

Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
Петрозаводский государственный университет

В. А. Гуртов

Оптоэлектроника и волоконная оптика

Учебное пособие

Петрозаводск
Издательство ПетрГУ
2005

УДК
ББК

Г957

Печатается по решению редакционно издательского совета
Петрозаводского государственного университета

Рецензенты

Гуртов В. А.
Г957 Оптоэлектроника и волоконная оптика / В. А. Гуртов; ПетрГУ.
— Петрозаводск: Изд во ПетрГУ, 2005. — 100 с.

ISBN

Аннотация

УДК
ББК

ISBN
Гуртов В. А., 2005

©

Оглавление

Глава 1. Волоконная оптика	9
1.1. Волоконно-оптическая линия связи	9
1.2. История волоконной оптики	10
1.3. Преимущества волоконной оптики как коммуникационной среды	14
1.3.1. Широкая полоса пропускания	15
1.3.2. Низкие потери	16
1.3.3. Нечувствительность к электромагнитным полям	17
1.3.4. Малый вес	19
1.3.5. Малый размер	19
1.3.6. Безопасность	20
1.3.7. Секретность	20
1.3.8. Выводы	20
Глава 2. Конструкция и типы оптических волокон	22
2.1. Принципиальное устройство оптического волокна	22
2.2. Классификация волокон	24
2.2.1. Материал	24
2.2.2. Индекс преломления и модовая структура света	25
2.2.3. Сравнение волокон	29
2.3. Характеристики волокна	30
2.3.1. Дисперсия (модовая, молекулярная, волноводная)	30
2.3.2. Затухание (рассеяние, поглощение)	32
2.3.3. Микроизгибные потери	34
2.3.4. Численная апертура	34
2.3.5. Прочность	36
2.3.6. Влияние ионизирующего излучения	37
2.5. Характеристики оптических волокон, определяющие их долговечность	37

2.6. Механическая прочность и срок службы оптических волокон	38
2.7. Заключение	40
Глава 3. Технология изготовления волоконных световодов	42
3.1. Введение	42
3.2. Изготовление кварцевых стекол осаждением из газовой фазы	44
3.3. Процесс изготовления заготовки для оптоволокна	46
3.3.1. Химическое осаждение из газовой фазы	46
3.3.2. OVD-метод (outside vapor deposition)	49
3.3.3. VAD-метод (axial vapor deposition)	51
3.3.4. Сравнение методов получения заготовки для оптоволокна	53
3.4. Вытяжка оптоволокна	53
Глава 4. Источники оптического излучения	56
4.1. Оптические переходы	56
4.2. Излучательная рекомбинация	57
4.3. Методы инжекции	57
4.3.1. Условие односторонней инжекции в p-n переходе	57
4.3.2. Условие односторонней инжекции в гетеропереходе	58
4.4. Светодиоды	59
4.4.1. Светодиоды видимого диапазона	59
4.4.2. Светодиоды инфракрасного диапазона	62
4.5. Полупроводниковые лазеры	63
2.3.1. Зонная диаграмма и конструкция полупроводникового лазера	66
4.х.х Полупроводниковые лазеры на фотонных кристаллах	69
2.3.3 Применение полупроводниковых лазеров	71
Контрольные вопросы	76
Задачи	76

Глава 5. Приемники оптического излучения	77
5.1. Статистические параметры фотодетекторов	77
5.2. Материалы для фотоприемников	78
5.3. Фоторезисторы	79
5.4. Фотодиоды на основе p-n перехода	82
5.4.1. Общие сведения	82
5.4.2. Вольт-амперная характеристика фотодиода	82
5.4.3. Спектральная чувствительность	85
5.4.4. p-i-n фотодиоды	86
5.4.5. Лавинные фотодиоды	87
5.5. Фототранзисторы	88
5.6. МДП-фотоприемники с неравновесным обеднением	89
5.6.1. Механизмы генерации неосновных носителей в области пространственного заряда	90
5.6.3. Дискретные МДП-фотоприемники	98
5.6.4. Матрицы фотоприемников с зарядовой связью (ФПЗС)	102
Контрольные вопросы	113
Задачи	114
Глава 6. Пассивные оптические элементы	116
6.1. Роль соединителей	116
6.2. Требования к соединителям	119
6.3. Причины возникновения потерь в соединении	120
6.3.1. Внутренние причины	120
6.3.2. Внешние факторы	121
6.4. Разветвители	123
6.4.1. Принципы устройства разветвителей	123
6.4.2. Т-разветвитель	125
6.4.3. Разветвители типа «звезда»	126
6.4.4. Универсальные разветвители типа «звезда»	127

6.4.5. Сварные разветвители	127
6.4.6. Центральнo-симметричные разветвители с отражением	128
6.4.7. Мультиплексоры с разделением длины волны	129
6.4.8. Оптические коммутаторы	129
Глава 7. Волоконно-оптические усилители	130
7.1. История вопроса	130
7.2. Принцип работы эрбиевого усилителя	132
7.3. Оптическая схема эрбиевого волоконного усилителя	134
7.4. Изготовление усилителей	135
7.5. Основные параметры волоконных усилителей	136
7.6. Примеры волоконно-оптических усилителей	141
Глава 8	143
8.1. Конструкции и характеристики оптических кабелей	143
8.1.1. Общие требования к оптическим кабелям	143
8.1.2. Элементы конструкции оптических кабелей	145
8.1.2.2. Упрочняющие (силовые) элементы кабеля	151
2.4.3. Механические характеристики кабелей ВОЛС	163
2.4.4. Примеры кабелей разных российских компаний	167
Глава 9. ПРИМЕНЕНИЕ ОПТОВОЛОКНА	190
9.1. Телекоммуникации	190
9.1.1. Появление оптоволокна в телекоммуникациях	190
9.1.2. SONET	194
9.2. Локальные компьютерные сети (LAN)	195
9.2.1. Стандарт IEEE 802.5 Token Ring	196
9.2.2. Стандарт IEEE 802.3 Ethernet	197
9.2.3. Стандарт 10Base-F	198
9.3. Стандарт FDDI	198
9.4. Технологии GIGALite II фирмы «Nexans»	200

9.5. Стандарт HSSI	200
9.6. Стандарт SMDS	201
9.7. Канал передачи данных	201
9.8. Фирмы производители	202
9.8.1. Компания Alcatel	202
9.8.2. Техасская компания Grande Communications	202
9.8.3. Компания INFIGATE GmbH	203
9.8.4. Компания Lucent Technologies	204
Вопросы для самоконтроля	207
Список рекомендованной литературы	216
Ссылки на ресурсы сети Интернет	218

Глава 1. Волоконная оптика

1.1. Волоконно-оптическая линия связи

Волоконная оптика 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 рисунке 1.1 представлены основные компоненты такой системы:

— источник, который преобразует электрический сигнал в световой, 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, состоит из волокна и защитных оболочек;

— детектор предназначен для приема светового сигнала и его обратного преобразования в электрический сигнал.

— соединители (коннекторы) предназначены для подключения волокон к источнику, детектору и для соединения волокон между собой.

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. 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.

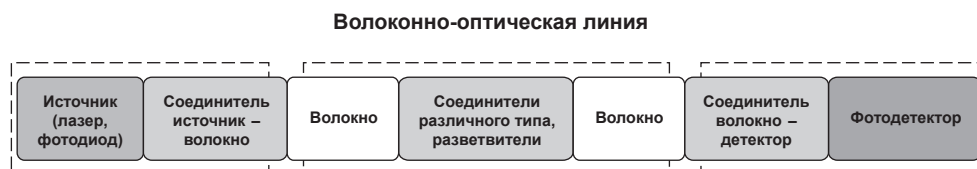


Рис. 1.1. Основные элементы оптоволоконной линии связи

1.2. 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 90-х годах XVIII века построил оптический телеграф во Франции. Сигнальщики располагались на вышках, расположенных от Парижа до Лилля по цепочке длиной 230 км. Сообщение передавалось из одного конца в другой за 15 минут. В США оптический телеграф соединял Бостон с островом Марта Вайнъярд, 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, 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 сопротивление 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. Фотофон позволял 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 Kaptron, специализирующуюся в области волоконно-оптических разветвителей и коммутаторов.

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 Мэймен 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. И лишь в 1988 году Голду 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 излучение 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 Манхеттена. 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 менее 20 дБ/км. 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 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 двухкилометровая система со скоростью передачи информации 20 Мб/сек, 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 превосходили 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 году 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, но его практическое использование было связано с множеством проблем, поэтому на протяжении многих лет полностью использовать такие кабели удавалось лишь в некоторых специализированных разработках. К 1985 году основные организации по передаче данных на большие расстояния — компании AT&T и MCI, 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

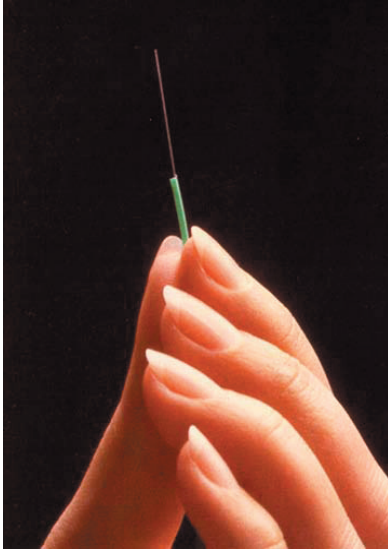


Рис. 1.2. Оптическое волокно, толщиной с волос, из кварцевого стекла, сделавшее революцию в коммуникационных технологиях

оптики в серийном оборудовании. Внедрение волоконного контроллера, получившего название ESCOM, 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 самоусиливающее волокно с добавками эрбия. Солитонные (в очень узком диапазоне спектра) 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.

Волоконно-оптическая альтернатива

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 обо-

рудования 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 начинающаяся 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 электронных блоков в вашем автомобиле;
- управление производственным процессом в промышленности.

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

1.3. 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.

Напрашиваются 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, достигаемые при использовании волоконной оптики. Ниже каждое из перечисленных преимуществ обсуждается более детально.

1.3.1. Широкая полоса пропускания

Выше уже 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 настоящее время 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.

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 перспективного 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).

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

1.3.2. 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 больше 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.

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. Тогда как лучшая трансатлантическая линия на коаксиальном кабеле поддерживала 4200 каналов и требовала установки повторителей через каждые 9,4 км. Существует теоретическая возможность создания волоконно-оп-



Рис. 1.3. Структура световода определяется слоями кварцевого стекла, легированного различными примесями

тической системы, передающей 200 Мб/сек на расстояние 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 большой объем информации, но и требуют меньшего количества повторителей — дорогостоящих электронных устройств, требующих существенных затрат на установку и обслуживание. Уменьшение количества повторителей приводит к снижению стоимости системы.

1.3.3. 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 Communications 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 представляют собой удары, которые можно испытать в сухой день, если пройти по ковру и прикоснуться к дверной ручке. 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 искажали 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 поместить 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 электромагнитных наводок. Они же 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 используют 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 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 сигнала без искажений.

1.3.4. 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 девять раз больше — 80 фунтов/1000 футов. Оптимальный вес крайне важен в самолетостроении и автомобилестроении.

1.3.5. Малый размер

Оптический кабель меньше по размеру, чем его медный аналог. Кроме того, достаточно часто одно оптическое волокно может заменить несколько медных проводников. Медный кабель диаметром 4,5 дюйма может передавать 40 300 двухсторонних разговоров на короткие расстояния. Волоконно-оптический кабель диаметром 0,5 дюйма, содержащий 144 волокна, обеспечивает 24 192 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 десять раз меньше.

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

- Самолеты и подводные лодки, где использование каждого квадратного дюйма является критическим. Применение волоконно-оптического кабеля обусловлено не только экономией места, но и 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 и учитывается высокая стоимость строительства новых каналов. При этом старые медные кабели заменяются оптическими, 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.

1.3.6. 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.

1.3.7. Секретность

Один из путей подслушивания заключается в подсоединении к проводу. Другой путь — перехват радиоволн, излучаемых работающим оборудованием или кабелем. Несколько лет назад США обнаружили такого рода прослушивание переговоров своих посольств. Чувствительная антенна, спрятанная в близкостоящем здании, улавливала радиоволны, излучаемые электронным оборудованием, работающим в посольстве. Данная антенна воспринимала ЭМН как в примере с радиоприемником, приведенном выше. Улавливаемый радиосигнал содержал сверхсекретные данные. Бизнесмены ежегодно 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.

1.3.8. 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-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 уни-

кальные характеристики оптоволокна делают его наиболее подходящей передающей средой во множестве различных областей техники.

Глава 2. Конструкция и типы оптических волокон

2.1. Принципиальное устройство оптического волокна

Оптическое волокно (световод) имеет два концентрических слоя — ядро (сердцевина) и оптическая оболочка (рис. 2.1). Внутреннее ядро предназначено для переноса света. Окружающая его оболочка имеет отличный от ядра показатель преломления и обеспечивает полное внутреннее отражение света в ядре.

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.

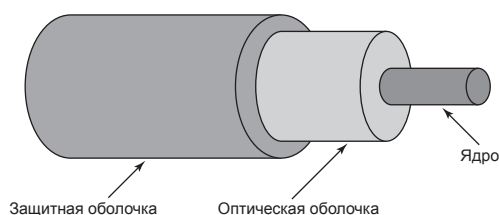


Рис. 2.1 Структура световода

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.

На рисунке 2.2 представлена схема распространения света по волокну. Свет заводится внутрь волокна под углом больше 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.

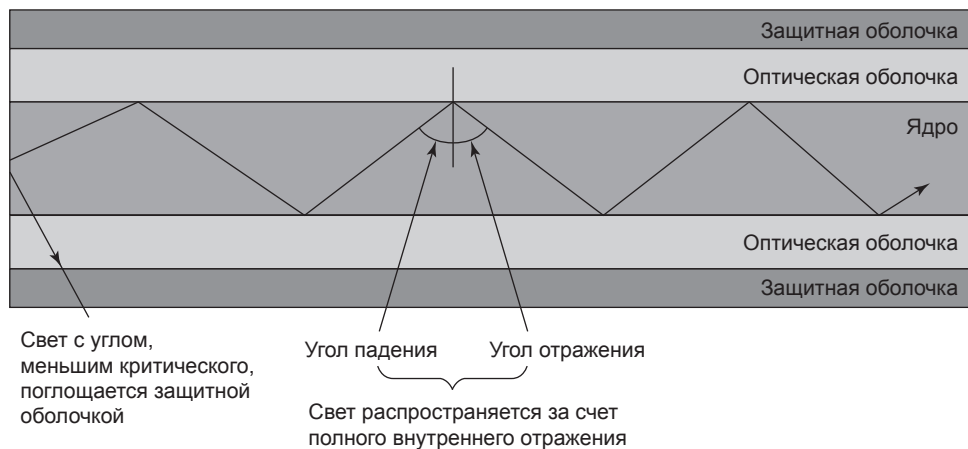


Рис. 2.2. Полное внутреннее отражение в оптическом волокне

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

Отметим, что в ситуации, представленной на рисунке выше, 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 оболочки.

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, накручивающуюся 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 инжекции света внутрь волокна.

Понимание взаимного влияния этих факторов проясняет многие аспекты волоконной оптики.

Волокна сами по себе имеют чрезвычайно малый диаметр. Поперечные сечения и диаметры для ядра и оптической оболочки четырех наиболее распространенных видов волокон следующие:

Таблица 2.1.

Ядро, мкм	Оптическая оболочка, мкм
8	125
50	125
62,5	125
100	140

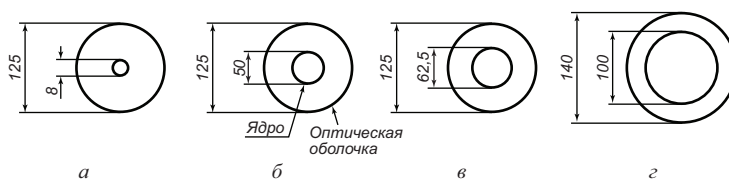


Рис. 2.3. Типичные диаметры ядра и оптической оболочки

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.

Таким образом, именно столь малые размеры позволяют передавать тысячи телефонных переговоров.

2.2. Классификация волокон

Оптические волокна могут быть классифицированы двумя способами по параметрам:

- 1) материал, из которого сделано волокно;
- 2) индекс преломления в ядре и модовая структура света.

2.2.1. Материал

Стеклянные волокна имеют как стеклянное ядро, так и стеклянную оптическую оболочку. Стекло, используемое в данном типе волокон, состоит из сверхчистого сверхпрозрачного диоксида кремния или плавленного кварца. Если морская вода была бы столь прозрачной, как волокно, то можно было бы увидеть дно самой глубокой океанской впадины — Марианской (11 022 метра), 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 (PCS) имеют стеклянное ядро и пластиковую оптическую оболочку. Их характеристики, 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 волокна являются достаточно прочными, с малым радиусом изгиба и способностью восстанавливать первоначальную форму после снятия нагрузки. Этот тип волокон находит применение в автомобилестроении, музыкальных системах, различной бытовой технике.

2.2.2. Индекс преломления и модовая структура света

В соответствии с этой классификацией на рис. 2.4 показаны три основные особенности волокон.

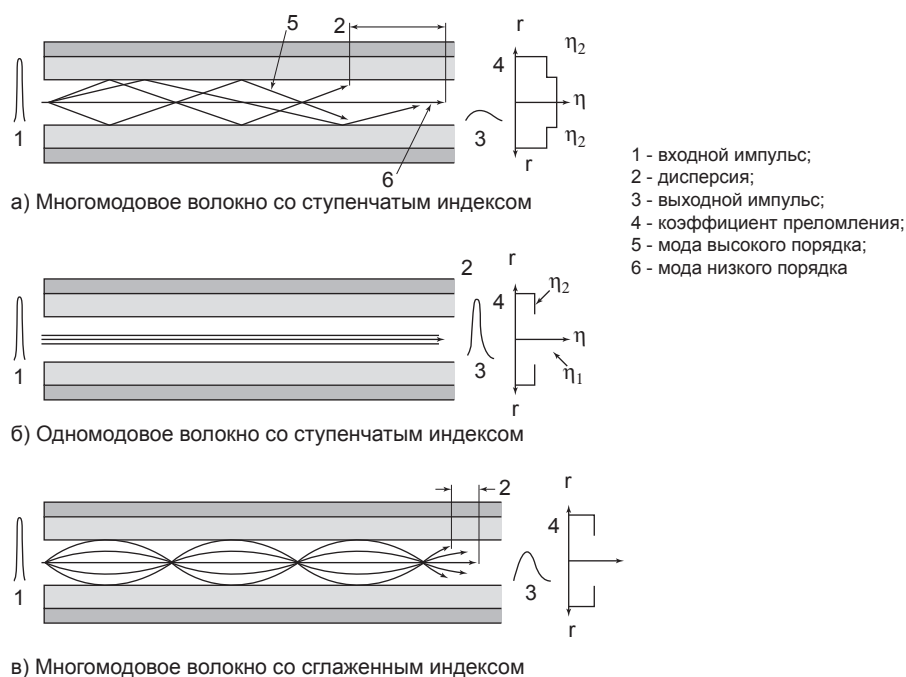


Рис. 2.4. Типы распространения света в волокне

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 — распределение значений показателей преломления в ядре и оптической оболочке для различных типов волокон. Важность каждой из перечисленных особенностей будет ясна после рассмотрения всех видов волокон.

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 максимален в центре и 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.

Волокно со ступенчатым индексом

Многомодовое волокно со ступенчатым индексом – наиболее простой тип волокон. Имеет ядро диаметром от 100 до 970 микрон и может быть чисто стеклянным, PSC 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, тоже 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. Сетевой импульс расплывается по вре-

мени.

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.

Типичное значение модовой дисперсии для волокна со ступенчатым профилем показателя преломления составляет от 15 до 30 нсек/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.

15 или 30 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. Вследствие этого импульсы трудно отличить один от другого, а заключенная в них информация теряется. Уменьшение дисперсии приводит к увеличению полосы пропускания.

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.

И так как свет движется быстрее по среде с меньшим показателем преломления, то чем дальше расположена траектория светового 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 оболочкой, 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 нсек/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 исполь-

зуются там, где требуются 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 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:

- Оптическая оболочка должна быть в десять раз толще, чем ядро одномодового волокна. Для ядра в 8 мкм она должна быть не менее 80 мкм.
- Данный размер совпадает с размером оптической оболочки для волокна со ступенчатым профилем показателя преломления, что обеспечивает стандартизацию размеров волокон.
- 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.

Характеристики одномодовой системы ограничены возможностями электроники, а не волокна. Еще одно преимущество одномодового волокна заключается в том, что оно может быть проложено один раз с тем, чтобы в дальнейшем возможности передающей линии возрастали по мере развития и замены электронных устройств. Это позволяет экономить средства на прокладке новой наиболее современной передающей линии и добиваться увеличения скорости передачи наиболее экономным способом.

2.2.3. Сравнение волокон

В таблице 2.1 представлены типичные характеристики различных волокон, их качество и физические свойства могут сильно 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 привлекательными другие типы волокон.

Волокна в соответствии с их качеством могут быть расположены в следу-

ющем порядке:

- одномодовое волокно;
- волокно со сглаженным индексом;
- стекло со ступенчатым индексом;
- пластиковые PSC.

Таблица 2.2. Типичные характеристики волокон

Тип волокна	Диаметр ядра (мкм)	Диаметр оптической оболочки (мкм)	Максимальное затухание (дБ/км)					
			650	790	850	1300	1550	
	3,7	80 или 125	10					
	5,0	85 или 125		2,3				5000 при 850 нм
	9,3	125				0,4	0,3	6 дисп./км ²
	8,1	125				0,5	0,25	
	50	125			2,4	0,6	0,5	600 при 850 нм 1500 при 1300 нм
	62,5	125			3,0	0,7	0,3	200 при 850 нм 1000 при 1300 нм
	85	125			2,8	0,7	0,4	200 при 850 нм 400 при 1300 нм
	100	140			3,5	1,5	0,9	300 при 850 нм 500 при 1300 нм
	200	380			6,0			6 при 850 нм
	300	440			6,0			6 при 850 нм
PSC	200	350		10				20 при 790 нм
Пластик	485	500	240					5 при 680 нм ³
	735	750	230					
	980	1000	220					

2.3. Характеристики волокна

2.3.1. Дисперсия (модовая, молекулярная, волноводная)

Дисперсия – 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:

- модовая дисперсия;
- молекулярная дисперсия;
- 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, что и лучи, движущиеся по коротким траекториям;
- 3) использование одномодового волокна, позволяющего избежать модовой дисперсии.

Молекулярная дисперсия

Лучи с различными длинами волн также движутся с различными скоростями по волокну, даже в одной и той же моде. Показатель преломления равен $n = c/v$, где c – скорость света в вакууме, v – скорость, соответствующая длине волны в веществе.

Поскольку каждая длина волны движется с разной скоростью, то величина скорости v 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 определяют два фактора:

- 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 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 ко-

роткими (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 длиной 1560 нм движется медленнее, чем волна длиной 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.

Молекулярная дисперсия является основным видом дисперсии в одномодовых 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 длин 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. А так как они имеют различные показатели преломления, то излучение движется со слегка различающимися скоростями в ядре и оптической оболочке. Изменение внутренней структуры волокна позволяет существенно влиять на волноводную дисперсию, тем самым изменяя специфицированную общую дисперсию волокна. Это является одним из перспективных направлений разработки одномодовых систем.

2.3.2. Затухание (рассеяние, поглощение)

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 — 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 на 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.

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 больше затухание. 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: рассеянием и поглощением.

Рассеяние

Потери, связанные с рассеянием оптической энергии, обусловлены неоднородностью волокна и его геометрической структурой. Рассеяние на неоднородностях происходит во всех направлениях, и свет перестает быть направленным.

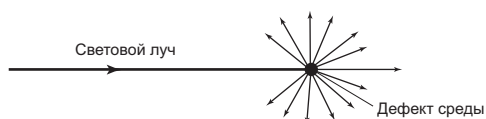


Рис. 2.5. Рассеяние

Релеевское рассеяние обусловлено вариациями состава и плотности волокна, неизбежными в процессе его производства.

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 820нм, 0,24 дБ при 1300нм, 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, обуславливающим поглощение, относятся ионы железа, меди, кобальта, ванадия и хрома. Для обеспечения низких по-

теперь 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.

2.3.3. Микроизгибные потери

Этот вид затухания связан с небольшими вариациями профиля границы ядро / оптическая оболочка. 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 направлено на уменьшение этих микронеоднородностей.

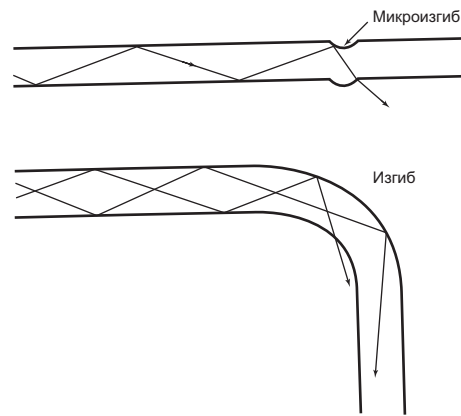


Рис. 2.6. Потери и изгибы волокон

2.3.4. Численная апертура

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

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

Таким образом, численная апертура является безразмерной величиной.

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

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

$$NA = \sin \theta,$$

где θ — половина угла ввода.

NA волокна является важной характеристикой, так как она указывает на то, как свет вводится в волокно и распространяется по нему. Волокно с большим значением NA хорошо принимает свет, в то время как в волокно с малым

значением NA можно ввести только узконаправленный пучок света.

Как правило, волокна с широкой полосой пропускания имеют малые значения NA. Таким образом, они допускают существование малого числа мод, означающее малую дисперсию и более широкую рабочую полосу. Значения NA изменяются от 0,5 в пластиковом волокне до 0,2 в волокне со сглаженным профилем показателя преломления. Большое значение NA подразумевает большую модовую дисперсию и, как следствие, большее количество возможных световых траекторий.

Свет в одномодовом волокне не испытывает отражения или преломления, 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.

Таким образом, в одномодовом волокне NA может быть определена чисто формально, особенного значения для практики она не имеет.

Источники и приемник также имеют свои апертуры. NA источника определяет угловую апертуру выходного света. NA детектора определяет рабочий диапазон углов для приемника. Для источника особенно важно иметь NA, согласованную с NA волокна, чтоб весь свет, излучаемый источником, проникал в волокно и распространялся по нему. Рассогласование NA приводит к дополнительным потерям при передаче света от устройства с меньшим значением NA к устройству с большим значением.

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 этой статьи 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

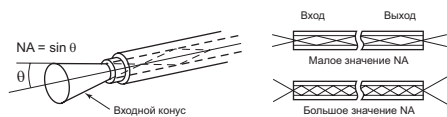


Рис. 2.7. Численная апертура

волокна.

2.3.5. Прочность

Стекло принято считать хрупким. Оконное стекло действительно не гнется. Однако стеклянные волокна можно согнуть в виде окружности небольшого диаметра или завязать в свободный узел.

Предел прочности характеризует способность волокна или провода противостоять натяжению 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, обуславливающая хрупкость волокна, — наличие микротрещин 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.

2.3.6. Влияние ионизирующего излучения

Радиационная прочность определяет способность оборудования противостоять ядерным эффектам. Волокна в отличие от проводников не накапливают статические заряды под воздействием радиации.

Волокна 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.

2.5. Характеристики оптических волокон, определяющие их долговечность

Ширина полосы пропускания и дисперсия

Многие производители волокна и оптического кабеля не специфицируют дисперсию в многомодовых изделиях. Вместо этого они указывают произведение ширины 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 произведение 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 рисунке ниже.

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 дисперсии является сложным, его приблизительная оценка может быть получена на основе следующего уравнения:

$$BW=0.178/(Disp)(SW)(L), \quad \text{где}$$

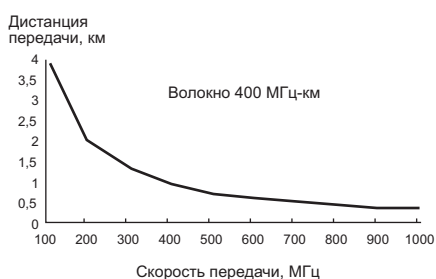


Рис. 2.8. Зависимость дистанции передачи от ширины полосы пропускания для 400 МГц-км волокна

Disp - дисперсия на рабочей длине волны в сек на нанометр и на километр
 SW - ширина спектра источника в нм
 L - длина волокна в км

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.

Влияние ионизирующего излучения

Радиационная прочность определяет способность оборудования противостоять ядерным эффектам. Волокна в отличие от проводников не накапливают статические заряды под воздействием радиации.

Волокна 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.

2.6. Механическая прочность и срок службы оптических волокон

Прочность

Стекло принято считать хрупким. Оконное стекло действительно не гнется. Однако стеклянные волокна можно согнуть в виде окружности небольшого диаметра или завязать в свободный узел.

Предел прочности характеризует способность волокна или провода противостоять натяжению 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, обуславливающая хрупкость волокна, - наличие микротрещин 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 приводит к появлению дефектов.

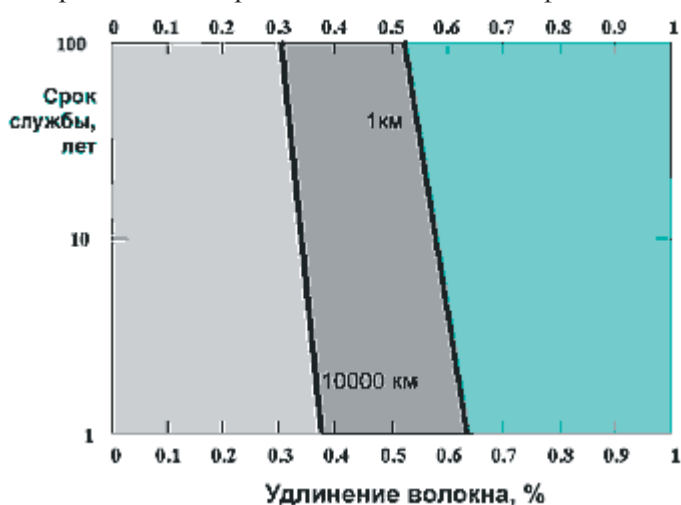


Рис. 2.9.

Важным достоинством волоконно-оптических линий связи является их потенциальная долговечность - изделия из стекла сохраняются столетиями. Для обеспечения долголетней работы необходимы соответствующие условия и главное из них - отсутствие механических напряжений. Дело в том, что срок службы оптических волокон определяется процессом роста в них микроскопических трещин. Центры роста таких трещин всегда присутствуют на поверхности стекла, но не всегда развиваются. Однако, если волокно растянуто, то трещина начинает лавинообразно расти, и волокно разрывается. Характер зависимости срока службы волокна от его натяжения проиллюстрирован на графике, где натяжение выражено в единицах продольного удлинения. Графики построены по типичным данным японской фирмы FUJIKURA для стандартного телекоммуникационного одномодового волокна. Левая кривая соответствует длине волокна 10000 км, а правая - 1 км; так что между ними располагаются практически все возможные длины волокон в линиях связи. Можно выделить три диапазона напряжений: безопасные - до 0.3 %, недопустимые - более 0.6

% и промежуточные, требующие дополнительного анализа. Хотя в приведенных оценках не учитывался ряд факторов, таких как микрповреждения волокна или влияние влаги, из графика видно, что незначительное увеличение натяжения волокна может приводить к многократному уменьшению его срока службы. Поэтому надежность волоконно-оптических линий связи невозможно оценить, не имея достоверной информации о натяжении волокна в кабеле. Актуальность такой задачи стимулировала исследования тонких оптических эффектов в волокне, в результате чего возникла бриллюэновская рефлектометрия.

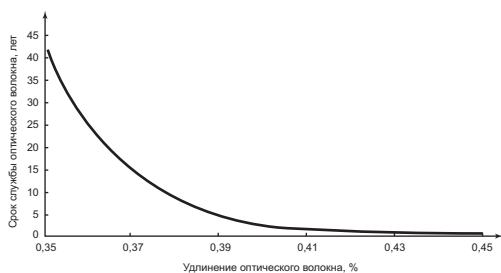


Рис. 2.10. Зависимость срока службы оптического волокна от его удлинения

Видно, что срок службы, установленный потребителем ВОК, в 25 лет обеспечивается при значении удлинения менее 0,36 %, что определяет допустимую величину локальной механической растягивающей нагрузки в пределах 3 Н.

Значительное влияние на процесс разрушения стекла оказывают физико-химические свойства окружающей среды, в первую очередь наличие паров воды. Наличие гидроксильных групп приводят не только к значительному снижению механической прочности и срока службы оптического волокна, но и к увеличению затухания из-за поглощения излучения. Защитное покрытие оптического волокна предохраняет волоконный световод от взаимодействия с окружающей средой. Конечно, полимерное покрытие не может полностью исключить проникновение молекул воды к поверхности волоконного световода, оно может только лишь затруднить этот доступ.

2.7. Заключение

- Существует три вида волокон: со ступенчатым индексом, со сглаженным индексом и одномодовое.
- Диаметр ядра позволяет грубо оценить качество волокна: чем меньше диаметр, тем шире полоса пропускания и меньше потери.
- Волокна разного качества находят применение в различных областях техники.
- Дисперсия – один из факторов, ограничивающих качество волокна. Для уменьшения дисперсии используют волокна со сглаженным индексом или одномодовые волокна.
- 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 собирающую 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.

Глава 3. Технология изготовления волоконных световодов

3.1. Введение

Технологии производства оптоволокна всего три десятка лет. Это если считать от момента появления первых теоретических работ, в которых была показана принципиальная возможность создания световодов с приемлемым, менее 20 дБ/км, затуханием.

Первые образцы, соответствующие этому требованию, были созданы в начале 70-х годов. Ясно, из чего лучше всего делать световоды, не было. Ранее же ученые исследовали многокомпонентные составы стекла, предлагали даже использовать капилляры с жидкостью. В конце концов, основным материалом для изготовления оптического волокна выбрали кварцевое стекло.

Технологический процесс изготовления световодов на основе кварцевого стекла делится на два этапа.

Первый этап — получение заготовки, которая представляет собой стеклянный стержень длиной порядка метра и диаметром около 10–80 мм. Для этого существует несколько способов:

- модифицированное химическое осаждение из газовой фазы на внутренней поверхности кварцевой трубки;
- метод осаждения из газовой фазы, полученной путем плазменного распыления;
- внешнее осаждение из газовой фазы на внешней поверхности стержня;
- осевое осаждение из газовой фазы на торце стержня.

На втором этапе конец заготовки размягчают в печи и тянут из него волокно. При вытяжке не происходит смешивания отдельных слоев — происходит, выражаясь математическим языком, преобразование подобия: если диаметры сердцевины и оболочки заготовки относились, как один к десяти, то так оно будет и в вытянутом волокне. Вытяжка световодов проводится в столь же чистых помещениях, как и при производстве микросхем: чтобы на их поверхность не попадали пылинки — те же самые включения.

После того как волокно остынет, на него наносится защитная пленка полимера. Полимер призван защитить волокно от механических воздействий и от окружающей среды, прежде всего от водорода и воды.

Дело в том, что вода ускоряет рост трещин, а водород, диффундируя вглубь волокна, повышает коэффициент затухания.

Однако по-настоящему могут защитить стекло только два покрытия: металлическое и углеродное. И сейчас японские фирмы начинают покрывать стекловидным углеродом каждое волокно в отдельности.

Пока же для достижения полной защиты лучше всего помещать уже гото-



Рис. 3.1. Оптические кабели

вый кабель в герметичную металлическую оболочку, но практически это реализуемо только в очень дорогих кабелях для транс-океанских линий.

На рисунке 3.2 схематически изображен процесс получения оптоволокна методами осаждения из газовой фазы.

Перечисленные методы применимы к производству волокон из кварцевого стекла.

Существуют также различные методы для производства оптоволокна из других материалов, наиболее часто встречаемые из них:

- способ двойного тигля — для комбинированных стекол;
- вытяжка

с

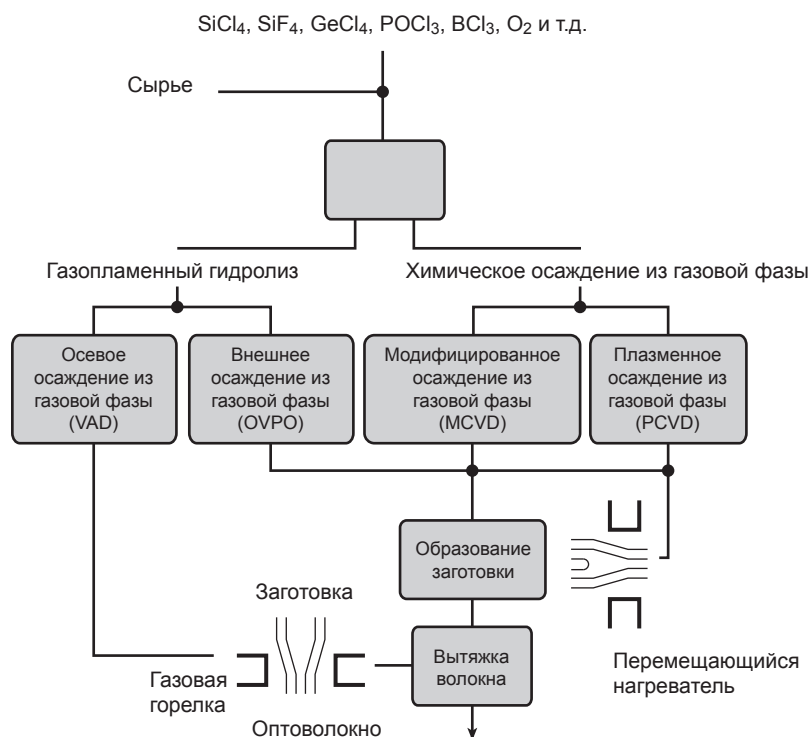


Рис. 3.2. Схема производства оптоволокна

покрытием — для волокон с ядром из кварцевого стекла и оболочкой из пластика;

— метод формирования выдавливанием — для получения пластиковых оптоволокон;

— золь-гелевая технология; и др.

Каждый из перечисленных методов имеет свои преимущества и недостатки.

3.2. Изготовление кварцевых стекол осаждением из газовой фазы

Оптические волноводы для коммуникаций состоят главным образом из кварцевого стекла (диоксид кремния SiO_2), со светопроводящим ядром из волокна, легируемым прибавлениями германия и фосфора, чтобы увеличить показатель преломления и, возможно, бора или фтора, чтобы понизить коэффициент преломления. Уникальная пригодность SiO_2 для изготовления сверхчистого, сверхпрозрачного кварцевого стекла основывается не только на его низком внутреннем поглощении, но и на том, что кварцевое стекло, с примесями или без, может быть получено осаждением из чистой и однородной газовой смеси.

Преимущество методов с осаждением из газовой фазы заключается в том, что упругость пара отличается от вещества к веществу, а материал из жидкого состояния выпаривается в почти постоянной температуре, побочные примеси, находящиеся в жидкости, не испаряются и только требуемый материал выпаривается. Поэтому материал становится намного чище в паровой, нежели в жидкой фазе, что делает этот эффект полезным для создания чистых слоев. Если материал выбран правильно, температура испарения может слегка варьироваться, и в этом случае парообразованием можно легко управлять.

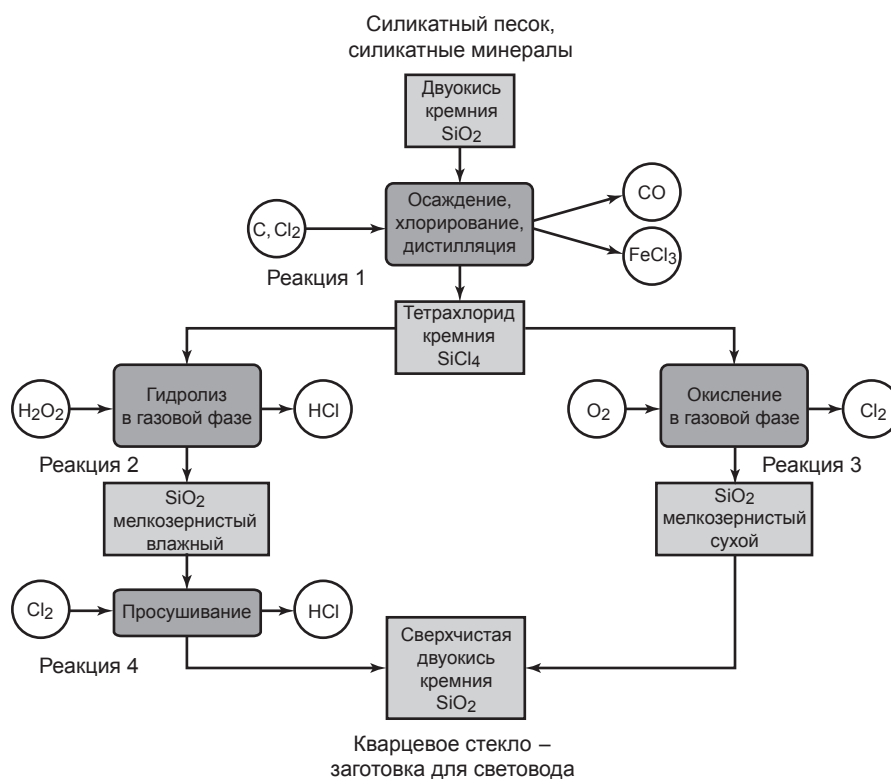


Рис. 3.3. Очистка натурального кремниевого песка

Поэтапная перегонка гарантирует, что кремниевые хлориды, выделяемые в процессе хлорирования, получены в сверхчистой форме. Они отделяются от металлических хлоридов типа хлористого железа. Кремниевые хлориды используются, например, для изготовления кремния с высокой чистотой для полупроводников.

Чистая двуокись кремния восстанавливается из кремниевого тетрахлорида путем осаждения из газовой фазы. Индекс преломления чистого вещества равен 1458. Чтобы изменить индекс преломления до требуемого уровня, добавляются соответствующие примеси (GeCl_4 , POCl_3 и т.д.). Хлорид или смесь хлорида могут быть гидролизованы в газовом пламени (рис. 3.3, реакция 2) или окислены в потоке кислорода при 1300 °С (рис. 3.3, реакция 3), где на соответствующем основании конденсируется мелкозернистый порошок SiO_2 .

Чтобы материал мог использоваться как легирующая примесь, он должен отвечать следующим требованиям:

- иметь высокую чистоту и быть легко доступным, легко переходить в жидкое состояние,
- отличаться от переходного металла давлением пара,
- легко остекловываться с кварцем и давать требуемый коэффициент

преломления,

- иметь коэффициент теплового расширения после остекления почти равным таковому у SiO_2 ,
- обладать неизменными физическими свойствами после остекления.

Остаточная вода (например, от газов пламени) может быть эффективно удалена от полученной двуокиси кремния с помощью газа хлора, так как вода и хлор формируют летучий хлористый водород при температуре около $1000\text{ }^\circ\text{C}$ (реакция 4, рис. 3.3). Этот процесс просушивания значительно увеличивает световую проницаемость стекла.

Пористая двуокись кремния спекается в температурах более $1200\text{ }^\circ\text{C}$ и формирует твердое, свободное от включений кварцевое стекло. Происходит это в результате снижения энергии поверхности при переходе от гранулированного стекла к твердому.

3.3. Процесс изготовления заготовки для оптоволоконна

3.3.1. Химическое осаждение из газовой фазы

Впервые о методе химического осаждения из газовой фазы (Chemical vapor deposition — CVD) было сообщено научно-исследовательскими лабораториями Corning Glass Works и Bell Telephone (MCVD — modified chemical vapor deposition — модифицированный метод химического осаждения из газовой фазы).

В этом методе добавляемая примесь SiO_2 отложена слоями — начиная со слоя стекла для оболочки оптического стекловолокна и заканчивая слоем ядра волокна — на внутренней стороне вращающейся трубки (рис. 3.4), нагретой до $1600\text{ }^\circ\text{C}$ внешней горелкой.

Поскольку каждый дискретный слой отложен друг на друга, то при нагревании они одновременно спекаются, чтобы сформироваться в твердое стекло. Это происходит под действием горелки, путем перемещения ее по трубе в направлении выброса газа, оплавливая слои кварца, отложенные перед горелкой.

Представьте себе подобие токарного станка, в котором на место резца установлена кислородно-водородная горелка. В станок зажимается стеклянная трубка и через нее на первом этапе пропускается хлорид кремния и кислород (на самом деле состав смеси более сложен). В горячей зоне напротив горелки синтезируется оксид кремния. Образуются, фигурально выражаясь, пушинки окиси, которые дрейфуют из горячей области в более холодную и прилипают к стенке. Этот процесс называется термофорезом, он прекрасно описывается и объясняется кинетической теорией.

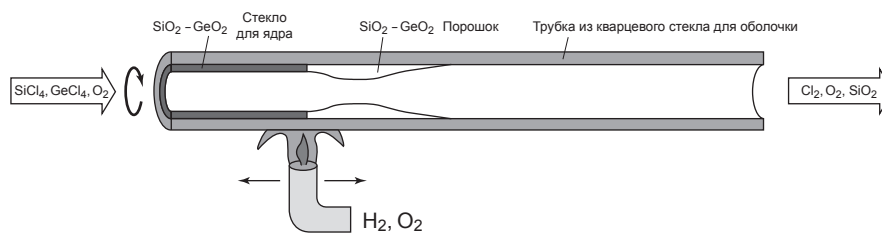


Рис. 3.4. Процесс изготовления заготовки для оптоволокна методом осаждения из газовой фазы

Важно, что осаждение происходит не в месте нагрева пламенем, а перед ним — там, куда пламя еще не дошло. На поверхности трубки образуется пористый слой окиси, и, двигаясь дальше, горелка его проплавляет — остекловывает. Так получается слой чистого стекла.

При следующих проходах через трубку пропускают еще и германий в виде хлорида. Таким образом, легируют материал световода, создавая в нем градиент коэффициента преломления. После того как необходимое число слоев осаждено, подачу хлоридов выключают, а температуру пламени увеличивают, в результате трубка плавится и схлопывается просто под действием сил поверхностного натяжения.

Результатом этого процесса будет твердое тело, внутреннюю часть которого составляет чистый материал для формирования ядра оптоволокна, а внешняя часть из материала покрытия оптоволокна.

Образцы, подготовленные этим методом, могут быть применены к различным типам оптоволокна в соответствии с отобранной толщиной, коэффициентом преломления и других характеристик.

Размеры заготовок, полученных этим способом, позволяют изготавливать оптоволокно длиной до 10 км.



Рис. 3.5. Процесс остекловывания в методе осаждения из газовой фазы

Достижимые величины затухания 1 дБ/км при длине волны $\lambda = 1300$ нм в настоящее время могут быть снижены до 0,5 дБ/км в высококачественных волокнах. Причиной этому, кроме свойственных преимуществ осаждения из газовой фазы, является то, что во внутренней части трубы контакт синтезируемого стекла с пыльным или влажным воздухом полностью отсутствует.

В основном этот метод разрабатывался компанией AT&T, которая производит больше трети всего объема волокна в мире. Этот метод считается самым простым, и, кстати, в отечестве только он реально и работал. Однако для него нужна очень хорошая труба-заготовка без включений, так как включения — это центры напряжений, из которых может начать расти трещина. С этим довольно успешно борются путем химической или огневой полировки поверхности трубок.

Преимущества метода:

- на всем протяжении процесса изготовления каждого слоя сохраняется закрытое пространство, что позволяет избежать примеси посторонних материалов. Относительно легко могут быть изготовлены волокна с малой величиной затухания;
- легко управлять показателем преломления слоя;
- может быть широко использован в изготовлении одномодовых волоконных световодов;
- оборудование, использованное для производства, относительно не-сложно по конструкции и просто в управлении.

Неудобства метода:

- размер стержня заготовки ограничен размером установки и трубкой кварцевого стекла. Поэтому стержень не может быть сделан очень большим или длинным, соответственно волокно не может быть сделано очень длинным, в среднем от 3 до 5 км, максимум от 20 до 40 км;
- должна использоваться только заготовка из кварцевого стекла. Трудно предотвратить диффузию ОН ионов и H_2 из трубки заготовки к ядру волокна;
- возможно снижение показателя преломления в центре ядра;
- так как горение и остекловывание происходят за счет наружного обогрева трубки пламенем горелки, производительность наплавки не такая высокая, как ожидается от расхода нагревающего горючего газа. Скорость напыления — приблизительно от 0,5 до 2 г / мин.

Благодаря простоте оборудования и его управления этот метод широко используется во многих странах.

Окисление кремния и хлористых германиев может также быть инициировано плазмой. Метод, названный позже PCVD (Plasma chemical vapor deposition), — метод осаждения из газовой фазы, полученной путем плазмен-

ного распыления. Данный метод впервые был разработан фирмой Philips.

Поскольку зона образования газа может быстро перемещаться по трубке, в короткий отрезок времени возможно нанести сравнительно большое количество тонких слоев, производя в результате однородные профили без видимых границ перехода от слоя к слою.

3.3.2. OVD-метод (outside vapor deposition)

Другой метод, которым пользуется фирма Corning, называют еще внешним осаждением (в отличие от первого — внутреннего): стекло осаждается на огнеупорный стержень прямо из пламени горелки, куда подаются хлориды исходных веществ.

Поскольку осаждение происходит в атмосфере пламени, в таком материале остается много воды, получившейся в результате окисления водорода. Поэтому, после того как центральный стержень вынимают, приходится продувать заготовку хлором, который экстрагирует воду. И только после этого заготовка остекловывается.

Перечисленные выше три фазы процесса, а именно: осаждение на огнеупорный стержень, сушка и остекловывание — происходят последовательно. Поэтому каждая фаза может быть оптимизирована отдельно, что позволяет достичь высокой скорости осаждения материала.

Кроме того, скорость осаждения увеличивается, так как поверхность подкладки увеличивается с каждым последующим слоем, что является положительным коэффициентом в увеличении относительной скорости процесса. Высокая производительность наплавки (4,3 г/мин) соответствует производительности 5 км/ч.

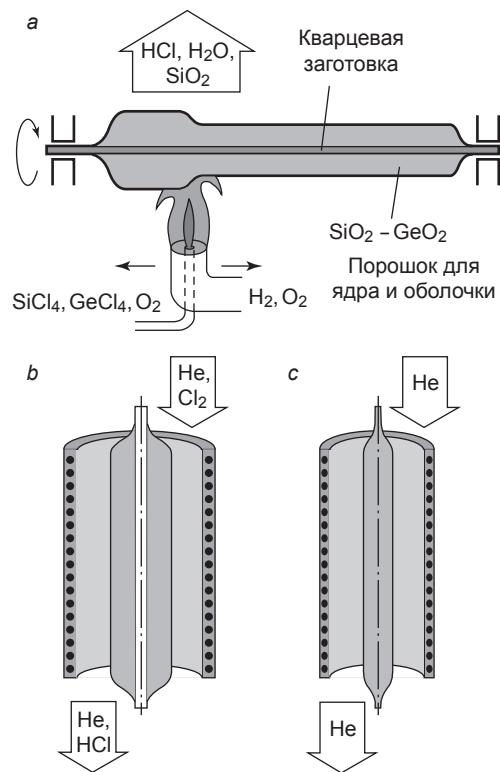


Рис. 3.6. Изготовление заготовки:

а) методом OVD; б) с последующей сушкой; в) спеканием

При соответствующей оптимизации процесса сушки этот метод также может использоваться для того, чтобы производить волокна с малыми потерями, сопоставимыми по качеству с полученными внутренним осаждением трубки.

Преимущества метода:

- отсутствие предела размера стержня заготовки, поэтому волокно может быть сделано большой непрерывной длины, например 50–100 км;
- осаждение, дегидратация и процессы спекания отделены друг от друга, так как гидролиз произведен прямым обогревом с горючим газом, то материал осаждения производится быстро, производительность наплавки — приблизительно 5 г/мин или больше;
- отсутствие необходимости в какой-либо подложке в основание, возможность изготавливать все искусственные волокна.

Неудобства метода:

- все химические реакции происходят на открытой площади, что способствует более легкому доступу для примесей. Чтобы предотвратить это,

должно быть подготовлено чистое пространство, которое охватывает все пространство реакции или оборудования;

- смещение исходного материала может причинять структурные нарушения в центре ядра;
- во время снятия сырьевого материала с заготовки на внутренней стенке трубки происходит натяжение, которое приводит к появлению трещин и иных нарушений в структуре волокна. Такое иногда случается, когда коэффициенты теплового расширения у ядра и оболочки разные. Из-за этого получение волокон с высокой NA затруднительно.

Решение этой проблемы было найдено в последнее время. Например, слой с $NA = 0,3$ можно получить, понижая в максимально возможной степени разность в коэффициентах теплового расширения материалов покрытия и ядра.

3.3.3. VAD-метод (axial vapor deposition)

В третьем методе, разработанном японскими фирмами, среди которых NTT, “Sumitomo” и др., реализована более сложная конструкция. Заготовка растет из заправки, расположенной на определенном расстоянии выше пламени горелки, имеющей сложную слоевую структуру, как у ролета.

В середину пламени подают смесь хлоридов германия и кремния, затем слой буферного газа, потом только хлорид кремния для чистого стекла, потом опять буферный газ и, в конце концов, на краю горелки, кислород с водородом — то, что, собственно говоря, и горит.

Вещество осаждается на только что созданную в этом же процессе поверхность. Однако расстояние до этой поверхности должно быть строго фиксированным, поэтому заготовка постоянно отодвигается от пламени горелки.

Таким методом можно создавать заготовки, которых хватает на несколько тысяч километров волокна, а в принципе, процесс может быть непрерывен — по мере изготовления заготовки из нее же можно вытягивать волокно. На сегодняшний день это единственный метод, позволяющий осуществить производство непрерывного оптического волокна.

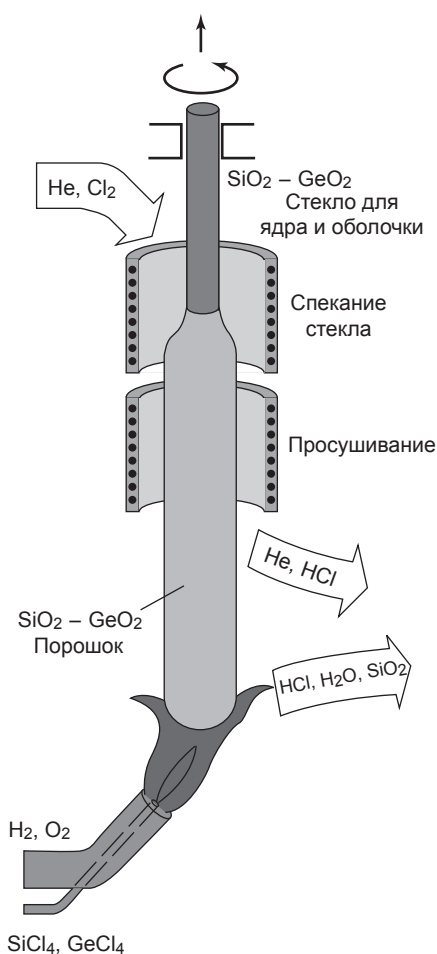


Рис. 3.7. Изготовление заготовки VAD методом

Преимущества метода:

- заготовка для оптоволокна может быть сделана непрерывно бесконечной длины;
- пламя горелки не двигается, и коэффициент газов, текущих от нее — всегда константа;
- производительность наплавки — приблизительно от 1 до 3 г/мин, максимум — приблизительно 6 г/мин;
- волокно с малыми потерями может быть легко изготовлено при использовании процесса обезвоживания;
- SM волокно легко изготавливается процессом VAD.

