**ЛЕКЦИЯ N1**

Введение. Оптические системы связи (ОСС). Классификация и принципы построения ОСС.(Уч.пос-2,с 12)

**Введение**

В последние годы скорость строительства и введения в эксплуата­цию волоконно-оптических сетей и систем различного назначения пре­взошла самые оптимистические прогнозы. К 2008 г. во всем мире изго­товлено и смонтировано более 100 млн. км оптических кабелей, которые являются доми­нирующей основой развивающейся глобальной информационной сети.

Технический облик волоконно-оптической системы передачи начала XXI века должен определяться в первую очередь внедрением новых промышленных и информационных технологий, от которых зависит их надежность, экономичность и потен­циальные возможности.

Оптические кабели, которым пока нет альтернативы, в бли­жайшие десятилетия будут оставаться основным видом направляющих систем. Обладая высокой пропускной способностью, они позволяют в течение срока службы увеличивать объем передаваемой информа­ции без существенных дополнительных затрат на модернизацию ли­нейных трактов волоконно-оптической системы передачи.

Поэтому основным направлением совершенствования волоконно-оптической системы передачи в бли­жайшее время останется увеличение объема передаваемой информа­ции.

Будет происходить дальнейшее развитие тенденций, наметив­шихся в предыдущие годы: освоение четвертого и пятого окон про­зрачности оптического волокна, разработка новых типов одномодовых оптических волокон с пониженной хроматической дисперсией и малым наклоном дисперсионной кривой, увеличение дальности передачи путем широкого внедрения оптических усилителей и компенсаторов хроматической дисперсии.

Продолжат­ся также исследования полностью оптических элементов коммутации, оптических регенераторов и солитонов.

Дальнейшее совершенство­вание методов плотного волнового (спектрального) мультиплексирова­ния DWDM и введение в коммерческую эксплуатацию систем передачи, использующих оптические солитоны, будет началом эпохи полностью оптических «терабитных» волоконно-оптических систем передачи.

**1 Классификация и принципы построения оптических систем передачи**

В настоящее время оптические системы связи (ОСС) получили широкое распространение в системах связи и кабельного телевидения, системах передачи данных и управления, в бортовой аппаратуре и т.п.

По протяженности ОСС можно подразделить на три группы: ло­кальные (внутриобъектовые), средней протяженности и магистральные.

Локальные ОСС используются в сетях передачи данных внутри предприятий, на подвижных объектах гражданского и военного назна­чения, в вычислительных комплексах.

ОСС средней протяженности предназначены для цифровых сетей интегрального обслуживания и для связи тактического военного назначения.

И, наконец, магистральные ОСС используются для дальней многоканальной связи на магистраль­ных и внутризоновых системах и сетях.

Для передачи информации в современных ОСС применяют вре­менной и частотный методы разделения каналов. Электрический сиг­нал, сформированный тем или иным методом, модулирует оптическую несущую источника оптического излучения. Поскольку электрический ток на выходе фотоприемника (фотодиод, лавинный фотодиод) про­порционален мощности (интенсивности) принимаемого светового потока обычно применяется модуляция интенсивности оптической несущей, при которой амплитуда модулирующего электрического сигнала опре­деляет мощность излучения оптического источника.

Существуют два основных способа модуляции — внутренний и внешний. Внутренняя модуляция осуществляется непосредственным воздействием на источник оптического излучения. Так получают мо­дуляцию интенсивности. Внешняя модуляция позволяет при помощи специального устройства — модулятора изменять параметры излучения немодулируемого источника. При этом можно осуществить не толь­ко модуляцию интенсивности, но и другие виды модуляции, основан­ные на изменении частоты, фазы и поляризации оптической несущей, которые по ряду причин еще не получили широкого распространения на практике.

Современные ОСС обычно являются цифровыми, наиболее ча­сто применяют импульсно-кодовую модуляцию интенсивности (ИКМИ), так как при этом в значительной степени снижаются требования к ли­нейности амплитудных характеристик источников и приемников опти­ческого излучения.

Типовая структурная схема цифровой ОСС представлена на рисунке 1. Основными элементами системы являются оптический линей­ный тракт и оконечные устройства — передающая и приемная станции.

На передающей станции N первичных цифровых электрических сиг­налов (основных цифровых каналов ОЦК) со скоростью передачи ин­формации 64 кбит/с поступают в оконечную аппаратуру типовой мно­гоканальной системы передачи (МСП). С выхода МСП групповой N-канальный электрический сигнал подается на устройство сопряжения (кодер), где преобразуется в форму, наиболее удобную для передачи по линейному тракту. Затем в оптическом передатчике электрический сигнал путем модуляции оптической несущей преобразуется в оптиче­ский сигнал и передается по ОВ линейного тракта.

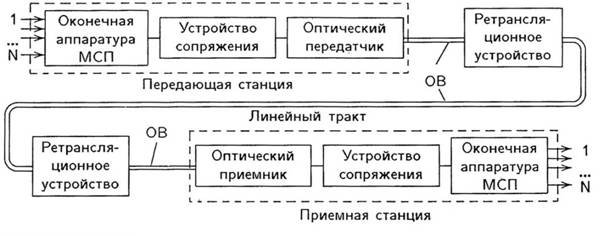


Рисунок 1 - Типовая структурная схема цифровой ОСС

На приемной станции осуществляется обратное преобразование принимаемого оптического сигнала в N первичных цифровых электри­ческих сигналов. Для этого последовательно используются оптический приемник, устройство сопряжения (декодер) и оконечная аппаратура типовой МСП.

Оптические сигналы, распространяющиеся по ОВ, затухают вслед­ствие потерь в самом кабеле, а также потерь в соединениях строитель­ных длин и оконечных разъемных соединителях в местах подключения аппаратуры. Кроме того, дисперсия импульсных сигналов увеличива­ет шумы в канале передачи и вызывает кодовые ошибки при приеме. Поэтому, если приемная и передающая станции удалены на большое расстояние друг от друга (например, на несколько сот км), может потребоваться дополнительно одно или несколько промежуточных ретрансля­ционных устройств.

В качестве таких устройств используются линейные регенераторы и оптические усилители (рисунок 2).

Линейный регенератор (рисунок 2, а) восстанавливает первоначаль­ную форму оптического сигнала. Поскольку при существующей эле­ментной базе компенсацию затухания и коррекцию искажений целесо­образно производить с электрическими сигналами, линейный регене­ратор состоит из оптического приемника, электронного регенератора и оптического передатчика. Входной оптический сигнал сначала преобра­зуется в электрическую форму, усиливается и корректируется, а затем вновь преобразуется в оптический сигнал.

Оптический усилитель (рисунок 2,б) в отличие от регенератора не осуществляет оптоэлектронного преобразования, а выполняет прямое усиление оптического сигнала.

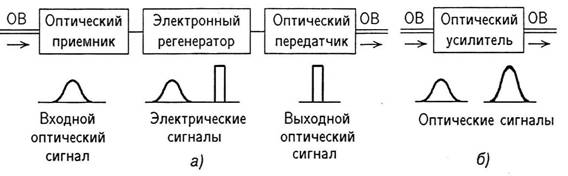


Рисунок 2 - Схемы ретрансляционных устройств: a– линейный генератор; б– оптический усилитель

 Первоначальная форма сигнала при этом не восстанавливается, что является существенным недостатком оптического усилителя. Однако в ряде случаев на практике применение оптических усилителей является весьма эффективным.

При построении сетей кабельного телевидения применяют анало­говые ОСС, в которых оптический передатчик осуществляет преобра­зование широкополосного аналогового электрического сигнала в ана­логовый оптический, а оптический приемник — обратное преобразова­ние. При этом амплитудные характеристики оконечных устройств долж­ны иметь высокую линейность, а аналоговое ретрансляционное устрой­ство, в основном, выполняет функцию усилителя, который вместе с по­лезным сигналом усиливает также входной шум.

Рассмотренная структурная схема предназначена для передачи сигналов в одном направлении по одному оптическому волокну (ОВ), которое является ана­логом двухпроводной электрической линии. Для встречной передачи необходим еще один комплект оконечных и линейных устройств и вто­рое ОВ. Обычно в обоих направлениях сигналы передаются в одном и том же оптическом диапазоне (чем достигается однотипность оборудо­вания), а ОВ объединяются в одном оптическом кабеле (ОК), поскольку взаимные влияния между ними практически отсутствуют. Таким образом, ОСС являются однополосными и однокабельными.

Увеличение объема передаваемой информации (информационной емкости) ОСС в основном осуществляется по тем же принципам, что и электрических систем аналогичного назначения. Это, прежде все­го, увеличение количества ОВ для каждого направления передачи. По одному многоволоконному ОК по рассмотренной схеме организуются линейные тракты нескольких N-канальных ВОСП, причем для каждого направления используется половина ОВ (включая резерв). Этот экстен­сивный метод увеличения пропускной способности ОК обычно приме­няют в ОСС средней и малой протяженности при сравнительно низких скоростях передачи информации (до десятков мегабит в секунду).

Увеличение пропускной способности магистральных ОСС может быть достигнуто не только применением многоволоконных ОК, но и увеличением скорости передачи (числа каналов N) различными мето­дами уплотнения передаваемой информации - мультиплексировани­ем. Мультиплексирование, т.е. объединение в один групповой сигнал сигналов нескольких передатчиков, можно осуществить либо до пре­образования электрических сигналов в оптические, либо после пре­образования.

