

АО «ЎЗБЕКИСТОН ТЕМИР ЙЎЛЛАРИ»

Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта

Кафедра «Электрический связь и радио»

**КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ
по дисциплине:
Волоконно-оптические сети и системы связи**

**для магистров по специальности 5А522210- “Обслуживание и
техническая эксплуатация систем и сетей связи на железнодорожном
транспорте”**

Составитель: Каримов Р. К.

Тошкент 2016

ВВЕДЕНИЕ

За последние годы достигнут значительный прогресс в создании новых перспективных средств связи, повышающих качество и эффективность передачи информации различного вида, расширяющих услуги связи, снижающих трудо- и материалоемкость в отрасли. В числе таких средств — волоконно-оптические системы передачи (ВОСП). Внедрение таких систем предопределяет развитие не только отрасли «Связь», но и радиоэлектроники, атомной энергетики, освоения космоса, машиностроения, судостроения и т. д. Работы по созданию и использованию ВОСП ведутся во всех экономически развитых странах. На сегодняшний день уже пройдены стадии испытаний и опытной эксплуатации.

Такое внимание к ВОСП вызвано следующими их основными качествами: широкополосностью и высокой пропускной способностью; малым затуханием в широком диапазоне частот; высокой защищенностью от внешних электромагнитных помех; малогабаритностью и легкостью (масса оптических кабелей в 10...12 раз меньше, чем электрических); пригодностью прокладки по реальным трассам.

Обратим внимание на то, что световые сигналы издавна использовались для передачи информации. Для увеличения дальности применялись цепочки переприемных сигнальных постов. Так, в начале XIX века действовала семафорная линия связи Петербург — Варшава протяженностью 1200 км. В 1882 г. американским ученым А. Бэллом был разработан оптический телефон, позволявший передавать речевую информацию на расстояние распространения светового луча. Однако с появлением радиосвязи, изобретенной А. С. Поповым, и успешным развитием проводной и кабельной связи оптические линии были забыты. Сегодня мы являемся свидетелями возврата к использованию света для передачи информации, но на современной основе — с применением достижений современной науки и техники, квантовой физики, оптоэлектроники. Толчком к этому явилось создание оптических квантовых генераторов (лазеров), обладающих когерентным излучением.

Как правило, эти ВОСП представляют собой цифровые системы передачи с их известными преимуществами. Такие ВОСП действуют в составе телефонных сетей ряда городов страны и сельской местности.

Лекция 1. ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ И ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЛС

В настоящее время волоконная оптика широко применяется не только для организации телефонной связи, но и для кабельного телевидения, видеотелефонизирования, радиовещания, вычислительной техники, технологической связи и т. д. Уникальные свойства ВОЛС — широкополосность и весьма малые затухания в кабелях — дают им особые перспективы при построении линий дальней связи.

Для многих применений ВОЛС важнейшим качеством является их невосприимчивость к внешним электромагнитным полям. Это качество трудно переоценить. Проблема борьбы с электромагнитными помехами самой различной природы, включая взаимные помехи многочисленных средств связи, является в современных условиях едва ли не самой острой. Обычные системы связи предусматривают весьма сложные и дорогие средства защиты от помех, создаваемых транспортом с электрической тягой, разнообразнейшими энергетическими, технологическими и другими электроустановками. Особенно тяжелой становится проблема, названная электромагнитной совместимостью, в ситуации, когда в относительно небольшом пространстве приходится размещать и энергетические установки, и системы автоматики и телеуправления, и разветвленную сеть связи с многочисленными абонентскими устройствами. Такая ситуация возникает на многих промышленных предприятиях, в различных центрах управления, на транспортных средствах — кораблях, самолетах и др.

Использование ВОЛС радикально решает проблему электромагнитной совместимости. Заметим, что здесь вовсе не обязательно речь идет о больших скоростях передачи и, тем более, о больших дальностях связи. Таким образом, волоконно-оптическая связь становится буквально незаменимой и вследствие того, что она свободна от внешних помех, в том числе и от помех со стороны соседних ВОЛС.

Немаловажное значение имеет и достигаемая скрытность связи.

Передачу сигналов по оптическому кабелю практически невозможно обнаружить и трудно «подслушать».

В качестве следующего достоинства укажем на малые габаритные размеры и массу оптических кабелей. Неизмеримо упрощается прокладка магистральных и зоновых линий связи. Отпадает необходимость использования тяжелой машинной техники, необходимой для земляных и строительных работ при подготовке трасс, для транспортировки и укладки тяжелых кабелей. Появляется новое качество — возможность оперативного развертывания кабельных линий с большой пропускной способностью, в том числе в труднодоступной местности, с преодолением водных и иных преград. Очень важен выигрыш в массогабаритных показателях на транспортных средствах, особенно на

летательных аппаратах — самолетах, вертолетах и др. Выигрыш от применения волоконно-оптических кабелей здесь может быть весьма ощутимым. Достаточно упомянуть, что на самолетах, специально оборудованных для выполнения задач сбора информации и управления, удается уменьшить массу соединительных кабелей более чем на 1 т. На судах, где благодаря более длинным трассам прокладки экономия массы еще более значительна, она может быть использована для многократного дублирования, например путем прокладки резервных линий связи по разным бортам.

Отметим еще, что отсутствие явлений искрения при обрывах, коротких замыканиях, ненадежных контактах позволяет обеспечить полную безопасность использования ВОЛС во взрывоопасных и пожароопасных помещениях. Кроме того, при работе персонала с действующим кабелем не возникает опасностей поражения электрическими разрядами. Можно добавить, что и для оконечной аппаратуры не возникает аварийных режимов, которые нередко наблюдаются при коротких замыканиях и обрывах в обычной аппаратуре

^xэлектросвязи.

В заключение перечня положительных качеств ВОЛС необходимо подчеркнуть, что волоконные световоды изготавливаются из диэлектрических материалов — кварца, многокомпонентных стекол, полимеров. На их изготовление не расходуются дефицитные цветные металлы. В современных условиях, когда уже сказывается ограниченность мировых запасов меди и свинца, переход на недефицитное сырье становится важнейшим фактором для будущего развития техники кабельной связи.

В настоящее время разработана и продолжает разрабатываться широкая номенклатура волоконных световодов и оптических кабелей для ВОСП различных назначений и структур. Для широкополосных систем дальней связи, в частности магистральных, изготавливаются кабели с одномодовыми волокнами, т. е. волокнами, в которых распространяется лишь основной тип колебаний. Здесь одновременно предъявляются и наиболее высокие требования по снижению затуханий и дисперсионных искажений. Изготавливаются волокна

обеспечивающие сохранение поляризации в распространяющемся оптическом излучении. Эта проблема подробно рассматривается в гл. 4.

Такие кабели, предназначенные для магистральной связи, весьма сложны в изготовлении и дороги. Кроме того, их использование предусматривает работу с лазерными передатчиками, к которым также предъявляются повышенные требования в отношении спектральной чистоты излучения, высокой стабильности всех характеристик излучения и т. д.

Для систем со скоростями до 100 Мбит/с и ограниченными дальностями (порядка до 10 км) часто оказывается предпочтительным

использование кабелей с относительно дешевыми и легко сопрягаемыми с оконечными устройствами многомодовыми волокнами. Здесь возможно применение в качестве источников несущих колебаний лазерных полупроводниковых диодов наиболее простого типа с многомодовым излучением и без специальных сложных систем стабилизации. Более того, во многих случаях становится оправданным использование таких источников некогерентного излучения, как светодиоды.

Наконец, для коротких связей, с дальностью приблизительно до 1 км, применяют и кабельные линии с полимерными волокнами относительно большого диаметра (диаметр сердцевины световода 200 мкм и более). На первое место здесь выходят высокие технологичность и конструктивность, прочность и надежность, простотастыковки, ремонтоспособность с одновременными жертвами по показателям, обеспечивающим высокие скорости и дальность передачи. В таких кабелях относительно велики потери (20 дБ/км и более) и дисперсионные искажения, влияние которых обсуждается ниже.

При всех достоинствах оптического диапазона нельзя не учитывать и те большие трудности, которые стоят на пути его освоения. Многие элементы и узлы здесь изготавливаются с очень сложной технологией и почти на пределе технических возможностей. Достаточно принять во внимание, что допуски на геометрические размеры составляют долю длины волны, т. е. долю микрометра. В полной мере элементный базис оптического диапазона еще далеко не разработан и тем более не освоен промышленностью. Наконец, в этом диапазоне есть и некоторые 'принципиальные, диалектически неизбежные недостатки. Отметим наиболее существенные из них.

В заключение укажем и на относительную дороговизну ВОЛС. Так, высококачественные оптические кабели с кварцевыми волоконными световодами в несколько раз дороже коаксиальных кабелей с медными жилами. Кроме того, большие трудности возникают при их использовании из-за опасности возникновения микроизгибов, микротрещин. Существуют свои проблемы осуществления надежных соединений между отрезками (строительными длинами) кабельных магистралей.

§ 1.2. ПРИНЦИПЫ И ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ВОСП

На рис. 1.1 приведена в обобщенном виде структурная схема простейшей ВОСП.. Здесь, как и в любой системе связи с несущими колебаниями, предусматриваются следующие основные преобразования сигнала. Сообщение в аналоговой или цифровой форме поступает от источника сообщений на преобразователь, где формируется первичный электрический сигнал.

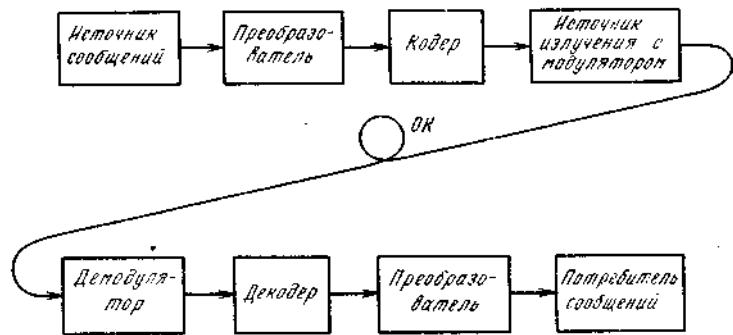


Рис. 1.1. Обобщенная структурная схема ВОСП

Если передача оптических сигналов реализуется в цифровой форме, используется кодер, в котором осуществляется избыточное кодирование, необходимое для обеспечения требуемой помехоустойчивости, удобства синхронизации приемных устройств, контроля исправности промежуточных функциональных устройств (регенераторов) и др. Далее электрическим сигналом осуществляется модуляция оптического излучения, генерируемого источником (лазером или светоизлучающим диодом).

Модулированное оптическое излучение с помощью согласующих устройств вводится в волоконный световод оптического кабеля (ОК). Оптическое волокно — диэлектрический волновод оптического диапазона с достаточно малым затуханием — служит для передачи оптических сигналов от передатчика к удаленному приемнику. В оптическом приемнике выполняются «обратные» преобразования. С помощью демодулятора, использующего фотодетектор того или иного вида, оптический[^] сигнал преобразуется в электрический. В декодере осуществляется восстановление первичного (модулирующего) сигнала, который с помощью преобразователя приобретает необходимую для потребителя информации форму (печатный текст, звук, изображение и т. п.).

По существу, ВОСП содержат функциональные узлы, присущие любым радиотехническим системам связи. Более того, при формировании сигналов в принципе возможно использование тех же разнообразных способов кодирования и видов модуляции, которые известны в радиотехническом диапазоне. Однако ряд особенностей оптического диапазона и используемого в нем элементного базиса накладывают свои ограничения на реализационные возможности ВОСП или приводят к техническим решениям, отличным от традиционных в технике связи.

Контрольные вопросы

1. Какие свойства оптического сигнала знаете?

2. Объясните области применения оптической связи.
3. По каким свойствам отличаются системы ОС от электрических систем?
4. Объясните принцип построения систем ОС.
Как построены системы ВОС?

Лекция 2 ОПТИЧЕСКИЙ СИГНАЛ И ЕГО ОБРАБОТКА

Обычная (классическая) теория связи строится на представлениях о непрерывных электромагнитных полях, распространяющихся от передатчика к приемнику сигналов. Непрерывной считается и энергия, поглощаемая приемником из поступающего на его вход электромагнитного поля. Такое представление естественно и оправданно в радиодиапазоне, где энергия элементарного сигнала всегда на много порядков больше энергии кванта электромагнитного поля $h\nu$. При переходе в оптический диапазон с увеличением частоты ν энергия кванта (фотона) становится сравнимой с энергиями принимаемых сигналов.

В процессе взаимодействия оптического сигнала с фотодетектором выявляются его дискретные свойства. Результатом детектирования является поток элементарных событий, заключающихся в преобразовании фотонов в одноэлектронные импульсы фототока. В соответствии с принципами квантовой механики этот процесс оказывается случайным, содержащим «квантовый шум».

Строгий подход к описанию указанных явлений требует, вообще говоря, привлечения квантовой теории электромагнитного поля, органически учитывающей его двойственную природу, волновую (непрерывную) и квантовую (дискретную). В то же время для наших целей описания и анализа каналов связи вполне адекватным является полуклассический подход. Он состоит в том, что при распространении оптических сигналов, их линейных преобразованиях типа суммирования, фильтрации и т. п. поле оптического сигнала описывается в терминах классической теории и принимается непрерывным. Дискретность же учитывается на стадии описания взаимодействия поля с детектором.

Поясним такой подход на примере. Пусть на вход приемника поступает непрерывное излучение с полностью известными и постоянными параметрами поля — детерминированный до классическим представлениям сигнал. Согласно квантовой теории энергия этого сигнала будет поглощаться приемником квантами с величиной $h\nu$. Таким образом, переходят к представлению сигнала потоком фотонов с постоянной интенсивностью, 1/с:

$$J = P/h\nu, \quad (1.10)$$

где P — мощность падающего излучения. Она, естественно, пропорциональна интенсивности поля, определяемой квадратом модуля комплексной амплитуды напряженности.

Интенсивность потока в данном примере — детерминированная и постоянная величина, однако сам поток — случайный. На некотором ограниченном интервале времени длительностью Γ отдельный фотон вследствие временной однородности процесса может появиться в любой точке этого интервала с равной плотностью вероятности.

Неопределенность моментов времени, в которые приходят фотоны на приемник, приводит и к неопределенности их чисел на ограниченных интервалах времени.

Опуская промежуточные формулировки и обычные для таких потоков доказательства, приведем лишь итоговые соотношения.

В сигнале с постоянной мощностью P интенсивность потока (1.10) определяет лишь среднее значение (математическое ожидание) числа фотонов на некотором интервале длительностью T :

$$\bar{n} = PT. \quad (1.11)$$

Заметим, что \bar{n} , как среднее, может быть любым и не целым числом. Реализуемое число фотонов $n = 0, 1, 2, \dots$ при заданном среднем случайно и распределено по закону Пуассона

$$p(n) = \frac{\bar{n}^n}{n!} e^{-\bar{n}}. \quad (1.12)$$

параметр которого \bar{n} равен математическому ожиданию n по (1.11). Важно отметить, что среднеквадратическое отклонение σ_n , в этом однопараметрическом распределении связано с математическим ожиданием соотношением

$$\sigma_n = \sqrt{\bar{n}}. \quad (1.13)$$

Таким образом, квантовый шум, количественно оцениваемый σ_n , оказывается зависимым от величины сигнала \bar{n} . С увеличением мощности сигнала либо уменьшением его частоты σ_n растет, но медленнее, чем \bar{n} . Это иллюстрируется графиками распределений на рис. 1.5.

Понятно, что в радиотехническом диапазоне при чрезвычайно больших числах фотонов в элементарных сигналах отношение

$$\bar{n}/\sigma_n = \sqrt{\bar{n}} \quad (1.14)$$

становится столь большим, что квантовым шумом пренебрегают.

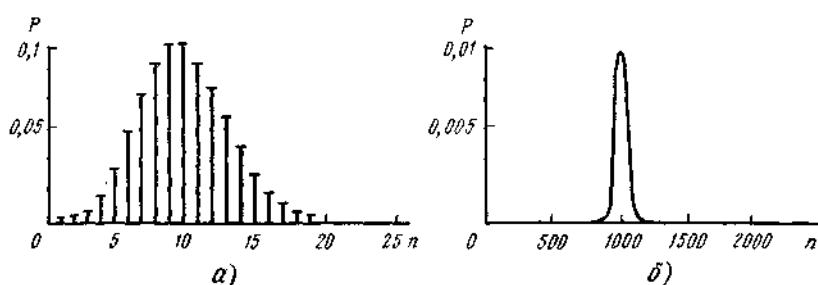


Рис. 1.5. Распределения вероятностей n по закону Пуассона:
а--при $\bar{n} = 10$; б--при $\bar{n} = 1000$

В оптическом диапазоне этот шум следует учитывать, принимая во внимание и его зависимость от уровня сигнала, так как во многих случаях она влияет на выбор структур, способов кодирования и модуляции, алгоритмов обработки сигналов при проектировании систем оптической связи.

Контрольные вопросы

1. Как классифицируются системы ВОС?
2. Какие знаете методы построения двухсторонних систем ВОС?
3. Объясните структурную схему двухволоконной однополосной однокабельной системы ВОС.
4. Как построена одноволоконная однополосная однокабельная система ВОС?
5. Как построена структурная схема систем ВОС со спектральным разделением?
6. Какие основные методы уплотнения линий ВОС знаете?
7. Объясните метод временного уплотнения линий ВОС.
8. Объясните метод частотного уплотнения линий ВОС.
9. Объясните метод спектрального уплотнения.

Лекция 3. ЦИФРОВЫЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ

Основным методом преобразования аналогового сигнала электросвязи в цифровой сигнал является, как известно, импульсно-кодо-вая модуляция (ИКМ). Оптическая система с ИКМ отличается от соответствующей кабельной системы главным образом линейным оборудованием и средой передачи сигналов. Поэтому, рассматривая работу цифровой ВОСП, необходимо выделить прежде всего код в линии передачи сигнала, оптические приемник и передатчик, построение линейного тракта.