Неудобства метода:

- трудное управление пламенем для того, чтобы сделать необходимый

профиль;

- трудности в изготовлении волокна с широкой полосой пропускания.

3.3.4. Сравнение методов получения заготовки для оптоволокна

	MCVD	PMCVD	PCVD	OVD	VAD
Химическая реакция	окисление	окисление	окисление	гидролиз	гидролиз
Подача тепла	кислородно-водородная горелка	плазма (1 атм.), кислородно-водородная горелка	микроразрядная плазма (10 торр)	кислородно-водородная горелка	кислородно-водородная горелка
Скорость осаждения, г/мин	0,5 - 2	3 - 6	0,5 - 2,5	5	3 - 6
Размер заготовки (волокон. км)	50 - 60	70 - 90	SiCl ₄ = 100	50 - 70	50 - 70
Контроль поверхности	очень легко осуществим	легко осуществим	очень легко осуществим	легко осуществим	Для SM волокон легко осуществим, для GI волокон требуются некоторые технические приемы
Применение	AT&T и многие страны	AT&T (в разработке)	Philips	Corning	Япония

3.4. Вытяжка оптоволокна

Полученная в ходе первого этапа заготовка подвергается бесконтактному вытягиванию при температуре 2000 – 2100 °С для того, чтобы получить оптоволокно с геометрией и оптическими свойствами первоначального образца. Температура плавления кварца — приблизительно 1900 °С. Чем более узкая высокотемпературная зона создана для плавления кварца, тем лучше.

Главное требование — для тонкого волокна, которое будет протянуто при установившейся скорости в низкоконтракционной печной атмосфере, однородность диаметра волокна.

Кроме того, необходимо предпринять меры, чтобы не допустить возникновения центров нагрева (графит или окись циркония (оксид циркония)), которые могут возникнуть от загрязнения поверхности стекла, поскольку любые посторонние включения, существующие на горячей поверхности слоя образу-

ют микротрещины, приводящие к нарушениям в однородности слоя.

Вытянутое волокно должно иметь достаточную механическую прочность, чтобы выдержать практическое использование.

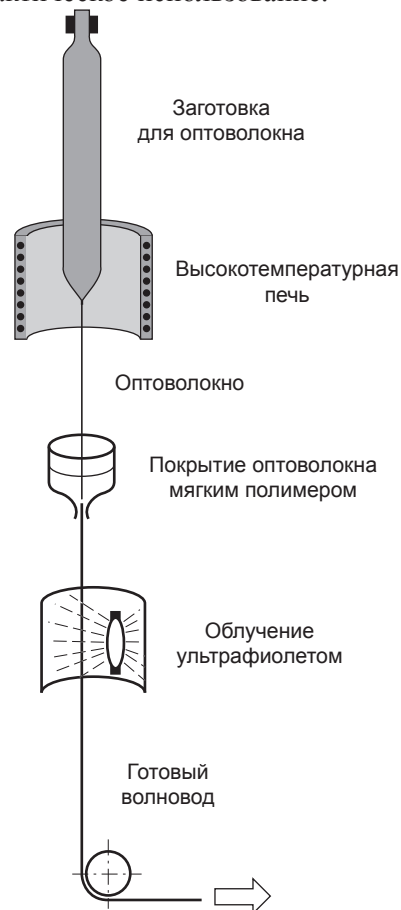


Рис. 3.8. Схематическое изображение процесса вытяжки волокна

Наружный диаметр слоя измерен неконтактным измерительным устройством, использующим светодиод. Измеренная величина наружного диаметра возвращается назад к кабестану натяжного приспособления, и скорость вращения кабестана автоматически изменяется, чтобы сохранить постоянный наружный диаметр слоя.

Температура поверхности заготовки и оптоволокна остается высокой в течение всего процесса, поэтому легко могут возникнуть поверхностные трещины и другие дефекты, так как пыль и влажность легко могут попасть на поверхность. Чтобы избежать этого, пластиковая оболочка должна быть нанесена на поверхность волокна немедленно после его получения.

По этой причине инструмент для нанесения покрытия расположен возле

нагревательной печи. Мягкая пластмассовая смола используется для магистрального покрытия, чтобы предотвратить увеличение микроразгибов. Наружный диаметр магистрального покрытия 0,25–0,4 мм. В некоторых случаях поверх мягкой пластмассы дополнительно наносят более твердый слой пластика.

Печь, используемая для вытяжки волокна, должна иметь следующие характеристики:

- легко регулируемая атмосфера и температура в печи;
- печь не выделяет сажу или пыль, посторонние частицы, и другие загрязняющие примеси;
- печь выдерживает высокую температуру (2200 °С);
- простое обслуживание печи;
- высокая надежность печи, длительный, устойчивый срок службы.

Для разогрева кварцевого стекла могут быть использованы следующие печи:

- кислородно водородная горелка;
- печь электрического сопротивления (графит);
- печь индукционного обогрева (графит);
- печь на двуокиси циркония;
- CO₂ лазер.

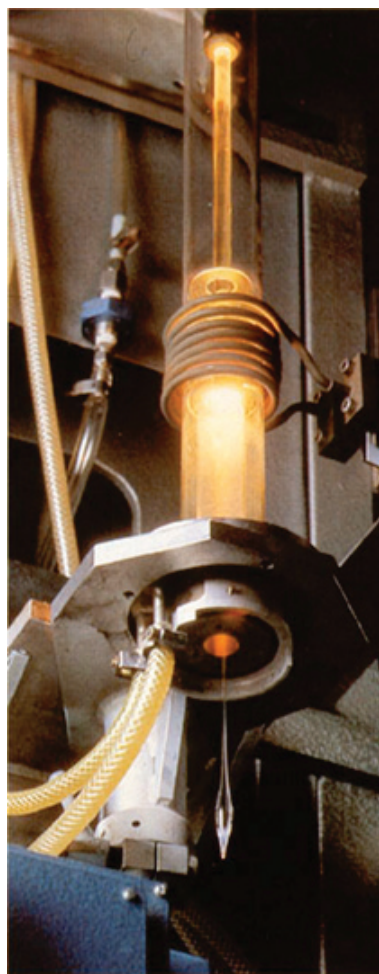


Рис. 3.9. Процесс вытяжки волокна

Глава 4. Источники оптического излучения

4.1. Оптические переходы

В твердых телах переходы электронов между состояниями возможны либо с испусканием, либо с поглощением квантов света. В зависимости от начального и конечного состояния различают четыре типа переходов: А – межзонные переходы, то есть переходы электронов между состояниями, расположенными в зоне проводимости и запрещенной зоне; В – внутризонные переходы, то есть переходы электронов между состояниями, расположенными только в зоне проводимости или только в запрещенной зоне; С – переходы между примесными состояниями, энергетические уровни которых расположены в запрещенной зоне; D_n – переходы между примесными состояниями и состояниями для электронов в зоне проводимости или дырок в валентной зоне. Для оптоэлектронных устройств наиболее важными являются оптические переходы типа А и типа D.

Межзонные переходы типа А обуславливают наиболее сильное поглощение или испускание света, с энергией, близкой к ширине запрещенной зоны: $h\nu > E_g$. Эти оптические переходы также называют фундаментальными.

Ширина запрещенной зоны полупроводниковых соединений зависит от вида элементов, входящих в его состав. Чем меньше длина химической связи в элементарной ячейке, тем, как правило, больше ширина запрещенной зоны. На рисунке 4.1 показана для различных полупроводниковых соединений (нитридов, фосфидов, арсенидов и селенидов) зависимость ширины запрещенной зоны от длины химической связи.

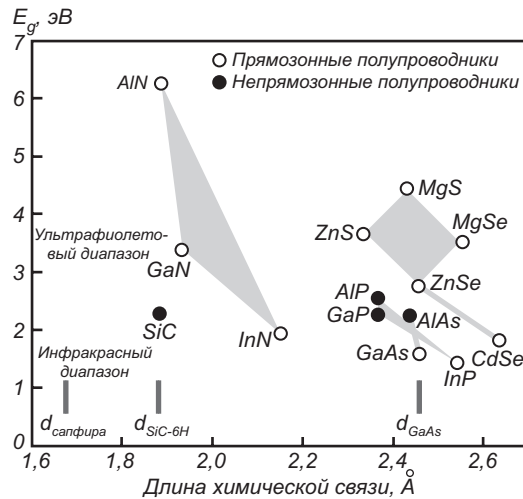


Рис. 4.1. Зависимость ширины запрещенной зоны для различных полупроводниковых соединений (нитридов, фосфидов, арсенидов и селенидов) от длины химической

связи [9]

В зависимости от типа кристаллической структуры и характера химических связей в полупроводниках реализуется либо та, либо иная форма зависимости энергии электронов E от волнового вектора k . Все полупроводниковые соединения можно подразделить на два типа этой зависимости — прямозонные и непрямозонные. В прямозонных полупроводниках энергетический минимум зоны проводимости находится при $k = 0$, также как и соответствующий минимум валентной зоны. В непрямозонных полупроводниках энергетический минимум зоны проводимости находится при k , отличном от нуля.

К полупроводникам с прямозонной энергетической структурой относятся GaAs, GaP, GaN, InGaAsP. К полупроводникам с непрямозонной энергетической структурой относятся Ge и Si.

При переходах электронов между состояниями должны соблюдаться законы сохранения энергии и квазиимпульса.

Расчет значения квазиимпульса фотона показывает, что его величина на несколько порядков меньше, чем квазиимпульс электрона. Отсюда следует, что при межзонных переходах в непрямозонных полупроводниках необходимо участие третьей частицы с малой энергией, но большим квазиимпульсом. Такой частицей в твердых телах является акустический фонон. Поскольку вероятность излучательных переходов с участием трех частиц ниже, чем двух, то, следовательно, в непрямозонных полупроводниках вероятность излучательной рекомбинации будет всегда меньше, чем в прямозонных.

Таким образом, для оптоэлектронных устройств предпочтительнее использовать полупроводниковые соединения с прямозонной энергетической структурой, спектральный диапазон которых лежит в области фундаментального поглощения. [2, 8, 19, 49, 66]

4.2. Излучательная рекомбинация

Физической основой излучения света (электромагнитного излучения) в твердых телах является рекомбинация неравновесных носителей. Процесс введения в какую-либо область твердого тела неравновесных носителей называют инъекцией. При анализе рекомбинации обычно имеют в виду, что при инъекции меняется концентрация неосновных носителей, в то время как концентрация основных носителей сохраняется. Это условие называют условием низкого уровня инъекции.

После снятия возмущения (прекращения инъекции) концентрация неравновесных носителей убывает во времени по экспоненциальному закону вследствие рекомбинации.

Поскольку от плоскости инъекции неравновесные носители распространяются на расстояние, равное диффузионной длине, то и излучательная рекомбинация, то есть генерация квантов света, будет происходить только в этой

области.

4.3. Методы инжекции

Основным методом создания неравновесных носителей в оптоэлектронных устройствах является инжекция неосновных носителей через прямосмещенный электронно-дырочный переход (р-п или гетеропереход).

4.3.1. Условие односторонней инжекции в р-п переходе

Вольт-амперная характеристика р-п перехода описывается следующим соотношением:

$$j = \left(\frac{qp_{n0}D_p}{L_p} + \frac{qn_{p0}D_n}{L_n} \right) (e^{\beta V_G} - 1). \quad (4.1)$$

При прямом смещении в токе р-п перехода присутствуют обе инжекционные компоненты: электронная и дырочная. Для большинства оптоэлектронных устройств необходимо, чтобы в инжекционном токе присутствовала только одна компонента — электронная или дырочная.

Из соотношения 4.3.1 следует, что доминирующая инжекционная компонента будет того типа, концентрация основных носителей в котором выше, т.е. в несимметричных р-п переходах р+n или n+r инжекция будет преимущественно дырок или электронов соответственно. Для несимметричных р-п переходов величина основной инжекционной компоненты в токе р-п перехода выражается соотношением:

$$\frac{j_p}{j_{p-n}} = 1 - \frac{N_{дБ}}{N_{АЭ}}. \quad (4.2)$$

Таким образом для реализации односторонней инжекции в р-п переходе необходимо иметь эмиттер этого перехода легированным, как правило, до вырождения, а базу — слаболегированной, по крайней мере на 3–4 порядка меньше, чем эмиттер.

4.3.2. Условие односторонней инжекции в гетеропереходе

Для гетеропереходов величина полного тока также выражается соотношением 4.1. При анализе вкладов дырочного и электронного инжекционного тока необходимо учесть, что р- и n-области в гетеропереходах состоят из разных полупроводников. В связи с этим значения собственной концентрации n_i , диффузионной длины и коэффициентов диффузии будут различными.

Как правило, в гетеропереходах ширина запрещенной зоны компонент гетероперехода отличается в 1,5–2 раза. Вследствие этого, значение собственной концентрации n_i будет отличаться на много порядков. Например, для гетеропереходов nGe-pGeAs ширины запрещенных зон E_g составляют 0,77 эВ и 1,43 эВ, а значение собственной концентрации $n_i = 1,6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ и $2 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3}$ соответственно. Для гетеропереходов доля инжекционного тока в полном токе гетероперехода будет

$$\frac{j_p}{j_{p-n}} = 1 - \frac{n_{iЭ}^2}{n_{iБ}^2} \frac{N_{дБ}}{N_{АЭ}}. \quad (4.3)$$

Из уравнения 4.3 следует, что при прочих равных условиях инжекционная компонента тока из узкозонного полупроводника будет всегда выше, чем из широкозонного. Использование гетеропереходов может обеспечить одностороннюю инжекцию из слаболегированного полупроводника в сильнолегированный, что невозможно для p-n гомопереходов.

4.4. Светодиоды

Светодиодом, или излучающим диодом, называют полупроводниковый диод на базе p-n либо гетероперехода, излучающий кванты света при протекании через него прямого тока.

По характеристике излучения светодиоды разделяют на две группы:

- светодиоды с излучением в видимой части спектра;
- светодиоды с излучением в инфракрасной части диапазона.

Спектральная характеристика излучения светодиода представляет из себя монохроматическую линию, полушириной kT и центрированную при значении $h\nu = E_g$, при этом интенсивность излучения описывается соотношением:

$$I(h\nu) = V^2 (h\nu - E_g)^{3/2} e^{-\frac{(h\nu - E_g)}{kT}} \quad (4.4)$$

На рисунке 4.20 приведен в качестве примера спектр излучения красного светодиода АЛ112 при комнатной температуре, который хорошо описывается этим соотношением.

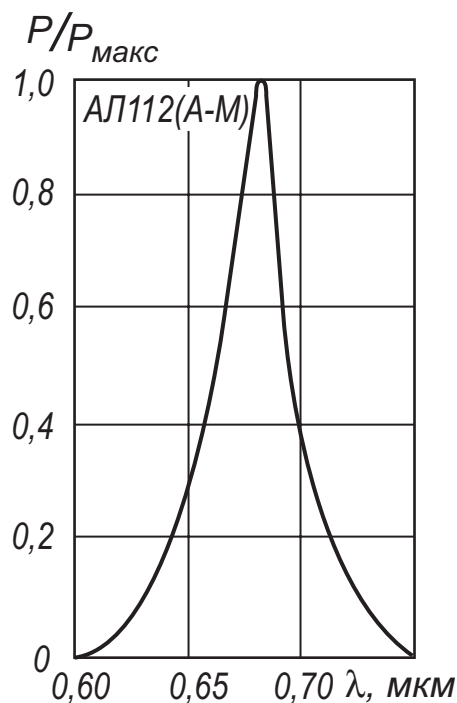


Рис. 4.2. Спектр излучения красного светодиода АЛ112 при температуре $T = 300\text{K}$ [76]

4.4.1. Светодиоды видимого диапазона

Спектральная чувствительность человеческого глаза находится в диапазоне цветов от фиолетового до красного и имеет максимум для зеленого цвета. По длинам волн этот диапазон находится от 0,39 мкм до 0,77 мкм, что соответствует энергии квантов света от 2,8 эВ до 1,8 эВ.

На рисунке 4.21 приведена диаграмма хроматичности, показывающая соотношение между тремя основными компонентами цвета (красный, зеленый, синий), необходимых для получения заданного цвета. Все многообразие цветов находится во внутренних пределах выделенного контура. По осям X и Y отложены доли двух компонент, определяющие вклад третьей. Вдоль контура цифрами указаны длины волн монохроматического излучения, соответствующие тому или иному цвету. Цифрами в кружочках указано расположение на диаграмме некоторых типовых светодиодов, сформированных из различных типов полупроводниковых соединений.

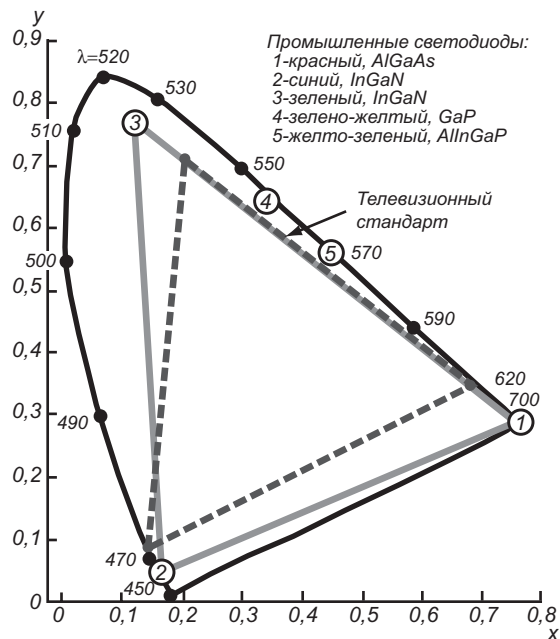


Рис. 4.3. Диаграмма хроматичности, показывающая соотношение между тремя основными компонентами цвета (красный, зеленый, синий), необходимых для получения заданного цвета [9]

Из вышеизложенного следует, что в качестве излучательной среды в светодиодах видимого диапазона необходимо использовать прямозонные полупроводники с шириной запрещенной зоны 1,8–2,8 эВ. [8] Одним из распространенных полупроводниковых соединений, удовлетворяющим перечисленным характеристикам, является твердый раствор $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$. При изменении процентного содержания фосфора P от 0 до 1 ширина запрещенной зоны этого соединения меняется ($x = 0$, GaAs, $E_g = 1,424$ эВ; $x = 1$, GaP, $E_g = 2,31$ эВ). Ниже на рисунке 4.4 приведены зонные диаграммы $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ с различными значениями компонентов фосфора P и мышьяка As.

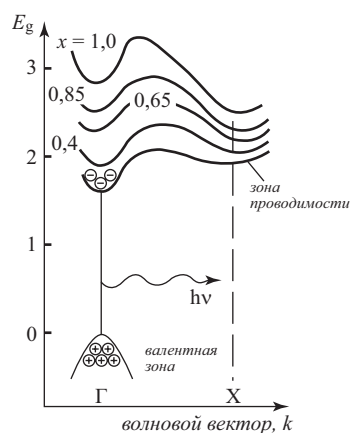


Рис. 4.4. Энергетическая зонная структура $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$. Значения состава соответствуют красному ($x = 0,4$), оранжевому (0,65), желтому (0,85) и зеленому (1,0) свету [8, 19]

Из рисунка 4.4 видно, что при $x = 0,45$ и значении ширины запрещенной зоны $E_g = 1,77$ эВ, полупроводник переходит из прямозонного в непрямозонный.

Для повышения эффективности излучательных переходов при $x > 0,45$ в полупроводник вводят излучательные центры, например азот (N). Атомы азота, внедренные в полупроводник, замещают атомы фосфора в узлах решетки. Азот и фосфор имеют одинаковую внешнюю электронную структуру (оба относятся к V группе элементов периодической системы), а структуры их внутренних оболочек сильно различаются. Это приводит к возникновению вблизи зоны проводимости электронного уровня захвата. Полученный таким образом рекомбинационный центр называется изоэлектронным центром. В нормальном состоянии изоэлектронные центры нейтральны. В материале p-типа инжектированный электрон сначала захватывается на центр. Заряженный отрицательно центр затем захватывает дырку из валентной зоны, формируя связанный экситон. Последующая аннигиляция этой электронно-дырочной пары приводит к рождению фотона с энергией, примерно равной разности между шириной запрещенной зоны и энергией связи центра. Так как захваченный электрон сильно локализован на центре, его импульс рассеивается. Таким образом обеспечивается преобразование квазиимпульса, вследствие чего вероятность прямого перехода существенно возрастает. В непрямозонных материалах, таких, как GaP, описанный механизм излучательной рекомбинации является преобладающим.

Для приборной реализации всей цветовой гаммы используют широкий спектр полупроводниковых материалов. Светодиоды выпускаются красного (1,8 эВ GaP: ZnO, $\text{GaAs}_{0,6}\text{P}_{0,4}$), оранжевого ($\text{GaAs}_{0,35}\text{P}_{0,65}$), желтого ($\text{GaAs}_{0,14}\text{P}_{0,86}$), зеленого (2,3 эВ GaP, ZnTe), голубого (2,4 эВ GaAs-ErYb, SiC, CdS), фиолетового (2,8 эВ GaN) цветов свечения. На рисунке 4.5 приведены спектральные характеристики светодиодов видимого и инфракрасного диапазонов с указанием

стехиометрии полупроводниковых соединений.

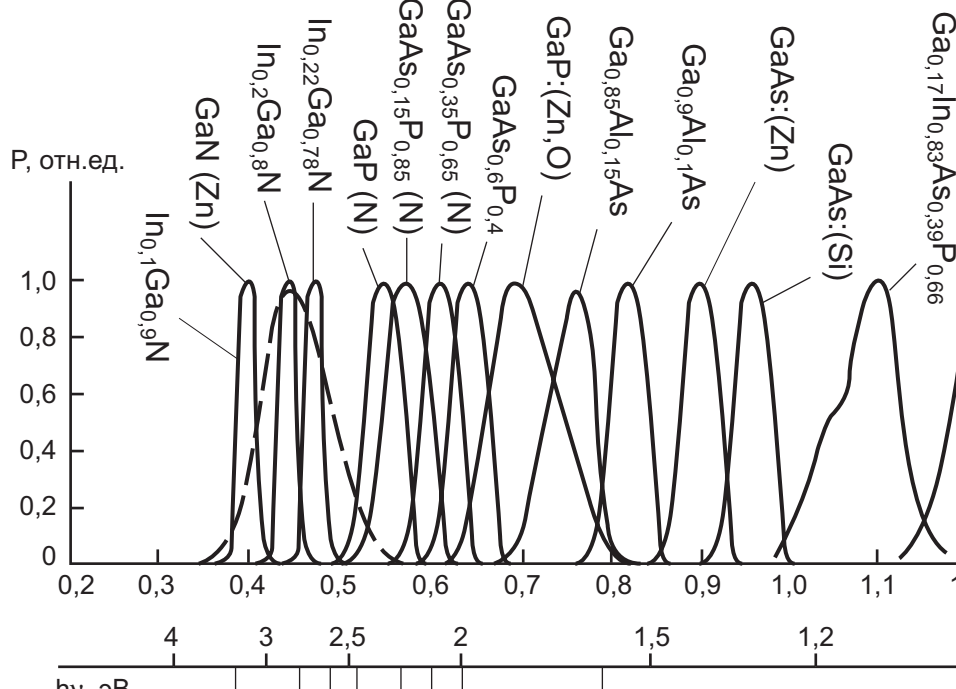


Рис. 4.5. Спектральные характеристики светодиодов, изготовленных из различных полупроводниковых материалов [84]

Конструктивно в светодиодах используют полупроводниковые структуры с плоской геометрией, изготовленные по планарной технологии (см. рис. 4.6). Обычно прямозонные светодиоды (красное излучение) формируются на подложках GaAs (а), тогда как непрямозонные (оранжевое, желтое и зеленое излучения) — на подложках GaP (б). При использовании подложки GaAs на нее наращивается переходный слой $\text{GaAs}_{(1-x)}\text{P}_x$ переменного состава с x , изменяющимся в пределах 0–0,4, а затем слой $\text{GaAs}_{(1-x)}\text{P}_x$ с постоянным составом.

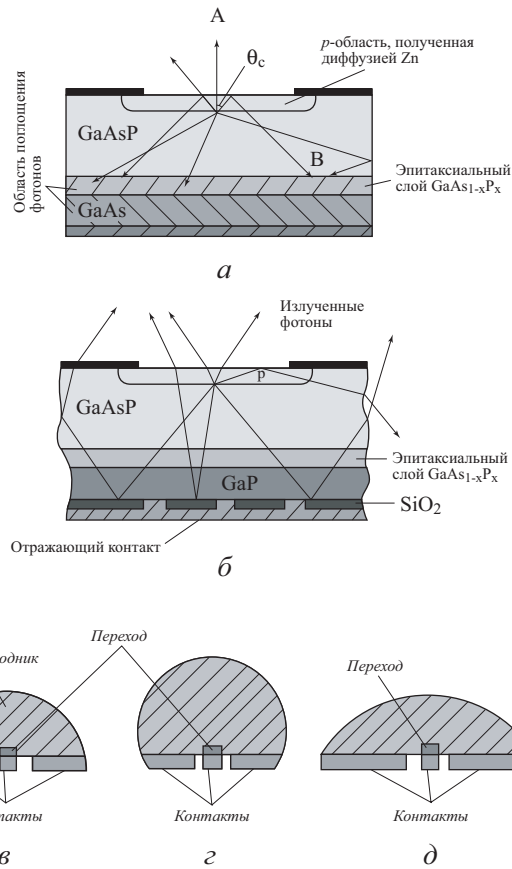


Рис. 4.6. Конструкция светодиодов и разрез трех светодиодов с различными типами корпусов: в — полусфера; г — усеченная сфера; д — параболоид

Переходная область ограничивает образование безызлучательных центров, обусловленных различием решеток. Фотоны, генерируемые в области перехода, испускаются во всех направлениях, однако наблюдателя достигает лишь та их часть, которая проходит через поверхность.

Уменьшение количества излучаемых светодиодом фотонов обусловлено поглощением в материале светодиода, потерями за счет отражения и потерями за счет полного внутреннего отражения. Потери, связанные с поглощением, весьма существенны в светодиодах на подложках GaAs (а), т.к. в этом случае подложка поглощает примерно 85 % фотонов, излучаемых переходом. В светодиодах на подложках GaP (б) поглощение составляет ~25 %, и эффективность излучения может быть существенно увеличена.

Полная эффективность преобразования ζ_F электрического сигнала в оптический дается следующим выражением: [8, 54]

$$\eta_F = \frac{q}{P}(1-R)(1-\cos\theta_c) \frac{\int \Phi(\lambda)(1+R_1 e^{-2\alpha_1(\lambda)x_1}) e^{-\alpha_2(\lambda)x_2} d\lambda}{\int \Phi(\lambda) d\lambda};$$

$$\eta_F \approx \frac{4n_1 n_2}{(n_1 + n_2)^2} (1 - \cos\theta_c), \quad (4.5)$$

где P — мощность на входе, $\frac{4n_2 n_1}{(n_2 + n_1)^2}$ — коэффициент передачи, равный $\frac{4n_2}{(n_2 + 1)^2}$ для границы раздела полупроводник-воздух, $(1 - \cos\theta_c)$ — телесный угол, $\frac{\hat{n} \cdot \hat{n}_i}{|\hat{n}|^2}$ — скорость генерации фотонов в единицах $\frac{\hat{n} \cdot \hat{n}_i}{|\hat{n}|^2}$, R_1 — коэффициент отражения от тылового контакта, α и x — соответственно коэффициенты поглощения и толщина р- и n-областей прибора.

На рисунке 4.6в, г, д показаны поперечные разрезы светодиодов, которые имеют параболическую, полусферическую и усеченно-сферическую геометрию. Основное отличие этих трех структур от структуры с плоской геометрией состоит в том, что телесный угол для них равен 1. Таким образом, отношение эффективностей равно

$$\frac{\eta}{\eta_F} \approx \frac{1}{1 - \cos\theta_c} = \frac{1}{1 - \sqrt{1 - \frac{1}{n_2^2}}},$$

$$\frac{\eta}{\eta_F} = 2n_2^2 \quad \text{при } n_2 \gg 1. \quad (4.7)$$

Это означает, что для структур на фосфиде галлия GaP с показателем преломления $n_2 = 3,45$ при данной геометрии можно ожидать увеличения эффективности излучения на порядок. На рисунке 4.7 в качестве примера приведена диаграмма направленности излучения красного светодиода АЛ112. [76]

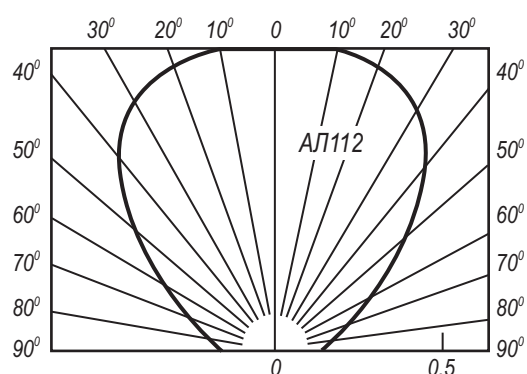


Рис. 4.7. Диаграмма направленности излучения красного светодиода АЛ112

4.4.2. Светодиоды инфракрасного диапазона

Областями применения светодиодов ИК-излучения являются оптоэлектронные устройства коммутации, оптические линии связи, системы дистанционного управления. Наиболее распространенный в настоящее время инфракрасный источник — это светодиод на основе GaAs ($\lambda = 0,9$ мкм). Он обладает наибольшей эффективностью электролюминесценции в основном благодаря тому, что среди всех прямозонных полупроводников GaAs является технологически наиболее освоенным. Для изготовления инфракрасных светодиодов используются многие другие полупроводники, имеющие запрещенную зону шириной менее 1,5 эВ. К ним относятся твердые растворы, в состав которых входят три или четыре элемента III и V групп периодической системы. Среди них твердый раствор переменного состава GaInAsP ($\lambda = 1,0 - 1,3$ мкм), наиболее популярный $\text{Ga}_{0,28}\text{In}_{0,72}\text{As}_{0,6}\text{P}_{0,4}$ ($\lambda = 1,26$ мкм).

4.4.3. Голубые светодиоды на соединениях нитрида галлия

Нитриды элементов третьей группы (GaN, AlN, InN) и тройные соединения на их основе являются широкозонными полупроводниками с прямыми оптическими переходами. На рисунке 4.8 показаны значения ширины запрещенной зоны для этих полупроводников. Как следует из данных, приведенных на рисунке 4.8, нитрид галлия и тройные соединения на его основе являются наиболее перспективными материалами для изготовления голубых светодиодов и светодиодов ультрафиолетовой области света.

Реализация этих преимуществ значительное время сдерживалась технологическими трудностями получения высококачественных пленок GaN. Эти трудности были обусловлены высокой температурой плавления GaN, рассогласованием параметров решеток и коэффициентов теплового расширения

GaN с сапфиром, кремнием и другими базовыми полупроводниковыми подложками. В середине девяностых годов был реализован светодиод на основе гетероструктуры InGaN/GaN с эмиссией излучения в планарном направлении. Особенностью таких светодиодов является высокая интенсивность люминесценции, достигающая (2 – 3) кд и высоким значением квантового выхода $\zeta = 5,4\%$. На рисунке 4.8 показана типичная структура светодиода с планарной генерацией излучения на основе GaN. [27, 49]

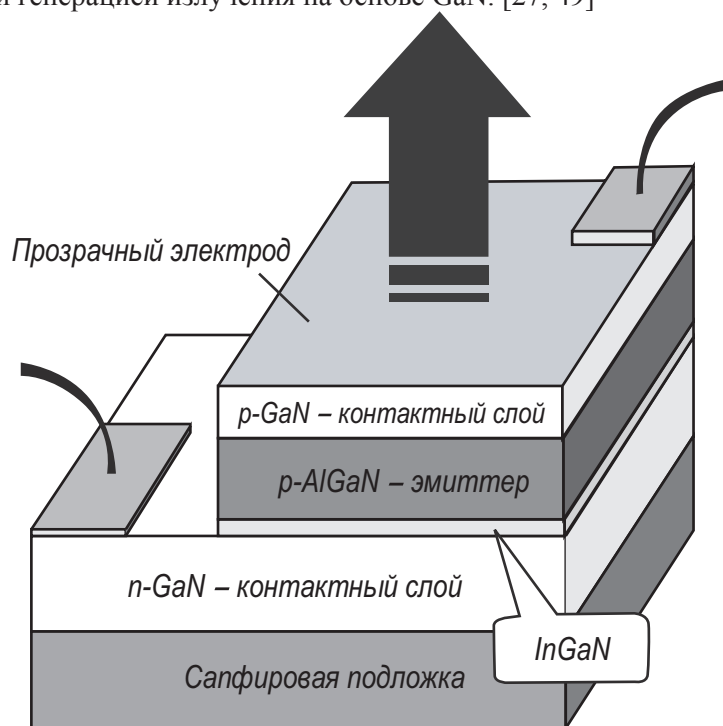


Рис. 4.8. Типовая структура светодиода с планарной генерацией излучения на основе гетероструктур InGaN/GaN [27, 49]

Внутренний слой InGaN имеет меньшую ширину запрещенной зоны, чем наружный слой GaN, поэтому верхний электрод является прозрачным для оптического излучения видимого диапазона.

Рабочая структура синих и зеленых светодиодов на основе соединений GaN приведена на рисунке 4.9.

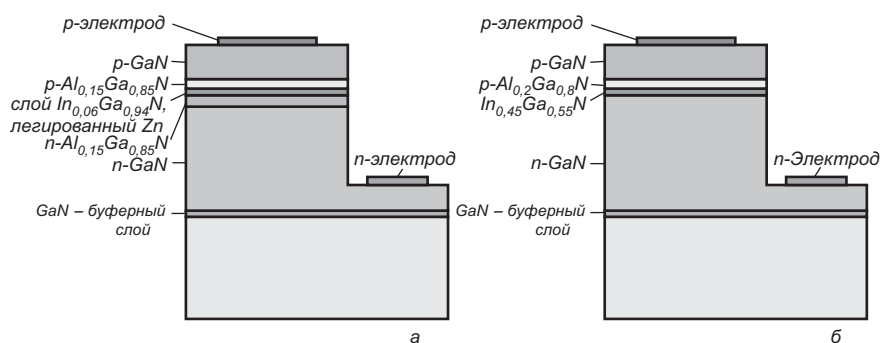


Рис. 4.9. Светодиоды на основе гетероструктур InGaN/GaN [9, 27]

- а) голубой светодиод с двойной гетероструктурой;
- б) зеленый светодиод с квантовой ямой

В синих светодиодах используется активный слой $\text{In}_{0,06}\text{Ga}_{0,94}\text{N}$, легированный цинком (рис. 4.9а). В зеленых светодиодах активный слой толщиной 3 нм имеет состав $\text{In}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{N}$. При реализации зеленого светодиода был использован гетеропереход p-AlGaIn и n-GaN , выращенный на сапфире. Тонкий слой InGaIn с одной стороны является демпфером между p-AlGaIn и n-GaN , сводя к минимуму рассогласование решеток, а с другой стороны формирует одиночную квантовую яму, где происходит эффективная излучательная рекомбинация. Изменение толщины активного слоя меняет энергетический спектр 2D электронов и позволяет управлять длиной волны излучения светодиода. Такая приборная реализация позволяет повысить силу света до 10 кд на длине волны 520 нм с квантовой эффективностью 6,3 % и временем жизни светодиода 50 тысяч часов.

Возможность создания экономичных и долговечных светодиодов на основе нитрида галлия, согласованных по спектру с естественным освещением и чувствительностью человеческого глаза, открывает новые перспективы для их нетрадиционного использования. Среди них использование светодиодов в транспортных многосекционных светофорах, индивидуальных микромошных лампочках освещения (при мощности 3 Вт световой поток составляет 85 Лм), в осветительных приборах автомобилей.

4.5. Полупроводниковые лазеры

Экспериментально излучение полупроводникового лазера было получено в 1962 году при температуре жидкого азота. Однако, необходимая для генерации лазерного излучения плотность тока накачки была такой большой, что ни одно полупроводниковое устройство не могло работать непрерывно в таком

режиме, из-за чего полупроводниковые лазеры не могли найти практического применения.

В 1970 году Алфёровым Жоресом, Хаяши Изуо и Панишем Муртоном были продемонстрированы полупроводниковые лазеры излучающие в непрерывном режиме при комнатной температуре. Ими была использована новая конструкция лазера - двойная гетероструктура, - когда материал активной зоны лазера GaAs располагается между двумя слоями AlGaAs. Пороговая плотность тока - минимальная плотность тока необходимая для генерации лазерного излучения, основная характеристика полупроводникового лазера - была существенно снижена за счет эффекта двойного ограничения. Электроны и дырки в активном слое лазера ограничены слоями широкозонного материала, в то же время разница в показателях преломления материала активной зоны и эмиттеров создает оптическое ограничение для излучения лазера, оптический волновод.

Работая на фирме Bell Labs (США), Хаяши предложил использовать концепцию двойной гетероструктуры для создания полупроводниковых лазеров, в свою очередь Паниш разработал метод послойного выращивания таких кристаллов. Их сотрудничество привело к успеху. Однако ещё за несколько месяцев до того, Алфёровым также были получены результаты по лазерной генерации при комнатной температуре. Для создания кристаллов использовалась схожая технология.

Технология полупроводниковых лазеров на двойной гетероструктуре привела к практическому использованию полупроводниковых лазеров. А потребительские характеристики полупроводниковых лазеров: низкая цена, микроскопические размеры, высокая эффективность, - определили бурное развитие оптоэлектроники. Другая технологическая особенность - возможность выращивания кристаллов с различным составом активной области - привела к созданию различных лазеров от инфракрасных до излучающих в видимой области спектра, - эта возможность привела к широкому практическому применению полупроводниковых лазеров в электронном оборудовании, что и привело к революционным изменениям в индустриальной и социальной структуре общества.

Полупроводниковые лазеры, доведенные до практического использования лауреатами Премии, сегодня применяются в проигрывателях видео- и компакт-дисков, в печатающих устройствах, в медицине и в волоконно-оптических линиях связи, обеспечивая работу телефонии и сети Интернет. [3]

Полупроводниковым лазером называют оптоэлектронное устройство, генерирующее когерентное излучение при пропускании через них электрического тока.

Генерация стимулированного когерентного излучения, или лазерный эффект, была разработана для газовых лазеров и хорошо описана, используя представление об электронных уровнях в атомных системах.

Рассмотрим два энергетических уровня E_1 и E_2 . E_1 характеризует основ-

ное, а E_2 — возбужденное состояние (рис. 4.10).

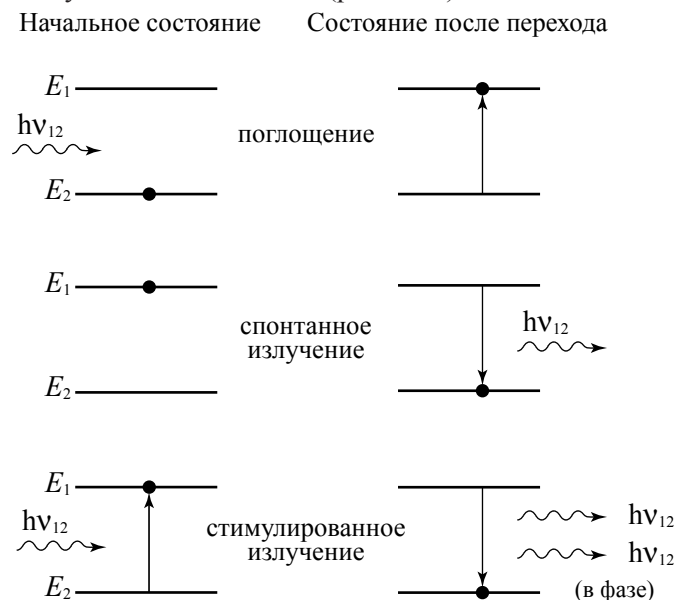


Рис. 4.10. Схема энергетических уровней, иллюстрирующая спонтанное и стимулированное излучение

Любой переход между этими состояниями сопровождается испусканием или поглощением фотона с частотой ν_{12} , определяемой из соотношения $h\nu_{12} = E_2 - E_1$. При обычных температурах большинство атомов находится в основном состоянии. Эта ситуация нарушается в результате воздействия на систему фотона с энергией, равной $h\nu_{12}$. Атом в состоянии E_1 поглощает фотон и переходит в возбужденное состояние E_2 . Это и составляет процесс поглощения излучения. Возбужденное состояние является нестабильным и через короткий промежуток времени без какого-либо внешнего воздействия атом переходит в основное состояние, испуская фотон с энергией $h\nu_{12}$ (спонтанная эмиссия). Время жизни, связанное со спонтанной эмиссией (т.е. среднее время возбужденного состояния), может изменяться в широком диапазоне, обычно в пределах 10^{-9} – 10^{-3} с, в зависимости от параметров полупроводника, таких, как структура зон (прямая или непрямая) и плотность рекомбинационных центров. Столкновение фотона, обладающего энергией $h\nu_{12}$, с атомом, находящимся в возбужденном состоянии, стимулирует мгновенный переход атома в основное состояние с испусканием фотона с энергией $h\nu_{12}$ и фазой, соответствующей фазе падающего излучения (стимулированное излучение).

4.х.х. Зонная диаграмма и конструкция полупроводникового лазера

Можно выделить два основных типа полупроводниковых лазеров, а именно: лазер на гомопереходе и лазер на двойном гетеропереходе (ДГ). Первый интересен в чисто историческом (так были устроены первые полупроводниковые лазеры) и физическом смыслах, а также тем, что позволяет лучше оценить преимущества лазеров на ДГ, которые работают в непрерывном режиме и при комнатной температуре. Спектр применений лазеров на ДГ интенсивно расширяется.

Лазер на гомопереходе

В подобных лазерах р- и n-области выполнены на одном материале. Причем обе области являются вырожденными полупроводниками с концентрацией носителей порядка 10^{18} ат/см³. При такой концентрации уровень Ферми E_{fn} для р-области попадает в валентную зону, а уровни Ферми E_{fn} для n-области - в зону проводимости (рис.2.4.1, а). В отсутствие напряжения оба уровня имеют одну и ту же энергию. Когда напряжение будет приложено, то оба уровня разбегутся на величину $\Delta E = e \cdot U$. Зонная структура примет вид, изображенный на рис.2.4.1, б. Из рисунка видно, что в области р - n - перехода возникает инверсия населенностей. Дальнейший процесс рекомбинации вызовет лазерную генерацию.

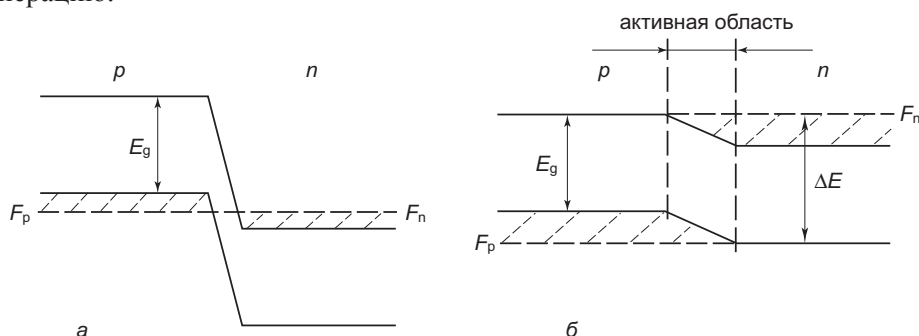


Рис. 4.11. Принцип действия полупроводникового лазера на основе р-n - перехода:

а - отсутствие смещения; б - при смещении в прямом направлении

Конструктивно активный слой из р-n - перехода помещается между двумя металлическими пластинами с припаянными электродами. Типичный размеры активной области не превышает 200-500 мкм, отражающие поверхности создаются путем скалывания выходных граней полупроводникового монокристалла.

В таком виде лазер имеет недостаток, заключающийся в том, что размер лазерного пучка (~ 5 мкм) значительно превышает активную область в поперечном направлении ($d = 1$ мкм). В результате чего проникает далеко в р- и n- области, где испытывает сильное поглощение. По этой причине пороговая

плотность тока достигает большой величины ($\sim 10^5$ А/см для GaAs) и лазер быстро выходит из строя от перегрева. Работоспособен такой лазер только в импульсном режиме, а для непрерывного режима излучения необходимо глубокое охлаждение.

Лазер на двойном гетеропереходе

Ограничений, отмеченных в п. 2.4.1., удалось избежать в конструкции лазера на двойном гетеропереходе (ДГ). Схематично одна из типичных конструкций такого лазера изображена на рис.2.4.2.

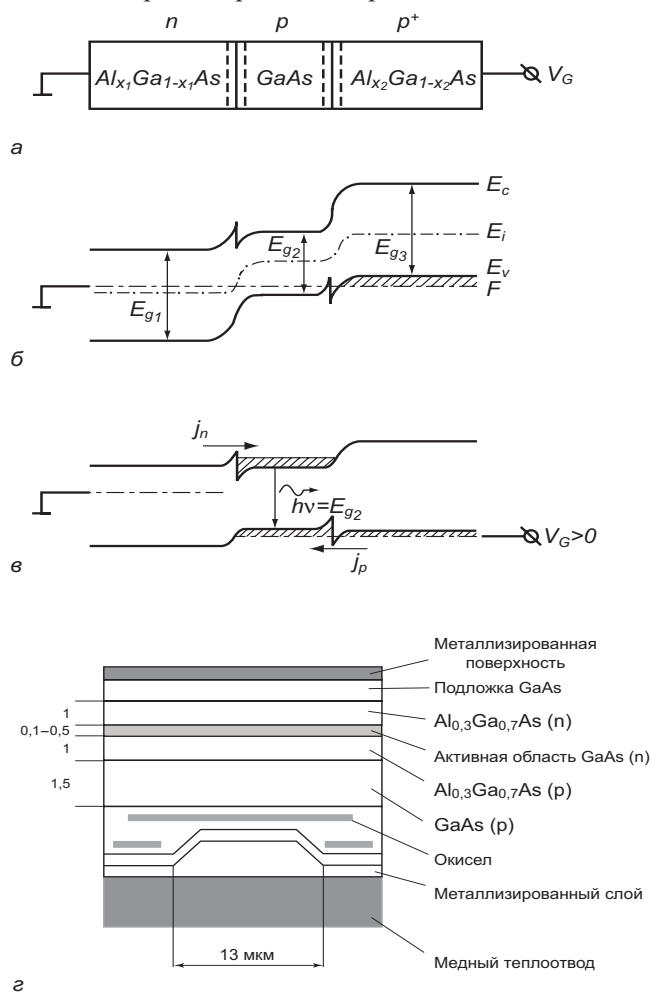


Рис. 4.12. Схема полупроводникового лазера на двойном гетеропереходе. Активная область - слой из GaAs (n)

В этом лазерном диоде реализованы два перехода между различными ма-

териалами: $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$ (p) - GaAs и GaAs - $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$ (n).

Активная область представляет собой слой GaAs толщиной всего 0,1-0,3 мкм. В такой структуре удалось снизить пороговую плотность тока почти на два порядка ($\sim 10^3 \text{ A/cm}^2$) по сравнению с устройством на гомопереходе. В результате чего лазер получил возможность работать в непрерывном режиме при комнатной температуре. Уменьшение пороговой плотности тока происходит из-за того, что оптические и энергетические характеристики слоев, участвующих в переходах таковы, что все инжектированные электроны и оставшиеся дырки эффективно удерживаются только в активной области; лазерный пучок сосредоточен также только в активной области, где и происходит его основное усиление и распространение; лазерный пучок не испытывает по этим причинам поглощения в областях, соседних с активной.

Длина волны излучения такого лазера ($\lambda = 0,85 \text{ мкм}$) попадает в диапазон, в котором оптический волоконный кварц имеет минимум потерь. В настоящее время разработаны и широко внедряются лазеры на материалах GaAs с присадками In, P и др. с $\lambda = 1,3$ и $1,6 \text{ мкм}$, также попадающие в окна прозрачности оптического кварца. Уменьшением ширины полосы лазеров с полосковой геометрией удалось довести пороговый ток до 50 мА, КПД до 60% (величина, рекордная для всех видов существующих в настоящее время лазеров). [4]

Принцип действия и конструктивные особенности полупроводниковых лазеров во многом сходны с полупроводниковыми светодиодами.

Инверсная населенность, необходимая для стимулированного когерентного излучения, формируется путем инжекции через прямосмещенный p-n переход. Резонатор, необходимый для усиления когерентного излучения формируется путем шлифовки граней кристалла.

Для того, чтобы переходы с излучением преобладали перед переходами с поглощением необходимо область рекомбинации в полупроводниковом лазере легировать до вырождения.

При прямом смещении в обе p^+ и n^+ происходит инжекция неравновесных носителей, и в этих областях на расстояниях порядка диффузионной длины L_p , L_n будет происходить рекомбинация неравновесных носителей.

При малых плотностях тока (низкий уровень инжекции) высока вероятность спонтанного излучения и спектральная линия достаточно широкая. При высоких уровнях тока (высокий уровень инжекции) вероятность стимулированного излучения возрастает как по отношению к вероятности спонтанного излучения, так и по отношению к вероятности поглощения, и на спектральной характеристике появляется узкая линия когерентного излучения. Значение тока, при котором появляется линия когерентного излучения, называют пороговым током.

На рис. 2.4.3 показана базовая структура лазера с p-n переходом. Две боковые грани структуры скалываются или полируются перпендикулярно плоскостям

ти перехода. Две другие грани делаются шероховатыми для того, чтобы исключить излучение в направлениях, не совпадающих с главным. Такая структура называется резонатором Фабри-Перо.

Смещение лазерного диода в прямом направлении вызывает протекание тока. Вначале, при низких значениях тока, возникает спонтанное излучение, распространяющееся во всех направлениях. При увеличении смещения ток достигает порогового значения, при котором создаются условия для стимулированного излучения, и p-n переход испускает монохроматичный строго направленный луч света.

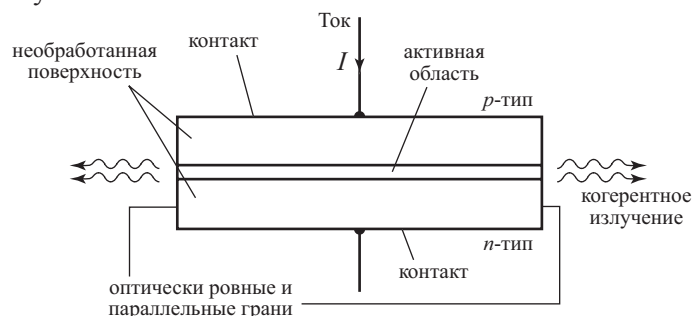


Рис. 4.13.

С целью уменьшения пороговой плотности тока были реализованы лазеры на гетероструктурах (с одним гетеропереходом - $n\text{GaAs-pGaAs-Al}(x)\text{Ga}(1-x)\text{As}$; с двумя гетеропереходами - $\text{Al}(x)\text{Ga}(1-x)\text{As-GaAs-Al}(x)\text{Ga}(1-x)\text{As}$).

В структуре с двумя гетеропереходами носители сосредоточены внутри активной области d , ограниченной с обеих сторон потенциальными барьерами; излучение также ограничено этой областью вследствие скачкообразного уменьшения показателя преломления за ее пределы. Эти ограничения способствуют усилению стимулированного излучения и соответственно уменьшению пороговой плотности тока.

На рис. 2.4.4 приведена зависимость J_{th} от рабочей температуры для трех лазерных структур. Самая слабая зависимость от температуры наблюдается для лазеров на двойных гетероструктурах (ДГ-лазерах). Поскольку J_{th} в ДГ-лазерах при 300К может достигать значений порядка 10^3 A/cm^2 и менее, оказывается возможным реализовать режим непрерывной генерации при комнатной температуре. Благодаря этому лазеры нашли широкое применение в науке и промышленности, в частности в ВОЛС.

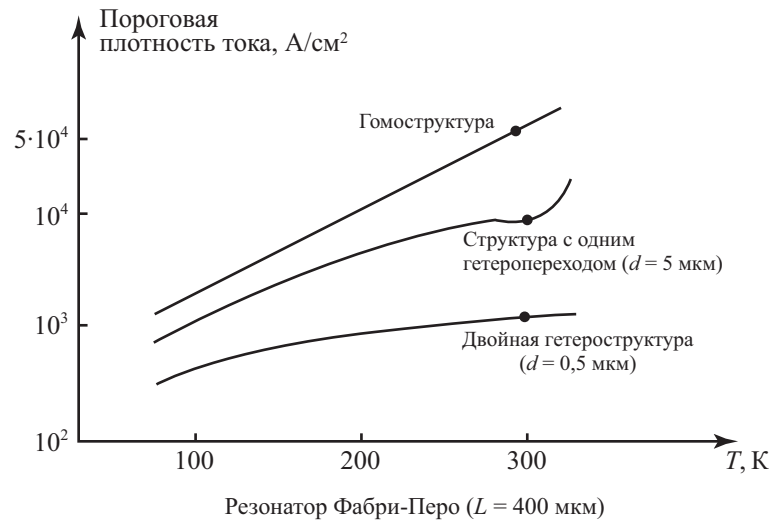


Рис. 4.14.

4.х.х Полупроводниковые лазеры на фотонных кристаллах

Ученым из компании Bell Labs удалось разработать лазер нового поколения, используя в качестве полупроводника для изготовления многокаскадного полупроводникового лазера фотонные кристаллы. Полученный лазер обладает уникальными свойствами. Например, его излучение может быть направлено в любом, заранее выбранном, направлении, что позволяет встраивать его в обычную полупроводниковую микросхему.

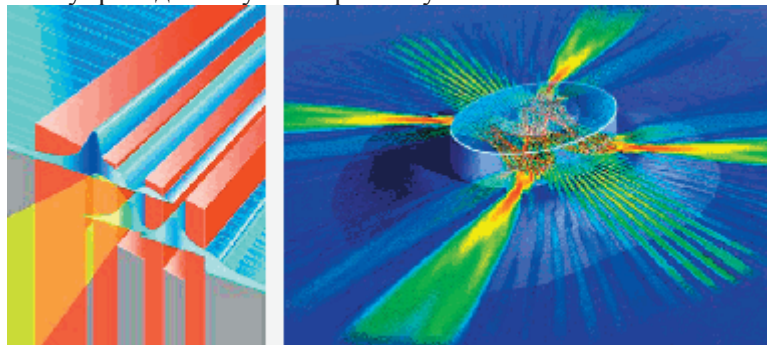


Рис. 4.15.

Обычный многокаскадный полупроводниковый лазер, представляющий собой набор слоев из тонких полупроводниковых пластин, может излучать свет лишь в стороны, как показано на втором рисунке. Новый лазер на фотонных кристаллах избавлен от этого недостатка и может излучать свет в любом, заранее выбранном направлении.