Простейшая принципиальная схема временного мультиплексирова­ния электрических сигналов представлена на рисунке 3. Две серии им­пульсов, поступающие с входов А и В (в общем случае может быть М), при помощи мультиплексора объединяются в определенной после­довательности чередования в групповой сигнал. Последний в оптиче­ском передатчике модулирует оптическую несущую, затем преобразо­ванный в световой поток проходит по ОВ и в оптическом приемнике вновь превращается в электрический сигнал. Этот сигнал разделяется демультиплексором на две серии импульсов, подобных входным, кото­рые поступают на выходы А' и В'.

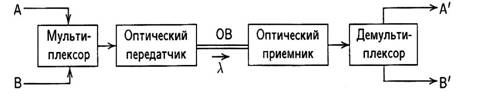


Рисунок 3 - Схема временного мультиплексирования электрических сигналов

Временное мультиплексирование оптических сигналов (рисунок 4) отличается тем, что сначала две серии электрических импульсов (в общем случае М) поступают в идентичные оптические передатчики, где преобразуются в оптические сигналы, а затем последние при помощи мультиплексора объединяются в групповой оптический сигнал. На при­еме осуществляется обратное преобразование.

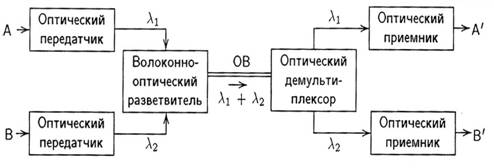


Рисунок 4 - Схема временного мультиплексирования электрических сигналов

При волновом (спектральном) мультиплексировании оптических сигналов (рисунок 5) в простейшем случае две серии электрических им­пульсов с входов А и В поступают в оптические передатчики, где мо­дулируют оптические несущие с длинами волн  и соответствен­но.

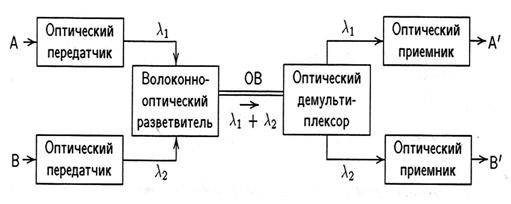


Рисунок 5 - Схема волнового мультиплексирования оптических сигналов

Оптический мультиплексор объединяет монохроматические свето­вые потоки в групповой поток, который проходит по ОВ.

Оптический демультиплексор разделяет групповой поток на два монохроматиче­ских световых потока, а оптические приемники преобразуют их в две серии электрических импульсов.

Своеобразной разновидностью волнового мультиплексирования ОВ является дуплексная система, осуществляющая многоканальную связь во встречных направлениях на различных оптических несущих  и (рисунок 6).

Разделение встречных сигналов на концах оптической линии можно осуществить при помощи волоконно-оптических разветвителей и оптических полосовых фильтров.

Принципиальной особенностью такой системы является наличие межсимвольных искажений между встречными сигналами, которые воз­никают за счет обратного рассеяния в ОВ и отражений от соединений строительных длин и оконечных разъемов.

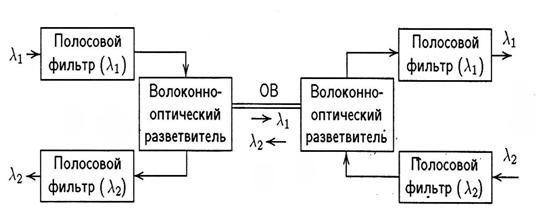
******

Рисунок 6 - Схема двунаправленной (дуплексной) системы передачи по одно­му ОВ

При волновом мультиплекси­ровании относительно высокие плотности оптической мощности мо­гут вызвать заметное проявление нелинейных эффектов. В результа­те возникает взаимодействие между монохроматическими световыми потоками, которое еще более усиливается при использовании опти­ческих усилителей.

**ЛЕКЦИЯ 2**

**1.1 Оптический передатчик.  Передающий оптоэлектронный модуль**

 Оптический передатчик передающей станции (см. рисунок 1) пре­образует электрические сигналы в оптические и обеспечивает передачу последних по ОВ линейного тракта. В состав оптического передатчика обычно входят источник оптического излучения, согласующее оптиче­ское устройство, электронные схемы модуляции и стабилизации режи­мов работы источника излучения.

Источник оптического излучения является основным элементом оптического передатчика. Он должен излучать на длине волны, соответ­ствующей одному из окон прозрачности ОВ; обеспечивать достаточно высокую мощность излучения и эффективный ввод его в ОВ; иметь вы­сокое быстродействие, позволяющее осуществлять высокоскоростную модуляцию; отличаться простотой, надежностью и малыми габаритами. Этим требованиям наиболее полно удовлетворяют полупроводниковые источники излучения: светодиоды (СД), суперлюминесцентные светодиоды (СЛД) и лазеры (ПЛ). Основу работы полупроводниковых ис­точников излучения составляет инжекционная электролюминесценция, представляющая собой излучательную рекомбинацию носителей (элек­тронов и дырок), инжектированных в активную область полупроводни­ковой конструкции из материалов с прямозонными переходами.

Среди полупроводниковых материалов, обладающих свойствами прямозонного перехода (для перехода электрона из одной зоны в дру­гую достаточно изменить только его энергию), наилучшими свойствами обладают арсенид галлия (GaAs), фосфид индия (InP) и соединения на их основе. Полупроводниковые материалы на основе кремния (Si) и германия (Ge) являются непрямозонными (для перехода электрона тре­буется изменить не только его энергию, но и импульс). В них вероят­ность излучательной рекомбинации мала по сравнению с другими вида­ми рекомбинации (ударная, на дефектах или примесях и др.), которые не сопровождаются излучением, а связаны в основном с выделением тепла. Поэтому они непригодны для источников оптического излучения.

Применяются две основные конструкции СД: с поверхностным и торцевым излучением. Основой первой является двухслойный полупро­водник, содержащий *р-п*переход.   При прямом напряжении смещения спонтанная излучательная рекомбинация происходит непосредственно в области *р-n*перехода, а свет распространяется по всем направлениям. Поэтому излучение на вы­ходе СД является некогерентным и слабо­направленным. Ширина спектра излучения  = 20...40 нм.

В СД с торцевым излучением используется двойная гетероструктура (ДГС), предоставляющая собой в упрощенном виде трехслойный                                                                                                                                                                                               полупроводник (рисунок 7). Излучательная рекомбинация происходит в узком активном слое *1.*Пассивные слои *2*образуются из полупроводниковых материалов с большей ши­риной запрещенной зоны *Еg1 > Еg2.*Граница раздела между двумя слоями с различными *Еg*называется гетеропереходом.

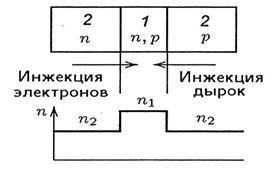


Рисунок 7 - Схематичное изображение двойной гетеростуктуры

 Отличительная особенность гетероперехода - односторонняя ин­жекция, обусловленная потенциальным барьером (скачком потенциала)  *E*на границе раздела. Поэтому в ДГС при прямом напряжении сме­щения происходит инжекция электронов и дырок из *n*и *р*областей в активный слой, где носители зарядов удерживаются за счет двух потен­циальных барьеров на гетеропереходах.

Другая особенность ДГС - это то, что показатель преломления ак­тивного слоя больше, чем пассивных ()- Поэтому рекомбинационное излучение распространяется вдоль активного слоя, испытывая полное внутреннее отражение на границах.

Вывод получения из источников с ДГС осуществляется с торца. По­скольку его распространение сопровождается большими потерями на поглощение, активный слой делают очень тонким (порядка 0,5 мкм). Ширина активного слоя, определяющая интенсивность излучения, в среднем составляет 20...40 мкм, но может достигать 100 мкм.

Длина волны излучения =*1,24/Еg1\*мкм, где *Еg1*= электрон-вольт. Следовательно, используя полупроводниковые материалы с раз­личной шириной запрещенной зоны, можно получить источники с раз­личной длиной волны. Например, при добавке к арсениду галлия при­меси алюминия GaAIAs   = 0,85 мкм, а для получения  = 1,3 и 1,55 мкм необходимо применять арсенид-фосфид галлия и индия (InGaAsP), варьируя композиционный состав.

В торцевых СД, как и в СД с поверхностным излучением, исполь­зуется механизм спонтанной рекомбинации, что делает источники не­когерентными. Однако частичная внутренняя канализация спонтанного излучения активным слоем позволяет сделать излучение торцевых СД на выходе более направленным.

При повышении напряжения смещения (тока накачки) спонтан­но образующиеся фотоны, которые распространяются вдоль активного слоя, оказываются способными инициировать случаи излучательной рекомбинации носителей, т.е. создавать подобные себе фотоны. Это вызывает как спонтанное излучение, так и стимулированное (вынужден­ное), которое обусловлено усилением спонтанного излучения.

Источни­ки, использующие этот режим работы ДГС, называются суперлюминес­центными светодиодами или диодами со сверхвысокой яркостью (СЛД). Поскольку фотоны могут слегка отличаться энергией и иметь разные фазы, излучение СЛД еще не когерентно, но более направленно, чем у торцевых СД, а ширина спектра излучения составляет  = 10...20 нм.