Выбор элементной базы при реализации ВОСП и параметры ее линейного тракта зависят от скорости передачи символов цифрового сигнала. МККТТ установлены правила объединения цифровых сигналов и определена иерархия аппаратуры временного объединения цифровых сигналов электросвязи. Сущность иерархии состоит в ступенчатом расположении указанной аппаратуры, при котором на каждой ступени объединяется определенное число цифровых сигналов, имеющих одинаковую скорость передачи символов, соответствующую предыдущей

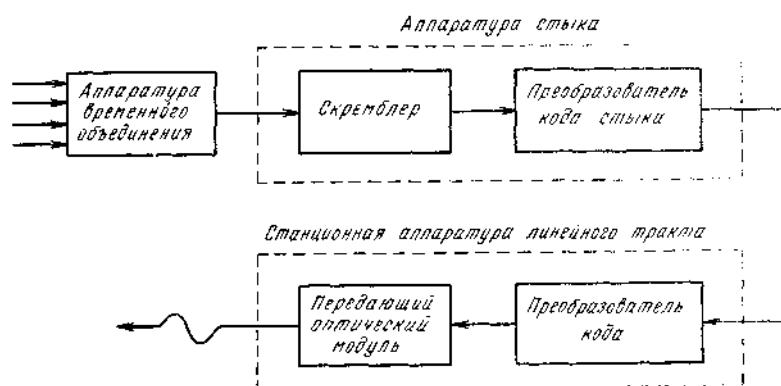


Рис. 1.9 Оконечная аппаратура цифровой ВОСП

ступени. Цифровые сигналы во вторичной, третичной и т. д. системах получаются объединением сигналов предыдущих иерархических систем. Аппаратура, в которой выполняется объединение этих сигналов, называется аппаратурой временного объединения цифровых сигналов (рис. 1.9). На выходе этой аппаратуры цифровой сигнал в устройстве, называемом скремблером, преобразуется по структуре без изменения скорости передачи символов, т. е. его свойства приближены к свойствам случайного сигнала.

Это позволяет достигнуть устойчивой работы линии связи вне зависимости от статистических свойств источника информации. С помощью аппаратуры стыка скремблированный цифровой сигнал может подаваться на вход любой цифровой системы связи. Для каждой иерархической скорости МККТТ рекомендует свои коды стыка, например

для вторичной — код HDB-3, для четверичной — код СМІ и т. д. Операцию преобразования бинарного сигнала, поступающего от аппаратуры временного объединения в код стыка, выполняет преобразователь кода стыка. Код стыка может отличаться от кода, принятого в оптическом линейном тракте. Операцию преобразования кода стыка в код цифровой ВОСП выполняет преобразователь кода линейного тракта, на выходе которого получается цифровой электрический сигнал, модулирующий ток излучателя передающего оптического модуля. Модулированное оптическое излучение с помощью оптического соединителя вводится в волокно оптического кабеля. Затухание световода приводит к уменьшению интенсивности распространяющихся по нему оптических импульсов, а конечные значения ширины полосы пропускания — к уширению этих импульсов. Для восстановления формы, амплитуды и временных характеристик цифровой последовательности в ВОСП, так же как в цифровых системах с другой средой передачи сигнала, используются регенераторы. Регенератор состоит из приемного оптического модуля, устройства обработки сигнала, передающего оптического модуля и устройства контроля. Различают линейные регенераторы, устанавливаемые вдоль линейного тракта системы в необслуживаемых пунктах (НРП), обслуживаемых пунктах с гарантированным электропитанием (ОРП) и станционные регенераторы, размещаемые на оконечных станциях и входящие в состав приемной части станционной аппаратуры линейного тракта. Восстановленный в регенераторе сигнал проходит следующий участок регенерации, восстанавливается в очередном регенераторе и т. д. Этот процесс продолжается до тех пор, пока оптический сигнал не достигнет приемного оптического модуля станционного регенератора.

После восстановления в станционном регенераторе электрический цифровой сигнал преобразуется в цифровой сигнал в коде стыка преобразователем кода (декодером), затем по соединительной линии поступает на преобразователь кода (декодер) аппаратуры стыка, на выходе которого получается сигнал в бинарном коде. После этого в дескремблере над сигналом выполняется операция, обратная скремблерию, и исходный цифровой сигнал поступает в аппаратуру временного разделения.

Рассмотрим особенности построения приемопередающей аппаратуры цифровых ВОСП.

Оптический ретранслятор, структурная схема которого приведена на рис. 1.10, состоит из оптического приемника (цифрового приемного оптоэлектронного модуля — ПРОМ), устройства обработки сигнала, оптического передатчика (цифрового передающего оптоэлектронного модуля — ПОМ), обнаружителя ошибок и устройства телеконтроля.

Цифровой сигнал принимается и усиливается оптическим приемником, восстанавливается по форме, амплитуде, длительности и положению

относительно тактового интервала в устройстве обработки сигнала, а затем управляет работой переключателя тока излучателя, на выходе которого образуется исходная последовательность цифрового сигнала. Устройство телеконтроля предназначено для обработки и передачи информации о функционировании передающего и приемного устройств, а также о частоте появления ошибок, сигнал о наличии которых поступает от обнаружителя ошибок.

Рассмотрим назначение отдельных элементов оптического ретранслятора.

Предусилителем является высокочувствительный широкополосный усилитель с фотодетектором на входе. Основная функция предусилителя заключается в преобразовании оптического сигнала в электрический с максимальным отношением сигнал-шум в заданной полосе частот. В магистральных, зоновых и городских системах важно обеспечить высокую чувствительность фотоприемного устройства, так как это позволяет уменьшить число участков переприема, снизить требования к выходной мощности излучателя, реализовать малую стоимость всей системы. Шумовые свойства предусилителя зависят от многих факторов: схемы реализации, типа фотодиода, требуемой полосы пропускания, типа используемого транзистора (полевой или биполярный), технологии изготовления (дискретная, гибридная — толстопленочная или тонкопленочная), вида корректирующего фильтра, выбора режима транзистора и т. д. Реализация предусилителя по технологии гибридных интегральных схем позволяет расширить полосу пропускания вследствие уменьшения паразитных индуктивностей и емкостей элементов схемы, улучшить экранировку от внешних полей, обеспечить высокую надежность, применяя герметизацию в нейтральной среде.

Оконечный усилитель обеспечивает повышение уровня цифрового сигнала, поступающего от предусилителя и меняющегося в диапазоне 20...50 дБ, до уровня, необходимого для надежной работы решающего устройства (РУ) при малых нелинейных и линейных искажениях. Для устранения перегрузки выходного каскада оконечного усилителя при изменении входного сигнала и применении коротких линий, когда запас по затуханию линейного тракта велик, в фотоприемнике имеется цепь автоматической регулировки усиления (АРУ). Цепь АРУ, как правило, работает двумя ступенями: при минимальном уровне оптического сигнала порядка 10 дБ усиление фотоприемника меняется за счет изменения напряжения смещения на ЛФД, а при больших значениях уровня оптического сигнала усиление фотоприемника меняется за счет изменения коэффициента усиления первых каскадов оконечного усилителя. Выходной каскад оконечного усилителя в цепь АРУ включать нельзя, так как регулировка усиления указанного каскада приводит к уменьшению его динамического диапазона (увеличению нелинейных искажений). Таким

образом можно обеспечить регулировку усиления фотоприемника до 50 дБ. С целью уменьшения нелинейных искажений при заданной амплитуде сигнала на входе РУ выходной каскад оконечного усилителя лучше выполнять на дифференциальном каскаде с парафазным выходом и соответственно с парафазным выходом реализовать компаратор РУ.

При работе системы АРУ амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) приемника, как правило, меняется (изменяются линейные искажения), но должна при этом оставаться в заданном интервале изменений. При минимальном уровне оптического сигнала на входе приемника на ЛФД за счет АРУ должен восстанавливаться оптимальный режим с точки зрения максимума отношения сигнал-шум. Обычно фотодетектор и усилитель помещаются в общий экранирующий кожух и представляет собой единую конструкцию ПРОМ.

Устройство обработки сигнала предназначено для восстановления формы амплитуды, длительности и положения сигнала относительно тактового интервала. В его состав входит РУ, в котором осуществляется сравнение усиленного и фильтрованного сигнала, поступающего от ПРОМ, с пороговым сигналом в момент внутритактового интервала элементарной посылки (момент принятия решения), определяемого хронирующим колебанием, которое выделяется с помощью соответствующей схемы. Если линейный ВОСП имеет низкочастотную составляющую непрерывной части энергетического спектра, то перед схемой РУ включается схема восстановления низкочастотной составляющей. При этом фиксируются минимальный уровень сигнала, относительно которого устанавливается пороговый уровень $f_{\text{у}}$, решающего устройства, т. е. производится оптимальная установка порогового уровня при приеме. Схема РУ совместно со схемой восстановления низкочастотной составляющей энергетического спектра показана на рис. 1.11. Для работы схемы достаточно иметь диод VD1. Диод VD2 служит для компенсации

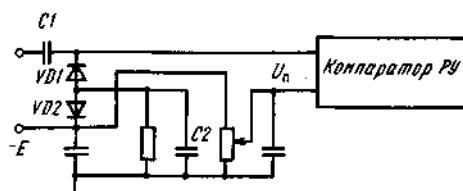


Рис.11 Схема восстановления низкочастотной составляющей

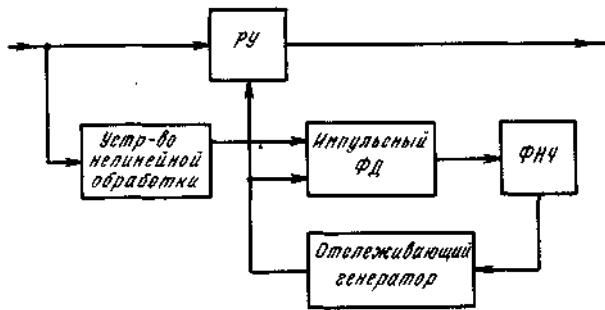


Рис. 1.12. Схема выделения хронирующего колебания с ФАП

температурных изменений вольт-амперной характеристики диода VD1. Работа схемы осуществляется следующим образом.

При отрицательных значениях сигнала на конденсаторе С2 диод VD1 открывается и конденсатор С1 заряжается с постоянной времени, меньшей, чем период следования кодовых посылок. Образующееся на С1 напряжение закрывает диод VD1, при этом постоянная времени заряда конденсатора С1 становится во много раз больше периода следования кодовых посылок. Таким образом минимальный уровень сигнала поддерживается постоянным во время отсутствия импульса. Для нормальной работы схемы емкость конденсатора С2 должна быть во много раз больше емкости конденсатора С1.

Схема выделения хронирующего колебания по структуре не отличается от соответствующей схемы ретранслятора цифровой системы передачи с другой средой распространения сигнала при использовании идентичных кодов. Основным узлом этой схемы является узкополосный фильтр, добротность которого должна быть на уровне 500...1000. Этой величины добротности оказывается практически достаточно, несмотря на то, что в ВОСП фазовые флуктуации хронирующего колебания оказываются на порядок выше, чем, например, в кабельной цифровой системе передачи. Фильтр с такой добротностью может выполняться на основе акустически связанных кварцевых резонаторов или кварцевых фильтров на поверхностных акустических волнах. В высокоскоростных цифровых ВОСП целесообразно строить схему выделения хронирующего колебания на основе системы с фазовой автоподстройкой частоты (ФАП). На рис. 1.12 показан один из примеров выполнения такой схемы. В устройстве нелинейной обработки происходит преобразование спектра принимаемой цифровой последовательности, в результате чего появляется дискретная составляющая тактовой частоты. Этот сигнал сравнивается в импульсном фазовом детекторе (ФД) с сигналом генератора, управляемого напряжением, которое поступает через ФНЧ с выхода этого детектора. Таким образом, частота генератора изменяется в соответствии с разностью фаз сигнала принимаемой цифровой последовательности и стробирующего

сигнала, поступающего на РУ. При изменении частоты следования посылок принимаемого сигнала изменяется фаза хронирующего колебания, так что момент принятия решения остается по-прежнему оптимальным.

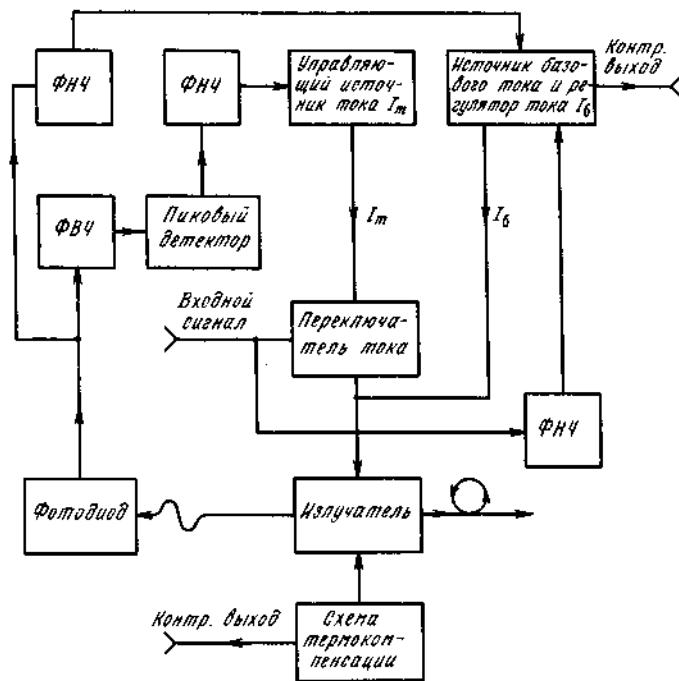


Рис. 1.13. Структурная схема оптического передающего устройства

Оптический передатчик, обобщенная структурная схема которого приведена на рис. 1.13, содержит переключатель тока, управляющий током накачки полупроводникового излучателя, и цепи стабилизации уровня излучения.

Восстановленный цифровой сигнал с устройства обработки поступает на вход переключателя тока, который в соответствии с тем, какой сигнал пришел: «0» и «1» выключает или включает источник тока смещения $I_{\text{в}}$, изменяя уровень излучаемой оптической мощности от P_0 при передаче «0» до пикового значения P_1 при передаче «1». Модулирующий ток I_m накладывается на ток постоянного смещения $I_{\text{в}}$, который определяет уровень остаточной мощности P_0 . Ток I_b поступает от источника регулируемого базового тока. Значения токов I_m и I_b устанавливаются в соответствии с требованиями к параметрам оптического цифрового сигнала. Для стабилизации отношения сигнал-шум на входе РУ ретранслятора в передатчике необходимо поддерживать постоянной разность пиковой и остаточной мощностей $P_1 - P_0$ и снижать фазовые флуктуации переднего фронта оптического импульса.

Постоянство разности $P_1 - P_0$ при изменении температуры и старении

полупроводникового излучателя обеспечивается с помощью автоматической регулировки тока I_t . Величины фазовых флуктуации переднего фронта оптического импульса и уровня шумов излучателя зависят от установки величины тока I_t относительно порогового тока I_p . При достижении значения порогового тока отношение сигнал-шум на приемной стороне уменьшается. При лазерном режиме генерации ($I_b > I_p$) кроме уменьшения шумов источника излучения уменьшается время задержки момента включения излучателя, однако в этом случае уменьшается также разность $P_b - P_0$. При уменьшении тока I_b ($I_b < I_p$) увеличивается время задержки включения излучателя. В связи с этим, как правило, ток I_b в оптическом передатчике на полупроводниковом лазере выбирается близко к I_p , но не должен превышать его значение. Для стабилизации P_b относительно P_0 , в схеме передатчика предусмотрена цепь стабилизации средней мощности излучения с помощью изменения тока I_b . Для устранения влияния низкочастотной составляющей энергетического спектра огибающей оптического сигнала, дестабилизирующей величины P_{cr} и $P_b - P_0$, в состав цепи обратной связи включен ФНЧ. Принцип работы цепей стабилизации режима излучателя поясняет рис. 1.14.

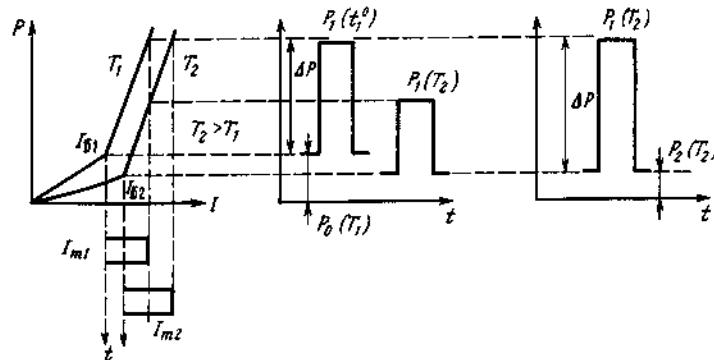


Рис. 1.14. К пояснению принципа работы цепей стабилизации оптического передающего устройства

При повышении температуры энергетическая характеристика лазерного диода смещается и при отключенных цепях стабилизации мощности P_0 и P_b уменьшаются, разность I_b и I_p увеличивается, а разность $P_b - P_0$ уменьшается. После времени установления переходных процессов в цепях стабилизации устанавливаются новые значения I_b и I_p и восстанавливаются прежние значения $P_b - P_0$ и P_{cr} . Для уменьшения температурной зависимости тока I_p в передатчике имеется схема термокомпенсации. В этом случае старение лазера контролируется по изменению тока I_b , а информация об уровне тока смещения от каждого промежуточного ретранслятора по цепям контроля передается на оконечные станции.

Обнаружитель ошибок предназначен для контроля ошибок. Это устройство должно быть простым по структуре, надежным в работе, иметь малое энергопотребление (так как располагается, как правило, в НРП). Контроль ошибок может производиться по нарушению структуры кода (выявление запрещенных комбинаций, чередование символов), по нарушению свойств кода (обнаружение ошибок, основанное на контроле текущей цифровой суммы, текущей диспаритетности, значения дискретной составляющей спектральной плотности мощности процесса на нулевой частоте и т. д.).

Для различных участков цифровой сети задается допустимая вероятность ошибки, исходя из которой можно определить требования к ретранслятору ВОСП. Для магистрального участка, например, допустимая вероятность на один ретранслятор составляет величину порядка 10^{-6} , для местного участка — порядка 10^{-9} . Устройство телеконтроля и служебной связи обеспечивает передачу на оконечные станции информации о состоянии узлов ретранслятора, величины вероятности ошибки, сигналов служебной связи. Для передачи этой информации можно выделить отдельные оптические волокна в кабеле либо использовать металлические симметричные пары, если они предусматриваются конструкцией кабеля. Однако такие технические решения зачастую экономически невыгодны. Сигналы телеконтроля и служебной связи целесообразнее передавать по информационным волокнам. Объединение информационного цифрового потока и сигналов телеконтроля и служебной связи может выполняться различными способами: объединением и разделением сигналов в цифровой форме, спектральным объединением и разделением сигналов в оптическом диапазоне на различных оптических частотах, частотным объединением и разделением на поднесущих частотах, при этом сигналы телеконтроля и служебной связи предварительно модулируют электрические поднесущие колебания с частотой, лежащей за пределами спектра информационного цифрового сигнала. Затем промодулированные сигналы управляют током накачки излучателя. Чаще всего применяется частотная модуляция поднесущих. При последнем способе передачи ухудшается помехоустойчивость в основном информационном канале; энергетический проигрыш составляет несколько децибел.