Фотонный кристалл, являющийся неотъемлемой частью нового лазера, представляет собой полупрозрачный диэлектрик с определенной периодической структурой и уникальными оптическими свойствами. Уникальность его заключается в том, что фотонный кристалл обеспечивает почти полное управление движением проходящего через него света. Такие возможности достигаются за счет наличия в кристалле диэлектрика равномерно распределенных мельчайших отверстий. Их диаметр подобран таким образом, что они пропускают световые волны лишь определенной длины, а остальные частично отражают или поглощают. При определенном физическом воздействии на кристалл, например, звуковыми волнами, длина световой волны, пропускаемой кристаллом, и направление ее движения могут значительно меняться.

Многокаскадный полупроводниковый лазер представляет собой этакий “сэндвич”, состоящий из нескольких (более двух) тончайших, в несколько нанометров толщиной, чередующихся слоев полупроводника с несколько отличающейся проводимостью. Если приложить к разным концам такого сэндвича электрическое напряжение, то электроны потекут сквозь эти слои весьма специфичным образом: накопив достаточно энергии, они синхронно “перепрыгивают” сквозь слой (выражаясь научно, падают в квантовую яму), излучая затраченную на переход энергию в виде фотонов. Характерной особенностью такого лазера является то, что он излучает непрерывно и равномерно, строго параллельно плоскости, в которой лежат слои полупроводников (см. рисунок).

Теперь ученым удалось совместить эти две разработки, что называется “два в одном”. На сайте Physics Web со ссылкой на журнал Science Express опубликована [статья](#), в которой сообщается, что сотрудниками Bell Labs был [создан](#) первый образец подобного прибора.

Ученым удалось нанести на слои полупроводников, используемых при изготовлении полупроводникового лазера, гексагонально-симметричную структуру, характерную для фотонного кристалла. При этом использовалась уникальная электронно-лучевая литографическая установка, расположенная в штаб-квартире Bell Labs в Мюррей-Хилл, штат Нью-Джерси. Полученный в итоге лазерный излучатель имеет размер всего 50 микрон, что вдвое тоньше диаметра человеческого волоса. При помощи встроенных фотонных кристаллов удалось направить поток излучения от боков к поверхности пленки и заставить лазер излучать в вертикальном направлении. Таким образом, для использования нового лазера не нужны дополнительные устройства фокусировки, что позволит расширить область применения полупроводниковых лазеров. Например, теперь их можно будет встраивать в микросхемы. “Этот новый лазер появился исключительно благодаря объединению разрозненных разработок в разных областях физики в одном устройстве”, - заявила Черри Мюррей, старший вице-президент Bell Labs по физическим исследованиям.

Велика вероятность того, что в будущем микросхемы, содержащие огром-

ные массивы подобных лазерных излучателей, будут широко применяться в оптических телекоммуникациях, а также в качестве чувствительных сенсоров для различных датчиков. Сейчас ученые пытаются добиться повышения мощности нового лазера, а также пытаются его модернизировать. “Если нам удастся заполнить крошечные отверстия фотонного кристалла какой-нибудь жидкостью или другим веществом, то мы можем получить совершенно новые физические эффекты, которые откроют для нашего лазера новые области применения”, - заявил Федерико Капассо, член команды разработчиков [5]

4.х.х. Применение полупроводниковых лазеров

Полупроводниковые лазеры находят применение в различных областях оптоэлектроники и систем записи и считывания информации. Впервые в широких масштабах эти лазеры начали использоваться в качестве считывающей головки в компакт-дисковых системах. Теперь область применения включает в себя оптические диски для постоянных и одноразовых запоминающих устройств. Лазеры на сплавах GaInP или AlGaInP имеют излучение в видимой области оптического спектра, что позволило считывать более плотно записанную информацию.

Вторая область применения - волоконно-оптическая связь, где чаще всего используются лазеры на GaAs. В будущем, наверное, для этих целей больше подойдет лазер на четверном сплаве InGaAsP с большим сроком службы (около $5 \cdot 10^5$ часов). Широко применяются лазеры на GaAs для накачки твердотельных Nd:YAG-лазеров при продольной конфигурации. Для этого используются линейки из диодных лазеров, в которых при некоторых конструктивных решениях (разработка линеек диодов с отдельными лазерными каналами, но синхронизированными по фазе) удалось поднять выходную мощность от 50 мВт до 2 Вт.

Можно сказать в заключение, что область применения подобных лазеров постоянно расширяется и в настоящее время значительная часть оптоэлектронных изделий не мыслима без использования полупроводниковых лазеров. [3]

В бытовых целях можно привести применение полупроводникового лазера в указке. Лазерная указка состоит из лазерного светодиода и источника питания - батарейки. Диод изготовлен из слоев полупроводников разных типов, например, арсенида галлия. Если в прямом направлении приложить напряжение, то возникает инверсия населенностей. Значит, для накачки электрический ток, и она осуществляется за счет рекомбинации используется основных и неосновных носителей на границе рп-перехода.



Рис. 4.16. Внешний вид лазерной указки

Усиление осуществляется в процессе многократного отражения света при его распространении вдоль полупроводникового перехода. Мода излучения выбирается углом скола торцов кристалла. В самых распространенных “инжекционных” лазерах при большом прямом токе происходит инжекция избыточных электронов и дырок в слой, прилегающий к р-n переходу. Там электроны и дырки рекомбинируют и излучают. Характерная частота света зависит от разности энергий между валентной зоной и зоной проводимости. Для арсенида галлия это 1,5 эВ, что соответствует ближнему ИК спектру. В настоящее время уже умеют делать лазерные диоды и на видимый, и даже на ближний УФ диапазон мощностью в сотни милливольт. Коэффициент полезного действия достигает 50%.

Технические характеристики лазерной указки:

Длина волны: 630-680 нм.

Выходная мощность: 3 мВт (класс IIIa).

Масса: 20 - 30 г

Стандарты безопасности: FDA, CE, GS, EMC, LVD, CSA [6]

Контрольные вопросы

- 4.1. Каковы критерии выбора полупроводниковых материалов для оптоэлектронных приборов?
- 4.2. В какой области светодиодов происходит генерация оптического излучения?
- 4.3. Назовите три условия, необходимые для генерации когерентного излучения в полупроводниковых лазерах на основе р-n перехода.
- 4.4. Как можно реализовать одностороннюю инжекцию в гомо- и гетеропереходах?
- 4.5. Как отличается спектр излучения светодиода и полупроводникового лазера?

4.6. В чем преимущество полупроводникового лазера с двойным гетеропереходом перед полупроводниковым лазером с одним гетеропереходом?

Задачи

4.1. Эффективность преобразования внешней (электрической) мощности планарного GaAs светодиода η равна 1,5 % при прямом токе $I = 50$ мА и разности потенциалов $U = 2$ В. Оценить генерируемую прибором оптическую мощность P_o , если коэффициент отражения R на границе GaAs – воздух равен $R = 0,8$. Коэффициент преломления GaAs $n = 3,6$.

4.2. Оценить эффективность преобразования внешней мощности планарного GaAs светодиода η , когда внутренняя оптическая мощность P_i составляет 30 % от приложенной электрической мощности. Коэффициент преломления GaAs $n = 3,6$.

4.3. Рекомбинационное время жизни неосновных носителей заряда фотодиода $\tau = 5$ нс. При протекании постоянного тока оптическая выходная мощность равна $P_{dc} = 300$ мкВт. Определить выходную мощность P_p когда сигнал через диод модулирован на частоте 20 МГц и 100 МГц.

4.4. Ширина запрещенной зоны слаболегированного GaAs при комнатной температуре 1,43 эВ. Когда материал сильно легирован (до вырождения) появляются “хвосты состояний”, которые эффективно уменьшают ширину запрещенной зоны на 8 %. Определить разницу в излучаемой длине волны света в случае слабого и сильного легирования.

Глава 5. Приемники оптического излучения

5.1. Статистические параметры фотодетекторов

Фотодетекторы — полупроводниковые приборы, регистрирующие оптическое излучение и преобразующие оптический сигнал на входе в электрический сигнал на выходе фотодетектора.

Термину фотодетектор соответствует как эквивалентный термин фотоприемник, так и термин приемник оптического излучения.

Поскольку основная задача фотоприемников — регистрация, то существует набор статических характеристик, которыми описываются основные характеристики фотоприемника. Если регистрируемый сигнал на выходе фотоприемника — напряжение, то вводят понятие вольтовая чувствительность, показывающая, на сколько изменится напряжение ΔU на выходе фотоприемника при единичном изменении мощности ΔP падающего лучистого потока:

$$S_v = \frac{\Delta U}{\Delta P}, \left[\frac{\text{В}}{\text{Вт}} \right]. \quad (5.1)$$

Если на выходе фотоприемника изменяется ток, то фотоприемник характеризуется токовой чувствительностью S_i . Токовая чувствительность — величина, характеризующая изменение тока ΔI , регистрируемого в цепи фотоприемника при единичном изменении мощности ΔP падающего оптического излучения:

$$S_i = \frac{\Delta I}{\Delta P}, \left[\frac{\text{А}}{\text{Вт}} \right]. \quad (5.2)$$

На фотоприемнике всегда есть хаотический сигнал, связанный с флуктуациями микропараметров приемника. Этот сигнал характеризуется средним квадратичным значением шумового напряжения:

$$\sqrt{U_m^2}. \quad (5.3)$$

Наличие шумового напряжения на фотоприемнике является физической границей регистрации внешнего сигнала. Параметр, описывающий этот эффект, получил название пороговой чувствительности. Пороговая чувствительность — это минимальная энергия оптического излучения P_m , которая вызовет на выходе фотоприемника сигнал, находящийся в заданном отношении (m) к шуму.

$$m = \frac{\Delta U}{\sqrt{U_m^2}} = \frac{P_m S_v}{\sqrt{U_m^2}};$$

$$P_m = \frac{m \sqrt{U_m^2}}{S_v}, \quad [\text{Вт}].$$

(5.4)

При $m = 1$ мощность оптического излучения $P_m = P_{\min}$ называется минимальной пороговой чувствительностью. Поскольку шумовая ЭДС пропорциональна полосе частот, то пороговую чувствительность рассматривают для единичной полосы частот $\Delta f = 1$, при этом

$$\sqrt{U_m^2} \Rightarrow \sqrt{U_{m0}^2},$$

$$P_{\min} = \frac{\sqrt{U_{m0}^2}}{S_v}.$$

(5.5)

Величина, обратная пороговой чувствительности, называется обнаружительной способностью:

$$D = \frac{1}{P_{\min}}.$$

(5.6)

Удельная обнаружительная способность D^* — величина, нормированная на единицу площади фотоприемника и на полосу частот:

$$D^* = \frac{S_v \sqrt{A \cdot \Delta f}}{\sqrt{U_0^2}}, \quad \left[\frac{\text{см} \cdot \text{Гц}^{1/2}}{\text{Вт}} \right]$$

(5.7)

Таким образом, удельная обнаружительная способность D^* — это величина, обратная мощности оптического излучения, которая при полосе частот $\Delta f = 1$ и площади фотоприемник $A = 1$, вызывает на выходе фотоприемника сигнал, равный шуму.

На рисунке 5.1 приведена зависимость обнаружительной способности D^* от длины волны излучения для различных фоторезисторов и фотодиодов. [9, 10, 12, 84].

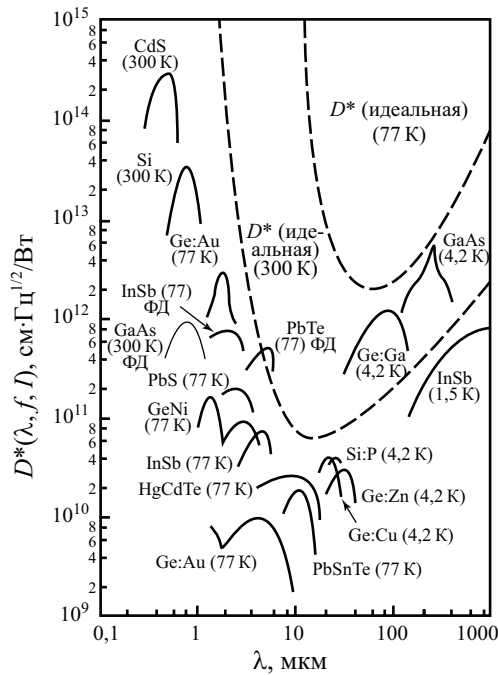


Рис. 5.1. Зависимость обнаружительной способности D^* от длины волны излучения для различных фоторезисторов и фотодиодов (ФД). Штрихованными кривыми представлена теоретическая идеальная D^* при 77 и 300 К и угле 2δ [10]

5.2. Материалы для фотоприемников

Также как и для всех оптоэлектронных устройств, для фотоприемников важно использовать прямозонные полупроводники и фундаментальное поглощение вблизи края запрещенной зоны.

Последнее условие вызывает наличие красной границы в регистрации сигнала.

Граничная длина волны $\lambda_{гр}$, выше которой отсутствует регистрация излучения, при межзонных переходах определяется из следующих простых соотношений:

$$h\nu_{гр} = E_g; \quad \lambda_{гр} = \frac{2\pi\hbar c}{E_g}; \quad \lambda_{гр}(\text{мкм}) = \frac{1,22}{E_g(\text{эВ})}. \quad (5.8)$$

В таблице 5.1 приведены значения ширины запрещенной зоны для различных полупроводников и граничная длина волны, рассчитанная по соотношениям (5.8).

Таблица 5.1. Длина волны $\lambda_{гр}$, соответствующая началу межзонного поглощения, для различных полупроводников

Материал	Карбид кремния SiC	Фосфид галлия GaP	Арсенид галлия GaAs	Кремний Si	Германий Ge	Арсенид индия InAs	Антимонид индия InSb	КРТ CdHgTe
Ширина запрещенной зоны E_g , эВ	3,0	2,26	1,42	1,12	0,66	0,36	0,17	0,10
Длина волны $\lambda_{\text{пр}}$, мкм	0,4	0,54	0,86	1,09	1,85	3,4	7,2	12,2

При выборе фотоприемников значение также имеет спектр пропускания среды между приемником и источником. Обычно этой средой является или атмосфера, или оптоволокно. Ниже на рисунках 5.2 и 5.3 приведены эти характеристики.

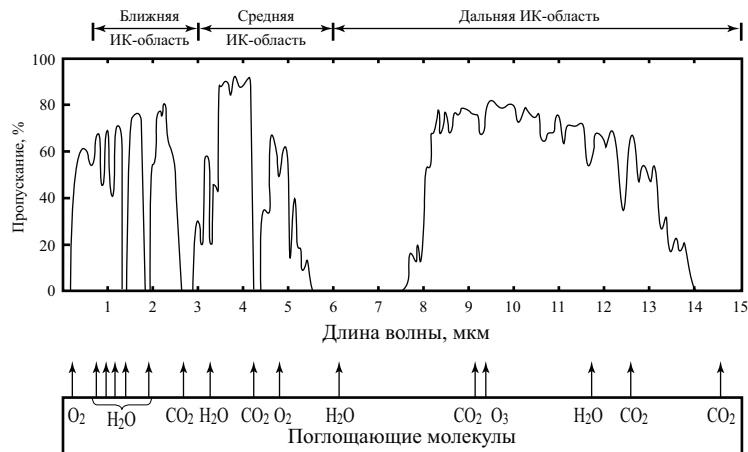


Рис. 5.2. Спектр пропускания атмосферы [82, 84]



Рис. 5.3. Спектр пропускания оптического волокна на основе кварца [8]

5.3. Фоторезисторы

При генерации в однородном полупроводнике, например n-типа проводимости, электронно-дырочных пар при его освещении в полосе собственного поглощения происходит изменение концентрации основных n_{no} и неосновных p_{no} носителей. В том случае, если изменение концентрации основных носителей Δn_{no} сопоставимо с их начальной концентрацией n_{no} , то суммарная концентрация основных носителей $n_n = \Delta n_{no} + n_{no}$ возрастает, а следовательно возрастает и величина удельной проводимости. В том случае, если увеличение концентрации основных носителей существенно больше, чем стационарная концентрация, то суммарная проводимость будет определяться только фотопроводимостью.

Это физическое явление лежит в основе принципа действия фоторезисторов. Полупроводниковые резисторы, изменяющие свое электрическое сопротивление под действием оптического излучения называются фоторезисторами. Поскольку фоторезисторы предназначены для регистрации слабых световых потоков, то зачастую величина полезного сигнала сравнима с шумовым током. В связи с этим для фоторезисторов с целью уменьшения шумов используют специальные конструкции, позволяющие охлаждать фоторезистор. На рисунке 5.4а приведена такая конструкция с термоэлектрическим охлаждением.

Рассмотрим основные характеристики фоторезисторов. На рисунке 5.4б приведена топология рассматриваемых фоторезисторов и геометрия их освещения. Как было написано в предыдущем разделе, одной из основных характеристик фоторезистора является токовая чувствительность S_i .

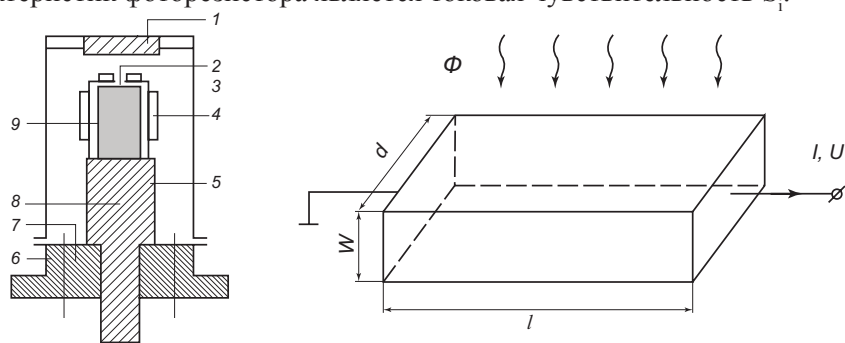


Рис. 5.4.

- а) Конструкция охлаждаемого фоторезистора: 1 – входное окно; 2 – фоточувствительный элемент; 3 – контактная колодка; 4 – предусилитель; 5 – теплоотвод; 6 – электрические выводы; 7 – основание; 8 – терморезистор; 9 – термоэлектрический охладитель;
- б) Топология фоторезистора для расчета токовой чувствительности

Изменение удельной фотопроводимости $\Delta\sigma_0$ резистора при освещении в следствие изменения концентрации неравновесных носителей будет описываться соотношением

$$\Delta\sigma_0 = q(\Delta n\mu_n + \Delta p\mu_p) = q\Delta p\mu_p(1+b), \quad (5.9)$$

где b – отношение подвижностей электронов и дырок.

Полный ток I через резистор при величине внешнего напряжения U будет определяться суммой темнового I_T тока и фототока I_Φ

$$I = U(\sigma + \Delta\sigma_0) = I_T + I_\Phi. \quad (5.10)$$

Величина темнового I_T тока определяется темновым омическим сопротивлением резистора, который при использовании геометрии фоторезистора, приведенной на рисунке 5.4б, будет

$$I_T = \sigma_0 \cdot \frac{w \cdot d}{l} \cdot U \quad (5.11)$$

где w – толщина, d – ширина, l – длина фоторезистора.

В стационарных условиях при освещении фоторезистора из уравнения непрерывности получаем

$$\frac{dn}{dt} = G - \frac{\Delta n}{\tau_n} = 0 \quad (5.12)$$

Следовательно, изменения концентрации основных носителей Δn_n будет

$$\Delta n_n = G\tau_n = \eta\alpha\Phi\tau_n, \quad (5.13)$$

поскольку темп генерации в случае однородного поглощения света в фоторезисторе будет

$$G = \eta\alpha\Phi. \quad (5.14)$$

В выражениях (5.13) и (5.14) использованы следующие обозначения:

η – квантовый выход (число неравновесных носителей, генерируемых при поглощении одного кванта), α – коэффициент поглощения, Φ – световой поток (число падающих фотонов на единицу площади).

При освещении изменение фотопроводимости $\Delta\sigma$ будет

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma_0 \frac{w \cdot d}{l}. \quad (5.15)$$

Согласно определению токовой чувствительности для фоторезистора, получаем

$$S_i = \frac{\Delta I}{P} = \frac{\Delta I_\Phi}{P} = \frac{w \cdot d}{l} U \frac{\Delta\sigma_0}{P} = \frac{w \cdot d}{l} U q \mu_p (1+b) \eta \alpha \frac{\Phi}{P}.$$

(5.16)

Используем для связи светового потока Φ и энергии оптического излучения, падающего на фоторезистор, P при энергии кванта $h\nu$ соотношение

$$\Phi = \frac{P/S}{h\nu} = \frac{P/dl}{h\nu}; \nu = \frac{1}{T} = \frac{c}{\lambda}. \quad (5.17)$$

Подставляя это выражение в формулу (5.16), получаем для токовой чувствительности S_i фоторезистора

$$S_i = \frac{q}{hc} (\eta \alpha \lambda) [\tau_p \mu_p (1+b)] \frac{w}{l^2} U. \quad (5.18)$$

Из уравнения (5.18) следует, что токовая чувствительность фоторезистора зависит от характеристик оптического излучения η , α , λ ; геометрии фотоприемника w , l ; характеристик полупроводникового материала τ_p , μ_p , b , α и выбора рабочей точки U .

На рисунке 5.5а показаны вольт-амперные характеристики фоторезистора при различных уровнях освещения.

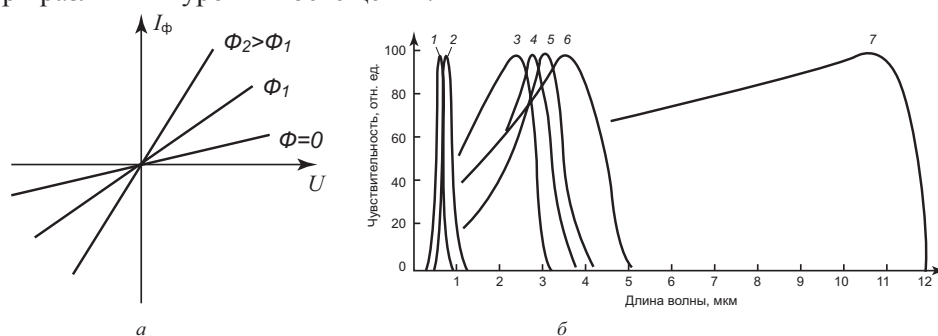


Рис. 5.5.

а) вольт-амперные характеристики фоторезистора при различных уровнях освещения; б) Спектральная чувствительность фоторезисторов на основе CdS (кривая 1), CdSe (2), PbS (3), твердого раствора PbS-PbSe (4, 5), PbSe (6), PbSn(Te) (7) [84]

Для фоторезисторов характерны стабильность фотоэлектрических характеристик во времени, малая инерционность, простота устройства, допускающая различные конструктивно-технологические решения. Выбор полупроводникового материала позволяет получить избирательную фоточувствительность. Фоторезисторы на основе CdS и CdSe чувствительны к видимому и УФ излучению, а фоторезисторы на основе InSb и CdHgTe – к длинноволновому ИК излучению. На рисунке 5.5б приведены спектральные зависимости фоточувствительности различных фоторезисторов.

5.4. Фотодиоды на основе p-n перехода

5.4.1. Общие сведения

При попадании кванта света с энергией $h\nu$ в полосу собственного поглощения в полупроводнике возникает пара неравновесных носителей – электрон и дырка. При регистрации электрического сигнала необходимо зарегистрировать изменение концентрацией носителей. Очевидно, что при прочих равных условиях зарегистрировать изменение концентрации неосновных носителей проще.

Так, например, в n-GaAs с легирующей концентрацией 10^{14} концентрация основных носителей электронов составляет 10^{14} см⁻³, а концентрация неосновных носителей – дырок – 1 см⁻³. Поэтому если при оптическом поглощении в фотоприемнике на основе GaAs возникает 10^{10} неравновесных носителей, то проще зарегистрировать изменение концентрации неосновных носителей. В фотоприемных устройствах как правило используется принцип регистрации неосновных носителей заряда. Наиболее распространенные фотоприемники реализуются на основе диодных структур. Среди них фотодиоды на основе p-n переходов, барьеров Шоттки и гетеропереходов. Ниже, на рисунке 5.6 приведена конструкция наиболее распространенных фотодиодов.

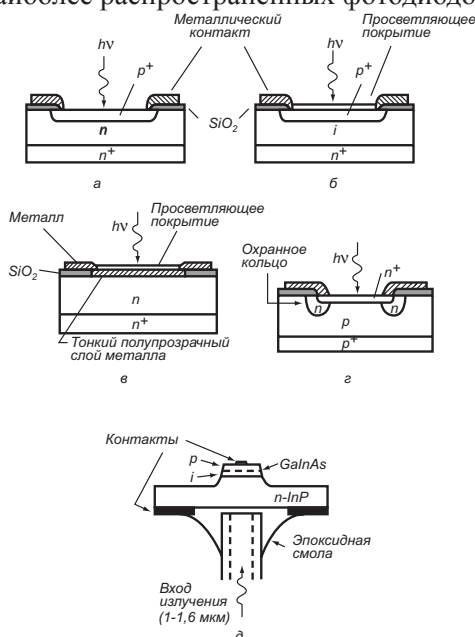


Рис. 5.6. Конструкции наиболее распространенных фотодиодов

- а) фотодиод на основе p-n перехода,
- б) p-i-n фотодиод,
- в) фотодиод на основе барьера Шоттки,

- г) фотодиод на основе р-п перехода с лавинным умножением,
 д) фотодиод на основе р-і-п гетероструктуры

В фотодиодах на основе р-п переходов используется эффект разделения на границе электронно-дырочного перехода созданных оптическим излучением неосновных неравновесных носителей. Схематически фотодиод изображен на рисунке 5.7.

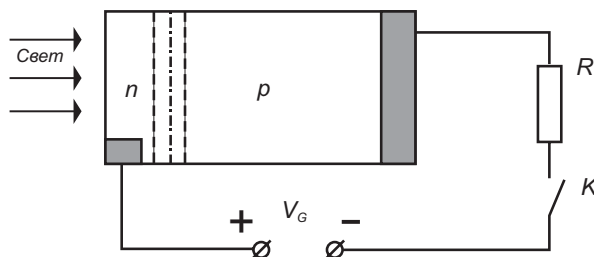


Рис. 5.7. Схематическое изображение фотодиода и схема его включения. n – эмиттер, p – база фотодиода

5.4.2. Вольт-амперная характеристика фотодиода

Обратный ток р-п перехода обусловлен дрейфовыми компонентами тока и выражается

$$j_0 = \frac{qp_{n0}D_p}{L_p} + \frac{qn_{p0}D_n}{L_p}, \quad (5.19)$$

где p_{n0} и n_{p0} — концентрации неосновных носителей.

Изменение концентрации неосновных носителей вызывает изменение фототока. Величина фототока при обратном смещении фотодиода выражается соотношением:

$$j_\Phi = q \frac{\Delta p D_p}{L_p} + q \frac{\Delta p D_n}{L_n} = \frac{q \Delta p L_p}{\tau_p} + \frac{q \Delta n L_n}{\tau_n} \quad (5.20)$$

$\ddot{A}p$ и $\ddot{A}n$ – неравновесная концентрация фотогенерированных неосновных носителей на расстояние L_n , L_p от области пространственного заряда в квазинейтральном объеме эмиттера и базы диода.

Обычно у p^+ -n фотодиода p^+ эмиттер делают тонким $l \ll L_p, L_n$, так, чтобы поглощение света происходило в n-базе фотодиода. Тогда величина фототока из выражения (5.20) выражается соотношением:

$$j_\Phi = q \frac{\Delta p \cdot D_p}{L_p} = q \frac{\Delta p \cdot l}{\tau_p}, \quad (5.21)$$

где $\ddot{A}p$ – неравновесная концентрация фотогенерированных (неосновных) носителей.

Поскольку

$$\Delta p = G \cdot \tau_p. \quad (5.22)$$

То величина фототока будет:

$$J_\Phi = qGL_p. \quad (5.23)$$

где G – темп генерации неравновесных носителей.

$$G = \eta\alpha\Phi, \quad (5.24)$$

где η – квантовый выход, α – коэффициент поглощения и Φ – падающий световой поток.

Величина фототока J_Φ после подстановки имеет величину

$$J_\Phi = q\eta\alpha L_p \Phi. \quad (5.25)$$

Фототок J_Φ постоянен, не зависит от полярности и величины приложенного напряжения V_G , и направлен от n-области к p-области полупроводника.

Неосновные носители, возникающие под действием светового потока, должны формироваться на расстоянии порядка диффузионной длины от обедненной области p-n перехода для того, чтобы принять участие в обратном токе диода. Характерные параметры: диффузионная длина L_p порядка 100 мкм, ширина обедненной области p-n перехода 1 мкм. Поэтому основной фототок в фотодиоде обусловлен поглощением в квазинейтральном объеме, и время отклика фотодиода будет определяться временем жизни неосновных носителей.

Две характеристики p-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 на пути 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.

Уравнение для активного режима работы фотодиода при наличии внешнего напряжения V_G , принимает вид

$$J = J_\Phi + J_s(e^{\beta V_G} - 1) \quad (5.26)$$

Разомкнутая цепь. При разомкнутой внешней цепи ($R = \infty$), для случая, когда внешнее напряжение отсутствует, ток через внешнюю цепь не протекает. В этом случае напряжение на выводах фотодиода будет максимальным. Эту величину V_G называют напряжением холостого хода V_{xx} . Из уравнения (5.26), при условии $J = 0$, получаем уравнение, позволяющее по известным значениям фототока J_Φ и тока нагрузки J_s рассчитать напряжение холостого хода V_{xx}

$$V_{xx} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_{\Phi}}{I_s} + 1 \right). \quad (5.27)$$

Напряжение V_{xx} (фотоЭДС) можно также определить непосредственно, подключая к выводам фотодиода вольтметр, но внутреннее сопротивление вольтметра должно быть много больше сопротивления p-n перехода.

Режим короткого замыкания. В режиме короткого замыкания, напряжение на выводах фотодиода $V_G = 0$. Тогда из уравнения (5.26) следует, что ток короткого замыкания $J_{кз}$ во внешней цепи равен фототоку J_{Φ} ,

$$J_{кз} = J_{\Phi}. \quad (5.28)$$

На рисунке 5.8 показано семейство ВАХ фотодиода, как при отрицательной так и при положительной поляризации фотодиода, рассчитанные по уравнению (5.26). При положительных напряжениях V_G ток фотодиода быстро возрастает (пропускное направление) с увеличением напряжения. При освещении же общий прямой ток через диод уменьшается, так как фототок направлен противоположно току от внешнего источника.

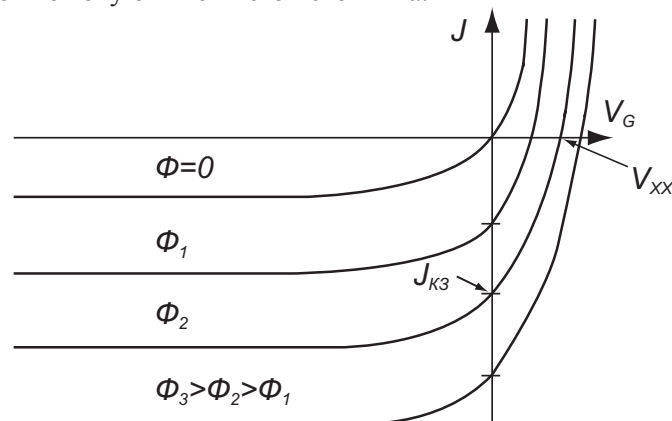


Рис. 5.8. Вольт-амперные характеристики фотодиода при различных уровнях освещения

ВАХ p-n перехода, располагаясь во II квадранте ($V_G > 0, I < 0$), показывает, что фотодиод можно использовать как источник тока. На этом основан принцип работы солнечных батарей на основе p-n переходов.

Световая зависимость

Световая характеристика представляет собой зависимость величины фототока J_{Φ} от светового потока Φ , падающего на фотодиод. Сюда же относится и зависимость V_{xx} от величины светового потока. Количество электронно-дырочных пар, образующихся в фотодиоде при освещении, пропорционально количеству фотонов, падающих на фотодиод. Поэтому фототок будет

пропорционален величине светового потока

$$J_{\Phi} = K \cdot \Phi, \quad (5.29)$$

где K – коэффициент пропорциональности, зависящий от параметров фотодиода.

При обратном смещении фотодиода, как следует из уравнения (5.25), ток во внешней цепи пропорционален световому потоку и не зависит от напряжения V_G .

Коэффициент пропорциональности K в уравнение (5.29) получил название интегральной чувствительности фотодиода.

5.4.3. Спектральная чувствительность

Будем теперь освещать фотодиод монохроматическим светом с некоторой длиной волны λ . Величину светового потока Φ будем поддерживать постоянной при любой длине волны света. Зависимость фототока $J_{\Phi}(\lambda)$ будет определяться зависимостью квантового выхода $\eta(\lambda)$ и коэффициента поглощения $\alpha(\lambda)$ от длины волны

$$J_{\Phi}(\lambda) \sim \eta(\lambda) \cdot \alpha(\lambda). \quad (5.30)$$

Зависимость спектральной чувствительности от длины волны является сложной. Эта зависимость имеет максимум при некоторой длине волны, причем спад в области длинных волн связан с зависимостью квантового выхода $\eta(\lambda)$ от длины волны, а в области коротких длин волн – с зависимостью коэффициента межзонного поглощения $\alpha(\lambda)$ от длины волны. Обе зависимости имеют красную границу, поскольку при энергии квантов $h\nu$ меньше ширины запрещенной зоны E_g межзонное поглощение света не происходит. На рис. 5.9. приведена зависимость спектральной чувствительности для германиевого и кремниевого фотодиодов.

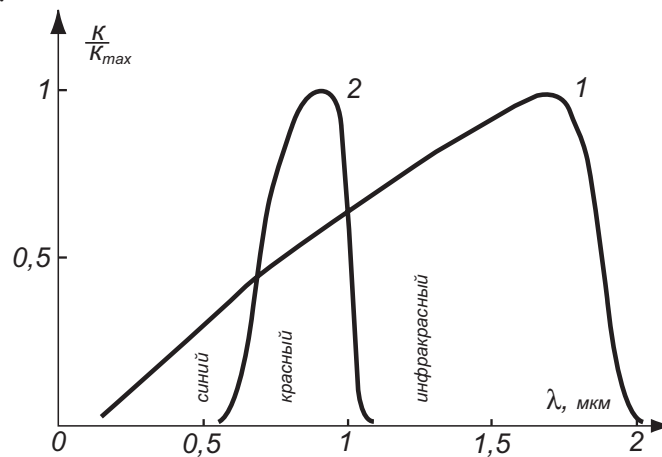


Рис. 5.9. Кривые спектральной чувствительности: 1) германиевого, 2) кремниевого фотодиодов [76]

Влияние неоднородного поглощения по глубине фотодиода на спектральную чувствительность показано на рисунке 5.10 ниже. Коротковолновое излучение имеет высокое значение коэффициента поглощения α , поэтому поглощается в основном в приповерхностной области эмиттера фотодиода. Очевидно, что в этом случае фототок будет мал, поскольку область поглощения света удалена от р-п перехода. В случае длинных волн поглощение происходит по всей глубине фотодиода на расстояниях равных или больших диффузионной длины. В этом случае эффективность преобразования будет максимальной. Наконец, при очень больших значениях λ фототок уменьшается из-за приближения к красной границе фотоэффекта.

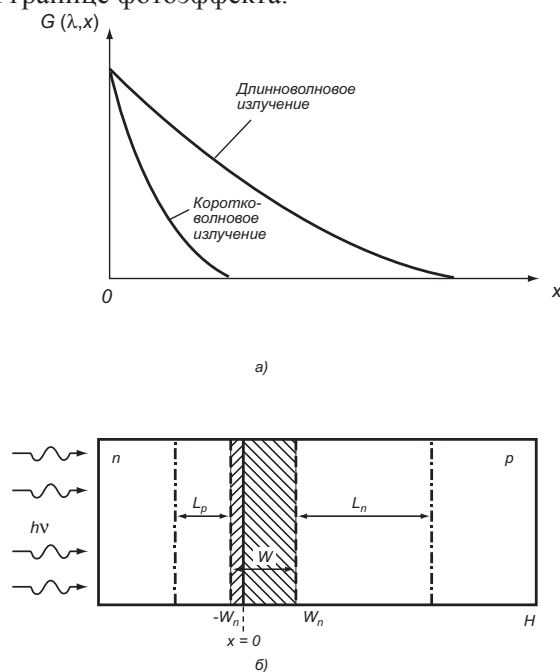


Рис. 5.10. Зависимость скорости генерации электронно-дырочных пар от расстояния от поверхности для длинноволнового и коротковолнового света (а), размеры фотодиода и характерные длины диффузии неосновных носителей (б)

5.4.4. р-і-п фотодиоды

Указанные недостатки фотодиода на основе р-п перехода устраняются в фотодиодах, где между р- и п-областями расположен і-слой с собственной проводимостью. Толщина этого слоя выбирается достаточно большой $W \gg L_p$ с тем,

чтобы поглощение света происходило в этой области. Поскольку в *i*-слое свободные носители отсутствуют, при обратном смещении *p*-*n* перехода все приложенное напряжение будет падать на *i*-слой. Фотогенерированные носители в *i*-слое будут разделяться в сильном электрическом поле и фотоотклик таких диодов будет быстрым. На рисунке 5.11 приведена конструкция и энергетическая диаграмма, иллюстрирующая принцип работы *p*-*i*-*n* фотодиодов.

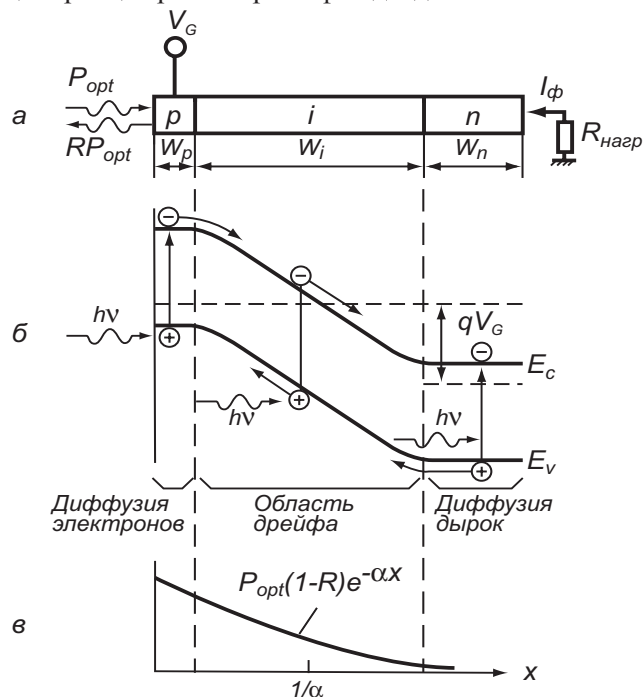


Рис. 5.11. Принцип работы *p*-*i*-*n* фотодиода:

а – поперечный разрез диода; б – зонная диаграмма в условиях обратного смещения; в – распределение интенсивности излучения

Структура *p*-*i*-*n* фотодиода спроектирована так, чтобы избежать недостатков фотодиода *p*-*n* типа. Но все основные принципы регистрации сохраняются.

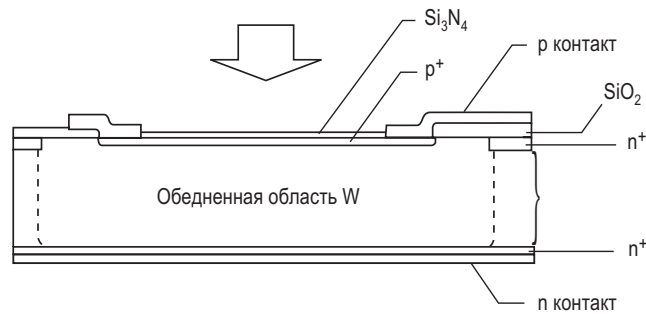


Рис. 5.12. Конструкция p-i-n фотодиода

Введение слоя собственного полупроводника между p- и n-слоями примесного полупроводника позволяет существенно увеличить размер области пространственного заряда.

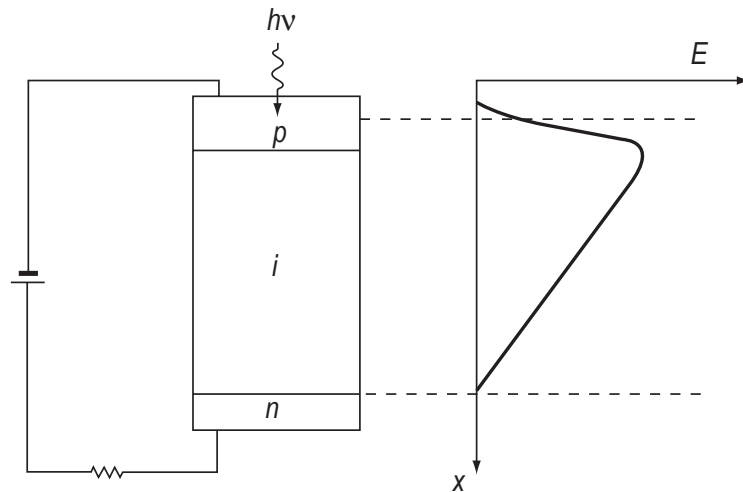


Рис. 5.13. Принцип действия p-i-n фотодиода

В i-слое свободные носители практически отсутствуют и силовые линии электрического поля, начинающие с доноров в n-области, без экранировки проходят через i-слой и заканчиваются на акцепторах p-области.

Ширина i-слоя составляет обычно 500–700 мкм. В отличие от i-зоны, легированные слои сделаны очень тонкими. Все вместе это сделано для того, чтобы все оптическое излучение поглощалось в i-слое и сокращалось время переноса зарядов из i-зоны в легированные области.

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 р- и n-областям диода соответственно.

Квантовая эффективность таких диодов обычно достигает 80 %. Для диодов, сконструированных для применения в оптоволоконных линиях емкость перехода равна 0,2 пФ, при рабочей поверхности диода 200 мкм.

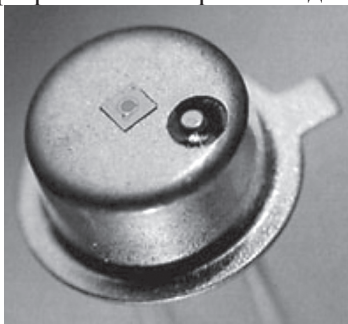


Рис. 5.14. p-i-n фотодиод SHF 202 [68]

Итак, основное преимущество p-i-n фотодиода заключается в высоких скоростях переключения, так как поглощение излучения происходит в i-слое, где за счет дрейфового переноса реализуются высокие скорости для носителей заряда.

Другим преимуществом является высокая квантовая эффективность, поскольку толщина i-слоя обычно больше обратного коэффициента поглощения и все фотоны поглощаются в i-слое.

Использование гетеропереходов для p-i-n фотодиодов позволяет избежать поглощения света в базе фотодиода.

5.4.5. Лавинные фотодиоды

Лавинный фотодиод – это фотоприемник, в котором повышение квантовой эффективности реализуется за счет внутреннего усиления благодаря лавинному умножению в обратносмещенном p-n переходе.

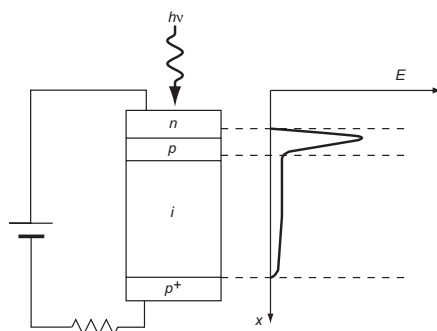


Рис. 5.15. Принцип действия лавинного фотодиода

Для реализации лавинного умножения необходимо выполнить два условия:

электрическое поле E области пространственного заряда должно быть достаточно большим, чтобы на длине свободного пробега λ электрон набрал энергию, большую, чем ширина запрещенной зоны E_g :

$$qE\lambda > \frac{3}{2}E_g. \quad (5.31)$$

ширина области пространственного заряда W должна быть существенно больше, чем длина свободного пробега λ :

$$W \gg \lambda \quad (5.32)$$

Значение коэффициентов внутреннего усиления составляет $M = 10-100$ в зависимости от типа фотодиодов.

На рисунке 5.16 представлен лавинный фотодиод на германиевой подложке для длин волн 1300 нм. Данный вид лавинного фотодиода является одним из самых распространенных, ввиду своей простоты в изготовлении и высоких характеристик.

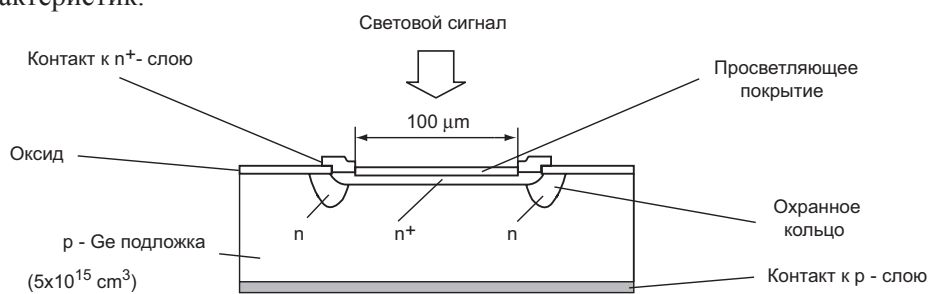


Рис. 5.16. Конструкция лавинного фотодиода

Диод сформирован на германиевой подложке p-типа ($p \sim 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$) с

последующим созданием n^+ – слоя на поверхности, полученным при помощи диффузии или ионной имплантации. Чтобы избежать поверхностного пробоя n^+ -слой окружен слабо легированным охранным кольцом n -типа. Область регистрации инфракрасного света имеет диаметр 100 мкм, и из-за присутствия охранного кольца, она меньше, чем площадь поверхности n^+ – слоя. Просветляющее покрытие увеличивает квантовую эффективность этого диода.

Требование высоких значений внутреннего усиления накладывают достаточно жесткие ограничения на качество и однородность полупроводникового материала, поскольку коэффициент умножения экспоненциально сильно зависит от напряженности электрического поля.

Требование высоких обратных напряжений и прецизионной установки напряжения питания усложняют их эксплуатацию. Обычно сочетают преимущества лавинного и p - i - n фотоприемника. На рисунке 5.17 как раз приведена такая конструкция — гетероструктура InGaAsP на подложке InP позволяет реализовать быстродействующие фотоприемные устройства с напряжением питания от 300 до 400 вольт.

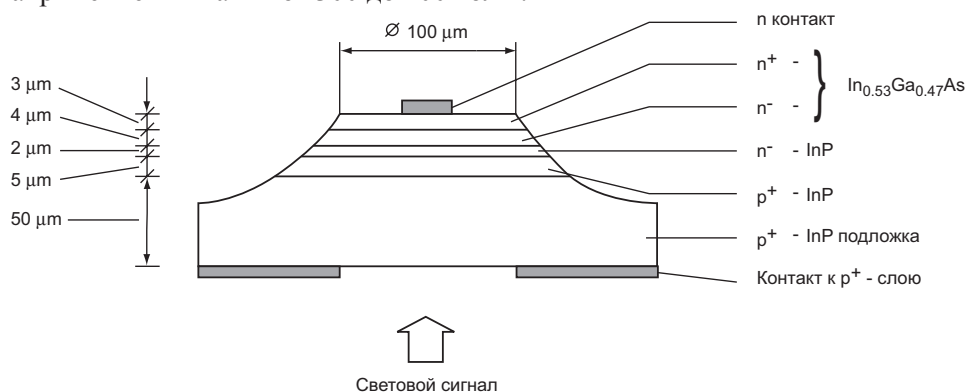


Рис. 5.17. Конструкция лавинного фотодиода на гетероструктуре

5.5. Фототранзисторы

Фототранзистор относится к полупроводниковым фотоэлектрическим приборам с внутренним усилением фототока. Структура фототранзистора эквивалентна структуре обычного биполярного p - n - p транзистора, включенного в схему с общим эмиттером. В отличие от биполярного транзистора, у фототранзистора отсутствует электрический контакт к базе, а управление током базы осуществляется путем изменения ее освещенности. По этой причине конструктивно фототранзистор имеет только два вывода – эмиттер и коллектор.

На рисунке 5.18 показана схема включения фототранзистора и зонная диаграмма в активном режиме работы.

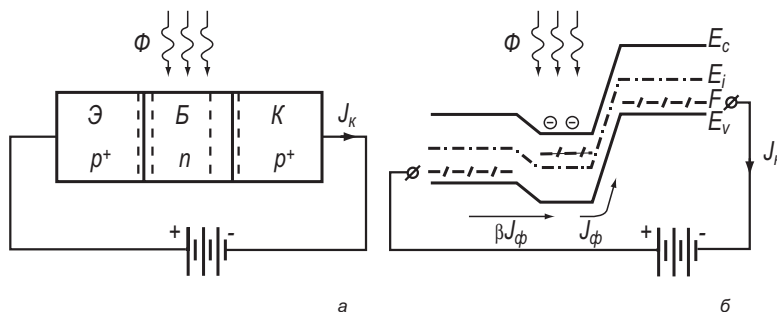


Рис 5.18.

- а) Схема фототранзистора со структурой р-п-р;
- б) зонная диаграмма фототранзистора в активном режиме работы

Как уже отмечалось, управление током фототранзистора осуществляется путем освещения базовой области. Рассмотрим для определенности р-п-р фототранзистор. При попадании светового потока на п-область базы в ней генерируются неравновесные электроны и дырки. Дырки будут являться неосновными носителями, увеличение их концентрации приведет к росту дрейфовой компоненты тока из базы в коллектор. Величина первичного «затравочного» фототока будет выражаться такими же соотношениями, как и фототок диода на основе р-п перехода. Отличие только в том, что неравновесные носители, участвующие в фототоке в фототранзисторе, собираются с области базы, ширина которой W меньше, чем диффузионная длина L_p . Поэтому плотность первичного «затравочного» фототока будет

$$j_{\Phi} = q \frac{\Delta p \cdot W}{\tau_p}, \quad (5.33)$$

Вследствие того, что неравновесные дырки уходят из базы в коллектор, база заряжена отрицательно относительно эмиттера, что эквивалентно прямому смещению эмиттерного перехода фототранзистора. При прямом смещении эмиттерного р-п перехода появляется инжекционная компонента тока из эмиттера в базу. При коэффициенте передачи эмиттерного тока $\hat{\alpha}$ в базе рекомбинируют $(1 - \hat{\alpha})$ инжектированных носителей или в $\hat{\alpha}$ раз меньше, чем число инжектированных носителей. В условиях стационарного тока число прорекомбинировавших носителей в базе должно быть равно их числу, ушедшему с первоначальным фототоком. Поэтому инжекционный ток должен быть в $\hat{\alpha}$ раз больше, чем первичный фототок. Ток коллектора I_K будет состоять из трех компонент: первичного фототока I_{Φ} , инжекционного $\hat{\alpha}I_{\Phi}$ и теплового I_{K0}

тока.

$$I_K = I_\Phi + \beta I_\Phi = (\beta + 1)I_\Phi + I_{K0}. \quad (5.34)$$

Используя выражение для коэффициента усиления $\hat{\alpha}$ базового тока через конструктивно-технологические параметры биполярного транзистора, получаем

$$I_K = I_\Phi \frac{2L_p^2}{W^2} + I_{K0}. \quad (5.35)$$

Величина первичного фототока I_Φ выражается через параметры светового потока и характеристики полупроводникового материала стандартным образом

$$I_\Phi = q\Delta p \frac{W}{\tau_p} = qGW = qW\eta\alpha\Phi \quad (5.36)$$

На рисунке 5.19 приведена вольт-амперная характеристика фототранзистора при различных уровнях освещенности.

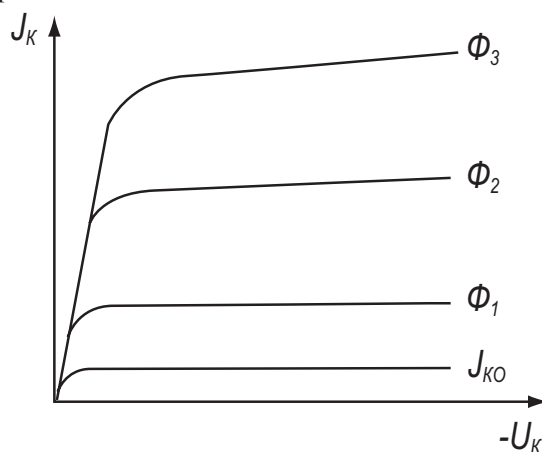


Рис. 5.19. Вольт-амперная характеристика фототранзистора при различных уровнях освещенности ($\Phi_3 > \Phi_2 > \Phi_1$)

Для фототранзисторов, благодаря большому коэффициенту внутреннего усиления, характерна высокая интегральная чувствительность (отношение фототока к падающему световому потоку), достигающая 10 А/лм; спектральная чувствительность определяется свойствами полупроводникового материала.

5.6. МДП-фотоприемники с неравновесным обеднением

5.6.1. Механизмы генерации неосновных носителей в области пространственного заряда

МДП-структуры в состоянии неравновесного обеднения являются физической основой приборов с зарядовой инжекцией и приборов с зарядовой связью [30, 31]. Процессы релаксации неравновесного состояния определяют границы частотного диапазона применения этих приборов. В зависимости от метода измерения можно контролировать либо изменение емкости C МДП-структуры, либо изменение заряда на электродах Q_G в процессе релаксации емкости при постоянном напряжении V_G , либо изменение напряжения на затворе V_G в режиме постоянного заряда Q_M на металлическом электроде.

Рассмотрим МДП-структуру, находящуюся в равновесных условиях при некотором значении напряжения на затворе. Подадим на затвор дополнительно импульс напряжения V_G , выводящий систему из равновесия. Часть напряжения упадет на диэлектрике (V_{ox}), часть – на ОПЗ МДП-структуры ($V_{ОПЗ} = \phi_s$). ОПЗ в момент $t = 0$ перейдет в неравновесное состояние и будет характеризоваться неравновесными значениями поверхностного потенциала ϕ_s , емкости ОПЗ C_{sc} , заряда ОПЗ Q_{sc} . Вследствие генерационно-рекомбинационных процессов ОПЗ будет переходить от неравновесного к равновесному состоянию. Пусть $\delta_{\text{рел}}$ – среднее время, за которое осуществляется этот переход. Ясно, что в зависимости от конкретных условий для МДП-структуры (режим постоянного напряжения V_G или режим постоянного заряда Q_M на полевом электроде) время релаксации $\delta_{\text{рел}}$ будет отличаться. Время релаксации также будет зависеть от начального и конечного состояния ОПЗ, от механизма генерации неравновесных носителей заряда. Последнее будет в основном определять кинетику релаксации ОПЗ.

При релаксации неравновесного обеднения на поверхности полупроводника происходит заполнение потенциальной “ямы” для неосновных носителей до равновесного значения. Существуют четыре основных механизма генерации неосновных носителей, вызывающих заполнение потенциальной ямы. 1 – генерация через объемные локальные центры в ОПЗ, находящиеся в запрещенной зоне полупроводника. 2 – генерация через поверхностные состояния. 3 – диффузионный ток из квазинейтрального объема. 4 – туннельный генерационный ток. При наличии высокого электрического поля в ОПЗ может происходить лавинное умножение неосновных носителей, причем в качестве “затравочного” тока может выступать любой из этих четырех механизмов. Рассмотрим более подробно механизмы генерации неосновных носителей.