Поместив ДГС в оптический резонатор, можно при превышении то­ком накачки некоторого порогового значения получить усиление, пре­вышающее оптические потери в резонаторе, и создать условия, при которых будет существовать только вынужденное излучение в актив­ной области.

Наличие резонатора позволяет значительно увеличить интенсивность излучения на одной (основной) или нескольких низших модах резонатора. Источники этого типа являются когерентными и называются полупроводниковыми лазерами (ПЛ). Они отличаются вы­сокой направленностью излучения, спектр которого является дискрет­ным.

Поскольку число генерируемых мод обычно достаточно велико, спектр излучения многомодового ПЛ составляет 1...3 нм. Для селекции мод применяются специальные меры: распределенная обратная связь (DFB-лазер), распределенное брэгговское отражение (DBR-лазер) и др. Источники, способные излучать на одной моде, получили название одномодовых ПЛ. Их спектр излучения не превышает 0,1 нм.

Полупроводниковые источники позволяют легко осуществить вну­треннюю модуляцию оптического излучения по интенсивности. Напря­жение смещения (ток накачки) управляет инжекцией носителей зарядов и, следовательно, в широких пределах меняет интенсивность выход­ного излучения.

Высокое быстродействие ПЛ, которое определяется временем вынужденного излучения и временем жизни фотонов, может обеспечить скорость передачи сигналов порядка нескольких гигабит в секунду.

Быстродействие некогерентных источников на порядок ниже и определяется временем спонтанной рекомбинации носителей и емко­стью *р-n*перехода. Это делает возможным использование СД в ВОСП со скоростью передачи сигналов до 100 Мбит/с, а СЛД — до 200 Мбит/с.

К числу основных параметров источников излучения, определяю­щих возможность их применения в ВОСП, относятся:

-  средняя мощность излучения при работе в непрерывном режиме; 

-  длина волны излучения;

-  углы расходимости пучка световых лучей;

- ширина спектра излучения;

-  срок службы (наработка на отказ).

Это означает, что оптимальными источниками излучения для ВОСП являются ПЛ. Высокая средняя мощность излучения (порядка 10 мВт) и малые углы расходимости пучка лучей позволяют обеспечить передачу сигналов по ОВ на расстояние десятков километров без усиления. Од­нако высокие плотности рабочих токов накачки и дефекты полупровод­никовых структур, неизбежно возникающие в процессе производства ПЛ, являются причиной ограничения их срока службы (не более 5\*105 ч). Кроме того, для ПЛ характерна температурная зависимость порогового тока, длины волны и мощности излучения.

Для уменьшения температур­ных влияний используют теплоотводы и различные цепи обратной связи, но это удорожает оптический передатчик и снижает его надежность.

Следует отметить, что ширина спектра излучения в значительной мере определяет возможности применения ПЛ. В высокоскоростных ВОСП для уменьшения хроматической дисперсии (увеличения длины регенерационных участков) необходимо применять одномодовые ПЛ. Од­нако основным недостатком этих лазеров является сложная технология изготовления и, как следствие, высокая цена.

Многомодовые ПЛ имеют более скромные технические характери­стики, но с точки зрения «цена — эффективность» они вне конкуренции на магистральных и внутризоновых ВОСП, где не требуется очень вы­сокой скорости передачи.

СД и СЛД обладают некоторыми преимуществами по сравнению с ПЛ. Они проще, дешевле, отличаются высокой долговечностью (поряд­ка 106 часов и более) и достаточно высокой температурной стабиль­ностью параметров. Однако большая расходимость пучка лучей, ши­рокий спектр излучения и ограниченное быстродействие существенно сужают область применения светодиодов: они используются в линиях малой и средней протяженности.

Энергетическая яркость (плотность) излучения любого источника не остается постоянной в пределах его пучка лучей. Обычно она мак­симальна на оси пучка и убывает по определенному закону в напра­влениях, образующих возрастающие углы *<р*с осью. Угловое распре­деление энергетической яркости принято характеризовать диаграммой направленности (ДН). Ширина ДН равна 2, где *—*угол между осью и направлением, в котором энергетическая яркость равна поло­вине ее максимального значения.

ДН светодиодов с поверхностным излучением обычно обладает осевой симметрией, а ее ширина равна 120°. У источников с ДГС по­верхность излучения имеет форму узкой полоски, а ДН несимметрична. В Случае СЛД частичная внутренняя канализация спонтанного излуче­ния позволяет уменьшить ширину ДН в плоскости, перпендикулярной полоске, до 30°, а в плоскости полоски она остается равной 120°.

У ПЛ за счет лазерного эффекта ширина ДН в указанных плоскостях обычно не превышает 30° и 20° соответственно.*А*(для параболического ОВ Аэфф). ОВ может захватывать и направлять только те световые лучи, которые падают на его торец под углами *в,*не превыша­ющими предельный угол захвата *тах.*Это означает, что при непосред­ственном соединении источника излучения с ОВ (встык) большие потери на вводе могут появиться при  > *тах.* Кроме того, если размеры по­верхности излучения источника больше диаметра сердцевины ОВ, часть мощности излучения не попадает в ОВ, а рассеивается в окружающем пространстве. Расчеты показывают, что для СЛД и ПЛ, серийно выпус­каемых отечественной промышленностью и предназначенных для ВОСП, потери на вводе составляют 10...16 дБ и 5...7 дБ соответственно.

Повысить эффективность ввода можно при помощи оптического со­гласующего устройства, которое устанавливается между источником и торцом ОВ, и в простейшем случае представляет собой увеличитель­ную линзу. Назначение линзы (сферической или цилиндрической) со­стоит в том, чтобы уравнять полуширину ДН источника с апертурным углом ОВ *(* > *тах*).

Применение линз целесообразно в случаях, когда размеры поверх­ности излучения источников существенно меньше диаметра сердцевины ОВ. Это объясняется тем, что уменьшение угловой расходимости пучка происходит одновременно с увеличением размеров изображения излу­чающей поверхности, создаваемым линзой.

Поэтому в случае мощных источников излучения и одномодовых ОВ кроме линз в оптическое со­гласующее устройство вводятся фоконы, позволяющие уменьшить раз­меры изображения излучающей поверхности. Фокон представляет со­бой отрезок ступенчатого или градиентного ОВ с плавно изменяющимся поперечным сечением.

На рис. 8 приведена структурная схема одного из вариантов оптического согласующего устройства. Цилиндрическая линза *2*представляет собой отрезок параболического ОВ большого диа­метра (порядка 2 мм), Подбором длины, формы и профиля показателя преломления фокона *3*можно уменьшить потери на вводе до 2...3 дБ.

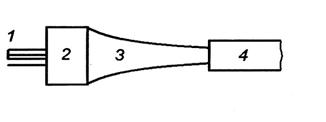


Рисунок 8 - Схема оптического согласующего устройства: 1- источник излучения с ДГС;  2– линза;  3–фокон;  4–ОВ

ПОМ с ПЛ, кроме того, содержит цепь обрат­ной связи, при помощи которой поддерживается постоянной мощность излучения при изменении температуры и действии других дестабили­зирующих факторов. В качестве датчика обратной связи используется pin-фотодиод. Ответвление части оптической мощности в цепь обрат­ной связи осуществляется с заднего торца ПЛ, а фототок датчика ис­пользуется для управления режимом работы ПЛ.

Все ПОМ работают на одной моде; в корпус встроен InGaAsP-фотодиод. Диапазон длин волн выпускаемых модулей от 0,8 до 1,55 мкм, мощность излучения от 1 до 100 мВт.

**1.2 Оптический приемник. Приемный оптоэлектронный модуль**

  Оптический приемник приемной станции (см. рисунок 1) осуществля­ет преобразование оптического сигнала в электрический ток (напря­жение), что позволяет осуществлять обработку сигналов электронными схемами. В состав оптического приемника обычно входят фотодетек­тор, приемное оптическое устройство, электронные схемы усиления и обработки электрического сигнала, схемы ста­билизации или автоматической регулировки усиления.

Фотодетектор, как и источник оптическо­го излучения, должен отвечать определенным требованиям, а именно: обладать высокой чув­ствительностью и быстродействием, вносить минимальные шумы в приемную систему, отличаться стабильностью рабочих характеристик, иметь небольшие раз­меры, быть высоконадежным и недорогим.

Полнее всего этим требованиям удовлетворяют полупроводнико­вые фото детекторы, которые выполняются из материалов, обеспечива­ющих максимальную чувствительность на рабочей длине волны. При  = 0,85 мкм используется кремний Si, а в длинноволновой обла­сти  = 1,3...1,6 мкм — германий Ge или сложные соединения вида InGaAs, InGaAsP, InGaAsSb.

Среди полупроводниковых фотодетекторов наибольшее примене­ние в ВОСП получили pin-фотодиоды (ФД) и лавинные фотодиоды (ЛФД). В основе их работы лежит явление внутреннего фотоэффекта в полупроводниковом материале, которое заключается в образовании пары носителей зарядов (электрон и дырка) при поглощении фотона, энергия которого больше или равна ширине запрещенной зоны. Структура pin-фотодиода схематично показана на рисунке 9.