Для настройки цифрового тракта могут использоваться кодовые слова, не входящие в алфавит информационного сигнала, при этом их диспаритетность должна быть такой же, что и у кодовых слов информационного сигнала.

Для низкоскоростных систем во всех странах используются коды с большой избыточностью типов СМ1, 1B2B, для высокоскоростных систем в европейских странах в основном применяются блочные коды 5B6B и

7B8B, а в Японии — коды mBIC: 8B1C и 10B1C, избыточность которых имеет небольшое значение. В последнее время получают распространение ВОСП с применением дуобинарных и многоуровневых кодов передачи.

Контрольные вопросы

1. Какие виды оптических световодов знаете?
2. В каких целях используются плоские оптические световоды?
3. Как построено оптическое волокно?
4. При каком условии световой луч распространяется только по сердцевине оптического волокна?
5. Излагайте понятия числовой апертуры и угловой апертуры.
6. В чем отличие многомодовых и одномодовых волокон?
7. Какие виды многомодовых волокон знаете?
8. На какие виды делятся одномодовые оптические волокна по дисперсии, и объясните область их применения.
10. Как образуется волокно со смещенной дисперсией?

Лекция 4. АНАЛОГОВЫЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ

В аналоговых ВОСП используются методы модуляции, характеризующиеся непрерывным изменением одного из параметров переносчика сигнала (мощности оптического излучения при модуляции интенсивности, положения оптического импульса при позиционно-импульсной модуляции или его длительности при широтно-импульсной модуляции и т. д.). На рис. 1.15 изображена структурная схема аналоговой ВОСП. Входной электрический сигнал $s(t)$ поступает на модулятор M , с помощью которого производится непрерывное изменение во времени одного из параметров выходного оптического сигнала излучателя. Оптический приемник преобразует свет в электрический сигнал, а демодулятор DM — в выходной электрический сигнал $\hat{s}(t)$.

Особенностью аналоговой передачи по сравнению с цифровой является необходимость обеспечения большого отношения сигнал-шум на выходе оптического приемного устройства и высокой линейности по всему тракту, так как в противном случае возможны взаимные помехи от различных частотных составляющих передаваемого аналогового сигнала.

С точки зрения схемотехнической реализации аналоговая ВОСП значительно проще, чем цифровая. Аналоговые способы модуляции удобно использовать, в частности, для передачи нескольких широкополосных сигналов (например, нескольких телевизионных программ) по одному оптическому волокну. Аналоговые ВОСП находят применение в системах контроля, для передачи сигналов телеметрии, управления. На их основе создаются многофункциональные ВОСП и системы кабельного телевидения. Рассмотрим методы модуляции, характерные для этих систем, и сравним их по помехоустойчивости.

Простейшим видом аналоговой модуляции является модуляция интенсивности (МИ) или непосредственная модуляция оптичес-

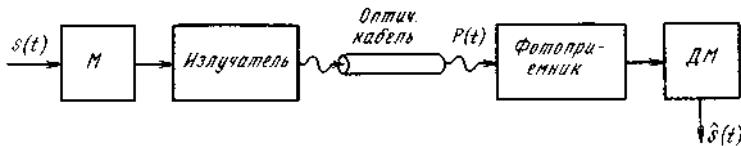


Рис. 1.15. Структурная схема аналоговой ВОСП

кого излучения аналоговым электрическим сигналом, при которой выходная мощность излучателя возрастает или уменьшается относительно некоторого среднего значения пропорционально величине передаваемого сигнала. При большой глубине модуляции современных лазерных диодов возникают большие нелинейные искажения, ухудшающие качественные показатели передачи. Поэтому основным источником

излучения в такой системе является свето-излучающий диод. При совместной передаче нескольких телевизионных и радиовещательных сигналов по одному оптическому ! волокну удается в определенной степени уменьшить мешающее влияние нелинейных искажений путем такого выбора положения несущих частот телевизионных и радиовещательных каналов на оси частот, при котором имеющие наибольший уровень продукты нелинейности второго и третьего порядков не попадают в полосы частот передаваемых сигналов.

Частотная модуляция (ЧМ) поднесущей с последующей модуляцией мощности оптического излучения обеспечивает повышение отношения сигнал-шум по сравнению с МИ, но требует большей полосы частот и более сложной в техническом исполнении приемопередающей аппаратуры. Однако при этом снижаются требования к линейности модуляционной характеристики. При этом можно увеличить глубину модуляции, а следовательно, и предельную дальность передачи.

В импульсном режиме допускается большая глубина модуляции лазерного диода, чем в режиме непрерывной генерации. Поэтому представляет практический интерес использование в ВОСП помехоустойчивых аналоговых импульсных методов модуляции, к числу которых относятся: широтно-импульсная (ШИМ), позиционно-импульсная (ПИМ), называемая также фазоимпульсной (ФИМ), частотно-импульсная (ЧИМ), интервально-импульсная (ИИМ) и некоторые другие.

Применение ШИМ в аналоговых ВОСП оказывается нецелесообразным, поскольку при этом виде модуляции сравнительно неэффективно используется выходная мощность источника излучения и, кроме того, ниже помехоустойчивость по сравнению с ЧИМ

и ИИМ.

При ПИМ, ЧИМ и ИИМ для передачи информации применяются относительно короткие импульсы одинаковой длительности, что позволяет более эффективно использовать выходную мощность оптического излучения.

В случае ПИМ информация об отсчетных значениях передаваемого аналогового сигнала $s(t)$ заключена во временных интервалах между тактовыми точками и сигнальными импульсами. Таким образом, данный вид модуляции требует обязательной синхронизации приемной и передающей аппаратуры, что может обеспечиваться либо передачей специального синхросигнала, либо синхронизацией приемной аппаратуры по информационному ПИМ сигналу. Это приводит к дополнительному усложнению приемной части системы.

При ЧИМ частота импульсной последовательности изменяется по закону, соответствующему передаваемому аналоговому сигналу $s(t)$. Характерной особенностью ЧИМ является отсутствие необходимости поддерживания синхронизации приемопередающей аппаратуры, а

следовательно, менее сложная ее реализация.

Сравнение помехоустойчивости ВОСП с ЧИМ и ВОСП с ПИМ показывает, что применение ЧИМ может обеспечить выигрыш в помехозащищенности по сравнению с ПИМ. Однако при многоканальной передаче с временным разделением каналов ПИМ обладает преимуществом, так как характеризуется частотно-независимым фазовым сдвигом.

При двустороннем ограничении ЧМ колебания возникает так называемая прямоугольная частотно-импульсная модуляция (ПЧИМ). На рис. 1.16, а показаны ЧМ колебание и соответствующие ему ПЧИМ (рис. 1.16, б) и ЧИМ (рис. 1.16, в) сигналы. Следует отметить, что при передаче телевизионных сигналов на сравнительно небольшие расстояния наиболее целесообразно использование ЧМ, ПЧИМ и ЧИМ, поскольку при этих видах модуляции энергетический спектр шума на выходе приемной аппаратуры ВОСП изменяется по квадратичному закону, что с учетом визометрического взвешивания шума ослабляет его мешающее действие. Для увеличения помехоустойчивости ВОСП при ЧИМ и ПЧИМ целесообразно увеличивать параметр $m = \Delta f_m / f_0$, где Δf — девиация частоты и f_0 — средняя частота следования импульсов при ПИМ. Однако если m слишком велико, то в полосу полезного сигнала попадают низкие по частоте паразитные продукты модуляции.

В оптических системах с ИИМ информация об аналоговом сигнале заключена во временных интервалах между передаваемыми импульсами.

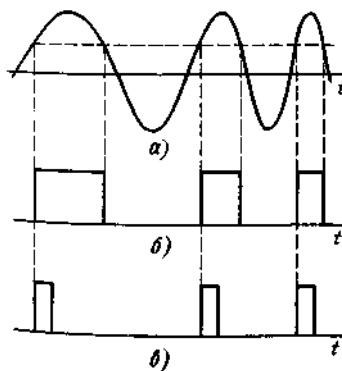


Рис. 1.16. Сигналы с ЧМ, ПЧИМ и ЧИМ

Рис. 1.17. Структурная схема приемопередающей аппаратуры ВОСП с ИИМ:

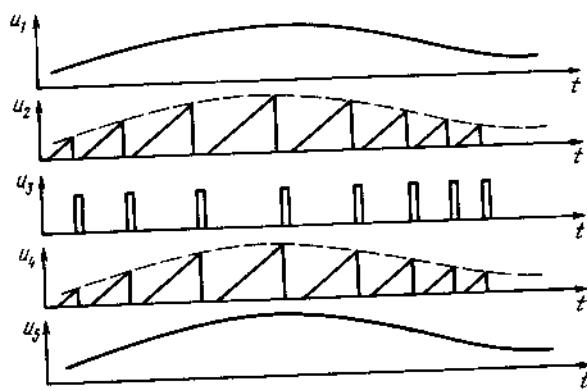


Рис. 1.18. Временные диаграммы сигналов в оптической системе с ИИМ

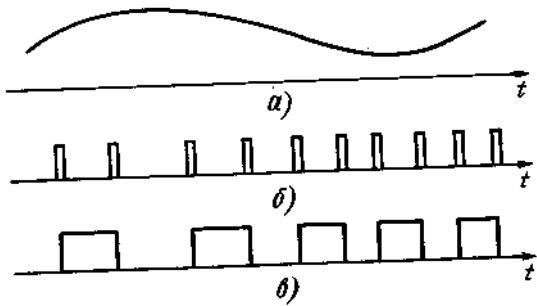


Рис. 1.19. Формирование ИШИМ сигнала

На рис. 1.17 приведена упрощенная структурная схема, поясняющая работу приемопередающей аппаратуры системы передачи с НИМ, а на рис. 1.18 изображены временные диаграммы сигналов в точках схемы 1...5. Как видно из рис. 1.18, на приемной стороне производится преобразование НИМ сигнала в последовательность пилообразных импульсов, модулированных по длительности и амплитуде. Отметим, что при ИИМ средняя частота стробирования аналогового сигнала $s(t)$ на передаче выше, чем при ПИМ. Кроме того, отсутствует необходимость синхронизации приемопередающего оборудования. Ширина полосы частот, занимаемая оптическим сигналом в ВОСГ с ШИМ, ПИМ и ЧИМ, примерно такая же, как и при использовании ИКМ. Уменьшение полосы пропускания можно обеспечить с помощью!* интервально-широтной импульсной модуляции (ИШИМ). При этом на передаче аналоговый сигнал (рис. 1.19, а) преобразуется в ИИД сигнал (рис. 1.19, б), который поступает на вход триггера со счетным входом. На выходе триггера формируется ИШИМ сигнал, показанный на рис. 1.19, в. У этого сигнала модулируемыми параметрами являются как интервал между соседними

импульсами, так и их ширина. На приемной стороне ИШИМ сигнал преобразуется в ИИМ сигнал, после чего демодулируется. Применение ПЧИМ и ИШИМ целесообразно в ВОСП со светодиодом в качестве источника оптического излучения.

Большие перспективы открывает в аналоговых ВОСП гетеродинный метод детектирования, позволяющий на 10...20 дБ повысить чувствительность оптического приемного устройства. В таких системах возможна частотная или фазовая модуляция оптической несущей. На рис. 1.20 приведена структурная схема аналогового оптического ретранслятора. Он состоит из оптического приемника (аналогового приемного оптоэлектронного модуля), усилителя, оптического передатчика (аналогового передающего оптоэлектронного модуля), схемы АРУ и устройства телеконтроля.

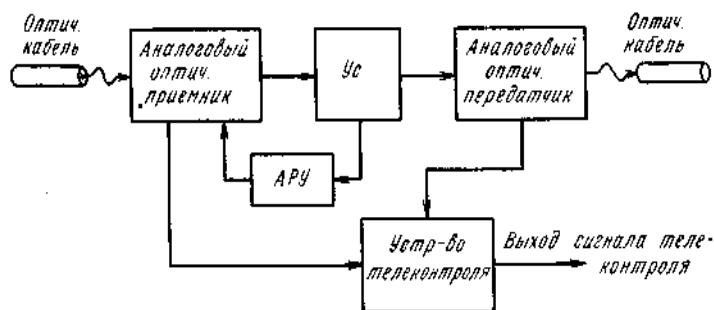


Рис. 1.20. Структурная схема аналогового оптического ретранслятора

Световой сигнал принимается оптическим приемником, преобразуется в электрический сигнал, усиливается усилителем, в котором в зависимости от метода модуляции может находиться также и пороговое устройство, а затем используется для управления током излучателя оптического передатчика.

Изменение уровня светового потока на входе приемника, а также колебания коэффициента усиления ЛФД в приемнике компенсируются схемой АРУ. Устройство телеконтроля передает информацию о наличии оптического сигнала на входе и выходе оптического ретранслятора и об исправности отдельных его элементов. Передача этой информации может осуществляться выделенным отдельным оптическим волокном в кабеле, либо по металлическим симметричным парам, предусмотренным конструкцией оптического кабеля, либо по информационному волокну с помощью временного или частотного метода уплотнения.

При непосредственной модуляции необходимо обеспечить высокую линейность характеристик ретранслятора по всему тракту в передачи. Применение импульсных методов модуляции снижает тре- 1

бование к линейности. В соответствии с частотой следования и длительностью принимаемых оптических импульсов предуслитель оптического приемника может строиться по трансимпедансной или высокоимпедансной схеме с использованием полевого или биполярного транзистора.

По сравнению с высокоимпедансной схемой, в которой нет резистора обратной связи, трансимпедансная схема имеет ряд преимуществ, к числу которых относятся большая ширина полосы частот, больший динамический диапазон и пониженная чувствительность к изменению усиления лавинного фотодиода. Выбор сопротивления резистора обратной связи производится таким образом, чтобы величина создаваемого им теплового шума оказалась малой в сравнении с тепловым шумом транзистора предуслителя. Выигрыш для приемника с р-і-п-фотодиодом от применения трансимпедансного усилителя с полевым транзистором может достигать 10 дБ. При использовании ЛФД выигрыш снижается приблизительно до 3 дБ.

В заключение отметим, что для аналоговых сигналов с широкими динамическим диапазоном и спектром особенно существенными становятся квантовые шумы модулированного сигнала. В этих условиях радикальное повышение помехоустойчивости может быть достигнуто применением одномодовых волоконно-оптических систем и гетеродинных способов приема. Кроме того, улучшение качеств аналоговой ВОСП может быть получено и за счет применения других, адекватных условиям гетеродинного приема видов модуляции. В частности, предпочтительной может оказаться внешняя модуляция лазерного излучения типа ДБН ПН (с двойной боковой полосой и подавленной несущей). Эти вопросы рассматриваются в гл. 7, посвященной анализу помехоустойчивости ВОСП и их оптимизации.

Контрольные вопросы

1. От чего зависит оценка оптического волокна по затуханию?
2. От каких факторов возникают потери в волокне?
3. Как возникают собственные потери оптического волокна?
4. Как возникают кабельные потери оптического волокна?

Лекция 5. ПОЛЯ И ВОЛНЫ В ПЛОСКИХ И ПРЯМОУГОЛЬНЫХ СВЕТОВОДАХ

В волоконно-оптических системах большое внимание уделяется обработке сигналов на оптическом уровне, без преобразования частоты в более низкие диапазоны. Для этого разрабатываются элементы и функциональные узлы на общей плоской подложке, производство которых осуществляется в едином технологическом цикле. Такие устройства получили название интегрально-оптических.

Интегрально-оптические устройства компактны, имеют малую массу и габаритные размеры, обладают высокой жесткостью, вибростойкостью и долговечностью, хорошо доступны для внешних управляющих воздействий. Наконец, их внедрение способствует более полной реализации потенциальных возможностей оптического диапазона по пропускной способности. Для управления интегрально-оптическими устройствами используются различные физические явления, которые были изложены в гл. 2.

Как отмечалось, наиболее перспективным для управления интегрально-оптическими устройствами считается использование электрооптических явлений, т. е. зависимость диэлектрической проницаемости от напряженности электрического поля. Для устройств интегральной оптики во всех странах широко используется кристаллический диэлектрик (сегнетоэлектрик) ниобат лития LiNbO_3 . Близким по свойствам к ниобату лития и так же хорошо освоенным в производстве является танталат лития LiTaO_3 . Кроме диэлектриков применяются также кристаллические полупроводники типа арсенида галлия GaAs с добавкой других примесей.

Хотя полупроводники обладают большими потерями, чем диэлектрики, но зато на их основе могут быть созданы в общей подложке как пассивные, так и активные элементы.

Ниобат и танталат лития обладают естественным двулучепреломлением. Для ниобата лития, например, $n_0 = 2,29$ и $n_\perp = 2,2$ (на $\lambda = 0,63$ мкм) и отличны от нуля следующие электроптические коэффициенты, м/В: $r_{33} = 30,8 \cdot 10^{-12}$; $r_{-13} = \Gamma_{23} = 8,6 \cdot 10^{-12}$; $\Gamma_{22} = r_{33} = -r_{61} = 3,4 \cdot 10^{-12}$; $r_{42} = 5i = 28 \cdot 10^{-12}$. В арсениде галлия анизотропия появляется лишь в результате приложенного напряжения. Для него $n_0 = 3,34$, причем отличны от нуля коэффициенты $r_{11} = \Gamma_{52} = r_{33} = 1,6 \cdot 10^{-12}$ мкВ.

Отметим, что на СВЧ показатели преломления существенно больше; так, для ниобата лития $n_\perp = 2,2$.

В пластинах указанных монокристаллов образуются оптически более плотные дорожки, вдоль которых и происходит распространение света. Ширина таких световодов имеет порядок 5...8 мкм, глубина 1...3 мкм. В ниобате лития, например, световоды образуются чаще всего диффузией титана Ti . Для этого на пластинку из ниобата лития наносят полоски Ti в

соответствии с рисунком световодов и далее производят процесс термодиффузии. Титан оказался предпочтительнее других металлов, поскольку создает наибольшую разницу в диэлектрической проницаемости между световодом и подложкой при минимальной глубине диффузии. Распространение света вдоль световода происходит за счет полного внутреннего отражения от его границ с соседними средами. Для изменения диэлектрической проницаемости (показателя преломления) световоды дополняются системой электродов, на которые подаются управляющие напряжения.