Генерация через объемные локальные центры в запрещенной зоне обедненной области пространственного заряда

Найдем выражение для генерационного тока $j_{\text{ген}}$, обусловленного генерацией неравновесных носителей в области пространственного заряда. Пусть ширина

ОПЗ равна W , темп генерации $G_n = \frac{dn}{dt}$. На рисунке 5.20 приведена схема

наблюдаемых переходов. Величина плотности тока на краю ОПЗ при $x = 0$ будет

$$j_{ген} = q \int_0^W G(x) dx = q \cdot \frac{dn}{dt} \cdot W, \quad (5.37)$$

если темп генерации G не зависит от ширины ОПЗ.

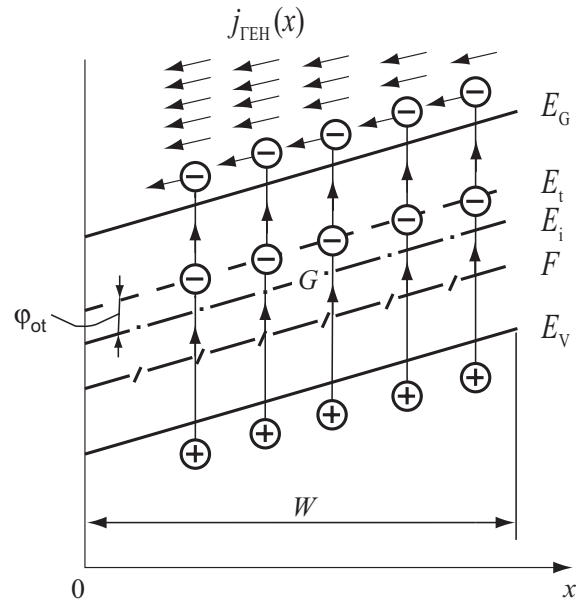


Рис. 5.20. Схема, иллюстрирующая генерацию через объемные уровни в ОПЗ. Дырочный генерационный ток не показан

Для расчета темпа генерации воспользуемся стандартным подходом для рекомбинации Шокли-Рида. Обозначим в общем случае через $f_t = f(E_t)$ вероятность заполнения уровня электронами, $1 - f_t$ – вероятность того, что уровень свободен, $R_{забв}^n$ – темп захвата электронов на генерационные ловушки

$$R_{забв}^n = \gamma_n \cdot n \cdot N_t (1 - f_t) \quad (5.38)$$

где $\tilde{\alpha}_n$ – коэффициент захвата.

Обозначим $R_{выброс}^n$ – темп выброса электронов с ловушек E_t

$$R_{выброс}^n = \beta_n \cdot f_t \cdot N_t \quad (5.39)$$

где $\tilde{\alpha}_n$ – коэффициент выброса.

Разность между темпом захвата и выброса будет определять динамику изменения числа электронов в зоне проводимости

$$-\frac{dn}{dt} = R_{\text{захв}}^n - R_{\text{выбр}}^n = \gamma_n \cdot n \cdot N_t(1 - f_t) - \beta_n f_t N_t \quad (5.40)$$

В состоянии термодинамического равновесия

$$\frac{dn}{dt} = 0; \quad f_t = f_{0t} = \frac{1}{e^{\frac{E_t - E_c}{kT}} + 1}$$

Поскольку коэффициенты \tilde{a}_n, \hat{a}_n те же самые, что и в неравновесном случае, получаем

$$\beta_n = \frac{\gamma_n \cdot n \cdot N_t(1 - f_{t0})}{f_{t0} \cdot N_t} = \gamma_n \cdot n \cdot \left(\frac{1}{f_{t0}} - 1 \right),$$

$$\beta_n = \gamma_n N_c e^{\frac{E_c - F}{kT}} e^{\frac{E_t - F}{kT}} = \gamma_n N_c e^{\frac{E_c - E_t}{kT}}. \quad (5.41)$$

Обозначим $n_1 \equiv N_c e^{\frac{E_c - E_t}{kT}}$ – число равновесных электронов в зоне проводимости, если бы уровень Ферми совпадал с рекомбинационным уровнем E_t . С учетом выражения (5.41) соотношение (5.40) будет иметь вид

$$-\frac{dn}{dt} = \gamma_n N_t [n(1 - f_t) - n_1 f_t]. \quad (5.42)$$

Уравнение (5.42) определяет скорость изменения электронов n в С-зоне. Аналогично получим и для дырок p в V-зоне

$$-\frac{dp}{dt} = \gamma_p N_t [p \cdot f_t - p_1 \cdot (1 - f_t)]. \quad (5.43)$$

В соотношениях (5.42) и (5.43) поменялись местами f_t и $1 - f_t$, ибо функция заполнения электронов есть f_t , а функция заполнения дырок – $1 - f_t$. Если концентрация рекомбинационных ловушек N_t не очень велика, то числом электронов на ловушках можно пренебречь. Тогда скорости изменения концентраций n и p будут равны

$$\frac{dn}{dt} = \frac{dp}{dt} \quad (5.44)$$

Подставляя в формулу (5.44) соотношения (5.42) и (5.43), получаем

$$\gamma_n N_t [n(1 - f_t) - n_1 f_t] = \gamma_p N_t [p_1 f_t - p_1(1 - f_t)].$$

Раскроем скобки и найдем f_t

$$f_t = \frac{\gamma_n \cdot n + \gamma_p \cdot p_1}{\gamma_n(n + n_1) + \gamma_p(p + p_1)}. \quad (5.45)$$

Подставим выражение (5.45) в (5.42) и, исключив из (5.42) f_p , имеем

$$-\frac{dn}{dt} = \frac{\gamma_n \gamma_p N_t (np - n_1 p_1)}{\gamma_n (n + n_1) + \gamma_p (p + p_1)}. \quad (5.46)$$

Рассмотрим применимость соотношения (5.46) для ОПЗ полупроводника, находящегося в неравновесном обеднении. В этом случае

$$pn = n_i^2 \exp\left(\frac{F_n - F_p}{kT}\right) \ll n_i^2$$

сами значения концентраций n , p также будут меньше n_i . Произведение $n, p_1 = n_i^2$ как произведение равновесных концентраций. Величины $n_1 = n_i e^{\beta\phi_{0t}}$; $p_1 = n_i e^{-\beta\phi_{0t}}$, где ϕ_{0t} – объемное положение рекомбинационного уровня относительно середины запрещенной зоны. Получаем с учетом этого из уравнения (5.46)

$$\frac{dn}{dt} = \frac{n_i}{\frac{1}{\gamma_n N_t} \left(e^{\beta\phi_{0t}} + \frac{\gamma_n}{\gamma_p} e^{-\beta\phi_{0t}} \right)} = \frac{n_i}{\tau_{эф}} \quad (5.47)$$

$$\tau_{эф} = \frac{1}{\gamma_n N_t} \left(e^{\beta\phi_{0t}} + \frac{\gamma_n}{\gamma_p} e^{-\beta\phi_{0t}} \right) = \tau_n \left(e^{\beta\phi_{0t}} + \frac{\gamma_n}{\gamma_p} e^{-\beta\phi_{0t}} \right)$$

Здесь $\tau_n = \frac{1}{\gamma_n N_t}$ – время жизни неравновесных электронов n при малом

уровне возбуждения в полупроводнике p -типа. Величина $\frac{dn}{dt}$ положительна, что свидетельствует о преобладании генерации над рекомбинацией при неравновесном обеднении ОПЗ. Подставляя выражение (5.47) в (5.37), получаем для генерационного тока

$$j_{ген}^{(ОПЗ)} = \frac{qn_i}{\tau_{эф}} \cdot W. \quad (5.48)$$

Генерация через поверхностные состояния

Для генерации через поверхностные состояния (ПС) также будет справедливо соотношение (5.46), только под n и p в этом случае следует понимать поверхностные концентрации электронов n_s и дырок p_s , а под N_{ts} – концентрацию поверхностных генерационных состояний. Все остальные обозначения остаются прежними. Перепишем соотношение (5.46)

$$-\frac{d\Gamma_n}{dt} = \frac{\gamma_n \gamma_p N_{ts} (n_s p_s - n_1 p_1)}{\gamma_n (n_s + n_1) + \gamma_p (p_s + p_1)}. \quad (5.49)$$

До тех пор, пока на поверхности будет неравновесное обеднение, величины $n_s, p_s \ll n_1, p_1$. Поэтому темп генерации через ПС, а следовательно, и генерационный ток будут иметь точно такое же выражение, как и при генерации в объеме. Поскольку число генерационных ПС N_{ts} определяется на единицу площади, то и в темпе генерации под \tilde{A}_n надо понимать число носителей,

возникающих на единицу поверхности (эквивалент $\frac{d\Gamma_n}{dt}$ в объеме $\frac{dn}{dt} \cdot W$)

$$j_{ген}^{(ПС)} = q \frac{d\Gamma_n}{dt} = \frac{q \cdot n_i^2}{1/\gamma_n N_{ts} [(n_s + n_1) + \gamma_n/\gamma_p (p_s + p_1)]}.$$

(5.50)

Для неравновесной ОПЗ произведение $p_s n_s$ всегда будет меньше, чем $n_1 p_1 = n_i^2$. Однако при наличии инверсионных слоев в знаменателе (5.50) уже нельзя пренебречь концентрациями p_s и n_s . Для n-инверсионного слоя будет доминировать первый член, поэтому

$$j_{ген}^{(ПС)} = \frac{q n_i^2}{1/\gamma_n N_{ts} (n_s + n_1)} \quad (5.51)$$

Из соотношения (5.51) видно, что как только в инверсионном слое возникнет число свободных электронов n_s , сравнимое либо большее n_1 , генерационный ток через ПС резко падает. Физически это означает, что при росте n_s начинают идти обратные переходы электронов из С-зоны на ПС, и темп генерации резко падает. Эти процессы показаны на рисунке 5.21.

Полезно сравнить генерационные токи через ПС в обеднении и через объемные уровни в неравновесной ОПЗ. Из соотношений (5.48) и (5.50) видно, что при прочих равных условиях

$$\frac{j_{ген}^{(ОПЗ)}}{j_{ген}^{(ПС)}} = \frac{N_{tv} \cdot W}{N_{ts}} \quad (5.52)$$

Из уравнения (5.52) следует, что генерационные токи через ПС и обедненную область сравнимы, если число генерационных центров на единицу площади в обоих случаях одинаково.

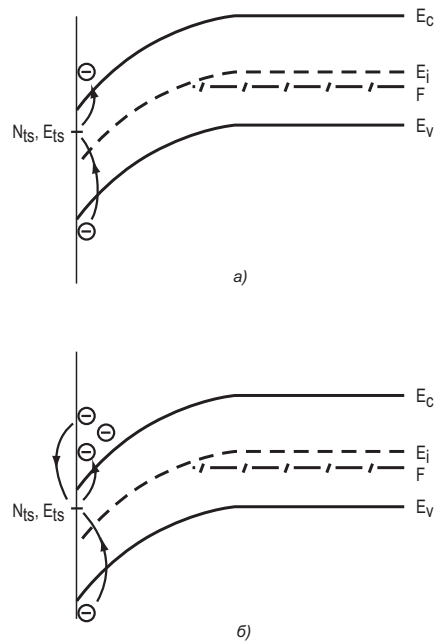


Рис. 5.21. Схема генерации через ПС

а) в области обеднения; б) при наличии инверсионного слоя

При конечных размерах МДП-структуры те ПС, которые расположены по периметру металлического затвора, будут находиться в несколько других условиях, чем ПС под затвором. Действительно, на краю ОПЗ у полевого электрода инверсионный канал не образуется, при релаксации всегда есть область ОПЗ, находящаяся в неравновесных условиях, и для нее величина $n_s \ll n_1$. Следовательно, генерационный ток через ПС на краю ОПЗ не будет зависеть от поверхностного потенциала ϕ_s и будет оставаться постоянным в процессе релаксации неравновесного обеднения.

Дрейфовый ток неосновных носителей из квазинейтрального объема

Рассмотрим зонную диаграмму ОПЗ в равновесном состоянии и в состоянии неравновесного обеднения. Для инверсионных изгибов зон в полупроводнике р-типа в равновесном состоянии в ОПЗ существуют две компоненты потоков для электронов – диффузионная (из ОПЗ) и дрейфовая (в ОПЗ). Если в момент $t = 0$ на поверхности создано неравновесное обеднение, то в ОПЗ есть только дрейфовая компонента $j_{др}$, которая будет “сгребать” электроны из ОПЗ в инверсионный канал. На границе квазинейтрального объема полупроводника возникнет градиент концентрации, который вызовет диффузионный поток электронов в квазинейтральном объеме полупроводника. Затем неосновные носители попадают в ОПЗ и уносятся электрическим полем к границе раздела

полупроводник-диэлектрик. Найдем, чему будет равен этот ток $i_{др}$. Скорость

диффузии неосновных носителей $v_{диф} = \frac{L_n}{\tau_n}$, где L_n - диффузионная длина, τ_n - время жизни. Тогда ток $j_{др}$ будет обусловлен электронами, находящимися в цилиндре с площадью $S = 1$ и длиной $l = v_{диф}$. Получаем

$$j_{др} = \frac{qn_{p0}L_n}{\tau_n} = \frac{qn_{p0}D_n}{L_n} \quad (5.53)$$

Соотношение (5.53) представляет собой одну из компонент обратного тока p-n перехода и при более строгом выводе будет иметь тот же самый вид. На рисунке 5.22 показана схема наблюдаемых переходов при учете дрейфового тока неосновных носителей из квазинейтрального объема.

Туннельный ток

При высоких величинах напряженности электрического поля E в ОПЗ возможны туннельные переходы электронов из валентной зоны в зону проводимости. На рисунке 5.23 показана схема таких переходов. В первом приближении выражение для туннельного тока в обедненной области эквивалентно выражению для тока туннельной инжекции Фаулера – Нордгейма и имеет вид

$$J_T = \frac{\sqrt{2m^*} \cdot q^2 \cdot E \cdot V}{4\pi^2 \hbar^2 E_0^{1/2}} \exp\left(-\frac{4\sqrt{2m^*} E_g^{3/2}}{3q\hbar E}\right) \quad (5.54)$$

Характерное расстояние для туннельных переходов L_T , как видно из рисунка 5.23, в значительной мере зависит от ширины запрещенной зоны полупроводника E_g и величины электрического поля E . Так, при поле $E = 10^6$ В/см величина L_T будет для Si $L_T = 1100 \text{ \AA}$, для InAs $L_T = 360 \text{ \AA}$ и для InSb $L_T = 170 \text{ \AA}$.

Как видно из соотношения (5.54) и рисунка 5.23, туннельный ток будет больше для узкозонных полупроводников с высоким значением легирующей концентрации.

Лавинное умножение в ОПЗ

При высоких значениях напряженности электрического поля в неравновесной части ОПЗ первичные электроны могут на длине свободного пробега λ набирать энергию λE , достаточную для дополнительной генерации электронно-дырочной пары, если величина $\lambda E = qE\lambda \geq E_g$. Процесс генерации дополнительных носителей за счет этого эффекта получил название лавинного умножения. Эффективность лавинного умножения характеризуется коэффициентом ударной ионизации α , который равен числу электронно-дырочных пар, генерируемых одним электроном (или дыркой) на

единице пути. По физическому смыслу величина \dot{a}^{-1}

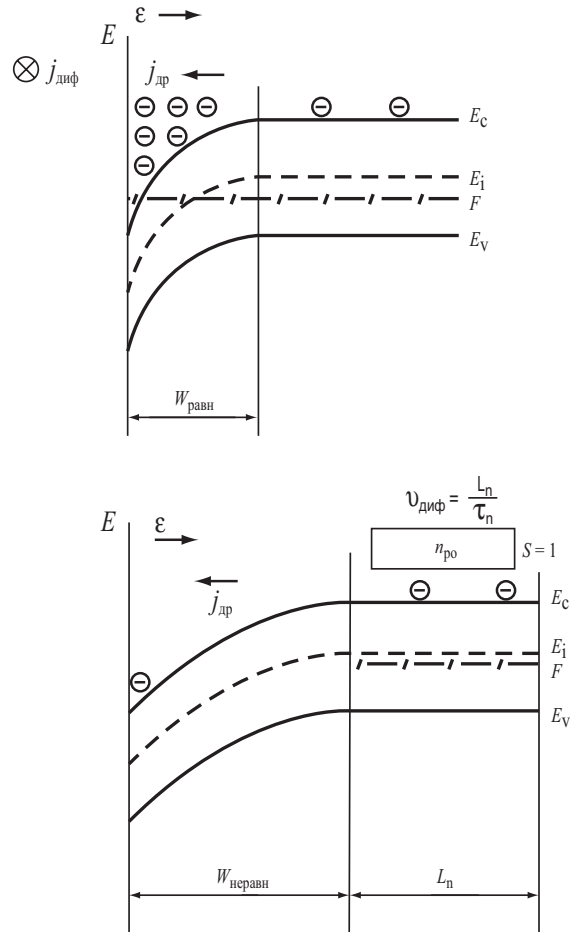


Рис. 5.22. Дрейфовые и диффузионные токи электронов в ОПЗ
а) равновесное состояние; б) неравновесное обеднение

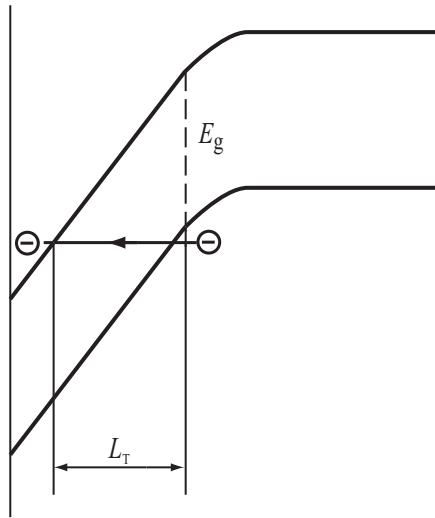


Рис. 5.23. Модель туннельного генерационного тока

будет равна среднему расстоянию $\langle z \rangle$, на котором горячий электрон генерирует одну электронно-дырочную пару. Коэффициент ударной ионизации $\dot{a}_{n,p}$ экспоненциально сильно зависит от напряженности электрического поля E . На рисунке 5.24 приведены зависимости \dot{a}_p и \dot{a}_n от напряженности поля E для кремния. Поскольку электрическое поле в ОПЗ распределено линейно по обедненной области, то пространственно лавинное умножение будет проходить неоднородно по ширине ОПЗ. На рисунке 5.25 схематически показан процесс лавинного умножения, а на рисунке 5.24 верхняя ось соответствует координатной зависимости в ОПЗ (p-Si, $\bar{n} = 1$ Ом·см) коэффициентов умножения электронов и дырок. Лавинное умножение приведет к тому, что исходный «затравочный» ток j_0 в ОПЗ будет усилен в M раз, где M – коэффициент умножения

$$j_{вых} = j_0 \cdot M \quad (5.55)$$

Выражение для коэффициента умножения M определяется коэффициентом ударной ионизации $\dot{a}_{n,p}$ и имеет вид

$$\frac{1}{M_p} = 1 - \int_0^w \alpha_p \exp \left[- \int_0^x (\alpha_p - \alpha_n) dx' \right] dx. \quad (5.56)$$

Аномальная генерация в ОПЗ

При исследовании генерационных характеристик области пространственного заряда часто встречаются локальные геометрические участки в ОПЗ размером от единиц до сотен микрон, характеризующиеся повышенным темпом генерации неравновесных носителей. Такие области получили название областей аномальной генерации. Общеизвестно, что аномальная генерация обусловлена структурными, фазовыми или зарядовыми

неоднородностями МДП-структур.

Физические механизмы генерации неосновных носителей, проявляющиеся при аномальной генерации, те же, что были рассмотрены в предыдущих разделах. Рассмотрим на примере неоднородности в зарядовом состоянии подзатворного диэлектрика МДП-структур, как может проявиться в МДП-структуре локальный повышенный темп генерации неравновесных носителей.

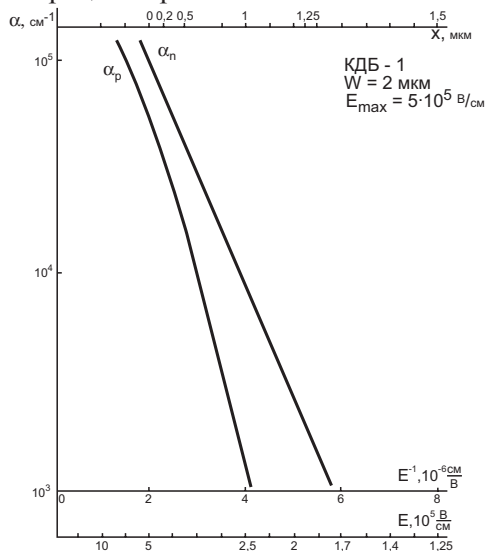


Рис. 5.24. Зависимость коэффициентов ударной ионизации электронов α_n и дырок α_p от электрического поля E в ОПЗ кремния

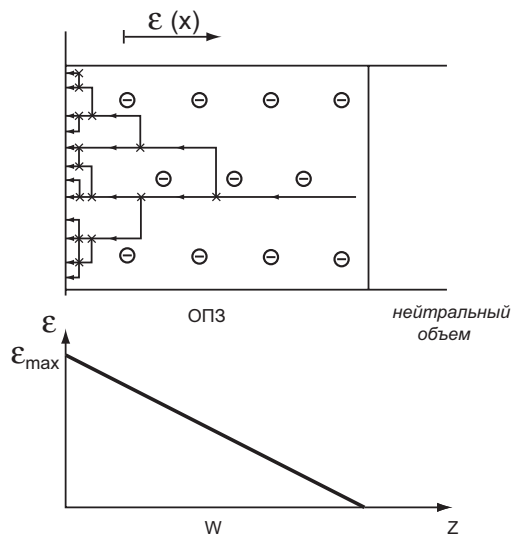


Рис. 5.25. Схема, иллюстрирующая лавинное умножение электронов в ОПЗ (дырки на схеме не показаны)

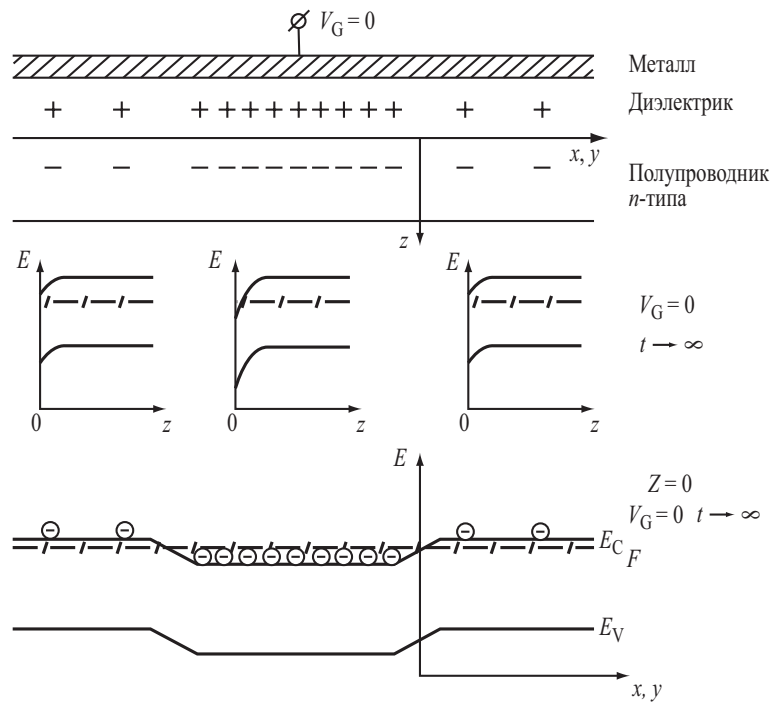


Рис. 5.26. Зонная диаграмма МДП-структуры с неоднородным встроенным в диэлектрик зарядом

На рисунках 5.26, 5.27, 5.28 приведены схема МДП-структуры с зарядовой неоднородностью и зонные диаграммы состояния ОПЗ на разных участках. Подадим импульс напряжения $V_G < 0$ такой, что ОПЗ полупроводника в момент времени $t = 0$ переходит в неравновесное обеднение, кроме части ОПЗ с повышенной концентрацией встроенного заряда (на рис. 5.27 изображена в центре). В неравновесном состоянии ОПЗ при $z = 0$ подобна туннельному диоду при обратном смещении. Поэтому в случае реализации резкой границы (малый встроенный заряд – большой встроенный заряд) будет идти туннельный генерационный ток дырок. Схема этого процесса изображена на рисунке 5.27. Зонная диаграмма, иллюстрирующая равновесное состояние, приведена на рисунке 5.28.

Для реализации туннельного процесса необходима небольшая ширина индуцированного $p^+ - n^+$ перехода на поверхности, порядка $\sim 100 \text{ \AA}$. Отметим, что при плотности встроенного заряда $N_{ox} = 10^{12} \text{ см}^{-2}$ среднее расстояние между зарядами $\langle a \rangle$ составляет как раз $\langle a \rangle = 100 \text{ \AA}$. Следовательно, при неоднородности встроенного заряда больше, чем 10^{12} см^{-2} , возможен локальный механизм генерации неосновных носителей типа параллельного поверхностного туннельного диода.

Другой тип аномальной генерации может быть обусловлен повышенной локальной концентрацией в ОПЗ рекомбинационных центров N_t Шокли-Рида. Третий тип аномальной генерации может быть обусловлен повышенной локальной концентрацией в ОПЗ легирующей примеси $N_{D,A}$ и реализацией перпендикулярного к поверхности туннельного диода.

5.6.2. Время релаксации неравновесного обеднения

Пусть импульсом напряжения на затворе V_G в момент времени $t = 0$ МДП-структура из равновесного состояния переведена в состояние неравновесного обеднения. Вследствие генерационных процессов неравновесное состояние будет релаксировать. Под временем релаксации неравновесного обеднения $\delta_{\text{рел}}$ обычно понимают среднее время, за которое МДП-структура перейдет.

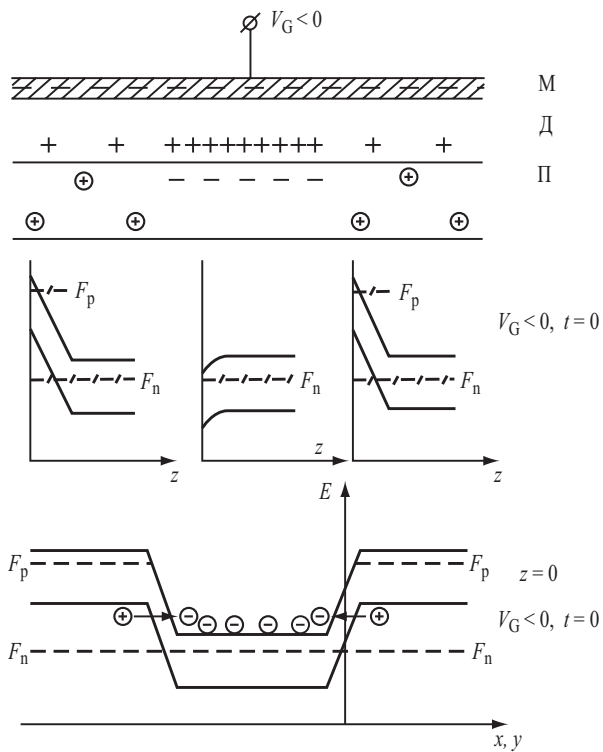


Рис. 5.27. Зонная диаграмма МДП-структуры, иллюстрирующая туннельный генерационный ток при неравновесном обеднении на краю зарядовой неоднородности

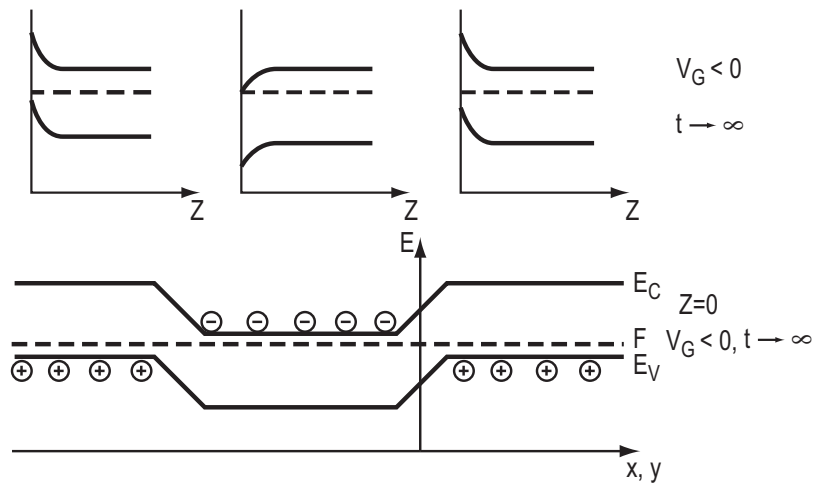


Рис. 5.28. Зонная диаграмма МДП-структуры, иллюстрирующая равновесное состояние после завершения релаксационных процессов

от неравновесного к равновесному состоянию. Величина времени релаксации $\hat{\delta}_{\text{рел}}$ зависит от того, в каком режиме – постоянного заряда на затворе $Q_B = \text{const}$ или постоянного напряжения на затворе $V_G = \text{const}$ происходила релаксация неравновесного обеднения. Время релаксации зависит также от доминирующего механизма генерации неосновных носителей, параметров МДП-структуры и величины тестирующего сигнала.

Время релаксации в режиме постоянного заряда на затворе

При условии постоянного заряда на затворе $Q_G = \text{const}$ постоянным будет и заряд в ОПЗ ($Q_G = Q_{\text{sc}} = \text{const}$). Поскольку релаксация ОПЗ происходит при условии постоянства заряда в ОПЗ ($Q_{\text{sc}} = \text{const}$), то $Q_p + Q_B = \text{const}$ и увеличение заряда свободных электронов сопровождается уменьшением ширины неравновесной ОПЗ W . Для объемной генерации и рекомбинации Шокли – Рида генерационный ток

$$j_{\text{ген}} = \frac{qn_i}{\tau_0} W(t). \quad (5.57)$$

заряд свободных дырок Q_p

$$Q_p = \int_0^t j_{\text{ген}}(t) dt = \frac{qn_i}{\tau_0} \int_0^t W(t) dt. \quad (5.58)$$

Величина заряда ионизированных доноров Q_n равна $Q_B = qN_D W(t)$.

Поскольку $\frac{\partial Q_p}{\partial t} = \frac{\partial Q_B}{\partial t}$, получаем $qn_i \frac{W(t)}{\tau_0} = qN_D \frac{dW(t)}{dt}$. Отсюда, разделяя переменные и интегрируя, получаем

$$W(t) = W(0) \exp\left(-\frac{n_i}{N_D} \frac{t}{\tau_0}\right) \quad (5.59)$$

где $W(0)$ – ширина неравновесного участка ОПЗ в момент времени $t = 0$.

Таким образом, время релаксации ОПЗ при объемном механизме генерации будет равно

$$\tau_{\text{рел}} = \tau_0 \frac{N_D}{n_i} \quad (5.60)$$

Время релаксации $\hat{\delta}_{\text{рел}}$ определяется вероятностью захвата электронов \tilde{a}_n и дырок \tilde{a}_p , числом генерационных центров N_g , их энергетическим положением $\hat{\delta}_{0t}$ относительно уравнения Ферми, температурой T , собственной концентрацией n_i и концентрацией примеси в подложке N_D . Значение $\hat{\delta}_0$ в (5.60) будет

$$\tau_0 = \tau_n \left(e^{\beta\phi_{0t}} + \frac{\gamma_n}{\gamma_p} e^{-\beta\phi_{0t}} \right) \quad (5.61)$$

где $\hat{\delta}_n$ – время жизни неравновесных электронов.

Из соотношений (5.60) и (5.61) следует, что определяемое время релаксации $\hat{\delta}_{\text{рел}}$ сложным образом связано со временем жизни неравновесных носителей $\hat{\delta}_n$, а рассчитанная из уравнения (5.60) величина $\hat{\delta}_0$, как правило, будет больше, чем время жизни $\hat{\delta}_n$.

В уравнении (5.59) величина времени релаксации $\hat{\delta}_{\text{рел}}$ определяется значением (5.60) как время, за которое ширина ОПЗ уменьшилась в “е” раз по сравнению с шириной ОПЗ в момент времени $t=0$. Отметим, что $\hat{\delta}_{\text{рел}}$ в режиме $Q_G = \text{const}$ не зависит от величины начального внешнего напряжения V_G и величины импульса напряжения ΔV_G , переводящего МДП-структуру в неравновесное обеднение.

Время релаксации в режиме постоянного напряжения на затворе

Представляет определенный интерес сравнить кинетику релаксации ОПЗ в режиме постоянного заряда $Q_G = \text{const}$ с кинетикой релаксации в режиме постоянного напряжения $V_G = \text{const}$. В случае $V_G = \text{const}$ из уравнения электро-нейтральности следует, что

$$C_{\text{ox}} \frac{d\psi_s}{dt} - \frac{\partial Q_p}{\partial t} + \frac{\partial Q_B}{\partial t} = 0 \quad (5.62)$$

Воспользуемся следующим соотношением

$$W(t) = \left[\frac{2\varepsilon_s \varepsilon_0 (\psi_s^{(n)} - \psi_s^{(p)})}{qN_D} \right]^{1/2}. \quad (5.63)$$

Поскольку

$$\frac{dW}{dt} = \left[\frac{\varepsilon_s \varepsilon_0}{2qN_D (\psi_s^{(n)} - \psi_s^{(p)})} \right]^{1/2} \frac{d\psi_s^{(n)}}{dt} \equiv C_B \cdot \frac{d\psi_s^{(n)}}{dt},$$

(5.64)

где C_B – емкость обедненной области.

Следовательно,

$$\frac{d\psi_s^{(n)}}{dt} = \frac{1}{C_B} \frac{dW}{dt}. \quad (5.65)$$

Подставляя (5.65) в (5.66) и проведя перестановки, получаем

$$qn_i \frac{W(t)}{\tau_0} = \left(1 + \frac{C_{\text{ox}}}{C_B} \right) \frac{dW(t)}{dt}. \quad (5.66)$$

Решение уравнения (5.66), так же как и (5.58), дает экспоненциальную зависимость ширины ОПЗ $W(t)$ от времени t

$$W(t) = W(0)e^{-t/\tau_{\text{рел}}};$$

$$\tau_{\text{рел}} = \tau_0 \frac{N_D}{n_i} \left(1 + \frac{C_{\text{ох}}}{C_B} \right). \quad (5.67)$$

Отметим, что величина емкости обедненного слоя C_B в соотношении (5.66) – усредненная величина согласно уравнению (5.64).

Сравнение времени релаксации $\hat{\delta}_{\text{рел}}$ в режиме постоянного заряда и постоянного напряжения дает

$$\tau_{\text{рел}}(V_G = \text{const}) > \tau_{\text{рел}}(Q_G = \text{const});$$

$$\frac{\tau_{\text{рел}}(V_G = \text{const})}{\tau_{\text{рел}}(Q_G = \text{const})} = 1 + \frac{C_{\text{ох}}}{C_B} > 1. \quad (5.68)$$

Физически этот факт обусловлен тем, что в режиме $V_G = \text{const}$ необходимо нагенерировать в ОПЗ большее число неосновных носителей для инверсионного слоя, чем в режиме $Q_G = \text{const}$.

5.6.3. Дискретные МДП-фотоприемники

Рассмотрим работу фотоприемника на основе МДП-структуры МДП ФПУ в режиме прибора с зарядовой инжекцией. На рисунке 5.29 показана зонная диаграмма, иллюстрирующая его работу. После подачи импульса напряжения $V_G < 0$ за момент времени, равный максвелловскому времени релаксации $\hat{\delta}_M$, реализуется состояние неравновесного обеднения (рис. 5.29). Состояние неравновесного обеднения хранится время t , равное времени релаксации неравновесной емкости $\hat{\delta}_p$. Если за это время в неравновесную ОПЗ попадет квант света в полосе собственного поглощения $h\nu > E_g$, то в ОПЗ произойдет генерация электронно-дырочных пар. Неосновные фотогенерированные носители будут заполнять неравновесную яму у поверхности (рис. 5.29). Поскольку на-

блюдается изменение заряда $\frac{\partial Q_p}{\partial t}$ в инверсионном слое, то через диэлектрик потечет довольно большой ток смещения $J_{\text{см}}$, который будет зарегистрирован во внешней цепи. Возможен и другой принцип регистрации фотонов – считывание информационного заряда, как в приборах с зарядовой связью (рис. 5.29).

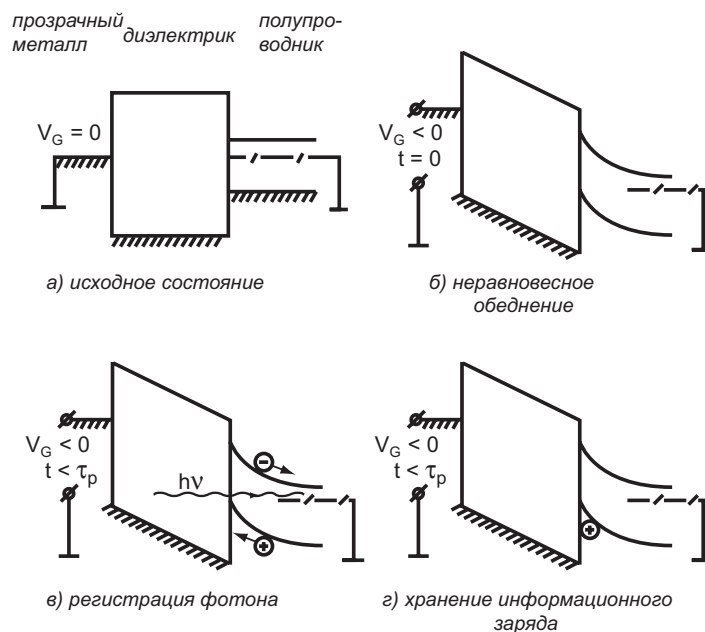


Рис. 5.29. Зонная диаграмма, иллюстрирующая работу МДП-структуры в качестве фотоприемного устройства

Через время t , равное времени релаксации неравновесной емкости $\hat{\delta}_p$, вследствие термогенерации «яма» для неосновных носителей заполнится. МДП-структура придет в равновесное состояние и утратит способность регистрировать кванты света. Поэтому необходимо привести МДП-структуру сначала в исходное состояние, а затем снова в состояние неравновесного обеднения. Следовательно, МДП ФПУ будет находиться в рабочем состоянии, если тактовая частота импульсов напряжения V_G будет больше, чем обратное время релаксации неравновесной емкости МДП-структуры.

(

Неравновесное обеднение

Рассмотрим МДП-структуру, находящуюся в равновесных условиях при некотором значении напряжения на затворе V_{G0} . Подадим на затвор дополнительно импульс напряжения V_n ($V_G = V_n + V_{G0}$), выводящий систему из термодинамического равновесия. Часть напряжения V_G упадет на диэлектрике (V_{ox}), часть на области пространственного заряда (ОПЗ) МДП-структуры ($V_{опз} = J_s$) (рис.).

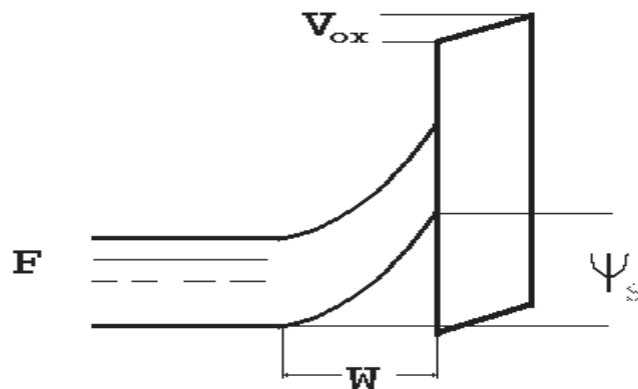


Рис. Зонная диаграмма МДП-структуры при неравновесном обеднении

МДП-структура в момент времени $t=0$ перейдет в неравновесное состояние и будет характеризоваться значениями поверхностного потенциала J_s , ширины W , заряда Q_{sc} , емкости C_{sc} ОПЗ, отличными от равновесных значений. При этом емкость всей МДП-структуры $C_{мп}$ меньше C_{min} , определяемой из равновесной высокочастотной вольфарадной характеристики (ВВФХ), и будет расти во времени, рис. .

Вследствие генерационно-рекомбинационных процессов, по мере формирования инверсионного канала и перераспределения напряжения между диэлектриком и полупроводником, МДП-структура будет переходить от неравновесного к равновесному состоянию. При этом время релаксации неравновесного обеднения $\tau_{рел}$ также будет зависеть от начального и конечного состояния ОПЗ (обеднение или инверсия).

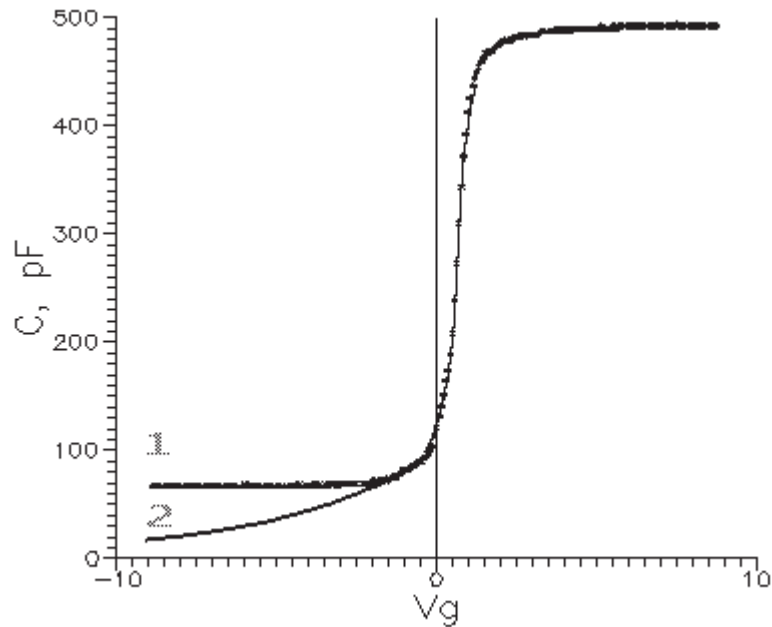


Рис. Равновесная (1) и неравновесная (2) ВВФХ

При релаксации неравновесного обеднения на поверхности полупроводника происходит заполнение потенциальной ямы неосновными носителями заряда до равновесного значения. Выражение для генерационного тока будет:

$$J_{gen}(t) = \frac{qn_i}{\tau} W(t) + \frac{qn_i^2 \gamma_n N_{ts} P}{n \cdot A} W(t) + \frac{qn_i^2 \gamma_n N_{ts}}{n + n_i} + \frac{qn_p}{i} \quad (1)$$

где n_i - концентрация носителей заряда в собственном полупроводнике, n_s , Γ_s - поверхностная концентрация и избыток неосновных носителей заряда; P/A - отношение периметра к площади МДП структуры; n_{po} , D_n , L_n - концентрация, коэффициент диффузии, диффузионная длина неосновных носителей;

γ_n - вероятность захвата;

N_{ts} - плотность ПС;

Γ_n - избыток неосновных носителей в инверсионном слое на поверхности вне затвора;

τ_g - время жизни неосновных носителей;

W - ширина ОПЗ.

Здесь первое слагаемое соответствует генерации Шокли-

Рида (через объемные локальные центры в ОПЗ, находящиеся в запрещенной зоне полупроводника). Второе - генерации через ПС периферии затвора, третье - генерации через ПС под электродом затвора, четвертое - подтеканию носителей из ОПЗ вне затвора, пятое - планарному диффузионному подтеканию из ОПЗ вне затвора.

)

5.6.4. Матрицы фотоприемников с зарядовой связью (ФПЗС)

Новым типом полевых полупроводниковых приборов, работающих в динамическом режиме, являются приборы с зарядовой связью (ПЗС). На рисунке 5.30 приведена схема, поясняющая устройство и основные физические принципы работы ПЗС. Приборы с зарядовой связью представляют собой линейку или матрицу последовательно расположенных МДП-структур. Величина зазора между соседними МДП-структурами невелика и составляет 1-2 мкм. ПЗС-элементы служат для преобразования оптического излучения в электрические сигналы, и передачи информации от одного элемента электронной схемы к другому. На рисунке 5.30 показан принцип работы трехтактного прибора с зарядовой связью. [8, 68]

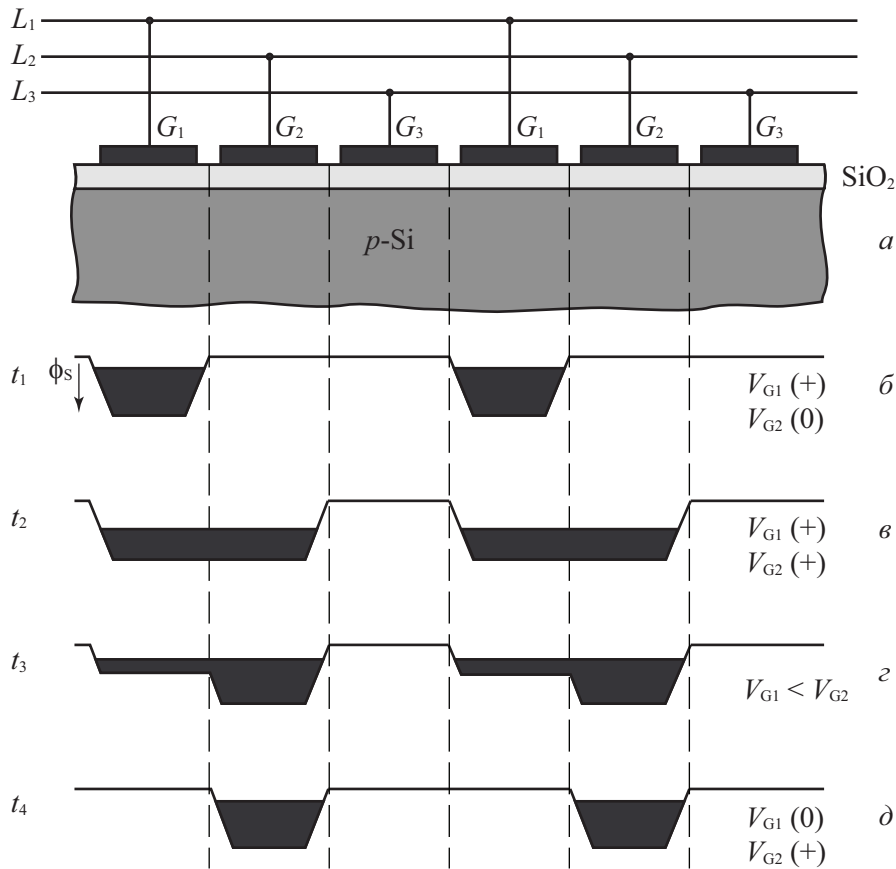


Рис. 5.30. Устройство и принцип работы приборов с зарядовой связью

Рассмотрим принцип работы ПЗС. При подаче обедняющего импульса напряжения V_{G1} на затвор 1-го элемента в ОПЗ полупроводника образуется неравновесный слой обеднения. Для электронов в полупроводнике р-типа это соответствует формированию под затвором 1-го элемента потенциальной ямы. Известно, что неравновесное состояние сохраняется в период времени t порядка времени генерационно-рекомбинационных процессов $\hat{\delta}_{\text{ген}}$. Поэтому все остальные процессы в ПЗС-элементах должны проходить за времена меньше $\hat{\delta}_{\text{ген}}$.

Пусть в момент времени $t_1 \gg \hat{\delta}_{\text{ген}}$ в ОПЗ под затвор 1-го элемента инжектирован каким-либо образом информационный заряд электронов (рис. 5.30б). Теперь в момент времени $t_2 > t_1$, но $t_2 \ll \hat{\delta}_{\text{ген}}$ на затвор 2-го ПЗС-элемента подадим напряжение такое же, как и напряжение на первом электроде (рис. 5.30в). В этом случае информационный заряд перераспределится между двумя этими электродами. Затем напряжение на втором электроде увеличим, а на первом уменьшим, $V_{G2} > V_{G1}$, что способствует формированию более

глубокой потенциальной ямы для электронов под затвором 2-го элемента. Вследствие диффузии и дрейфа возникнет поток электронов из ОПЗ под 1-м элементом в ОПЗ под вторым элементом, как показано на рисунке 5.30в. Когда весь информационный заряд перетечет в ОПЗ 2-го ПЗС-элемента, напряжение на затворе V_{G1} снимается, а на затворе V_{G2} уменьшается до значения, равного V_{G1} (см. рис. 5.30д). Произошла передача информационного заряда. Затем цикл повторяется, и заряд передается дальше в ОПЗ 3-го ПЗС-элемента.

Для того, чтобы приборы с зарядовой связью эффективно функционировали, необходимо, чтобы время передачи $t_{пер}$ от одного элемента к другому было много меньше времени генерационно-рекомбинационных процессов ($t_{пер} \ll \delta_{ген}$). Не должно быть потерь информационного заряда в ОПЗ вследствие захвата на поверхностные состояния, в связи с чем требуются МДП-структуры с низкой плотностью поверхностных состояний ($N_{ss} \approx 10^{10} \text{ см}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$) [10, 30].

Приборы с зарядовой связью реализуются в виде матриц размерностью, кратной 2^n . Типичный размер для матрицы емкостью 5 мегапикселей составляет 2048×2048 элементов. На рисунке 5.31 приведена схема ПЗС-матрицы с регистрами сдвига, обеспечивающими считывание информационного заряда с индивидуальных элементов – пикселей.

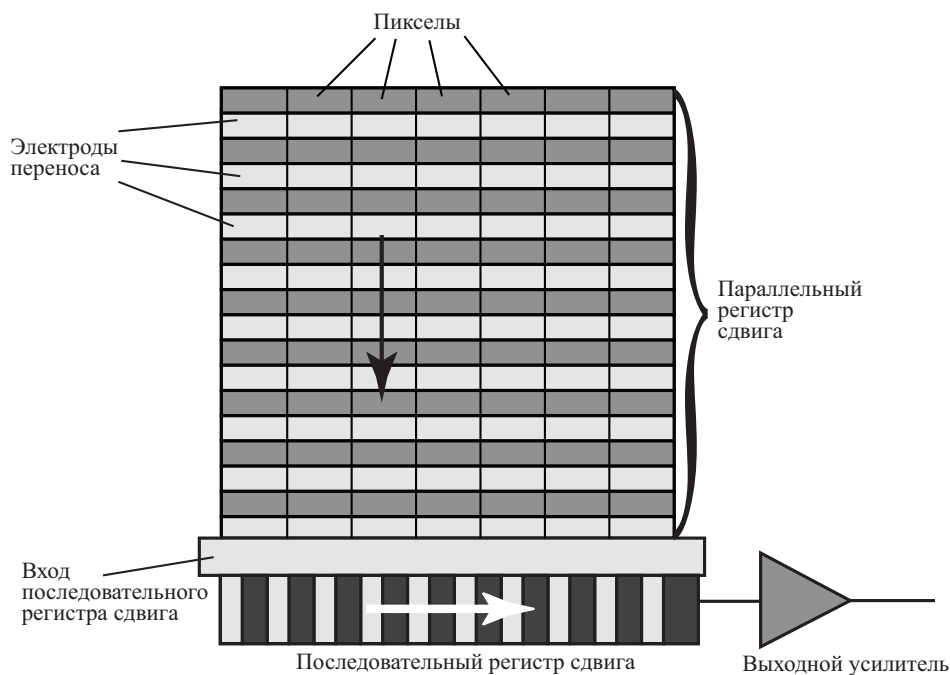


Рис. 5.31. ПЗС-матрица с регистрами сдвига, обеспечивающими считывание информационного заряда с индивидуальных элементов – пикселей

Формат матрицы

Размер матрицы описывается параметром, называемым формат. Формат — это размер диагонали матрицы, приблизительно равный диаметру мишени соответствующего видикона. Он измеряется в дюймах и принимает значения: 1", 2/3", 1/2", 1/3", 1/4". Матрицы большого формата 1", 2/3" практически перестали выпускаться, так как камеры на их основе получаются очень громоздкими и дорогими. Последние модели ПЗС - матриц фирмы "Sony" имеют формат 1/4". На основе таких матриц некоторые фирмы выпускают сверхминиатюрные камеры.

Совершенствование технологий позволяет производить уменьшение формата без ухудшения качества передаваемого изображения. Каждая новая матрица при меньшем формате имеет разрешение не хуже, чем предшественница.

Размер матрицы важен при определении необходимого угла обзора камеры. С одинаковыми объективами камера на основе матрицы 1/2" имеет больший угол зрения, чем камера с матрицей 1/3".

Основное применение матрицы элементов с зарядовой связью нашли в цифровых видеокамерах и фотоаппаратах. Удешевление телевизионных камер на основе ПЗС, уменьшение их габаритов и веса, низкое энергопотребление, простота и надежность в эксплуатации позволили применять их не только в профессиональных студиях, в научных исследованиях, в дорогостоящих системах военного назначения. В настоящее время телекамеры на основе ПЗС - матриц можно встретить в самых разных областях производства, сфере услуг, сервиса, в системах охраны. Появление миниатюрных телекамер с применением ПЗС - матриц с размерами пиксела в несколько микрон позволило применять ПЗС телекамеры в микрохирургии, микробиологии, микровидеооптике, серийное производство ПЗС - матриц осуществляется компаниями Texas Instruments, Ford Aerospace, Sony, Panasonic, Samsung, Hitachi, Kodak.

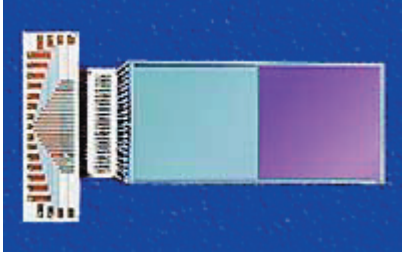
Среди российских производителей — научно - производственное предприятие «Электрон – Оптроник» и НПП «Силар» из Санкт-Петербурга, которая является единственным в России производителем ПЗС - матриц, применяемых в научных и коммерческих целях.

Основное применение матрицы элементов с зарядовой связью нашли в цифровых видеокамерах и фотоаппаратах. Удешевление телевизионных камер на основе ПЗС, уменьшение их габаритов и веса, низкое энергопотребление, простота и надежность в эксплуатации позволили применять их не только в профессиональных студиях, в научных исследованиях, в дорогостоящих системах военного назначения. В настоящее время телекамеры на основе ПЗС-матриц можно встретить в самых разных областях производства, сфере услуг, сервиса, в системах охраны. Появление миниатюрных телекамер с примени-

ем ПЗС-матриц с размерами пиксела в несколько микрон позволило применять ПЗС телекамеры в микрохирургии, микробиологии, микровидеооптике, серийное производство ПЗС-матриц осуществляется компаниями Texas Instruments, Ford Aerospace, Sony, Panasonic, Samsung, Hitachi, Kodak.

