может иметь время нарастания 5 нсек при 15 В и 1 нсек при 90 В.

Время отклика связано с частотной полосой пропускания диода. Частотная полоса может быть оценена на основе времени отклика:

$$BW = \frac{0.35}{t_r}$$

Частотная полоса пропускания, или рабочий диапазон фотодиода, ограничивается как временем нарастания, так и постоянной RC, влияние которой доминирует при медленных скоростях. Частотная полоса, лимитированная RC-константой, равна

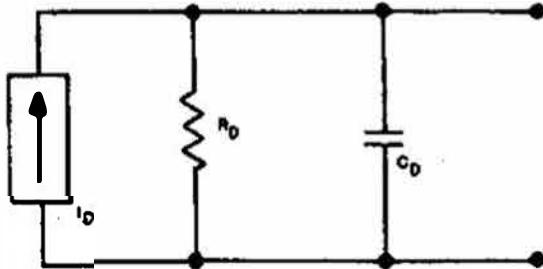
$$BW = \frac{1}{2\pi R_L C_d}$$

где  $R_L$  — сопротивление нагрузки и  $C_d$  — емкость диода. Время нарастания RC контура равно

$$\tau_r = 2.19 R_L C_d$$

На рис. 9.5 изображен электрический контур, эквивалентный диоду *p-i-n*-типа. Он состоит из источника тока, подключенного параллельно сопротивлению и емкости, и работает как низкочастотный фильтр, пропускающий низкие частоты и задерживающий высокие. Частота отсечки, которой соответствует затухание в 3 дБ (или 50%), определяет верхнюю границу частотного диапазона (полосы пропускания). Частоты выше частоты отсечки не являются рабочими.

Диоды, предназначенные для высокоскоростных систем, должны иметь емкости величиной в несколько пикофарад и менее. Емкость диода *p-i-n*-типа представляет собой емкость контактов *p*, *i* и *n* слоев, а также конструктивные емкости элементов подключения и крепления. Рассмотрим фотодиод с временем реакции 1 нсек и емкостью 2 пФ. Его рабочая частотная полоса пропускания (BW) равна



**Рис. 9.5.** Электрическая модель p-i-n-диода (рисунок предоставлен AMP Incorporated)

$$BW = 0.35 / 1 \text{ нс} = 0.35 \text{ ГГц} = 350 \text{ МГц}$$

Для определения диапазона параметров, при которых отсутствует влияние постоянной RC на частотную полосу, требуется вычислить максимальное значение сопротивлений, соответствующее полученному ранее значению ширины частотной полосы:

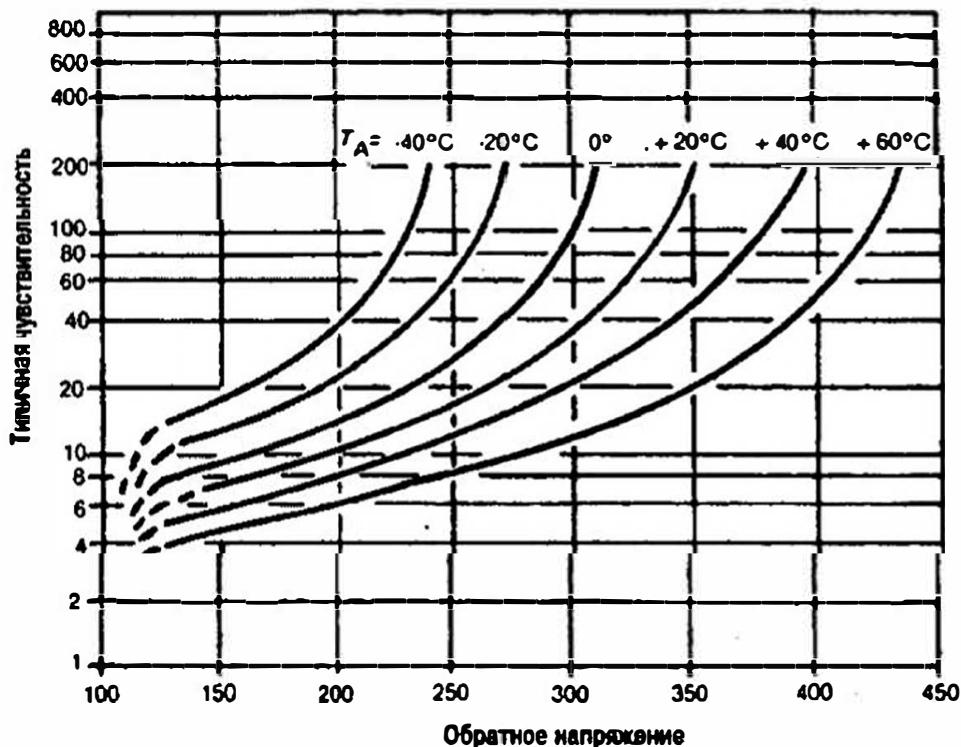
$$\begin{aligned} BW &= \frac{1}{2\pi R_L C_d} \\ 350 \times 10^6 \text{ Гц} &= \frac{1}{(2)(3.1415927)(2 \times 10^{-12} (R_L))} \\ R_L &= 227 \text{ Ом} \end{aligned}$$

Итак, стандартный 220-омный резистор будет работать, хотя на практике используется в четыре раза меньшее сопротивление.

## Приложенное напряжение

Фотодиоды работают при напряжении от 5 В в p-i-n-диодах до нескольких сотен вольт в лавинных диодах. Приложенное напряжение оказывает существенное влияние на работу диода, поскольку теневой ток, чувствительность и время реакции возрастают при увеличении напряжения. В лавинных диодах обычно используется напряжение, соответствующее порогу лавинного процесса, что обеспечивает быстрое время реакции.

Как показано на рис. 9.6, лавинные диоды также достаточно чувствительны к изменению температуры. Поэтому приложенное напряжение должно варьироваться при изменении температуры для обеспечения стабильного режима работы диода. Выходной сигнал лавинного диода проявляет нестабильность до тех пор, пока в приемнике не используется компенсационный контур. Необходимость использования высокого напряжения и чувствительность к изменениям температуры ограничивают выбор лавинного диода случаями, когда чувствительность и возможность усиления важнее указанных неудобств.



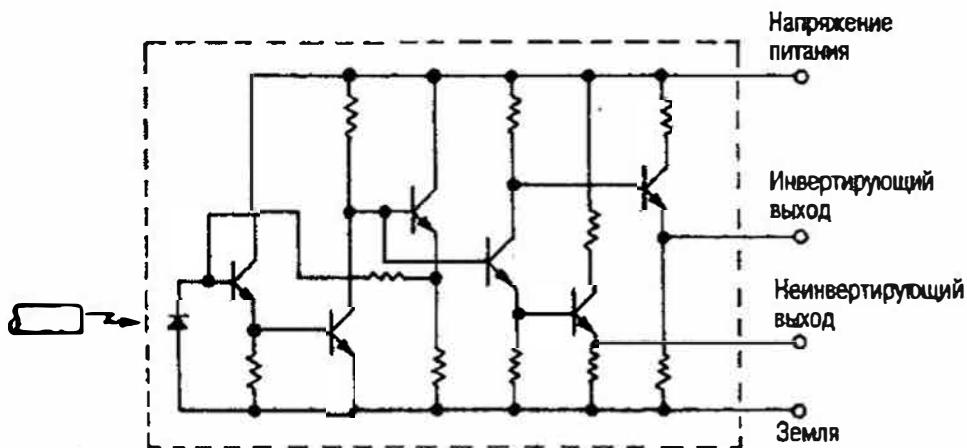
**Рис. 9.6.** Влияние приложенного напряжения и температуры на чувствительность лавинного диода (рисунок предоставлен AMP Incorporated)

## Интегрированные детекторы/предусилители

*Интегрированный детектор/предусилитель* (IDP) является альтернативой фотодиодам p-n-pn-типа. Шум, который ограничивает работу приемника, возникает между самим диодом и первой ступенью приемника. Электрические контуры диода могут оказаться чувствительными к электромагнитным помехам и работать подобно антенне, улавливающей внешний шум и добавляющей его к шуму усилителя.

Для ослабления этих источников шума в IDP используется *трансимпедансный усилитель*, встроенный в такой же полупроводниковый кристалл, что и фотодетектор. Трансимпедансный усилитель выполняет функции как усилителя, так и преобразователя тока в напряжение. IDP является интегрированным контуром, совмещающим в себе фотодиод и трансимпедансный усилитель. (Усилитель может представлять собой некоторую приставку к детектору, выполненную в виде отдельного кристалла.) На рис. 9.7 представлен схематический вид интегрированного IDP.

Специфицированные характеристики ГОР совпадают с типичными характеристиками обычных фотодетекторов. Основное отличие в том, что на вы-



**Рис. 9.7.** Интегрированный детектор/предусилитель (рисунок предоставлен AMP Incorporated)

ходе IDP — напряжение, поэтому чувствительность задается в вольтах/ватт (В/Вт). Поскольку ГОР является и усилителем, то типичное значение чувствительности составляет около 40 В/Вт. В случае 50 мкВт оптической мощности выходное значение напряжения IDP составляет 2 мВ.

Альтернативный подход состоит в использовании неинтегрированного детектора/предусилителя. В этом случае детектор и предусилитель представляют собой отдельные устройства, составляющие единый комплект. Преимущества такого подхода те же, что и в интегрированном устройстве: размещение двух устройств вместе позволяет избежать проблем с шумом.

## Конструкция

Конструкция детектора аналогична конструкции источника: корпус серии ТО, пигтейлы и микролинзовые переходники. Более детально с этим вопросом можно ознакомиться в главе 8 на примере конструкции источников. Два основных источника потерь при подключении к волокну возникают из-за рассогласования диаметров и апертуры (NA):

Когда  $\text{dia}_{\text{det}} < \text{dia}_{\text{fiber}}$

$$\text{loss}_{\text{dia}} = 10 \log_{10} \left( \frac{\text{dia}_{\text{det}}}{\text{dia}_{\text{fiber}}} \right)^2$$

Когда  $\text{NA}_{\text{det}} < \text{NA}_{\text{fiber}}$

$$\text{loss}_{\text{dia}} = 10 \log_{10} \left( \frac{\text{NA}_{\text{det}}}{\text{NA}_{\text{fiber}}} \right)^2$$

Поскольку конструкция детекторов легко позволяет иметь большой активный диаметр и широкую угловую апертуру, то проблема затухания на контактах в детекторах стоит менее остро, чем в источниках. Другие виды потерь возникают из-за Френелевского отражения и механического несоответствия между соединителем и приемной частью диода.

Детекторы укомплектовываются теми же разъемами, что и источники . (рис. 8.12).

## Спецификации детекторов

Таблица 9.1 представляет типичную спецификацию для p-i-n- и лавинных детекторов.

**Таблица 9.1. Типичные характеристики детекторов.**

	Pin-детекторы	Pin-детекторы с предусилителем	Лавинные детекторы
Чувствительность	.80 мкА/мкВт	2 мВ/мкВт	70 мкА/мкВт
Спектральное время ответа (нм)	1150-1600	1150-1600	1150-1600
Фоновый ток (нА)	2		5
Емкость (пФ)	1.5		4
Время нарастания (нс)	0.5 макс.		0.5

## Заключение

- Детектор представляет собой преобразователь, который трансформирует оптическую энергию в ток.
- Наиболее распространенными видами детекторов, используемых в волоконной оптике, являются pin-фотодиоды и лавинные фотодиоды.
- Чувствительность отражает отношение выходного тока к оптической мощности.
- Лавинные детекторы обеспечивают внутреннее усиление сигнала, поэтому их чувствительность существенно выше, чем чувствительность pin-диода. Лавинные детекторы более сложны в эксплуатации.

Шум определяет уровень минимальной детектируемой мощности. С детекторами ассоциируются два вида шумов: дробный и тепловой.

SNR и BEK представляют два вида характеристик, указывающих на качество сигнала в системе.

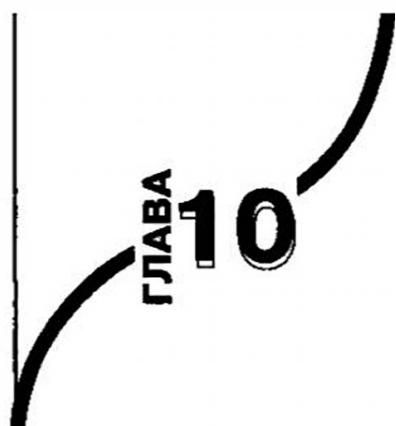
Время ответа детектора может определяться временем его внутреннего срабатывания или постоянной RC его электрического контура.

Интегрированный детектор/предусилитель представляет собой детектор, включающий в себя как фотодиод, так и трансимпедансный усилитель.

Контрольные вопросы

1. Для чего служит детектор?
2. Назовите два типа волоконно-оптических источников.
3. Назовите три слоя  $p-i-n$ -фотодиода. Каково предназначение среднего слоя?
4. Назовите вид шума, возникающего из-за дискретности потока электронов.
5. Назовите вид шума, возникающего из-за температурных флюктуаций в сопротивлении нагрузки.
6. Вычислите ток, возникающий при падении 750 нВт оптической мощности на детектор с чувствительностью 0.7 А/Вт.
7. Назовите два фактора, ограничивающих время ответа детектора.
8. Вычислите время реакции контура детектора, имеющего емкость 3 пФ и сопротивление нагрузки 160 Ом.
9. Чем отличаются интегрированные детекторы/предусилители от  $p-i-n$ -фотодиодов?
10. Назовите две причины большего распространения фотодиодов  $p-i-n$ -типа по сравнению с лавинными.

# *Передатчики и приемники*



В главе 1 указывалось, что волоконно-оптическая линия содержит передатчик, оптический кабель и приемник. Были рассмотрены волоконно-оптические кабели, источники и детекторы, то есть электронно-оптические преобразователи, обеспечивающие связь между оптической и электронной частями волоконно-оптической системы.

## **Фундаментальные концепции передатчика**

На рис. 10.1 представлена блок-схема передатчика, содержащего управляющее устройство и источник. На входе передатчика поступает сигнал от обслуживаемого устройства. На выходе передатчика появляется ток, управляющий работой источника.

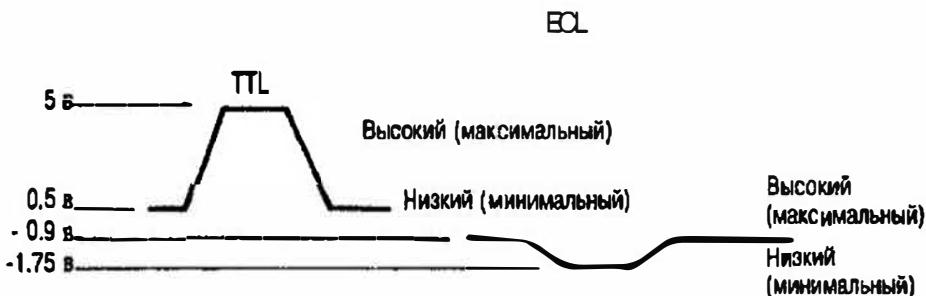
Большинство электронных схем работает со стандартными сигналами определенного уровня. Телевизионные видеосигналы используют уровень в 1 В, цифровые схемы — различные стандарты в зависимости от типа логических цепей, применяемых в системе. Эти логические цепи определяют



**Рис. 10.1.** Блок-схема передатчика

уровни для максимумов и минимумов, представляющих единицы и нули цифровых данных.

В настоящее время наиболее распространенной цифровой логикой является транзисторно-транзисторная (TTL). Она использует 0.5 В для минимального уровня сигнала и 5 В — для максимального. TTL является быстрой логикой, позволяющей применять ее во многих приложениях, однако более быстрой является эмиттерно-связанная логика (ECL). Цепи ECL используют -1.75 В для минимального и -0.9 В для максимального значений. На рис. 10.2 представлены логические уровни TTL и ECL цепей.



**Рис. 10.2.** Уровни сигналов TTL и ECL

Обычно TTL и ECL не могут быть совмещены. Однако существуют специальные микросхемы, позволяющие конвертировать сигналы из одной логики в другую. Как TTL, так и ECL используются в волоконно-оптических передатчиках и приемниках. TTL является более распространенной; ECL обычно используется только для систем со скоростями около 50 или 100 Мб/сек.