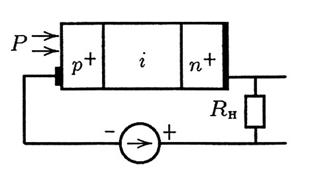
******

                 Рисунок 9 - Схема структуры pin-фотодиода

Ме­жду тонкими слоями сильно легированных полупроводников *р*+- и *n+-*типа (знак «+» означает сильное легирование) расположен слаболеги­рованный полупроводник n-типа. При обратном напряжении смещения в последнем образуется обеднённая г-область.

Электрическое поле в основном сосредоточено в этой области, поскольку ее сопротивление значительно больше, чем сопротивления *р*+ и *n+*-слоев.

В результате поглощения фотонов падающего излучения в pin-структуре образуются электронно-дырочные пары. В*i*- области под дей­ствием сильного электрического поля происходит быстрое разделение носителей зарядов (дрейфовое движение), что обеспечивает высокую скорость процесса преобразования оптического излучения в электри­ческий ток. Поскольку г-область достаточно широка, достигается и вы­сокая эффективность процесса преобразования.

В *р+-*и *n+*-слоях электрическое поле практически отсутствует. Вследствие этого движение носителей зарядов в них возможно, в основном, за счет диффузии, скорость которой примерно на три по­рядка ниже скорости дрейфового движения. Таким образом, диффузи­онный ток ухудшает быстродействие ФД.

Кроме того, поскольку раз­деление носителей происходит медленно, часть из них рекомбинирует, и эффективность работы ФД снижается.  Чтобы уменьшить эти нежелательные эффекты, при разработке конструкции ФД -слой стремят­ся сделать как можно тоньше, а толщину г-слоя выбирают достаточно большой, чтобы обеспечить полное поглощение падающего излучения.

Основными параметрами ФД являются квантовый выход (эффек­тивность),  токовая чувствительность *S* и  темновой ток *Т*.

Квантовый выход определяет ту часть общего количества элект­ронно-дырочных пар, которая разделяется pin-структурой и вызывает в сопротивлении нагрузки *RH*протекание фототока. Спектральная за­висимость квантового выхода определяется материалом полупровод­ника (рисунок 10).

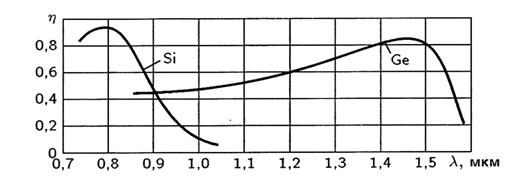


Рисунок 10 - Спектральная зависимость квантового выхода полупроводниковых фотодетекторов на основе кремния (Si) и германия (Ge)

Токовая чувствительность — это отношение среднего значения фо­тотока в нагрузке *RH* к среднему значению мощности падающего опти­ческого излучения: *S* = *ф/Р,*А/Вт. Она связана с квантовым выходом соотношением **= 1,245/, где  — в микрометрах. Типичное значение *S*на рабочей длине волны *S =*(0,5...0,8) А/Вт.

В отсутствие падающего на ФД оптического излучения при обрат­ном смещении через нагрузку протекает ток, который называется темновым. Этот ток вызывает дробовый шум и в ряде случаев ограничивает чувствительность оптического приемника.

Величина темнового тока за­висит от материала полупроводника, температуры и конструкции ФД. Наибольший темновой ток в германиевых ФД (порядка 10-7 А), наи­меньший — в кремниевых (порядка 10-9А).

В реальном оптическом приемнике с ФД темновой ток является не единственным источником шума. Суммарный шум определяется также сопротивлением нагрузки и, главным образом, электронным усилите­лем, подключенным к ФД.

При увеличении дальности связи мощность падающего излучения уменьшается настолько, что на выходе усилите­ля суммарный шум оказывается недопустимо большимпо сравнению с полезным сигналом, что исключает возможность последующей обработ­ки последнего. Чтобы шум усилителя не ограничивал чувствительность оптического приемника, следует предварительно увеличить полезный сигнал (фототок), поступающий на вход усилителя.

Увеличение первичного фототока мож­но обеспечить механизмом лавинного умноже­ния, который используется в ЛФД. Полупро­водниковая структура ЛФД схематично показа­на на рисунке 11. Профиль распределения ле­гирующих примесей подбирается таким обра­зом, чтобы при сравнительно большом обрат­ном напряжении смещения левее обедненной*i*- области в узком *р*- слое (области лавинного умножения) создавалось сильное электрическое поле. В этом поле обусловленные фотоэффек­том первичные носители зарядов преобретают кинетическую энергию, достаточную для создания новых электронно-дырочных пар путем удар­ной ионизации.

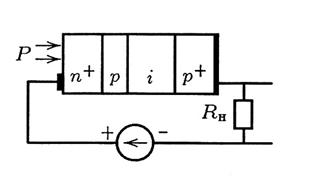
****

Рисунок 11 - Схема структуры ЛФД

Поскольку и эти носители в свою очередь вызывают ударную ионизацию, процесс размножения носителей преобретает ла­винообразный характер, В результате получается ФД с внутренним усилением фототока.

Усиление ЛФД характеризуется коэффициентом лавинного умно­жения *М,*который показывает, во сколько раз выходной ток ЛФД пре­вышает первичный фототок фотодиода при отсутствии в нем процес­са ударной ионизации.

Величина *М*обычно составляет несколько де­сятков, поэтому токовая чувствительность ЛФД значительно превышает токовую чувствительность ФД и обычно составляет *S*= (20...60) А/Вт. Это позволяет существенно снизить требования к шумам и коэффици­енту усиления электронного усилителя.

Темновой ток в ЛФД состоит из двух частей. Одна часть вызвана поверхностными токами утечки, а вторая проходит внутри объема полу­проводника через область лавинного умножения и поэтому усиливается.

ЛФД всегда обеспечивает более высокую чувствительность опти­ческого приемника, чем ФД. Однако ЛФД работает при значительно более высоком напряжении питания (порядка сотен вольт), имеет мень­шую надежность и относительно высокую стоимость.

Кроме того, коэф­фициент лавинного умножения сильно зависит от напряжения питания, что вызывает необходимость в использовании схемы обратной связи в тракте прохождения сигнала.

Особенности ВОСП определяют выбор фотодетектора. В маги­стральных линиях всегда стремятся увеличить расстояние между ре­трансляционными устройствами, что требует максимальной чувстви­тельности оптического приемника. В этих случаях применяются ЛФД. Простота и надежность ФД позволяют использовать их во всех случаях, когда они удовлетворяют требованиям по чувствительности.

Соединение фотодетектора с ОВ осуществляется непосредствен­но (встык). Поскольку диаметр светочувствительной поверхности ФД и ЛФД (порядка 0,5 мм) значительно больше диаметра сердцевины ОВ (небольше 0,05 мм), почти весь световой поток попадает в фотодетектор, и небольшие угловое и радиальное смещения не вносят заметных потерь. Основной причиной возникновения потерь при соединении является от­ражение, обусловленное, во-первых, наличием зазора между торцом ОВ и светочувствительной поверхностью, и, во-вторых, скачком пока­зателей преломления граничащих сред.

Поэтому для уменьшения от­ражаемой мощности зазор заполняют прозрачным связующим веще­ством (иммерсионной жидкостью) с показателем преломления, равным показателю преломления сердцевины, и на светочувствительную по­верхность фотодетектора наносят антиотражающее покрытие, показа­тель преломления которого равен среднегеометрическому из показа­телей преломления граничащих сред, а толщина — четверти рабочей длины волны. Вносимые потери в приемном оптическом устройстве при этом не превышают 2 дБ.

Световой поток, переданный по ОВ в оптический приемник, пре­образуется фотодетектором в электрический сигнал, который после усиления в малошумящем предварительном усилителе поступает на главный усилитель и далее в устройства обработки сигнала.

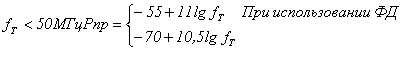
Повышение чувствительности приема достигается за счет увеличения входного со­противления предварительного усилителя. Для этого в первом каскаде применяется полевой (ПТ) или биполярный (БТ) транзистор.

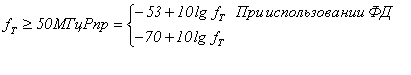
Основным параметром оптического приемника является пороговая чувствительность (минимально допустимый уровень мощности прини­маемого оптического сигнала)

*P*= 10lg дБм (Р0 = 1мВт).

При заданной вероятности ошибки (или заданном отношении сиг­нал/шум) пороговая чувствительность зависит от скорости передачи информации (тактовой частоты следования оптических импульсов), ти­па фотодетектора и предварительного усилителя. При расчете необ­ходимо учитывать эффективность преобразования оптического сигна­ла в электрический, уровень шумов фотодетектора и предваритель­ного усилителя.

Приближенно пороговая чувствительность определяется по следу­ющим формулам

 при использовании ЛФД,

 при использовании ЛФД.

Отметим,  что для обеспечения максимальной чувствительности оптического приемника при т < 40 МГц целесообразно в первом каскаде предварительного усилителя применять ПТ, а при т< 40 МГц — применять БТ.

Фотодетектор и предварительный усилитель конструктивно объ­единяются в приемный оптоэлектронный модуль (ПРОМ). Излучение вводится через отрезок ОВ, к которому при помощи разъема присо­единяется внешнее ОВ кабеля.