Интегрально-оптические элементы предназначены для выполнения тех же функций, что и их радиотехнические аналоги: сложения и деления оптической мощности, модуляции и переключения оптических сигналов, формирования оптических импульсов, умножения и деления частоты их следования, измерения физических величин и т. д. Принципы построения интегрально-оптических устройств весьма разнообразны; их анализ целесообразно начать со свойств одиночных плоских световодов.

Плоский волновод (слой плотного диэлектрика) представляет собой наиболее простую модель направляющих диэлектрических систем, правильно передающих все принципиальные особенности распространения электромагнитных волн в них. Поэтому подобная модель часто используется при оценке параметров функциональных оптических элементов и узлов.

Как было показано в гл. 2, в плоском световоде распространение света с точки зрения лучевой оптики можно рассматривать как зигзагообразное движение лучей вдоль продольной координаты (за которую принята z) при полном внутреннем отражении от границ раздела сред (см. рис. 2.6). Углы падения лучей θ могут принимать лишь вполне определенные дискретные значения в соответствии с $\theta=1, 2, 3, \dots$

Лучи есть геометрическая интерпретация процесса, в основе которого лежит падение плоской однородной электромагнитной волны на границу раздела сред. В гл. 2 подчеркивалось, что при полном внутреннем отражении в результате интерференции падающей и отраженной волн в поперечном сечении (по координате x) диэлектрического слоя устанавливается стоячая волна. Наличие полного внутреннего отражения не означает, что поле отсутствует по другую сторону границ; оно существует, экспоненциально затухая по мере удаления от поверхности разделов. Отмечалось, что затухание поля реактивно, так как в установившемся режиме не связано с необратимыми потерями (считается, что диэлектрики не имеют потерь).

Волны подобной структуры в плоском световоде называются направленными или модами. Параметры мод отличаются между собой теми же целочисленными значениями $g=1, 2, 3, \dots$, что и для лучей. Число g показывает число стоячих полуволн, укладывающихся в слое (с

округлением до целого). На рис. 2.7 для примера было приведено распределение поля при $t=1$ и 2 . Такие структуры полей и распространяются вдоль продольной координаты g .

Нам уже известно, что при падении плоской волны на границу раздела сред необходимо различать нормальную (вектор E перпендикулярен плоскости падения) и параллельную (вектор f параллелен плоскости падения) поляризации волн. При этом образуются моды магнитного ($H_{,,}$) и электрического ($E_{,,}$) классов. Первый класс имеет составляющие полей E_y , H_x и H_z , второй H_y , E_x и f_r . (Обозначение классов волн введено по наличию продольных составляющих H_r либо E_r . Существует и другое обозначение, связанное с наличием только поперечных составляющих полей, поперечно-)

электрический класс $TE_{,,}$ и поперечно-магнитный класс TM_r вместо I_r и E_r соответственно.)

В данной главе будет рассмотрена волновая теория плоских и прямоугольных световодов, которая наиболее полно описывает электромагнитные процессы при распространении электромагнитных волн в них. Ее качественные выводы применимы и к волоконным световодам (см. гл. 5). Первой задачей, возникающей при анализе полей, является определение их распределения в поперечном сечении и постоянной распространения r вдоль направляющего слоя, а также поперечного волнового числа x , связанных соотношением (см. рис. 2.11) $/e'f = p^2 + x^2$, где $k = kn$ — волновое число в неограниченной среде с показателем преломления n .

Анализ распространения светового излучения в волоконном волноводе удобно начинать с рассмотрения лучевой картины, при этом нужно помнить, что лучи трактуются как волновые векторы парциальных волн.

Простейшая модель оптического волокна может быть представлена двухслойным коаксиальным световодом (рис. 4.1), состоящим из внутренней сердцевины и окружающей оболочки с показателями преломления n_1 и n_2 соответственно, причем $n_1 > n_2$. Материалы и методы производства волоконных световодов рассмотрены в конце главы. Здесь же только отметим, что сердцевина выполняется из стекла (чаще всего кварцевого), оболочка — либо из такого же стекла, либо из прозрачного полимера. На рис. 4.1 показаны продольное осевое сечение волокна и набор лучей, лежащих в этом сечении и называемых меридианами. Критический режим

$$\sin\theta_c = n_2/n_1. \quad (4.1)$$

Полное внутреннее отражение (ПВО) на

$$\theta_c \leq \theta \leq \pi/2. \quad (4.2)$$

соответствует условию

При этом луч, удовлетворяющий условию (4.2), распространяется вдоль сердцевины волокна по зигзагообразной траектории. Поскольку явление ПВО не сопровождается потерями (если материалы, из которых изготовлены сердцевина и оболочка, непоглощающие), то становится очевидно, что набор лучей, удовлетворяющих условию (4.2), может обеспечить передачу светового сигнала на большие расстояния. Отметим, что в волокне имеется бесчисленное множество меридианальных сечений, в каждом из которых возможно распространение множества меридианальных лучей, удовлетворяющих условию (4.2) и, следовательно, имеющих направляющие углы GI (т. е. углы между волновым вектором и осью волокна) в пределах

$$0 \leq \theta_1 \leq \pi/2 - \theta_c. \quad (4.3)$$

Таким образом, если на торец волокна, окруженного прозрачной средой с показателем преломления n_2 (см. рис. 4.1), падают в какой-либо из меридианальных плоскостей лучи под углами θ_0 к оси, то условию их волноводного распространения в волокне (4.2) соответствует следующее ограничение на угол падения Оо:

$$\theta_0 \leq \arcsin\left(\sqrt{n_1^2 - n_2^2}/n_0\right). \quad (4.4)$$

Выражение (4.4) нетрудно получить из закона

а также условия (4.1) и соотношения $\theta^+ + \theta^- = \pi/2$. Если, как чаще всего бывает, свет падает на входной торец из воздушной среды (для этого достаточно существования даже минимального зазора между стыкуемыми волокнами или источником света и волокном), то Пц—1 и

$$\sin\theta_{0c} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = NA. \quad (4.6)$$

$$\sin\theta_{0c} / \sin\theta_{1c} = n_1 / n_0. \quad (4.5)$$

Выражение (4.6) определяет ранее известную уже нам числовую апертуру волокна, являющуюся одной из важнейших оптико-геометрических характеристик. Здесь и в дальнейшем числовая апертура обозначается аббревиатурой английского синонима (NA), диаметр сердцевины — Id (рис. 4.1), диаметр оболочки — 2Ь.

Возвращаясь к рис. 4.1, обратим внимание на то, что лучи, падающие на торец сердцевины под углами $\theta_0 > \theta_{0c}$ недерживаются в сердцевине и не участвуют в формировании волноводных мод. Эти лучи, так же как и все лучи, попадающие в волокно через торец оболочки (независимо от угла их падения на торец оболочки), обозначены цифрами 2, 3, 4 и

формируют световой поток мод о б о -л очки (2, 4) и излучательных мод (3). Рассмотрение процессов формирования и взаимодействия различных типов мод диктуется практическими соображениями и является одной из основных задач при анализе свойств оптического волокна. Применяемый в этом разделе лучевой подход в ряде случаев может оказаться неточным, однако поведение излучательных и оболочечных мод описывает корректно. Дело в том, что внешняя граница оболочки в силу технологических причин не обеспечивает отражения без потерь: она геометрически несовершенна и покрыта полимерным материалом (так называемое первичное покрытие) со значительным коэффициентом оптических потерь. Кроме того, у некоторых волокон, особенно кварц-полимерных, оптические потери весьма велики в этой оболочке. Поэтому энергия мод оболочки за счет процессов рассеяния и поглощения затухает на первых метрах оптической линии. Излучательные моды затухают еще быстрее в малопрозрачном материале внешнего вторичного покрытия волокна. Несмотря на это, было бы крайне неправильно игнорировать существование данных мод, поскольку их взаимодействие с регулярными, т. е. волно-водными, модами может явиться серьезной причиной повышенного затухания энергии оптического сигнала в процессе его распространения вдоль волокна. Взаимодействие волноводных мод с оболочечными, в частности, провоцируется случайными (а иногда и специально созданными) неоднородностями, расположенными вдоль волокна: изменениями диаметра и показателя преломления сердцевины, показателя преломления оболочки, изгибами, кручением и т. д.

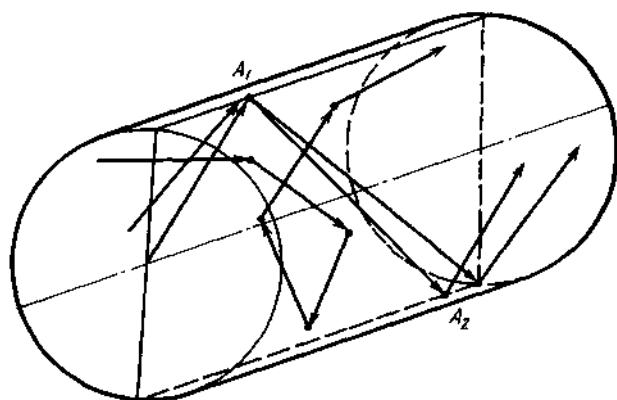


Рис. 4.2. Отражение косых лучей

Более подробное рассмотрение лучей, образующих волноводные моды, показывает, что их множество не исчерпывается мери-дианальными лучами. Более общий случай представляют так называемые косые лучи (рис. 4.2).

Косые лучи образуются в результате падения на входной торец лучей, лежащих в пределах числовой апертуры, но не в плоскости меридианального сечения волокна. Если меридианальный луч, движущийся вдоль волокна, «виден» с его торца в виде отрезка прямой, проходящей через центр, т. е. поперечная проекция луча совпадает с диаметром сердцевины (рис. 4.3), то косой луч проецируется на плоскость поперечного сечения в виде ломаной линии, как показано на том же рисунке. Характерно, что траектория всех меридианальных лучей, исходящих из точек A_1 , A_2 , имеет одинаковую поперечную проекцию независимо от их направляющих углов 0_i (см. рис. 4.2). В то же время косые лучи, исходящие из точки A' , имеют поперечные проекции, описываемые ломаными линиями различной конфигурации в зависимости от угла падения в точку A' (см. рис. 4.3).

Здесь мы подходим к явлению, принципиально отличающему ситуацию в оптическом волокне от процесса распространения света в планарном волноводе и связанному с тем, что граница раздела «сердцевина — оболочка» в волокне является искривленной, причем кривизна в точке падения зависит от типа луча и угла падения. Напомним, что луч в нашем понимании представляет собой волновой вектор плоской волны, фронт которой перпендикулярен лучу в каждой его точке. Кривизна границы раздела в точке падения косого или меридианального луча на внутреннюю поверхность

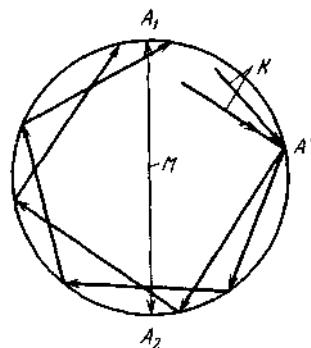


Рис. 4.3. Следы лучей в поперечном сечении

сердцевины определяется формой криволинейного следа, образуемого при пересечении этой поверхности волновым фронтом падающей волны. Меридианальный луч распространяется в волокне таким образом,

что соответствующая волна «видит» границу раздела в форме эллипса (рис. 4.4). Чем больше направляющий угол $9i$ меридианального луча, тем ближе эллипс к окружности, но во всех случаях точки, в которых происходит отражение, лежат в крайних точках эллипса, т. е. там, где кривизна максимальна*.

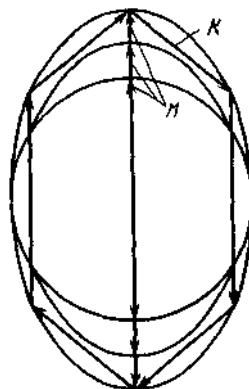


Рис. 4.4. «Видимые» границы раздела для различных лучей

В то же время волновые фронты, соответствующие косым лучам /, также «видят» границу раздела эллиптической, но точки отражения располагаются на этом эллипсе в областях различной локальной кривизны границы (см. рис. 4.4).

Нетрудно представить, что условия отражения могут быть различными для косого луча в различных точках его изломанной траектории: в одних точках это отражение будет полным, в других — частичным, что приведет к постепенному выходу энергии лучей в оболочку. Такая модель поведения косых лучей демонстрирует основную черту континуума лучей, называемых лучами утечки, — энергия лучей утечки переходит в оболочку не сразу, как в случае лучей, формирующих моды оболочки, а постепенно, на протяжении сотен метров и даже нескольких километров волоконно-оптического тракта. Лучи утечки и соответствующие им моды утечки нуждаются в столь же тщательном анализе, как и волноводные моды, так как принимают активное участие в формировании потока энергии вдоль волокна.

Контрольные вопросы

5. От чего зависит оценка оптического волокна по затуханию?
6. От каких факторов возникают потери в волокне?
7. Как возникают собственные потери оптического волокна?
8. Как возникают кабельные потери оптического волокна?

Лекция 6. ИСТОЧНИКИ И ДЕТЕКТОРЫ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

6.1. ИСТОЧНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ ТРЕБОВАНИЯ К ИСТОЧНИКАМ ИЗЛУЧЕНИЯ

Общие требования к источникам излучения для ВОСП и измерительных систем можно сформулировать следующим образом:

длина волны излучения источника должна совпадать с одним из Минимумов спектрального распределения потерь волоконных световодов;

конструкция источника должна обеспечивать достаточно высокую мощность выходного излучения и эффективный ввод его в волоконные световоды;

источник должен иметь высокую надежность и большой срок службы;

габаритные размеры, масса и потребляемая мощность должны быть минимальными;

простота технологии должна обеспечивать невысокую стоимость и высокую воспроизводимость характеристик.

Особенности конкретных систем предъявляют ряд специфических требований к характеристикам источников излучения. Весьма жесткими эти требования являются для высокоскоростных систем передачи информации на большие расстояния с использованием одномодовых волоконных световодов. В первую очередь речь идет о спектральных характеристиках излучения. Уширение световых импульсов в одномодовых волокнах вследствие дисперсии пропорционально ширине спектра излучения, скорость передачи информации обратно пропорциональна ей (см. гл. 4 и 7).

В перспективных ВОСП с когерентным приемом необходимы источники не только с узким спектром, но и с высокой долговременной стабильностью центральной длины волны λ_0 . Высокая стабильность λ_0 необходима и в многоканальных системах со спектральным уплотнением, если спектральный интервал между соседними каналами невелик.

Естественно, что в высокоскоростных системах передачи значительные требования предъявляются и к динамическим характеристикам источника света. Удобнее всего использовать источники, допускающие прямую модуляцию интенсивности, частоты или фазы излучения без существенных изменений других параметров: модо-вого состава, диаграммы направленности, появления самопульсаций и т. д.

Существенно снижаются требования к характеристикам источников света, предназначенным для использования в системах передачи данных на небольшие расстояния с относительно малой скоростью: внутриобъектовых системах, сетях ЭВМ и т. п. В этих системах, как правило, используются волоконные световоды со ступенчатым профилем показателя преломления «кварц-полимер» или на основе

многокомпонентных стекол, полоса пропускания частот определяется межмодовой дисперсией световодов, так что использование высококогерентных источников теряет смысл. Более того, высокая степень когерентности излучения повышает уровень шумов в связи с тем, что при прохождении когерентного света по многомодовому волоконному световоду на торце его в результате интерференции многих мод образуется спекл-структура, чрезвычайно чувствительная к внешним воздействиям (давлению, температуре, кручениям, изгибам). Неизбежное диафрагмирование (в разъемных соединителях, например) приводит к выделению части изменяющейся спекл-структуры и вызывает появление дополнительных (модовых) шумов. В этой связи целесообразно использование в указанных системах источников излучения с длиной когерентности меньшей, чем минимальная разность хода между модами световода.

Источники излучения с прямой модуляцией для аналоговых систем передачи информации должны в широком динамическом диапазоне иметь линейный отклик на модулирующий сигнал.

В настоящее время можно рассматривать три класса источников излучения для волоконно-оптических систем: полупроводниковые, волоконные и объемные микрооптические источники (микролазеры). Все они в той или иной мере удовлетворяют изложенным выше требованиям, однако только полупроводниковые источники — светоизлучающие диоды и лазеры — широко используются в реальных системах. Волоконные лазеры, несмотря на целый ряд достоинств, не вышли из стадии исследований, это же касается и объемных микролазеров, хотя область их возможного применения значительно уже. Интенсивное развитие полупроводниковых источников света связано в первую очередь с уникальным сочетанием важных для световодных систем положительных свойств, таких как непосредственное преобразование энергии электрического тока в световое излучение с

высокой эффективностью, возможность прямой модуляции параметров излучения током накачки с высокой скоростью, малые масса и габаритные размеры.

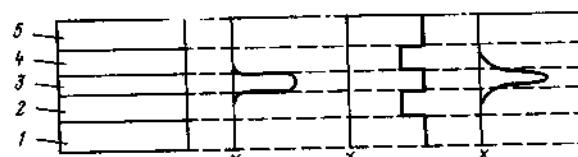


Рис. 5.5. Структура, распределение инверсной населенности ΔN , показателя преломления n и электрической составляющей поля E лазера ДГС:

1 — подложка с электронной проводимостью ($n = \text{GaAs}$); 2 — широкозонный эмиттерный слой с n -проводимостью ($n = \text{Ga}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$); 3 — узкозонный активный слой ($n = \text{GaAs}$); 4 — широкозонный эмиттерный слой с p -проводимостью ($p = \text{Ga}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$); 5 — слой узкозонного полупроводника $p = \text{GaAs}$

Проблема создания лазерных источников излучения для ВОСП решается при использовании полупроводниковых двойных гетероструктур (ДГС). Структура лазера на ДГС $\text{Ga}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ схематически изображена на рис. 5.5. В этой структуре использовано свойство алюминия и галлия взаимно замещать друг друга без изменения периода кристаллической решетки полупроводника. Замещение галлия алюминием приводит к увеличению ширины запрещенной зоны W_g и к снижению показателя преломления n . Центральный активный слой выращивается из GaAs без добавки алюминия и имеет меньшую ширину запрещенной зоны, чем окружающие его эмиттерные слои из $\text{Ga}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$. Увеличение ширины запрещенной зоны вверху и внизу активного слоя из узкозонового полупроводника ограничивает область инверсной населенности (усиления) толщиной этого слоя вследствие образования потенциального барьера на границах. В гомолазерах толщина активной зоны определяется длиной диффузии неосновных носителей. Кроме того, эмиттерные слои, где галлий частично замещен алюминием, имеют показатель преломления, достаточно сильно (на несколько процентов) уменьшенный в сравнении с показателем преломления центрального слоя. Это означает, что здесь имеет место жесткий пленарный волновод, световое поле локализовано в активном слое существенно сильнее, чем в гомоструктурах. «Хвосты» поля, прописывающие в эмиттерные слои, испытывают слабое затухание в силу того, что ширина запрещенной зоны там больше и разонансного поглощения нет.