Другим популярным видом логических схем является CMOS. Он быстро становится альтернативой TTL благодаря очень низкой стоимости компонент. Многие CMOS-цепи используют те же уровни напряжений для сигналов, что и TTL.

Управляющие цепи передатчика должны принимать данные определенного логического уровня. После обработки поступивших цифровых сигналов формируется выходной сигнал для управления источником. Например, он может преобразовать 0.5 В и 5 В TTL-сигнала в 0 мА и 50 мА, необходимые для включения и выключения источника.

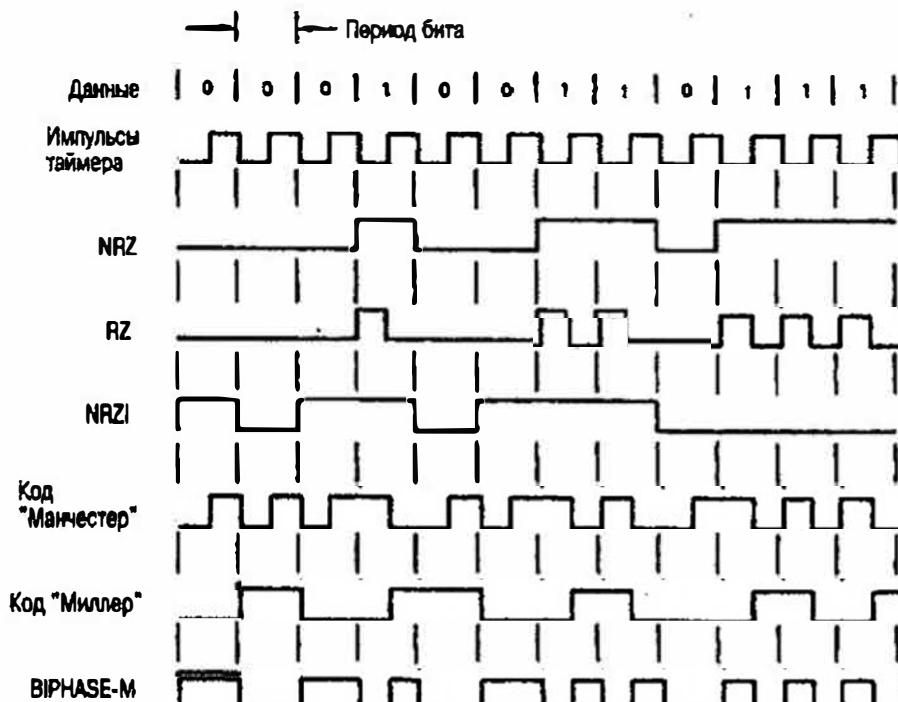
Дополнительная функция передатчика заключается в обеспечении соответствующего кодирования.

## Кодирование

Передача цепочки цифровых ступенек на любое значимое расстояние, как правило, неудобна. В то время как цифровые цепи используют ступенчатые импульсы для представления единиц и нулей двоичных данных, для передачи цифровых сигналов между электронными устройствами используется более сложный формат. Модуляционный код применяется для кодирования цифровых данных с последующей передачей их по линиям связи.

Ранее было отмечено, что наличие ступенчатого импульса означает двоичную 1, а его отсутствие — двоичный 0. В TTL-системах 5-В уровень представляет 1; 0,5-В уровень представляет 0. Таким образом, существует взаимное соответствие между высокими и низкими уровнями напряжения и двоичными 1 и 0. В модуляционных кодах, представленных здесь, данное соответствие не всегда сохраняется.

На рис. 10.3 показано несколько популярных кодов модуляции. Каждому биту данных ставится в соответствие определенный период сигнала, который контролируется таймером. Таймером служит постоянная цепочка им-



Формат	Символы в битах	Внутренняя синхронизация	Коэффициент заполнения (%)
NRZ	1	Нет	0 - 100
RZ	2	Нет	0 - 50
NRZI	1	Нет	0 - 100
Манчестер (BiPHASE-L)	2	Да	50
Миллер	1	Да	33 - 67
BiPHASE-M	2	Да	50

Рис. 10-3. Модуляционные коды

пульсов, задающая временной интервал для основной системы. Как показано в таблице на рис. 10.3, некоторые коды имеют внутренние сигналы синхронизации, другие их не имеют. Код с внутренней синхронизацией представляет собой код с уже включенной информацией о времени. В других кодах эта информация отсутствует.

Информация о времени важна для приемника, одна из целей которого — восстановление сигнала в его первоначальном состоянии. Приемник имеет три варианта информации о времени.

1. Передаваемые данные содержат информацию об импульсах таймера, то есть модуляционный код включает в себя внутреннюю синхронизацию.
2. Информация об импульсах таймера должна передаваться по другой линии. Это делает систему более громоздкой, поскольку требует дополнительной линии от передатчика к приемнику. Для дальних расстояний стоимость прокладки дополнительной линии может быть существенной.
3. Приемник может обеспечивать собственную синхронизацию по времени независимо от импульсов таймера передатчика.

## Код NRZ

*Код NRZ (nonreturn-to-zero, без возврата к нулю)* аналогичен "нормальным" цифровым данным. Сигнал максимален в 1 и минимален в 0. Для представления последовательности единиц сигнал остается на высоком уровне. Цепочка нулей сигнала отображается низким уровнем. Таким образом, уровень сигнала преобразуется лишь при изменении значения данных.

## Код RZ

*Код RZ (return-to-zero, с возвратом к нулю)* представляет 0 в виде сигнала низкого уровня. Для представления 1 — уровень сигнала высокий в течение половины периода бита, а затем становится низким в оставшейся части периода. Для каждой 1 из последовательности данных уровень сигнала сначала становится высоким, а затем низким в течение периода бита. Например, для последовательности из трех единиц уровень сигнала становится высоким для каждой из них, а затем для каждой из них возвращается к минимальному значению.

## Код NRZI

*Код NRZI (nonreturn-to-zero - inverted, инвертированный без возврата к нулю)* представляет 0 в виде изменения уровня сигнала, а 1 — отсутствием такого рода изменения. Таким образом, уровень сигнала меняется от высокого до низкого (или наоборот от низкого к высокому) для каждого нуля, но остается на одном уровне для представления каждой единицы. Важным моментом является то, что не существует заданного соотношения между 1 и 0, а

также между высоким и низким уровнями. Бинарная единица может быть представлена как высоким уровнем сигнала, так и низким.

## **Код Манчестер**

В этом методе кодирования используется изменение уровня сигнала в середине каждого битового периода. Для 1 первая половина периода соответствует высокому уровню сигнала, а вторая — низкому. В представлении 0 — наоборот.

## **Код Миллер**

В коде *Миллер* каждая 1 представляется изменением уровня сигнала в середине периода бита. Для представления 0 используется либо отсутствие изменения уровня сигнала, если он следует после 1, либо изменение в начале периода, если он следует за 0.

## **Код Bi-phase-M**

В коде *Bi-phase-M* (модифицированный двухфазный) каждый период бита начинается с изменения уровня сигнала. Для представления 1 используется дополнительное изменение в середине периода. Для представления 0 никаких дополнительных изменений не выполняется. Таким образом, 1 представляется как высоким, так и низким уровнем сигнала в течение периода. Для представления 0 используется либо низкий, либо высокий уровень сигнала в течение всего битового периода (но не оба уровня одновременно).

## **Кодирование 4B/5B и 4B/8B**

Большинство локальных компьютерных сетей использует код Манчестер. Для волоконно-оптических локальных сетей это не так. Причина в том, что это кодирование требует удвоенной скорости таймера по сравнению со скоростью передачи данных. Например, 100-Мб/сек сеть требует таймер на 200 МГц. Кодировка данных NRZI не предусматривает изменения сигнала в случае передачи цепочки нулей, что затрудняет разбивку информации на битовые периоды (внутреннюю синхронизацию). При этом приемник не может соответствующим образом синхронизировать свою работу с поступающим потоком данных.

Многие высокоскоростные волоконно-оптические системы используют схемы кодировки информации по группам, в которых кодируются не отдельные биты, а целые слова длиной в несколько бит. Например, при кодировке 4B/5B каждые четыре бита информации кодируются в 5-битовое слово. После получения такого кода приемник декодирует 5-битовые слова в 4-битовые блоки первоначальной информации. Эта схема гарантирует, что данные никогда не будут представлять собой цепочку из более чем трех последовательных нулей. Эта кодировка использует менее широкую частотную полосу пропускания по сравнению с кодированием Манчестер, требуя

увеличения скорости передачи лишь на 20 процентов. Данная схема применяется в FDDI.

В рамках другой схемы 4B/8B, используемой в Fiber Channel и в системе IBM ESCON, 4-битовые блоки информации кодируются в 5-битовые слова или 8-битовые блоки — соответственно в 10-битовые слова. FDDI, ESCON и Fiber Channel обсуждаются в главе 15.

## **Скорость передачи данных и скорость сигнала**

При внимательном рассмотрении различных кодов модуляции, представленных на рис. 10.3, обнаруживается один очень важный аспект. Максимумы и минимумы сигнала могут изменяться чаще, чем 1 и 0 двоичных данных. На рисунке представлены 12 битов данных (000100110111). Однако соответствующие им коды используют большее количество символов для представления этих данных. Символом является либо максимум, либо минимум в коде. В коде Манчестер используется два символа (как максимум, так и минимум) для представления каждого двоичного бита. Этот код всегда использует удвоенное количество символов по сравнению с числом передаваемых битов.

Говоря о скорости системы, очень важно понимать разницу между скоростью передачи данных и скоростью передачи сигнала. *Скорость передачи данных* — это число бит данных, переданных за одну секунду. Система, например, может работать со скоростью 10 Мб/сек (мегабит в секунду). *Скорость сигнала* — это число символов, передаваемых за одну секунду, — выражается в бодах. Скорость сигнала (бод-скорость) и скорость передачи данных (бит-скорость) могут совпадать или не совпадать в зависимости от используемого кода модуляции.

В коде NRZ, использующем один символ для представления одного бита, данные скорости совпадают. Скорость в 10 Мб/сек соответствует 10 Мбодам. В коде Манчестер два символа представляют один бит, а скорость в бодах в два раза больше скорости в битах. Для передачи потока данных в 10 Мб/сек требуется линия связи информационной емкостью (скоростью передачи сигнала) в 20 Мбод. Скорость в бодах, или скорость передачи символов, является более точным показателем скоростных характеристик системы. Данное утверждение является общим для всех передающих систем, в том числе и для волоконно-оптических.

## **Уровень мощности сигнала**

*Уровень мощности* сигнала определяется отношением максимального уровня импульсов к минимальному в закодированном потоке сигналов. Уровень мощности, равный 0, соответствует последовательности, полностью состоящей из символов с минимальным уровнем. Значение уровня мощности, равное 100%, соответствует потоку, состоящему полностью из символов с максимальным уровнем. Уровень мощности, равный 50%, соответствует равному количеству символов с максимальным и минимальным уровнем. Уровень мощности также определяет соотношение между пиковым и средним значением мощности, приходящей к приемнику. Для 50% уровня мощности

средняя мощность соответствует половине максимальной. Свыше 50% — средняя мощность приближается к максимальному значению. Ниже 50% — средняя мощность снижается по отношению к максимальному значению. Уровень мощности является важным параметром, характеризующим работу приемника, и будет рассматриваться позднее в этой главе.

## Выходная мощность передатчика

Важным параметром является выходная мощность передатчика. Во многих случаях специфицируется мощность, которая может быть передана волокну. При этом для заданной конструкции передатчика значения выходной мощности могут быть следующими:

Волокно	Мощность
50/125 мкм, 0.21 апертура (NA)	-6 дБм
62.5/125 мкм, 0.275 апертура (NA)	-12 дБм
85/125 мкм, 0.26 апертура (NA)	-10 дБм
100/140 мкм, 0.30 апертура (NA)	-8 дБм

Передаваемая мощность увеличивается вместе с диаметром ядра и апертурой (NA). С другой стороны, меньшее затухание и более широкая полоса пропускания характерны для волокна с меньшими значениями диаметра ядра и апертуры.

Если выходная мощность передающего устройства не специфицирована, как представлено выше, то она может быть вычислена. Для проведения оценки необходимо знать мощность источника, диаметр и апертуру как волокна, так и источника, а также ожидаемые потери в соединителе. Пример такой оценки дается в следующей главе.

## Основные принципы работы приемника

На рис. 10.4 представлена блок-схема приемника, состоящего из детектора, усилителя и выходной цепи. Усилитель восстанавливает ослабленный сигнал, получаемый от детектора. Выходная цепь выполняет множество функций:

- Разделение синхроимпульсов и данных

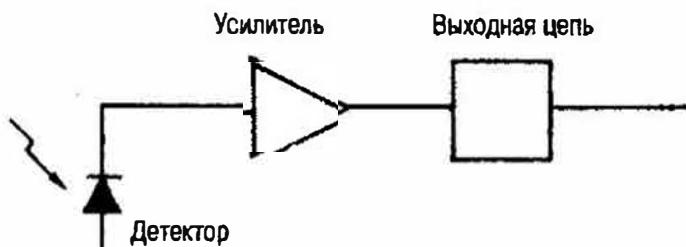


Рис. 10.4. Блок-схема приемника

- Восстановление формы и временных характеристик импульса
- Сдвиг уровня сигнала для обеспечения совместимости с внешними электрическими цепями TTL, ECL и т.д.
- Контроль за усилением для поддержания его постоянного уровня вне зависимости от полученной оптической мощности и изменений режима работы приемника, вызванных колебаниями температуры и напряжения питания.

Поскольку приемник работает с достаточно ослабленным световым сигналом, он играет важную роль в оптической системе, которой приходится подстраиваться под него. Именно на стадиях детектирования и предварительного усиления сигнал наиболее слабый и искаженный. Поэтому можно сказать, что эти стадии являются центральными во всей линии связи. Выбор других частей линии согласовывается с типом приемника. Выбор схемы кодирования (по крайней мере частично) определяется требованиями, предъявляемыми со стороны приемника.

## Чувствительность приемника

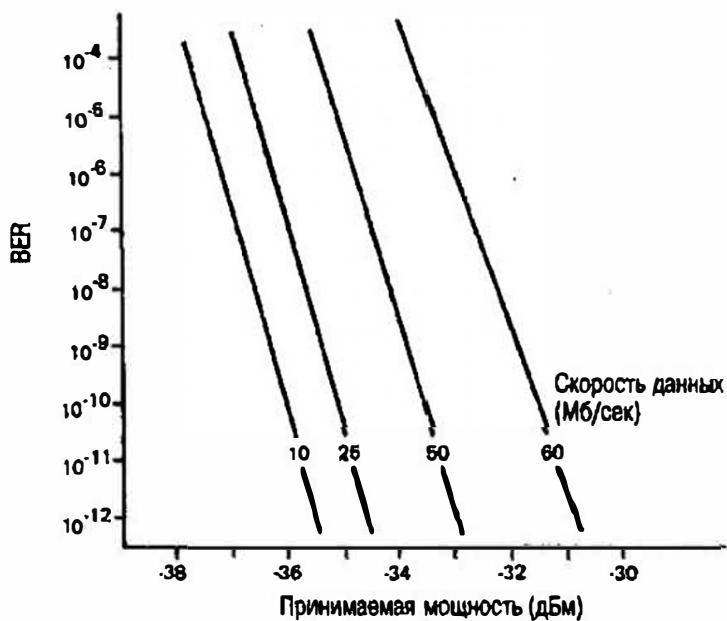
*Чувствительность приемника* определяется минимальным по мощности оптическим сигналом, который может быть обработан. Уровень данного сигнала определяется интенсивностью шумов на входе в приемник. В последней главе будет обсуждаться вопрос о пороге чувствительности детектора. Порог чувствительности приемника практически совпадает с характеристикой детектора, за исключением того, что на него влияют шумы усилителя. Кроме уровня шумов, порог чувствительности зависит также от SNR- или BER-характеристик системы.

Чувствительность выражается в микроваттах или в дБм. Значения чувствительности, равные 1 мкВт или -30 дБ, являются идентичными. Для приемника, выполненного как единое устройство, чувствительность может специфицироваться либо минимальным значением, определяемым уровнем шума, либо в зависимости от производительности, определяемой BER- уровнем.