При использовании в качестве фото­детектора ЛФД можно не только поддерживать постоянным коэффи­циент лавинного умножения, но регулировать его в достаточно широ­ких пределах. Это способствует увеличению динамического диапазона ПРОМ, но связано с применением схемы автоматической регулиров­ки усиления (АРУ).

Промышленно разработаны и производятся ПРОМ для диапазонов 0,8...1,6 мкм, предназначенные для скоростей пе­редачи информации до 2,5 Гбит/с. Параметры основных типов ПРОМ представлены в таблице 1.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Таблица 1 | | | |
| Тип модуля | Скорость передачи информации, Мбит/с | Пороговая чувстви­тельность, дБм | Динамический диапазон, дБ |
| ПРОМ-364 | 4 16 68 320 | -55 -51 -44 -35 | 52 48 41 32 |
| ПРОМ-363 | 565 1200 | -37 -33 | 25 20 |
| ПРОМ-365 | 2500 | -28 | 20 |
| ПРОМ-367 | 4 16 68 | -48 -45 -40 | 45 42 37 |
| Примечание -Значения пороговой чувствительности приведены при вероятности ошибки 10-9, кроме значения для ПРОМ-365 (10-10). | | | |

 В состав модулей входят высокоскоростные ФД и ЛФД на осно­ве кремния (=0,8...0,9 мкм) и многокомпонентного полупроводника InGaAsP ( = 0,98...1,6 мкм). Предварительные усилители выполнены по тонкопленочной гибридной технологии.

Основное назначение ПРОМ-364 — работа в цифровых магистраль­ных ОСС с большим динамическим диапазоном принимаемых сигна­лов. Модуль ПРОМ-367 является модификацией ПРОМ-364 и предна­значен для работы в ОСС средней и малой протяженностей, но может быть использован и на магистральных линиях, где не требуется пре­дельно высокой чувствительности оптического приемника.

В высокоскоростных ОСС применяют ПРОМ-363 и ПРОМ-365. Эти модули имеют в своем составе быстродействующий ФД и широкопо­лосный усилитель с регулируемой полосой усиления до 2 ГГц. Для выравнивая АЧХ используется внешнее корректирующее устройство — эквалайзер, а для расширения динамического диапазона — схема ста­билизации рабочего режима.

На рисунке 12 показана структурная схема оптического приемника. Решающее устройство производит оценку значений передаваемых сим­волов (1 или 0). Для этого в решающем устройстве периодически с тактовой частотой производится стробирование сигнала на выходе главного усилителя и сравнение полученного отсчета с порогом.

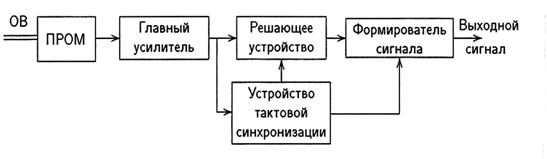
****

Рисунок 12 - Структурная схема оптического приемника

При превышении порога в формирователе сигнала вырабатывается необ­ходимый прямоугольный импульс.

Устройство тактовой синхронизации выделяет из принимаемого сигнала синхроимпульсы тактовой частоты и вырабатывает короткие импульсы, при помощи которых осуществляет­ся стробирование сигнала в наиболее удобные моменты (вблизи ам­плитуды импульсов).

**ЛЕКЦИЯ 3**

**1.3 Оборудование оптоволоконной системы связи ОСС.**

**Ретрансляционные устройства. Мультиплексоры**

 Оптические сигналы при распространении по ОВ кабеля ослабля­ются и искажаются.

Поэтому, как указывалось ранее, для увеличения дальности и качества связи в магистральных ВОСП вдоль линейного тракта через определенные расстояния *Lp,*обусловленные затухани­ем и дисперсией в ОВ, устанавливаются ретрансляционные устройства: линейные регенераторы и оптические усилители.

Линейный регенератор (ЛР) восстанавливает амплитуду, форму, длительность и положение оптических импульсов цифрового оптическо­го сигнала, т.е. осуществляет его регенерацию.

ЛР — сложное и дорогостоящее устройство. Каждый из двух его по­лукомплектов (отдельно для встречных направлений передачи), содер­жит ПРОМ, электронный регенератор (ЭР) и ПОМ (рис. 13).

Принима­емый оптический сигнал преобразуется в электрический, в таком виде усиливается и корректируется, а затем вновь преобразуется в оптиче­ский сигнал для передачи по ОВ.

Электронный регенератор (ЭР) содержит усилитель, решающее устройство, формирователь сигнала, устройство тактовой синхрони­зации, т.е. все электронные устройства оптического приемника (см. рисунок 12).

Однако в отличие от последнего прямоугольные электриче­ские импульсы (с определенной амплитудой и длительностью), которые вырабатываются формирователем сигнала, поступают не на декодер, а модулируют оптическую несущую источника излучения ПОМ.

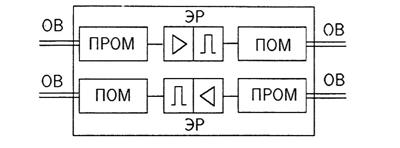
****

Рисунок 13 ***-***Структурная схема линейного регенератора

Существенным упрощением ЛР является применение прямой опти­ческой регенерации без оптоэлектронного преобразования. Однако чисто оптические регенераторы — дело будущего.

Разработанные в последние годы оптические усилители (ОУ), выполняющие более про­стую функцию — прямое усиление оптических сигналов, обладают ря­дом ценных свойств, которые позволяют увеличить длину регенерационного участка, уменьшить число регенераций, упростить схему передачи, и тем самым уменьшить расходы на оборудование ОСС.

В настоящее время наиболее перспективными для ОСС считают­ся следующие типы ОУ:

           -  полупроводниковые усилители:

           -  усилители на основе нелинейных явлений в ОВ;

           -  усилители на примесном ОВ.

 Принципы действия указанных ОУ весьма сложны и их рассмотре­ние выходит за рамки настоящего пособия. Поэтому ограничимся лишь общей характеристикой.

Полупроводниковые усилители подразделяются на усилители бегу­щей волны (УБВ) и усилители Фабри-Перо (УФП). Их отличает эконо­мичность, простая конструкция, высокий коэффициент усиления (25...30дБ). До недавнего времени полупроводниковые усилители счи­тались наиболее подходящими для работы во 2-м окне прозрачности. Однако в последнее время появились сообщения об успешных разра­ботках усилителей для 3-го окна.

Важной особенностью УФП являет­ся то, что они всегда могут быть перестроены для усиления только на одной определенной длине волны. Это позволяет широко использо­вать их в оптических коммутаторах и демультиплексорах для разде­ления по длинам волн.

Во втором типе ОУ обычно используются вынужденное комбина­ционное (рамановское) рассеяние (ВКР-усилители) и вынужденное рас­сеяние Мандельштама-Бриллюэна (ВРМБ-усилители).

Эти нелинейные эффекты дают возможность преобразовать часть энергии мощной вол­ны накачки в слабую сигнальную волну. При малом входном сигнале ОУ обеспечивают усиление до 40 дБ во 2-м и 3-м окнах прозрачности.

У ВРМБ-усилителей выходной сигнал сосредоточен в узком диапазо­не (меньше 100 МГц), т.е. они могут использоваться для узкополосно­го усиления, в то время как ВКР-усилители достаточно широкополос­ны (5...10 ТГц), и могут использоваться в системах волнового мульти­плексирования для усиления сразу нескольких сигналов на различных оптических несущих (нескольких волновых каналов). Однако большие переходные помехи между усиливаемыми каналами — существенный недостаток ВКР-усилителей.

Основным элементом ОУ третьего типа является ОВ, легированное редкоземельными металлами (примесное ОВ). Ионы металлов создают активную среду для усиления в определенных полосах длин волн, кото­рые соответствуют полосам поглощения легирующих металлов. Обыч­но используются три редкоземельных металла: неодим (Nd), празео­дим (Рг) и эрбий (Ег).

ОУ, использующие два первых металла (они называются соответ­ственно NDFA и PDFA), работают во 2-м окне прозрачности. В настоя­щее время они находят ограниченное практическое применение.

Эрбиевые усилители (EDFA) обеспечивают широкую полосу усиле­ния (до 40,8 нм) в 3-м окне прозрачности, что особенно важно при создании полностью оптических ВОСП с волновым мультиплексирова­нием. Однако у них коэффициент усиления сигнала существенно за­висит от его входной мощности и длины волны, поэтому для полу­чения максимально плоской характеристики усиления необходимо ис­пользовать различные выравнивающие фильтры.

У лучших промышлен­ных усилителей EDFA коэффициент усиления достигает 40 дБ в поло­се 1530...1570 нм при неравномерности характеристики 0,6...1,5 дБ. Уже разработаны усилители EDFA с рабочей полосой 84,3 нм (1530... ...1614 нм) в 3-м и 4-м окнах прозрачности.

Сравнительный анализ параметров ЛР и ОУ позволяет сделать не­которые выводы. ЛР осуществляет регенерацию цифрового оптиче­ского сигнала, но имеет сложную конструкцию и, как следствие, вы­сокую стоимость и относительно низкую надежность.