Среди российских производителей – научно - производственное предприятие «Электрон – Оптроник» и НПП «Силар» из Санкт-Петербурга, которая является единственным в России производителем ПЗС-матриц, применяемых в научных и коммерческих целях. В качестве примера российской продукции приведем матрицу ПЗС марки ISD-077, в которой число элементов составляет 1040 при размере ячейки 16×16 мкм с общей площадью фоточувствительной поверхности $16,6 \text{ мм}^2$, частотой считывания 10 МГц и эффективностью переноса заряда 0,99999. На ее базе разработана малокадровая цифровая 14-разрядная ПЗС-камера S2C/077, укомплектованная охлаждаемым ПЗС типа ISD-077APF с волоконно-оптическим входным окном. ПЗС-камера предназначена для регистрации изображений в ультрафиолетовом и видимом спектральных диапазонах при низких уровнях освещенности в астрономии, медицине, биологии, научном эксперименте.

ПЗС фотоприемники ГУП НПП «Пульсар»

	<p>ФПЗС 1200Ц12 Линейка 2048 фотодиодов размером 10×12 мкм в технологическом держателе</p>
	<p>ФПЗС А1139 Матрица с переносом кадра 1154×576 16×16 мкм стыковка по трем сторонам, антибллюминг.</p>
	<p>ПЗС 1200Ц14 4 линейки по 2048 фотодиодов 15×15 мкм светофильтры: R,G,B и панхроматический либо интерференционные</p>

	<p>ФПЗС А1094 Полнокадровая матрица 800x800 пикселей размером 15x15мкм 4 секции 800x200 2 выходных регистра</p>
ПЗС фотоприемники ГУП “Электрон-Оptronик”	
	<p>ФПЗС “Конвой” 1024x1024 пикселей размером 16x16мкм Высокая чувствительность Зарядовая ёмкость 130000 е Шум 15 е. Конструкция обеспечивает стыковку по трем сторонам</p>
	<p>ФПЗС ISD017A 1140x1060 пикселей размером 16x16мкм Высокая чувствительность</p>
	<p>ФПЗС “Круз” ВЗН 1024x128 пикселей размером 9x9мкм Изменение числа шагов накопления: 2, 4, 8, 16 раз Зарядовая ёмкость 70000 е Шум 50 е.</p>

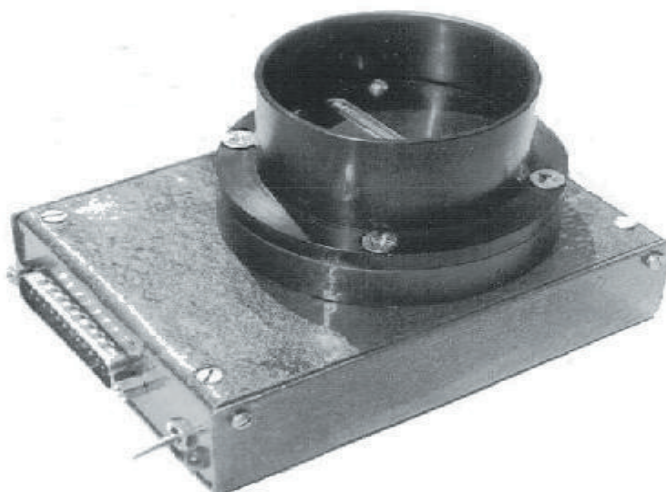
ПЗС фотоприемники НПП "ОПТЭКС"	
	<p>ФПЗС АМ-7 ВЗН 512x128 пикселей размером 12x12мкм Изменение числа шагов накопления: 2, 4, 8, 16 раз Дискретное изменение направления переноса заряда: $\pm 7,5^\circ$ от направления столбцов</p>
	<p>ФПЗС МИС ВЗН 512x128 пикселей размером 12x12мкм шаг расположения пикселей по столбцу линейно изменяется от 12 до 24 мкм Изменение числа шагов накопления: 2, 4, 8, 16 раз</p>
	<p>ФПЗС АМ-8 ВЗН 512x128 пикселей размером 12x12мкм Изменение числа шагов накопления: 2, 4, 8, 16 раз переменный наклон столбцов от $-25,6^\circ$ до $+25,6^\circ$ с шагом $0,1^\circ$</p>

Примеры применения

Универсальный фотоприемный модуль УФПМ-100

УФПМ-100 - серия компактных корпусных модулей регистрации оптической информации многоэлементным линейным фотоприемником с последующим ее вводом в ЭВМ. Модули подключаются к компьютеру через стандартный LPT порт и поддерживают SPP и EPP протоколы обмена данных. Благодаря использованию современной элементной базы модули могут быть быстро адаптированы под использование практически любого фотоприемника - как на основе ПЗС, так и фотодиодных, пиро и прочих структур.

УФПМ-100



УФПМ-100 могут найти применение в составе приборов и систем, используемых для решения широкого круга задач, таких как спектральный анализ, системы технического зрения и прочее.

Конструктивно модули представляют компактный блок, на котором расположены разъёмы и выключатель питания.

УФПМ-100 поставляется с техническим описанием и текстом драйвера для связи с ЭВМ. По заявкам потребителей модули комплектуются пакетом программного обеспечения, позволяющим работать с устройствами в операционных системах MS DOS и Windows 95/98. Программы имеют удобный пользовательский интерфейс, позволяют осуществлять анализ данных в режиме реального времени, изменять режим запуска (синхронно с внешними запускающими сигналами, либо асинхронно командами управляющей программы), обеспечивают управление параметрами измерений (временем интегрирования, режимами накопления и отображением результатов).

Питание модулей может осуществляться как от блока питания ЭВМ так и от автономного устройства. В комплект поставки могут быть включены фланцы для сопряжения со стандартными оптическими устройствами.

Технические характеристики фотоприемного модуля УФПМ-100 модификации 1А (на основе ФПЗС фотоприемника ILX526 "SONY")

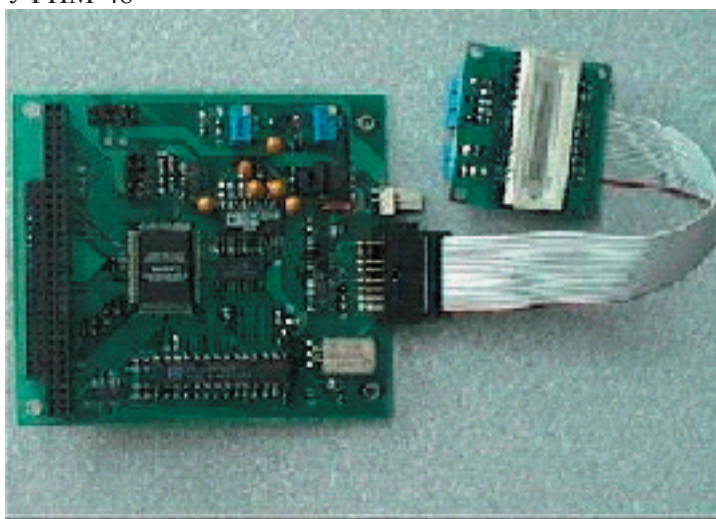
Спектральный диапазон	350-1100 нм
Динамический диапазон	>1000
Диапазон установки времени интегрирования	2мс-1мин
Максимальная частота пересылки массивов данных в ЭВМ	50Гц

Число элементов	3076
Размер элемента	7x200 мкм
Число разрядов используемого АЦП	12
Габаритные изменения, мм	75x95x25
Масса без фланца	300 г
Питание	+/- 5V, 300 mA + 12V, 150 mA - 12V, 50 mA

Универсальный фотоприемный модуль УФПМ-48

УФПМ-48 - серия компактных бескорпусных модулей, предназначенных для регистрации оптической информации многоэлементным фотодиодным приёмником и ввода этой информации в цифровой виде в ЭВМ через шину РС-104. Модули ориентированы на работу в условиях жестких технологических производств в режиме реального времени, изготавливаются при полном соблюдении всех требований стандарта РС-104 и имеют расширенный температурный диапазон.

УФПМ-48



Модули комплектуются техническим описанием. Возможна поставка пакетов программного обеспечения, позволяющие работать с устройствами в операционных системах MS DOS, Windows 95/98 и QNX. Программы пакетов имеют удобный пользовательский интерфейс, позволяют осуществлять анализ данных в режиме реального времени, изменять режим работы, обеспечивают управление параметрами измерений (временем интегрирования, режимами накопления и отображением результатов). По специальному требованию модули УФПМ-48 могут быть адаптированы

под использование другого типа фотоприемника - на основе ПЗС, фотодиодных, пиро и прочее структур.

Модули поставляются в следующих модификациях		
Марка	Фотоприемный элемент	Интерфейс с ЭВМ
УФПМ-48-2Б	ФУК1-Л2	РС-104 ISA
УФПМ-48-4Б	ФУК1-Л4	РС-104 ISA

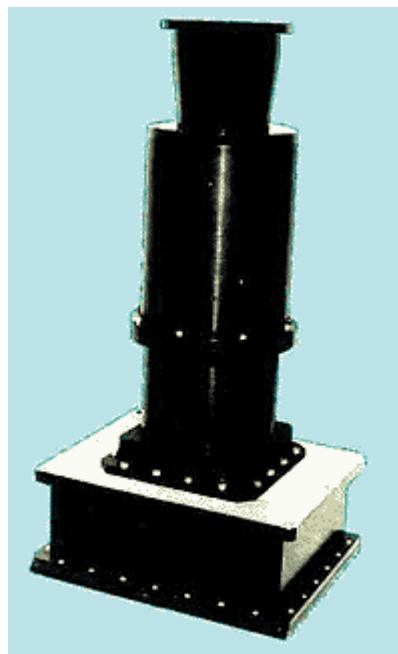
Технические характеристики УФПМ-48	
Спектральный диапазон	250-1100 нм
Динамический диапазон	>4000
Диапазон установки времени интегрирования	2мс-1мин
Максимальная частота измерения	500Гц
Число элементов в линейке	1024
Размер элемента фотоприемник для ФУК1-Л2 для ФУК1-Л4	25x150 мкм 25x1000 мкм
Число разрядов используемого АЦП	12
Масса	200 г
Питание	+/- 5V, 300 мА + 12V, 150 мА - 12V, 50 мА

Оптико-электронные камеры видимого диапазона

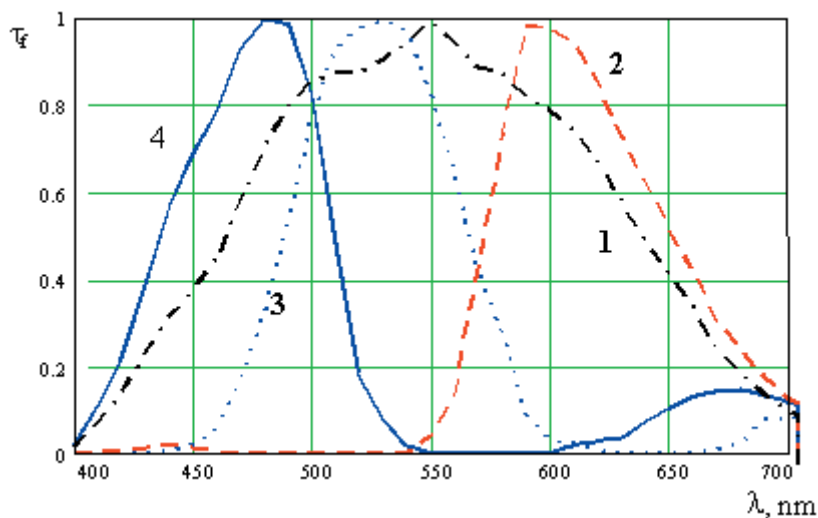
Оптико-электронные камеры, разрабатываемые НПП «ОПТЭКС», для дистанционного зондирования Земли, как правило предназначены для съемки поверхности Земли в режиме “push broom”. При этом сканирование поверхности осуществляется за счет движения космического аппарата по орбите. Для систем с разрешением от 5 метров и вплоть до 1-4 км, как правило используются линейки ПЗС длиной от 2 до 8 тысяч элементов. Камеры для более высокого разрешения строятся на основе матриц ПЗС, работающих в режиме временной задержки и накопления. Оптико-электронная камера, как правило включает в себя: объектив, светозащитное устройство с блендой и крышкой, спектроразделительное устройство или светофильтры, один или несколько фотоприемников ПЗС с электроникой управления, усиления, аналого-цифрового преобразования видеосигнала и передачи его в информационные каналы. Обеспечивается управление оптимальной работой камер в широком диапазоне условий освещенности, высот орбиты.

Мультиспектральная оптико-электронная камера КОЭ-ОЗ

Поле зрения:	4 x 2048 pix
Объектив:	8,8°
Спектральные диапазоны:	F=200мм (1:3,5) 0,43-0,70 мкм 0,56-0,70 мкм 0,48-0,50 мкм
Полоса захвата (H=1000км)	0,43-0,52 мкм
Разрешение: (H=1000км)	150 км 75 м
Масса:	9,6 кг
Мощность	25 Вт
Диапазон температур	-10°C до +40°C
Срок службы	5 лет



Оптико-электронная камера КОЭ-ОЗ конструктивно выполнена в виде герметичного моноблока. Внутри герметичного объема находятся: ФПЗС, электронные ячейки управления ФПЗС и обработки видеосигнала, источники вторичного питания, а также объектив. Конструкция, структура и облик камеры в значительной мере определены типом использованной ФПЗС -1200ЦЛ4 (ГУП НПП "Пульсар"), которая совмещает в едином кристалле 4 линейки ПЗС. Использованное конструктивное решение позволило применить относительно простую оптическую систему: объектив с фокусным расстоянием 200 мм и относительным отверстием 1:3,5. Габаритные размеры камеры 500x250x200 мм, включая бленду. ФПЗС 1200ЦЛ4 содержит 4 параллельных линейки, по 2048 фотодиодов размером 15x15 мкм, расположенных с шагом 0,57 мм. В состав микросхемы входят светофильтры. Возможно применения светофильтров различного типа: интерференционных или на основе органических красителей. Окончательная спектральная чувствительность КОЭ-ОЗ определяется как светофильтрами, так и спектральной характеристикой ФПЗС, а также входного окна и объектива.



Относительная спектральная чувствительность каналов оптико-электронной камеры КОЭ-ОЗ:

- | | | | |
|---|---|---------|--------|
| 1 | - | панхр. | канал; |
| 2 | - | красный | канал; |
| 3 | - | зеленый | канал |
- 4 - синий канал

Камера для астрономических наблюдений



Оптико-электронная камера на ПЗС форматом 800x800 пикселей размером 15x15 мкм и содержит в своем составе светосильный объектив с фокусным расстоянием 160 мм. Камера имеет поле зрения несколько угловых градусов и по принятой в астрономии классификации близка к астрографам,- приборам, предназначенным для съемки больших участков звездного неба с невысоким угловым разрешением.

Поле зрения 4,3 x 4,3 градуса. Предельная обнаружительная способность 10m_v

В настоящее время находится в разработке вариант камеры с улучшенными характеристиками.

Контрольные вопросы

- 5.1 Что такое удельная обнаружительная способность фотоприемника?
- 5.2. В каких типах фотоприемников при регистрации оптического излучения используются основные носители?
- 5.3. В чем различие в конструкции и характеристик фотодиодов с р-п переходом, с рп структурой, с лавинным умножением?
- 5.4. Как можно реализовать внутреннее усиление в фотоприемниках?
- 5.5. В чем заключается принцип работы динамических фотоприемников на основе МДП структур?
- 5.6. Как регистрируется и передается информация в матрицах ФПЗС?

Задачи

5.1. Идеальный фотодиод (т.е. с квантовым выходом равным 1) освещается излучением мощностью $P=10$ мВт при длине волны 0.8 мкм. Рассчитать ток и напряжение на выходе прибора, когда детектор используется в режиме фототока и фото-э.д.с. соответственно. Ток утечки при обратном смещении $I_0=10$ нА, рабочая температура $T=300$ К.

5.2. Фотодиод на основе р-п перехода имеет квантовый выход 50% на длине волны 0.9 мкм. Рассчитать чувствительность R , поглощенную оптическую мощность P ($I_p=1$ мкА) и число фотонов, поглощенных в секунду на этой длине волны Γ_p .

5.3. Лавинный фотодиод с коэффициентом умножения $M=20$ работает на длине волны $\lambda=1.5$ мкм. Рассчитать квантовый выход и выходной фототок прибора, если его чувствительность R на этой длине волны равна 0.6 А/Вт при потоке 10^{10} фотонов/с.

5.4. Кремниевый лавинный фотодиод имеет коэффициент умножения $M=20$ на длине волны 0.82 мкм при этом квантовый выход 50% и темновой ток 1 нА. Определить число падающих фотонов Γ_p на этой длине волны в секунду, обеспечивающее выходной ток прибор (после умножения), большой уровня темнового тока.

Глава 6. Пассивные оптические элементы

6.1. Роль соединителей

Соединение различных частей волоконно-оптической системы крайне важно для ее работы. 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.

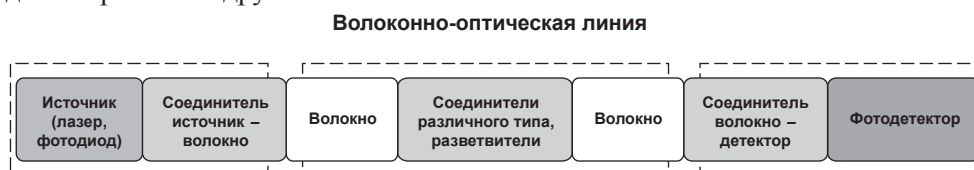


Рис. 6.1 Соединительные элементы в оптоволоконной линии связи

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, переконфигурацию контура и перераспределение оптической энергии одного волокна на несколько других волокон.

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. Наиболее современные и быстродействующие передающие и принимающие устройства могут устанавливаться без каких-либо изменений в волоконном контуре.

Важным элементом является соединение источника с оптоволоконном. Основная задача — это обеспечение максимально возможного уровня мощности, передаваемой от источника к оптическому волокну. Оптические характеристики источника и волокна должны быть при этом согласованы.

Выходная диаграмма света является важной характеристикой для воло-

конно-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.

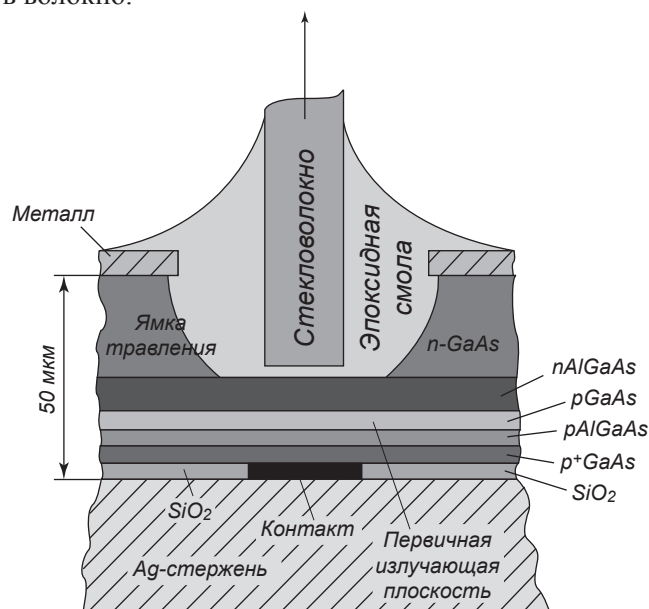


Рис. 6.2 Схема соединения источника и оптоволоконна

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.

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

$$loss_{dia} = 10 \cdot \lg \left(\frac{dia_{fiber}}{dia_{source}} \right)^2. \quad (6.1.1)$$

Потери отсутствуют, когда диаметр ядра волокна превосходит диаметр источника.

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

$$loss_{dia} = 10 \cdot \lg \left(\frac{NA_{fiber}}{NA_{source}} \right)^2. \quad (6.1.2)$$

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

Соединение оптоволокну с фотодетектором также представляет важный элемент. Два основных источника потерь при подключении к волокну возникают из-за рассогласования диаметров и апертуры.

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.

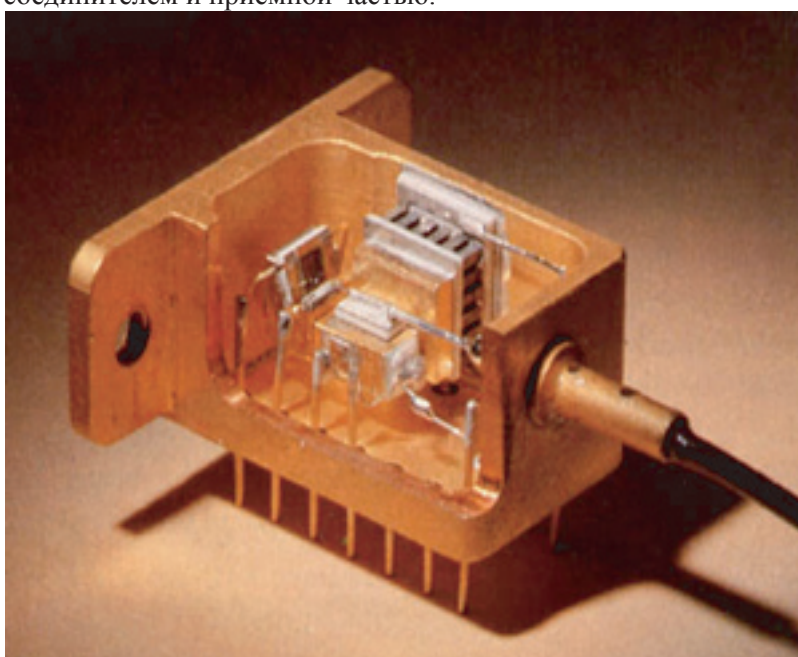


Рис. 6.3. Источник с подключенным оптоволокну

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.

Неразъемный соединитель (сплайс, “заплатка”) – устройство, предназначенное для постоянного соединения одного волокна с другим. Некоторые производители предлагают многоразовые сплайсы, позволяющие разрывать соединение или переконфигурировать волоконную цепь.

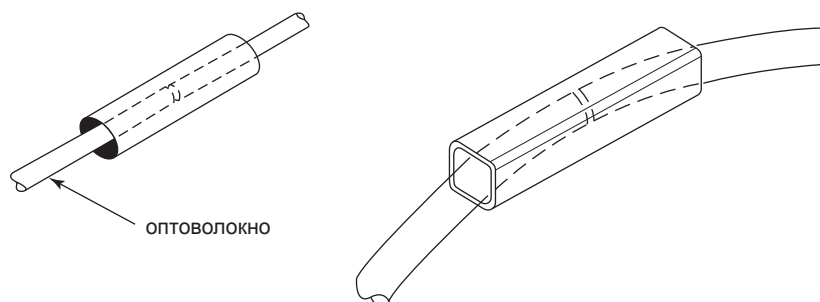


Рис. 6.4. Сплайсы

Разъемный соединитель (разъем, коннектор) – устройство, служащее для подключения волокна к источнику, детектору или к другому волокну. В его конструкции заложена возможность многократного подключения и отключения волокна.

Поскольку производители волокон поставляют кабели ограниченной длины — обычно от 1 до 6 км, в длинной линии концы волокон необходимо сращивать 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).



Рис. 6.5. Разъемный соединитель

На практике, когда возникает необходимость протянуть кабель через закрытый канал, не удастся использовать даже 6 километровый кабель, в то время как кабель меньшей длины облегчает процесс прокладки.

6.2. Требования к соединителям

Требования 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 многократные подключения 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:

- 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.

6.3. Причины возникновения потерь в соединении

Существует две причины возникновения потерь в волоконно-оптическом соединении:

— внутренняя, или связанная с нестабильностью параметров самого волокна;

— внешняя, связанная непосредственно с соединителем.

6.3.1. 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.

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 оси эллипсов могут быть перпендикулярны, 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 ± 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 ± 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.

6.3.2. Внешние факторы

Сами соединители также приносят определенные потери в соединение. Ниже рассмотрены четыре основные причины возникновения потерь в соединителе, которые необходимо контролировать.

Боковое смещение

Если центральная ось одного волокна не совпадает с центральной осью

другого, то неизбежно возникновение потерь. Допустимое рассогласование становится меньше при уменьшении размера волокна. Очевидно, что контроль бокового смещения особенно затруднен в волокнах малого диаметра. Производители соединителей стремятся ограничить смещение до уровня менее 5 % диаметра ядра.

Зазор между сколами

Соединение двух волокон, разделенных небольшим зазором, подвержено двум видам потерь.

Первый – это френелевское отражение, связанное с разницей показателей преломления волокон и среды в зазоре (обычно воздух). 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 показателем преломления.

Второй вид потерь в многомодовых волокнах связан с потерей мод высокого порядка при прохождении светом зазора и на входе в ядро второго волокна. 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.

Угловое рассогласование ориентации осей

Сколы обработанных волокон должны быть перпендикулярны осям волокон и параллельны друг другу при соединении. Уровень потерь, связанных с угловым рассогласованием ориентации осей относительно друг друга, также определяется NA волокон. В данном случае влияние NA противоположно эффекту 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 смещением. Дело в том, что при скалывании 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.

6.4. Разветвители

6.4.1. Принципы устройства разветвителей

Разветвитель является многопортовым устройством. Портом называется входная или выходная точка для света. С использованием разветвителей связано несколько видов потерь. На рис. 6.6 представлена схема четырехпортового разветвителя, которая будет использоваться для иллюстрации основных идей, заложенных в эти конструкции. Стрелками показаны направления возможных потоков света внутри разветвителя. Свет, вошедший через порт 1, может выходить через порты 2 и 3. В идеале данный источник света не может проявлять себя через порт 4. Аналогично свет, инжектируемый через порт 4, может выходить через порты 2 и 3, но не через порт 1.

Изображенный разветвитель является пассивным и двунаправленным.

Порты 1 и 4 могут служить в качестве входных, а порты 2 и 3 — выходных.

Возможно также обратное распространение света и изменение роли портов.

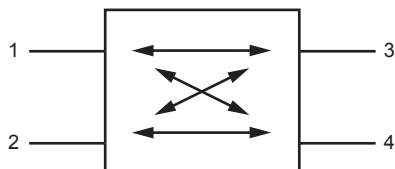


Рис. 6.6. Схема четырехпортового двунаправленного разветвителя

Для анализа потерь представим в качестве входного порт 1 и в качестве выходных — порты 2 и 3. Выходная мощность через порт 2 всегда превосходит выходную мощность через порт 3. Таким образом, порт 2 является сквозным. Порт 3 является заглушенным портом. Данные термины подчеркивают тот факт, что основная часть мощности выходит через сквозной порт, в то время как менее мощный световой канал является заглушенным!

Сквозные потери определяются отношением выходной мощности через порт 2 к входной мощности через порт 1:

$$loss_{THP} = 10 \cdot \lg_{10} \left(\frac{P_2}{P_1} \right). \quad (6.4.1)$$

Потери заглушенного канала определяются отношением мощности, проходящей через порт 3, к мощности, приходящей на порт 1:

$$loss_{TAP} = 10 \cdot \lg_{10} \left(\frac{P_3}{P_1} \right). \quad (6.4.2)$$

Направленность определяется отношением между нежелательным выходом энергии через порт 4 к энергии, входящей через порт 1:

$$loss_D = 10 \cdot \lg_{10} \left(\frac{P_4}{P_1} \right). \quad (6.4.3)$$

В идеале никакая мощность не должна выходить через порт 4 и, следовательно, $loss_D = 0$. На практике некоторая мощность направляется через данный порт и теряется или отражается. Направленность иногда называется изолированностью. Направленность или изолированность в хорошо заглушенном порту составляет 40 дБ или больше; только очень малая часть света выходит через порт 4.

Избыточные потери определяются отношением суммы мощности, выходящей через порты 2 и 3, к входной мощности, подводимой через порт 1:

$$loss_E = 10 \lg_{10} \left(\frac{P_2 + P_3}{P_1} \right). \quad (6.4.4)$$

Избыточные потери возникают из-за того, что разветвитель не является идеальным устройством. Потери происходят внутри волокон в разветвителе благодаря наличию рассеяния, поглощения, отражения, выхода через буфер или просто плохой изоляции. В идеальном разветвителе сумма выходных мощностей равна входной: $P_2 + P_3 = P_1$. В реальном разветвителе сумма выходных мощностей всегда немного меньше по сравнению с входной мощностью из-за избыточных потерь:

$$P_2 + P_3 < P_1. \quad (6.4.5)$$

Избыточные потери не включают в себя потери, связанные с подключением волокон к портам.

Входная мощность должна разделяться между двумя выходными портами. Разделительное отношение разветвителя равно отношению мощностей выходящих через сквозной и заглушенный порты P_2/P_3 . Типичные значения отношения равны 1:1, 2:1, 3:1, 6:1 и 10:1. При заданном разделительном отношении соотношение между потерями сквозного и заглушенного портов является постоянной величиной.

В существующих разветвителях потери выходных портов равны сумме

индивидуальных потерь портов и избыточных потерь. Если $Loss_{THP}$ и $Loss_{TAP}$ представляют собой потери сквозного и заглушенного портов в реальном разветвителе, действительные потери составляют:

$$\begin{aligned} Loss_{THP'} &= Loss_{THP'} + Loss_E; \\ Loss_{TAP'} &= Loss_{TAP'} + Loss_E. \end{aligned} \quad (6.4.6)$$

Направленный разветвитель симметричен — величина потерь не зависит от того, какой порт является входным, а какой сквозным, заглушенным или изолированным.

6.4.2. Т-разветвитель

Т-разветвитель является трехпортовым устройством. На рисунке 6.7 представлена типичная схема локальной сети с общей шиной. Разветвитель устанавливается на каждом узле и служит для отвода части энергии от шины к приемопередатчику присоединенного к узлу оборудования. Если шина имеет много узлов, то разветвители, как правило, имеют большое разделительное отношение, так что только малая доля светового потока отводится к каждому узлу. При этом сквозной поток существенно превосходит заглушенный.

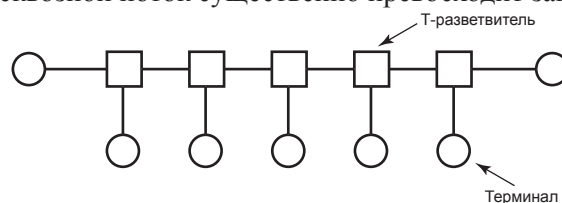


Рис. 6.7. Т-разветвитель

Т-разветвитель чаще всего применяется, когда к шине подключено несколько терминалов. Рассмотрим шины с N терминалами. В этом случае сигнал проходит через $N - 1$ узлов прежде, чем достигнет приемника. Для разветвителя, имеющего потери только на сквозном и заглушенном портах (т.е. не имеющего избыточных потерь), общие распределительные потери составят

$$L = (N - 1)Loss_{THP} + Loss_{TAP}. \quad (6.4.7)$$

Потери увеличиваются линейно с ростом числа терминалов, подключенных к шине.

К сожалению, необходимо учитывать избыточные и соединительные потери (включая связанные с рассогласованием диаметров и апертуры) для каждого узла. Поскольку на каждом узле используются как входной, так и выходной порты, то общее количество соединений составляет $2N$. Последний вид потерь также имеет тенденцию линейного увеличения с ростом числа терминалов, поэтому реальные общие потери составляют

$$L = (N - 1) \cdot Loss_{TTP} + Loss_{TAP} + 2NL_C + Loss_E. \quad (6.4.8)$$

По мере увеличения числа подключенных к общей шине терминалов общие потери быстро увеличиваются. В результате Т-разветвители могут эффективно работать только при ограниченном числе терминалов. Разница в потерях между идеальной (имеющей потери только на сквозном и заглушенном портах) и реальной сетью (имеющей также избыточные и соединительные потери) быстро становится заметной.

Выход из строя одного разветвителя не приведет к полному нарушению работы сети. В этом случае она будет представлять собой два сегмента, работающих независимо и разделенных неисправным узлом.

6.4.3. Разветвители типа «звезда»

Разветвители типа «звезда» являются альтернативой Т-разветвителям и избавлены от многих перечисленных недостатков. На рисунке 6.8 представлен разветвитель типа «звезда», имеющий равное количество входных и выходных портов. В сети, состоящей из N терминалов, данный разветвитель имеет 2N портов. Свет, входящий через любой порт, в равной степени распределяется между всеми выходными портами.

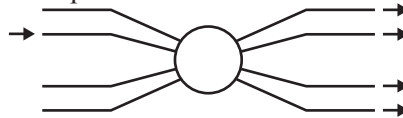


Рис. 6.8. Разветвитель типа «звезда»

Потери включения данного типа разветвителя определяются отношением мощности на каком-либо выходном порте к входной мощности. Таким образом потери включения изменяются в обратной зависимости от числа терминалов

$$loss_{IN} = 10 \cdot \log_{10} \frac{1}{N}. \quad (6.4.9)$$

Потери не увеличиваются линейно с ростом числа терминалов. При учете избыточных и соединительных потерь распределительные потери составят:

$$loss_{IN} = 10 \cdot \log_{10} \frac{1}{N} + 2L_C + loss_E. \quad (6.4.10)$$

В результате разветвитель типа «звезда» более эффективен в сети с большим количеством станций.

В идеале свет распределяется между всеми выходными портами. На практике это не так. Действительное количество мощности на каждом выходном порте варьируется в зависимости от индивидуальных потерь включения. Однородность разветвителя является параметром, определяющим данные вариации, и выражается как в процентах, так и в децибелах.

Потери в сети типа «звезда» при наращивании числа рабочих станций увеличиваются медленнее по сравнению с сетью с Т-разветвителями.

Единственным преимуществом сети с Т-разветвителями является меньшая потребность в кабеле. Центральное расположение разветвителя типа «звезда» приводит к использованию существенно большего количества кабеля для соединения достаточно разнесенных друг от друга терминалов.

На рисунке 6.9 представлена блок-схема сети типа звезда, использующей разветвитель «звезда» 4 x 4.

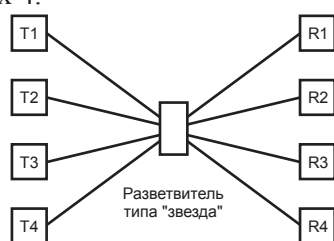


Рис. 6.9. Сеть со звездообразной структурой

6.4.4. Универсальные разветвители типа «звезда»

Универсальные разветвители типа «звезда» содержат N портов, каждый из которых может работать как на прием, так и на передачу. Свет, попавший в любой из портов, может выйти через другой порт.

6.4.5. Сварные разветвители

Сварные разветвители изготавливаются путем скручивания волокон в одной точке и нагревания их в точке скрутки. Стекло плавится и образует однородную массу, при этом свет из любого волокна, проходя через точку сварки, выходит через другие концы всех оставшихся волокон. Передающий разветвитель типа «звезда» получается в том случае, когда концы каждого волокна находятся только по одну сторону от сварной секции. Разветвитель типа «звезда» с отражением имеет петлеобразные участки, при этом каждое волокно сваривается в центральной точке дважды. Оба типа разветвителей представлены на рисунке 6.10.

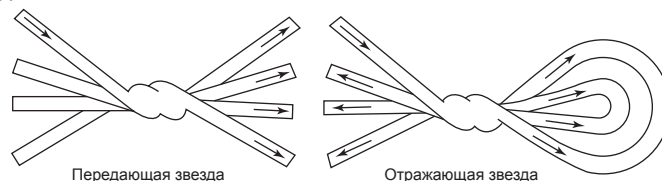


Рис. 6.10. Сварные разветвители «звезда»

В зависимости от того, как сварены волокна, оптическая мощность мо-

жет распределяться однородно или неоднородно между волокнами. Сварные разветвители имеют очень малые размеры, около десятых дюйма. Они также характеризуются высокой однородностью.

6.4.6. Центральнo-симметричные разветвители с отражением

В основу устройства центрально-симметричных разветвителей (ЦСР) положено изогнутое зеркало. Пучок света, выходя из какого-либо волокна, расширяется и отражается от зеркала. Отраженный пучок фокусируется и заводится во второе волокно. Конус отражения 1:1 совпадает с конусом падения, точка фокусировки — зеркально симметричная по отношению к точке выхода падающего пучка. Таким образом, название устройства подчеркивает, что падающий и отраженный пучки симметричны относительно центра кривизны.

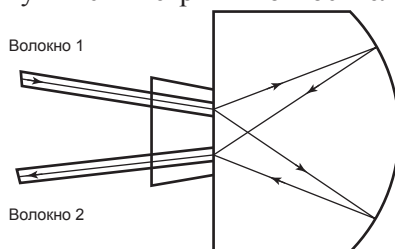


Рис. 6.11. Принцип центрально-симметричного отражения

При вращении зеркала меняется кривизна и вместе с ней — траектории пучков. Если добавить в схему третье волокно, то свет от входного волокна может быть направлен в любое из оставшихся приемных волокон в зависимости от положения зеркала. В действительности мы имеем дело с переключателем, позволяющим направлять световой сигнал в одно из двух принимающих волокон.

На эффективность работы ЦСР влияют следующие факторы:

- радиус зеркала;
- показатель преломления среды, размещенной между волокном и зеркалом;
- диаметр ядра волокна и апертура;
- угол между волокном и осью зеркала;
- расстояние между волокнами.

Радиус зеркала может быть оптимизирован в зависимости от применяемого волокна, но на практике используется радиус компромиссной величины, адаптированный для широкого спектра размеров волокон и апертур. Радиус зеркала 9,2 мм обеспечивает приемлемую эффективность работы с обычными размерами ядер многомодовых волокон (от 50 до 100 мкм) при размещении волокон в виде параллельного массива. Наклонное расположение волокон сохраняет симметрию между падающим и отраженным пучками, уменьшает потери

и позволяет использовать зеркало с радиусом всего лишь в 5 мм. Параллельное размещение волокон требует достаточно точного совмещения ориентации волокон с осью зеркала — допустимое отклонение составляет 0,4 мкм для одномодовых волокон и 2,7 мкм для многомодовых с размерами 100 / 140. При выполнении данных условий потери могут быть незначительными.

На данных принципах возможно создание широкого спектра устройств, необходимых для волоконно-оптических систем. ЦСР являются высоконаправленными устройствами и позволяют применять различные типы волокон.

6.4.7. Мультиплексоры с разделением длины волны

Мультиплексирование — процесс одновременной передачи нескольких сигналов по одной линии.

В мультиплексировании с разделением длин волн (wavelength-division multiplexing, WDM) используются различные длины волн для двух и более сигналов. Передающие устройства, работающие на различных длинах волн, могут посылать свои оптические сигналы в волокно одновременно. На противоположном конце линии сигналы разделяются по длинам волн. WDM-разветвители служат для группирования отдельных длин волн в одном волокне или для обратного разделения комбинированного сигнала на отдельные составляющие.

Важными способностями WDM-устройства являются перекрестное влияние и разделение каналов. Обе характеристики в основном относятся к принимающему, или демультиплексирующему концу линии связи. Перекрестное влияние или направленность определяет, насколько хорошо разделяются демультиплексированные каналы. Сигнал каждого вида должен присутствовать только в одном, соответствующем этому сигналу, порту.

WDM-разветвители существенно усиливают потенциальные возможности оптического кабеля.

6.4.8. Оптические коммутаторы

Иногда возникает необходимость в переключении света между двумя и более волокнами. Пассивный разветвитель распределяет свет по всем выходящим волокнам, но не выборочно между ними.

В FDDI и других оптических сетях с конфигурацией типа token-ring используются проходные коммутаторы для отсоединения станции от сети. Когда станция находится в рабочем состоянии, свет подходит к ее принимающему устройству и выходит из передающего устройства. Если станция не работает, входящая и выходящая линии должны соединяться напрямую, минуя станцию. Сигнал не может пройти узел, минуя станцию (если она выходит из строя или не работает), и сеть также перестает работать. Оптический коммутатор с воз-

возможностью пропускать сигнал напрямую поддерживает работу сети при отключенном узле.

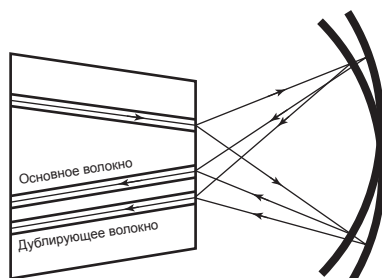


Рис. 6.12. Вращение зеркала позволяет переключаться между выходными волокнами

Основные принципы работы такого коммутатора аналогичны представленным на рисунке 6.12. Вращающееся зеркало направляет свет в различные волокна. Реальный коммутатор устроен немного сложнее, поскольку содержит более трех волокон.

Глава 7. Волоконно-оптические усилители

7.1. История вопроса

Хорошо известно, что через каждые 50 -100 км волоконно-оптического тракта происходит ослабление оптического сигнала на 10 - 20 дБ, что требует его восстановления. До начала 90-х г. в действующих линиях связи единственным способом компенсации потерь в линии было применение регенераторов. Регенератор ~ это сложное устройство, включающее в себя как электронные, так и оптические компоненты. Регенератор преобразует световой сигнал в электрический, распознает его и производит электронное восстановление первоначальной формы сигнала, а затем вновь излучает оптический сигнал, передаваемый дальше по волокну. Пропускная способность сети или линии дальней связи с регенераторами ограничена возможностями электроники (на сегодняшний день предельная скорость обработки сигналов для электроники порядка 40 Гбит/с). Интенсивные исследования нескольких групп ученых в 1985 - 1990 годах, каскад открытий и изобретений привели, в конечном счете к появлению технически совершенных промышленных эрбиевых усилителей (Erbium-Doped Fiber Amplifier -EDFA). Усилители на волоконном световоде, легированном ионами эрбия (Er-doped fiber), обладают сочетанием уникальных свойств, обеспечившим им быстрое внедрение в системы дальней связи. Среди этих свойств следующие:

- Возможность одновременного усиления сигналов с различными

длинами волн.

- Непосредственное усиление оптических сигналов, без их преобразования в электрические сигналы и обратно.
- Практически точное соответствие рабочего диапазона эрбиевых усилителей области минимальных оптических потерь световодов на основе кварцевого стекла.
- Низкий уровень шума и простота включения в волоконно-оптическую систему передачи.

Преимущества оптических усилителей над регенераторами были очевидными и до их практической реализации. Поэтому первое же сообщение (1987 г.) об успешных экспериментах научной группы из Университета Саутгемптона (Великобритания) под руководством Д. Пэйна по усилению света в волоконном световоде, легированном ионами эрбия, привлекло пристальное внимание ученых и разработчиков. За короткое время были проведены экспериментальные и теоретические исследования, подтвердившие практическую возможность создания компактного, обладающего хорошими характеристиками чисто оптического усилителя. В 1990 г. были проведены крупные конференции, посвященные исключительно эрбиевым усилителям и их компонентам; на эту тему было опубликовано множество статей и уже в 1992 г. на рынке появились готовые для применения модули таких усилителей. Существенный вклад наряду с группой из Саутгемптона внесла научная группа под руководством Эммануила Десурвира из лаборатории Bell (США). В нашей стране работы в этом направлении велись под руководством Е.М. Дианова в отделе волоконной оптики Института общей физики АН СССР (в настоящее время Научный центр волоконной оптики при ИОФ им. А.М. Прохорова РАН). Разработка и применение эрбиевых волоконных усилителей привели к революционным изменениям в линиях дальней связи и обеспечили внедрение технологии спектрального уплотнения DWDM. Быстрый рост информационной емкости волоконно-оптических линий связи, основанных на новых технологиях, способствовал возникновению телекоммуникационного бума и росту инвестиций в эту область в конце 90-х.

7.2. Принцип работы эрбиевого усилителя

Принцип работы усилителей EDFA основан на явлении усиления света при вынужденном излучении (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation). Возможность усиления света в световодах, легированных ионами эрбия, обуславливается схемой уровней энергии данного редкоземельного элемента, представленной в упрощенном виде на рис. 7.1.

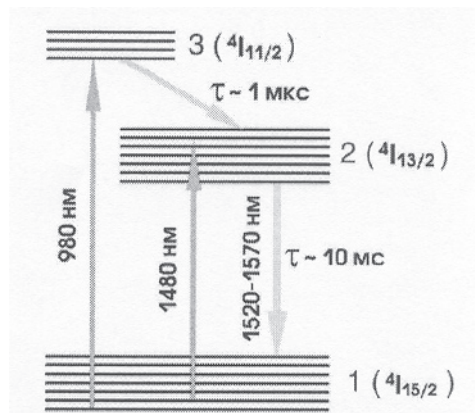


Рис. 7.1. Упрощенная схема уровней энергии эрбия в кварцевом стекле

Усиление света в эрбиевом усилителе происходит благодаря переходу между уровнями 2—1 (${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$). Каждый из этих уровней расщеплен на ряд подуровней из-за взаимодействия ионов эрбия с внутрикристаллическим полем кварцевого стекла (эффект Штарка). Под действием накачки за счет поглощения фотонов накачки ионы эрбия переходят из основного состояния (уровень 1) в верхнее возбужденное состояние (уровень 3), которое является короткоживущим (время жизни $\tau_3 = 1$ мкс), и за счет процессов релаксации переходят в долгоживущее состояние (на метастабильный уровень 2 энергии). Временем жизни на этом уровне относительно велико ($\tau_2 = 10$ мс, т.е. $\tau_2 = 10000\tau_3$), поэтому число ионов, находящихся на уровне 2, при соответствующей мощности накачки может превышать число ионов на уровне 1.

Если в среду с инверсией населенности попадает излучение с энергией фотона, совпадающей с энергией перехода из метастабильного состояния в основное, то с большой вероятностью происходит переход иона с метастабильного уровня 2 на основной уровень 1 с одновременным рождением еще одного фотона. Увеличение числа фотонов при их взаимодействии с ионами эрбия означает, что происходит усиление света, распространяющегося в среде с инверсией населенности.

Не все ионы эрбия находятся в метастабильном состоянии и обеспечивают усиление. Часть ионов находится на уровне 1 и эти ионы, взаимодействуя с фотонами, энергия которых совпадает с энергией перехода, эффективно их поглощают, переходя на уровень 2. При этом спектр усиления ионов эрбия практически совпадает со спектром поглощения. Если количество ионов, находящихся на уровне 2, меньше числа ионов, находящихся на основном уровне 1, то наблюдается поглощение. Именно поэтому необходимым условием усиления света является создание инверсии населенностей между двумя рабочими уровнями энергии 2 и 1. Для создания инверсии населенностей в эрбиевом усилителе необходимо перевести примерно половину ионов эрбия на метаста-

бильный уровень 2. Мощность накачки оптического усилителя, при которой населенность уровней 1 и 2 равны, называется пороговой мощностью.

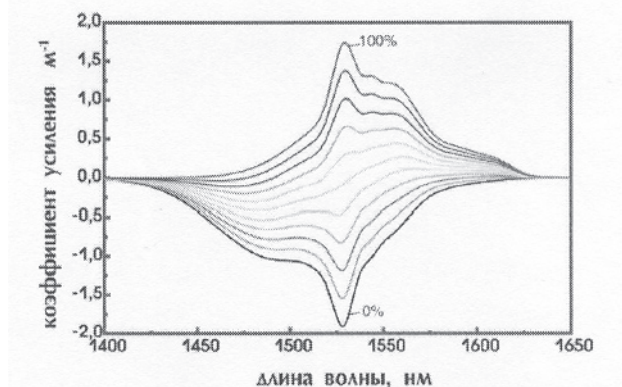


Рис. 7.2. Спектральная зависимость усиления/поглощения эрбиевого волокна при различных значениях относительной населенности метастабильного уровня энергии

При мощности накачки ниже пороговой наблюдается не усиление, а поглощение светового сигнала. На рис.2 представлены спектры поглощения/усиления при различных значениях относительной населенности уровня 2, определяемой уровнем мощности накачки. Нижняя кривая, наблюдающаяся в отсутствии накачки (все частицы находятся в основном состоянии, населенность уровня 2 равно соответствует «отрицательному усилению», т.е. поглощению во всем рабочем спектральном диапазоне. По мере увеличения мощности накачки все большее число активных ионов переходит в возбужденное состояние. Это приводит, как видно из рис.2, сначала к уменьшению коэффициента поглощения, а затем к усилению света. Отметим также, что спектр усиления несколько сдвинут в длинноволновую область относительно спектра поглощения. Следовательно, для усиления в длинноволновой части спектра требуется меньшее значение инверсии.

Использование трехуровневой схемы накачки приводит к появлению следующих важных свойств эрбиевого усилителя:

- Наличие пороговой мощности накачки, при которой происходит «просветление» активного волоконного световода, т.е. достигаются нулевые потери. При превышении пороговой мощности накачки начинается усиление сигнала. В зависимости от структуры активного волоконного световода, концентрации легирующей примеси и длины волны накачки величина пороговой мощности составляет от долей до нескольких единиц мВт.
- Необходимости выбора оптимальной длины эрбиевого волокна, то есть длины, при которой достигается максимальное усиление при заданной концентрации ионов эрбия. При длине волокна больше оптимальной в дальних

участках волокна будет наблюдаться поглощение сигнала, а при использовании эрбиевого волокна не достаточной длины излучение накачки используется не полностью. Оптимальная длина эрбиевого волокна зависит от частоты усиливаемого сигнала. Чем меньше частота сигнала, тем более длинный отрезок эрбиевого волокна соответствует максимальному усилению.

При отсутствии усиливаемого сигнала ионы эрбия переходят в основное состояние самопроизвольно, излучая фотоны с энергией, соответствующей данному переходу. То есть появляется спонтанное излучение. Следует подчеркнуть, что и в рабочем режиме при наличии усиливаемого сигнала часть возбужденных ионов переходит в основное состояние спонтанно, при этом спонтанное излучение также усиливается, приводя к появлению усиленного спонтанного излучения. Усиленное спонтанное излучение является основным источником шумов, а также ограничивает коэффициент усиления, особенно в случае слабого сигнала.

7.3. Оптическая схема эрбиевого волоконного усилителя

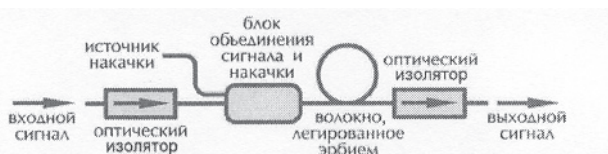


Рис. 7.3. Упрощенная схема эрбиевого волоконного усилителя

Упрощенная схема эрбиевого волоконного усилителя представлена на рис.3. Оптическая накачка, необходимая для перевода ионов эрбия в возбужденное состояние, осуществляется на длинах волн, соответствующих одной из их полос поглощения. В табл.1 приведены значения эффективностей использования накачки, определяемой максимальным значением отношения коэффициента усиления к мощности накачки, для нескольких полос поглощения.

Таблица 1. Эффективность использования накачки

Длина волны накачки, нм	Максимальная эффективность накачки, дБ/мВт
980	11
1480	6.3
664	3.8
532	2.0
827	1.3

Источники накачки видимого диапазона на основе твердотельных и газовых лазеров использовались на начальном этапе исследований

эрбиевых волоконных усилителей, пока не были разработаны необходимые полупроводниковые источники. Наибольшая эффективность использования накачки достигается на длинах волн 980 и 1480 мкм. Именно этот факт дал мощный толчок развитию полупроводниковой техники высоких мощностей. Если в первых экспериментах по усилению сигнала использовались полупроводниковые лазеры с максимальной мощностью 20-30 мВт, то в настоящее время разработаны устройства накачки с мощностью в несколько сотен мВт, введенной в одномодовое волокно. Большая мощность накачки требуется, например, для обеспечения высокого коэффициента усиления одновременно большого числа информационных каналов в системах со спектральным уплотнением (DWDM). Для объединения входного оптического сигнала и излучения накачки используются мультиплексоры. Необходимыми элементами оптических усилителей являются оптические изоляторы - устройства, пропускающие световые сигналы только в одном направлении. Оптические изоляторы на входе и выходе усилителя применяются для того, чтобы предотвратить проникновение в усилитель паразитных отраженных от неоднородностей линии связи сигналов. Отраженные сигналы, усиленные в эрбиевом волокне, являются источником шумов, ухудшающих работу усилителя.

Изображенная на рис.3 схема усилителя представляет собой вариант схемы с попутной накачкой, когда сигнал и излучение накачки распространяются в одном и том же направлении. Возможным является вариант со встречной накачкой, а также применение накачки в двух направлениях. Двухнаправленная накачка позволяет использовать два источника накачки, повышая суммарную мощность накачки.

7.4. Изготовление усилителей

Усилительной средой усилителя является эрбиевое волокно - волоконный световод с примесями ионов эрбия. Изготавливаются такие световоды теми же методами, что и световоды для передачи информации, с добавлением промежуточной операции пропитки не проплавленного материала сердцевины раствором солей эрбия либо операции легирования ионами эрбия из газовой фазы непосредственно в процессе осаждения сердцевины. Волноводные параметры эрбиевого волоконного световода делают сходными с параметрами световодов, используемых для передачи информации, в целях уменьшения потерь

на соединения.

Принципиальным является выбор легирующих добавок, формирующих сердцевину активного световода, а также подбор концентрации ионов эрбия. Различные добавки в кварцевое стекло изменяют характер штарковского расщепления уровней энергии ионов эрбия (рис.1). В свою очередь это приводит к изменению спектров поглощения и излучения.

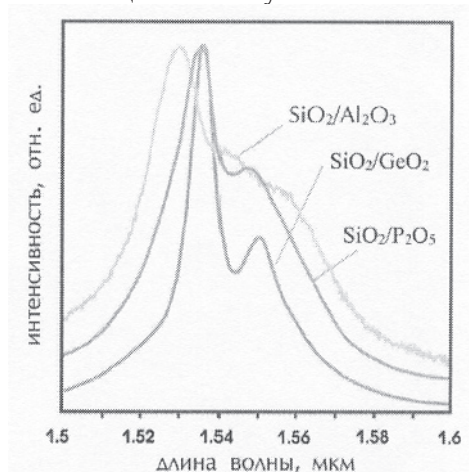


Рис. 7.4. Спектры излучения ионов эрбия в кварцевом стекле с различными добавками

На рис. 4. представлены спектры излучения ионов эрбия в кварцевом стекле, легированном наиболее часто применяемыми в технологии волоконных световодов добавками. Из представленных данных видно, что наиболее широкий спектр излучения (а значит, и спектр усиления), составляющий около 40 нм по полувысоте, достигается при использовании в качестве добавки алюминия. Поэтому этот элемент стал необходимой составляющей материала сердцевины эрбиевых волоконных световодов. Концентрация ионов эрбия в сердцевине оптического волокна фактически определяет его длину, используемую в усилителе при заданных уровнях сигнала и накачки. Верхний предел концентрации активных ионов определяется возникновением эффекта кооперативной апконверсии. Это явление состоит в том, что при большой концентрации активных ионов возможно образование кластеров, состоящих из двух и более ионов эрбия. Когда эти ионы оказываются в возбужденном состоянии, происходит обмен энергиями, в результате чего один из них переходит в состояние с еще более высокой энергией, а второй — безызлучательно релаксирует на основной уровень. Таким образом, часть ионов эрбия поглощает излучение усиленного сигнала, снижая эффективность усилителя.

Нижний предел по концентрации ионов эрбия определяется тем, что слишком длинный активный световод неудобен при изготовлении усилителя, а также тем, что при использовании большого количества активного светово-

да повышается стоимость усилителя. На практике концентрация ионов эрбия составляет $10^{18} - 10^{20} \text{ см}^{-3}$, что обеспечивает длину используемого активного световода от нескольких единиц до нескольких десятков метров.