## Динамический диапазон

*Динамический диапазон* — это разность между минимальным и максимальным уровнями допустимой мощности. Минимальный уровень мощности определяется порогом чувствительности и ограничивается детектором. Максимальный уровень определяется как детектором, так и усилителем. Уровень мощности, превосходящий максимальный, будет приводить к насыщению приемника и искажению сигнала. Принимаемая мощность должна находиться ниже указанной в спецификации максимальной мощности.

Если минимальный уровень оптической мощности приемника составляет -30 дБм, а максимальный равен -10 дБм, то динамический диапазон приемника равен 20 дБм. Такой приемник может работать в диапазоне от 1 до 100 мкВт.



**Рис. 10.5.** Зависимость между принимаемой мощностью, BER и скоростью поступления данных для типичного оптического приемника

На рис. 10.5 представлено соотношение между BER, скоростью данных и принимаемой мощностью для типичных приемников. Как и следовало ожидать, значение BER улучшается с ростом мощности. С другой стороны, требуемая мощность при заданном значении BER существенно увеличивается по мере увеличения скорости передачи данных. Значению BER  $10^{-4}$  соответствует оптическая мощность -35 дБм (310 нВт) при скорости данных 25 Мб/сек и -32 дБм (620 нВт) при скорости данных 60 Мб/сек. Принимаемая мощность должна быть равна 3 дБ или примерно на 50% больше для более высокого значения скорости данных.

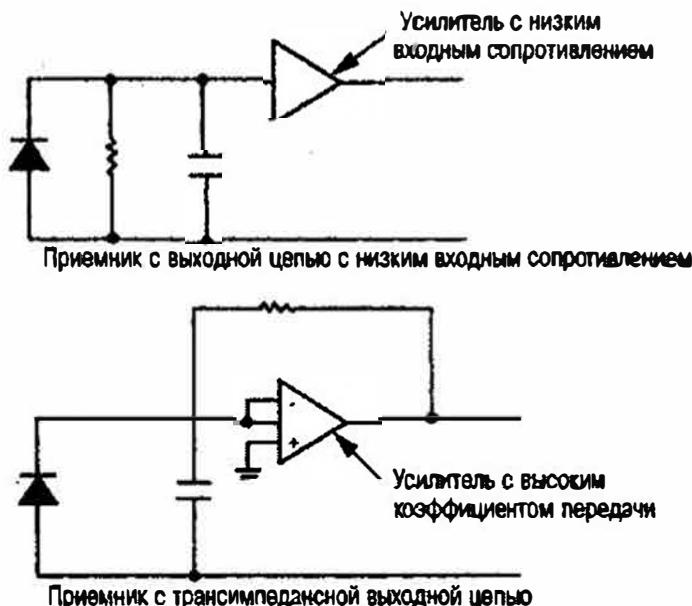
## Усилитель

В волоконно-оптических приемниках используется два вида усилителей: усилитель с малым входным сопротивлением и трансимпедансный усилитель. Примеры — на рис. 10.6.

Ширина полосы пропускания усилителя с малым входным сопротивлением определяется постоянной времени RC контура:

$$BW = \frac{1}{2\pi RC}$$

Данное уравнение совпадает с соответствующим уравнением для фотодиода. При обсуждении шумов и времени реакции фотодиода указывалось, что ширина частотной полосы и тепловой шум уменьшаются с ростом сопротив-



**Рис. 10.6.** Электрические схемы трансимпедансных цепей и цепей с низким входным сопротивлением

ления. Поэтому чувствительность приемника увеличивается с ростом сопротивления нагрузки, но за счет уменьшения ширины полосы пропускания. В результате усилитель с большим сопротивлением имеет более узкую полосу, но большую чувствительность.

Ширина полосы приемника с трансимпедансным усилителем зависит от коэффициента усиления:

$$BW = \frac{g}{2\pi RC}$$

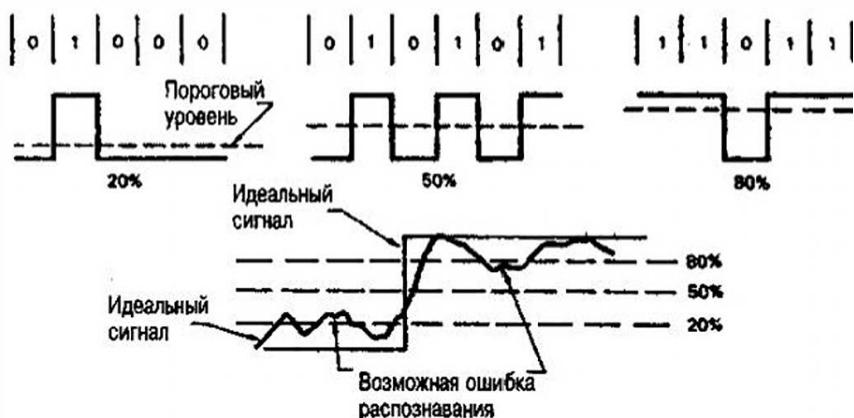
где  $g$  — коэффициент усиления без обратной связи. Для достижения ширины полосы пропускания, сравнимой с полосой усилителя с малым сопротивлением, трансимпедансный усилитель должен иметь гораздо более низкое значение входного сопротивления.

Наглядные значения чувствительности различных типов приемников, работающих при 100 Мб/сек и BER 10<sup>-6</sup>, составляют

- малое входное сопротивление -33 дБм
- большое входное сопротивление -40 дБм
- трансимпедансное (промежуточное) сопротивление -36 дБм

## Уровень мощности приемника

Некоторые приемники имеют конструктивные ограничения по параметрам уровня мощности, поэтому его приходится увязывать с кодами модуляции. Приемник различает высокие и низкие значения сигнала, сравнивая их



**Рис. 10.7.** Ошибки распознавания сигнала и уровень мощности в приемнике с ограничением на уровень мощности

с пороговым уровнем. Уровень сигнала выше порогового значения соответствует 1; а ниже — 0.

В приемнике с ограниченным уровнем мощности значение около 50% может быть интерпретировано неправильно. Более высокий уровень может восприниматься как более низкий, и наоборот. По мере отклонения мощности от 50% уровня возможность неправильной интерпретации значения сигнала определяется значением BER.

На рис. 10.7 продемонстрировано происхождение таких ошибок в приемнике со смещенным пороговым уровнем при обработке NRZ-кодированного сигнала. Приемник устанавливает пороговый уровень на основании получаемой средней оптической мощности. В верхней части рисунка — зависимость порогового уровня от уровня мощности сигнала. При равном соотношении в сигнале максимумов и минимумов (50% уровень мощности) пороговый уровень — в средней точке между минимальным и максимальным уровнями мощности. При этом разница между пороговым уровнем и минимальным значением такая же, как и между пороговым уровнем и максимальным значением.

При 20% уровне мощности, когда число минимумов заметно превосходит число максимумов, средняя принимаемая мощность существенно ниже. При этом пороговый уровень сдвигается в сторону минимального значения. В 80% уровне мощности средняя принимаемая мощность существенно выше и пороговый уровень сдвигается в сторону максимального значения. Эти сдвиги происходят в результате изменения среднего уровня принимаемой мощности.

Подобные сдвиги порогового уровня не вызвали бы никаких проблем в идеальном приемнике без собственных шумов. Но поскольку в действительности приемник генерирует шумы, уровень сигнала не только постоянно меняется, но и содержит шум. В нижней части рисунка представлено, как шум изменяет форму сигнала. Если уровень сигнала приближается к пороговому, то в результате ошибки, возникающей на передающей линии, он может быть неправильно интерпретирован. Уровень сигнала, соответствующего 0, при 20% уровне мощности может пересечь пороговый уровень и выглядеть как 1. Аналогично уровень сигнала, соответствующего 1, при 80% уровне мощности может расположиться ниже порогового уровня и интерпретироваться как 0. В обоих случаях возникает ошибка в передаче одного бита.

Избежать таких ошибок можно двумя способами. Первый заключается в поддержании уровня мощности вблизи 50% уровня. Код Манчестер и biphasе-M, по определению, всегда характеризуются 50% уровнем мощности и, таким образом, удовлетворяют указанному требованию. К недостаткам можно отнести то, что используется в два раза более широкая частотная полоса пропускания, чем требуется для передачи данных. Эти способы кодирования приводят к усложнению конструкции передатчика.

Второй способ исключения ошибок предполагает использование приемника, пороговый уровень которого не испытывает сдвигов в зависимости от уровня мощности сигнала. При этом пороговый уровень всегда находится посередине между максимальным и минимальным значениями мощности. Один из вариантов — использование приемника со связью по постоянному току (dc), специально сконструированного для работы с потоком произвольных данных. Такой приемник чувствителен к изменению фронтов сигнала, а не к изменениям его уровня.

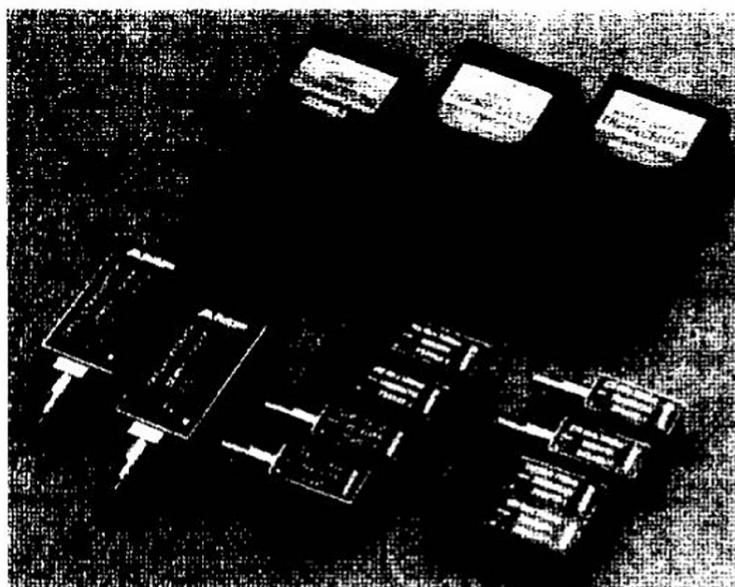
Возникает вопрос, почему dc-приемники, столь простые в изготовлении, не используются повсеместно? Ограничение заключается в чувствительности приемника, — он работает при более высоком (на 6–8 дБ) уровне оптической мощности. Расплатой за увеличение мощности являются более низкая скорость передачи данных, более короткая длина линии связи и снижение требований к допустимому уровню ошибок. Поэтому данное решение не является оптимальным в целом ряде приложений.

При использовании связи по переменному току (ac) в приемниках с ограниченным отношением максимальных уровней сигнала к минимальным, постоянный (dc) уровень сигнала устраняется. Остается только его переменная во времени часть. Удаление постоянной составляющей сигнала, как правило, осуществляется за счет включения в контур емкости. При этом емкость блокирует протекание постоянного тока, но допускает протекание переменного. Примером dc-связи могут служить приемники, представленные на рис. 10.6. В ac-связи на схеме между фотодетектором и усилителем необходимо установить конденсатор (емкость).

## Приемопередатчики и повторители

Приемопередатчики (трансиверы) и повторители (репитеры) являются важными компонентами во многих волоконно-оптических системах. Их устройство достаточно просто, и в данной главе только кратко комментируется. Приемопередатчик — устройство, объединяющее в одном корпусе передатчик и приемник и позволяющее одновременно передавать и принимать сигнал с любой станции. Повторитель — приемник, который управляемый передатчиком и используется для усиления сигнала в случае когда сигнал передается на большие расстояния и испытывает сильное затухание. Повторитель принимает сигнал, усиливает его, восстанавливает форму сигнала под управлением приемника и посыпает его далее по линии связи.

Одним из преимуществ цифровой передачи данных является использование повторителей, восстанавливающих первоначальную форму сигнала, а не только усиливающих его. Любые искажения импульсов, связанные с дисперсией или с другими причинами, при этом устраняются. Аналоговые каналы передачи используют повторители, не восстанавливающие форму сигнала, а только усиливающие его вместе с шумами. Трудность восстановления формы аналоговых



**Рис. 10.8.** Модули передатчиков и приемников (фотография предоставлена AMP Incorporated)

сигналов заключается в том, что она неизвестна, и повторитель ничего не знает о ней. Напротив, в цифровых сигналах форма импульсов известна.

## Комплектация передатчиков и приемников

Комплектация принимающих и передающих устройств является важным моментом для многих применений волоконно-оптических систем. Эти устройства могут быть выполнены в виде небольших модулей, устанавливаемых на плату, в виде самостоятельных плат, устанавливаемых в оборудование либо в виде независимых устройств. Выбор типа устройств зависит частично от сложности их конструкции, а также от предъявляемых к системе требований. На рис. 10.8 представлены примеры монтируемых на плату передатчиков и приемников.

## Спецификация приемников и передатчиков

Многие специфицируемые характеристики передающих и принимающих устройств связаны с электронными схемами, в которых используются эти устройства. Спецификации включают в себя питание напряжение, температурные режимы хранения и работы, требуемый уровень входного и выходного напряжений (что указывает на TTL- или ЕСЧЮВМЕСТИМОСТЬ), временные задержки, а также харак-

теристики, связанные с работой данных устройств в волоконно-оптической системе. Познакомимся с некоторыми из этих спецификаций.

### **Передатчик**

- Пиковая выходная мощность
- Скорость передачи/частотная полоса пропускания
- Рабочая длина волны
- Спектральная ширина источника
- Допустимые отношения максимальных и минимальных значений мощности сигнала
- Время нарастания и спада сигнала

### **Приемник**

- Скорость передачи/частотная полоса пропускания
- Чувствительность
- Динамический диапазон
- Рабочая длина волны
- Допустимые отношения максимальных и минимальных значений мощности сигнала

В таблице 10.1 представлена спецификация 125 Мб/сек волоконно- оптического приемопередатчика, соответствующего требованиям FDDI, описываемым в главе 15.

**Таблица 10.1. FDDI приемопередатчики**

<b>Передающая часть</b>					
<b>Параметр</b>	<b>Условия</b>	<b>Мин.</b>	<b>Норм.</b>	<b>Макс.</b>	<b>Ед. изм.</b>
Скорость передачи данных (NRZ)		0		125	Мб/сек
Оптическая выходная мощность	62.5/125, 0.275 NA волокно	-19		-4	дБм
Центральная длина волны		1270	1330	1380	нм
Спектральная ширина FWHM			140		нм
Уровень мощности	Скорость передачи данных = 0-125 Мб/сек	0		100	%
Время нарастания сигнала на выходе	10-90%	0.6	2	3	нс

**Таблица 10.1. FDDI приемопередатчики (продолжение)**

Передающая часть					
Параметр	Условия	Мин.	Норм.	Макс.	Ед. изм.
Время спада сигнала на выходе	10-90%	0.6	2	3	нс
Напряжение питания		4.5	5.0	5.72	В
Потребляемый ток				150	мА
Рабочая температура		0	25	70	°С
Принимающая часть					
Скорость передачи данных		10	125	Мб/сек	
Чувствительность	62.5/125, 0.275 НА волокно Скорость данных = 125 Мбит/сек, BER = $2.5 \times 10^{-10}$	-33		-14	дБм
Длина волны		1270		1390	нм
Уровень мощности		30	50	70	%
Время нарастания сигнала на выходе	20-80%	0.5		3	нс
Время спада сигнала на выходе	20-80%	0.5		3	нс
Напряжение питания		4.5	5	5.5	В
Потребляемый ток				150	мА
Рабочая температура		0	25	70	°С

## Заключение

- Передатчик включает в себя источник и цепи управления.
- Приемник включает в себя детектор, цепи усиления и внешние цепи.
- Коды модуляции — формат, в соответствии с которым цифровые биты переводятся в форму, пригодную для передачи.
- Для отдельных кодов модуляции скорость передачи данных и фактическая скорость передачи сигнала совпадают, для других они отличаются.
- Некоторые коды имеют встроенную синхронизацию.
- Уровень преобразуемой мощности отражает отношение между максимальным и минимальным значениями сигнала.