Кроме того, ЛР обычно предназначен для работы на определенной скорости переда­чи информации и не допускает одновременной передачи нескольких волновых каналов, что затрудняет его использование в ОСС с вол­новым мультиплексированием.

ОУ имеет простую и высоконадежную конструкцию, а его стоимость постоянно снижается. Он не привязан к скорости передачи информации, что позволяет увеличивать пропуск­ную способность действующих ОСС без значительного увеличения за­трат на оборудование.

Создание современных сверхпротяженных ВОСП невозможно без ЛР. Однако в ряде случаев применение ОУ весьма эффективно.

 Это, прежде всего, относится к внутризоновым ОСС на одномодовом ОК с малой дисперсией при сравнительно небольших скоростях передачи информации.

Высокая надежность ОУ является важным преимуществом при создании ретрансляционных устройств для подводных ОСС.

Очень эффективным является совместное использование ЛР и ОУ (а в ряде случаев и компенсаторов дисперсии) на высокоскоростных сверхпротяженных ОСС. В них на один ЛР может приходиться от 4 до 8 линейных ОУ.

 Последние применяют не только в качестве ретрансляционных уст­ройств. Их часто устанавливают непосредственно за оптическим пере­датчиком, обеспечивая высокий уровень сигнала (бустеры), непосред­ственно перед оптическим приемником (предусилители), а также вну­три или на выходе устройств, которые вносят нежелательные потери (например, компенсаторы дисперсии).

**1.4 Оптические соединители**

  Оптический соединитель (ОС) представляет собой устройство, предназначенное для соединения компонентов линейного тракта ОСС. Применяются неразъемные и разъемные ОС.

Неразъемные ОС обеспе­чивают постоянное соединение ОВ строительных длин ОК между собой, а также с некоторыми другими компонентами (волоконно-оптические разветвители, станционные ОК).

Разъемные ОС (разъемы) допускают многократное оптическое соединение и применяются для соединения оконечных и ретрансляционных устройств с ОВ кабеля, а также для подключения приборов при проведении измерений.

ОС должны иметь малые вносимые и высокие возвратные потери, быть устойчивыми к внешним воздействиям (механическим, климатиче­ским и др.), отличаться простотой конструкции и высокой надежностью.

Дополнительно к разъемным ОС предъявляются требования неизмен­ности параметров при повторных соединениях и отсутствии необходи­мости в дополнительной юстировке.

При соединении ОВ с одинаковыми размерами и профилем пока­зателя преломления наиболее эффективно торцевое соединение.

По­скольку вносимые и возвратные потери в ОС возникают главным обра­зом из-за неточности оптической юстировки, основной задачей при торцевом соединении является обеспечение строгой соосности, пер­пендикулярности поверхностей торцов осям и высокая степень глад­кости торцов ОВ.

На рисунке 14 показаны возможные дефекты при торцевом соеди­нении ОВ.

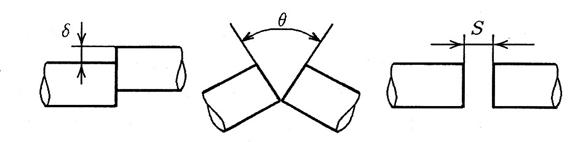
****

 Рисунок 14 ***-***Виды дефектов при торцевом соединении

Коэффициент передачи оптической мощности из одного ОВ в дру­гое:

          - при радиальном смещении *K*= 1 - */2а;*

          - при угловом смещении *K*= 1 — */2 тах;,*

          - при осевом смещении *Ks =*1 – *S*tg max/*4*a.

          Здесь *а*и mах — радиус сердцевины и апертурный угол ОВ.

Вносимые потери при рассогласовании определяются по форму­ле

ai =10lg(1/Ki) = -10lgKi (i = ,*, S).*Расчеты показывают, что наиболее жесткие требования предъявляют к радиальному и угло­вому смещениям.

 В настоящее время для постоянного соединения ОВ кабелей по­чти всегда применяют сварные соединения. Освобожденные от покры­тия ОВ после шлифовки торцов закрепляют в юстировочном устройстве и сваривают электрической дугой или лазерным лучом. Типовые вно­симые потери в таких соединителях составляют менее 0,2 дБ, а при высоком качестве - меньше 0,1дБ.

При проведении ремонтных работ, когда отсутствует сварочный ап­парат, а также при создании временных соединений для измерений и тестирования используется механическое соединение ОВ. В механи­ческом неразъемном ОС концы ОВ выравниваются друг относительно друга в направляющем устройстве (V-образная канавка или металли­ческие стержни) и фиксируются при помощи клея или прижима. Для улучшения оптических характеристик ОС часто используется гель с со­ответствующим показателем преломления. При этом вносимые поте­ри не превышают 0,2 дБ.

Конструкции разъемных ОС весьма разнообразны, но наиболее ча­сто используются ОС с наконечниками, принцип действия которых по­казан на рисунке 15.  Концы ОВ *1*закрепляются в наконечниках *2*при помощи клея, а юстировка наконеч­ников и их фиксация производится центрирующей муфтой *3.*

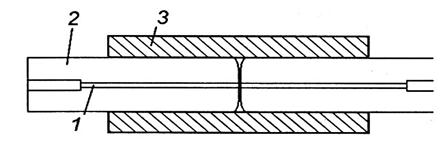


                Рисунок 15**-**К пояснению прин­ципа действия разъемного ОС с  наконечниками

Торцы наконечников полируют­ся таким образом, чтобы придать им слегка выпуклую форму. В результате между ОВ возникает плотный кон­такт без воздушного зазора.  Такой вид соединения имеет более высокую оптическую эффективность, чем в случае плоских торцов.

Оптические характеристики разъемных ОС определяются качест­вом полировки торцов наконечников. Типичные значения вносимых по­терь 0,2...0,3 дБ, возвратных потерь 30...60 дБ.

Наконечники могут быть керамическими или металлическими (на­пример, циркониевые). Центрирующая втулка изготавливается из брон­зы, латуни или керамики.

Обычно разъемные ОС рассчитаны на 500...1000 повторных со­единений. При этом увеличение вносимых потерь не должно превы­сить 0,2 дБ.

Кроме одиночных ОС разработаны и применяются двойные ОС, обеспечивающие двунаправленную передачу по паре ОВ, соединители для двух пар ОВ и для волоконных лент.

**3.3 Компоненты системы DWDM: мультиплексоры и демультиплексоры**

Мультиплексирование и демультиплексирование спектральных компонент отдельных сигналов в системах WDM основано на использовании комбинированных или последовательно расположенных узкополосных фильтров.

Каждый лазерный передатчик в системе WDM выдает сигнал на одной из заданных частот. Все эти сигналы (каналы) необходимо мультиплексировать (объединить друг с другом) в единый составной сигнал. Устройство, которое выполняет эту функцию, называется оптическим мультиплексором MUX (или OM). Аналогичное устройство на другом конце линии связи разделяет составной сигнал на отдельные каналы и называется оптическим демультиплексором DEMUX (или OD). В отличие от систем TDM, в которых подобные операции уплотнения каналов происходят во временной области, и основное внимание уделяется точности синхронизации приемника и передатчика, в системах WDM мультиплексированию и демультиплексированию подвергаются спектральные компоненты отдельных сигналов, характеристики которых всегда известны заранее.

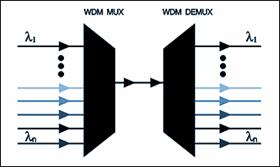


Рисунок 24 - Мультиплексор и демультиплексор

Оптическое мультиплексирование и демультиплексирование основано на комбинированных или расположенных последовательно друг за другом узкополосных фильтрах. В частности, для фильтрации применяют тонкопленочные фильтры, волоконные или объемные брэгговские дифракционные решетки, сварные биконические волоконные разветвители, фильтры на основе жидких кристаллов, устройства интегральной оптики (матрицы фазовых волноводных дифракционных решеток или фазары).

В настоящее время наибольшее распространение получили устройства оптического мультиплексирования и демультиплексирования с частотным интервалом между отдельными каналами в 100 ГГц (~0,8 нм), наиболее распространенный в существующих системах WDM. Появляющиеся в последнее время мультиплексные устройства могут обеспечить большую плотность размещения каналов с частотным интервалом 50 ГГц и меньше. Современные оптические мультиплексоры создаются преимущественно на основе тонкопленочных фильтров и, немного реже – на матрицах волноводных дифракционных решеток и волоконных брэгговских решетках. При дальнейшем увеличении плотности размещения каналов в системах DWDM и ужесточении требований к оптическим устройствам MUX/DEMUX, по-видимому, будет меняться и спектр используемых технологий.

**3.4 Технологии мультиплексирования**

**Тонкопленочные фильтры**

         Тонкопленочный фильтр состоит из нескольких слоев прозрачного диэлектрического материала с различными показателями преломления, нанесенных последовательно друг за другом на оптическую подложку. На каждой границе раздела между слоями из-за различия их показателей преломления часть падающего светового пучка отражается обратно. Этот отраженный свет усиливает или подавляет падающий (отраженная волна интерферирует с падающей) в зависимости от длины волны. Надлежащим образом подобрав показатель преломления и толщину каждого слоя, можно получить фильтр, который будет пропускать любой заданный диапазон длин волн и отражать все остальные (рисунок 25).