Таким образом, лазеры на ДГС имеют низкие пороговые плотности тока накачки ($500\ldots1000 \text{ A/cm}^2$) и работают в режиме непрерывной генерации при комнатной температуре по следующим основным причинам:

инверсная населенность (усиление) эффективно сконцентрирована в узкозоновом центральном слое;

активный слой имеет значительный скачок показателя преломления, оптическое поле эффективно локализуется в нем;

потери вне активного слоя (α , в формуле (5.8)) малы, поскольку ширина запрещенной зоны в $\text{Ga}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ больше, чем в усиливающем слое GaAs .

Для снижения до минимума безызлучательной рекомбинации в активном слое (см. § 2.5) необходимо, чтобы параметры кристаллических решеток материалов, образующих гетеропереход, были максимально близки, в противном случае появляются дислокации рассогласования. Именно поэтому в настоящее время широко освоен выпуск лазеров и светодиодов на тройном соединении $\text{Ga}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$, у которого решетка остается практически постоянной при изменении величины x . Ширина

запрещенной зоны у этого соединения W_g такова, что длина волны излучения лазера $\lambda = c/\Delta n$ лежит в диапазоне 0,8...0,87 мкм. Рекордно низкие потери (порядка 0,2 дБ/км) в волоконных световодах высокого качества и минимальная дисперсия на длинах волн вблизи 1,3 и 1,55 мкм, стимулировали разработку источников излучения для спектрального диапазона 1...1,6 мкм. В последние годы освоен выпуск лазеров и светодиодов на четверном соединении $In_xGa_{1-x}AsyPi-y$, которые перекрывают диапазон от 0,95 до 1,65 мкм.

Основные конструкции и характеристики источников излучения на двойной гетероструктуре рассмотрим на примере GaAlAs-соединений с учетом того факта, что большинство результатов применимо и к источникам на четверных соединениях.

Лазеры на ДГС прошли многочисленные стадии оптимизации конструкции и характеристик. Наиболее распространенный тип резонатора таких лазеров — это полосковый волноводный аналог открытого оптического резонатора Фабри—Перо (рис. 5.6), зеркалами которого являются параллельно сколотые торцы кристалла. Высокий показатель преломления $n = 3,6$ обеспечивает, как уже отмечалось, достаточный коэффициент отражения $R = 0,3$. По оси x (см. рис. 5.6), т. е. в направлении, перпендикулярном слоям гетероструктуры, скачок показателя преломления в узкозонном активном слое GaAs приводит к тому, что структура представляет собой, как отмечалось выше, пленарный волновод и световое поле практически полностью локализуется в активном слое. Толщина активного слоя d_x , его показатель преломления n и скачок показателя преломления Δn определяют число направляемых мод этого волновода. Обычно в GaAlAs/GaAs при $d_x \approx 1$ мкм условия распространения выполняются только для основной моды. Уже в первых разработках стало ясно, что существует необходимость создания волноводных условий и в плоскости самого активного слоя (в плоскости уз на рис. 5.6), т. е. в гетеролазерах в настоящем время обязательно тем или иным способом создается не пленарный, а двумерный (полосковый) световод. Соответственно и инверсная населенность создается не по всей ширине слоя узкозонового полупроводника, а концентрируется в области полоскового световода.

Лазеры с полосковым световодом обладают рядом значительных достоинств с точки зрения использования в световодных системах:

излучающая площадка в таких лазерах мала, что улучшает условия ввода их излучения в одномодовые световоды;

малые размеры области с инжекцией носителей существенно снижают пороговый ток накачки. По этой причине легче избежать возникновения дефектов в активной области, что существенно для характеристик лазера.

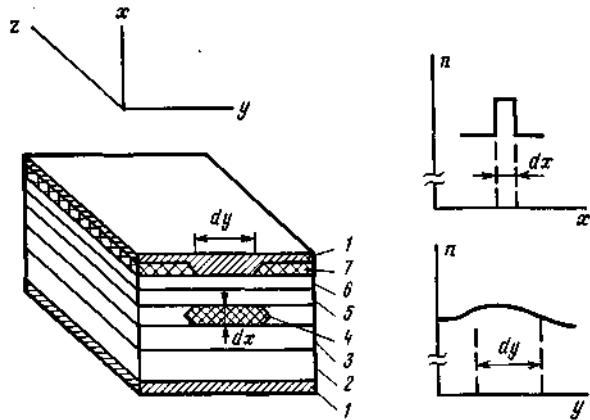


Рис. 5.6. Лазер на ДГС с полосковым контактом: /
 / -• металлический контакт; 2 — $n = \text{GaAs}$; 3 — $\pi = \text{Ga}_x\text{Ah}_{-x}\text{As}$; 4 — $n(p) = \text{GaAs}$; 5 — $p = \text{Ga}_x\text{Ah}_{-x}\text{As}$; 6 — $p = \text{GaAs}$; 7 — SiCh

По способу формирования полоскового световода в планарной гетероструктуре лазеры можно разделить на две группы:
 лазеры со световодом, образованным профилем усиления;
 лазеры со световодом, образованным профилем показателя преломления.

В каждой из групп лазеры имеют много общего в процессах [•операции и, как следствие, в характеристиках излучения. Поэтому вначале рассмотрим наиболее типичные для обеих групп конструкции, а затем проанализируем их работу.

Одной из первых структур со световодом, образованным профилем усиления, является лазер с полосковым контактом, конструкция которого схематически изображена на рис. 5.6. Контакт на верхнем слое p GaAs ограничен изолирующим слоем SiO_2 , в котором вытравлена полоска шириной $dy = 5\ldots20$ мкм. Из-за расплывания тока усиливающий слой несколько шире, чем dy . Главный механизм образования полоскового световода состоит в том, что наличие градиентного распределения усиления (т. е. мнимой части комплексного показателя преломления) в среде приводит к локализации светового поля в области с большим усилением.

Полупроводниковые светоизлучающие диоды (СИД) в силу физики процессов, происходящих в них, существенно уступают по параметрам излучения полупроводниковым лазерам. Возникающее в результате спонтанной рекомбинации излучение светодиодов является некогерентным, спектр его существенно шире, чем у лазеров. Спонтанное

время жизни значительно больше, чем индуцированное, поэтому СИД является менее быстродействующим прибором. Однако относительная простота технологии изготовления, низкая стоимость и более высокий срок службы вследствие менее напряженного режима работы делают целесообразным применение СИД в системах, где широкая линия излучения не является существенным недостатком: в локальных сетях, объектовых ВОСП и т. п.

Можно выделить два типа конструкции СИД: поверхностные — с выводом излучения в направлении, перпендикулярном плоскости '—«-перехода, и торцевые СИД, излучающие в направлении, параллельном этой плоскости.

Прогресс в развитии торцевых СИД связан с появлением в последние годы конструкций, в которых осуществляется усиление спонтанного излучения без обратной связи — суперлюминесцентных СИД. Суперлюминесцентные СИД по параметрам излучения занимают промежуточное положение между лазерами и поверхностными СИД со спонтанным излучением. Конструкция люминесцентных СИД представляет собой двойную гетероструктуру с полосковым контактом, который с одной только стороны доходит до торца кристалла. Таким образом, основное отличие от лазера с полосковым контактом состоит в отсутствие резонатора Фабри—Перо, т. е. в отсутствие положительной обратной связи. Кроме того, длина усиливающей области обычно больше, чем в лазере, она достигает 1,5 мм. Спонтанное излучение происходит равновероятно во все стороны, однако часть его удерживается, направляется планарным световодом и усиливается за счет вынужденного излучения. В процессе распространения с усилением происходит сужение спектра излучения, так как спектральные компоненты, расположенные у максимума линии спонтанного излучения, усиливаются сильнее. Спектр излучения суперлюминесцентных СИД сплошной, так же как и у поверхностных, однако значительно уже (3...5 нм). Диаграмма направленности более узкая, чем у поверхностных СИД, и несимметричная, как у лазеров, с угловыми размерами около 120...40°. Эффективность ввода излучения суперлюминесцентных СИД в многомодовые волокна выше, чем у поверхностных. Мощность излучения лежит в пределах 1...10 мВт, мощность, вводимая в многомодовый световод, 0,1...1 мВт.

Таблица 5.1

Тип излучателя	Центральная длина волны спектра излучения, мкм		Ширина спектра излучения по уровню 0,5 яркости, не более	Конструкция узла вывода излучения
	минимальная	максимальная		
Многомодовый лазерный диод	0,8	0,86	2	Отрезок волоконного световода с разъемным соединителем
Одномодовый лазерный диод	1,2 1,22	1,35 1,33	5 10	То же Разъемный соединитель
Суперлюминесцентный диод	0,78	0,88	40	Отрезок волоконного световода с разъемным соединителем
	1,22	1,33		Разъемный соединитель
Поверхностный светодиод	0,8	0,9		Отрезок волоконного световода с разъемным соединителем

Примечание. Многомодовый, одномодовый и суперлюминесцентный диоды имеют

Проведенный анализ показывает, что полупроводниковые источники излучения отвечают большинству требований, предъявляемых к таким приборам в световодных системах связи и световодных измерительных системах. Светоизлучающие диоды являются наиболее подходящими источниками для низкоскоростных систем передачи информации с использованием многомодовых волоконных световодов. Примерные представления о границе перехода от использования СИД к применению лазеров в системах на многомодовых волокнах дают графики зависимостей длины ретрансляционного участка от скорости передачи информации, приведенные на рис. 5.17.

В заключение раздела, посвященного полупроводниковым источникам излучения для ВОСП, остановимся на технических параметрах устройств, выпускаемых серийно нашей промышленностью (табл. 5.1). Здесь необходимо отметить высокие темпы освоения промышленностью новых образцов излучателей, их ассортимент обновляется каждые 3...5 лет. Если судить по опубликованным данным, то в ближайшие годы появятся лазерные диоды, позволяющие в спектральных диапазонах 1,3 и 1,55 мкм вводить в многомодовые волоконные световоды оптическую мощность порядка 50...100 мВт, а в одномодовые — 1...10 мВт при скоростях модуляции 1...10 мбит/с.

Наряду с полупроводниковыми источниками излучения определенные перспективы использования в ВОСП имеют волоконные лазеры и объемные микролазеры. В этих устройствах в качестве активных частиц используются лазерные ионы неодима и эрбия, внесенные в качестве примеси в стекла или диэлектрические

Средняя мощность, вводимая в волокно, мВт, не менее	Номинальное значение тока инжекции, мА, не более	Срок службы, ч
1	150	10^4
1	200	10^4
1	120	$5 \cdot 10^4$
0,1	90	10^4
0,1	200	10^4
0,05	50	10^5

встроенный фотодиод.

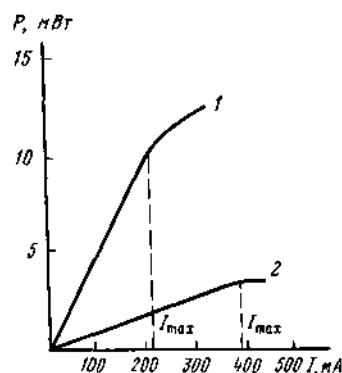


Рис. 5.16. Ватт-амперные характеристики поверхностных СИД на ДГС типа:

1 — GaAlAs; 2 — JnGaAsP/JnP

кристаллы. Ионы неодима имеют две основные линии усиления с центральными длинами волн 1,06 и 1,32 мкм, линия усиления ионов эрбия лежит вблизи длины волны 1,55 мкм. Возбуждение этих лазерных ионов производится только оптической накачкой (излучением светодиодов, полупроводниковых лазеров или газоразрядных ламп). Необходимо отметить, что в лазерах на примесных ионах спонтанное время жизни составляет $10^{-3} \dots 10^{-4}$ с, что исключает быстрое «включение» усиления и ограничивает возможность прямой модуляции накачкой на частотах выше $10^4 \dots 10^5$ Гц.

Волоконные лазеры — это твердотельные лазеры с оптической накачкой, активным элементом в которых является волокон-

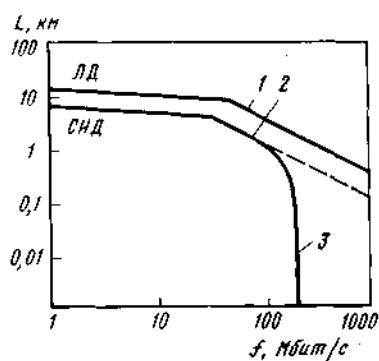


Рис. 5.17. Зависимость длины ретрансляционного участка L от скорости

передачи информации / для ступенчатого световода с затуханием 5 дБ/км. Лазерный диод и СИД работают на длине волны 0,85 мкм:

/ — спад характеристики, обусловленный Ж'жмодовой дисперсией; 2 — спад характеристики, обусловленный дисперсией, вызванной

ный световод с добавками в сердцевине лазерных активаторов, в основном указанных выше ионов неодима и эрбия. Спектральные характеристики усиления ионов неодима и эрбия практически не зависят от внешних условий; температурный дрейф длины волны, соответствующей максимуму усиления ионов неодима, равен $5-10^{-2}$ А/К, тогда как для полупроводниковых сред этот параметр составляет величину 2...5 А/К. Волоконная конструкция излучателя позволяет эффективно, с помощью стандартных разъемов вводить излучение в волоконные световоды, в том числе и одномодовые. Несмотря на эти достоинства и, как будет показано ниже, широкие функциональные возможности волоконных лазеров, они до сих пор не вышли из стадии исследований. Объясняется это тем, что многие задачи решались с использованием хорошо разработанных полупроводниковых излучателей, особенно во внедряемых в первую очередь достаточно простых системах, где определяющую роль играет одно из основных преимуществ полупроводниковых источников — возможность прямой модуляции интенсивности излучения током накачки. Развитие световодных систем, особенно перспективных систем ближайшего будущего — с когерентным приемом и многоканальным спектральным уплотнением, стимулирует разработки волоконных лазеров, которые могут использоваться не только как генераторы, но и как усилители света.

На рис. 5.18 схематически изображена одна из возможных конструкций волоконного оптического усилителя с торцевой полупроводниковой накачкой. Излучение накачки и усиливающее излучение вводятся в активный световод через волоконный разветвитель. Представленный на рисунке узел преобразуется в волоконный лазер — генератор, если на торцах активного световода расположены зеркала, прозрачные для света накачки, но достаточно хорошо отражающие на длине волны генерации. Известны конструкции волоконных лазеров и усилителей, в которых накачка производится светодиодом или газоразрядными лампами с боковой поверхности волокна (поперечная накачка).

Области применения волоконных лазеров в световодных системах определяются их функциональными возможностями. Речь не может идти о том, что волоконные излучатели вытесняют полупроводниковые или наоборот. Эти два класса источников излучения могут дополнять друг друга, значительно повышая возможности системы в целом.

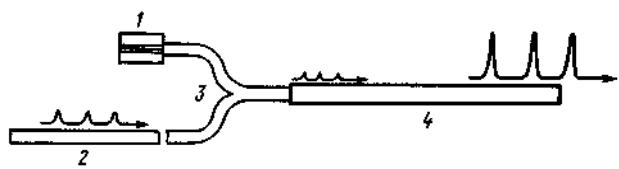


Рис. 5.18. Конструкция волоконного лазера с продольной накачкой:

В системах связи, особенно в системах с когерентным приемом, сочетание полупроводниковых лазеров на ДГС и волоконных лазеров — усилителей на одномодовых волокнах открывает новые перспективы в построении систем. Существующие лазеры на ДГС могут быть выполнены так, что длина волны их излучения совпадет с одной из линий усиления ионов неодима или эрбия (1,06; 1,32 и 1,55 мкм). В этом случае стабилизация длины волны излучения полупроводникового лазера в передатчике (например, с^3 -лазера) по стабильному максимуму линии усиления ионов неодима в волоконном лазере — усилителем задает рабочую длину волны для системы в целом. Поскольку в системах с когерентным приемом оптическое усиление в линии является одной из немногих возможностей регенерации сигнала, одномодовый волоконный оптический усилитель здесь практически незаменим. Во-первых, длина волны излучения передатчика автоматически настроена на максимум усиления ионов неодима; во-вторых, одномодовый волоконный световод усилителя легко стыкуется с одномодовым волокном в линии передачи; в-третьих, оптическое усиление происходит с сохранением спектральных свойств сигнала. Эксперименты по волоконным лазерам — усилителям с поперечной проводниковой накачкой показывают, что в таких устройствах достаточно просто реализуется усиление 25...30 дБ на длине волны 1,06 мкм. При этом при определенных условиях может производиться одновременное усиление сигналов на волнах 1,06 и 1,32 мкм в полосе около 200 А, что открывает новые возможности спектрального уплотнения. Наконец, в оптическом приемнике малошумящий волоконный усилитель может быть использован в качестве оптического предусилителя. Если производится когерентное гетеродинирование, максимум линии усиления ионов неодима в волокне является хорошим репером для предварительной настройки лазера — гетеродина.

Необходимо отметить, что полупроводниковые оптические усилители уступают по своим качествам волоконным. Существенными недостатками здесь являются известная температурная нестабильность линии усиления (0,25 нм/К для $\lambda=1,3$ мкм), значительные потери при стыковке одномодовых волоконных световодов с планарным световодом усилителя

и высокий уровень мощности шума — излучения суперлюминесценции.