7.5. Основные параметры волоконных усилителей

Для практического использования в системах волоконно-оптической связи наибольшее значение имеют следующие параметры эрбиевых усилителей:

- коэффициент усиления;
- выходная мощность сигнала и энергетическая эффективность накачки;
- шум-фактор и мощность усиленного спонтанного излучения;
- спектральная ширина и равномерность полосы усиления.

Коэффициент усиления G определяется как отношение мощности сигнала на выходе оптического усилителя к мощности сигнала на его входе с учетом дополнительных потерь на мультиплексоре и в оптическом изоляторе. В технических спецификациях коэффициент усиления выражают в децибелах $g[\text{дБ}] = 10 \lg G$.

Если мощность входного и выходного сигналов также выражена в логарифмических единицах (дБм), то коэффициент усиления равен разности мощностей выходного и входного сигналов.

В лабораторных условиях достигнуто усиление 50 дБ. В серийных эрбиевых усилителях типичные значения коэффициента усиления слабого сигнала находятся в районе 30 дБ. Увеличение мощности входного сигнала уменьшает населенность метастабильного лазерного уровня 2 и, тем самым, снижает коэффициент усиления (рис.2).

Выходная мощность сигнала и энергетическая эффективность накачки. Выходная мощность сигнала определяет расстояние до следующего усилителя. Поэтому важными параметрами эрбиевых усилителей, работающих в качестве усилителей мощности, являются выходная мощность и энергетическая эффективность накачки. Энергетическая эффективность определяется отношением изменения мощности сигнала к мощности накачки.

Для того чтобы обеспечить высокую энергетическую эффективность, необходимо, чтобы практически все фотоны накачки передавали свою энергию фотонам сигнала. Для получения максимальной энергетической эффективности перспективнее использовать накачку на длине волны 1480 нм (энергетическая эффективность 86%), а не на длине волны 980 нм (энергетическую эффективность 55%).

Большая энергетическая эффективность позволяет использовать для накачки источники излучения меньшей мощности, а следовательно, более дешевые. Эта характеристика особенно важна в системах со спектральным уплотнением, где требуется усиливать одновременно большое количество сигналов большой суммарной мощности.

Для достижения уровней выходной мощности в сотни мВт и выше разработаны специальные волоконные световоды с двойной оболочкой и схемы накачки таких световодов. Усилители на основе эрбиевых волоконных световодов с двойной оболочкой обеспечивают получение выходного излучения мощностью более 1,5 Вт (33 дБ).

Шум-фактор. Основным источником шума в усилителе на волокне, легированном эрбием, является самопроизвольное (спонтанное) излучение при переходе иона эрбия с метастабильного уровня энергии 2 на основной уровень 1 (рис.1). Это спонтанное излучение усиливается и повторно поглощается по всей длине усилителя приблизительно так же, как слабый сигнал, распространяющийся по усилителю.

Для характеристики качества оптического усилителя используется параметр получивший название шум-фактор. Величина шум-фактора является мерой ухудшения отношения сигнал/шум входного когерентного сигнала при прохождении через оптический усилитель.

Обеспечить минимальное значение шума можно с использованием накачки большой мощности на длине волны 980 нм, работающей по трехуровневой схеме. В этом случае теоретически населенность основного уровня 1 может быть снижена практически до нуля. Излучение накачки на длине волны 1480 нм само эффективно взаимодействует с ионами эрбия, находящимися на метастабильном уровне энергии 2, а это приводит к тому, что населенность уровня 1 не может быть снижена до нуля. Поэтому уровень шума при использовании накачки на длине волны 1480 нм выше, чем при использовании накачки на длине волны 980 нм. При накачке во встречном по отношению к сигналу направлении шум-фактор также несколько выше, чем при сонаправленной накачке, поскольку очень важно обеспечить большую населенность метастабильного уровня 2 и малую населенность уровня 1 там, где сигнал слабый.

На рис. 5 представлены спектральные зависимости шум-фактора при двух значениях входного сигнала - -30 дБм и -0,5 дБм. Видно, что данная величина не превышает уровня 5 дБ в диапазоне 60 нм.

Рис. 5. Спектральная зависимость коэффициента шума и усиления эрбиевого усилителя для двух значений входного сигнала

Ширина и равномерность полосы усиления. Ширина полосы усиления показывает диапазон длин волн, в котором значение усиления не ниже некоторого граничного уровня. Как правило, этот уровень составляет -3 дБ от максимального значения коэффициента усиления.

Ширина полосы усиления определяется спектром излучения ионов эрбия в материале сердцевины оптического волокна. Наиболее широким спектром излучения обладают ионы эрбия в алюмосиликатном стекле (рис.4). Спектры усиления типичного эрбиевого усилителя на алюмосиликатном стекле при

двух значениях мощности входного сигнала представлены на рис.5. Увеличивая длину активного волокна, удается получать достаточно большой коэффициент усиления вплоть до длины волны 1560 нм, при превышении которой усиление резко падает. Таким образом, ширина полосы усиления для традиционной конфигурации усилителя составляет примерно 30 нм (1530 - 1560 нм).

Для многоканальных волоконнооптических систем со спектральным мультиплексированием этот параметр является принципиальным. Поскольку в настоящее время число каналов достигает 100 и практически трудно реализовать разделение отдельных спектральных каналов с интервалами менее чем 0,4 нм (100 ГГц), то ширина спектра усиливаемого излучения может превышать 40 нм. В этих условиях ширина полосы усиления начинает оказывать определяющее влияние на число спектральных каналов, используемых для передачи информации, а значит, и на общую информационную пропускную способность волокна.

Эта полоса усиления имеет название стандартного диапазона (conventional band), или С-диапазона. Как видно из рис.4, интенсивность люминесценции имеет заметное значение вплоть до 1600 нм. При этом поглощение в области 1560 - 1600 нм падает очень быстро, что позволяет использовать и этот диапазон для усиления световых сигналов. Таким образом, оказывается возможным усиление в так называемом длинноволновом диапазоне (long wavelength band) или L-диапазоне, если использовать длинное эрбиевое волокно. Следует отметить, что при такой конструкции усилителя активная среда оказывается не полностью инвертированной, и для оптических сигналов в С-диапазона такое устройство работает как поглотитель. Поэтому перед усилением оптические сигналы разделяются по диапазонам С и L, и для каждого используется свой усилитель. Спектральные характеристики усиления в обоих диапазонах представлены на рис.6.

Рис. 6. Спектральные характеристики двухдиапазонного усилителя

Дальнейшее расширение рабочего спектрального диапазона эрбиевых усилителей связано с использованием области 1480 -1530 нм, или S-диапазона (short wavelength band - коротковолновый диапазон). Интенсивность люминесценции ионов эрбия в этой области не меньше, чем в L-диапазоне, однако существенным является сильное поглощение сигнала. Эта проблема решается использованием более мощных источников накачки по сравнению с другими усилителями. Вторая проблема выглядит более серьезной и связана она с сильной конкуренцией между усилением сигнала в S-диапазоне и спонтанным излучением в С-диапазоне, для которого условия усиления являются более благоприятными. В последнее время опубликованы несколько работ, в которых показана возможность усиления в S-диапазоне при использовании фильтров

или введении изгибных потерь в диапазоне 1530 - 1560 нм для подавления усиленного спонтанного излучения.

Другое направление исследований в области расширения полосы усиления эрбиевых усилителей связано с поиском материала сердцевины волокна, позволяющего расширить спектр люминесценции. Так, в последнее время появился значительный интерес к эрбиевым волокнам на основе теллуричного стекла. Однако усилители на основе теллуричного волокна пока находятся на стадии лабораторных исследований.

Важной характеристикой усилителя в системах связи со спектральным разделением каналов (WDM) является равномерность коэффициента усиления в пределах рабочего спектрального диапазона. Как видно из рис.5 неравномерность коэффициента усиления слабого сигнала может превышать 10 дБ в пределах одной спектральной полосы. В рабочих условиях неравномерность коэффициента усиления уменьшается из-за повышения суммарной мощности оптического сигнала. Тем не менее при прохождении в длинной линии через ряд усилителей суммарная неоднородность усиления может привести к потере информации в каналах с меньшим усилением. Таким образом, актуальным является сглаживание спектра усиления. Для этого в схему усилителя обычно вводятся спектрально селективные поглощающие фильтры на основе как световодных, так и объемных элементов. Одним из популярных видов фильтра является фо-тоиндуцированная длиннопериодная решетка (LPG, long-period grating). Такие решетки изготавливают путем пространственно периодического облучения сердцевины световода ультрафиолетовым излучением через его поверхность. Решетка, период которой, как правило, лежит в диапазоне 0,1 - 1 мм, обеспечивает резонансное взаимодействие фундаментальной моды с модами оболочки. Следствием такого взаимодействия являются преобразование части энергии основной моды волоконного световода с резонансной длиной волны в энергию оболочечных мод и быстрое затухание этих мод. Спектр и интенсивность поглощения задаются периодом решетки и временем облучения световода. Применение сглаживающих фильтров, изготовленных с использованием этой техники, позволяет уменьшить вариации коэффициента усиления до десятых долей дБ в пределах рабочего диапазона.

7.6. Примеры волоконно-оптических усилителей

Волоконные эрбиевые усилители обеспечивают “прозрачное” усиление произвольно поляризованного оптического сигнала в С2-диапазоне (1535-1565 нм) с максимальной выходной мощностью до 25дБм на один спектральный канал. В усилителях используется уникальная технология накачки мощными многомодовыми диодами специального волокна легированного эрбием. Усилители на основе эрбиевого волокна имеют малый шум-фактор, что позволяет передавать оптический сигнал на большие расстояния без его регенерации.

Малый шум-фактор позволяет также строить на основе EDFA эффективные предусилители для сигнала с уровнем мощности до -40дБм.

Варианты исполнения усилителей (по выходной оптической мощности):

- 20 мВт (предусилитель)
- 60 мВт
- 100 мВт
- 200 мВт
- 350 мВт
- 400 мВт
- 500 мВт

Технические характеристики:

Максимальная выходная оптическая мощность	25дБм
(Диапазон входной оптической мощности)	-14... 6
Спектральная неравномерность	±0.8
Спектральная неравномерность	<±0.8 дБ
Стабильность мощности (более 10 часов)	<±0.01 дБ
Остаточная поляризация	<±0.2 дБ
Изоляция на выходе	40 дБ
Рабочая температура	0 °С ... 50 °С
Температура хранения	-40°С... 70 °С
Влажность	0 - 95%
Время прогрева	
до начала работы	< 1 мин
до полной стабилизации	5 мин

ВОУ имеют три модификации:

1. Усилитель мощности, используемый для увеличения уровня оптического сигнала на входе волоконно-оптической связи (ВОЛС)
2. Предварительный усилитель для увеличения чувствительности фотоприёмного устройства
3. Линейный усилитель, используемый вместо оптического регенератора

Технические Характеристики: Волоконно-оптический усилитель мощности

Длина волны оптического сигнала, нм	1530...1560
-------------------------------------	-------------

Уровень входной оптической мощности, дБм	-6...0
Максимальная выходная мощность, дБм	15
Коэффициент шума, дБ	не более 6
Коэффициент экстинкции	не менее 5

Волоконно-оптический предварительный усилитель

Длина волны оптического сигнала, нм	1530...1560
Максимальное усиление (при $P_{вх} = -40$ дБм), дБм	22±2
Максимальный выходной сигнал (при $P_{в>л} = -22$ дБм), дБм	не более -11
Ширина полосы пропускания оптического фильтра, нм	1+0,2
Коэффициент шума, дБ	не более 6,0+1,0

Линейный волоконно-оптический усилитель

Длина волны оптического сигнала, нм	
Входная мощность, дБм	-15...-6
Коэффициент шума, дБ	не более 6,0
Ширина пропускания оптического фильтра, нм	1,0±0,2

Транспондер

Длина волны оптического сигнала на входе, мкм	1,3
Длина волны оптического сигнала на выходе, мкм	1,55
Входная мощность, дБм	ц о 1,0
Максимальная выходная мощность, дБм	15
Коэффициент экстинкции	10

Глава 8

8.1. Конструкции и характеристики оптических кабелей

8.1.1. Общие требования к оптическим кабелям

Волоконно-оптические кабели, применяемые в СКС, предназначены для передачи оптических сигналов внутри зданий и между ними. На их основе могут быть реализованы все три подсистемы СКС, хотя в горизонтальной

подсистеме волоконная оптика пока находит ограниченное применение для обеспечения функционирования ЛВС. В подсистеме внутренних магистралей оптические кабели применяются одинаково часто с кабелями из витых пар, а в подсистеме внешних магистралей они играют доминирующую роль. В зависимости от основной области применения волоконно-оптические кабели подразделяются на три основных класса:

кабели внешней прокладки (outdoor cables);
кабели внутренней прокладки (indoor cables);
кабели для шнуров.



Рис. 8.1.

Кабели внешней прокладки используются при создании подсистемы внешних магистралей и связывают между собой отдельные здания. Основной областью использования кабелей внутренней прокладки является организация внутренней магистрали здания, тогда как кабели для шнуров предназначены в основном для изготовления соединительных и коммутационных шнуров, а также для выполнения горизонтальной разводки при реализации проектов класса fiber to the desk (волокно до рабочего места) и fiber to the room (волокно до комнаты). Общую классификацию оптических кабелей СКС можно представить в виде приведённой выше схемы.

Оптический кабель состоит из скрученных по определенной системе оптических волокон из кварцевого стекла (световодов), заключенных в общую защитную оболочку. При необходимости кабель может содержать силовые (упрочняющие) и демпфирующие элементы.

Существующие ОК по своему назначению могут быть классифицированы на три группы: магистральные, зонные и городские. В отдельные группы выделяется подводные, объектовые и монтажные ОК.

Магистральные ОК предназначены для передачи информации на большие расстояния и значительное число каналов. Они должны обладать малыми затуханием и дисперсией и большой информационно-пропускной способностью. Используется одномодовое волокно с размерами сердцевины и оболочки 8/125 мкм. Длина волны 1,3...1,55 мкм.

Зоновые ОК служат для организации многоканальной связи между областным центром и районами с дальностью связи до 250 км. Используются градиентные волокна с размерами 50/125 мкм. Длина волны 1,3 мкм.

Городские ОК применяются в качестве соединительных между городскими АТС и узлами связи. Они рассчитаны на короткие расстояния (до 10 км) и большое число каналов. Волокна-градиентные (50/125 мкм). Длина волны 0,85 и 1,3 мкм. Эти линии, как правило, работают без промежуточных линейных регенераторов.

Подводные ОК предназначены для осуществления связи через большие водные преграды. Они должны обладать высокой механической прочностью на разрыв и иметь надежные влагостойкие покрытия. Для подводной связи также важно иметь малое затухание и большие длины регенерационных участков.

Объектовые ОК служат для передачи информации внутри объекта. Сюда относятся учрежденческая и видеотелефонная связь, внутренняя сеть кабельного телевидения, а также бортовые информационные системы подвижных объектов (самолет, корабль и др.).

Монтажные ОК используются для внутри- и межблочного монтажа аппаратуры. Они выполняются в виде жгутов или плоских лент. [7]

8.1.2. Элементы конструкции оптических кабелей

Можно выделить несколько основных групп конструктивных элементов: ОВ, оптические модули, сердечники, силовые элементы, гидрофобные материалы, оболочки и броня. В зависимости от назначения и условий применения ОКС конструкция имеет свои особенности.

8.1.2.1. Сердечник кабеля

Кабели внешней, или наружной, прокладки используются для построения подсистемы внешних магистралей СКС. Основным требованием к их конструкции, наряду с малым затуханием и большой широкополосностью, является высокая механическая прочность к растягивающим и сдавливающим усилиям, а также влагостойкость и широкий диапазон рабочих температур. Немаловажное значение имеют также хорошие массогабаритные показатели. Необходимый для практической эксплуатации уровень этих параметров может быть достигнут несколькими различными способами, каждому из которых отвечает своя каноническая конструкция кабелей.

В настоящее время известно большое количество конструкций оптических кабелей внешней прокладки, полную совокупность которых можно условно разделить на четыре группы.



Рис. 8.2.

Основой кабеля с профилированным сердечником является фигурный элемент, в пазах или внутренних полостях которого укладываются волоконные световоды. Данная конструкция была достаточно широко распространена в 80-х годах. Из-за ограниченной ёмкости (обычно не более 16 волокон) в настоящее время применяется сравнительно редко.

Кабели модульной, или многомодульной, конструкции имеют традиционную повивную структуру, причём каждый повив набирается из модулей диаметром около 2 мм. В модуле может размещаться от 1 до 12 волокон. В процессе производства кабеля обеспечивается свободная укладка волокон в трубку модуля. Поэтому в обычном состоянии кабеля световоды слегка скручиваются по спирали, располагаясь вдоль внутренней поверхности трубки. Это обеспечивает возможность небольшого упругого растяжения и сгибания кабеля во время прокладки без каких-либо ухудшений его оптических характеристик. Основная масса кабелей рассматриваемой разновидности, предлагаемых в настоящее время на рынке, имеет одноповивную конструкцию. Наибольшее распространение получили шестимодульные конструкции, несколько реже применяются восьмимодульные варианты. При необходимости увеличения ёмкости модули располагают в двух повивах или используют центральный силовой элемент увеличенного диаметра, вокруг которого размещается большее количество модулей. Некоторые зарубежные фирмы называют рассматриваемую конструкцию *multitube cable*; в отечественной литературе употребляется буквальный эквивалент этого термина - “многотрубчатый кабель”.

В качестве основы сердечника может быть использована также одна центральная трубка большого диаметра, которая расположена по оси кабеля. Такой вариант кабеля более удобен в разделке, а за счёт максимального удаления волокон от внешней поверхности оболочки обеспечивается наилучшая защита от

сдавливающих усилий, однако трубка несколько уступает традиционной многомодульной конструкции по рабочему диапазону температур и устойчивости к растяжению. Для дополнительного улучшения условий защиты волокон финская фирма NK Cables (бывшая Nokia) применила в трубчатых элементах Spiral Space - канал спиральной формы. В отечественной технической литературе эту разновидность кабелей иногда называют однотрубной или одномодульной конструкцией.

Основная масса кабелей модульной конструкции в тех или иных вариантах практической реализации имеет ёмкость не более 144 волокон. В настоящее время они занимают доминирующее положение в общем объёме выпуска кабелей внешней прокладки. Это объясняется хорошей защитой волокон от механических и климатических воздействий, а также простотой и удобством разделки и монтажа.

На рынке в ограниченном количестве представлены и кабельные изделия, объединяющие в себе основные черты кабелей с профилированными сердечником и модульной конструкции. В качестве основы их сердечника использован профилированный элемент, на внешней поверхности которого в пазы уложены трубки модулей с волоконными световодами. Наличие профилированного сердечника обеспечивает высокую устойчивость к раздавливающим усилиям (например, у кабелей серии GNSLWLV фирмы Ericsson паспортная величина этого параметра составляет 6 кН вместо обычных 1,5 кН у традиционной модульной конструкции), а наличие трубок модулей - удобство работы и повышенную продольную герметичность.

Ленточные кабели за счёт очень плотной компоновки обеспечивают преимущество над конструкциями других типов при большом (несколько сотен и более) количестве волокон и поэтому используются, главным образом, при создании основных магистралей крупных городских и телекоммуникационных сетей. Применение этих кабелей для построения СКС в настоящее время не целесообразно, так как высокая ёмкость, на которой начинают проявляться их преимущества, в рассматриваемой области пока не требуется, а из-за особенностей конструкции работа по установке разъёмов и изготовлении неразъёмных соединителей требует сложного и дорогого технологического оборудования и более высокой квалификации монтажников. [10]

Профилированный оптический сердечник

Некоторые кабели и во время, и после прокладки постоянно подвергаются воздействию раздавливающих усилий. Для защиты волокон в этих кабелях должны быть приняты специальные меры. С этой целью было разработано несколько различных видов сердечников. Большинство из них являются профилированными сердечниками, т.е. сердечниками, снабженными пазами (см. Рис.2.4.3).

Оптические волокна укладываются в них в направляющие пазы. Обычно профилированный сердечник с 6 - 12 пазами отливается вокруг металлического или неметаллического центрального силового элемента (ЦСЭ). Пазы могут быть спиральными, идущими в любом направлении, либо их направление чередуется. Спиральные пазы идут в одном и том же направлении по всей длине кабеля, в то время как направление пазов второго вида чередуется через определенные отрезки длины. Такие пазы (и сердечники с такими пазами) называются SZ-пазами (SZ-сердечниками). Это название они получили потому, что сначала пазы образуют S-образную кривую, а затем – Z-образную. Применение сердечников с чередованием направления пазов упростило как изготовление, так и установку этого вида оптического кабеля.

Все три вида сердечников обычно изготавливаются из полипропилена. Они получают путем экструзии, причем их длина достигает $25 \div 30$ км. ЦСЭ, как правило, делается из стали или из пластмассы, армированной стекловолокном. У всех видов таких сердечников имеется по $6 \div 12$ пазов, в каждом из которых помещается от 1 до 16 волокон.

В зависимости от размеров и формы этих углублений в центральном элементе в них могут свободно помещаться один или несколько световодов – отдельно или в виде ленточной конструкции. Как и в случае с модулями, эти пазы заполняются компаундом. В случае если требуется конструкция кабеля без наполнителя, водонепроницаемость по длине может быть обеспечена с помощью водоблокирующей ленты.

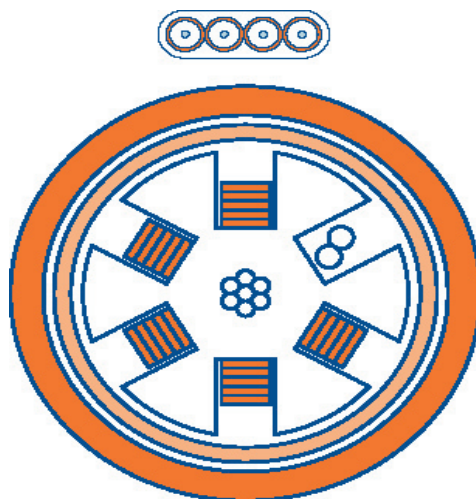


Рис. 8.3. Профилированный сердечник оптического кабеля

Для дальнейшего увеличения числа световодов в кабеле, в пределах одной общей внешней оболочки могут быть свиты по жгутовому принципу несколь-

ко отдельных кабельных элементов с профилированным стержнем. Преимуществом данной конструкции в сочетании с ленточной компоновкой кабелей с большим количеством световодов (более 100) является, во-первых, большая плотность упаковки, а, во-вторых, упрощенная технология соединения вследствие упорядоченного размещения световодов.

Данный вид сердечника очень распространен у зарубежных производителей (особенно у Ericsson – изобретателя профилированного оптического сердечника), но в России распространения не получил. Причиной оказалось как отсутствие опыта производства профилированных сердечников, так и необходимость специального оборудования, загрузка которого не гарантируется. Высокую стойкость к раздавливающим усилиям – основное преимущество профилированного сердечника – российские производители компенсируют толщиной стенки оптических модулей и увеличением толщины и жесткости первичной оболочки, накладываемой непосредственно на сердечник модульной скрутки.

Трубчатый сердечник

Другим особым типом оптического кабеля является кабель с центральной трубкой или, другими словами, - с трубчатым сердечником. В нем нет ЦСЭ. Световоды скручиваются между собой внутри полой оболочки.

Такая конструкция отличается простотой и компактностью. Она применяется в кабелях, для которых малые геометрические размеры существенны.

Как правило, трубчатый сердечник представляет собой двухслойную пластиковую трубку, заполненную гидрофобным компаундом, в которой находятся оптические волокна. Окраска волокон обеспечивает цветовую идентификацию. Волокна группируются в пучки, скрепленные цветной нитью. По сути, трубчатый сердечник является укрупненным аналогом оптического модуля со свободной укладкой волокон

Технология производства позволяет создать в трубке избыточную длину волокна, необходимую для защиты волокон от механических напряжений при климатических и механических воздействиях на кабель. Избыточная длина непрерывно контролируется в процессе производства трубки. Двухслойная стенка трубки формируется двумя экструдерами, подающими материалы в общую экструзионную головку. Диаметр трубки в двух проекциях непрерывно контролируется в процессе производства. Внутренний слой трубки выполняется из высококачественной полиамидной композиции, имеющей высокую химическую и климатическую стойкость, низкие показатели старения, высококачественную внутреннюю поверхность, контактирующую с оптическим волокном, высокую стойкость к раздавливанию. Наружный слой трубки выполняется из полибутилентерефталатных композиций, которые традиционно применяются в изготовлении оптических модулей. Они имеют более низкую стоимость по

сравнению с полиамидом. Такая конструкция трубки наиболее экономична и обеспечивает большой срок службы кабеля при надежной защите волокна от механических воздействий. При малых размерах и невысоких требованиях к раздавливающим усилиям трубка может быть однослойной.

Проектирование кабеля с таким сердечником сложнее, нежели сердечника модульной скрутки. Здесь нет шага скрутки, за счет которого образуются избыток длины волокна, и удастся оставить волокна ненагруженными при относительно большом удлинении кабеля. Поэтому допуски на удлинение такого кабеля ниже, а рабочий диапазон температур уже. Применение такого сердечника для подвесных кабелей в России требует особенно тщательного проектирования и соблюдения технологии при монтаже, а потому нежелательно. Накоплен значительный отрицательный опыт использования в наших условиях импортных подвесных кабелей с подобной конструкцией сердечника.

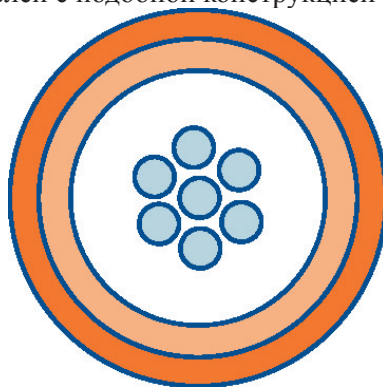


Рис. 8.4. Трубчатый сердечник оптического кабеля

Заполнение сердечника

Для обеспечения водонепроницаемости сердечника оптического кабеля по всей длине свободное пространство между модулями или волокнами заполняется специальным компаундом, состав которого не должен оказывать влияния на характеристики остальных элементов сердечника. Компаунд почти не вызывает набухания полимерной оболочки и имеет относительно малый коэффициент линейного расширения. Предохранительный слой из устойчивого к нефтепродуктам расплавленного связующего вещества, которое наносится вокруг сердечника экструзионным способом, служит, во-первых, дополнительным барьером для компаунда, а, во-вторых, как бесшовное соединение между устойчивой к нагрузке на растяжение защитной оболочкой или обмоткой сердечника и оболочкой кабеля, не уменьшая, при этом, ее гибкости.

Если продольная водонепроницаемость не требуется, например, для кабелей внутренней прокладки, то необходимость в заполнении сердечника компаундом отпадает. Чтобы защитить элементы сердечника от повреждений во

время дальнейших технологических операций, а также, чтобы изолировать наполнители сердечника от силовых элементов кабеля, предотвращающих нагрузку на растяжение, и от материала оболочки, скручиваемые элементы покрываются одним или несколькими слоями тонкой полимерной пленки.

Для обозначения фирмы-производителя кабеля непосредственно поверх скручиваемых элементов, обычно параллельно оси кабеля, укладывается фирменная опознавательная нитка. Эта операция выполняется, как правило, во время наложения оболочки. По желанию заказчика дополнительно к опознавательной нитке можно добавить ленту для определения длины, которая представляет собой бумажную полосу шириной 6 мм с нанесенными метровыми метками.

8.1.2.2. Упрочняющие (силовые) элементы кабеля

Силовые элементы повышают механическую прочность кабеля. В ходе прокладки и после нее силовые элементы принимают на себя растягивающие напряжения, защищая от них волокно.

В качестве силовых элементов для оптических кабелей могут использоваться следующие материалы:

- Стальная проволока;
- Медная, алюминиевая или свинцовая трубка (обычно у подводного кабеля);
- Стекловолокно;
- Арамидные нити.

При этом защита от механических воздействий, в частности от продольных механических усилий, возникающих при прокладке и в процессе эксплуатации (особенно для воздушных самонесущих кабелей), обеспечивается силовыми элементами, а защита от тепловых и химических воздействий, влаги, а также от ряда механических воздействий, например, истирания или грызунов, обеспечивают внешняя и промежуточные оболочки.

Как правило, силовые элементы и металлические ленты (для защиты от грызунов) не рекомендуется накладывать непосредственно на оптический сердечник и в качестве промежуточного слоя накладывается промежуточная полимерная оболочка.

Стальная проволока

Стальная проволока навивается поверх сердечника кабеля. Преимущество состоит в том, что кабель, усиленный таким образом, может выдерживать большие поперечные и продольные нагрузки, так как сталь характеризуется лучшей механической устойчивостью, по сравнению с другими материалами. Однако сталь является проводником, что представляет опасность при попада-

нии грозовой молнии.

Круглая оцинкованная проволока используется, например, для бронирования кабелей с трубчатым сердечником. В процессе бронирования по вив заполняется гидрофобным компаундом для предотвращения попадания воды в пустоты бронеповива.

Медная, алюминиевая или свинцовая трубка

Внутренняя часть кабеля, прокладываемого под водой или в очень влажном грунте, должна быть полностью заключена в герметизирующую металлическую трубку. Это вызвано тем, что вода с течением времени просачивается сквозь все обычно используемые для оболочки виды пластмасс. Внутренняя часть кабеля заключается в герметичную металлическую трубку. Затем подводный кабель армируется одним или несколькими слоями стальной проволоки. Сверху наносятся несколько слоев полипропиленовых нитей и антикоррозийного состава.

Арамидные нити

Арамидные нити используются в качестве силовых элементов воздушных оптических кабелей. Отдельный слой из таких нитей располагают между первым и вторым слоем оболочки. Защищенный таким образом кабель может выдерживать большие продольные нагрузки. Обычно таким способом усиливаются кабели, подвешиваемые в пролетах длиной до 1000 м.

Кроме того, арамидные нити, хотя и менее устойчивы к механическим нагрузкам, чем стальные, являются диэлектрическими, и не представляют опасность в случае попадания электрического разряда молнии.

Поддерживающий силовой элемент

На Рис. 2.4.5 показан способ усиления волоконно-оптических кабелей с профилированным сердечником, подтвердивший свою эффективность по отношению к медным кабелям. Этот способ предполагает заключение стальной проволоки в отдельную оболочку, которая вместе с собственно кабелем образует “восьмерку”. Такой кабель обычно используется для подвески в пролетах длиной 50 ÷ 70 м. Такая конструкция кабеля очень экономична, однако, данный тип кабеля нельзя использовать на линиях электропередачи.

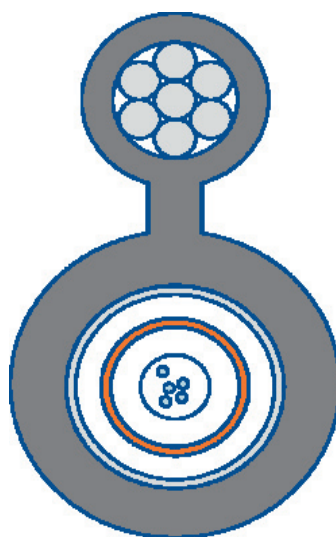


Рис. 8.5. Поддерживающий силовой элемент («восьмерка»)

Оптический кабель, встроенный в грозозащитный трос (ОКГТ)

Оптический кабель, встроенный в грозозащитный трос (ОКГТ), является предметом отдельной статьи. Здесь же отметим, что в настоящее время запущены в серийное производство следующие конструкции ОКГТ:

- сердечник в виде модулей со свободной укладкой волокон, заключенный в алюминиевую центральную трубку;
- модули со свободной укладкой волокон в профилированном алюминиевом сердечнике со спирально расположенными пазами;
- модули из нержавеющей стали с оптическими волокнами в повиве вместо проволок;
- и аналогичные конструкции с плотной укладкой волокон.

Другие конструкции на сегодняшний день широкого распространения не получили. Все модули ОКГТ, выполненные из пластика, сделаны из специального сорта полибутилентерефталата (ПБТ), сочетающего в себе исключительно высокую механическую прочность и стойкость к вредному воздействию влаги. Этот материал, температура плавления которого 225°C, достаточно прочен для того, чтобы выдерживать кратковременное воздействие высоких температур.

8.1.2.3. Оболочка кабеля

Защитные покровы должны предохранять сердечник оптического кабеля от:

- механических воздействий;
- тепловых воздействий;

- химических воздействий;
- воздействий влаги.

Для защиты ОВ от воздействия внешней среды и механических повреждений в процессе прокладки ОК и его эксплуатации кабельный сердечник защищается наружной оболочкой. В общем случае в конструкциях ОК используется 4 варианта оболочек: полиэтиленовая, алюмополиэтиленовая, поливинилхлоридная и из безгалогенного материала, не распространяющего горение.

Полиэтиленовая оболочка, используется, главным образом, в бронированных кабелях наружной прокладки, а алюмополиэтиленовая – в небронированных кабелях, прокладываемых в пластмассовых трубах методом пневмопротяжки. В кабелях, прокладываемых в пожароопасных местах, например, в шахтах телефонных станций, тоннелях метро, и т.д., применяется оболочка из поливинилхлорида, или из безгалогенного материала, не распространяющего горение, и практически не выделяющего при горении дыма и других токсических веществ.

При больших внешних нагрузках на ОК в его конструкцию вводятся броневые покровы. Броня бывает 3-х видов: ленточная, одноповивная круглопроволочная и двухповивная круглопроволочная.

В кабелях для прокладки в кабельной канализации, трубах, коллекторах, тоннелях, на мостах и эстакадах используется стандартная ленточная броня. Стальная гофрированная лента толщиной 0,15-0,25 мм, покрытая с наружной стороны сополимером, накладывается продольно с перекрытием на внутреннюю оболочку ОК. В кабелях для прокладки в грунтах, не подверженных мерзлотным деформациям, на переходах через неглубокие судоходные реки и болота применяется одноповивная броня из круглых стальных оцинкованных проволок различного диаметра. Для прокладки в сложных грунтах всех групп, в т.ч. и подверженных мерзлотным деформациям, а также на переходах через глубокие несудоходные реки и болота применяется двухповивная круглопроволочная броня. В указанной броне оба повива стальных проволок могут быть разделены промежуточной полиэтиленовой оболочкой. В основном броня обеспечивает стойкость ОК к такому внешнему механическому воздействию, как растяжение.

Наружная оболочка кабеля состоит из одного или двух слоев полимера. Обычно для изготовления оболочки применяют следующие виды полимеров:

- полиэтилен;
- поливинилхлорид;
- полиамид;
- термопластический полиуретан.

Применяемые виды полимеров обладают различными термическими, механическими и электрическими свойствами. Прочность, стойкость к воздействию химикатов и воспламеняемость у них также различная.

Таким образом, правильный выбор материала для каждого конкретного

изделия имеет большое значение.

Материалы, идущие на изготовление кабельных оболочек

Полиэтилен

Полиэтилен – полимерный материал, являющийся продуктом полимеризации этилена. Имеет низкую диэлектрическую проницаемость. Обладает почти постоянными диэлектрическими свойствами в широком диапазоне температур. Удовлетворяет основным механическим и химическим требованиям и применяется, прежде всего, для кабелей наружной прокладки.

Существует много разновидностей полиэтилена для широкого диапазона областей применения в кабельной технике ВОЛС. Например, благодаря низкой плотности, высокой вязкости, удлинению при разрыве и хорошей обрабатываемости он используется для производства оболочек сердечников оптических кабелей. Для различных видов оболочек оптических кабелей обычно используют полиэтилен низкой плотности (ПЭНП). Однако, при необходимости обеспечения большей прочности и сопротивления деформации при высоких температурах, применяют и более твердые разновидности полиэтилена – полиэтилен средней плотности (ПЭСП) и высокой плотности (ПЭВП). Это повышает стоимость кабеля, однако ПЭВП существенно увеличивает износостойкость оболочки, делает ее менее восприимчивой к задирам. Также низкий (в 1000 раз меньше чем у ПЭСП) коэффициент диффузии молекул воды через ПЭВП обеспечивает изоляцию металлических силовых элементов свыше 2000 МОм/км. Известно, что именно по сопротивлению изоляции можно судить о нарушении оболочки линий дальней связи. Для этого должна быть высокая защита кабеля от проникновения влаги, что способствует дальности обнаружения нарушения оболочки.

Кроме того, в случае больших нагрузок на оболочку кабеля используют специальные материалы из полиэтилена, имеющие линейную молекулярную структуру. К ним относятся линейный полиэтилен низкой плотности и линейный полиэтилен средней плотности.

Иногда используется многослойная оболочка из ламинированного алюминием полиэтилена, известная по технологии изготовления медных кабелей.

Полиэтиленовая оболочка, которая должна плотно облегать сердечник кабеля, наносится методом экструзии.

Диапазон температур, рекомендуемый для использования полиэтилена, составляет от -60 до 79°C; при этом допускается кратковременное нагревание до 90°C при условии, что в этом случае кабель не будет подвергаться повышенному давлению. Точка плавления полиэтилена находится в диапазоне температур от 110 до 130°C. Как и остальные полимеры, при понижении температуры полиэтилен становится более твердым. При температуре около -65°C

полиэтилен становится хрупким.

Напряжение, вызывающее разрушение, при 20°C равно 10 МПа. Полиэтилен, применяемый для изоляции, можно растянуть на 400%, прежде чем он порвется, а полиэтилен, используемый для изготовления кабельных оболочек, - на 500%; его разрушающее напряжение составляет не менее 12 МПа.

При использовании в помещениях и обеспечении защиты от прямых солнечных лучей срок службы полиэтилена практически неограничен. Однако ультрафиолетовое излучение приводит к образованию в нем трещин. Для их предотвращения в состав полиэтилена вводят УФ-стабилизатор. В качестве такого вещества обычно используется сажа. Поэтому полиэтилен, предназначенный для использования на открытом воздухе, обычно черного цвета.

При комнатной температуре полиэтилен обладает большой стойкостью к воздействию большинства химикатов, масел и других растворителей. Также у полиэтилена очень высокая влагонепроницаемость.

Это значит, что оболочка из полиэтилена обеспечивает высокоэффективную защиту кабелей от попадания в них влаги, особенно при использовании ПЭВП, и от химических воздействий. Кабели с такой оболочкой можно использовать в условиях повышенной влажности и при наличии химических веществ в окружающем пространстве.

В полиэтилене нет никаких пластификаторов, которые могли бы мигрировать в другие материалы. Однако при постоянном соприкосновении с поливинилхлоридом (ПВХ), резиной и т.п. в полиэтилен могут проникать небольшие количества пластификаторов. Поэтому в некоторых случаях полиэтилен нужно защищать от миграции пластификаторов.

Полиэтилен является воспламеняемым материалом. Для придания ему огнестойкости нужно использовать специальные присадки.

Поливинилхлорид (ПВХ)

Оболочки из поливинилхлорида (ПВХ) в основном применяются для кабелей внутренней прокладки. Цвет оболочки обычно серый.

Путем добавления разных специальных присадок, ПВХ могут быть приданы различные свойства, в соответствии с его назначением. Например, можно добавить в качестве присадки вещества, смесь которых является стойкой к воздействию масел и нефти. Приготовленный таким образом ПВХ может использоваться для оболочки кабелей наружной прокладки в случаях, когда в грунте могут быть химически активные отложения.

Как и полиэтилен, ПВХ является термопластическим материалом, т.е. он размягчается при нагревании и становится более твердым при охлаждении. Степень его мягкости при различных температурах зависит, в основном, от вида и количества введенного в его состав пластификатора. Из-за жесткости материала при низких температурах прокладку кабеля с поливинилхлорид-

ной оболочкой рекомендуется осуществлять при температуре не ниже -10°C . Обычно кабель с ПВХ-изоляцией можно использовать при температуре окружающей среды до 70°C .

У ПВХ очень хорошая прочность на растяжение и высокое сопротивление разрыву. Твердость материала можно регулировать с помощью изменения вида и количества пластификатора, делая его пригодным для того или иного конкретного способа применения.

При использовании ПВХ внутри помещений срок его службы практически не ограничен. Самым подходящим для использования в наружных установках является ПВХ черного цвета; однако и смесь с ПВХ серого цвета может быть вполне стойкой к атмосферным воздействиям. Отличительным свойством ПВХ является его высокое сопротивление воздействию озона.

Также ПВХ характеризуется повышенным сопротивлением воздействию кислот и щелочей, а также моторного масла и большого числа растворителей. Однако воздействие некоторых растворителей и масел может привести к выходу из ПВХ пластификатора и тем самым сделать его более твердым. Сопротивление воздействию этих масел и растворителей можно усилить введением в ПВХ более стойких пластификаторов.

Длительное соприкосновение с лакированными поверхностями или с пластмассами может привести к выведению пластификатора из ПВХ. При соприкосновении с такими материалами ПВХ обычно немного затвердевает.

В чистом ПВХ содержится 57% химически связанного хлора, что затрудняет его горение. Поэтому оболочка из ПВХ применяется, если требуется невоспламеняемость.

Присадки и пластификаторы, добавляемые в состав используемого в кабелях ПВХ, являются горючими и увеличивают его воспламеняемость. Ситуацию можно значительно улучшить, если добавить в материал различные жаростойкие химикаты. Однако их дозировку нельзя превышать, так как требуемые от материала механические свойства в этом случае не будут обеспечены.

Степень сопротивления ПВХ горению можно установить путем лабораторных измерений содержания в нем кислорода и температуры самовоспламенения, а также путем проведения элементарных испытаний на огнестойкость.

Следует отметить, что ПВХ все более вытесняется невоспламеняющимися полимерами, в состав которых не входят галогены. Дело в том, что ПВХ при горении выделяет галогены (Cl_2) опасные для жизни людей. Таким образом, при прокладке кабеля оболочкой внутри объектов есть риск удушья людей продуктами сгорания ПВХ. Поэтому в случае такой опасности, например, в метро или в супермаркетах, применение кабелей с оболочкой из ПВХ не желательно.

Полиамид

При изготовлении волоконно-оптического кабеля используются несколько различных модификаций полиамида. Полиамид РА 6 обычно применяется в качестве защитного покрытия полиэтиленовых или ПВХ оболочек кабелей, подвергающихся сильным механическим напряжениям. Полиамид РА 12 используется для оболочек модулей.

Полиамид может использоваться в широком температурном диапазоне, сохраняет свои свойства при постоянной рабочей температуре 90°C, размягчается при температуре около 150°C и сохраняет гибкость при понижении температуры до -40°C. Хрупкость полиамида при низких температурах (ниже -30°C) не позволяет применять его в качестве оболочки в кабелях для прокладки на ВСС России, кроме, пожалуй, кабелей специальных применений и внутриобъектовых кабелей.

Полиамид – более прочный материал, чем ПВХ и полиэтилен. Его прочность на растяжение при 20°C составляет около 50 МПа. Его удлинение до обрыва по меньшей мере 100%.

Полиамид обладает высоким сопротивлением старению, а также является стойким к воздействию атмосферы. Он характеризуется хорошим сопротивлением воздействию большинства масел и химикатов.

Полиамид не содержит в себе никаких пластификаторов, так что при соприкосновении с другими материалами никаких взаимных воздействий не оказывается.

Фторопласты

В качестве материала для изготовления оболочки волоконно-оптических кабелей используются также различные термопластические материалы, содержащие галогены - фтор и хлор - в различных концентрациях. Механические свойства этих материалов очень хорошие, что позволяет уменьшать размеры изделий. Термические свойства фторопластов, их долговечность, а также сопротивление старению, воздействию масел и различных химикатов, и огнестойкость очень хорошие.

Это означает, что их можно использовать в широком диапазоне температур и в различных условиях окружающей среды, в которых использование других изоляционных материалов оказывается невозможным.

Жаростойкие материалы, не содержащие галогенов

В качестве материала для оболочки кабелей, которые подвергаются воздействию высоких температур, обычно нельзя использовать ни полиэтилен, ни ПВХ, ни фторопласты. Они требуют применения специальных материалов, в которых нет галогенов, и которые являются невоспламеняемыми. Такие оболочки состоят из сополимеров этилена и винилацетата и до 50% по весу заполнены триоксидгидратом алюминия.

Под воздействием пламени при температуре выше 250° С вследствие восстановления тригидрооксида алюминия происходит образование водных паров. Данный процесс понижает температуру до уровня ниже температуры воспламенения. Водяные пары также снижают концентрацию горючих газов и кислорода, а образовавшаяся вода гасит пламя. В результате образуется жаростойкий негорючий материал – оксид алюминия. Его термические и механические свойства, а также сопротивление воздействию химикатов зависят от полимерного основания и от количества наполнителей.

Кабели с такой оболочкой имеют почти такие же механические характеристики, как и кабели с полиэтиленовой оболочкой. Эта оболочка имеет серый цвет, и дополнительную маркировку.

Однако важно понимать, что такие оболочки очень быстро впитывают воду, и традиционный тест на сопротивление изоляции «маканием в воду» для них неприменим. Также необходимы специальные меры перевозки и хранения кабелей с такой оболочкой, для предотвращения впитывания влаги, в т.ч. хранение в закрытых помещениях и прочее.

Термопластический полиуретан

Как и полиамид, термопластический полиуретан (ТПУ) – материал довольно дорогой, а поэтому и менее используемый для изготовления кабелей. У него отличные механические свойства (например, высокая прочность на растяжение – 30 ÷ 55 МПа), он способен выдерживать до разрыва деформацию в пределах 400 ÷ 700%. Очень высокое сопротивление ТПУ трению делает этот материал подходящим для оболочек кабелей, подверженных ему в процессе применения. Полиуретан также сохраняет гибкость при понижении температуры до –40°С и характеризуется высоким сопротивлением воздействию масел, нефти и большинства растворителей, а также кислорода и озона.

В ТПУ нет никаких пластификаторов, так что проблема их миграции не возникает.

Защита от влаги

По требованию Минсвязи РФ стандартный тест на водонепроницаемость кабеля, который проводится по методике МЭК 794 (ГОСТ Р МЭК 794-1-93 п.29 метод F5), применяется не к оптическому сердечнику, а ко всему сечению оптического кабеля.

Чтобы удовлетворить требованиям Минсвязи РФ пустоты в бронеповиве заполняются гидрофобным компаундом. Разумеется, требования к данному компаунду существенно ниже, нежели к тиксотропному гелю, заполняющему внутримодульное пространство в кабелях со свободной укладкой волокон. Правда, при прокладке в грунтах, насыщенных влагой, в качестве заполнителя бронеповива для уменьшения диффузии влаги на пути к оптическим волокнам

применяют специальные компаунды с сорбентом по водороду. Срок службы сорбентов в данном случае не должен быть ниже срока службы оптических кабелей.

Оболочка любого кабеля может оказаться поврежденной. В частности, кабели наружной установки подвергаются воздействию влаги, проникающей сквозь мельчайшие отверстия в оболочке или в месте соединения. В таких случаях, насколько высококачественной ни была бы сама кабельная оболочка, будет происходить диффузия воды в материал оболочки.

Вода, при проникновении в оптический кабель, будет растекаться по сердечнику и скапливаться между модулями. Вода воздействует на стекло, уменьшая тем самым срок службы волокон. Повышающаяся в результате проникновения воды концентрация водорода приведет к увеличению затухания в волокнах. При замерзании вода способна повредить элементы кабелей и привести к нарушению связи.

Лучший способ избежать повреждений, вызываемых водой и повышенной влажностью, заключается в заполнении пространства между волокнами, модулями, волоконно-оптическими лентами и оболочкой водонепроницаемым наполнителем.

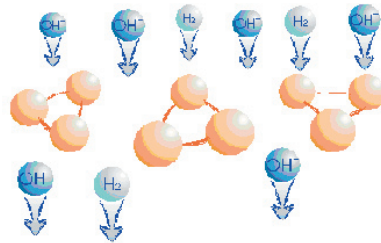
Этот наполнитель не должен оказывать никаких воздействий на входящие в состав кабеля пластмассы и волокна. Наполнитель предотвращает дальнейшее распространение в кабеле воды и влаги и тем самым ограничивает потенциальное увеличение повреждений.

Наполнитель должен иметь соответствующую консистенцию, чтобы не вытекать из кабеля при прокладке.

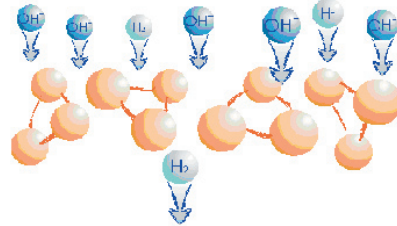
Однако все вышеприведенные способы защиты кабеля от воздействия влаги допустимы только при кратковременных контактах оболочки кабеля с водой, не более 10% срока эксплуатации. В случае большего срока, например, в болотах, реках и т.д., необходима более надежная защита от проникновения как молекул воды H_2O , так и молекулярного водорода.

Проблема влаги, по сути дела, разбивается на два совершенно независимых явления, связанных с наличием водорода, и приводящих к отказам системы. Первое явление – чисто механическая зависимость прочности оптического волокна от количества влаги на его поверхности. Это могут быть как гидроксильные группы OH , так и просто вода H_2O (см. Рис. 2.4.6). Таким образом, срок службы из-за проникновения влаги может быть уменьшен с расчетных до 7-10 лет. От присутствия влаги на поверхности волокна спасает полное внутримодульное заполнение гидрофобным компаундом.

Структура полиэтилена низкой/средней плотности



Структура полиэтилена высокой плотности



Структура металла

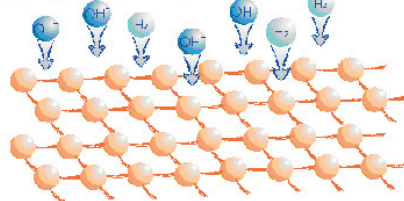


Рис. 8.6. Диффузия водородосодержащих соединений через защитную оболочку

Второе явление, заставляющее помнить о “водородной проблеме”, это явление роста оптического затухания волокна из-за поглощения атомами водорода. При этом, если кабель, волокна которого при укладке имели погонное затухание 0,19-0,22 дБ/км, не защищен от проникновения влаги и водорода, и эксплуатируется в условиях их постоянного воздействия (например, болота с высоким содержанием метана), то после 3-5 лет эксплуатации затухание может вырасти на несколько десятых децибела (Рис. 2.4.7).

Конкретные значения прироста и сроки его появления зависят от типа волокна и концентрации водорода, но важно отметить, что даже прирост 0,05 дБ на магистральной линии связи, проложенной в болоте, приведет к необходимости реконструкции линии. На Рис. 2.4.7 показано, с какой интенсивностью происходит диффузия водородосодержащих соединений к волокну через внешние оболочки.

Применяемая защита от воздействия высокоактивного атомарного водорода возможна лишь с помощью оболочки выполненной из металлизированной фольги или алюмополиэтиленовой ленты, т.е. кристаллической решетки металла. Дело в том, что диффузия сквозь кристаллическую структуру атомов и

молекул химических элементов пренебрежимо мала. В глубоководных кабелях применяют специальную алюминиевую или медную трубку, в более дешевых конструкциях, для прокладки в реках, болотах и пр., используют алюмополиэтиленовую ленту. Применение металлического слоя вызвало трудности на первых порах кабельного производства, связанные с тем, что полимеры, находящиеся внутри защитного металлического экрана, разлагаясь, выделяли водород, который не мог выйти наружу, и его концентрация с годами накапливалась и становилась выше критической, что приводило к росту затухания оптических волокон.

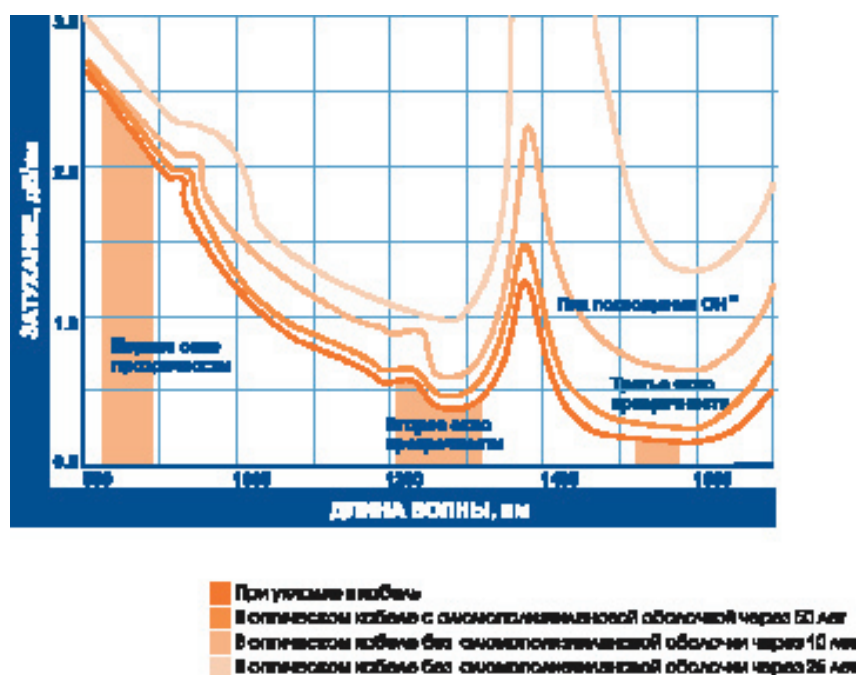


Рис. 8.7. Зависимость затухания в оптическом волокне от различных условий эксплуатации

В последние годы производство компонентов было перестроено таким образом, чтобы химические элементы не разлагались в течение всего срока эксплуатации кабелей. Также элементы подвергаются принудительной дегидратации, что уменьшает число ионов воды и ведет к пониженному изначальному содержанию водорода. Однако такие химические материалы, как правило, дороже, требуют специальных технологий переработки и имеют меньший срок хранения.

Защита от грызунов

Для защиты от грызунов в кабелях применяется оболочка, армированная гофрированной стальной лентой. При этом гофрированная коррозионно-устойчивая стальная лента накладывается непосредственно на сердечник по его длине, а сверху наносится полиэтиленовая оболочка.

Данная стальная лента, благодаря гофрам, одновременно повышает гибкость кабеля. Альтернативой стальной гофрированной ленте является стальная ленточная броня. Она состоит из двух слоев оцинкованных стальных лент толщиной 0.1 мм, которые заделываются в коррозионно-устойчивые слои и покрываются оболочкой из полиэтилена.

Стальная гофрированная лента имеет одинаковую механическую стойкость и гибкость, по сравнению с кабелем со стальной проволокой, которая не дает, в отличие от гофрированной ленты, 100% защиты от грызунов. В ценовом отношении гофрированная лента значительно дешевле. Также броня из гофрированной ленты дополнительно защищает от поперечного проникновения воды, которую не дает броня из стальной проволоки.

2.4.3. Механические характеристики кабелей ВОЛС

Деформация растяжения и сжатия

Наряду с изгибом необходимо ограничивать растяжение и сжатие световодов в модулях с тем, чтобы в заданных диапазонах нагрузок на растяжение и температурных диапазонах в волоконно-оптическом кабеле не возникали недопустимые изменения передаточных характеристик и опасность повреждения световодов. Световоды в модулях со свободной укладкой волокон могут свободно передвигаться внутри оболочки. В ненагруженном состоянии они располагаются в центре модуля, и их зазор ΔR (по отношению к защитной оболочке модуля) определяется с учетом внутреннего диаметра d_i оболочки модуля и наружного диаметра d_f световода (см. Рис.2.4.8). В случае модуля со свободной укладкой, в котором находятся несколько световодов, за наружный диаметр d_f следует принять диаметр воображаемой окружности, охватывающей световоды как можно плотнее.