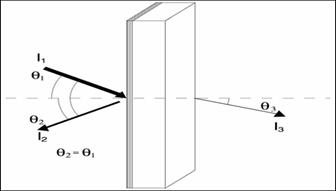


Рисунок 25 - I1 – падающая волна, I2 – отраженная, I3 – прошедшая

Методы выбора параметров и техника нанесения диэлектрических слоев хорошо известны в оптической промышленности десятки лет. Выбор диэлектрических материалов ограничен, так как многие материалы с хорошими оптическими свойствами имеют физические качества, далекие от требуемых. В общем случае, чем жестче требования к фильтру, тем большее число слоев необходимо нанести на подложку. Несмотря на имеющиеся сложности, эта технология позволяет, незначительно изменяя процесс производства, создавать недорогие фильтры с различными специальными спектральными свойствами.

В мультиплексорах и демультиплексорах используются обычно одноступенчатые тонкопленочные фильтры, каждый из которых выделяет из составного сигнала (или добавляет в него) один канал. Фильтры расположены под наклоном к оптической оси, чтобы отраженный свет не попадал обратно в систему.

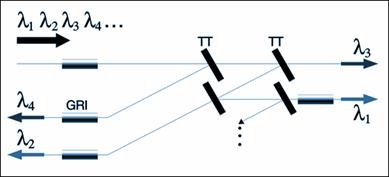


Рисунок 26 - Многоступенчатая система тонкопленочных фильтров для демультиплексирования составного сигнала

Наклонное расположение фильтров изменяет эффективную толщину слоев и меняет таким образом полосу пропускания, что необходимо учитывать при проектировании фильтров. Для обработки многоволновых сигналов используют многоступенчатые системы фильтров, в которых свет, отраженный от каждого фильтра, попадает на вход следующего фильтра, что придает исключительную важность вопросу их выравнивания (рисунок 26).

Тонкопленочные фильтры имеют достаточно узкую полосу пропускания и используются в системах WDM с 16-ю или 32-мя каналами. В современных системах с более плотным расположением каналов используют другие технологии.

**Волоконные брэгговские решетки**

Волоконная брэгговская решетка – это, по сути, оптический интерферометр, встроенный в волокно. Волокно, легированное некоторыми веществами (обычно германием), может изменять свой показатель преломления под воздействием ультрафиолетового света. Если облучить такое волокно ультрафиолетовым излучением с определенной пространственной периодической структурой, то волокно превращается в своего рода дифракционную решетку. Другими словами, это волокно будет практически полностью отражать свет определенного, наперед заданного диапазона длин волн, и пропускать свет всех остальных длин волн.

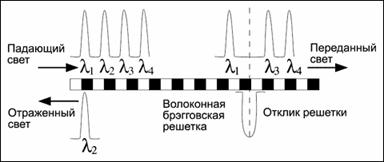


Рисунок 27 - Волоконная брэгговская решетка выделяет из составного сигнала канал определенной длины волны

Если структура не вполне периодическая, и период модуляции ее показателя преломления изменяется монотонно (происходит чирпирование), то получается дифракционная решетка с линейно изменяющимся периодом. Такие решетки используются для компенсации хроматической дисперсии в волоконной линии связи или для коррекции чирпированного сигнала лазерного источника.

Центральная длина волны фильтра на основе регулярной волоконной брэгговской решетки определяется ее периодом, полоса пропускания обратно пропорциональна ее длине. Оба этих параметра зависят от температуры, поэтому такие фильтры должны быть помещены в термостат или другое устройство, контролирующее температуру.

Волоконная брэгговская решетка может использоваться как оптический фильтр в устройствах мультиплексирования и демультиплексирования, как компенсатор хроматической дисперсии, или в комбинации с циркуляторами в мультиплексорах ввода/вывода каналов (рисунок 27).

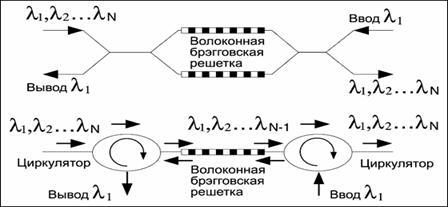


Рисунок 28 - Использование волоконных брэгговских решеток в мультиплексорах ввода/вывода каналов

В мультиплексорах ввода/вывода каналов волоконная брэгговская решетка может использоваться вместе с двумя циркуляторами и редко используется в пассивных компонентах систем DWDM сама по себе. Со стороны порта вывода канала циркулятор выделяет отраженную волну и направляет ее в порт вывода (рисунок 28, слева). Со стороны порта ввода циркулятор добавляет в передаваемый составной сигнал один канал на той же длине волны, что была выделена (рисунок 28, справа). Такие устройства часто используются на границе между магистральным каналом и сетью городского или регионального масштаба. В магистральном канале обычно очень много длин волн, в то время как в городских или региональных сетях их намного меньше.

Волоконные брэгговские решетки в последнее время также стали использоваться в устройствах мультиплексирования и демультиплексирования вместе с интерферометрами типа Маха-Цендера и в комбинации с другими типами фильтров.

Наряду с мультиплексорами и демультиплексорами, рассмотренная технология узкополосной фильтрации оптических каналов также используется для выравнивания спектра сигнала перед усилителями EDFA, для стабилизации длины волны и в волновых стабилизаторах.

**Дифракционные решетки**

Наиболее распространенные в оптике обычные дифракционные решетки отражают световой пучок под разными углами в плоскости падения, причем угол, в которых отраженный свет достигает максимальной интенсивности, зависит от длины волны. В дифракционных решетках используется тот же физический принцип, что и в тонкопленочных фильтрах – подавление или усиление света за счет интерференции падающих и отраженных волн (рисунок 29).

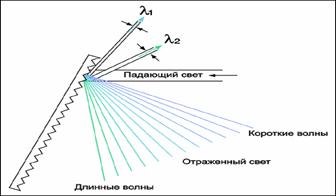


Рисунок 29 - Отражение составного сигнала дифракционной решеткой

Представим, что в падающем свете присутствует излучение разных длин волн. Можно выбрать угол падения таким образом, что волны определенной длины при отражении от отдельных линий решетки будут отличаться по фазе друг от друга ровно на одну длину волны. В этом случае все отраженные волны будут усиливать друг друга. Такой угол будет углом максимального пропускания для заданной длины волны падающего света.

В устройствах мультиплексирования и демультиплексирования дифракционные решетки располагаются на пути света таким образом, чтобы сигнал нужной длины волны мог быть выделен из составного сигнала или добавлен в него. Хотя устройства на основе дифракционных решеток дороги и сложны в производстве, вносимые ими потери практически не зависят от числа каналов, что делает эту технологию одной из наиболее привлекательных для использования в системах с большим числом каналов. Однако при этом требуется тщательно контролировать поляризацию падающего оптического излучения.

**Устройства интегральной оптики**

Интегральные оптические устройства мультиплексирования и демультиплексирования – это оптический эквивалент интегральных схем в электронике. Оптические волноводы в несколько слоев помещаются на подложку из кремния или ниобата лития. В таком небольшом блоке содержится множество оптических компонентов, взаимосвязанных друг с другом. При использовании современного полностью автоматизированного оборудования возможно массовое производство таких блоков.

Интегральная оптика – относительно новая технология. Для того чтобы полностью использовать ее потенциал, требуются дальнейшие научные исследования и конструкторские разработки. В настоящее время интегральная оптика используется при производстве оптических разветвителей, коммутаторов, модуляторов, эрбиевых и легированных различными редкоземельными элементами волноводных усилителей, брэгговских решеток и других компонентов систем DWDM.

Интегральная оптика успешно применяется для создания решеток на основе массива планарных волноводов (более 100) различной длины между двумя планарными линзами смесителями AWG (Arrayed Waveguide Gratings), рисунок 30.

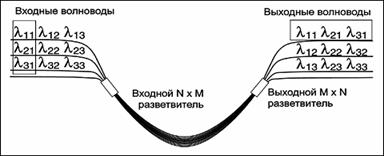


Рисунок 30 - Решетка на основе массива волноводов AWG – принцип работы

Входной сигнал, который содержит излучение разных длин волн, попадает во входной разветвитель. Там он расщепляется на N оптических лучей, каждый из которых попадает в отдельный волноводный канал. Все N волноводных каналов, образующих волноводную матрицу, имеют разную длину и вносят в сигнал разные фазовые сдвиги, зависящие от длины волны. После этого световые пучки из отдельных волноводных каналов вновь объединяются в выходном разветвителе и интерферируют таким образом, что излучение разных длин волн попадает в разные выходные волноводы.

Решетки на основе массива волноводов AWG используются для того, чтобы перераспределять сигналы различных длин волн (каналы) между двумя наборами волокон (рисунок 30) или выделить (демультиплексировать) отдельные каналы составного сигнала в отдельные волокна. Эта технология сейчас становится основной для производителей мультиплексоров и демультиплексоров систем DWDM. Благодаря легко масштабируемой структуре, она может широко применяться в системах с сотнями каналов.

Решетки AWG еще также называют “драконовыми маршрутизаторами” (Dragon Routers), фазовыми матрицами или фазарами.