Объемные микролазеры представляют собой миниатюрные твердотельные лазеры на объемных (т. е. не обладающих волноводными свойствами) образцах кристаллов, активированных ионами неодима. Миниатюрность конструкции определяется применением эффективной системы накачки с использованием полупроводниковых лазеров и СИД на ДГС GaAlAs. Достаточно узкая (порядка 100 ГГц) однородно уширенная линия усиления ионов неодима в кристаллах обуславливает достаточно высокую монохроматичность излучения микролазеров с характерной для ионов неодима хорошей температурной стабильностью центральной длины волны. Направленность излучения микролазеров выше, чем у полупроводниковых лазеров, что увеличивает эффективность ввода их излучения в одномодовые световоды

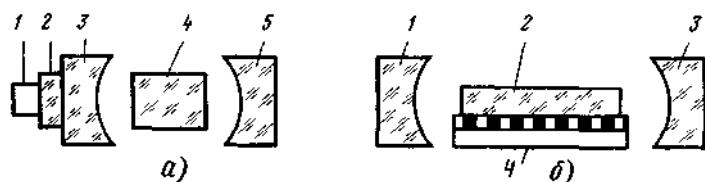


Рис. 5.19. Конструкции объемных микролазеров:

а — лазер с ториевой накачкой; 1 — СИД или ЛД; 2 — коллимирующая линза; 3 — зеркало резонатора, прозрачное для излучения накачки, 4 — активный кристалл; 5 — зеркало резонатора; б — лазер с поперечной накачкой: 1, 3 — зеркала резонатора; 2 — активный кристалл; 4 — линейка СИД на радиаторе

В микролазерах, так же как и в волоконных лазерах, применяются два вида накачки: продольная в торец активного элемента и поперечная линейками СИД через боковую поверхность кристалла (рис. 5.19). Во втором случае для увеличения эффективности накачки используются отражатели. Генерация в микролазерах получена на целом ряде активных сред: на кристаллах с малой (около 1 %) концентрацией неодима Nd (АИГ); со средней (3...8 %) концентрацией этих ионов (примером здесь может служить кристалл калий-гаделиниевого вольфрамата (КГБ) и на высококонцентрированных активных средах — кристаллах $\text{LiNdP}^{\text{3+}}\text{i}$ и NdP_5O_4 , которые, по-видимому, наиболее эффективны (усиление в них достигает 10 дБ/см). К сожалению, кристаллы с высокой концентрацией неодима, как правило, имеют малые размеры (около 1 см) и использование

их в- качестве оптических усилителей представляется проблематичным.

Лекция 7. Фотодетекторы

Функция фотодетектора в волоконно-оптических системах связи и световодных измерительных системах состоит в преобразовании оптического сигнала в электрический сигнал, который затем усиливается и обрабатывается в электронных схемах. Фотодетекторы должны иметь высокую чувствительность в рабочих спектральных диапазонах, минимальные шумы, достаточные для данной системы, быстродействие и линейность отклика, высокую надежность. Полнее всего этим требованиям отвечают полупроводниковые р-і-п фотодиоды (ФД) и лавинные фотодиоды (ЛФД), которые широко используются в волоконно-оптических системах. Они имеют малые размеры и достаточно хорошо стыкуются с волоконными световодами и электронными схемами.

Типичные конструкции р-і-п ФД изображены на рис. 5.20. Между слоями полупроводника с противоположными знаками проводимости (р- и «-слой) расположена область с собственной проводимостью (l-область). Слой р и п с высокой концентрацией примесей имеют малое удельное сопротивление, l-слой — очень большое, близкое к собственному удельному сопротивлению материала. На диод подается обратное напряжение, такое, что l-слой обедняется свободными носителями. Фотоны, поглощаемые в обедненной области, вызывают переходы электронов в зону проводимости, т. е. приводят к рождению пары «электрон-дырка». Свободные носители, генерируемые при поглощении света, разделяются и ускоряются электрическим полем, которое в обедненном слое является сильным и практически однородным, и вызывают фототок в цепи смещения. Электронно-дырочные пары, рожденные вне обедненного слоя, движутся медленно и создают диффузионный ток. Фотодиоды р-і-п типа конструируются так, чтобы свет поглощался в основном в обедненной области, а постоянная времени ФД определялась не диффузией носителей, а их дрейфом с высокой скоростью в р-слое. Поэтому р-слой, через который свет проходит в диодах с фронтальным освещением (рис. 5.20, а), обычно в 10...100 раз ($d < \lambda$ мкм) тоньше l-слоя. В диодах с боковым освещением (рис. 5.20, б) свет попадает непосредственно в обедненную область, однако толщина ее не может быть большой ("и U^50 мкм), чтобы не увеличивать время пролета носителей, поэтому в такой конструкции возникают проблемы стыковки ФД со световодом.

В обеих конструкциях на входную грань ФД наносится просветляющее покрытие, чтобы изменить потери света на френелевское отражение от границы раздела «полупроводник—воздух». В р-і-п БЛ в лучшем случае каждый поглощенный фотон рождает одну 1-ю «электрон—дырка». В ЛФД происходит внутреннее усиление сигнала, поскольку они

сконструированы таким образом, что в них образуется область с сильным электрическим полем ($\mathcal{E} \ll 3 \cdot 10^6$ В/см). В таком поле электроны, генерируемые светом, ускоряются до энергий, достаточных для ударной ионизации атомов кристаллической решетки. Образующиеся в результате ионизации свободные носители также ускоряются и рождают новые пары. Такой лавинный процесс приводит к тому, что поглощение фотона порождает 1 одну электронно-дырочную пару, а десятки и сотни.

($n < 1$), зависящая от конструкции диода, его материала и условий освещения. Зависимость коэффициента умножения M от температуры определяется температурной зависимостью величин U_{np} и n :

$$\left. \begin{aligned} U_{np} &= U_{np0} + a(\mathcal{T} - \mathcal{T}_0); \\ n &= n_0 + b(\mathcal{T} - \mathcal{T}_0), \end{aligned} \right\} \quad (5.19)$$

где U_{np} , n_0 , a , b — эмпирически определяемые коэффициенты. Необходимо отметить, что процесс умножения является статистическим процессом, в ходе которого каждый носитель, рожденный поглощением фотона, создает случайное число вторичных носителей со средним значением M .

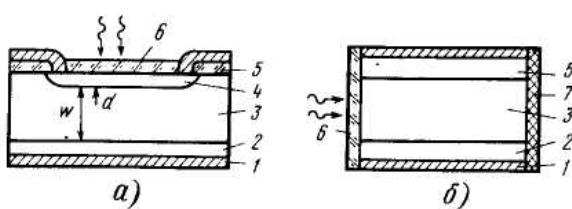


Рис. 5.20. Конструкции p - i - n фотодиодов:

а — диод с фронтальным освещением; б — диод с боковым освещением; 1 — контакты; 2 — слой полупроводника с n -проводимостью; 3 — i -слой; 4 — p -слой; 5 — диэлектрик (SiO_2); 6 — просветляющее покрытие; 7 — отражатель

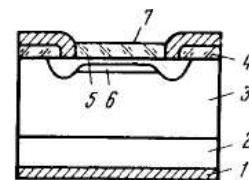


Рис. 5.21. Конструкция ЛФД:

1 — металл, контакты; 2 — p^+ -слой; 3 — n -слой; 4 — SiO_2 ; 5 — n -слой с охранным кольцом; 6 — p -слой; 7 — просветляющее покрытие

Одна из наиболее распространенных конструкций ЛФД схематически изображена на рис. 5.21. Структура ЛФД выращена на высококолегированной кремниевой подложке (p^+ -слой). Основная часть света поглощается, порождая первичные пары носителей, в n -слое с собственной проводимостью. Умножение происходит в p - p^+ -переходе, где электрическое поле велико. Слой с p -проводимостью, необходимый для создания области с умножением, окружен охранным кольцом с n -проводимостью, предотвращающим электрический пробой на краях умножающего перехода. Большая ширина обедненного слоя, относительно тонкий p^+ -контактный слой и просветляющее покрытие делают ЛФД такой конструкции достаточно эффективным.

Величина фототока р-і-п ФД определяется выражением, имеющим ясный физический смысл:

где q — квантовая эффективность фотодетектора; e — заряд электрона; P — мощность оптического излучения; hf — энергия фотона. Таким образом, P/hf есть число фотонов, падающих на детектор в единицу времени. Квантовая эффективность определяет, какая часть фотонов рождает электроны. Число электронов, рожденное в единицу времени, умноженное на заряд, дает величину фототока. Отсюда чувствительность фотодиода

$$S = 0,8q\lambda. \quad (5.22)$$

В обедненном слое поглощаются те фотоны, которые не отразились от поверхности диода и не поглотились в контактном слое, поэтому квантовая эффективность определяется как

$$q = (1 - r) e^{-\alpha d} (1 - e^{-\alpha W}), \quad (5.23)$$

где r — коэффициент отражения света по мощности от границы «воздух—полупроводник»; α — погонный коэффициент поглощения полупроводника; d и W — ширина контактного и обедненного слоев соответственно.

Из выражений (5.21) и (5.23) понятно, что существует «красная граница» в спектральной зависимости чувствительности, определяемая шириной запрещенной зоны. Фотоны с энергией, меньшей ширины запрещенной зоны, не поглощаются ($\alpha = 0$), причем граничная длина волны определяется известным условием (5.2): $Y_{rp} = ch/W_g$ или $Y(\text{мкм}) = 1,2398/\text{ИР,}(\text{эВ})$.

Для диапазона длин волн 0,8...0,9 мкм широкое распространение получили кремниевые детекторы в силу хорошо развитой технологии кремниевых полупроводниковых приборов и малой величины токов утечки. Кремниевые фотодиоды с тонким контактом ($d < 1 \text{ мкм}$) и просветляющим покрытием в этом диапазоне длин волн имеют квантовую эффективность $d = 0,9$ и чувствительность 0,4...0,6 А/Вт. Однако ширина запрещенной зоны (1,1 эВ) ограничивает использование кремния длинами волн не более 1,1 мкм. Для перспективных диапазонов вблизи 1,3 и 1,5 мкм используется германий и соединения $\text{A}_{\text{ш}} - \text{B}_{\text{v}} - \text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{Pi}_{1-y}$, а также $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. Как следует из изложенного выше, чувствительность ЛФД

$$S = Mq \frac{e\lambda}{hc}.$$

юрий чувствительности фотодетекторов определяется как величина мощности излучения, при которой фототок равен шумовому току. Времена прихода отдельных фотонов — случайные величины, подчиняющиеся статистике Пуассона, поэтому ток в каждый момент времени также есть

величина случайная. Как известно, такой шум носит название дробного, среднеквадратическое значение его спектральной плотности для фототока $/\phi$ равно

$$\frac{d}{dF}(\bar{i^2}) = 2ei_\phi,$$

где t — частота сигнала.

Величина $/\phi$ включает ток i_p , вызванный мощностью светового сигнала, и темновой ток $/_t$:

$$i_\phi = i_p + i_t. \quad (5.26)$$

Это означает, что для уменьшения шумов необходимо минимизировать темновые токи, представляющие собой поверхностные и объемные токи утечки. В кремниевых детекторах токи утечки можно снизить до уровня $1\text{СГ}^9 \text{ А}$, в германии и в соединениях $A_{sh} B_v$ они обычно на два порядка выше. Темновой ток растет с температурой по закону $\exp(-Wg/2kT)$, где k — постоянная Больцмана; T — температура, К.

Из (5.20) и (5.25) следует, что пороговая детектируемая мощность и соответствующий ей фототок можно определить из выражений

$$P_{\text{пор}} = \sqrt{2ei_t \Delta F / S}, \quad (5.27)$$

$$i_{\text{пор}} = \sqrt{2ei_t \Delta F}, \quad (5.28)$$

где ΔF — полоса регистрируемых частот. Для реализации пороговой чувствительности необходимо выбрать сопротивление нагрузки (входное сопротивление усилителя) R , такое, что тепловые шумы самого сопротивления не превышали напряжения $U_{\text{пор}}/2$. Расчет показывает, что для кремниевых p-i-n ФД с темновым током $/_t = 10 \text{ А}$ сопротивление R_h должно быть $5\ldots50 \text{ МОм}$. При таких значениях сопротивления сильно ограничивается частотный диапазон фотоприемника, поэтому на практике выбираются значительно меньшие сопротивления нагрузки и порог чувствительности определяется шумами первого каскада усилителя.

В ЛФД спектральная плотность шума определяется выражением

$$\frac{d}{dF}(\bar{i^2}) = 2ei_\phi M^2 F(M), \quad (5.29)$$

где $F(M)$ — коэффициент, учитывающий

где $\beta_{\text{ЭФ}} = P_{\text{р}}/P_{\text{и}}$ — отношение коэффициентов ионизации дырок и электронов соответственно. Для кремниевых ЛФД $\beta_{\text{ЭФ}} \approx 0,01\ldots0,08$, для германиевых ЛФД эта величина обычно выше. Коэффициент умножения M в принципе можно увеличивать до тех пор, пока шумы фотодетектора не сравняются с шумом усилителя. Однако ток сигнала растет

пропорционально M , а шумовой ток — пропорционально $M^2[P(M)]$, поэтому имеется оптимальное для отношения сигнала-шум значение коэффициента умножения. Для кремниевых ЛФД оно составляет величину 80...100. В этом случае ЛФД, безусловно, более чувствительный детектор, чем $p-i-n$ диод, однако необходимо помнить о следующих его недостатках: 1) ЛФД работает при достаточно высоких напряжениях смещения (80...400 В), тогда как $p-i-n$ ФД можно запитывать от источников, используемых для обычных полупроводниковых микросхем; 2) коэффициент лавинного умножения M у ЛФД зависит достаточно сильно от температуры, что зачастую приводит к необходимости термостабилизации.

Линейность выходной характеристики $i_p = SP$ $p-i-n$ фотодиода, работающего с обратным смещением, исключительно высока вплоть до величины $i_p = 10^6/n$, так что световые мощности, используемые в световодных системах ($P \ll 10^3$ Вт), не приводят к насыщению. Первым эффектом, возникающим при возрастании мощности, является уменьшение напряженности электрического поля в обедненной области. Это не уменьшает чувствительности, однако уменьшает скорость движения носителей и соответственно верхнюю граничную частоту детектора.

Линейность выходной характеристики ЛФД также высока для световых мощностей в диапазоне $10^3..10^5$ Вт. При больших уровнях мощности чувствительность снижается из-за накопления пространственного заряда в обедненном слое, приводящего к изменению распределения электрического поля и в результате — к снижению умножения.

Быстродействие $p-i-n$ ФД в пределе определяется временем пролета носителей через обедненный слой. В кремниевых диодах высокий квантовый выход обеспечивается, как уже говорилось, при толщине обедненного слоя $W = 50$ мкм, при этом время отклика составляет 0,5 нс. Для получения большего быстродействия приходится поступаться чувствительностью.

Второе ограничение на быстродействие может накладываться постоянной времени детектора $1/R_C$ ($1/R$ — сопротивление нагрузки, C — емкость диода). Емкость $p-i-n$ фотодиода

$$C = A \epsilon_0 \epsilon_r / W,$$

где A — площадь перехода; ϵ_0 и ϵ_r — диэлектрические постоянные вакуума и полупроводника соответственно. Для кремния $\epsilon_r = 11,7$ и $C = 1,035 \cdot 10^{10} (A/W) \cdot \Phi$. Для серийных диодов обычно $L \approx 1 \text{ мм}^2$, $U = 50 \text{ мкм}$ и $C_{ss} = 2 \text{ пФ}$. Учитывая, что для высокочастотных приемников

Таблица 5.2

Тип фотодиода	Рабочий диапазон длины волн, мкм	Чувствительность, А/Вт	Темновой ток, А	Плотность шумового тока, А/Гц ^{1/2}	Емкость диода, пФ	Постоянная времени, с
Si $p-i-n$	0,8..0,9	0,4	$5 \cdot 10^{-9}..10^{-8}$	—	2..5	$2 \cdot 10^{-9}..5 \cdot 10^{-9}$
Si ЛФД	0,8..0,9	40	—	10^{-11}	2	10^{-9}
Ge $p-i-n$	1,2..1,35	0,4	$2 \cdot 10^{-8}$	—	2..5	$5 \cdot 10^{-9}$
Ge ЛФД	1,2..1,6	10	—	10^{-11}	2	10^{-9}

В ЛФД быстродействие ограничивается теми же факторами, однако полное время дрейфа носителей в них примерно в 2 раза больше, чем р-і-п фотодиода.

В табл. 5.2 приведены технические параметры отечественных серийных полупроводниковых фотодиодов, используемых в ВОСП

Лекция 8. Компоненты волоконно-оптических систем передачи

В данной главе рассмотрены принципы функционирования, основные характеристики и направления развития компонентов ВОСП, позволяющих объединить источник светового излучения, волоконно-оптический кабель и фотоприемник в волоконно-оптическую линию связи (ВОЛС), а также создавать разветвленные ВОСП, такие как локальные сети, световодные измерительные системы и другие перспективные типы систем. Очевидно, что характеристики простейшей ВОСП — линий связи, и в особенности возможность реализации разветвленных сетей для различных применений решающим образом зависят от уровня развития таких компонентов ВОСП, как разъемные и неразъемные соединители, разветвители, мульти-и демультиплексоры, модуляторы и т. д. Для разных компонентов этот уровень в настоящее время различен, но для каждого из них, по-видимому, возможны три различных конструктивных реализации: микрооптическая, т. е. с включением традиционных, но малогабаритных элементов; планарная, т. е. основанная на принципах интегральной оптики, и в перспективе — волоконно-оптическая.

Источники излучения, рассмотренные в гл. 5, являются одним из ключевых устройств ВОСП. Основные достижения в создании источников, как указывалось, связаны с пленарными и полосковыми структурами, но в последнее время особое внимание привлекают волоконные источники и усилители света в связи с их уникальными свойствами. Оптические модуляторы и аттенюаторы, столь необходимые для достижения тех широких возможностей, которые предоставляют ВОСП, существуют пока в микрооптической и планарной формах. Спектральные фильтры интерференционного типа для систем со спектральным уплотнением хорошо известны и могут быть изготовлены в микрооптическом варианте, однако и разработка интерференционных волоконных фильтров чрезвычайно перспективна.

Фотодетекторы на основе волоконных структур, казалось бы, сильно уступают хорошо разработанным традиционным устройствам на базе кремния и германия, также описанным в гл. 5'. Однако возможность безразрывного съема информации реализуется именно в проходных волоконных детекторах, что выгодно выделяет их.

Разъемные соединители — наиболее хорошо разработанный компонент. Доводка их параметров до теоретического предела даже в одномодовом исполнении — чисто техническая проблема. Значительно сложнее обстоит дело с многопортовыми разветвителями, объединителями, а также мультиплексорами и демультиплексорами. Последние два устройства в отличие от разветвителей и объединителей разделяют и суммируют световые потоки на различных длинах волн.