Относительное изменение длины $\Delta L/L$ волоконно-оптического кабеля, т. е. допустимое удлинение e_k или сжатие e_k (сжатие, обусловленное температурой) кабеля с повивной скруткой радиусом R и шагом S равно:

$$e = -1 + \sqrt{1 + \frac{4p^2 R^2}{S^2} \left(2 \frac{\Delta R}{R} \pm \frac{\Delta R^2}{R^2} \right)},$$

где знак «+» используется для сжатия кабеля e_K , а знак «-» - для удлинения кабеля e_K . Это уравнение может привести к выводу, что уменьшение шага скрутки S вызовет существенное увеличение допустимого удлинения или сжатия кабеля. Но при этом необходимо учитывать допустимый радиус кривизны световода, который различен для одномодовых и многомодовых волокон.

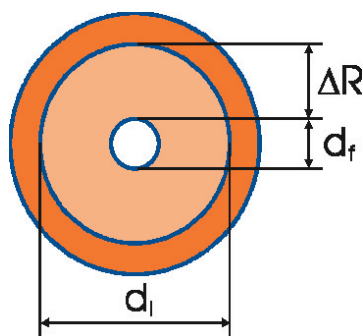


Рис. 8.8. Размеры и положение волокна в модуле в ненагруженном состоянии

Чтобы вычислить максимально допустимое растягивающее усилие F_{max} необходимо знать площади поперечного сечения A материалов, используемых в кабеле, и значения их модуля Юнга E (модуля продольной упругости). Тогда сумма всех произведений $E_i A_i$, умноженных на максимально допустимое удлинение кабеля e_K , дает максимальное растягивающее усилие для кабеля, при котором световоды не подвергаются механическому напряжению:

$$F_{max} = \sum_i E_i A_i e_K$$

На рис. 8.9 показаны различные состояния световода в полой оболочке. Без какого-либо напряжения длина световода и оболочки одинаковая (а). При растяжении за счет растягивающего напряжения волоконно-оптического кабеля световод смещается в направлении внутренней стороны полый оболочки (б), при этом сначала ее не касается и не подвергается деформациям. Удлинение кабеля передается на световод только при величине, превышающей примерно 0,5 %, в зависимости от размеров полый оболочки. Реакцией световода будет повышение затухания.



Рис. 8.9. Различное положение волокон в модуле

При низких температурах имеет место обратное явление. Полимер, из которого сделана оболочка модуля, сжимается. Поэтому, при охлаждении кабеля происходит его сжатие, и световод движется к внешней стороне полой оболочки (в).

Монтажные характеристики ВОК.

Монтаж ВОК должен производиться в соответствии с инструкциями и соблюдением всех допустимых значений его параметров. Наиболее жесткие ограничения накладываются на следующие параметры:

- минимальный радиус изгиба;
- минимальная температура при проведении монтажных работ;
- растягивающая нагрузка
- раздавливающая нагрузка

Минимальный радиус изгиба определяется необходимостью предотвращения повреждения кабеля в месте изгиба. При малом радиусе изгиба может произойти разрыв оболочки и перекручивание кабеля. Малый радиус изгиба приводится обычно для двух случаев: во время прокладки (когда кабель подвержен одновременно перемещению и изгибу) и после нее (когда перемещающая сила на кабель не действует).

Минимальная температура при проведении монтажных работ определяется морозоустойчивостью пластмасс и других органических материалов, используемых в кабеле. При низких температурах пластмассы становятся менее пластичными и подверженными механическим повреждениям, например, раскалыванию или ломке. Минимальная температура при проведении монтажных работ всегда означает температуру кабеля, а не окружающей среды. Если кабель необходимо монтировать при более низкой температуре, или его температура снизилась вследствие хранения под открытым небом, перед монтажом его следует поместить в теплое помещение на достаточное количество времени. Температура кабеля, находящегося на барабане, увеличивается медленно. Необходимое для этого время может составить от нескольких часов до суток в зависимости от размера барабана, длины и типа кабеля и степени предполагаемого нагрева. Размотанный кабель остывает быстро, поэтому монтаж дол-

жен быть произведен в кратчайшие сроки. Типичные значения минимальных температур:

- -15°C для кабелей, предназначенных для прокладки в кабельной канализации и непосредственно в грунте;
- -15°C для подвесных кабелей
- -5°C для внутриобъектовых кабелей

Максимальная растягивающая нагрузка не должна быть превышена, чтобы механическое напряжение волокон во время монтажа оставалось ниже своего допустимого максимального значения (обычно 1/3 напряжения, используемого при испытаниях). Максимальная растягивающая нагрузка определяется прочными элементами ВОК, и задается для каждого типа производителем.

Раздавливающая нагрузка особенно важна для кабелей, предназначенных для прокладки непосредственно в грунте. Чрезмерное давление приводит к механическим напряжениям в волокнах и микроизгибам, которые уменьшают срок службы волокна и увеличивают потери. Раздавливающая нагрузка определяется как допустимая сила, с которой сжимается кабель между пластиной и оправкой. Длина пластины – 100 мм, диаметр оправки – 25 мм (стандарт EN 187000, метод 504).

Указанные выше требования обеспечиваются соответствующим подбором материалов и расчетом конструктивных элементов ОК. Правильно разработанные ОК обладают высокой механической прочностью, позволяющей прокладывать их как обычные металлические кабели. Кроме того, конструкция должна гарантировать и поддерживать характеристики передачи ОВ в течение всего срока службы, который должен составлять 25-30 лет.

В “Технических требованиях к оптическим кабелям связи на ВСС РФ”, утвержденных Минсвязи России (1998) установлены 4 типа ОК по параметру “допустимое растягивающее усилие”:

ТИП 1 – не менее 80 кН;

ТИП 2 – не менее 20 кН;

ТИП 3 – не менее 7 кН;

ТИП 4 – не менее 2,7 кН.

Первому типу удовлетворяют ОК в двухповивной броне из круглых проволок. Усилие в 7 и 20 кН выдерживают кабели в одинарной круглопроволочной броне, но с различными диаметрами бронепроволок. И, наконец, четвертому типу удовлетворяют кабели небронированные и в ленточной броне.

Особые требования к защитным покровам предъявляются к ОК для воздушной подвески. В связи с тем, что подвесные кабели не содержат металлических элементов и изготавливаются из полиэтиленовой оболочки, двух повивов арамидных нитей или повива стеклопластиковых стержней и защитного шланга из полиэтиленов. [8]

2.4.4. Примеры кабелей разных российских компаний

Оптические кабели в России выпускают порядка 10 предприятий, оснащенных современным технологическим оборудованием, которые производят практически всю номенклатуру кабелей, необходимых для строительства современных сетей связи различного назначения. Номенклатура выпускаемых кабелей как по числу ОВ, так и по роду защитных покровов в основном соответствует мировой практике. Незначительное различие состоит лишь в том, что в отечественных конструкциях кабелей используются в основном трубчатые модули, как наиболее распространенные, а зарубежные фирмы используют также профильные и ленточные модули.

Оптические параметры выпускаемых кабелей полностью удовлетворяют всем требованиям и рекомендациям Международного союза электросвязи (МСЭ-Т), а также стандартам Международной электрической комиссии (МЭК). В последние годы производство оптических кабелей в России постоянно растет, улучшается финансовое состояние кабельных заводов, и, как следствие, повышается качество выпускаемых кабелей. В настоящее время отечественная промышленность практически полностью обеспечивает потребности внутреннего рынка ОК и даже способна поставлять его на внешний рынок.

ЗАО “Севкабель” - старейший в России завод-производитель кабелей связи, и один из первых российских заводов, который начал производить оптические кабели. В настоящее время завод оснащен самым современным оборудованием, позволяющим выпускать кабели, предназначенные на всех участках ВСС России.

Не так давно, в июне 1999 года, усилиями двух соучредителей, в городе Воронеже была создана волоконно-оптическая кабельная компания ЗАО “Лусент Текнолоджис Связьстрой -1”. Производственная база предприятия построена на основе современного высокопроизводительного комплекса технологического оборудования для производства кабелей модульной конструкции фирмы Nextrom (Финляндия). Применяется также оборудование Mali (Австрия), Nema (Германия), Swisscab (Швейцария), Watson (США).

Еще одно молодое предприятие – ЗАО “Трансвок”, основанное в конце 1996 года, на сегодня является одним из крупнейших производителей волоконно-оптических кабелей и муфт для их монтажа. Основной задачей предприятия является поставка комплектного оборудования высокого качества для строительства магистральных и внутризоновых волоконно-оптических линий связи (ВОЛС). За 5 лет деятельности ЗАО “Трансвок” освоило выпуск и осуществило поставку более 40 тыс. километров оптических кабелей. Предприятие оснащено новейшим технологическим оборудованием фирмы “Nextrom”. Выпускаемая продукция подвергается испытаниям и исследованиям на уникальном комплексе, позволяющем проводить климатические, механические и электрические испытания.

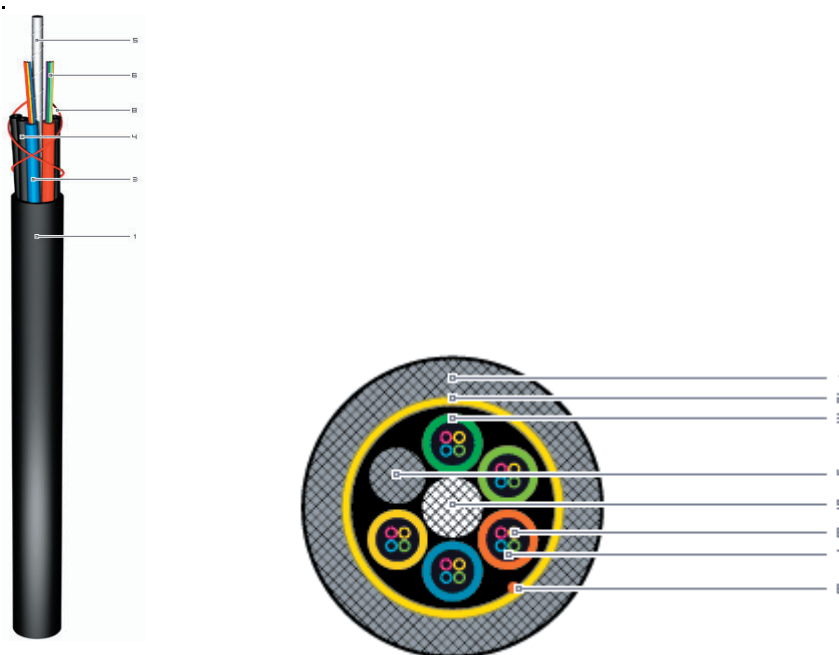
Также из отечественных производителей необходимо выделить еще несколько ведущих предприятий: завод “Саранскабель”, Самарская оптическая

кабельная компания (СОКК) и “Оптен”. Каждое из них имеет свои плюсы – так, например, СП ЗАО “СОКК” является единственным в России изготовителем кабеля в грозозащитном тросе. [8]

Далее представлены некоторые виды кабелей:

ЗАО «Связстрой-1»

кабели оптические для прокладки в специальных трубах типов: ДП-, СП-, ДПа-, СПа-, ДПб-, СПб-, ДН, СН, ДНа-, СНа-, ДНб-, СНб-



ТУ 3587-003-51702873-00

1. Наружная оболочка
2. Силовые элементы
3. Оптический модуль
4. Кордель заполнения
5. Центральный элемент
6. Оптическое волокно
7. Заполнитель оптического модуля
8. Рипкорд

Количество оптических волокон в кабеле	2 - 144
Допустимая растягивающая нагрузка (статическая), кН	1,0 - 2,5

Допустимая растягивающая нагрузка (динамическая), кН	1,6 - 4,0
Допустимая раздавливающая нагрузка, кН/см	0,2 - 0,3
Максимальный наружный диаметр кабеля, мм	12,6 - 21,9
Максимальная масса 1 км кабеля, кг	80 - 460
Температура эксплуатации, °С:	-40...+50
Температура хранения, °С:	-50...+50

По требованию заказчика в кабеле могут быть применены различные виды ОВ

Параметры передачи - в соответствии со спецификацией на оптическое волокно

Марка кабеля	Особенности конструкции	Рекомендуемые условия прокладки
ДП	Диэлектрический ЦЭ	В специальных трубах
СП	Стальной ЦЭ	Те же, исключая условия с высоким уровнем внешних электромагнитных воздействий.
ДПа, СПа	Дополнительная оболочка из алюминиевой ленты	Те же, для условий длительного затопления водой
ДПб, СПб	Дополнительная оболочка из гофрированной стальной ленты	Те же, для условий повышенных раздавливающих нагрузок
ДН, СН, ДНа, СНа, ДНб, СНб	В оболочке из материала, не распространяющего горение	Те же при наличии требований пожарной безопасности

ЗАО «ТРАНСВОК»



Применение

магистральный с броней из стальных проволок, для прокладки в грунтах всех категорий, при пересечении рек и болот, мостах, в кабельной канализации, тоннелях, коллекторах, при вводе в здания и эксплуатации при температуре окружающей среды от минус 40°С до плюс 70°С

Технические характеристики

Количество оптических волокон в кабеле, шт.	2 - 144
Максимальное количество оптических волокон в одном модуле, шт.	12
Тип оптических волокон, по рекомендации ИТУ-Т...	G . 6 5 1 G . 6 5 2 G.655
* Коэффициент затухания, дБ/км, не более, на длине волны: l=1310 нм l=1550 нм	0 , 3 6 0,22
* Длина волны отсечки, нм, не более:	1270
* Хроматическая дисперсия, пс/(нм*км), не более, в диапазоне длин волн: (1285-1330) нм (1525-1575) нм	3 , 5 18
Номинальный диаметр кабеля (D каб), мм	14,1 - 29,0
Температура эксплуатации, °С	- 40 ... +70
Температура монтажа, °С, не ниже	-10
** Нормированная строительная длина, км, не менее	4,0
Расчетная масса кабеля, кг/км	325 - 2460
Допустимое растягивающее усилие, кН	1,5 - 4,0
Допустимое раздавливающее усилие, кН/см, не менее	1,0
Минимальный допустимый радиус изгиба, мм	20 D каб

* - для одномодового стандартного оптического волокна по рекомендации ИТУ-Т G.652

** - по требованию заказчика возможно изготовление других строительных длин (с допуском 0-5%)

Особенности

- срок службы - не менее 30 лет
- модульная конструкция
- наличие защитных покровов (стальная проволоочная броня), центрального силового элемента (стеклопластиковый пруток или стальной трос, покрытый полимерной оболочкой)
 - стойкий к повреждению грызунами
 - возможно изготовление с внешней оболочкой из полиэтилена, не распространяющего горение
 - возможно изготовление строительных длин до 6 км
 - маркировка погонного метра с точностью не хуже 1%
 - поставляется на деревянных барабанах типа 12а, 17а, 18а

ЗАО «Самарская оптическая кабельная компания»
Кабели оптические, встроенный в грозозащитный трос типа ОКГТ-МТ

- [Сертификат соответствия Министерства связи РФ № ОС/1-КБ-140](#)
- [Экспертное заключение РАО “ЕЭС РОССИИ” № 43-СС-2000](#)

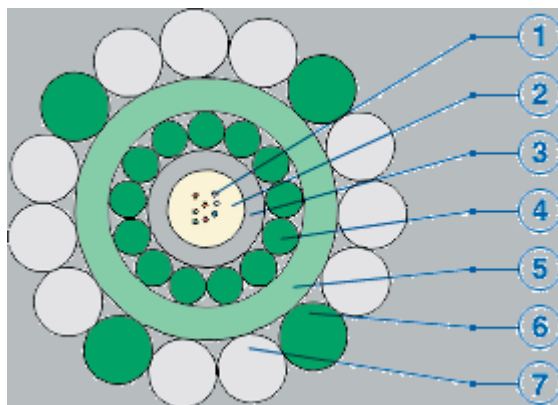
ПРИМЕНЕНИЕ

Для подвески на опорах воздушных линий электропередачи, напряжением 35кВ и выше.

ОСОБЕННОСТИ



- способность выдерживать высокие механические и электрические нагрузки;
- защита от коррозии;
- высокая молниестойкость; высокая стойкость к пляске и вибрации;
- минимальный крутящий момент при монтаже и эксплуатации;
- диапазон рабочей температуры: $-60^{\circ}..+70^{\circ}$;
- возможность изготовления больших строительных длин;
- длительный срок службы.



1. оптическое волокно фирмы “Корнинг”
2. гидрофобный наполнитель
3. центральная полимерная или стальная трубка
4. проволоки стальные оцинкованные
5. алюминиевая оболочка
6. проволоки из алюминиевого сплава
7. проволоки стальные с алюминиевым покрытием

ХАРАКТЕРИСТИКИ

Количество ОВ
до 48
Номинальный внешний диаметр кабеля, мм
13.2
Расчетный вес кабеля, кг/м

590	Сечение стальной части кабеля, мм ²
56,27	Сечение алюминиевой части кабеля
43,26	Минимальная разрывная нагрузка, кг
7600	Максимально допустимая растягивающая нагрузка, кг
4500	Среднеэксплуатационная нагрузка, кг
1900	Модуль упругости (начальный), кг/мм ²
11735	Модуль упругости (конечный), кг/мм ²
14130	Сопrotивление постоянному току при 20°, Ом/км
0.47	Допустимый ток КЗ в 1 сек, кА
9.0	Термическая стойкость к КЗ, кА ² ·с
81	Коэффициент линейного термического расширения, °/С
1.6x10 ⁻⁵	Минимальный радиус изгиба, мм
260	

Примечания:

1. Параметры кабеля уточняются для каждого конкретного проекта ВОЛС. В зависимости от числа оптических волокон кабели могут иметь сердечник модульной конструкции или типа макси тьюб.
2. Параметры передачи даны для стандартного одномодового волокна марки SMF 28 CPC 6 ф. КОРНИНГ. Возможно изготовление кабеля с более низким коэффициентом затухания по специальному заказу.
3. Возможно изготовление кабеля с другими типами оптических волокон производства ф. КОРНИНГ - одномодовым с ненулевой смещенной дисперсией марки LEAF CPC 6;

2.4.5. Кабели зарубежных компаний

Мировым лидером по производству ОК является транснациональная компания ALCATEL, выпускающая широкую номенклатуру ОК от трансокеанских, морских и магистральных до городских, объектовых и

монтажных. Из зарубежных производителей ОК стоит также отметить фирмы NOKIA, Samsung и Corning.

В таблицах 1,2, приведены сравнительные характеристики кабелей отечественного и зарубежного производства

Примечания:

H1 - допустимая растягивающая нагрузка

H2 – допустимая раздавливающая нагрузка

к - количество оптических волокон в кабеле

r - минимальный радиус изгиба

d - минимальный наружный диаметр кабеля

t°C - температура эксплуатации кабеля

У - срок службы

Таблица 1. Подземные ВОК

Производитель	Марка кабеля	Способ прокладки	Коэф. затухания $\alpha=1310$		H1	
СОКК	ОКЛСТ-01(02)	грунт; каб.	0,34	0,2	400	1.
		канализ				
Сарансккабель	ОКЛК	грунт; каб.	0,34	0,2	1000	7
		канализ				
		к а б .				
		канализация				
ОКП	ОКЛм	к а б .	< 0,7	0,22	кН	
		канализация				
		к а б .				
		канализация				
ОКЛ	ОКБ-Т	к а б .	< 0,7	0,22		
		канализация				
		грунт; каб.				
		канализ				
Оптен	ОКБ	к а б .	< 0,7	0,22	7...20	
		канализ				
		к а б .				
		канализация				
СПО	Д П О ,	к а б .	-	-	0,2...6	кН
		канализация				
		к а б .				
Д П С ,	ДАС	к а б .	-	-	7...80	
		канализация				
ДА 2		грунт	-	-		
		трубопровод				
Зао "Трансвок"		грунт; каб.	0,35	0,22	1,5...4	
Севкабель-Оптик		канализ	-	-	7	1.
	ДП2	грунт	-	-	80	
	ДПЛ	грунт; каб.	-	-	2,7	
		канализ	-	-		

Таблица 1. Подземные ВОК

Производитель	Марка кабеля					
	ДПО		-	-	2,7	
	ДПС	грунт; каб. канализ	-	-	7	
	ДПУ	грунт	-	-	20	
	ДА 2	грунт	-	-	80	
	ДАО	грунт	-	-	2,7	
	ДАС	грунт	-	-	7	
	ДАУ	грунт	-	-	20	
Alcatel			-	-	900- 2700Н	
	Б р о н . обычн.		-	-	900- 2700	
	Б р о н . усилен.		-	-	1500- 3500	
	Брон спец.		-	-	1500- 7000	
Samsung		грунт; каб. канализ	-	-	1000- 2700	
			-	-	до 50000	1
Nokia		грунт к а б .	-	-	10000	500
Л у с е н т		канализация	-	-	3000	
Текнолоджис		грунт; каб. канализ	-	-	3-80 кН	0,4
	ДБЦ,ДБН	грунт; каб. канализ	-	-	1,5-4 кН	0

Таблица 2. Подвесные ВОК

Производитель	М а р к а кабеля	Коэф. затухания	Конструктивный параметр	Н1	
		ε=1310	ε=1550		

		Зао		НФ							
				“Электропровод”		ОК/Т	-	0,22		3 кН	
				СОКК		ОКЛЖ	0,34	0,2		10-100	
0,5		228	11,4-	250	К Г Т -						
		380	19	МТ			0,34	0,2		3650кг	
1		316	12,7-	25	ОКЛ		0,36	0,22		≤3,5 кН	
		496	16	лет							
1		332	16,6-	25	ОКК		< 0,7	< 0,22		до 20 кН	
		512	25,6	лет							
1		540	27-	25			-	-		3...34	
		706	35,3	лет							
0,5		252	12,6-	25			-	-		0,2...6	
		404	20,2	лет							
1		354	17,7-	25	ОКМС		0,35	0,22		3...10	
		512	27	лет							
1		370	18,5-	25	ДШМ		-	-		20	
		536	26,8	лет							
		150			ДШТ		-	-		7	
4500	24	200	12,5	-А	D S S		0,37	0,23		1120 Н	
		200	Alcatel	L100							
4500	24	250	17	-А	D S S		0,37	0,23		10080	
		200									
4500	24	250	18,5	-А	D S S		0,37	0,23		4500	
		200									
300							0,37	0,23		5260	
							0,37	0,23		10493	
0000										до10000	
										Н/10см	
00-6000		350	17,5-	с е н т			-	-		3-50 кН	
		360	Текно	Должис	-		-	-		3-22 кН	
3000		280	14-		ДС		-	-			
		290	14,5	-							
4-1 кН	-	-									
4 кН	-	-									

Муфты предназначены для прямого и разветвительного сращивания распределительных, бронированных оптических кабелей и подвесных кабелей на воздушных линиях связи. Оптические муфты могут быть установлены в колодцах кабельной канализации, коллекторах, тоннелях, помещениях для ввода кабеля в АТС. [12]

H2	k	r	d	t°C	У

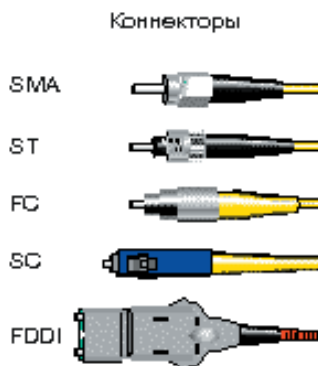


Рисунок 2.4.10

После того, как оптический кабель проложен, необходимо соединить его с приемо-передающей аппаратурой. Сделать это можно с помощью оптических коннекторов (соединителей). В системах связи используются коннекторы многих видов. Сегодня мы рассмотрим лишь основные виды, получившие наибольшее распространение в мире. Внешний вид разъемов показан на рисунке.

Характеристики коннекторов представлены в таблице 3. Когда мы говорим, что данные виды коннекторов имеют наибольшее распространение, то это означает, что большинство приборов ВОЛС имеют розетки (адаптеры) под один из перечисленных видов коннекторов. Хотелось бы сказать несколько слов о последнем разделе таблицы 3. В нем упомянут новый тип фиксации: “Push-Pull”.

Таблица 3:

Т и п разъема						
FC/PC	+	+	+			резьба
ST	+	+				BNC
SMA	+			+		резьба
SC	+	+	+	+		Push - Pull
	+				+	Push - Pull

Фиксация “Push-Pull” обеспечивает подключение коннектора к розетке наиболее простым образом - на защелке. Защелка-фиксатор обеспечивает надежное соединение, при этом не нужно вращать накидную гайку. Важное преимущество разъемов с фиксацией Push-Pull - это высокая плотность

монтажа оптических соединителей на распределительных и кроссовых панелях и удобство подключения. [13]

Оптические соединители

Оптические соединители (разъемы-коннекторы - рис. 2.4.11 и соединительные розетки) используются в волоконно-оптических системах связи и локальных вычислительных сетях (ЛВС) и предназначены для подключения оптического кабеля к коммутационно-распределительным устройствам, терминальному оборудованию и контрольно-измерительной аппаратуре.

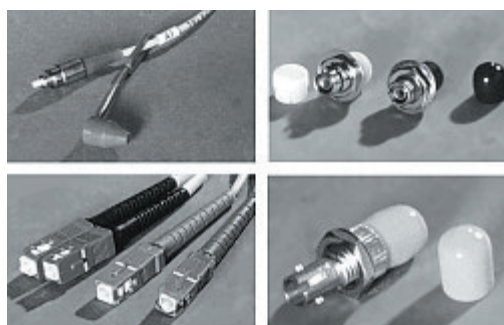


Рис. 2.4.11. Оптические разъемы и адаптеры

К оптическим разъемам предъявляются высокие требования: малые стыковочные потери, низкий коэффициент отражения и высокая надежность работы в различных условиях эксплуатации.

Для высококачественного соединения ОК необходимо устранить попадание воздуха между торцами совмещаемых ОВ. Для этого торцы ОВ шлифуют и придают им сферическую форму, благодаря чему при соединении волокон их торцы плотно прижимаются друг к другу и возникает оптический контакт (Physical Contact - PC), в разьеме значительно снижаются потери и обратное рассеяние из-за френелевского отражения на границе «стекло-воздух». Качество полировки торцов определяет величину коэффициента отражения оптического соединителя. Типичные значения обратных отражений: <-30 дБ (PC), <-40 дБ (SuperPC), <-50 дБ (UltraPC). При использовании технологии APC (скошенный торец) можно получить коэффициент отражения ниже -75 дБ.

Основные типы оптических разъемов, применяемых в настоящее время - FC, SC, ST. Также используются типы Лист-Х и FDDI.

Разъемы стандарта FC/PC имеют надежный металлический корпус и резьбовое соединение. Они достаточно надежны и рекомендуются в первую очередь для одномодовых волокон и бортовых систем специального применения.

В упрощенном варианте - стандарте ST - предусмотрен байонетный тип соединения. Он рекомендуется к использованию в локальных вычислительных

сетях и системах связи общего применения. Для потребителей наиболее предпочтителен многомодовый вариант ST.

Наиболее перспективны разъемы стандарта SC. Они имеют пластмассовый корпус прямоугольной формы, дешевы, удобны при формировании группы оптических соединителей.

Все современные разъемы-коннекторы изготавливаются путем вклейки ОВ в керамический наконечник с последующей полировкой торца.

В соединительных розетках стыковка происходит за счет центровки наконечников в обжимающей втулке-центраторе. Во всех вариантах соединителей разрезной центратор изготавливается для многомодовых ОВ как правило из бронзы, а для одномодовых - из керамики.

В настоящее время многие фирмы предлагают как соединительные шнуры (кабельные сборки, оконцованные с двух сторон) и пигтейлы (армированные разъемом с одной стороны), так и оптические разъемы и розетки, а также наборы инструментов и приспособлений для самостоятельной оконцовки ОВ на месте монтажа. В табл. 4 и 5 представлены типичные характеристики оптических разъемов и соединительных розеток, предлагаемых фирмой «Телеком Комплект Сервис».

Таблица 4. Оптические разъемы-коннекторы					
Стандарт, обозначение		Тип соединения			Обратные потери
ST-125-MM	ЛВС	Байонет с ключом	-	Меньше 0,2 дБ (типично)	-
ST-125-SM	Л В С , системы связи		- волокно во вторичном покрытии (900 мкм)	- меньше 0,3 дБ	- меньше -30 дБ (PC) - меньше -40 дБ (SuperPC) - меньше -50 дБ (UltraPC)
(FC/PC-125-MM)	Л В С , системы связи	Резьба М8х0,75	То же	То же	То же
FC/PC-125-SM					
SC-125-MM	ЛВС	защелка с фиксатором	То же	То же	То же
SC-125-SM	Л В С , системы связи				

Таблица 5. Соединительные розетки			
Стандарт, обозначение	Применение	Тип корпуса	

ST-AM, ST-AS	Преимущественно MM; панели и стенки приборов		
FC-AM, FC-AS	Преимущественно SM; панели и стенки приборов	С квадратным фланцем	
FC-D-AM, FC-D-AS	Преимущественно SM; распределительные панели	D-тип	
SC-AM, SC-AS	MM, SM; панели и стенки приборов	С фланцем	

Кроме простых типов розеток, выпускаются комбинированные соединительные розетки стандартов FC-ST, ST-SC, SC-FC, Лист-Х-FC-AM, Лист-Х-ST-AM.

Для соединения ОВ, кроме сварной технологии и оптических соединителей, используются также механические сплайсы. Сплайс предназначен для многократной и быстрой стыковки обнаженных одномодовых и многомодовых ОВ в покрытии диаметром 250-1000 мкм. Он представляет собой стеклянный капилляр, заполненный иммерсионным гелем, обеспечивает величину вносимых потерь меньше 0,2 дБ и обратных потерь меньше -50 дБ. Пластмассовый корпус модели ULTRAsplice имеет размеры 40 x 5,7 мм.

Коммутационно-распределительные устройства.



Рисунок 2.4.12

К коммутационно-распределительным устройствам относятся настенные соединительные коробки, соединительные коробки, соединительные модули, телекоммуникационные шкафы. Все они предназначены для коммутации многожильного ОК и оконечного оборудования с помощью соединительных шнуров и комплектуются оптическими адаптерами и сплайс-пластинками. Количество портов коммуникационного поля может достигать 96. Коммутационно-распределительные устройства применяются в телефонных сетях, ЛВС, сетях кабельного телевидения.

Оптические разветвители, аттенюаторы, адаптеры

В ЛВС и сетях кабельного телевидения могут использоваться многомодовые и одномодовые разветвители. Типичные параметры разветвителей представлены в табл. 6.

Таблица 6. Оптические разветвители

Т и п разветвителя	Размеры корпуса, мм	Д л и н а волны, нм	Большее
1x2, 2x2	0,15	5,0x70	1310, 1550 дБ
1x2	0,1	55x13x8	

Для подключения к измерительной аппаратуре разработаны и выпускаются FM адаптеры. Они представляют собой комбинацию коннектора и розетки, в коннекторную часть которой вклеен отрезок волокна. Поставляются стандартные FM-ST, FM-SC, FM-FC и переходные FM адаптеры.

Для временного оконцевания волокна в стандартном кабеле (3 мм) и ОВ с буферной оболочкой 900 мкм используют адаптеры для обнаженного волокна, а также устройства для оперативного подключения ОВ. Например, устройство для оперативного подключения волокон УП-125 предназначено для подсоединения оптического измерительного оборудования (рефлектометров, мультиметров) и оптических телефонов непосредственно к ОВ. При этом время подключения не превышает 1-2 с, средние потери для одномодового волокна составляют 0,3 дБ. Ресурс устройства - более 1 млн подключений.

Аттенюаторы обеспечивают заданное ослабление сигнала и позволяют получить нужный уровень оптического сигнала. Фиксированные аттенюаторы имеют размеры и внешний вид стандартных соединительных розеток ST, FC, SC. Затухание обеспечивается отрезком специального волокна между стыкуемыми коннекторами. В переменных аттенюаторах изменение затухания обеспечивается фильтром переменной оптической плотности, расположенным между коллиматорами. [14]

Организатор

Устройство для укладки избытка длины кабелей, монтажных и коммутационных шнуров, а также отдельных световодов оптического кабеля, защитных гильз сварных соединений и корпусов механических сплайсов. Обеспечивает фиксацию перечисленных элементов в рабочем положении, соблюдение заданных радиусов изгиба и величин сдавливающих и растягивающих механических воздействий

Организатор неразъемных соединителей

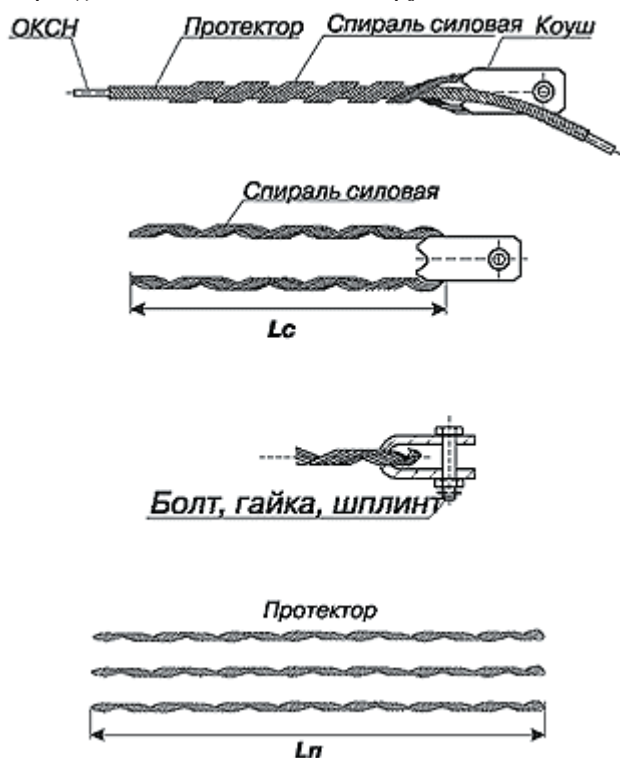
Конструктивный элемент оптического коммутационного оборудования для крепления трубок защитных гильз сварных соединений волокон или корпусов механических сплайсов

Организатор световодов

Конструктивный элемент оптического коммутационного оборудования для хранения технологического запаса длины волокон с соблюдением минимально допустимого радиуса изгиба. Конструктивно он может быть выполнен в виде барабана с боковыми лепестками, поддона с загнутыми вверх краями или отдельных разрезных колец. [15]

Зажимы натяжные спирального типа НСО-ДкП-11(...), НСО-Дк-11(...)

Зажимы натяжные спиральные типа НСО-ДкП-11(...) и НСО-Дк-11(...) предназначены для анкерного крепления самонесущих диэлектрических оптических кабелей (ОКСН) на опорах воздушных линий электропередачи, связи, городского электрохозяйства (уличного освещения, наземного электротранспорта), элементах зданий и сооружений с длиной пролета до 110 м.

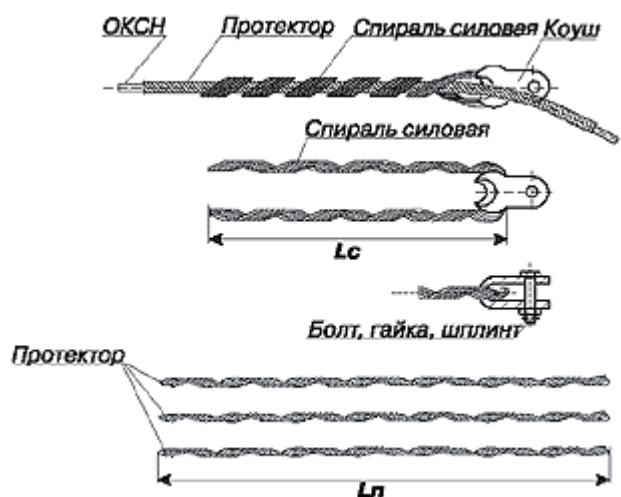


Зажимы натяжные спирального типа НСО-ДкП-01(...) и НСО-ДкП-21(...)

Зажимы натяжные спиральные типа НСО-ДкП-01(...) предназначены для анкерного крепления соответственно самонесущих диэлектрических оптических кабелей связи (ОКСН) монтируемых на опорах воздушных линий электропередачи 35-220 кВ.

Зажимы натяжные спиральные типа НСО-ДкП-21(...) предназначены для анкерного крепления грозозащитных тросов со встроенным оптическим кабе-

лем (ОКГТ), монтируемых на опорах воздушных линий электропередачи 35-220 кВ.

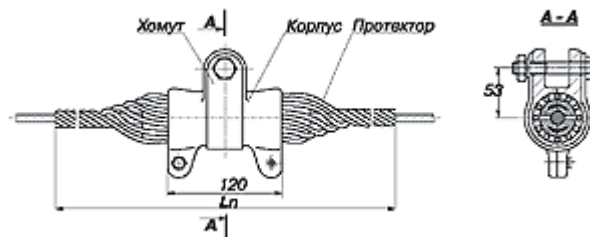


Зажимы поддерживающие спирального типа ПСО-Дк-04, ПСО-Дк-21

Зажимы поддерживающие спиральные типа ПСО-Дк-04 предназначены для подвески оптических самонесущих неметаллических кабелей связи (ОКСН) к опорам линий электропередачи напряжением 35-220 кВ. При использовании для подвески ОКСН к опорам различных линий связи (линии электропередачи менее 20 кВ, опоры городского электротранспорта и т. д.) с длиной пролета до 110 м допускается использование зажимов на опорах с углом поворота трассы до 20° .

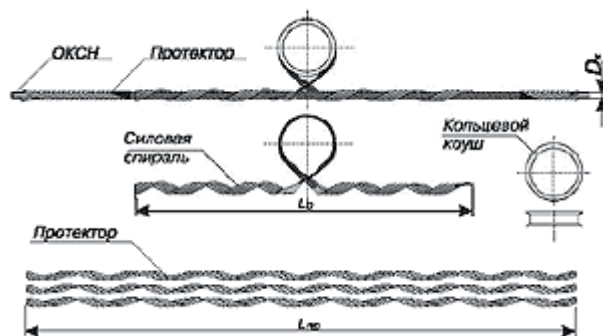
Зажимы поддерживающие спиральные типа ПСО-Дк-21 предназначены для подвески оптических кабелей (ОК) связи, встроенных в грозозащитные тросы (ОКГТ) к опорам линий электропередачи напряжением 35-220 кВ.

Для подвески ОК в особо тяжелых условиях (большие переходы, высокие статические и динамические нагрузки, и т. п.) рекомендуется применение поддерживающих зажимов с дополнительными протекторами: ПСО-ДкП-04 (для ОКСН) и ПСО-ДкП-21 (для ОКГТ) с номинальным диаметром ОК с 9 до 16 мм.



Зажимы поддерживающие спирального типа ПСО-ДкII-11

Зажимы ПСО-ДкII-11 предназначены для воздушной подвески оптического самонесущего неметаллического кабеля связи на опорах линий электропередачи напряжением до 10 кВ, контактной сети и автоблокировки железных дорог, освещения, связи, городского электрического транспорта с длиной пролета до 110 м. [16]



2.4.6.2. Распределительные коробки, панели, шкафы, кабельросты, оптические кроссовые устройства

Распределительные коробки предназначены для соединения и распределения жил кабелей внутри помещений. Малогабаритные распределительные коробки различных размеров и различного оснащения с установленными в них коммутационными узлами предусмотрены на емкость 2, 10 и 20 пар. Для подключения жил кабелей, а также для подключения проводов заземления применяются плиты типа LSA-PLUS. Многие из коробок обеспечивают размещение в них элементов защиты от перенапряжения. [17]

2.4.7. Прокладка кабеля в грунте

Прокладка оптических кабелей в грунт

Оптические кабели прокладываются в грунтах всех категорий, кроме подверженных мерзлотным деформациям. Способы прокладки ОК через болота и водные преграды должны определяться отдельными проектными решениями.

Прокладка может осуществляться в отрытую заранее траншею или с помощью ножевых кабелеукладчиков. Если используются ЗПТ, то сначала одним из указанных способов укладываются в грунт они, а затем в них прокладываются ОК. Возможна прокладка ЗПТ с заранее уложенным в ней кабелем.

Непосредственно в грунт прокладываются ОК имеющие ленточную броню или броню из стальных проволок.

Прокладка оптического кабеля в грунт должна осуществляться при температуре окружающего воздуха не ниже -10 С. При более низких температурах (но не ниже -30 С) кабель необходимо выдержать в течение двух суток в отапливаемом помещении и обеспечить прогрев его на барабане непосредственно перед прокладкой.

Земляные работы выполняются в соответствии с требованиями руководств по строительству линейных сооружений сетей связи

Работы по прокладке ОК в местах пересечения ими охранных зон магистральных трубопроводов газовой и нефтяной промышленности, электрических сетей должны выполняться с учетом требований соответствующих Инструкций по производству земляных работ в охранных зонах указанных коммуникаций.

При любом способе прокладки ОК непосредственно в грунт в местах стыковки строительных длин отрываются котлованы для размещения оптических муфт и запаса ОК. Запас ОК должен обеспечивать возможность подачи муфты в зону удобную для организации рабочего места монтажников. Для соединения строительных длин используются оптические муфты в основном тупиковые отечественного и иностранного производства. Монтаж муфт производится в соответствии с Инструкциями. Для обеспечения возможности измерения сопротивления изоляции наружных оболочек на каждой строительной длине или на участках из нескольких строительных длин из муфт в контейнер проводов заземления (КПЗ) выводятся провода заземления, соединенные с броней. В КПЗ с помощью перемычек можно соединять броню ОК, а при необходимости снимать перемычки и проводить измерения сопротивления изоляции. [18]

8.х. Воздушные линии

Варианты подвески ОК имеют ряд достоинств по сравнению с другими способами строительства:

- отсутствие необходимости отвода земель и согласований с заинтересованными организациями;
- уменьшение сроков строительства;
- уменьшение количества повреждений в районах городской

застройки и промышленных зон;
снижение капитальных и эксплуатационных затрат в районах с тяжелыми грунтами.

Подвеска волоконно-оптических кабелей производится по уже установленным опорам и не требует тщательной предварительной подготовки трассы прокладки, поэтому более технологична и проще, чем прокладка в грунт.

В настоящее время широко используются следующие технологии подвески ОК на опорах различных телекоммуникационных и электрических сетей:

- подвеска самонесущего ОК;
- подвеска ОК с встроенным тросом;
- подвеска кабеля с креплением к внешним несущим элементам.
- подвеска грозотроса со встроенным ОК;
- навивка ОК на фазные провода.

Одним из наиболее важных моментов при подвеске ВОК является правильный выбор технологического оборудования, используемого при строительстве волоконно-оптических линий связи таким способом. Стандартный комплект технологического оборудования включает:

- лебедку с регулируемой силой тяжения;
- кабельный домкрат с тормозным устройством;
- диэлектрический трос (трос-лидер);
- набор больших и малых монтажных роликов;
- кабельные чулки (транзитные и концевые);
- динамометр;
- компенсатор вращения (вертлюг).

Все работы по подвеске ОК на опорах выполняются в соответствии с действующими Правилами и Нормами и техническими условиями, заложенными в проектах.

Перед непосредственной раскаткой ОК на опорах устанавливаются кронштейны для крепления натяжных и поддерживающих зажимов. На установленные кронштейны подвешиваются монтажные (раскаточные) ролики.

Лебедка и барабан с ОК устанавливаются на минимальном расстоянии от граничных опор участка равном тройной высоте от земли до места подвески раскаточного ролика, крепятся и заземляются.

Трос-лидер разматывается с барабана лебедки, на каждой опоре пропускается через желоба раскаточных роликов и соединяется с кабелем на барабане с помощью кабельного чулка. Между кабельным чулком и тросом-лидером устанавливается компенсатор кручения (вертлюг).

Раскатка ОК производится путем наматывания троса-лидера на барабан лебедки, при этом прохождение места соединения троса-лидера с ОК по монтируемому участку должно постоянно контролироваться. Раскатка заканчивается, когда ОК пройдет через раскаточный ролик на концевой опоре на расстояние равное высоте подвески ролика плюс 15-20 м.

После раскатки на опоре, возле которой расположен барабан с ОК, кабель закрепляется с помощью натяжного зажима.

Путем натяжения кабеля задается определенная проектом стрела провеса его в пролетах и кабель крепится к граничной опоре монтируемого участка с помощью натяжного зажима.

После крепления ОК на концевых опорах он снимается с роликов и закрепляется в поддерживающих зажимах.

На граничных опорах участка кабель спускается с опор для обеспечения монтажа оптических муфт.

После монтажа муфт свободная длина кабелей спуска скручивается в бухту радиусом не менее 20 диаметров ОК. Для закрепления оптической муфты и бухты кабеля на опоре могут использоваться различные специальные конструкции. Наиболее оптимальным для исключения несанкционированного доступа и защиты является размещение муфты и запаса кабеля в шкафу, закрепленном на опоре.

При строительстве волоконно-оптических линий связи методом подвески на опоры высоковольтных линий напряжением 110 кВ и выше, кроме рассмотренного способа применяют:

неметаллический кабель малого диаметра, который с помощью специальных механизмов наматывается с определенным шагом намотки на фазный провод или грозозащитный трос;

встроенный в грозотрос специальный микрокабель, как правило, используется только при реконструкции высоковольтной линии с заменой грозотроса.

Для строительства ВОЛС местных сетей связи широко используется подвеска ОК с встроенным тросом типа "8" и подвеска кабеля с креплением к внешним несущим элементам (стальному канату). В обоих случаях используются те же кронштейны, устанавливаемые на опорах, что и при подвеске самонесущего ОК.

При строительстве ВОЛС методом подвеса ОК к стальному канату в первую очередь подвешивается и натягивается стальной канат. При этом используется натяжная и поддерживающая арматура как в предыдущем варианте. ОК крепится к стальному канату подвесами из листовой оцинкованной стали или алюминия. Подвесы устанавливаются через каждые 700 мм так, чтобы они плотно обжимали кабель и свободно висели на канате.

Стальной канат, на котором подвешен кабель, заземляется в начале и в конце линии, а также через каждые 250 м.

В настоящее время разработана технология навивки маловолоконного оптического кабеля (6 -16 волокон) диаметром от 3,5 до 6,2 мм на один из фазных проводов низковольтных ЛЭП 6, 10 и 33 кВ. Соединительные муфты крепятся непосредственно к фазному проводу.

Для соединения оптических волокон подвешенных строительных длин

применяются оптические муфты различной конструкции отечественного и иностранного производства.

На граничных опорах участка кабель спускается с опор для обеспечения монтажа оптических муфт.

После монтажа муфты свободная длина кабелей спуска и сама муфта крепятся на опоре. Для закрепления оптической муфты и свободной длины ОК на опоре используются различные специальные конструкции.

Рассмотренные выше технологии не являются единственными и, как правило, используются в комплексе. Применение той или иной технологии определяется принятыми проектными решениями. [18]

8.x. Подводные кабельные системы

Прокладка ОК через водную преграду предусматривает сооружение двух участков перехода (створов), разнесенных друг от друга на расстояние около 300 м. При наличии моста на участке организации речного перехода нижний створ ОК прокладывается по мосту. На береговых участках ОК речного перехода соединяются муфтовым соединением с ОК, проложенным в грунт. Для удобства доступа к муфтам стыка грунтового ОК и ОК речного перехода целесообразно размещать их и технологические запасы длин ОК внутри пункта доступа типа ПОД.

Метод горизонтально-наклонного бурения применяется при прокладке ОК через крупные овраги, судоходные реки и многочисленные подземные коммуникации. Этим методом с высокой точностью выполняются скрытые переходы на глубине до 30 м и длиной до 1 км. Установка горизонтально-наклонного бурения по заданной траектории бурит предварительную (пилотную) скважину, с большой точностью выходящую в заданную точку на другой стороне препятствия. Затем за один или несколько этапов расширяют скважину до требуемого диаметра. В скважину с помощью бурового раствора, формирующего канал и выполняющего роль смазки, затягивают отдельные трубы или пучки труб, используемые в качестве труб кабельной канализации на участке перехода (рис. 2.4). [9]

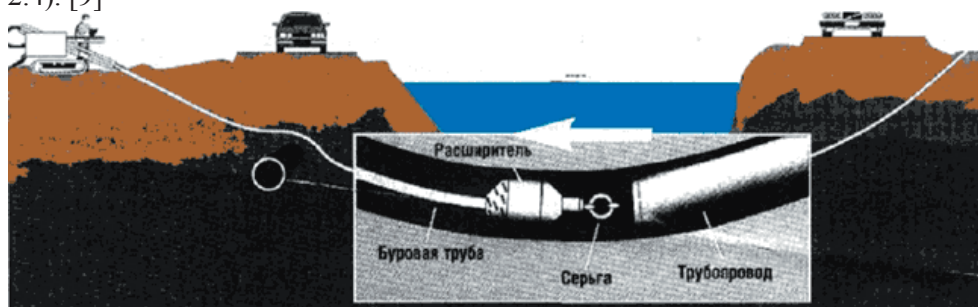


Рис. 8.х. Выполнение речного перехода методом горизонтально-наклонного бурения

Глава 9. ПРИМЕНЕНИЕ ОПТОВОЛОКНА

9.1. Телекоммуникации

9.1.1. Появление оптоволоконна в телекоммуникациях

Оптическое волокно в настоящее время считается самой совершенной физической средой для передачи информации, а также самой перспективной средой для передачи больших потоков информации на значительные расстояния.

В современных телекоммуникационных системах информация передается в виде последовательностей двоичных посылок, или битов. Каждый бит, передаваемый в строго определенный момент времени, может иметь значение либо 1 (есть световой сигнал — импульс), либо 0 (в тот же момент времени сигнал отсутствует).

Телекоммуникационная индустрия является основным потребителем волоконно-оптической технологии, использующим ее широкую частотную полосу пропускания, низкие потери и электромагнитную невосприимчивость. Чаще всего применяется волокно 62,5 / 125 или одномодовое.

При построении городских телекоммуникационных сетей главным образом используются ленточные кабели, состоящие из большого (до нескольких сотен) количества волокон. Подключение к телекоммуникационному оборудованию осуществляется с помощью оптических коннекторов (соединителей) типа FC/PC (Physical Contact), ST (straight tip connector — «прямой разъем»), SC (subscriber connector — «абонентский разъем»); к кабельному ТВ — FC/PC, SC; к измерительной аппаратуре — SMA, SC; к дуплексным системам связи — FDDI.

Раньше всего начали использовать волоконно-оптическую технологию в магистральных линиях, соединяющих центральные телефонные узлы с международными переговорными центрами.

В центральном узле размещалось коммутационное оборудование, позволяющее обеспечить телефонный сервис в данной географической зоне. Центральный узел коммутировал номера с одинаковыми первыми тремя числами семизначных телефонных кодов.

На международном переговорном узле устанавливалось коммутационное оборудование, обеспечивающее телефонные переговоры из одной географической зоны в другую.

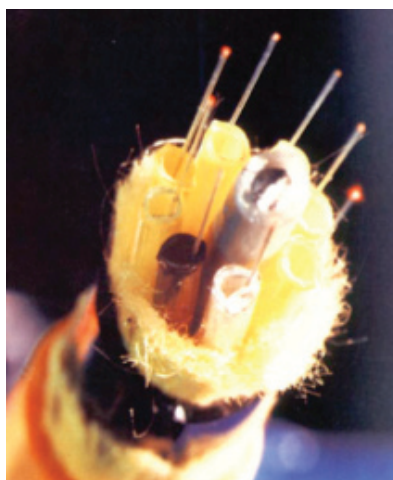


Рис. 9.1. Первый оптоволоконный кабель в немецкой телефонной сети. Установлен 1 октября 1977 года

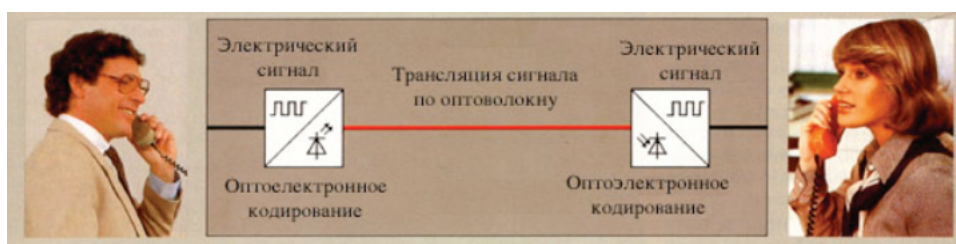


Рис. 9.2. Принципы телекоммуникации на основе оптоволоконна

Волоконная оптика нашла свое применение и в абонентной сети, соединяющей центральный узел с абонентными телефонами. При этом используется локальная оптическая линия, соединяющая центральный узел с небольшой электронной системой, называемой локальным сервисным интерфейсом, от которого выходят линии, подключаемые непосредственно к бытовым телефонам. Частотная полоса оптического волокна позволяет телефонным компаниям предоставлять пользователям дополнительные услуги, включая видео, информационную службу и др., осуществление которых требует достаточной частотной полосы пропускания. На рис. 7.2 представлена упрощенная схема телефонной сети.

1990-е годы характеризуются интенсивным внедрением оптического волокна в абонентные линии. При этом существуют два подхода: оптическое волокно прокладывается до коммуникационного колодца вне здания (FTTC — fiber to the curb) или непосредственно внутри здания (FTTH — fiber to the home), при этом приемопередатчик находится в здании. Внутри него может проходить как волокно, так и медный кабель. В FTTC приемопередатчик размещается вне здания, и медные кабели соединяют его с несколькими здания-

ми. Как более дешевый, этот подход получил большее распространение.

Также интерес представляют несколько кабельных решений на основе оптоволокну, которым компания Сонет Текнолоджис уделяет особое внимание. Они получили сокращения: FTTW — оптоволокну до рабочего места, соединяющие в себе решения FTTO — оптоволокну в офис и FTTD — оптоволокну до рабочего стола. Технология FTTW пришла на смену существовавшей до недавнего времени популярной технологии — кабельного решения СТТД — медный кабель до рабочего места (рис. 7.3).

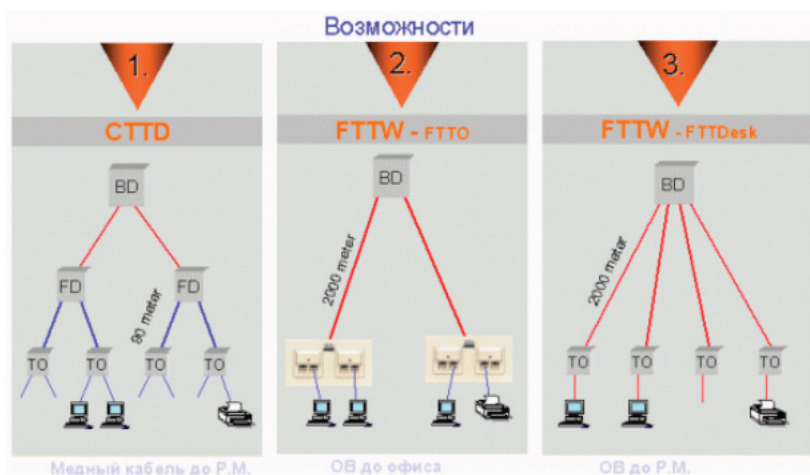


Рис. 9.3. Сравнение кабельных решений на базе медного кабеля и оптоволокну

Кабельные решения FTTW объединяют два направления, работающие на базе оптоволоконных кабелей: FTTD и FTTO (рис. 7.4).