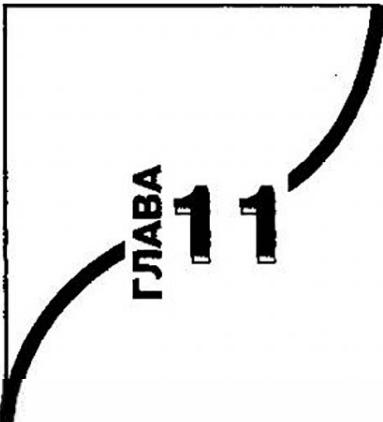
- Чувствительность приемника определяет минимально различимый уровень оптической мощности.
- Динамический диапазон — это разность между максимальным и минимальным значениями оптической мощности, допустимыми для нормальной работы приемника.

### Контрольные вопросы



1. Нарисуйте блок-схему простого передатчика.
2. С использованием кода Манчестер информационный сигнал передается со скоростью 200 Мб/сек. Какова его скорость в бодах?
3. Назовите два примера кодов модуляции, использующих встроенную синхронизацию.
4. Нарисуйте NRZ-образ последовательности бит 1111001. Обратите внимание на изображение каждого периода бита.
5. В какой из видов волокон передающее устройство вкладывает большую мощности — в 50/125 мкм или 85/125 мкм? Почему?
6. Приемник характеризуется чувствительностью -30 дБм и максимально допустимой мощностью -10 дБм. Каков его динамический диапазон?
7. Назовите два наиболее распространенных типа принимающих цепей.
8. Нарисуйте блок-схему повторителя.
9. Если приемник имеет чувствительность -28 дБм, то какую минимальную оптическую мощность он может принять?

# *Разъемные и неразъемные соединители*



Соединение различных частей волоконно-оптической системы крайне важно для ее работы. Разъемные и неразъемные соединители позволяют передавать свет от одной компоненты системы к другой с минимально возможными потерями оптической мощности. На протяжении линии волокно может соединяться с источниками, детекторами или другими волокнами. В данной главе речь пойдет об основных принципах волоконно-оптических соединений и о видах применяемых для этого разъемных и неразъемных соединителей. Для упрощения изложения остановимся на примере соединения одного волокна с другим.

*Разъемный соединитель (разъем, коллектор)* — устройство, служащее для подключения волокна к источнику, детектору или к другому волокну. В его конструкции заложена возможность многократного подключения и отключения волокна. *Неразъемный соединитель (сплайс, "заплатка")* — устройство, предназначеннное для постоянного соединения одного волокна с другим. Некоторые производители предлагают многоразовые сплайсы, позволяющие разрывать соединение или переконфигурировать волоконную цепь.

Требования к волоконному соединению существенно отличаются от аналогичных требований к соединению медных кабелей. Два медных проводника могут быть соединены путем непосредственной пайки либо при установке соединителей на их концы, опять же с использованием пайки или обжима. При соединении необходимо достигать плотного контакта между проводниками, чтобы соединение имело по возможности минимальное сопротивление. При этом соединители должны быть просты по конструкции и при установке, надежны и обеспечивать малые потери.

Ключевым моментом волоконно-оптического соединения является точное размещение волоконных ядер (или несущих свет областей в одномодовом волокне) для обеспечения максимально полной передачи света от одного

волокна к другому. При этом необязателен непосредственный контакт между волокнами. Условие точного размещения тонких волокон (одно относительно другого) ставит перед производителями соединителей сложную задачу.

## Роль соединителей

Соединители нужны по многим очевидным причинам, по большей части совпадающим с аналогичными потребностями в металлических проводниках. Рассмотрим их кратко. В длинной линии, поскольку производители волокон поставляют кабели ограниченной длины — обычно от 1 до 6 км, концы волокон необходимо спlicingивать при помощи неразъемных соединителей. При длине кабеля 6 км для прокладки линии в 30 км требуется пять таких соединителей (не считая разъемов для подключения кабеля к передающему и принимающему устройствам). На практике, когда возникает необходимость протянуть кабель через закрытый канал, не удается использовать даже 6-км кабель, в то время как кабель меньшей длины облегчает процесс прокладки.

Соединители требуются при вводе кабеля внутрь здания, в кабельных каналах, в проходных соединениях и в других промежуточных точках между передающим и принимающим устройствами. Они позволяют, например, осуществить переход от магистрального кабеля к внутреннему кабелю, переконфигурацию контура и перераспределение оптической энергии одного волокна на несколько других волокон.

И, наконец, волокно необходимо соединить с источником в передающем устройстве и с детектором в принимающем.

Разделение волоконно-оптической системы на несколько подсистем, соединенных вместе с помощью соединителей, упрощает выбор системы, ее установку и эксплуатацию. Совместно использоваться могут соединители различных производителей. Они могут устанавливаться разными специалистами. Например, специалисты, участвующие в строительстве здания, прокладывают волоконно-оптическую систему внутри здания, специалисты по компьютерным сетям устанавливают активное оборудование в виде передатчиков и приемников и, наконец, телефонная компания прокладывает внутри здания волоконно-оптические телефонные линии. Все эти различные части оптической системы затем соединяются вместе с помощью соединителей. Эксплуатация системы упрощается, если вышедшие из рабочего состояния или устаревшие элементы системы легко отключить и заменить новыми. Более современные и быстродействующие передающие и принимающие устройства могут устанавливаться без каких-либо изменений в волоконном контуре.

## Требования к соединителям

Ниже приводится перечень требований к волоконно-оптическим соединителям:

- *Низкие потери:* установка соединителей должна приводить к небольшим потерям оптической мощности на соединении.

- *Простота установки:* соединители должны легко и быстро устанавливаться, не требуя дорогостоящего оборудования или длительного обучения персонала.
- *Надежность:* разъем должен гарантировать многократное подключение и отключения без каких-либо изменений уровня потерь.
- *Регламентируемость характеристик:* потери должны быть регламентированы вне зависимости от времени установки соединителя.
- *Экономичность:* цена соединителей и оборудования для их установки должна быть невысокой.

Изготовить соединитель, удовлетворяющий всем перечисленным требованиям, достаточно сложно. Соединитель с малым затуханием может быть дороже соединителя с более существенным затуханием или он может потребовать более дорогого оборудования для установки. Желательны минимальные потери, но другие моменты также играют важную роль при выборе типа соединителя.

Требования к потерям на соединителе следующие:

- 0.2 дБ и менее для телекоммуникационных систем или для дальних линий связи.
- 0.3-1 дБ для соединителей, используемых в контуре внутри здания: для локальных сетей или линий управления производством.
- 1-3 дБ для соединителей в системах, где такого рода потери приемлемы и основным соображением выступает низкая стоимость. В таких системах, как правило, используется пластиковое волокно.

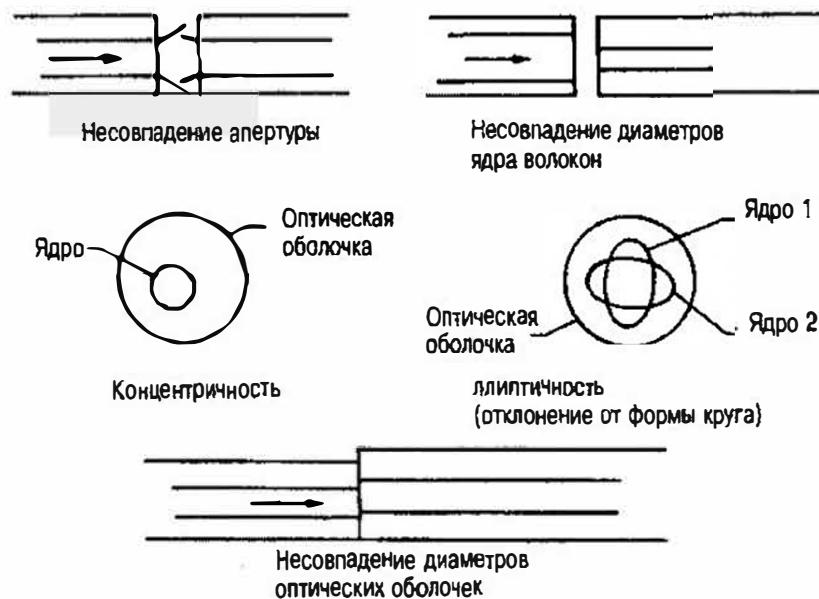
## Причины возникновения потерь в соединении

Существует три причины возникновения потерь в волоконно-оптическом соединении:

1. Внутренняя, или связанная с нестабильностью параметров самого волокна.
2. Внешняя, связанная непосредственно с соединителем.
3. Системный фактор, отражающий параметры системы в целом.

## Внутренние причины

Рассматривая соединение одного волокна с другим, исходят из того, что оба волокна являются идентичными. Однако обычно это не так. Производство волокон оставляет некоторые допуски на воспроизводимость их параметров, варьирующихся в установленных пределах вблизи специфицированных значений. На рис. 11.1 схематически представлены вариации параметров воло-



**Рис. 11.1.** Внутренние причины потерь в соединении

кон, наиболее важных с точки зрения их влияния на потери. Настоящий параграф посвящен более детальному изложению данного вопроса.

Потери, связанные с рассогласованием апертуры (NA), происходят, если NA передающего волокна больше апертуры принимающего. Потери, связанные с рассогласованием диаметров ядер, возникают, когда диаметр ядра передающего волокна больше диаметра принимающего волокна. Возникают также потери, связанные с несовпадением размеров оптических оболочек, при этом оси волокон децентрируются.

Возможным источником потерь является также *концентричность размещения* волоконного ядра внутри оптической оболочки. В идеале оси ядра и оптической оболочки должны совпадать. Рассогласование, связанное с концентричностью, определяется расстоянием между центрами ядра и оптической оболочки.

*Эллиптичность* (отклонение от формы идеального круга) формы ядра и оптической оболочки также является источником потерь. Взаимное расположение двух ядер эллиптической формы зависит от взаимного размещения двух волокон. При одном соединении большие оси эллипсов могут быть перпендикулярными, тогда потери максимальны. В другом случае оси эллипсов могут повернуться и совпасть, тогда потери будут отсутствовать. Допустимые значения эллиптичности ядра и оптической оболочки равны отношению минимального значения диаметра к максимальному.

Данные вариации параметров существуют в каждом волокне, несмотря на технологический контроль, позволяющий избегать недопустимых отклонений этих параметров. За последние несколько лет технология изготовления была существенно улучшена, и диапазоны варьирования параметров волокна существенно сузились. Например, 125-мкм волокно ранее имело допустимое

отклонение диаметра оптической оболочки  $\pm 5$  мкм, так что реальный диаметр волокна менялся от 120 до 130 мкм. Соединение двух таких волокон при максимальном рассогласовании приводит к потерям в 0.6 дБ. В настоящее время нормальным допуском является  $\pm 2$  мкм, приводящий к отклонению размера от 123 до 127 мкм и к максимальным потерям в 0.28 дБ. Допустимое отклонение в  $\pm 0.1$  мкм уменьшает возможные потери до 0.1 дБ.

Указанные потери являются максимально возможными и могут не возникать в большинстве случаев, поскольку вероятность соединения двух волокон с максимальным рассогласованием достаточно мала.

В таблице 11.1 представлены типичные допустимые вариации параметров современных волокон.

**Таблица 11.1.**  
**Типичные допуски, влияющие на внутренние потери**

Параметр	Допуск
Диаметр ядра (62.5 мкм)	$\pm 3$ мкм
Диаметр оптической оболочки (125 мкм)	$\pm 2$ мкм
Апертура (0.275)	$\pm 0.015$
Концентричность	$\leq 3$ мкм
Эллиптичность ядра	$\geq 0.98$
Эллиптичность оптической оболочки	$\geq 0.98$

## Внешние факторы

Сами соединители также привносят определенные потери в соединение. Если центральные оси двух волокон недостаточно точно совмещены, потери возникают даже при отсутствии вариаций характеристик волокон. Потери возникают из-за того, что в настоящее время невозможно производить оборудование, соответствующее всем перечисленным выше требованиям. Существует большое количество различных механизмов для соединения двух волокон.

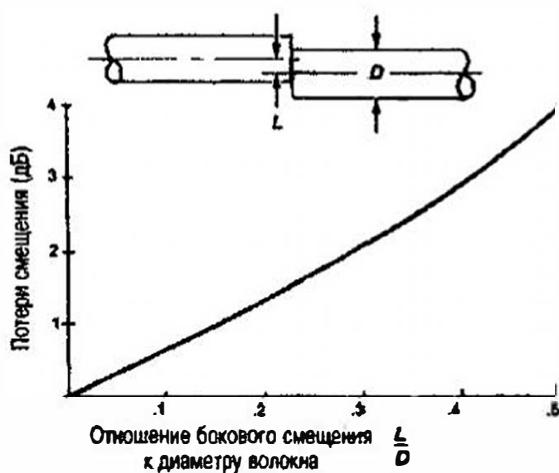
Назовем четыре основные причины возникновения потерь в соединителе, которые необходимо контролировать:

1. Боковое смещение
2. Зазор между сколами
3. Угловое рассогласование ориентации осей
4. Гладкость поверхности скола

Следующее обсуждение предполагает идеальные волокна без допустимых вариаций параметров. Приведенные кривые являются типичными для многомодовых волокон. Как будет показано ниже в этой главе, модовые условия также влияют на затухание, связанное с соединением.

## Боковое смещение

Волокно в соединителе должно размещаться вдоль его центральной оси. Если центральная ось одного волокна не совпадает с центральной осью другого, то неизбежно возникновение потерь. На графике рис. 11.2 представлена зависимость этих потерь от отношения абсолютной величины смещения к диаметру волокна. Видно, что допустимое рассогласование становится меньше при уменьшении размера волокна. Относительное смещение в 10% приводит к потерям на уровне 0.5 дБ. Для волокна с диаметром ядра 50 мкм относительное смещение в 10% означает реальное смещение на уровне в 5 мкм, что, в свою очередь, соответствует смещению в каждом соединителе на 2.5 мкм.

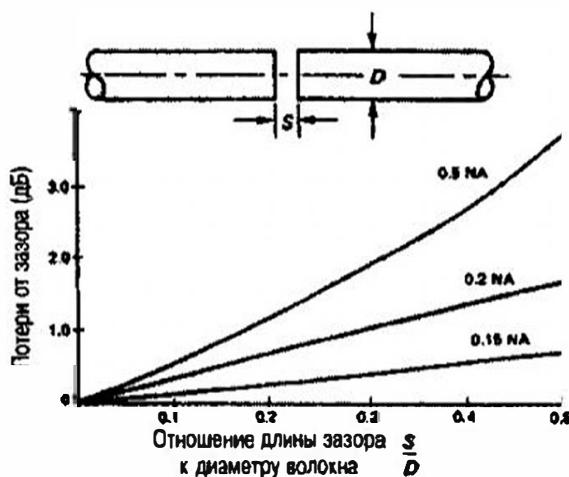


**Рис. 11.2.** Потери от бокового смещения волокон (рисунок предоставлен AMP Incorporated)

Эти величины будут удвоены для волокна со 100-мкм ядром: смещение в 10% соответствует 10-мкм общему рассогласованию и 5-мкм смещению в каждом соединителе. Очевидно, что контроль бокового смещения особенно затруднен в волокнах малого диаметра. Производители соединителей стремятся ограничить смещение до уровня менее 5% от диаметра ядра.

## Зазор между сколами

Соединение двух волокон, разделенных небольшим зазором, подвержено двум видам потерь, представленным на рис. 11.3. Первый — это *френелевское отражение*, связанное с разницей показателей преломления волокон и среды в зазоре (обычно воздуха). Френелевское отражение происходит как на выходе из первого волокна, так и на входе во второе волокно. В стеклянных волокнах, разделенных воздушным зазором, потери от френелевского отражения составляют около 0.34 дБ. Френелевские потери могут быть существенно снижены при использовании в зазоре жидкости с согласованным



**Рис. 11.3.** Потери от зазора между сколами (рисунок предоставлен AMP Incorporated)

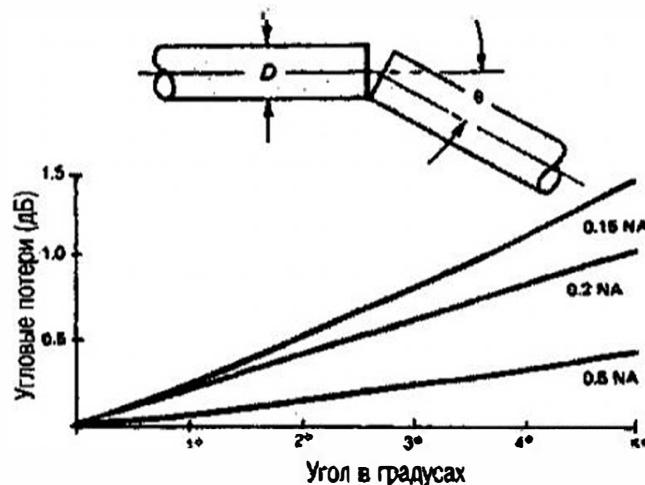
показателем преломления. Такая жидкость представляет собой либо оптически прозрачную среду, либо гель, имеющий показатель преломления, близкий к показателю преломления стекла.