Легко видеть, что почти все устройства, рассмотренные выше, могут

быть изготовлены на основе любой технологии: волоконной, микрооптической, планарной (табл. 6.1). Волоконная и микрооптическая технологии наиболее развиты в части создания пассивных оптических устройств: соединителей, ответвителей, переключателей и т. д. Эти устройства разработаны с параметрами, близкими к теоретически достижимым, и осваиваются производством. Планарная технология наибольшее использование находит в области

создания лазеров, светодиодов и фотодиодов. Практически все источники излучения и фотодетекторы, применяемые в реальных системах, изготавливаются по планарной технологии.

Каждый вид технологии оптимален для определенной группы устройств и обеспечивает им лучшие параметры и технологичность за счет возможности выбора оптимальных материалов и конструкции для дискретных устройств. Однако стремление к интеграции устройств на единой основе (волоконном световоде, подложке, микрооптической пластине) и улучшение за счет этого параметров узлов -в целом стимулирует разработку устройств, не типичных для данного вида технологии, например волоконных лазеров или планарных переключателей. Имеются серьезные успехи в этом направлении. Но устройства, интегрированные на единой основе, еще не достигли параметров, необходимых для реальной аппаратуры. Ниже рассматриваются основные компоненты ВОСП, причем из соображений простоты электродинамический анализ их характеристик проводится для одной из реализаций на планарных или на полосковых волноводах. Анализ волоконно-оптического варианта значительно сложнее, но, как показывает сравнение, приводит к тем же принципиальным выводам.

Для соединения элементов ВОСП между собой требуются простые и надежные соединители волоконных световодов друг с другом (ВС—ВС), с излучателями (ИИ—ВС), фотодетекторами (ВС—ФД) и полосковыми световодами (ВС—ПС).

Оптические соединители (ОС) представляют собой один из самых ответственных классов пассивных компонентов для ВОСП. От их качества зависят предельные возможности и сроки эксплуатации систем. Совокупность требований, предъявляемых к ОС, может быть сформулирована следующим образом: малые оптические потери; стабильность параметров в процессе эксплуатации; устойчивость к внешним механическим и физико-химическим воздействиям; надежность, а также простота сборки, низкая стоимость, герметичность.

Соединители волоконных световодов ВС—ВС основаны чаще всего на непосредственном соединении световодов «встык», иногда в них используются коллимирующие и фокусирующие элементы.

Таблица 6.1

Тип устройства	Исполнение			
	на основе волоконных световодов	микроскопическое на основе		на основе планарных и полосковых световодов
		сферических и градиентных линз	3-мерных линз	
Источники излучения	И	Р	—	Р
Оптические модуляторы	И	Р	В	Р
Спектральные и поляризационные фильтры	И	Р	И	И
Фотодетекторы	И	—	—	Р
Оптические вентили	И	Р	В	И
Соединители:				
ИИ—ВС	Р	Р	И	—
ВС—ВС	Р	Р	И	—
ВС—ПС	—	—	—	Р
ВС—ФД	Р	Р	В	—
Оптические переключатели	Р	Р	В	И
Светоделительные устройства (ответвители, демультиплексоры, поляризационные детали)	Р	Р	И	И
Оптические аттенюаторы	Р	Р	В	И

П р и м е ч а н и е. Р — разработаны, И — в стадии исследований, В — возможная реализация, ИИ — источник излучения, ВС — волоконный световод, ПС — полосковый световод, ФД — фотодетектор.

Сферические линзы (рис. 6.7, а) обладают большой числовой апертурой ($NA > 0,4$) и малым диаметром фокального пятна (8 ... 15 мкм для многомодовых устройств и 2 ... 5 мкм — для одномодовых). Выбором соответствующего материала легко обеспечить требуемые спектральные характеристики. Для линз, применяемых в многомодовых устройствах, — это оптические стекла, чистый кварц, полимерные материалы, для одномодовых ОС наилучшими характеристиками обладает сапфир.

При использовании сферических линз в микрооптических устройствах оптические потери в зависимости от радиального и осевого несовмещения сердцевин световодов и фокуса линзы имеют приблизительно такую же величину, как и в случае непосредственного соединения волоконных световодов, поэтому для достижения потерь менее 0,5 дБ требуется точность совмещения для многомодовых световодов ± 5 мкм. Системы на основе сферических линз очень чувствительны к угловому рассогласованию, для обеспечения потерь менее 0,5 дБ в соединителе одномодовых световодов на основе сапфировых линз диаметром 250 мкм требуется угловое отклонение не хуже чем доли секунды. В таких системах имеют место все оптические потери, вызванные недостаточным качеством обработки торцов и неидентичностью параметров световодов. Дополнительные потери около 0,6 дБ вносят френелевские отражения в связи с тем, что фокус линзы находится на некотором расстоянии от нее и

нельзя обеспечить непосредственное крепление волокна к поверхности линзы. В зависимости от диаметра сферических линз расстояние между линзами, обеспечивающее малое увеличение оптических потерь, меняется от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров.

В целом применение сферических линз в качестве коллимирующих и фокусирующих элементов позволит создать одно- и многомодовые соединители с величиной оптических потерь 0,5 ... 2 дБ.

Градиентные стержневые линзы (рис. 6.7, б), или, как их называют, «граданы» или «селфоки», нашли широкое применение в электрооптических системах и светокопировальной технике, вычислительной технике и ряде других областей. В связи с возможностью жесткого крепления волоконного световода в фокусе градиентной линзы, находящемся на ее плоской поверхности, и малыми аберрациями ОС на граданах перспективны для применения в ВОСП.

Градан представляет собой стержень с радиальным, а иногда и осевым градиентом профиля показателя преломления. Для меридианальных лучей, проходящих через градиентную линзу, в которой радиальное распределение показателя преломления описывается выражением

где по — показатель преломления в центре; r — радиус; g — положительная константа, обеспечивается высокая степень фокусировки. Выражение (6.33) можно представить в виде полинома:

где L — положительная константа, т. е. практически имеет место параболическое распределение показателя преломления. Отклонение ; распределения показателя преломления от оптимального приводит к положительным или отрицательным аберрациям и соответственно к λ увеличению диаметра фокального пятна. Оптимизация технологических режимов позволяет в настоящее время изготавливать граданы с оптимальным профилем показателя преломления, в которых величина аберраций уменьшается практически до нуля и диаметр D ; фокального пятна определяется дифракционными пределом

$$D = 1,22 \frac{\lambda}{n_0 \sqrt{A} R}. \quad (6.36)$$

Числовая апертура граданов максимальна в центре и убывает до 0 на периферии:

Меридианальные лучи распространяются по синусоидальной траектории с периодом

При длине градана, равной $r/4$, он является коллиматором, у которого фокус находится на плоской поверхности.

Технология изготовления граданов достигла весьма высокого уровня, разработаны граданы диаметром 0,5; 1; 2; 5 мм с числовой апертурой от 0,2 до 0,6. Например, для граданов с диаметром 5 мм и $NA = 0,6$ диаметр фокального пятна (на уровне $1/e^2$) составляет всего 1,2 мкм.

Оптические потери на поглощение в диапазоне 0,7 ... 1,6 мкм не превышают 0,05 дБ. Для граданов, используемых в коллимирующей

системе микрооптических устройств, зависимость оптических потерь в системе от точности совмещения сердцевины световода с фокусом такая же, как при непосредственном совмещении волоконных световодов, поэтому допуски при изготовлении деталей устройств, точность позиционирования, сложность сборки также аналогичны чисто волоконным устройствам.

Для ряда применений большим достоинством является расположение фокуса на жесткой поверхности, к которой возможно непосредственное крепление волоконного световода. Зависимость оптических потерь от расстояния между линзами определяется диаметром и числовой апертурой. Для граданов диаметром 2 мм и $M4 = 0,2$ возможно увеличение расстояния до 40 мм без роста оптических потерь, для граданов диаметром 5 мм и $ЛЛ4=0,6$ — до 80 мм. Использование просветляющих покрытий позволяет снизить общие потери в системе на 1 дБ в случае, если волоконные световоды не крепятся жестко к их поверхности.

Для изготовления граданов применяется несколько видов технологий: нейтронная бомбардировка, химические осаждения из газовой фазы, технология полимеризации, ионный обмен, технология пористых стекол, рост кристаллов. Важнейшей чертой любой технологии является обеспечение возможно большего диаметра линзы и изменения показателя преломления, определяющего апертуру, а также возможность оптимизации профиля для устранения аберраций.

Градиентные трехмерные линзы (рис. 6.7, в) — новый, разработанный в последние годы тип коллимирующих микролинз, сочетающий в себе достоинства граданов и одновременно позволяющий обеспечить новый тип интеграции элементов. В настоящее время применяются три метода изготовления интегральных трехмерных линз. Изготовление полимерных микролинз основано на диффузии доцента в планарную подложку через маску. После полимеризации в результате нагрева образуются линзы, имеющие распределенный показатель преломления.

Техника ионного обмена и электродиффузии также основана на диффузии в планарную структуру через маску. За счет ионного обмена при погружении в расплав солей в объеме структуры образуется профиль показателя преломления. Линзы, полученные этим методом, пригодны для использования в волоконно-оптических устройствах с малыми потерями. При соединении многомодовых волоконных световодов через систему трехмерных градиентных линз получены оптические потери порядка 0,5 дБ.

Метод плазменного химического осаждения из газовой фазы позволит получить линзы для создания одномодовых соединителей и других микрооптических устройств.

Независимо от оптической схемы соединители волоконных световодов ВС — ВС делятся на два больших класса: неразъемные и разъемные.

Неразъемные соединители применяются во всех случаях, когда это возможно по условиям сборки узлов и систем или условиям эксплуатации. Разъемные соединители используются тогда, когда необходимо или удобно обеспечить возможность многоразового соединения различных узлов и устройств системы.

Неразъемные оптические соединители обеспечивают минимально возможные оптические потери, так как в них нет френелевских потерь, а также потерь, вызванных неперпендикулярностью, кривизной поверхности или качеством обработки торцов. Структура неразъемного соединителя представлена на рис. 6.8.

Конструктивно и технологически отличаются неразъемные соединители, в которых сращивание волоконных световодов осуществляется сплавлением, сваркой и склеиванием. При изготовлении методом сплавления возможна юстировка сердцевины световодов относительно друг друга визуально либо по оптическому сигналу. При этом достигается лучшее совмещение сердцевин, обеспечивается независимость оптических потерь от геометрических параметров световодов и тем самым меньше оптические потери. В kleевых соединителях, как правило, совмещение производится в элементах крепления при использовании в качестве базовой поверхности самих волоконных световодов, поэтому на оптических потерях оказывается неидентичность диаметров соединяемых волоконных световодов и эксцентричность сердцевин. В неразъемных сварных соединителях всегда обеспечивается защита места сварки с помощью лаков или kleев от внешних воздействий. После сварки прочность волоконного световода снижается приблизительно на 30 % в результате термического удара, поэтому в соединителях применяют упрочняющие элементы (металлические и керамические стержни). Иногда функцию упрочняющего элемента выполняет корпус.

Технология изготовления сварного соединителя включает следующие операции: удаление вторичного и первичного покрытий, скальвание, совмещение сердцевины волоконных световодов, собственно сварку, изготовление защитного покрытия, установку упрочняющего элемента и корпуса, герметизацию. Удаление защитных покрытий, скальвание осуществляют механически с помощью специальных технологических инструментов. При этом оптические потери в соединителе сильно зависят от качества скола.

Совмещение сердцевин волоконных световодов — одна из основных операций, определяющих потери в соединителе. Разработано несколько методов совмещения сердцевины для различных типов волоконных световодов.

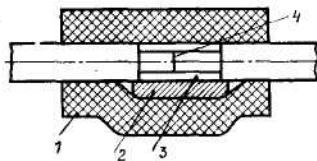


Рис. 6.8. Оптический неразъемный соединитель:

2 — упрочняющий элемент; 3 — корпус; 4 — торцы волокон

Для многомодовых волокон со стандартными геометрическими параметрами достаточно хорошо осуществляется совмещение в V-образной канавке, при этом поверхность волокна используется как базовая. Оптические потери не превышают в данном случае 0,2 дБ. Для одномодовых волоконных световодов совмещение указанным методом не обеспечивает требуемых параметров. Даже при отклонении внешних диаметров соединяемых волокон на 1 мкм и эксцентричности порядка 0,5 мкм могут возникнуть потери порядка 0,5 дБ. В связи с этим разработан ряд методов, основанных на контроле точности совмещения. Совмещение с помощью микропозиционеров и визуального контроля обеспечивает средние потери 0,18 дБ при $X=1,3$ мкм и 0,12 дБ при $L=1,55$ мкм.

Лучшие результаты дает контроль по экстремуму оптического сигнала. Ввод и вывод излучения через торцы соединяемых волокон обеспечивают хорошее качество совмещений, но не всегда удобны, поскольку эти концы могут находиться от места сварки на расстоянии нескольких или даже десятков километров. Значительно удобнее осуществлять вывод излучения на изгибе волоконного световода непосредственно в районе сварки. Для волокон, сердцевины которых изготовлены из кварца, легированного германием, применяется возбуждение излучения ультрафиолетовыми источниками.

Наиболее широкое распространение при сплавлении получила электродуговая сварка из-за простоты регулировки теплового режима и возможности проведения сварки в полевых условиях. Для внут-риблочного монтажа может оказаться более целесообразным применение СОг-лазера, позволяющего осуществлять по 4×10^9 сращиваний без замены газа.

Изготовление защитного покрытия и установка корпуса обеспечивают необходимую прочность неразъемному соединителю. Крепление волоконных световодов к корпусу осуществляется в месте, где не удалены защитные покрытия.

В целом технология изготовления неразъемных соединителей методом сплавления хорошо отработана, обеспечивает оптические потери 0,1 ... 0,2 дБ для много- и одномодовых соединителей. Ее недостатком является применение открытого огня, что не всегда позволяет использовать эту

технологию, например при изготовлении соединителей в помещении с повышенной взрывоопасностью, а также возможное нарушение при сплавлении структуры волоконного световода.

При изготовлении соединителей методом склеивания выполняются те же технологические операции, что и при изготовлении сварных соединителей, но вместо сплавления осуществляется склеивание в юстировочном элементе. Юстировочными элементами служат стеклянные или металлические капилляры; 1/-образные канавки, выполненные в металле, пластмассе или кремниевых пластинах; эласто-мерные трубы.

На оптические потери в этом типе соединителей влияют только радиальное и угловое рассогласования. Для многомодовых световодов со стандартной геометрией склеивание обеспечивает оптические потери на уровне 0,1 ... 0,3 дБ. Для одномодовых волокон непосредственное соединение без подстройки по сигналу недостаточно. Как было показано выше, применение микролинз при соединении волоконных световодов значительно снижает требования к точности совмещения коллимирующей и фокусирующей линз. При использовании микролинз в неразъемных соединителях одномодовых волоконных световодов оптические потери в соединителях не превышают 0,5 дБ, но операции изготовления линз на торцах методами оплавления либо макания в расплав или приклейивания сферических линз к торцам волоконных световодов в полевых условиях осуществить сложно. Кроме того, еще недостаточно изучены вопросы старения kleеных соединений при прохождении через них оптического излучения.

Лекция 9. Ответвители и разветвители

Для распределения сигналов по нескольким каналам или, наоборот, для объединения нескольких сигналов для передачи по одному каналу требуется различного рода ответвители и разветвители.

Разветвитель — устройство, в котором происходит одинаковое (как правило) распределение мощности входного сигнала между двумя или большим числом выходных каналов. При изменении направления световых потоков на противоположное разветвитель выполняет роль объединителя.

Среди ответвителей широкое распространение получили направленные, имеющие два входных и два выходных плеча, причем эти пары плеч внутри себя развязаны. Такой ответвитель осуществляет функцию деления оптической мощности, поступающей на один из входных каналов, только между выходными каналами. При обратном включении устройство также работает как направленный ответвитель (НО).

Аналогично многим другим компонентам ВОСП разветвители и ответвители могут выполняться в микрооптическом, планарном и волоконном вариантах. На рис. 6.10, где представлены волоконные и полосковые устройства, ясно видна разница между ответвителями (рис. 6.10, б, г) и разветвителями (рис. 6.10, а, в). На рис. 6.10, д, е представлены разветвитель и ответвитель в микрооптическом исполнении.

Волноводные ответвители (рис. 6.10, б, г) работают на принципе распределенной ЕВ; л между световодами. Для расчета параметров этих устройств рассмотрим достаточно подробно явление распределенной связи.

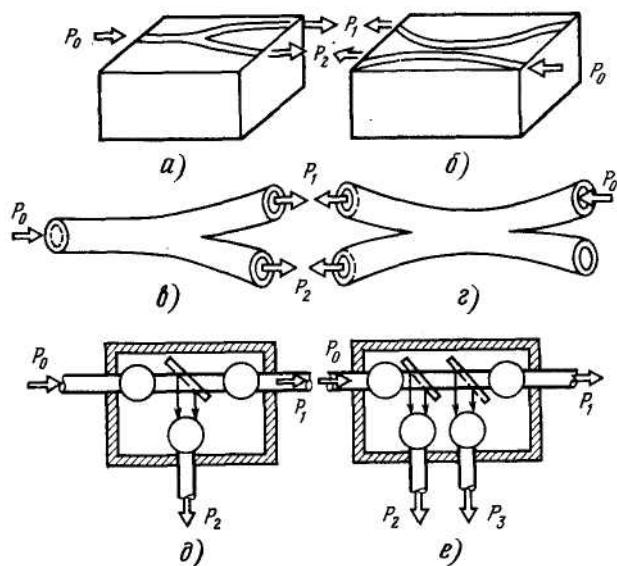


Рис. 6.10. Оптические ответвители и разветвители

Для изготовления отвивтелей и разветвителей на основе волоконных световодов (см. рис. 6.10, в, г) наиболее широко применяются методы сплавления, прецизионной механической обработки и химического травления с последующим восстановлением оболочки волоконных световодов. При сплавлении волоконных световодов защитные оболочки удаляются механически или химически. В ряде способов отражающая оболочка также частично стравливается. Затем световоды на участках, освобожденных от оболочек, перевиваются либо соединяются, после чего сплавляются в печи или электрической дуге. Этим методом могут быть изготовлены много- и одномодовые ответвители, в том числе на световодах, сохраняющих состояние поляризации.

При сплавлении волоконных световодов применяют также биконические элементы, создаваемые оттягиванием концов световодов в процессе сплавления. Ответвители с использованием биконических элементов также не изменяют поляризации проходящего излучения. Вносимое затухание в сплавных ответвителях имеет малую величину (0,2 ... 1 дБ). Требуемые коэффициенты передачи обеспечиваются путем использования непосредственного контроля оптической мощности в процессе сплавления. В связи с отсутствием участков с открытым распространением света параметры устройств стабильны при изменении температуры и других внешних воздействиях. Однако данный метод сложен и трудоемок, требует индивидуальной технологии изготовления каждого ответвителя.