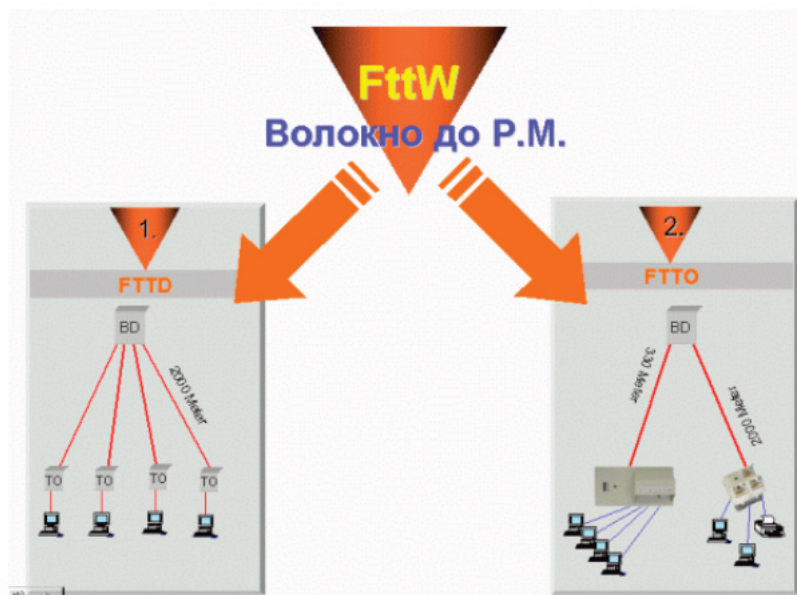


Рис. 9.4. Оптоволоконное кабельное решение FTTW

Преимущества такого оптоволоконного кабельного решения перед медным кабелем:

- оптоволокну подходит к розетке рабочего места, минуя уровни распределения этажа здания, что позволяет сэкономить на установке коммутационных коробок зонавого распределения;

- возможность доведения до офиса оптоволоконной магистрали высокоскоростных сетевых приложений (таких, как АТМ (асинхронный режим передачи) 155 Мбит/с и GIGAbit Ethernet 1000 Мбит/с);

- организация офисных концентраторов на базе оптоволокна с последующим зонавым распределением в офисе или преобразованием оптического излучения в электрический сигнал с доводкой сетевого приложения до рабочего места по медному кабелю.

Одним из лучших, если не самым лучшим, источником практической информации по физической проводке кабелей является руководство BICSI Telecommunications Distribution Method (TDM) за 1995 год. TDM представляет основу для формирования топологии сети с проводкой из оптического кабеля, в соответствии с принятыми стандартами.

Физическая топология типа «звезда», рекомендованная TDM, во многом определяется взаимным расположением и внутренней планировкой зданий, а также наличием готовой кабельной канализации. Несмотря на то, что иерархическая звездообразная топология обеспечивает наибольшую гибкость, она может оказаться невыгодной по чисто финансовым соображениям. Но даже

физическое кольцо лучше, чем полное отсутствие оптической кабельной магистрали.

Большинство предприятий по производству оптоволокна сосредоточено в США. Обладая главными патентами, американские фирмы (в первую очередь это относится к фирме “CORNING”) оказывают влияние на производство и рынок компонентов ВОЛС (Волоконно-оптические линии связи) во всем мире, благодаря заключению лицензионных соглашений с другими фирмами и созданию совместных предприятий. На сегодня в мире несколько десятков фирм, производящих оптические кабели различного назначения. Наиболее известные из них: AT&T, General Cable Company (США); Siccog (ФРГ); BICC Cable (Великобритания); Les cables de Lion (Франция); Nokia (Финляндия); NTT, Sumitomo (Япония), Pirelli(Италия).

9.1.2. SONET

Sonet (synchronous optical network) является волоконно оптическим телекоммуникационным стандартом, предусматривающим скорость передачи данных до 10 Гб/сек.

Впервые Sonet был предложен в 1984 году как стандартизованный метод передачи оптического сигнала и для обеспечения совместимости оборудования, выпускаемого различными компаниями. Наиболее крупные телефонные компании и поставщики телекоммуникационного оборудования приняли стандарт Sonet в 1988 году.

Базисная скорость Sonet составляет 51 840 Мб/сек и называется Optical Carrier 1 или ОС-1. Более высокие скорости получаются умножением базовой скорости: $ОС-n = n \times 51\,840$. Например, ОС-3 имеет скорость 155,52 (51 840 \times 3 = 155,52). Максимальная скорость, доступная в настоящий момент, — ОС-192, составляет примерно 10 Гб/сек и лимитирована возможностями доступных электронных компонент. Как только более скоростные электронные компоненты станут доступны, стандарт Sonet будет расширен до более высоких скоростей.



Рис. 9.5. Коммуникационное оборудование для оптоволоконных линий

Отметим, что скорости передачи системы Sonet начинаются с уровня, на котором возможности коаксиального кабеля исчерпаны. Представляет интерес также расстояние между повторителями. Коаксиальные системы требуют для регенерации сигнала размещение повторителей через каждые 1–2 км, в то время как оптические системы на лазерных источниках имеют стандартное расстояние между повторителями — 25 км, а оптические системы на светодиодах требуют регенерации сигнала с интервалом в 2 км.

Таким образом, преимущественное использование волоконной оптики в приложениях типа удаленной телефонной связи основано на большей информационной емкости линий и большем расстоянии между повторителями.

9.2. Локальные компьютерные сети (LAN)

В 1980-е годы начались работы по созданию стандартных технологий и устройств для использования оптоволоконных каналов в локальных сетях. Работы по обобщению опыта и разработке первого оптоволоконного стандарта для локальных сетей были сосредоточены в Американском национальном институте по стандартизации — ANSI, в рамках созданного для этой цели комитета X3T9.5.

В настоящее время большинство сетевых технологий поддерживают опто-

волоконные кабели в качестве одного из вариантов физического уровня.

Большинство локальных сетей работает с ограниченной скоростью и на ограниченном расстоянии, поэтому использование волоконной оптики привлекательно по двум причинам.

Во-первых, она позволяет увеличить расстояние передачи сигнала. Например, сеть 10BASE-T допускает максимальное расстояние между концентраторами в 100 метров. При использовании волоконно-оптического повторителя в некоторой точке сети оно может быть увеличено в 20 раз и достигать 2 км, что существенно расширяет пространственные рамки сети.

Вторая причина — невосприимчивость к электромагнитным помехам. В некоторых случаях в сети используются волоконно-оптические участки для избежания влияния внешних помех.

Во многих приложениях скорость передачи информации не требует применения волоконной оптики. В частности, локальные сети на медном кабеле работают со скоростью 10 или 16 Мб/сек (Мегабит в секунду), что существенно ниже возможностей волоконной оптики.

Фирма «ВИМКОМ ОПТИК», занимаясь автоматизацией и электронными технологиями, разрабатывает и устанавливает локальные и магистральные сети Ethernet, Fast Ethernet, FDDI, ATM/SDH с применением оптических линий связи. Делает это она по трем причинам. Во-первых, это выгодно. При установке протяженных сегментов сети не требуются повторители. Во-вторых, это надежно. В оптических линиях связи очень низкий уровень шумов, что позволяет передавать информацию с коэффициентом ошибок не более 10^{-10} . В третьих, это перспективно. Волоконно-оптические линии связи позволяют наращивать вычислительные возможности сети без замены кабельных коммуникаций. Для этого нужно просто установить более быстродействующие передатчики и приемники. Это важно для тех пользователей, кто ориентируется на развитие своей ЛВС.

В настоящее время существует два наиболее популярных вида локальных сетей: IEEE 802.3 Ethernet и 802.5 Token Ring. Указанные индексы присвоены комитетом IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers), который разработал эти стандарты и выпустил соответствующие документы.

Кроме того, оптическое волокно сложно использовать при строительстве общей шины, но его удобно использовать для связи «точка — точка», применяемой в топологии «звезда» и «кольцо».

9.2.1. Стандарт IEEE 802.5 Token Ring

Стандарт IEEE 802.5 специфицирует сеть типа token ring (с передачей маркера). Она часто называется IBM token ring, потому что ее первоначальная разработка была произведена компанией IBM. В данной сети на логическом уровне используется топология типа «кольцо», в то время как на физическом

уровне реализована топология типа «звезда». Рабочие станции подключаются к концентратору, а концентраторы соединяются сетевым кабелем, называемым магистральным (backbone).

Волоконная оптика используется в сетях IEEE 802.5 для соединения повторителей. Сигнал передается повторителю по витой паре, трансформируется в оптический сигнал и передается другому повторителю, который на другом конце оптической линии принимает сигнал и снова трансформирует его в электронный вид. Каждый повторитель имеет порт для подключения витой пары и два порта для приема и передачи светового сигнала.

В отличие от сетей CSMA/CD (например, Ethernet), сети с передачей маркера являются детерминистическими сетями. Это означает, что можно вычислить максимальное время, которое пройдет, прежде чем любая конечная станция сможет передавать. Эта характеристика, а также некоторые характеристики надежности делают сеть Token Ring идеальной для применений, где задержка должна быть предсказуема и важна устойчивость функционирования сети. Примерами таких применений является среда автоматизированных станций на заводах.

9.2.2. Стандарт IEEE 802.3 Ethernet

Стандарт IEEE 802.3 разработан для сетей типа CSMA/CD и обычно называется Ethernet. Он определяет топологию сети на логическом уровне в виде шины, а на физическом уровне она может быть реализована как в виде «шины», так и в виде «звезды», в зависимости от используемого кабеля. Коаксиальный кабель используется для реализации топологии типа шина: общий кабель проходит от одной станции к другой. Сеть на витой паре и волокне имеет топологию «звезды». При этом все станции подключены к концентратору (также называемому мультипортовым повторителем). Каждый концентратор имеет несколько портов, осуществляющих подключение рабочих станций или другого концентратора.

Стандартный порт концентратора работает как приемопередатчик, тип которого зависит от используемого кабеля. Единственной задачей приемопередатчика является преобразование сигнала в форму, приемлемую для передачи по сетевому кабелю.

Например, в кабеле типа витой пары используется четыре провода: два — для передачи и два — для приема сигнала. Также применяются модульные соединители типа телефонных. В коаксиальном кабеле используется единственный кабель, как для приема, так и для передачи, и радиочастотные соединители BNC-типа или N-типа. Использование волоконно-оптического кабеля подразумевает включение двух волокон для передачи в обоих направлениях и соединителя ST-типа или SMA-типа.

9.2.3. Стандарт 10Base-F

Стандарт 10Base-F использует в качестве среды передачи данных оптоволоконно. Функционально сеть стандарта 10Base-F состоит из тех же элементов, что и сеть стандарта 10Base-T — сетевых адаптеров, многопортового повторителя и отрезков кабеля, соединяющих адаптер с портом повторителя. Как и при использовании витой пары, для соединения адаптера с повторителем используется два оптоволоконна: одно соединяет выход Tx адаптера со входом Rx повторителя, а другое — вход Rx адаптера с выходом Tx повторителя.

Стандарт FOIRL (Fiber Optic Inter-Repeater Link) — это первый стандарт комитета 802.3 для использования оптоволоконна в сетях Ethernet. Он гарантирует длину оптоволоконной связи между повторителями до 1 км при общей длине сети не более 2500 м. Максимальное число повторителей — 4.

Стандарт 10Base-FL предназначен для соединения конечных узлов с концентратором и работает с сегментами оптоволоконна длиной не более 2000 м при общей длине сети не более 2500 м. Максимальное число повторителей — 4.

Стандарт 10Base-FB предназначен для магистрального соединения повторителей. Он позволяет иметь в сети до 5 повторителей при максимальной длине одного сегмента 2000 м и максимальной длине сети 2740 м. Повторители, соединенные по стандарту 10Base-FB, постоянно обмениваются специальными последовательностями сигналов, отличающимися от сигналов кадров данных, для обнаружения отказов своих портов.

Поэтому концентраторы стандарта 10Base-FB могут поддерживать резервные связи, переходя на резервный порт при обнаружении отказа основного с помощью тестовых специальных сигналов. Концентраторы этого стандарта передают как данные, так и сигналы простоя линии синхронно, поэтому биты синхронизации кадра не нужны и не передаются. Стандарт 10Base-FB поэтому называют также синхронный Ethernet.

Стандарты 10Base-FL и 10Base-FB не совместимы между собой.

9.3. Стандарт FDDI

Fiber Distributed Data Interface (FDDI) — первая локальная сеть, сконструированная полностью на волоконной оптике. По сравнению со своими предшественницами, основанными на медном кабеле, она имеет лучшие характеристики: скорость передачи данных 100 Мб/сек на расстояние до 100 км и возможность подключения до 1000 станций. Сравнив эти возможности с возможностями 16 Мб/сек 802.5 token ring или с 10 Мб/сек 802.3 Ethernet с расстояниями подключения в несколько сот метров, вы можете оценить существенные преимущества сети FDDI.

Технология FDDI во многом основывается на технологии Token Ring, развивая и совершенствуя ее основные идеи. Разработчики технологии FDDI ставили перед собой в качестве наиболее приоритетных следующие цели:

- повысить битовую скорость передачи данных до 100 Мб/с;
- повысить отказоустойчивость сети за счет стандартных процедур восстановления ее после отказов различного рода — повреждения кабеля, некорректной работы узла;
- максимально эффективно использовать потенциальную пропускную способность сети как для асинхронного, так и для синхронного трафиков.

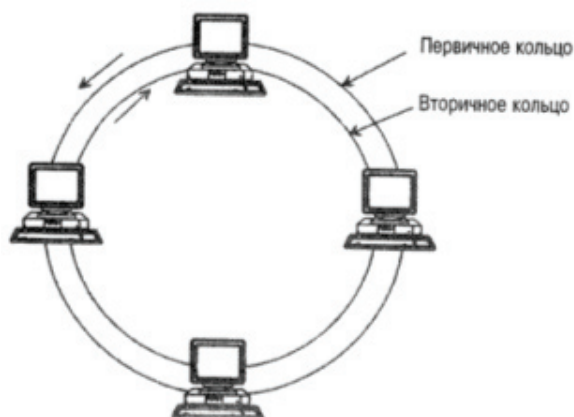


Рис. 9.6. Сеть FDDI

Сеть FDDI строится на основе двух оптоволоконных колец, которые образуют основной и резервный пути передачи данных между узлами сети. Использование двух колец — это основной способ повышения отказоустойчивости в сети FDDI, и узлы, которые хотят им воспользоваться, должны быть подключены к обоим кольцам. В нормальном режиме работы сети данные проходят через все узлы и все участки кабеля первичного (Primary) кольца, поэтому этот режим назван режимом *Trng* — “сквозным” или “транзитным”. Вторичное кольцо (Secondary) в этом режиме не используется.

В случае какого-либо вида отказа, когда часть первичного кольца не может передавать данные (например, обрыв кабеля или отказ узла), первичное кольцо объединяется со вторичным, образуя вновь единое кольцо. Этот режим работы сети называется *Wrap*, то есть “свертывание” или “сворачивание” колец. Операция свертывания производится силами концентраторов и / или сетевых адаптеров FDDI. Для упрощения этой процедуры данные по первичному кольцу всегда передаются против часовой стрелки, а по вторичному — по часовой. Поэтому при образовании общего кольца из двух колец передатчики станций по-прежнему остаются подключенными к приемникам соседних станций, что позволяет правильно передавать и принимать информацию соседними станциями.

В стандартах FDDI отводится много внимания различным процедурам, которые позволяют определить наличие отказа в сети, а затем произвести не-

обходимую реконфигурацию. Сеть FDDI может полностью восстанавливать свою работоспособность в случае единичных отказов ее элементов. При множественных отказах сеть распадается на несколько не связанных сетей.

FDDI-сеть достаточно часто используется для соединения других сетей. Она может быть использована как backend-сеть, frontend-сеть и магистральная сеть.

На сегодняшний день FDDI не столь распространены, как Ethernet или Token Ring. Хотя FDDI приобрела значительное число своих последователей, которое увеличивается по мере уменьшения стоимости интерфейса FDDI. Также FDDI часто используется и как основа технологий, и как средство для соединения быстродействующих компьютеров, находящихся в локальной области.

9.4. Технологии GIGALite II фирмы «Nexans»

На сегодняшний день — это, пожалуй, единственный оптоволоконный кабель, который в состоянии обеспечить требуемую полосу пропускания информационного сигнала на больших расстояниях.

Оптоволоконные кабели GIGALite II производятся со стандартными типоразмерами (62,5 / 125 и 50 / 125), они полностью совместимы с существующими типами оборудования, работающими на мировом рынке оптоволоконной кабельной продукции и поэтому не требуют специального оборудования и средств прокладки и оконцовки.

9.5. Стандарт HSSI

High-Speed Serial Interface(HSSI) — высокоскоростной последовательный интерфейс является интерфейсом DTE/DCE (интерфейс «терминальное оборудование / оборудование завершения работы информационной цепи»), разработан компаниями Cisco Systems и T3Plus Networking. Менее чем за три года HSSI стала настоящим промышленным стандартом.

В настоящее время HSSI находится в стадии процесса официальной стандартизации в комитете Ассоциации электронной промышленности (EIA/TIATR30.2) Американского национального института стандартизации (ANSI). Недавно он был передан в организации “Международный консультативный комитет по телеграфии и телефонии” (CCITT) и “Международную организацию по стандартизации” (ISO); ожидается, что он будет стандартизирован обеими организациями.

Максимальная скорость передачи сигнала HSSI равна 52 Мбит/сек. На этой скорости HSSI может оперировать скоростями T3 (45 Мбит/сек) большинства современных быстродействующих технологий WAN (линии глобальных сетей), а также может легко обеспечить высокоскоростное соединение между локальными сетями, такими, как Token Ring и Ethernet.

9.6. Стандарт SMDS

Switched Multimegabit Data Service (SMDS) (Служба коммутации данных мультимегабитного диапазона) является службой дейтаграмм с коммутацией пакетов, предназначенной для высокоскоростных информационных сообщений глобальных сетей. SMDS в настоящее время повсеместно используется в общедоступных сетях передачи данных коммерческими сетями связи, обеспечивая пропускную способность от 1 до 34 Мб/сек. Причинами этому служили: 1) пролиферация обработки распределенных данных и других прикладных задач, для реализации которых необходимы высокопроизводительные объединенные сети; 2) уменьшающаяся стоимость и высокий потенциал полосы пропускания волоконно-оптического носителя, обеспечивающие жизнеспособность прикладных задач при их использовании в глобальных сетях.

SMDS описана в серии спецификаций, выпущенных Bell Communications Research (Bellcore) и принятых поставщиками оборудования для телекоммуникаций и коммерческими сетями связи.

SMDS способен формировать все пакеты данных IEEE 802.3, IEEE 802.4, IEEE 802.5 и FDDI. Большой размер пакета согласуется с задачами высокоскоростного обслуживания.

9.7. Канал передачи данных

Постоянно увеличивающиеся тактовые частоты процессоров ведут за собой все возрастающий поток обмена информации, как между компонентами компьютера, так и с периферийными устройствами. Это соответственно ведет к увеличению различных наводок и электромагнитных колебаний внутри компьютера. Использование же оптоволоконных каналов передачи данных (Data Links) между различными компонентами и периферийными устройствами полностью исключает электромагнитное возмущение.

Важно отметить, что появляются некоторые различия в требованиях к используемому оборудованию по сравнению с телекоммуникационными приложениями или компьютерными сетями. Так как протяженность канала намного меньше, чем в других случаях, то источник и детектор намного меньше по размеру, по мощности и соответственно по цене. В связи с этим возможно использование волокон с большим затуханием.

Но такие характеристики, как надежность, диапазон рабочих температур, в некоторых случаях должны быть выше, чем обычно. Как следствие этого, в каналах передачи данных больше распространены диодные источники, чем лазерные.

Различия также касаются способов кодирования и декодирования сигнала, так как в отличие от коммуникаций поток данных здесь асинхронный и происходит с непостоянной тактовой частотой.

В настоящее время быстрыми темпами развиваются системы дальней оп-

тической связи на расстояния в тысячи километров. Успешно эксплуатируются трансатлантические линии связи США — Европа TAT-8 и TAT-9, Тихоокеанская линия США — Гавайские острова — Япония TRC-3. Ведутся работы по завершению строительства глобального оптического кольца связи Япония — Сингапур — Индия — Саудовская Аравия — Египет — Италия.

В последние годы наряду с когерентными системами связи развивается альтернативное направление: солитоновые системы связи. Солитон — это световой импульс с необычными свойствами: он сохраняет свою форму и теоретически может распространяться по «идеальному» световоду бесконечно далеко. Солитоны являются идеальными световыми импульсами для связи. Длительность солитона составляет примерно 10 триллионных долей секунды (10 пс). Солитоновые системы, в которых отдельный бит информации кодируется наличием или отсутствием солитона, могут иметь пропускную способность не менее 5 Гбит/с на расстоянии 10 000 км.

Такую систему связи предполагается использовать на уже построенной трансатлантической линии TAT-8.

9.8. Фирмы-производители

9.8.1. Компания Alcatel

Компания Alcatel — мировой лидер в области интеллектуальных оптических сетевых технологий. Кроме того, Alcatel - единственная компания, предоставляющая услуги для прокладки и поддержки как наземных, так и подводных глобальных “бесшовных” оптических сетей.

Сейчас оптоволокно импортируется в Россию, а затем на местных заводах «упаковывается» в кабель. Alcatel решила организовать в России производственные мощности по выпуску оптоволокна, т.е. организовать наиболее высокотехнологичную составляющую всего процесса.

Потребление оптоволокна в России — это крохотная доля мирового потребления. Но телекоммуникационная инфраструктура — это наивысший приоритет для России.

9.8.2. Техасская компания Grande Communications

Техасская компания Grande Communications, которая занимается широкополосной связью, объявила о подписании трехлетнего соглашения с Alcatel. Grande Communications строит оптическую широкополосную сеть, которая предоставит жителям Центрального Техаса и города Хьюстон высокоскоростной доступ в Интернет, услуги местной междугородней и международной телефонной связи и услуги кабельного телевидения.

В течение трех лет Alcatel поставит 100 000 километров волоконно-оптических кабелей и сопутствующих соединительных устройств для сети Grande Communications, что позволит расширить полосу пропускания до 10 Мб/с и более на каждого пользователя.

С помощью технологии FTTC (Fiber To The Curb) сеть Grande Communications подходит еще ближе к дому и поддерживает полосу пропускания более 10 Мбит/с на пользователя, что превышает возможности любой другой сети. Оптический кабель Alcatel, который будет использовать сеть Grande Communications, изготовлен с использованием эксклюзивной технологии кабельной изоляции (ColorLock™).

9.8.3. Компания INFIGATE GmbH

Компания INFIGATE GmbH выбрала Alcatel в качестве поставщика самой современной волоконно-оптической сети для Центральной и Восточной Европы. Сеть должна быть развернута в течение трех лет. Общая протяженность оптического волокна должна составить более 1,6 миллиона километров.

По данному контракту Alcatel поставит гибридное оптическое кабельное решение с одномодовым оптоволокном (Single-mode Fiber) и волоконно-оптическим кабелем с ненулевой смещенной дисперсией TeraLight™ (Alcatel Non Zero Dispersion Shifted Fiber). Это самые современные и технически совершенные типы оптического волокна из имеющихся на рынке. Волоконно-оптическое решение Alcatel оптимизировано для передачи трафика на большие расстояния. Решение Alcatel усовершенствовано за счет собственной технологии изоляции волоконного кабеля (Alcatel Fiber Coating — AFC™) и технологии ColorLock™, которые значительно повышают качество и срок службы оптического волокна. Прокладка высококачественного кабеля с большим сроком службы поможет увеличить срок эксплуатации сети и снизить стоимость технической поддержки.

Разработанное в Alcatel новое оптическое волокно TeraLight™ позволяет преодолеть ограничения, свойственные оптическим волокнам с ненулевой смещенной дисперсией (Non-Zero-Dispersion Shifted Optical Fibers — NZDSF), которые используются для каналов большой емкости на больших расстояниях. Величина хроматической дисперсии волокна TeraLight позволяет резко уменьшить нелинейность. Кроме того, сокращение дисперсии позволяет увеличить число оптических каналов (рабочих частот) и открыть четвертое «оптическое окно» с длиной волны 1440 нм. Недавно компания Alcatel смогла расширить общую пропускную способность до 5120 Гбит/с (5,12 Тбит/с) за счет использования средств DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) для передачи по 128 каналам по 40 Гбит/с каждый, что эквивалентно одновременной поддержке 100 миллионов телефонных переговоров. Связь в этом режиме осуществлялась на расстоянии более 300 км. Teralight™ является торговым знаком

Alcatel.

9.8.4. Компания Lucent Technologies

Основное событие в сетевой индустрии конца 90-х годов — это невиданное увеличение потребности в полосе пропускания магистральных каналов. Существуют три способа, позволяющие удовлетворить эту потребность:

- прокладка дополнительного оптоволокна;
- построение еще одного кольца SDH (Synchronous Data Hierarchy);
- использование технологий спектрального мультиплексирования.

Прокладка дополнительных волоконно-оптических линий сталкивается с несколькими препятствиями. Во-первых, оптоволокно в последнее время стало в буквальном смысле дефицитным товаром, его производство явно не поспевает за растущим спросом. По этой причине оператор, избравший путь экстенсивного развития волоконно-оптической инфраструктуры, скорее всего, просто не сможет приобрести физический носитель в требуемых количествах. Во-вторых, прокладка дополнительных линий во многих случаях имеет чисто физические ограничения, поскольку сопряжена, например, с перекрытием транспортных магистралей. Таким образом, первый вариант никак не назовешь оптимальным решением.

Создав технологию SDH, компания думала, что она будет существовать вечно. Как показал дальнейший ход событий, эти ожидания не оправдались. А о технологии спектрального мультиплексирования с полной уверенностью можно сказать только то, что физические принципы, на которых она базируется, обеспечат ее доминирование на рынке в течение ближайших пяти лет. На более длительную перспективу загадывать трудно.

Проблемы, связанные со спектральным мультиплексированием:

- Дальность передачи.

В последнее время появляются системы, позволяющие транспортировать данные по волоконно-оптическим линиям на сверхдлинные дистанции (от 1 до 4000 км.) без применения регенераторов. Однако, как и при использовании других технологий, увеличение дальности здесь достигается ценой уменьшения пропускной способности. Если длина волоконно-оптического канала доведена до нескольких тысяч километров, то по каждому волокну уже не удастся передать 40 длин волн с пропускной способностью 40 Гбит/с. Сегодня подобная скорость передачи может поддерживаться без регенерации на расстояниях 600, от силы — 1000 км.

- Увеличение количества длин волн, присутствующих в одном волокне.

При сохранении существующей ширины рабочей части спектра такое увеличение сталкивается со множеством препятствий. Скажем, большинство современных оптических систем работают в С-полосе (1510—1570 нм), именно на нее настроены оптические усилители и другие компоненты. Чтобы «втис-

нута» в то же спектральное окно 80 или даже 160 различных длин волн вместо 40, потребуются лазеры с очень высокой точностью настройки. Организация их массового производства — задача не из легких, да и стоимость таких устройств окажется чрезвычайно высокой. Кроме того, при повышении «плотности» длин волн в волокне возрастают требования к техническим характеристикам последнего. В результате проектировщикам приходится принимать специальные меры для компенсации различных видов дисперсии. Вот почему индустрия избрала другой путь, связанный с расширением рабочей части спектра путем добавления к С-полосе расположенной правее от нее L-полосы. Такое решение позволяет повысить скорость передачи на одной длине волны с 10 до 40 Гбит/с. Устройства Lucent Technologies, работающие в полосе С, оптимизированы для скорости передачи 10 Гбит/с, а продукты, использующие полосу L, — для скорости 40 Гбит/с.

- Создание средств эффективного управления длинами волн.

С увеличением количества длин волн, «запускаемых» в одно волокно, потребность в таких средствах постоянно возрастает. Важно также гарантировать совместимость оборудования для таких сетей, выпускаемого разными компаниями (Lucent, Nortel, Alcatel и т.д.). Это очень серьезная проблема, к решению которой сетевая индустрия практически еще не подошла.

В июле 1999 года — впервые в индустрии — Lucent Technologies начала поставки оптических коммутаторов заказчикам. Соответствующий продукт называется LambdaRouter. Можно ожидать, что в ближайшее время аналогичные устройства анонсируют еще три или четыре компании. Основное достижение здесь заключается в том, что впервые удалось обойтись без преобразования оптического сигнала в электрическую форму при его приеме коммутатором, и, следовательно, без обратного преобразования перед отправкой в сеть.

Трудно не согласиться с тем, что для магистральных сетей технология WDM или DWDM сегодня является наилучшим решением. Однако год или два тому назад Lucent начала активно пропагандировать идею использования спектрального мультиплексирования в городских сетях и сетях доступа. Иногда даже встречаются утверждения о том, что WDM доберется до персональных компьютеров.

На выбор технологии для городских сетей влияют такие факторы, как:

- Во-первых, наличие готовой волоконно-оптической инфраструктуры в том районе, где оператор намеревается предоставлять сервис; сегодня она имеется в центральной части любого мегаполиса.
- Во-вторых, уровень развития сетей SDH. Когда дело касается городских сетей, у SDH обнаруживается множество привлекательных черт. Достаточно упомянуть высокую гибкость процедур добавления графика и вывода его из сети SDH, а также высокую надежность средств управления этими процессами. В настоящее время можно встретить сети на основе данной технологии с пропускной способностью 2,5 и даже 10 Гбит/с.

Но по мере разрастания волоконно-оптической инфраструктуры городских сетей в них все чаще начинает применяться спектральное мультиплексирование. Тому есть две причины.

Первая из них — экономическая. Подобно ситуации с магистральными каналами глобальных сетей, на определенной стадии развития городской сети затраты, связанные с повышением ее производительности в рамках технологии SDH, оказываются выше, чем при выборе в пользу DWDM. Этот момент определяется особенностями сетевой инфраструктуры и стоимостью ее модернизации либо расширения, объемом графика, циркулирующего в городской сети, динамикой его роста и другими факторами.

Вторая — желание каждого оператора выгодно отличаться от конкурентов.

Технология WDM способна сослужить здесь неплохую службу, ведь одним из видов сервиса, предлагаемого клиентам, может стать сдача в аренду определенной длины волны (взамен предоставления управляемых услуг по сети SDH с полосой пропускания на уровне 2,5 Гбит/с).

Возможность доведения оптических сетей до персональных компьютеров, установленных в частных домовладениях, следует обсуждать исключительно в экономических категориях, причем с учетом особенностей конкретной сетевой среды. Споры о технологии FTTH (Fiber To The Home) продолжаются в течение многих лет. Ее тестирование ведется в США, Японии, в академических учреждениях разных стран. Несмотря на всю эту активность, не следует забывать о проблеме «узкого места». Оно неизбежно возникает в магистральном канале, как только оптоволоконные линии в том или ином микрорайоне доводятся не до двух-трех квартир (или частных домовладений), а до десятков или сотен пользователей.

Вопросы для самоконтроля

Глава 1

1. Что является носителем сигнала в оптическом волокне?
 - А) Звук.
 - Б) Свет.
 - В) Изображение.
 - Г) Электричество.

2. Перечислите основные компоненты волоконно-оптической системы.
 - А) Волоконно-оптический кабель, источник, детектор, соединители.
 - Б) Источник, коаксиальный кабель, детектор, соединители.
 - В) Волоконно-оптический кабель, повторитель, соединители.
 - Г) Волоконно-оптический кабель, источник, соединители.

3. По мере увеличения частоты сигнала потери в медном / оптическом кабеле...
 - А) Уменьшаются / не изменяются.
 - Б) Уменьшаются / увеличиваются.
 - В) Увеличиваются / не изменяются.
 - Г) Без изменений / уменьшаются.

4. Что из ниже перечисленного является наиболее важным следствием широкой полосы пропускания оптического волокна?
 - А) Высокая скорость и информационная емкость линий.
 - Б) Меньшее число повторителей.
 - В) Невосприимчивость по отношению к электромагнитным полям.
 - Г) Все выше перечисленное.

5. Перечислите наиболее важные преимущества оптики как коммуникационной среды.
 - А) Широкая полоса пропускания, нечувствительность к электромагнитным помехам, низкие потери.

- Б) Малый вес, малый размер.
- В) Безопасность, секретность.
- Г) Все выше перечисленные.

6. По мере распространения сигнала в оптическом кабеле затухание...

- А) Не зависит от частоты и остается постоянным в определенном диапазоне частот.
- Б) Зависит от частоты и остается постоянным в определенном диапазоне частот.
- В) Не зависит от частоты и изменяется в диапазоне частот.
- Г) Зависит от частоты и изменяется в диапазоне частот.

Глава 2

1. В какой части волокна индекс преломления выше?

- А) В ядре.
- Б) В оптической оболочке.
- В) В защитной оболочке.
- Г) В воздушной оболочке.

2. На сколько процентов отличаются показатели преломления ядра и оптической оболочки?

- А) На 50 %.
- Б) На 25 %.
- В) На 10 %.
- Г) Менее чем на 1%.

3. Как называется волокно с переменным показателем преломления луча?

- А) Волокно со ступенчатым индексом.
- Б) Многомодовое волокно.
- В) Волокно со сглаженным индексом.
- Г) Волокно со смещенной дисперсией.

4. Модовая дисперсия может быть уменьшена с помощью...

- А) Использованием ядра с меньшим диаметром.
- Б) Использованием волокна со сглаженным индексом.
- В) Использованием одномодового волокна.
- Г) Всех упомянутых выше способов.

5. При уменьшении диаметра ядра в оптоволокне широта пропускания / потери...

- А) Уменьшаются / уменьшаются.
- Б) Увеличиваются / уменьшаются.
- В) Увеличиваются / увеличиваются.
- Г) Без изменений / увеличиваются.

6. Что определяет затухание в оптоволокне?

- А) Рассеяние.
- Б) Поглощение.
- В) Потери на стыках и изгибах.
- Г) Все выше перечисленные.

Глава 3

1. Какая из перечисленных оболочек эффективно защищает оптоволокно от механических воздействий и окружающей среды?

- А) Полимерная.
- Б) Углеродная.
- В) Кремниевая.
- Г) Пластмассовая.

2. В какой фазе кварцевое стекло становится намного чище?

- А) В твердой.
- Б) В жидкой.
- В) В газообразной.
- Г) В твердой и жидкой.

3. Для чего добавляются примеси (GeCl_4 , POCl_3) в чистую двуокись кремния?

- А) Чтобы изменить коэффициент теплового расширения.
- Б) Чтобы перевести его в жидкое состояние.
- В) Чтобы изменить индекс преломления до требуемого уровня.
- Г) Чтобы остекловывать.

4. В каком из методов можно получить наибольшие размеры заготовки (50–100 км)?

- А) MCVD.
- Б) PCVD.
- В) OVD.
- Г) VAD.

5. В каких методах контроль за поверхностью очень легко осуществим?

- А) MCVD.
- Б) PCVD.
- В) OVD.
- Г) VAD.

6. Какое главное требование при вытяжке оптоволокна?

- А) недопустимость образование микротрещин;
- Б) достаточная механическая прочность;
- В) однородность диаметра волокна;
- Г) все перечисленные.

Глава 4

1. В каких полупроводниковых соединениях вероятность излучательной рекомбинации больше?

- А) Непрямозонных
- Б) Прямозонных
- В) Широкозонных
- Г) Во всех выше перечисленных

2. Каким образом в полупроводниковом лазере формируется резонатор,

необходимый для усиления когерентного излучения?

- А) С помощью зеркала.
- Б) Путем шлифовки граней кристалла.
- В) Нанесением специального покрытия.
- Г) Все выше перечисленные.

3. Какая область является активной в полупроводниковом лазере?

- А) р н переход.
- Б) р типа.
- В) n типа.
- Г) Все выше перечисленные.

4. Какие преимущества дает реализация полупроводникового лазера на гетероструктурах?

- А) Уменьшение пороговой плотности тока.
- Б) Снижение входного сопротивления.
- В) Снижение входного тока.
- Г) Все выше перечисленные.

5. Какие группы светодиодов не используются в волоконной оптике?

- А) Красного цвета свечения.
- Б) Оранжевого и желтого цвета свечения.
- В) Зеленого цвета свечения.
- Г) Голубого и фиолетового цвета свечения.

6. На какой подложке формируются прямозонные светодиоды (красного излучения)?

- А) GaAs.
- Б) GaP.
- В) GaN.
- Г) ZnTe.

Глава 5

1. Удельная обнаружительная способность это...

- А) Величина, обратная пороговой чувствительности.
- Б) Минимальная энергия оптического излучения, которая вызывает на выходе фотоприемника сигналы, находящиеся в заданном отношении к шуму.
- В) Величина, обратная мощности оптического излучения, которая при полосе частот и единичной площади фотоприемника вызывает на выходе фотоприемника сигнал, равный шуму.
- Г) максимальная энергия оптического излучения, которая вызывает на выходе фотоприемника сигналы, находящиеся в заданном отношении к шуму.

2. Какие параметры не важны в выборе фотоприемника?

- А) Спектр пропускания.
- Б) Ширина запрещенной зоны.
- В) Концентрация основных носителей.
- Г) Все выше перечисленные.

3. Основные преимущества рpn-фотодиода...

- А) Простота в изготовлении.
- Б) Быстродействие.
- В) Широкая полоса пропускания.
- Г) Секретность.

4. Время отклика фотодиода определяется...

- А) Временем пролета носителей через обедненную область р n перехода.
- Б) Временем жизни неосновных носителей.
- В) Длиной волны падающего излучения.
- Г) Всеми выше перечисленными параметрами.

5. Для чего используют гетеропереход в рpn-фотодиодах?

- А) Для уменьшения квантовой эффективности.
- Б) Для увеличения скорости переключения.
- В) Чтобы избежать поглощения света в базе фотодиода.
- Г) Чтобы упростить конструкцию.

6. Для реализации лавинного умножения необходимо чтобы...

- А) Электрическое поле области пространственного заряда должно быть

достаточно большим / ширина области пространственного заряда должна быть существенно больше, чем длина свободного пробега.

Б) Электрическое поле области пространственного заряда должно быть достаточно мало / ширина области пространственного заряда должна быть существенно больше, чем длина свободного пробега.

В) Электрическое поле области пространственного заряда должно быть достаточно большим / ширина области пространственного заряда должна быть существенно меньше, чем длина свободного пробега.

Г) Электрическое поле области пространственного заряда должно быть достаточно мало / ширина области пространственного заряда должна быть существенно меньше, чем длина свободного пробега.

Глава 6

1. Укажите, какое из перечисленных определений относится к разъёмному соединителю:

А) Устройство, предназначенное для постоянного соединения одного волокна с другим;

Б) Устройство, служащее для подключения волокна к источнику, детектору или другому волокну;

В) Устройство, устанавливаемое на каждом узле, служащее для отвода части энергии от шины к приемопередатчику;

Г) Устройство, необходимое для переключения света между двумя или более волокнами;

2. Какого из перечисленных видов разветвителей не существует?

А) Т-разветвитель;

Б) Сварные разветвители;

В) Разветвитель типа «треугольник»;

Г) Разветвитель типа «звезда»;

3. Из перечисленных внутренних причин возникновения потерь в соединении, укажите максимально возможные:

А) Диаметр ядра передающего волокна меньше диаметра принимающего волокна.

Б) При перпендикулярном соединении двух ядер эллиптической формы.

В) При совпадении оси ядра и оптической оболочки.

Г) При полном совпадении двух ядер эллиптической формы.

4. Укажите фактор, который не влияет на эффективность работы центрально-симметричного разветвителя с отражением:

- А) Радиус зеркала.
- Б) Угол между волокном и осью зеркала.
- В) Длина волокна.
- Г) Диаметр ядра волокна и апертура.

5. Какой тип из перечисленных разветвителей служит для группировки отдельных длин волн в одном волокне:

- А) Мультиплексоры с разделением длины волн.
- Б) Сварные разветвители.
- В) Оптический коммутатор.
- Г) Центральное симметричное разветвление с отражением.

6. Что относится к внешним причинам возникновения потерь в волоконно-оптическом соединении?

- А) Боковое смещение, зазор между сколами.
- Б) Угловое рассогласование ориентации осей, гладкость поверхности скола.
- В) Боковое смещение, гладкость поверхности скола.
- Г) Боковое смещение, зазор между сколами, угловое рассогласование ориентации осей, гладкость поверхности скола.

Глава 7

1. Какой вид волокна используют для передачи телевизионного сигнала, в локальных сетях, компьютерах?

- А) Волокно со сглаженным индексом.
- Б) Волокно со ступенчатым индексом.
- В) Одномодовое волокно.
- Г) Все из перечисленных.

2. В какой из перечисленных ниже отраслей впервые внедрили волоконно-

оптическую линию?

- А) Медицина.
- Б) Телекоммуникации.
- В) Военная отрасль.
- Г) Компьютерная индустрия.

3. Какое из преимуществ оптоволокна делает его наиболее подходящей передающей средой в области телекоммуникации?

- А) Высокая скорость передачи информации.
- Б) Нечувствительность к электромагнитным помехам.
- В) Малый вес и малый размер.
- Г) Безопасность и секретность.

4. Какая топология используется в сети стандарта FDDI?

- А) шина.
- Б) «звезда».
- В) «кольцо».
- Г) Все выше перечисленные.

5. Максимальная скорость передачи данных в сети SONET...

- А) 100 Мб/сек.
- Б) 10 Гб/сек.
- В) 10 Мб/сек.
- Г) Нет предела.

6. Какие из стандартов локальных компьютерных сетей являются несовместимыми между собой?

- А) 10 Base-F и 10 Base-T.
- Б) 10 Base-F и 10 Base-FB.
- В) 10 Base-FL и 10 Base-FB.
- Г) 10 Base-T и 10 Base-FL.

Ответы

Глава 1: 1А; 2А; 3В; 4А; 5Г; 6А.
Глава 2: 1А; 2Г; 3В; 4Г; 5Б; 6Г.
Глава 3: 1Б; 2В; 3В; 4Г; 5А, Б; 6Г.
Глава 4: 1В; 2В; 3Б; 4Б; 5В; 6А.
Глава 5: 1В; 2В; 3Б; 4Б; 5В; 6А.
Глава 6: 1Б; 2В; 3Б; 4В; 5А; 6Г.
Глава 7: 1А; 2Б; 3А; 4В; 5А; 6В.

Список рекомендованной литературы

1. Senior, John M. Optical Fiber Communications: Principles and Practice (Second Edition) Prentice Hall International: Series in Optoelectronics 1992
2. Wilson, J. and Hankes, J.F.B. Lasers: Principles and Application Prentice Hall International: Series in Optoelectronics 1992
3. Wilson, J. and Hankes, J.F.B. Optoelectronics: An Introduction (Second Edition) Prentice Hall International: Series in Optoelectronics 1992
4. Стерлинг, Д. Дж. Техническое руководство по волоконной оптике.: Лори, 1998
5. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. В 2 кн. /С. Зи М.: Мир, 1984.
6. Murata, Hiroshi Handbook of Optical Fibres and Cables. Marcel Dekker Inc. 1996
7. Bjarkler, Anders Optical Fiber Amplifiers: Design and System Applications. Artech House Inc, USA. 1993
8. Optical Communications. Siemens, Germany. 1983
9. Personick, D. Fiber Optics: Technology and Applications. Plenum Press. NY, USA. 1985
10. W. van Effer and J. van der Plaars Fundamentals of Optical Fiber Communication
11. Gillessen, K. and Shairen, W. Light Emission Diodes
12. Gowar, J. Optical Communication Systems
13. Jenkins, J. E. Optical Sensing Techniques and Signal Processing
14. Пихтин А. Н. Оптическая и квантовая электроника. /А.Н. Пихтин. М.: Высшая школа, 2001. 573 с.
15. Розеншер Э. Оптоэлектроника (пер. с франц.) /Э. Розеншер, Б. Винтер. Техносфера, 2004. 592 с.
16. Фриман Р., Волоконно оптические системы связи /Р. Фриман. Техносфера, 2003. 440 с.
17. Гончаренко А. М., Карпенко В. А. Основы теории оптических волноводов, Изд. 2-е, испр. /А.М. Гончаренко, В.А. Карпенко. М.: Едиториал УРСС, 2004. 240 с.
18. Шишкин Г. Г. Приборы квантовой электроники. Уч.пособие для вузов /Г. Г. Шишкин, Сайнс-Пресс, 2004, 80 с.
19. Ермаков О. Н. Прикладная оптоэлектроника /О.Н. Ермаков, Техносфера, 2004, 416 с.
20. Виноградов В. В., Котов В. К., Нуприк В. Н. Волоконно-оптические линии связи: Учебное пособие для техникумов и колледжей ж.-д. трансп. /В. В. Виноградов, В. К. Котов, В. Н. Нуприк, М.: ИПК «Желдориздат», 2002, 278 с.
21. Листвин А. В., Листвин В. Н., Швырков Д. В. Оптические волокна для

линий связи. /А. В. Листвин, В. Н. Листвин, Д. В. Швырков. М.: ЛЕСАРарт, 2003, 288 с.

22. Фриман Р. Волоконно-оптические системы связи, Изд. 2-е, дополненное. /Р. Фриман. М.: Техносфера, 2004, 496 с.

23. Розеншер Э., Винтер Б. Оптоэлектроника. /Э. Розеншер, Б. Винтер. М.: Техносфера, 2004, 592 с.

24. Ермаков О. Н. Прикладная оптоэлектроника /О. Н. Ермаков, М.: Техносфера, 2004, 416 с.

25. Шишкин Г. Г. Приборы квантовой электроники: Учеб. пособие для вузов. /Г. Г. Шишкин, М.: САЙНС-ПРЕСС, 2004, 80 с.

26. Пихтин А. Н. Оптическая и квантовая электроника: Учеб. для вузов /А. Н. Пихтин. М.: Высш. шк., 2001, 573 с.

27. Волоконно-оптические локальные вычислительные сети /Под ред. Щокина А. А. М., 1994, 90 с.

28. Волоконная оптика. Труды института общей физики РАН. Т. 39: /Гл. ред. А. М. Прохоров; Отв. ред. тома Е. М. Дианов, М.: Наука, 1993, 215 с.

29. Волоконная оптика. Труды института общей физики РАН. Т. 5. М.: Наука, 1992, 160 с.

30. Волноводная оптоэлектроника /Под ред. Т. Тамира; Пер. с англ. Горобца А. П., Корнюшенко Г. В., Чехловой Т. К. Под ред. Аникина В. И., М.: Мир, 1991, 574 с.

31. Капани Н. Волоконная оптика. Принципы и применения. /Пер с англ. Под ред. д-ра техн. наук В. Б. Вейнберга и канд. техн. наук Д. К. Сатгарова. М.: Мир, 1969, 464 с.

32. Лисица М. Волоконная оптика /М. Лисица. Киев: Техніка, 1968, 280 с.

33. Носов Ю. Р. Дебют оптоэлектроники. /Ю. Р. Носов. М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1992, 238 с.

34. Погребысская Е. И. Дисперсия света. /Е. И. Погребысская. М.: Наука, 1980, 166 с.

Ссылки на ресурсы сети Интернет

Глава 1. Волоконная оптика

1. Encyclopedia of Fibre Optics
http://www.its.bldrdoc.gov/fs-1037/dir-025/_3720.htm
2. Введение в технику волоконно-оптических сетей
<http://www.citforum.ru/nets/optic/optic1.shtml>
3. Оптоволоконная технология
<http://astu.secna.ru/russian/students/personal/41nav/page1.html>
4. История оптоволоконна
<http://www.tau.ac.il/~lab3/OPTICFIBERS/opticfibers.html>
5. Оптическая линия связи
<http://www.jinr.ru/~jinrmag/win/2000/5/optic5.htm>

Глава 2. Оптическое волокно

6. Волоконно-оптический кабель
<http://www.citforum.ru/nets/optic/optic2.shtml>
7. Оптоволоконная технология
<http://astu.secna.ru/russian/students/personal/41nav/index.html>
8. Оптоволоконно: теория и практика
<http://polynom.rzn.ru/gazeta/54/fibre.htm>
9. Световоды
<http://www.computerra.ru/offline/1998/232/1051/>
10. Electronic journal: Optical Fibre Technology
<http://www.idealibrary.com/cgi-bin/links/toc/of>

Глава 3. Технология изготовления волоконных световодов

11. Производство оптоволокна
<http://astu.secna.ru/russian/students/personal/41nav/page5.html>

12. «Тянем, потянем...», (эволюция установок для производства заготовок)
<http://www.computerra.ru/offline/1998/232/1053/>

13. Кварцевые методы изготовления световодов
http://www.mnts.msk.su/ecolink/i20/E20_22.htm

14. Исследование оптоволокон, полученных MCVD методом
<http://jre.cplire.ru/jre/feb00/1/text.html>

15. Manufacturer in fiber optic connectivity products
<http://www.fiberlan.com>

16. Технология строительства волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) с прокладкой кабелей в пластмассовых трубопроводах
<http://www.plastcom.spb.ru/doc/dop2.html>

Глава 4. Источники

17. Оптоволоконная технология
<http://astu.secna.ru/russian/students/personal/41nav/page4.html>

18. Фотодиоды
<http://st.karelia.ru/Edu/Diod/first.htm>

19. Semiconductor Laser International Corporation
<http://www.slicorp.com/main/products.html>

20. Semiconductor Lasers
<http://vcs.abdn.ac.uk/ENGINEERING/lasers/semi.html>

Глава 5. Фотодетекторы

21. Оптоволоконная технология
<http://astu.secna.ru/russian/students/personal/41nav/page4.html>

Глава 6. Соединители и разветвители

22. Оптоволоконная технология
<http://astu.secna.ru/russian/students/personal/41nav/page4.html>

Глава 7. Применение оптоволокна

Обучающие:

23. FDDI
<http://www.citforum.ru/nets/ito/7.shtml>

24. SMDS
<http://www.citforum.ru/nets/ito/15.shtml>

25. HSSI
<http://www.citforum.ru/nets/ito/9.shtml>

26. Gigabit Ethernet
http://www.citforum.ru/nets/protocols2/2_07_00.shtml

27. Введение в технику волоконно-оптических сетей
<http://www.citforum.ru/nets/optic/optic1.shtml>

28. Основы технологии FDDI
http://www.citforum.ru/nets/protocols2/2_08_02.shtml

29. Применение ВОЛС в вычислительных сетях
<http://www.citforum.ru/nets/optic/optic3.shtml>

30. Учебно-методическое пособие по оптоволокну
<http://www.radio.tsl.ru/files/optvol1.html>

31. <http://www.it-scs.ru/>
32. Оптоволоконные кабели
<http://www.ksaa.edu.ru:8100/book/hard/cable/fiber.htm>
33. Волоконная оптика: конструктор света
<http://www.gls.ru/About/article.asp?articleid=124>

Научные:

34. Application of Fibre Optics
<http://www.spie.org/web/meetings/calls/pe99/confs/VV08.html>
35. Application of Fibre Optics
<http://www.spie.org/web/meetings/calls/pe99/confs/VV09.html>
36. Application of Fibre Optics
<http://www.spie.org/web/meetings/calls/pe99/confs/VV12.html>
37. Практическое руководство
<http://www.sonet.ru/support/netlib/articles/20011113/index.html>
38. Телекоммуникации — наивысший приоритет для России
http://www.alcatel.ru/events/vedomosti_030402.html
39. Optical Ethernet в сети большого города
<http://www.osp.ru/lan/2003/02/062.htm>
40. Архив номеров журнала LAN
<http://www.osp.ru/lan/numbers.htm>
41. Архив номеров журнала «Сети»
<http://www.osp.ru/nets/numbers.htm>
42. Архив номеров журнала «Открытые Системы»
<http://www.osp.ru/ap/numbers.htm>
43. Работа с волоконной оптикой
<http://www.osp.ru/lan/2002/01/028.htm>

<http://www.osp.ru/lan/2002/02/>
<http://www.osp.ru/lan/2002/03/>
<http://www.osp.ru/lan/2002/04/>
<http://www.osp.ru/lan/2002/05/>
<http://www.osp.ru/lan/2002/06/>

44. В России открывается первый завод по производству оптоволокна
<http://www.hitechno.ru/news123.htm>

45. Телекоммуникации (информационно аналитический сайт)
<http://www.anitel.ru/obz2.htm>

Производители:

46. The Fiber Optic test equipment company and training
<http://www.fotec.com>

47. Волоконно-оптические системы, компания Speckless
<http://www.fiber.ru>

48.
<http://www.sonet.ru>

49. Оптоволоконные решения
http://www.sonet.ru/faq.html?faq_tree_CurrentElement=5

50. Оборудование для оптоволоконных ЛВС
<http://www.sonet.ru/support/netlib/articles/20020611/index.html>

51. Оптоволоконные разъемы
<http://www.sonet.ru/support/netlib/articles/20020627/index.html>

52. Оптические соединители
<http://www.sonet.ru/support/netlib/articles/20021220/index.html>

53. Optical Fiber Technology
<http://www.idealibrary.com/cgi-bin/links/toc/ofte>

54. Компания Infigate подписывает с Alcatel контракт

<http://www.alcatel.ru/news/pr/2000/11/30/268.html>

55. Grande Communications подписывает с Alcatel контракт
<http://www.alcatel.ru/news/pr/2001/2/22/1042.html>

56. Организация магистральных трактов
http://www.lucent.ru/products/library/tech_materials/tract.html

57. Оптика
<http://www.molexpn.ru/solution/mod.html>

Литература по волоконно-оптическим усилителям

1. http://www.energy-telecom.ru/main/catalog/metric/novel-il/optic_transpond
- 2.) <http://www.lightwave-russia.com/magazines/01/02-edfa.pdf>
3. <http://ffke.fizteh.ru/reviews/VoloknoLaser.rar>
4. <http://kunegin.narod.ru/ref/lec/637.htm>
5. http://www.hostlink.ru/files/ikusi_fibre%20optic v5.pdf
6. <http://www.promsytex.ru/prod/desc15.shtml>
7. <http://www.globaloptical.ru/27.html>
8. <http://www.quantum-electron.ru/pdfrus/fullt/1996/2/601.pdf>
9. <http://www.promsytex.ru/prod/desc15.shtml>
10. <http://www.optictelecom.ru/000000/0406060000b.htm>

Научное издание

Гуртов Валерий Алексеевич

Оптоэлектроника и волоконная оптика

Редактор И. И. Куроптева

Компьютерная верстка — О. Н. Артамонов

Оптоэлектроника и волоконная оптика: Науч. издание / В. А. Гуртов;
ПетрГУ. – Петрозаводск.

В формате 70x100 , в книге ___ стр.(___ уч.-изд. л.), книга содержит
богатый иллюстративный и справочный материал, библиография – ___
изданий.

Подписано в печать __.__.05. Формат 70x100 .

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Уч.-изд. л. __. Усл. кр.-отг. ____. Тираж ___ экз. Изд. № 178.

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Петрозаводский государственный университет»
Отпечатано в типографии Издательства ПетрГУ
185910, Петрозаводск, пр. Ленина, 33