Второй вид потерь в многомодовых волокнах связан с потерей мод высокого порядка при прохождении светом зазора и на входе в ядро второго волокна. Свет, выходящий из первого волокна, распространяется в некотором конусе. Величина потерь, связанных с этим эффектом, зависит от величины NA волокон. Волокно с большим значением NA не допускает столь большого зазора между волокнами при том же уровне потерь, что и волокно с меньшим значением NA.

В идеале для уменьшения потерь волокна следует соединять вплотную. В большинстве неразъемных соединителей волокна действительно устанавливаются вплотную. В разъемах иногда нужен небольшой зазор для предотвращения появления царапин на сколе при подключении. Волокна, прижатые друг к другу с большим усилием при подключении соединителя, могут даже потрескаться. Поэтому некоторые соединители сконструированы таким образом, чтобы обеспечивать небольшой зазор между волокнами, в других используется фиксированное прижимающее давление для мягкого контакта волокон, исключающего появление повреждений. Физический контакт волокон часто необходим для регулирования обратных отражений, которые обсуждаются ниже в этой главе.

## Угловое рассогласование ориентации осей

Сколы обработанных волокон должны быть перпендикулярны осям волокон и параллельны друг другу при соединении. Потери, представленные на рис. 11.4, связаны с угловым рассогласованием ориентации волокон относительно друг друга. Снова, как и ранее, уровень потерь определяется NA волокон. Отметим, что влияние NA в данном случае противоположно эффекту



**Рис. 11.4.** Потери от углового рассогласования ориентации осей (рисунок предоставлен AMP Incorporated)

наличия зазора между волокнами. Здесь большее значение NA допускает большее угловое рассогласование для ограничения потерь на том же уровне, что и в случае меньшего значения апертуры.

При правильном использовании соединителя угловое рассогласование ориентации практически исключается, так что связанные с этим эффектом потери существенно меньше потерь, связанных с боковым смешением. Дело в том, что при скальвании волокна и полировке стекла контролируется перпендикулярность поверхности по отношению к оси волокна.

## Гладкость поверхности скола

Поверхность скола должна быть гладкой и не содержать дефекты типа трещин, выбоин и заусениц. Неровная поверхность разрушает геометрическую картину световых лучей и рассеивает их, что затрудняет ввод лучей во второе волокно.

## Факторы, связанные с системой

Потери, возникающие в соединении, могут быть связаны не только с волокном или соединителем, но также непосредственно с системой. В главе 6 обсуждалась зависимость модовых условий в волокне от длины волны, а также достижение равновесного модового распределения (EMD). Первоначально волокно может быть переполнено или полностью насыщено, при этом свет переносится также в модах оптической оболочки и в модах высокого порядка. С расстоянием эти моды будут покидать систему. При достижении EMD волокно со сглаженным профилем показателя преломления будет иметь меньшее значение NA и меньшую активную площадь ядра, используемую для переноса света.

Рассмотрим соединитель, подключенный к источнику. Волокно на передающей стороне соединителя может быть переполнено. Большая часть света, находящегося в модах оптической оболочки и модах высокого порядка, не будет попадать во второе волокно, хотя и присутствует в соединении. В условиях EMD свет в таких модах отсутствует, поэтому энергия заключенного в них света не будет теряться в соединении.

Теперь рассмотрим принимающую часть волокна. Некоторая порция света после прохождения соединения волокон будет оказываться в модах оптической оболочки и в модах высокого порядка принимающего волокна. Если измерить принимаемую оптическую мощность на небольшом расстоянии от соединения, то эти моды еще будут присутствовать в общем потоке. На некотором расстоянии от соединения они теряются, так что их присутствие является временным.

Аналогичные эффекты будут наблюдаться, когда точка соединения находится далеко от источника и в ней уже достигнуто состояние EMD. Поскольку активная площадь волокна со сглаженным профилем уже уменьшена, боковое смещение не оказывает существенного влияния, особенно когда принимающее волокно имеет ограниченную длину. Свет снова будет переноситься в модах высокого порядка и в модах оптической оболочки. Данные моды будут теряться в протяженном принимающем волокне.

Итак, передаточная характеристика соединителя зависит от модовых условий и положения соединителя в системе (состояние отдельной моды изменяется вдоль волокна). Проводя оценку затухания волоконно-оптического соединителя, надо принимать во внимание условия по обе стороны соединения. Существует четыре различных условия:

1. Короткий передающий сегмент, короткий принимающий
2. Короткий передающий сегмент, длинный принимающий
3. Длинный передающий сегмент, короткий принимающий
4. Оба сегмента длинные

При заданных постоянных параметрах передаточная характеристика соединителя зависит от условий испускания и приема света. Например, в серии измерений, проведенных с одним соединителем при большой длине передающей части волокна, потери составляли 0.4-0.5 дБ при небольшой длине 1.3-1.4 дБ. Таким образом, разница в 1 дБ может возникать из-за различия в условиях приема света.

## Потери включения

Измерение потерь включения является методом оценки качества соединителя. Сначала измеряется мощность, передаваемая вдоль волокна. Затем волокно перерезается в центре, и устанавливается соединитель. Опять измеряется мощность на конце волокна. Потери включения составляют

$$\text{loss}_{IL} = 10 \log_{10} \left( \frac{P_1}{P_2} \right)$$

где  $P_2$  — первоначальное измерение мощности,  $P_1$  — измерение мощности после включения соединителя.

Этот метод измерения минимизирует влияние варьирования параметров волокна на потери. При соединении разрезанного волокна используются практически одинаковые его половины. При этом присутствуют только потери на нецентричность и эллиптичность. Влияние NA и вариации диаметра несущественны. Цель подобного метода измерения качества соединителя — исключение влияния вариаций параметров волокна.

Остается влияние на измерение условий испускания и приема света. Такие условия должны быть известны при сравнении специфицированных параметров различных соединителей. Разница между этими данными может быть связана с разницей в условиях измерения. Кроме того, нужно учитывать условия использования соединителя. Лучшая оценка получается, если условия эксперимента идентичны эксплуатационным условиям.

## Дополнительные потери в соединении

Обсуждение вопроса о внутренних потерях, связанных с волокном, основаны на допущении, что передающее волокно имеет меньшие диаметр и апертуру, чем принимающее волокно. Предполагается, что соединяются два волокна одинакового типа, отличающиеся только допусками параметров. Эти параметры оказывают влияние на качество подключения соединителя, но, как правило, не учитываются в общем балансе потерь. Если, однако, происходит соединение двух различных волокон, рассогласование размеров диаметров и апертуры (NA) может оказывать существенное влияние и должно быть учтено.

Когда NA передающего волокна больше апертуры принимающего, то NA-потери равны

$$\text{loss}_{\text{NA}} = 10 \log_{10} \left( \frac{\text{NA}_r}{\text{NA}_t} \right)^2$$

Аналогично когда диаметр передающего волокна больше диаметра принимающего, потери, связанные с этим эффектом, равны

$$\text{loss}_{\text{dia}} = 10 \log_{10} \left( \frac{\text{dia}_r}{\text{dia}_t} \right)^2$$

Предположим, что передающее волокно имеет диаметр ядра 62.5 мкм и NA=0.275, а принимающее волокно имеет диаметр 50 мкм и NA=0.2. Подобное соединение может встречаться в локальных сетях. Потери, связанные с NA-рассогласованием, равны

$$\begin{aligned} \text{loss}_{\text{NA}} &= 10 \log_{10} \left( \frac{\text{NA}_r}{\text{NA}_t} \right)^2 \\ &= 10 \log_{10} \left( \frac{0.20}{0.275} \right)^2 \\ &= -2.8 \text{dB} \end{aligned}$$

Потери, связанные с несовпадением диаметров, равны

$$\begin{aligned}
 \text{loss}_{\text{dia}} &= 10 \log_{10} \left( \frac{\text{dia}_r}{\text{dia}_t} \right)^2 \\
 &= 10 \log_{10} \left( \frac{50}{62.5} \right)^2 \\
 &= -2.9 \text{дБ}
 \end{aligned}$$

Общие потери равны 5.7 дБ.

## Потери в одномодовых волокнах

Соединители для одномодовых волокон также должны обеспечивать высокое качество соединения. Часто случается, что допустимые относительные рассогласования одномодовых соединений больше своих многомодовых аналогов. Однако из-за меньшего размера ядра одномодового волокна абсолютные допускаемые рассогласования параметров являются столь же, если не более, критичными, чем в многомодовом волокне. Например, зазор в десяток диаметров ядра приводит в одномодовом волокне к затуханию в 0.4 дБ.

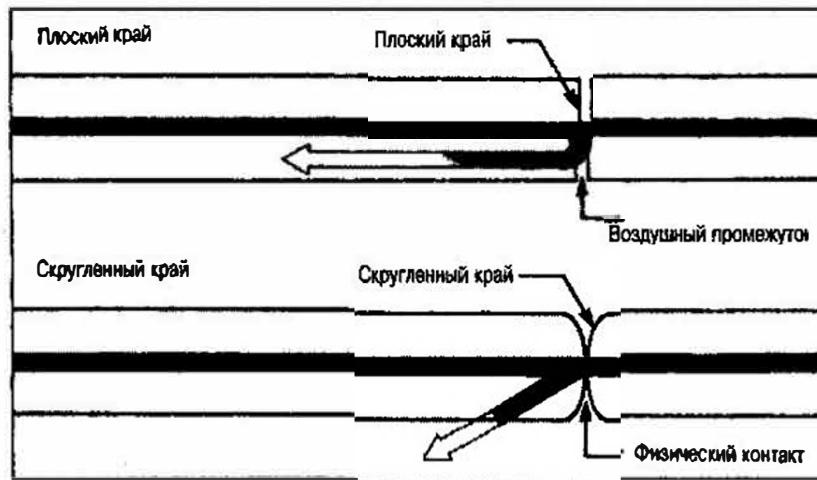
Рассогласования в размере светодового поля (размере пятна) более существенны из-за внутренних потерь, присущих волокну. Большинство производителей допускают отклонения в 10% для размера пятна, что приводит к возрастанию затухания до 0.1 дБ в 99% соединений волокон одного и того же производителя. Поскольку размеры светодового поля у волокон разных производителей отличаются, то потери при соединении таких волокон могут быть еще большие.

## Потери, связанные с обратным отражением

Ранее уже говорилось, что при разделении двух волокон воздушным зазором оптическая энергия может отражаться назад к источнику. Эта энергия называется *обратным отражением, или возвратными потерями*. Слово потеря указывает на то, что энергия теряется при соединении волокон. Она представляет собой ту часть потерянной энергии, которая отражается от соединения и меняет направление распространения на обратное. На рис. 11.5 схематически представлен эффект возвратных потерь.

В одномодовом соединении с плоскими полированными контактами потери могут составлять -11 дБ, при этом отраженная мощность на 11 дБ меньше падающей мощности. Если 500 мкВт энергии достигает конца волокна, то около 40 мкВт отражается назад к источнику. Этого уровня мощности достаточно, чтобы интерференция встречных излучений заметно влияла на работу лазерного диода. В одномодовых системах особенно важно минимизировать возвратные потери для снижения влияния интерференции на работу источника.

Улучшение контакта между волокнами или удаление воздуха из зазора может уменьшить возвратные потери до уровня -30 дБ, что соответствует при 500 мкВт падающей мощности только 0.5 мкВт отраженной мощности. Один из способов достижения таких показателей — закругление концов во



**Рис. 11.5.** Возвратные потери и скругления краев (рисунок предоставлен AMP Incorporated)

локон при полировке. Уменьшение отражения при соединении двух закругленных волокон происходит по двум причинам. Во-первых, соединяемые волокна в этом случае контактируют более плотно, что уменьшает отражение, обусловленное разностью показателей преломления воздуха и волокна. Остается только зеркальное отражение, связанное с вариациями оптических свойств волокон. Во-вторых, при скруглении концов волокон отсутствует обратное отражение к источнику. Отражение обычно происходит в сторону, при этом отраженное излучение покидает волокно.

Плоские прижатые концы волокон не используются, потому что получить идеально плоские и идеально параллельные концы очень трудно. Более вероятно, что поверхность скола одного из волокон или обоих волокон сразу будет иметь некоторый наклон по отношению к противоположному сколу, препятствующий плотному контакту между волокнами. При скругленных полированных сколах волокна всегда соприкасаются выступающими частями поверхностей сколов в месте светонесущих ядер.

Скругляющая полировка сколов может найти применение и в многомодовых системах. Например, в некоторых локальных сетях система должна обеспечивать отсутствие передачи сигнала (молчание) между пакетами информации. Молчание указывает на отсутствие передачи информации по каналу и открывает возможность для передачи станцией следующего пакета. При достаточно сильном отраженном сигнале в сети ситуация может быть интерпретирована как невозможность передачи следующего пакета, и рабочая станция будет прервана.

Другой подход к уменьшению возвратных потерь — полировка скола волокна под некоторым углом, что также приводит к отражению света в оптическую оболочку и удалению его из волокна.

Было разработано несколько вариантов такой полировки, соответствующих различным уровням допустимых возвратных потерь:

Нормальная полировка:  $> 30$  дБ

Суперполировка: > 40 дБ

Ультраполировка: > 50 дБ

## Оконцовка волокна

Длястыковки частей волокна каждая часть должна быть окончирована соединителем. В большинстве случаев неразъемный соединитель является более простым устройством, чем разъемный соединитель (разъем). Одноразовый (неразъемный) соединитель состоит всего лишь из нескольких частей, сварочный — в простейшем варианте вообще не имеет дополнительных компонент. Волоконно-оптический соединитель должен выполнять несколько функций:

- Закреплять волокно вдоль оптической оси
- Предохранять волокно
- Связывать волокно с кабелем. Под этим подразумевается, что кабель, обычно имеющий силовые элементы, также предохраняет волокно от прилагаемого натяжения.

На рис. 11.6 показано сечение двух частей оконченного соединителя. Его части связываются друг с другом соединительным патроном, — высверленным с высокой точностью отверстием, имеющим внешнее устройство для быстрого закрепления частей устройства. Высверленная часть бывает либо чисто металлической, либо содержит пластиковую вставку, обеспечивающую эластичное уплотнение соединителя.



**Рис. 11.6.** Соединитель (рисунок предоставлен AMP Incorporated)

## Наконечники

В большинстве соединителей для поддерживания волокна вдоль оптической оси используются специальные наконечники. В каком-то смысле многие соединители отличаются только корпусами, включающими в себя наконечники.

Керамические наконечники позволяют достичь лучшего качества и наиболее предпочтительны для одномодовых волокон. Керамика является прочным материалом, позволяющим высверливать отверстие под волокно с высокой точностью. Кроме того, она имеет прекрасные температурные и механические свойства, которые практически остаются прежними при изменении температурных и других внешних условий.

Пластиковые наконечники снижают стоимость соединителя, но обеспечивают менее качественное соединение. Наконечники из нержавеющей стали имеют промежуточные характеристики. Их популярность объясняется прочностью и меньшей хрупкостью по сравнению с керамикой.