При изготовлении отретвителей методом механической обработки волоконных световодов волокна, предварительно освобожденные от защитных оболочек, вклеивают с заданным радиусом изгиба а квартцевые блоки или капилляры и затем сошлифовывают часть отражающей оболочки таким образом, чтобы после склеивания двух блоков происходила эффективная перекачка мод из одного волоконного световода в другой. Контролируя радиус изгиба и толщину «шлифованного» слоя, обеспечивают заданные коэффициенты передачи. Другой разновидностью ответвителей, изготавляемых методом механической обработки, являются устройства, у которых сердцевина световода сошлифовывается до половины диаметра. После резки и склеивания блоков два сошлифованных световода на выходе имеют диаметр одиночного световода. Этими методами изготовлены одно- и многомодовые ответвители. В одномодовых ответвителях на основе сохраняющих состояние поляризации волоконных световодов поляризация излучения после прохождения ответвителя не изменяется. Возможно создание перестраиваемого ответвителя за счет изменения расположения световодов. Оптические вносимые потери в ответвителях этого типа составляют малую величину (0,5 ... 1 дБ), возможно обеспечить любые заданные коэффициенты передачи, но они изменяются в зависимости от

температуры. Наличие kleеных соединений в принципе должно ухудшить стабильность параметров при влиянии других факторов.

Достаточно простой метод изготовления оптических ответвителей основан на применении многослойных интерференционных покрытий. В этом методе на скошенном торце волоконного световода изготавливают зеркало с заданными коэффициентами отражения и пропускания. Для уменьшения потерь в случае расходности луча, падающего на скошенный торец, применяют также микролинзы на торцах волокон. Данным методом изготавливают многомодовые ответвители, имеющие приемлемое значение вносимого затухания (1,5 ... 2 дБ). Метод, видимо, не применим для создания одномодовых ответвителей. Наличие свободного распространения света или kleеного соединения должно ухудшить стабильность параметров при внешних воздействиях. Основными достоинствами являются относительная простота изготовления, надежность и возможность применения групповой технологии.

При химическом методе изготовления ответвителей волоконные световоды очищают от защитных оболочек, переплетают неочищенные участки и осуществляют травление отражающей оболочки. После достижения заданных коэффициентов передачи, контролируемых по выходному сигналу непосредственно в процессе травления, волокна промывают и осуществляют восстановление оболочек, например из стеклянного геля. Этот метод также позволяет достичь малых вносимых затуханий (менее 1 дБ) и заданных коэффициентов передачи. Достоинством метода является сохранение состояния поляризации распространяющегося излучения. Этот метод трудоемкий, требует индивидуальной технологии, но вносит наименьшие изменения в структуру распространяющейся волны.

Таким образом, все методы изготовления ответвителей на основе волоконных световодов обеспечивают малые оптические вносимые потери, заданные коэффициенты передачи. Ответвители, полученные методами сплавления, механической обработки и химического травления, позволяют сохранить состояние поляризации. Лучшая стабильность параметров достигается у сплавных и химических ответвителей. Последние вносят наименьшие изменения в структуру оптического излучения. Все методы изготовления волоконных ответвителей трудоемкие, требуют сложной прецизионной технологии.

Действие микрооптических ответвителей (см. рис. 6.10, д, е) основано на преобразовании оптического излучения в коллимированный луч, перераспределение энергии в котором легко обеспечить с помощью зеркал с заданными коэффициентами пропускания и отражения. Ввод излучения в выходные волоконные световоды осуществляют с помощью фокусирующих элементов. Разрабатываются оптические ответвители, использующие в качестве коллимирующих элементов сферические,

градиентные стержневые и трехмерные интегральные линзы. Конструктивно и технологически отличаются микрооптические ответвители, в которых применяется расположение зеркал перпендикулярно коллимированному лучу, и ответвители, у которых зеркала устанавливаются под углом 45°. Ответвители первого типа, изготовленные на основе стержневых и интегральных градиентных линз, обеспечивают жесткое крепление волоконных⁸ световодов к поверхностям линз и не имеют участков свободного распространения света. Вносимые потери для многомодовых ответвителей порядка 1 дБ, коэффициенты передачи определяются параметрами зеркал, изготавляемых, как правило, непосредственно на плоской поверхности линз.

Основные технологические проблемы связаны с точным позиционированием и креплением линз и волоконных световодов. Разработаны одномодовые ответвители при перпендикулярном падении луча на зеркало с использованием сферических сапфировых линз. Они имеют вносимые потери порядка 1,5 ... 2 дБ. Нет принципиальных ограничений на создание одномодовых ответвителей с использованием стержневых и интегральных градиентных линз, но для этого требуются линзы высокого качества с очень малыми аберрациями.

Установка зеркал под углом 45° более удобна для реализации многомодовых ответвителей, заканчивающихся разъемными соединителями. Ответвители этого типа имеют вносимые потери порядка 2 дБ, обеспечивают любые заданные коэффициенты передачи. Это, видимо, наиболее технологичный тип многомодовых ответвителей, так как в нем применяется только один однотипный прецизионный узел (линзовый соединитель с волоконным световодом) и изготовление всех элементов ответвителя может осуществляться независимо от других по групповой технологии.

При использовании планарной технологии для изготовления ответвителей применяются, как уже говорилось, либо У-разветвители (см. рис. 6.10, а), либо направленные ответвители (см. рис. 6.10, б). Многомодовые ответвители изготавливают только У-типа, одномодовые — обоих типов. В многомодовых ответвителях серьезной проблемой является согласование модового состава полосковых световодов и соединяемых волоконных световодов, поэтому трудно обеспечить малые потери (менее 2 дБ) на ввод-вывод излучения.

Одномодовые ответвители на полосковых световодах сложны в изготовлении в связи с трудностью процессов формирования световодов с микронными размерами, а также обеспечения надежного соединения волоконного световода с полосковым. Тем не менее изготовлены ответвители, имеющие избыточные оптические потери менее 1 дБ, включая потери на соединение с волоконным световодом. Достоинствами плленарных ответвителей являются групповая технология, возможность

обеспечения заданных коэффициентов деления с высокой точностью.

Итак, изготовление ответвителей можно осуществить на основе любой технологии: волоконной, микрооптической, планарной. В целом все способы обеспечивают относительно малые потери и заданные коэффициенты распределения. Для световодных систем связи, где к стабильности параметров не предъявляется жестких требований, широко применяются микрооптические ответвители, как наиболее технологичные. Проблема минимизации шумов в световодных измерительных системах делает сомнительной целесообразность применения в таких системах любых элементов со свободным распространением излучения. Наличие kleеных соединений также может приводить к появлению дополнительных шумов. С этой точки зрения лучшими параметрами обладают ответвители, изготавливаемые методами сплавления или химического травления волоконных световодов.

Типы переключателей. Важнейшим устройством ВОСП с импульсной модуляцией являются коммутаторы оптических каналов, предназначенных для переключения абонентов между собой и подключения их к общему световодному тракту. Основой коммутаторов являются переключатели оптических каналов. Для использования в коммутационной технике переключатели должны иметь большую развязку между каналами (определенную уровень перекрестной помехи), высокое быстродействие, малые оптические потери, небольшую потребляемую мощность и высокую надежность. При выборе того или иного переключателя всегда приходится искать компромисс между этими параметрами.

Наиболее широкое применение нашли пока механические переключатели, в которых осуществляется перемещение волоконного световода. Совмещение подвижного и неподвижного волоконных световодов производится либо по базовой поверхности V-образной канавки (рис. 6.21), либо за счет точного позиционирования подвижных узлов, содержащих световоды, относительно неподвижных. При совмещении в V-образной канавке необходимо обеспечить центровку световода в наконечнике с такой же точностью, как и в случае оптического соединителя. При применении движущихся узлов добиться точности позиционирования на уровне нескольких микрон сложно, поэтому в таких переключателях, как правило, используют коллимирующие элементы. Перемещение наконечников либо узлов осуществляют для различных типов переключателей вручную с помощью электродвигателей, электромагнитных реле, пьезоэлементов. Широко применяется перемещение за счет магнитного поля, что позволяет сделать корпус герметичным. В этом случае наконечник движущегося волокна изготавливают из магнитного материала. Переключатели этого типа достаточно технологичны, они имеют малые оптические потери для одно- и многомодовых волокон (0,3 ... 1,5 яБ), высокую развязку (свыше 60 дБ,

возможно достижение и 120 дБ), быстродействие 2 ... 50 мс, малую потребляемую мощность 2 ... 20 мВт. Их недостатками являются ограниченное быстродействие и чувствительность параметров к внешним воздействиям. Естественно, переключатели с применением микролинз менее чувствительны к вибрации, тепловым полям и т. д.

Переключатели с применением движущихся зеркал, призм всегда требуют использования коллимирующих элементов (рис. 6.22). Параметры их аналогичны параметрам механических переключателей на основе движущихся волоконных световодов. Достоинства и недостатки их так же, как у механических переключателей. В настоящее время указанные переключатели используются только для многомодовых световодов.

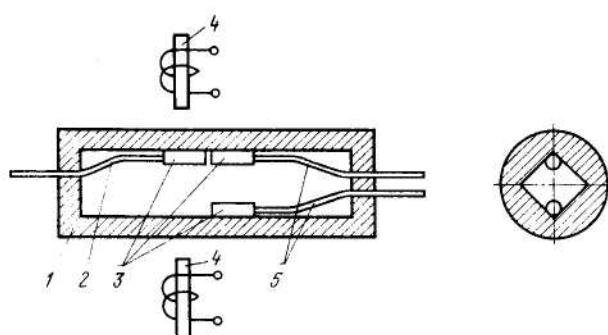


Рис. 6.21. Механический оптический переключатель с движущимся волоконным световодом:

1 — корпус; 2 — подвижный волоконный световод; 3 — наконечники, армирующие волоконные световоды; 4 — магнитная система; 5 — неподвижные волоконные световоды

Разработаны также переключатели с использованием жидкостей в качестве перемещаемого оптического элемента. Переключатель на основе движущегося в электролите зеркала из ртути (рис. 6.23) имеет очень малую управляющую мощность (25 мкВ), выдерживает до 10^7 переключений без деградации, но оптические потери в нем выше (0,5 и 2 дБ), а развязка ниже (22 и 51 дБ) по сравнению с предыдущими. Недостатком всех механических переключателей является наличие движущихся элементов, что принципиально снижает надежность и делает их параметры чувствительными к внешним воздействиям.

Оптические переключатели, изменяющие направление светового потока в результате изменения параметров среды распространения, основываются на управлении коэффициентами отражения и пропускания в жидких кристаллах, акустооптическом, магнитооптическом либо электрооптическом эффектах.

Действие переключателей на жидких кристаллах основано на переориентации молекул в них под воздействием электрического поля, в результате чего изменяются условия прохождения и отражения лучей с различной поляризацией. В настоящее время переключатели этого типа на тонкой пленке кристалла (толщиной 25 мкм) имеют потери 1 ... 2 дБ, малые

управляющие поля (потребляемая мощность 30 ... 50 мкВт, $7 = 30$ В, ≈ 10 мкА), удовлетворительное быстродействие (5 ... 50 мс), но малое значение развязки (10...20 дБ), что существенно ограничивает область их применения. Достоинством переключателей на жидкокристаллических кристаллах является возможность соединения с волоконными световодами с помощью коллимирующих элементов. Современный уровень технологии изготовления всех компонентов позволяет достаточно просто реализовать переключатели для многомодовых световодов, но для одномодовых требуются очень высокие точности изготовления призм, сборки элементов, что создает значительные трудности.

Действие акустооптических переключателей основано на дифракции света на акустических волнах. Исследуются пути создания переключателей на объемных элементах и пленарных световодах. При использовании акустооптических переключателей на объемных элементах ввод и вывод излучения осуществляются с помощью коллимирующих и фокусирующих элементов, что делает возможным обеспечение малых оптических потерь (2 дБ) для многомодовых волокон. Для одномодовых волокон проблема согласования, как и в рассмотренных выше случаях, требует повышенной точности изготовления элементов. Переключатели этого типа имеют быстродействие порядка $10^{*} \dots 10^{8}$ с, но малые величины развязки (10 ... 20 дБ).

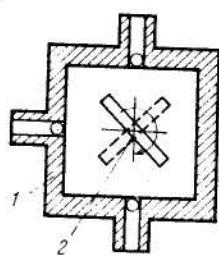


Рис. 6.22. Механический оптический переключатель с движущимся зеркалом:

1 — корпус с линзовыми разъемными соединителями; 2 — вращающееся зеркало

210

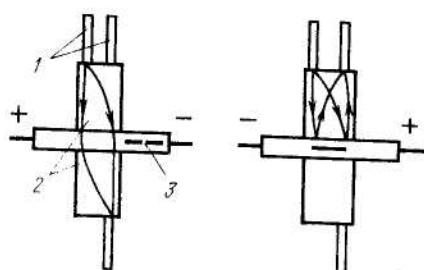


Рис. 6.23. Оптический переключатель с движущимся в электролите зеркалом:

1 — волоконный световод; 2 — градиентные линзы; 3 — ртутное зеркало в электролите

Акустооптические переключатели на пленарных световодах (рис. 6.24) могут использоваться только в одномодовых системах. Пленарный световод / изготавливают из фотоупругого материала, например LiNbCh, TagOg, ZnO. Акустические волны возбуждаются с помощью электродов, нанесенных на поверхность волновода, в виде встречно-штыревого преобразователя 2. Ввод (под углом β) и вывод (под углом 0) излучения из одномодового волоконного световода требуют применения коллимирующих и фокусирующих элементов и призм, элементов

периодического типа и т. д. Магнитооптические переключатели на основе эффекта Фарадея используют поворот плоскости поляризации в пластине из магнитооптического материала, например в иттриево-железистом гранате (рис. 6.25). Направление вектора намагниченности в пластине и соответственно направление вращения плоскости поляризации изменяется внешним магнитным полем, создаваемым катушкой с сердечником из магнитожесткого материала. В зависимости от поляризации излучение в призме распространяется в одном из двух направлений (обыкновенного или необыкновенного луча). Для работы такого переключателя требуется коллимированный свет, поэтому ввод (вывод) излучения в волоконные световоды осуществляется через микролинзы.

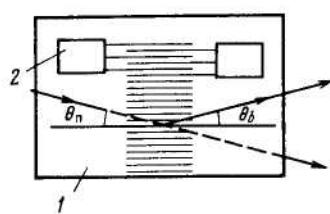


Рис. 6.24. Принцип действия брэгговского акустооптического переключателя:

1 — подложка из акустооптического материала с планарным световодом;
2 — электроды

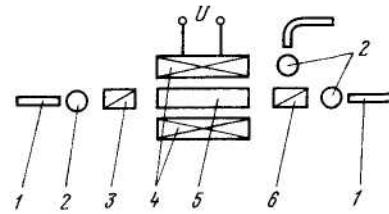


Рис. 6.25. Магнитооптический переключатель на объемных элементах:

1 — волоконные световоды; 2 — микролинзы; 3 — поляроиды; 4 — электромагнитная система; 5 — магнитооптический элемент; 6 — анализатор

Разработаны магнитооптические переключатели на объемных элементах для много- и одномодовых волоконных световодов. Они имеют достаточно высокую скорость переключения (десятки микросекунд), умеренные оптические потери (несколько децибел), величину развязки порядка 20 ... 30 дБ и довольно высокий уровень потребляемой мощности (для переключения требуются импульсы 1x500 мА и Uzz5 В). Снизить управляющую мощность на два порядка удается за счет преобразования ТЕ- и ТМ-мод в пленарных магнитооптических световодах, но такие световоды могут применяться только с одномодовыми волокнами и имеют большие оптические потери. В электрооптических переключателях используется эффект изменения показателя преломления среды под действием управляющего электрического поля, создаваемого с помощью электродов. Объемные переключатели этого типа (с толщиной пластины 50...80 мкм) требуют слишком больших управляющих напряжений (400...700 В), что практически исключает возможность их использования в ВОСП.

Для многомодовых систем электрооптические переключатели разрабатываются на основе пленарных световодов. Для систем на одномодовых волоконных световодах лучшие параметры из всех типов переключателей имеют электрооптические переключатели на полосковых световодах, обеспечивающие быстродействие выше 10^{-9} с, и малые оптические потери (3 дБ), включая потери на согласование с входными и вы-

ходными волокнами. Это — самый перспективный (но технологически и самый сложный) тип оптических переключателей.

Литература

1. Громаков Ю.А. Стандарты и системы подвижной радиосвязи. М.: Эко- Трендз Ко, 1997.-238 с.
2. Андрианов В.И., Соколов А.В. Средства мобильной связи. ВНВ- Санкт- Петербург, 1998.- 256 с.
3. Невдяев Л. CDMA: IS-95. Сети, 2000, № 3
4. Невдяев Л. Стандарты 3G. Сети, 2000, № 6
5. Ибраимов Р.Р. Мобильные системы связи. Учеб. пос., ТУИТ, 2004.
6. Спутниковая связь и вещание. /Под общ.ред. Л.Я.Кантора. М.: Радио и связь, 1997
7. Аболиц А. Персональная спутниковая связь. PC Week/RE, 1997.
8. Невдяев Л. Спутниковые системы. <http://www.osp.ru/>
9. Замарин А.И. и др. Спутниковые сети VSAT. Информация и космос № 3.2004.
10. Овчинников А.М. Сравнение стандартов цифровой транкинговой радиосвязи. st.ess.ru/publications/articles/ovchinkv2/ovchkv2.htmЛитература

1. Громаков Ю.А. Стандарты и системы подвижной радиосвязи. М.: Эко- Трендз Ко, 1997.-238 с.
2. Андрианов В.И., Соколов А.В. Средства мобильной связи. ВНВ- Санкт- Петербург, 1998.- 256 с.
3. Невдяев Л. CDMA: IS-95. Сети, 2000, № 3
4. Невдяев Л. Стандарты 3G. Сети, 2000, № 6
5. Ибраимов Р.Р. Мобильные системы связи. Учеб. пос., ТУИТ, 2004.
6. Спутниковая связь и вещание. /Под общ.ред. Л.Я.Кантора. М.: Радио и связь, 1997
7. Аболиц А. Персональная спутниковая связь. PC Week/RE, 1997.
8. Невдяев Л. Спутниковые системы. <http://www.osp.ru/>