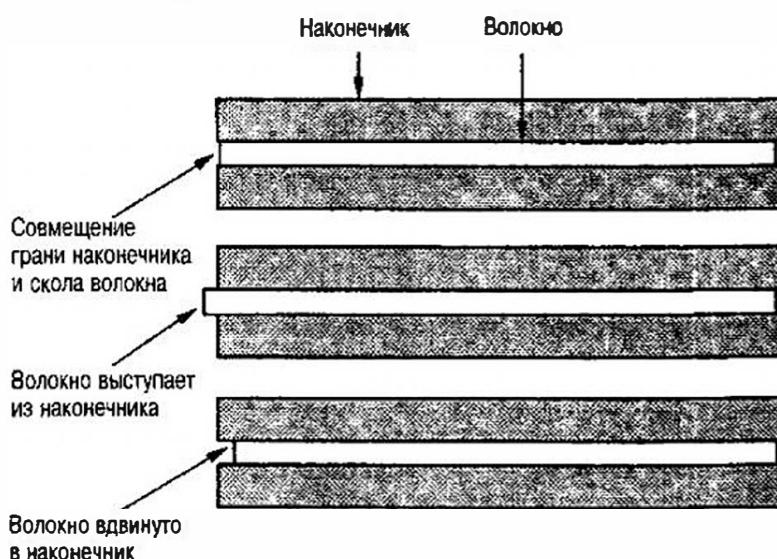
Для наконечников используется два вида керамики: окись алюминия и окись циркония. Первоначально применяли окись алюминия — твердый, неэластичный материал, позволяющий производителям очень точно выдерживать допуски. Коэффициент теплового расширения окиси алюминия — степень увеличения или уменьшения линейных размеров образца при изменении температуры — очень близок аналогичному коэффициенту для стекла. Недостатком данного материала является его хрупкость и разрушение при незначительных давлениях. Кроме того, полировка окиси алюминия достаточно сложна, особенно в полевых условиях.

Окись циркония — более мягкий вид керамики и более устойчивый по отношению к механическим ударам. Он к тому же достаточно прочен и позволяет выдерживать допуски подобно окиси алюминия, но, в отличие от нее, легче полируется.

Наиболее популярный размер наконечника равен 2.5 мм в диаметре, что фактически стало стандартом.

### Эпоксидный клей и полировка

Популярным методом закрепления волокна в соединителе является эпоксидная технология. Эпоксидный клей после приготовления имеет достаточно ограниченное время использования, но несмотря на этот недостаток, его применение является необходимым при оконцовке волокна. Эпоксидная смола обеспечивает надежное закрепление волокна в корпусе соединителя и позволяет избежать эффекта выдвигания/вдвигания (рис. 11.7) волокна



**Рис. 11.7.** Размещение волокна в наконечнике

относительно наконечника. Одна из причин этого — изменение температуры, при котором волокно может расширяться или сжиматься. Если волокно начинает выступать из наконечника, то возникает опасность его повреждения. Напротив, заглубление волокна внутрь наконечника приводит к образованию воздушного зазора внутри соединения. После застывания эпоксидной смолы волокно вместе с наконечником полируется для обеспечения гладкости среза соединителя.

## Бесклеевая технология оконцовки

Не так давно были разработаны бесклееевые соединители. На рис. 11.8 корпус соединителя имеет дополнительный наконечник, позволяющий закрепить волокно как на конце, так и на основании соединителя. Такие обжатые волокна обеспечивают стабильность закрепления и устойчивость по отношению к растягивающим напряжениям, подобную kleевому закреплению. После обжатия соединителя наконечник охватывает волокно в двух местах (спереди и сзади).

При фронтальном обжатии отсутствует эффект выдвигаания/вдвигания, однако при более сильном обжатии не исключена возможность повреждения волокна. Поэтому для надежного закрепления волокна в соединителе применяется обжатие волокна в кабельной трубке с буфером у основания соединителя, где можно применить достаточно сильное усилие. Ни одно из обжатий само по себе не обеспечивает надежного закрепления волокна в соединителе. В частности, обжатие кабельной трубы не позволяет избежать эффекта выдвигаания/вдвигания волокна на срезе соединителя. Только оба обжатия полностью закрепляют волокна в соединителе.

Качество бесклееевой технологии практически не уступает kleевой. Основным преимуществом бесклееевой технологии является быстрота сборки. В некоторых случаях выгоднее использовать более дорогую бесклееевую технологию, поскольку время — это деньги. В новом большом здании при прокладке волоконной сети приходится осуществлять тысячи оконцовок. Поэтому скорость установки может оказаться важнее, чем достижение сверхнизкого затухания, не требующегося для планируемого применения.

Отметим, что бесклееовая технология не ограничивается использованием только одного вида соединителей.

## Совместимость

Стандартизация, являясь растущей тенденцией в электронике, подразумевает, что все оборудование, от соединителя и до компьютера, соответствует специфицированным требованиям, и различные компоненты, оговоренные в стандарте, могут быть взаимозаменяемыми. Несмотря на то, что некоторые стандарты являются стандартами "де-факто", они достаточно популярны, хотя и не утверждены чисто формальными документами. Многие такие стандарты созданы промышленными ассоциациями типа Американской электронной промышленности (EIA), Институтом инженеров по электротехнике и электронике (IEEE), либо Американским национальным институтом стандартов (ANSI).

Совместимость в соединителях означает, что различные соединители должны стыковаться между собой и соответствовать спецификации. Например,



**Рис. 11.8.** Бесклеевой соединитель. Показаны составляющие элементы и ручная оснастка для обжатия волокна (фотография предоставлена AMP Incorporated).

ранее большие телекоммуникационные компании разрабатывали специальные соединители для использования со своим собственным оборудованием. Во многих последующих применениях потребовались соединители, совместимые с уже установленными. В этом случае приходит на помощь спецификация используемого типа соединителя. Например, MIL-C-83522 описывает SMA-тип соединителя, применяемый в военной области.

Совместимость существует на нескольких уровнях. Основным является физический уровень. Соединитель должен соответствовать определенным

требованиям, касающимся его размеров, чтобы можно было подключить его к другим соединителям того же типа.

Следующий уровень совместимости охватывает его функциональные характеристики: потери в соединении, время службы, рабочий температурный диапазон и т.д.

В итоге стандарты, подобные MIL-C-83522, полностью описывают соединители: размеры, рабочие характеристики, материалы, используемые для изготовления. В данном случае совместимость означает фактически полное совпадение, военная спецификация оставляет изготовителю очень мало возможностей для каких-либо изменений.

## Примеры соединителей

Следующие страницы посвящены описанию наиболее популярных в настоящее время соединителей. В таблице 11-2 собраны их основные характеристики. Обозначения: А — тип

- В — применение/наконечник/материал С - потери в соединении (dB)
- Д — возвращаемые потери для одномодового волокна (dB) Е — срок службы (цикловстыковки/расстыковки)

**Таблица 11.2. Характеристики типичных соединителей**

Соединитель		A	B	C	D	E
FC/PC		SM/MM		0.3	40 (типичное)	1000
ST		SM		0.3	40 (типичное)	1000
		Керамические (MM)		0.3		1000
		Нерж. сталь (MM)		0.6		1000
		Пластик (MM)		0.7		250
SC		SM/MM		0.3	40 (типичное)	1000
FDDI		SM		0.3	36 (мин.)	500
		MM		0.5		500
ESCON		MM		0.5		500
SMA		MM		1.5		200
DNP		Пластиковое волокно		2		
Неразъемный соединитель		SM/MM		0.2	40 (типичное)	NA

SM = одномодовое, MM = многомодовое. Материал указан для наконечников. Все одномодовые соединители используют керамические наконечники.

В конце 1980-х и начале 1990-х произошел заметный прогресс в стандартизации соединителей. Следует все же помнить, что совместимость, как правило, не означает идентичность. Основой для достижения совместимости является удобство интерфейса: возможность стыковки соединителей различных производителей. Данный подход оставляет за каждым производителем свободу видоизменять свою продукцию. Например, первоначально FC соединитель состоял из пятнадцати различных частей, которые собирались при установке. В настоящее время некоторые производители предлагают соединители FC, состоящие только из четырех частей. Подобное усовершенствование конструкции существенно облегчает процесс установки.

В большинстве одномодовых соединителей применяются керамические наконечники. При этом одномодовые соединители могут использоваться с многомодовым волокном. Многомодовые соединители с одномодовым волокном использовать нельзя по причине различных допусков. Соединитель для 125-мкм многомодового волокна должен иметь достаточно большое отверстие в наконечнике для того, чтобы пропустить волокно максимально допустимого диаметра в 127 мкм. Одномодовые соединители часто выпускаются под различные размеры волокон: 125, 126 или 127 мкм. Последнее усовершенствование позволяет точнее зафиксировать волокно. Имея соединитель с 126-мкм отверстием в наконечнике, невозможно оконцевать 127-мкм волокно. Напротив, наличие нескольких видов соединителей с различными размерами отверстий в наконечниках позволяет подобрать оптимальный вариант для оконцовки данного вида волокна.

## Соединитель FC-типа

Первым соединителем, основанным на 2.5-мм керамическом наконечнике, был соединитель FC-типа, разработанный компанией Nippon Telephone and Telegraph для телекоммуникационных систем (рис. 11.9). Он был очень популярен в Европе, Японии и СИЛА. MCI, например, использовала его для волоконно-оптической телефонной сети в 80-х годах.

В этом соединителе применялись корпуса с резьбой, обеспечивающие надежное соединение даже при наличии вибрации, но неудобные при быстрой расстыковке. Необходимо несколько раз повернуть резьбовую головку, прежде чем соединение разомкнется или восстановится.

В соединителях использовались также головки с проворачиваемыми фиксаторами. Данные соединители с малым углом поворота фиксатора обеспечивают попадание наконечника в одно и то же положение внутри адаптера. Наконечник не вращается ни относительно корпуса, ни относительно адаптера, что минимизирует любые изменения характеристик соединения, связанные с проявлением концентричности или эллиптичности как наконечника, так и волокна (рис. 11.1). Вращающиеся фиксаторы позволяют также произвести соединение с минимальными потерями. Например, можно измерить потери включения в различных позициях фиксатора, а затем зафиксировать соединение в требуемом положении.

Данное устройство фиксатора является полезным в приложениях, требующих минимизации потерь на соединении, но практически бесполезно в большинстве ситуаций, когда разница в затухании от 0.01 до 0.02 дБ, достигаемая за счет проворачиваемого фиксатора, не представляет никакого интереса.



**Рис. 11.9.** Соединители типов FC и D4 (Фотография предоставлена AMP Incorporated)

Любой тип соединителя имеет как одномодовый, так и многомодовый варианты. Первые FC соединители использовали наконечники с плоскими гранями, но позднее в соединителях FC/PC-типа стали применять вставки со скругленной внешней поверхностью, что уменьшает влияние обратного отражения. Некоторые производители для получения аналогичного эффекта предлагают соединители со склоненными выходными гранями.

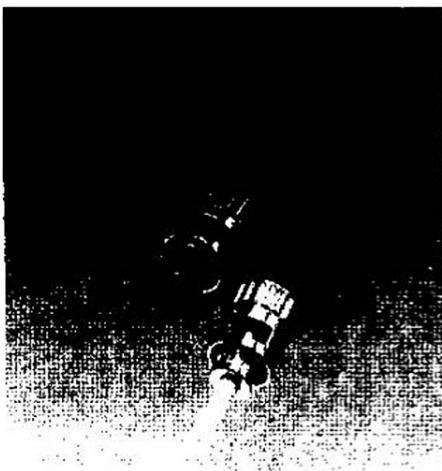
### **Соединитель B4-типа**

Данный соединитель очень близок к FC-типу своим резьбовым механизмом фиксации, использованию вращающегося фиксатора и скругленной полировкой выходной грани. Основное его отличие в использовании 2.0-мм насадки. Этот соединитель был первоначально сконструирован компанией Nippon Electric Corporation (рис. 11.9).

### **Соединитель ST-типа**

Соединитель ST-типа был сконструирован компанией AT&T Bell Laboratories для внутренних кабельных систем и использовал 2.5-мм керамическую насадку так же, как FC-соединитель, но отличался быстрорасчленяемым погрызковым механизмом фиксирования соединения (рис. 11.10). Такой тип фиксации предпочтительнее, когда не требуется защиты от вибрации, например, в офисе.

Данный тип соединителя производится примерно тридцатью компаниями и является наиболее популярным. Он широко используется в локальных сетях, внутренних кабельных системах, тестовом оборудовании и т.д. Во



**Рис. 11.10.** Соединители ST-типа (фотография предоставлена AMP Incorporated)

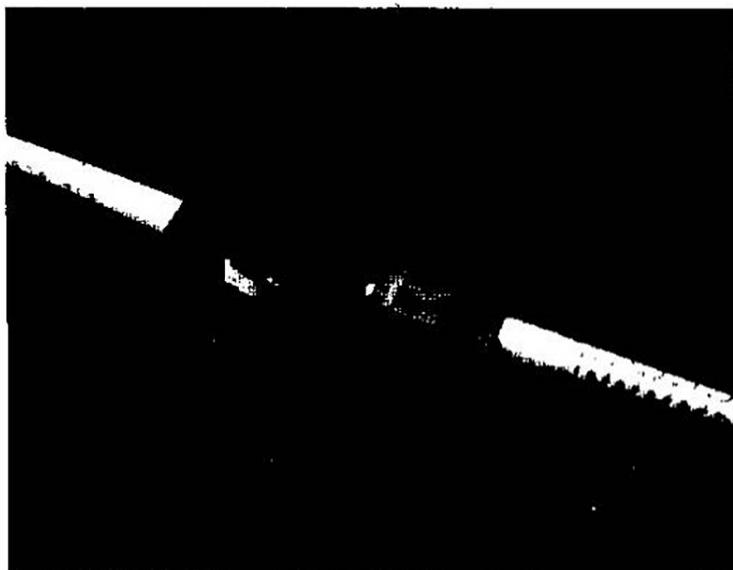
многих применениях, где специфицируется другой тип соединителя, также могут использоваться соединители ST-типа как альтернатива.

Для стыковки или отстыковки фиксирующего механизма быстрого расчленения достаточно повернуть на четверть оборота головку соединителя. При этом прижимной механизм обеспечивает стабильное положение насадки в адаптере: одно волокно не меняет ориентации относительно другого при повторении подключения. Часто важнее получить предсказуемые допустимые потери, чем минимально возможные.

Благодаря своей популярности соединители ST-типа производятся в нескольких модификациях: с керамической, стальной или пластиковой насадкой; в одномодовой или многомодовой версии, а также в бесклееевом варианте. Потери соединения составляют от 0.3 дБ для керамической версии и до 0.7 дБ для пластиковой версии. Разница в потерях определяется скорее не материалом вставки, а допусками, связанными с его использованием. Другими словами, керамика может быть обработана с меньшими допусками по сравнению с пластиком.

## Соединитель SC-типа

Соединители SC-типа стали достаточно распространеными в начале 90-х годов как для одномодовых, так и для многомодовых систем (рис. 11.11). Изначально сконструированные компанией Nippon Telephone & Telegraph соединители данного типа используют защелкивающийся механизм для соединения. Соединители SC-типа предусматривают защиту от случайных механических воздействий. Такого рода защита предусматривает механическую независимость крепления насадки от кабеля и корпуса соединителя.



**Рис. 11.11.** Соединитель SC-типа (фотография предоставлена AMP Incorporated)

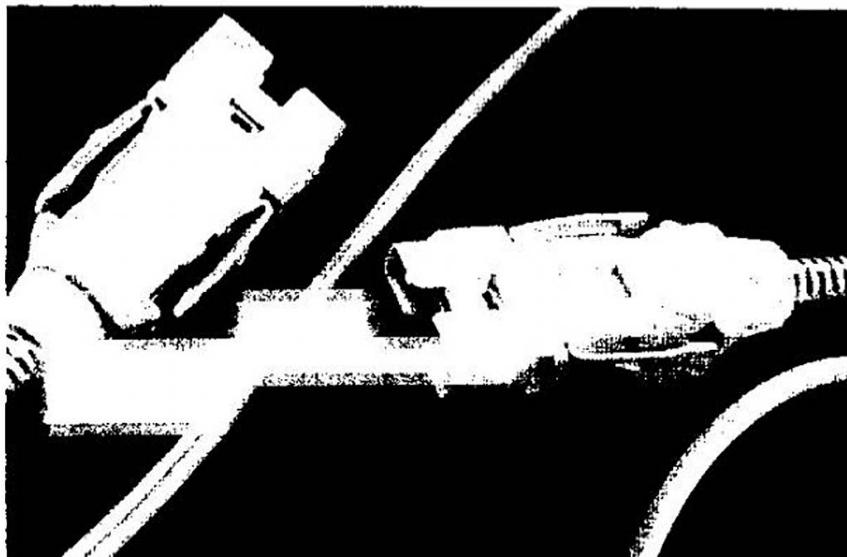
При этом слабое натяжение, приложенное к кабелю, не приводит к разрыву оптического контакта между насадкой и адаптером.

Название SC — от "subscriber connector" (подключаемый соединитель), что соответствует его первоначальному применению в телекоммуникации. Он пришел на смену соединителям FC- и D4-типа в современных глобальных телекоммуникационных системах. Кроме того, он составляет заметную конкуренцию соединителю ST-типа в локальных сетях, внутренних кабельных системах и аналогичных областях применения.

Основной вариант SC состоит из соединительной сборки, включающей насадку. Соединительная сборка фиксируется в адаптере. Одной из положительных черт соединителя SC-типа является простота конструкции многоволоконных подключений, основанных на многопозиционном адаптере или на клипсах, объединяющих корпуса двух и более вилок. Соединители, для фиксирования которых в адаптере требуется вращение их корпуса, подобные FC или ST, неудобны для многоволоконных систем.

Важным видом многоволоконных систем являются дуплексные. В этих системах одно волокно используется для передачи информации в одном направлении, а другое — в противоположном. Например, компьютерная рабочая станция в локальной сети, подключенная по волоконно-оптической связи, использует как передающее, так и принимающее устройства. Дуплексный соединитель позволяет подключиться к обоим устройствам одновременно.

Другим типом соединителя, имеющим аналогичные дуплексные возможности, является соединитель FDDI-типа.



**Рис. 11.12.** Соединитель FDDI MIC-типа

### Соединители FDDI MIC

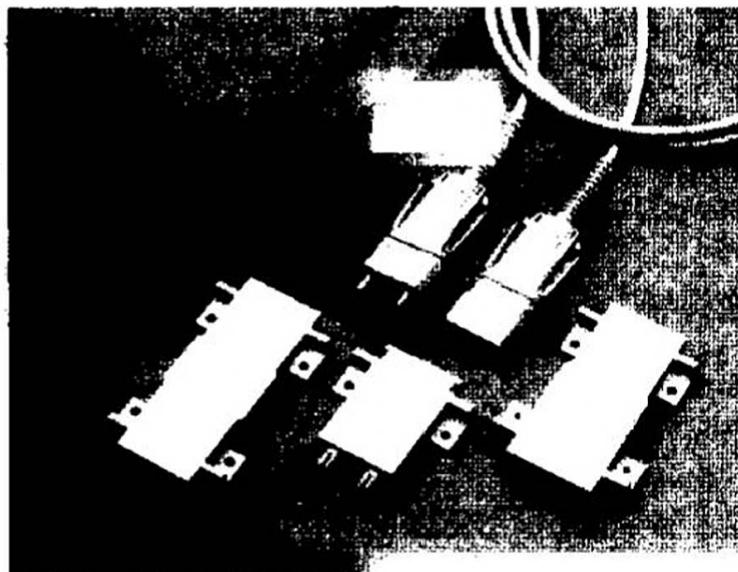
Соединитель FDDI MIC сконструирован ANSI для использования в FDDI-сетях (см. подробно в главе 15). Данный тип соединителя имеет только дуплексный вариант и использует 2.5-мм насадки (рис. 11.12). Его отличительная черта — наличие фиксирующего корпуса, запирающего насадку от повреждений. Мягкий интерфейс позволяет организовать соединение без особых усилий.

Наличие заплечек на корпусе соединителя делает его простым в использовании. Соединительный проходной адаптер позволяет подключить FDDI-соединитель к другим FDDI-соединителям, либо к двум ST-соединителям, либо к преобразователю. Термин MIC возник от "medium interface connector" (межинтерфейсный соединитель), что свидетельствует о возможности использования данного типа соединителей в качестве интерфейса между электронными устройствами и волоконной передающей средой.

Из-за дуплексной конфигурации, низких потерь, широких возможностей и простоты использования данный тип соединителей находит свое применение и за пределами FDDI-сетей.

### ESCON-соединитель

Этот соединитель получил свое название благодаря использованию компанией IBM в ESCON-интерфейсе канального типа, уже упоминавшемся в главе 1 и описанном ниже в главе 15 (рис. 11.13). Он аналогичен соединителю FDDI-типа: дуплексное исполнение, 2.5-мм насадки и мягкий интерфейс. Принципиальное отличие заключается в отодвигаемом корпусе,

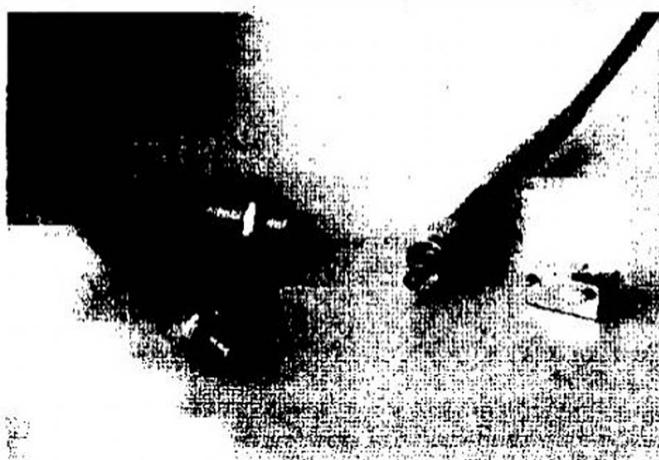


**Рис. 11.13.** Соединители ESCON (фотография предоставлена AMP Incorporated)

который позволяет легко подключить соединитель к преобразователю, но не обеспечивает столь надежной защиты, как конструкция с фиксированным корпусом.

### SMA-соединитель

Соединители, использующие накручивающуюся фиксирующую головку SMA- типа, являются наиболее старыми и известными, прошедшими стандартизацию НАТО, военного ведомства США, а также ТЕС (рис. 11.14). Пер-



**Рис. 11.14.** Соединители SMA (фотография предоставлена AMP Incorporated)

воначально они были разработаны компанией Amphenol Corporation в конце 70-х.

Существует два основных вида SMA-соединителей — 905 и 906. В 905-м типе используется прямая насадка, в 906-м — вставка переменного диаметра. Пластиковая направляющая заполняет всю наиболее узкую часть насадки и позволяет правильно сориентировать оси стыкуемых соединителей.

Изначально SMA-соединитель создавался для многомодовых волокон и использовал стальные насадки. В настоящее время они доступны и в одномодовой версии с керамическими насадками. Другие версии удовлетворяют строгим требованиям военного стандарта MIL-C-83522.

## **Соединители для пластиковых волокон**

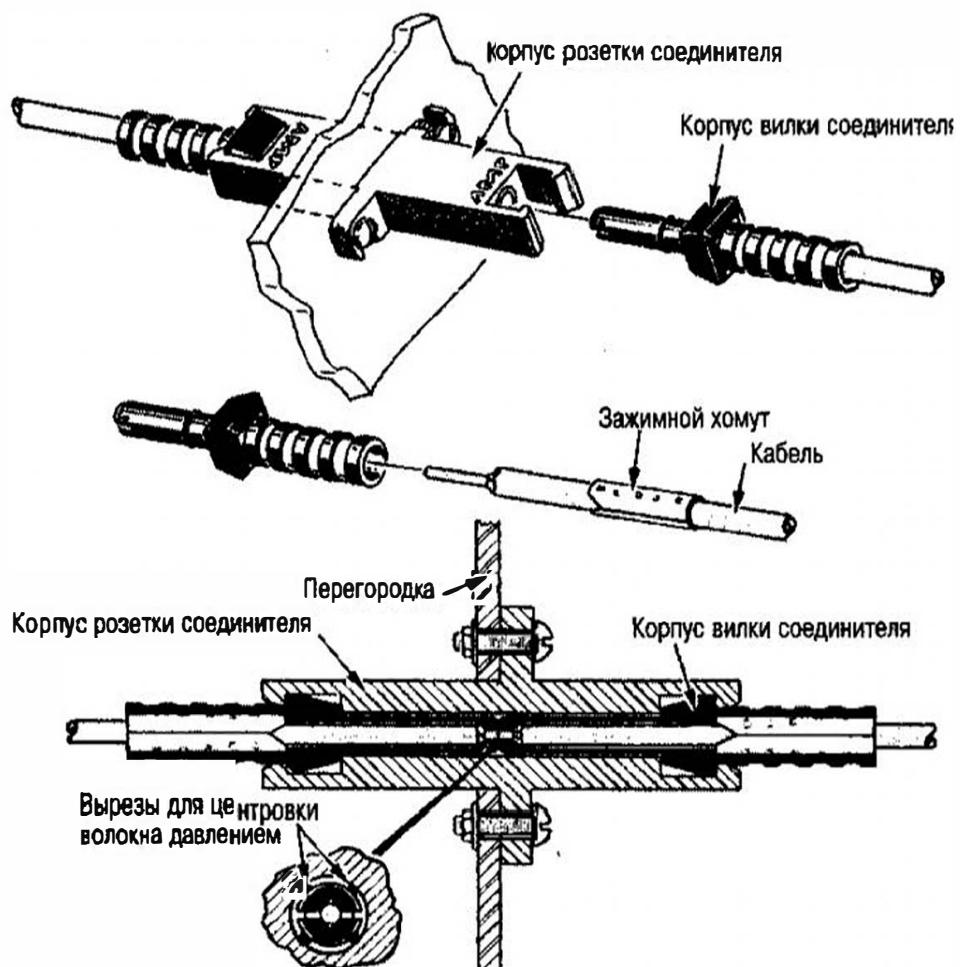
Соединители, предназначенные исключительно для оконцовки пластиковых волокон, отличаются очень низкой стоимостью и простотой использования. Их часто применяют даже без полировки или эпоксидной смолы (рис. 11.15). Пластиковое волокно может быть обработано с помощью разогретого ножа, без последующей полировки. Закрепление волокна является чисто механическим и обычно представляет собой фиксирование оптической оболочки с помощью зубцов или других подобных приспособлений. Такая установка соединителей требует очень мало времени и существенно меньших навыков по сравнению с установкой стеклянного волокна.

Соединители для пластикового волокна могут иметь как специфическую запатентованную конструкцию, так и стандартное устройство типа цифровых аудиосоединителей, специфицированных в стандарте электронной индустрии Японии (EIAJ) RC-5720. Соединители типа ST и SMA также могут использоваться совместно с пластиковым волокном. С ростом применения пластикового волокна в цифровой аудиоэлектронике и других бытовых приложениях оптическое оборудование, без сомнения, будет унифицироваться во все большей степени. В автомобилестроении или системе безопасности стандартизация не так важна.

## **Неразъемные соединители**

### **Сварные неразъемные соединители**

Для установки сварных соединителей применяется электрическая дуга, позволяющая сварить два волокна между собой. Сварные соединители позволяют добиваться очень точного, контролируемого компьютером расположения волокон, что, в свою очередь, определяет их чрезвычайно низкие потери на уровне 0.05 дБ. Поскольку установка таких соединителей сопровождается расплавлением волокон, то полностью исчезает проблема обратного отражения. Основным недостатком сварных неразъемных соединителей является высокая стоимость оборудования. Тем не менее, сварные соединители продолжают применяться там, где существуют строгие ограничения на уровне допустимых потерь.

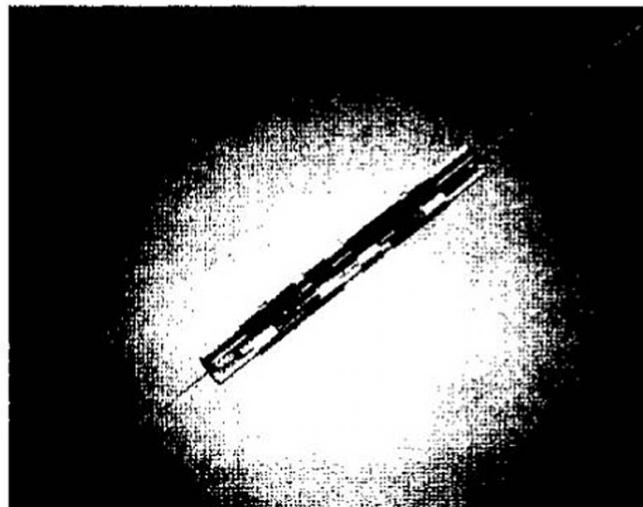


**Рис. 11.15.** Соединители для пластикового волокна (рисунок предоставлен AMP Incorporated)

## Механические неразъемные соединители

В настоящее время разработано несколько видов механических неразъемных соединителей. Все они имеют следующие общие характеристики: легко устанавливаются в полевых условиях, с использованием только простого инструмента и допускают затухание на уровне 0.2 — 0.25 дБ. Некоторые неразъемные соединители являются многоразовыми — термин, в телефонной индустрии означающий, что они могут использоваться повторно. На рис. 11.16 представлен типичный неразъемный соединитель, разработанный компанией Siemens.

В то время как в индустрии по производству разъемных соединителей основной прогресс связан с принятием стандартов для ST, SC или FDDI,



**Рис. 11.16.** Неразъемный соединитель волокна.

каждый производитель неразъемных соединителей оставляет за собой право предлагать собственную конструкцию. Причина проста: они не обязаны быть совместимыми, поскольку ни с чем не соединяются.

## Подготовка волокна

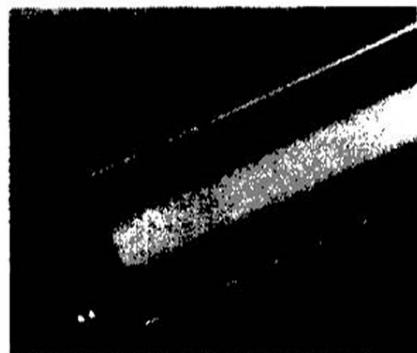
Подготовка волокна к оконцовке является важным моментом. Здесь можно отметить два параметра, которые нужно контролировать в процессе подготовки: *перпендикулярность скола волокна и его гладкость*. В идеале скол волокна должен быть перпендикулярен волокну с точностью до 1-2 градусов. Любое отклонение свыше 2 градусов приводит к неприемлемому уровню потерь в соединении. Поверхность скола должна быть гладкой, без трещин, заусениц и других дефектов.

Существует два способа получения такого рода поверхности: *прецзионное скальвание* и *полировка*. Техника скальвания, как правило, используется в подготовке волокна для неразъемных соединителей, а полировка — при установке разъемов.

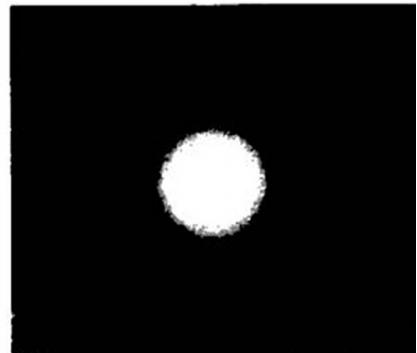
При любой технологии зачистка является общим процессом в подготовке волокна к оконцовке. Внешний экран, буферные трубки и другие внешние слои удаляются с помощью обычных стрипперов для медных кабелей, кусачек и ножей. Металлические силовые элементы удаляются с помощью кусачек и ножниц, используемых для удаления кевларовых нитей.

Пластиковая буферная оболочка, прилегающая к оптической, может быть удалена либо химически, либо механически. Химическое удаление подразумевает погружение кончика волокна в лакокрасочный растворитель примерно на 2 минуты и последующую протирку волокна салфеткой. Механическое удаление оболочек производится с помощью специальных стрипперов. Оголенное волокно может быть обработано изопропиловым спиртом или каким-либо другим очистителем.

Скалывание волокна сопровождается его фиксированием под небольшим давлением. Режущей частью инструмента с твердым и острым лезвием типа алмазного, сапфирового, либо карбид-вольфрамного производится небольшой надколот оптической оболочки. Можно провести лезвие вдоль неподвижного волокна или провести волокно вдоль неподвижного лезвия. После



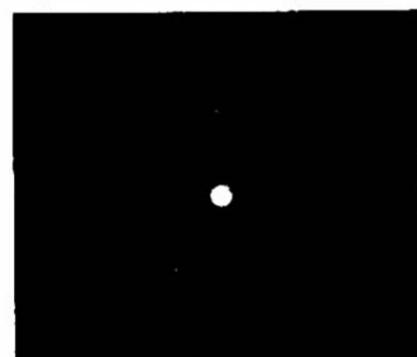
Выступ на сколе волокна



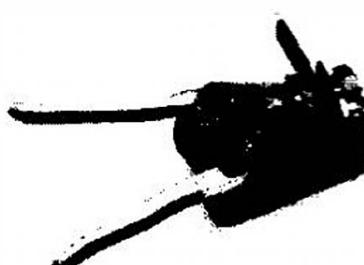
50/125 многоомпактное волокно



Засоренцы



8/125 одномодовое волокно



Инструмент для очистки волокна

**Рис. 11.17.** Хорошая и плохая очистка оптического стеклянного волокна  
(фотографии предоставлены GTE Fiber Optic Products)

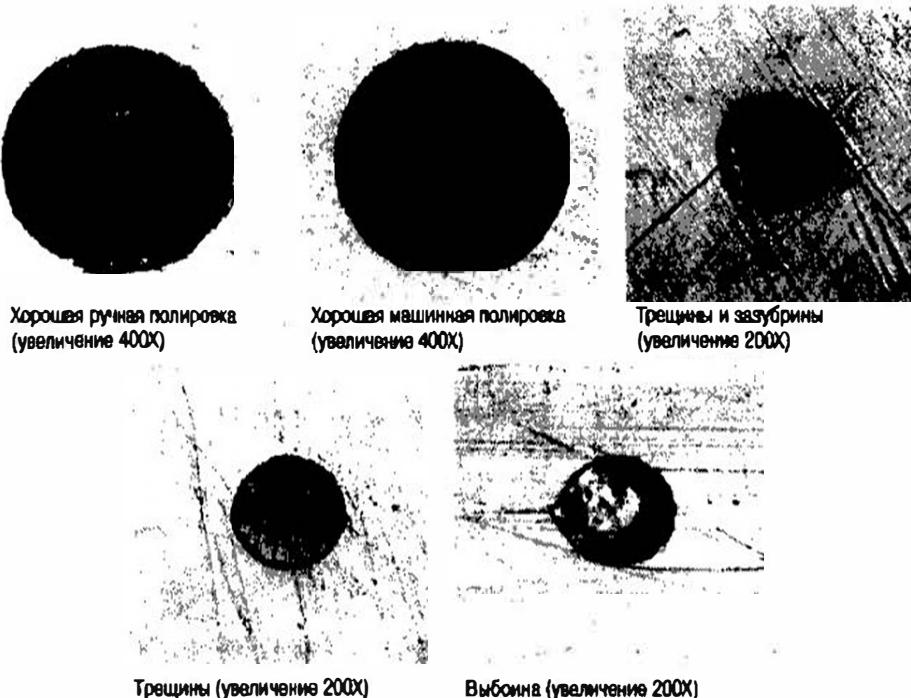
этого приложенные к волокну растягивающие напряжения углубляют трещину поперек волокна.

При правильном проведении работ надколот преобразуется в перпендикулярный и гладкий скол. Если работа сделана неправильно, на сколе могут появляться трещины и заусенцы (рис. 11.17), что делает скол непригодным для дальнейшего использования, а процесс должен быть выполнен повторно.

Скалывание может производиться вручную либо специальными инструментами различных типов: от относительно недорогих ручных инструментов и до точных автоматизированных станков. Любая техника позволяет достичь хорошего скола; опыт определяется количеством произведенных операций. Дешевая технология требует большего искусства и тренировки от специалистов, производящих данную операцию.

При установке большинства соединителей после закрепления волокна в корпусе проводится полировка его внешней части — последний этап работ. Для большинства соединителей существуют специальные держатели, эффективно увеличивающие полируемую поверхность и позволяющие добиваться перпендикулярности скола. Чем меньше поверхность держателя, тем больше риск повреждения поверхности скола или отклонения его от перпендикулярной ориентации при ручной полировке.

Полировка производится вдоль линии, напоминающей контур цифры 8, в два или более этапов с использованием все более мелкозернистой поли-



**Рис. 11.18.** Хорошая и плохая полировка скола волокна (фотографии предоставлены Buehler Ltd., 71 Waukegan Road, Lake Bluff, IL 60044)

ровальной пленки с типичным размером зерна от 1 мкм до 0.3 мкм. Соединитель и поверхность волокна должны быть очищены перед проведением заключительного этапа.

Как и при скальвании, отполированные волокна должны быть проверены под микроскопом. Небольшие царапины на полированной поверхности допустимы так же, как небольшие неровности внешней окружности переходного слоя. Большие царапины и неровности поверхности ядра свидетельствуют о неприемлемом качестве полировки. Царапины могут быть устранены повторной полировкой на 1-мкм или более мелкозернистой пленке. Неоднородности границ слоев волокна свидетельствуют о необходимости замены соединителя. На рис. 11.18 представлены примеры приемлемой и неприемлемой обработки.

## Примеры установки соединителей

Для демонстрации практической установки соединителей в данном разделе воспроизводится инструкция по установке соединителя SC-типа, прилагаемая его производителем — AMP Incorporated (рис. 11.19).

## Заключение

- Неразъемные соединители используются для постоянного или долговременного соединения волокон.
- Разъемные соединители используются для размыкаемых соединений.
- Потери, привносимые соединением, определяются внутренними факторами, внешними или факторами, связанными с системой.
- Существует множество различных конструкций соединителей, основное назначение которых — точная ориентация осей соединяемых волокон.
- Концы волокна могут быть подготовлены перед соединением либо в соответствии с технологией скальвания, либо с помощью полировки.

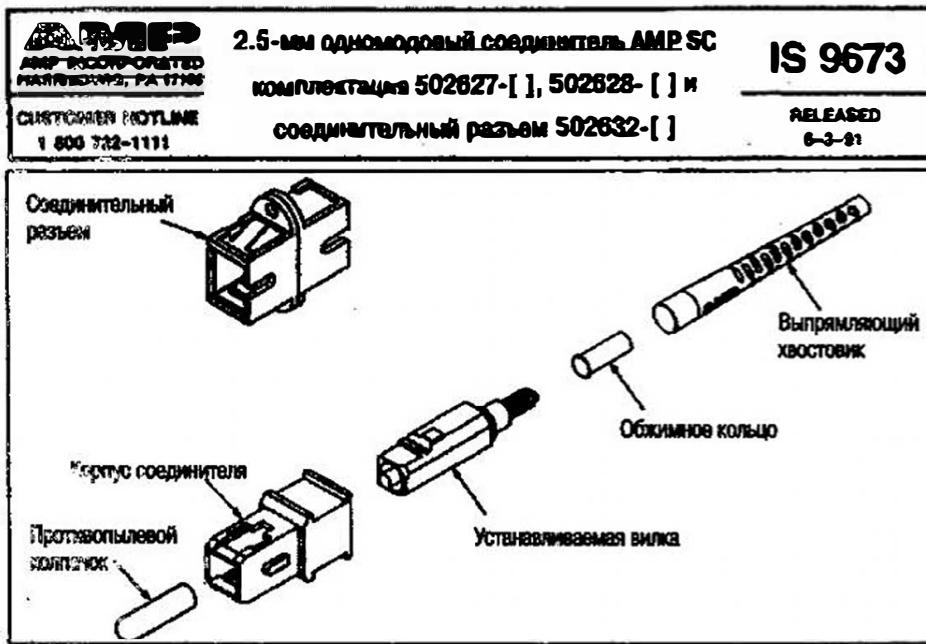


Рис. 1

## 1\* Введение

Данная инструкция (IS) относится к одномодовому соединителю AMP SC волоконно-оптического кабеля. Комплектация соединителя 502627 включает насадку из оксида алюминия, а комплектация 502632 - насадку из оксида циркония, в соответствии с пользовательским чертежом с указанием диаметра отверстия в насадке и цветовой маркировкой.

Описан также корпус приемной части соединителя AMP 502632 в соответствии с чертежом 502632 приемной части с указанием всех размеров и цвета. Перед установкой соединителя следует внимательно ознакомиться с данной инструкцией.

### ВНИМАНИЕ:

все размеры приводятся в миллиметрах (размер в дюймах указывается в скобках). Рисунки и чертежи выполнены без соблюдения масштаба и служат только для идентификации частей устройства.

## 2. Описание (рис. 1)

Комплектация соединителя включает в себя корпус устанавливаемой вилки, корпус соединителя, резиновый выпрямительный хвостовик, обжимное кольцо и пылезащитный колпачок. Соединители могут использоваться длястыковки 125-мм одномодового волокна, имеющего диаметр кабельной трубы 3 мм [.12 дюймов]. Приемный соединительный разъем служит для соединения двух AMP SC соединителей. Приемный соединительный разъем состоит из корпуса и монтажного фланца. Он может использоваться как для закрепления соединения на весу, так и на панели корпуса. Рис. 11 и 12 иллюстрируют монтаж приемного соединительного разъема.

## 3. Процедура установки

А. Необходимые инструменты и материалы. Приведем перечень необходимых длястыковки оптических волокон инструментов и материалов:

### Инструменты:

- Кабельный стриппер 501198-1 (IS9394)

Рис. 11.19. Пример сборки соединителя.

- Обжимное устройство 58190-6 с запасными губками 58289-1 (S9047); или ручные клеммы 220190-1 (S2901) с запасными губками 58289-1 (S6888)
- Смеситель эпоксидной смолы 501202-1
- Волоконный стриппер 501013-2 (S9485)
- Микроскоп 501196-5 (S9111) или увеличитель 501095-1
- Полировальные юстировки 502631-1
- Платформа для полировки 501197-2
- Волоконная защитная трубка 502656-1
- Ножницы 501014-1
- Карапаш скользящий 502684-1 (S9687)
- Набор для подготовки кабеля 501818-1

#### Материалы:

- Хлопковые тампоны
- Эпоксидная смола 501195-4 или 502418-1 (без строеной смолы)
- Шприц с иглой 501473-3
- Изопропиловый спирт (рекомендуются пропитанные спиртом салфетки)
- Безворсовые салфетки
- Полировальная подложка 501858-1 (зеленая подложка)
- 5-мкм полировальные пленки 228433-8
- 0,3-мкм полировальные пленки 228433-5
- Пленка для окончательной полировки 502748-1 (один лист), 502748-2 (пять листов)

### В. Подготовка волокон

#### ОПАСНО:

Будьте осторожны в обращении с кончиком волокна. Волокно может отколоться и легко проколоть кожу, вызывая тем самым воспаление.

#### ОПАСНО:

Всегда используйте защитные очки при работе с волокном.

1. Отреяжьте сегмент кабеля на 25. мм [1 дюйм] длиннее, чем необходимо для конечного использования.
2. Наденьте на кабель выпрямляющий штрафник; затем наденьте на кабель обжимное кольцо (рис.1).
3. Зачистите кабель и волокно в соответствии со шкалой размеров, представленной на рис. 2. Используйте кабельный стриппер S01198-1, волоконный стриппер 501013-2 и ножницы S01014-1. Используйте также шаблон для OPTIMATE 2.0, 25 мм AMPSC, входящий в набор для подготовки кабеля 501818-1, для уточнения рекомендованных размеров зачищаемых участков и допусков.
4. Тщательно очистите волокно, используя пропитанные спиртом салфетки.

#### ВНИМАНИЕ:

Никогда не протирайте волокно сухой тканью.

5. Определите оптимальное соответствие между диаметром волокна и размером отверстия в насадке соединителя, используя соединители с различными насадками (125, 126 и 127 мкм). Начните с соединителя с максимальным диаметром насадки (127 мкм), затем попробуйте 126 мкм соединитель и т. д., до тех пор, пока не подберете размер, обеспечивающей достаточно плотное фиксирование волокна. Если волокно не будет входить в соединитель, то используйте предыдущий соединитель с большим диаметром отверстия.

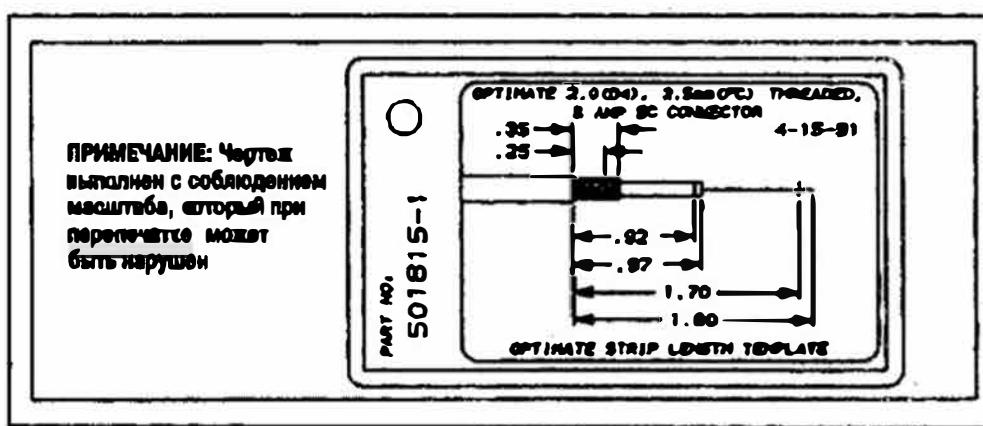


Рис. 2

Рис. 11.19. Пример сборки соединителя (продолжение)

6. Повторите пункт 5 для всех устанавливаемых концов кабеля.
7. Распределите силовые нити веером поверх буфера.

### С. Выбор и приготовление эпоксидного клея

#### 1. Выбор эпоксидной смолы:

Эпоксидная смола 5011954 проста в использовании, поскольку она поставляется в нормированной упаковке. Время ее затвердевания составляет 24 часа при 25 градусах Цельсия или 2 часа при 65 градусах. Для тщательного перемешивания эпоксидного клея используйте миксер 501202-1.

Эпоксидная смола 502418-1 поставляется в объемной упаковке в двух емкостях. Она сохнет 30 минут при 100 градусах Цельсия.

#### 2. Приготовление эпоксидного клея 501195-4: а.

Удалите разделяющую вставку из упаковки и тщательно смешивайте эпоксидные компоненты в течение 20-30 секунд, используя миксер 501202-1.

б. Наденьте иглу на шприц. Убедитесь в надежности ее закрепления. Извлеките поршень.

с. Сделайте небольшой диагональный надрез на одном из углов пакета и выдавите эпоксидный клей в корпус шприца. Установите поршень на место. Держите шприц вертикально (иглой вверх) и медленно вдвигайте поршень до тех пор, пока попавший в корпус воздух не выйдет и на конце иглы не появится капля клея.

#### 3. Приготовление эпоксидного клея 502418-1 (быстроохнущий):

а. Выдавите одинаковое количество компонентов клея на чистую поверхность.

б. Смешайте их тщательно с помощью деревянной лопатки.

с. Наденьте иглу на шприц. Убедитесь в надежности ее закрепления. Извлеките поршень.

д. Наполните шприц клеем. Установите поршень на место. Держите шприц вертикально (иглой вверх) и медленно вдвигайте поршень до тех пор, пока попавший в корпус воздух не выйдет и на конце иглы не появится капля клея.

### D. Оконцовка волокон

#### 1. Зафиксируйте соединитель вертикально керамическим носиком вниз. Очистите иглу шприца и введите ее в трубку корпуса до самого дна (рис. 3А).

#### ПРИМЕЧАНИЕ:

Не допускайте попадания эпоксидного клея на внешнюю сторону корпуса соединителя.

2. Медленно выдавливайте эпоксидный клей до тех пор, пока он не появится на керамическом кончике соединителя. Выдвигните шприц примерно на 1,5 мм от его максимально запущенного положения и выдавите еще небольшое количество клея.

3. Быстро извлеките шприц из трубы без дополнительного выдавливания клея в соединитель.

#### ПРИМЕЧАНИЕ:

В случае, если слишком большое количество клея будет выдавлено в соединитель, он не будет работать должным



Рис. 3

**Рис. 11.19.** Пример сборки соединителя (продолжение)

образом.

## Разъемные и неразъемные соединители

4. Опустите с нажимом керамический носик соединителя на мягкую поверхность так, чтобы подвижная трубка выступила на 3 мм за срез корпуса (рис. 3В).

5. Отреяжьте выступающую часть трубки заподлицо с корпусом соединителя (рис. 3В).

### **ВНИМАНИЕ:**

Эпоксидный клей не должен вытекать из