**Сварные биконические разветвители**

Простейший биконический разветвитель FBT (Fused Biconic Tapered) представляет собой пару одномодовых оптических волокон, на определенном участке сваренных друг с другом по длине. Основная мода волокна, которая распространяется по сердцевине одного из оптических волокон, при прохождении области сварки преобразуется в моды оболочки. Когда волокна снова разделяются, моды оболочки снова преобразуются в моды волокна, распространяющиеся по сердцевине каждого из выходных волокон. В результате получается разветвитель, практически не вносящий потерь. Выходные сигналы не обязательно имеют равную мощность, соотношение их мощностей определяется интерференцией в области сварки волокон и зависит от длины этой области.

Если два таких разветвителя расположены последовательно (рисунок 31), и два рукава имеют разные оптические пути между местами сварки, то такая комбинация действует подобно интерферометру Маха-Цендера. Мощность входного сигнала распределяется между выходными волноводами в зависимости от длины волны с определенной периодичностью. Если составной входной сигнал содержит оптические каналы двух различных длин волн, то при определенном подборе параметров эти каналы на выходе окажутся в разных выходных волокнах. Второе входное волокно не используется.



Рисунок 31 - Входной сигнал распределяется между двумя выходами

Если на вход поступает составной сигнал, который содержит большое количество каналов на разных частотах (с одинаковыми расстояниями между ними), на выходе в каждом волокне будет по половине каналов с расстоянием между частотами в два раза больше. Используя последовательно несколько разветвителей, можно вывести каждый канал в отдельное волокно.

Массивы таких устройств, отдельные секции которых иногда заменены брэгговскими решетками, используются для выделения каналов определенной частоты из многоканальных систем WDM и DWDM или для добавления каналов в каком-либо узле оптической сети. Поскольку они являются полностью пассивными устройствами и имеют низкие потери, допустимо применение достаточно больших наборов таких устройств.

**3.5 Компоненты системы DWDM: оптические усилители EDFA**

Усилители на волокне, легированном эрбием, усиливают оптические сигналы без преобразования их в электрическую форму. Именно усилителям EDFA сети связи DWDM обязаны своим стремительным развитием в последние годы.

Усилители на волокне, легированном эрбием EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifier) за последние несколько лет произвели революцию в телекоммуникационной промышленности. Усилители EDFA обеспечивают непосредственное усиление оптических сигналов, без их преобразования в электрические сигналы и обратно, обладают низким уровнем шумов, а их рабочий диапазон длин волн практически точно соответствует окну прозрачности кварцевого оптического волокна (рисунок 32). Именно благодаря появлению усилителей с таким сочетанием качеств линии связи и сети на основе систем DWDM стали экономически привлекательными.

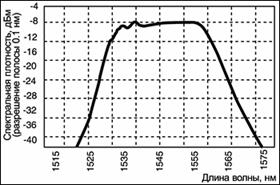


Рисунок 32 - Зависимость коэффициента усиления EDFA от длины волны

Усилитель EDFA состоит из отрезка волокна, легированного эрбием. В таком волокне сигналы определенных длин волн могут усиливаться за счет энергии внешнего излучения накачки. В простейших конструкциях EDFA усиление происходит в достаточно узком диапазоне длин волн – примерно от 1525 нм до 1565 нм. В эти 40 нм умещается несколько десятков каналов DWDM.

Обычные электронные повторители, чтобы восстановить уровень сигнала на протяженной линии связи, считывают сигнал с волокна, преобразуют его в электрические импульсы, усиливают их, преобразуют усиленный сигнал снова в оптическую форму и передают дальше по линии связи. В отличие от них, усилители EDFA полностью "прозрачны" – не зависят от используемых протоколов, форматов, скорости передачи и (в пределах указанных выше ограничений) длины волны оптического сигнала. Поскольку усилители EDFA независимы от сетевого протокола, их можно подключать непосредственно к различному оборудованию – коммутаторам ATM или компонентам протокола IP – не опасаясь, что они помешают друг другу. Такая гибкость – одно из основных преимуществ использования их в системах DWDM. Наряду с этим, при использовании усилителей EDFA требуется тщательно учитывать их неоднородное спектральное усиление и шум, вносимый ими за счет усиленной спонтанной эмиссии ASE (Amplified Spontaneous Emission). Сети с усилителями EDFA имеют многочисленные преимущества. Пропускную способность таких сетей можно наращивать экономично и постепенно, добавляя новые каналы по мере роста потребности. Применение усилителей EDFA позволяет создавать полностью оптические сети, в которых обработка сигнала электронными компонентами происходит только в начальной (где информация впервые попадает в сеть) и конечной (где информация достигает конечного получателя) точках сети. Каждая линия связи уровня OC-48 (STM-16) обрабатывается в системе DWDM как отдельный канал на отдельной длине волны, благодаря чему большая часть существующего сетевого оборудования непосредственно включается в состав систем DWDM. За счет этого начальная стоимость ввода систем DWDM в эксплуатацию достаточно низка.

Оптические усилители успешно используются в сетях кабельного телевидения CATV, когда один общий сигнал передается большому числу абонентов ("широковещание"). Сейчас еще достаточно редко прокладывают оптическое волокно непосредственно до квартиры FTTH (Fiber to the Home). Сигнал CATV обычно доставляется по оптическому волокну только до локальной точки распределения внутри дома FTTB (Fiber to the Building) или поблизости от группы домов FTTC (Fiber to the Curb), а конечная разводка осуществляется с помощью коаксиального кабеля. Для уверенного приема аналоговых сигналов, которые в основном используются в CATV, требуется большее отношение сигнал/шум на стороне получателя, чем для цифровых систем. Общий сигнал в сетях CATV должен иметь большую мощность, так как его энергия распределяется между сотнями и тысячами абонентов. Оптические усилители способны успешно справиться с этой задачей.

Для того чтобы технология FTTH стала экономически оправданной, необходимо обеспечить абонентов недорогими – а значит, не очень чувствительными приемниками. В этом случае также требуется обеспечить передачу к конечным точкам сети как можно более мощного сигнала. Таким образом, потребность сетей CATV в "прозрачных", гибких оптических усилителях достаточно очевидна.

Разработка различных схем мощной накачки позволила создать усилители EDFA с расширенным рабочим диапазоном от 1570 нм до 1605 нм (L-диапазон). Такие усилители также называют длинноволновыми усилителями LWEDFA (Long Wavelength EDFA).

**3.6 Технология SWDM**

Бурный рост Интернет-трафика вызвал не менее бурные обсуждения того, как поднять пропускную способность сетевой инфраструктуры. Никто не сомневается в том, что если не принять срочных мер в этом направлении, сети начнут захлебываться трафиком в “узких местах”, появятся заторы. В общем-то, нет сомнений и в том, что современные технологии передачи данных сами по себе обладают достаточным потенциалом для решения грядущих и уже сегодняшних проблем. Магистрали со скоростями в сотни Гбит/с уже не такая уж редкость, во всяком случае, в Северной Америке. Терабитные коммутаторы и мультиплексоры вышли из стен лабораторий, их предлагают многие производители оборудования. Платите деньги, наращивайте полосу пропускания, и все будет в порядке. Все это справедливо с одной лишь оговоркой: думая о главном, то есть создании инфраструктуры, способной справится со стремительно растущими информационными потоками, не стоит забывать о том, что идти к цели можно разными путями, платя абсолютно разные деньги. Идеальным было бы решение, позволяющее при относительно небольших инвестициях на начальном этапе, наращивать сеть в будущем без существенных перестроений сети. Именно здесь сильная сторона появившейся недавно на рынке запатентованной технологии SWDM, ориентированной главным образом на городские сети. Но, чтобы трезво оценить ее возможности, и границы применимости, стоит вспомнить о преимуществах и недостатках конкурирующих технологий.

**4 Виды сетей**

Задачи, которые должна решать транспортная сеть связи, соответствуют трем категориям сетей:

1.     Сетевое ядро, соединяющее города, страны и континенты.

2.     Городская транспортная сеть.

3.     Сеть доступа.

Требования к пропускной способности на уровне сетевого ядра находятся в широком диапазоне — от единиц до сотен Гбит/с. Нижняя граница требований характерна для развивающихся стран (к которым относится и Россия), а верхняя — для таких регионов, как Северная Америка (прежде всего, США), Западная Европа и Япония. Для уровня городских сетей необходимы (в зависимости от региона и масштаба города) скорости передачи в диапазоне от сотен Mбит/с до десятков Гбит/с. Для сетей доступа речь может идти о пропускной способности от единиц до сотен Mбит/с. При этом конечные пользователи могут подключаться к сети доступа в диапазоне скоростей от десятков кбит/с до единиц Mбит/с. До недавнего времени преобладающей технологией транспортного уровня и для ядра сети, и для городской сети была SDH/SONET. Распространение более скоростной - DWDM  началось с тех магистралей, где увеличение полосы пропускания нужно достичь любой ценой. Постепенно эта новая технология стала проникать и в менее скоростной сектор рынка. Многие эксперты полагали, что DWDM вытеснит SDH/SONET и из городских сетей, однако этот процесс идет совсем не теми темпами, которые ожидались. В какой-то степени результатом этой заминки и стало появление SWDM, облегчающей и удешевляющей переход к DWDM в городских сетях.

**Достоинства и недостатки**

Главное достоинство технологии WDM заключается в том, что она позволяет преодолеть ограничения на пропускную способность канала и существенно увеличить скорость передачи данных. Причем используются уже проложенный волоконно-оптический кабель и стандартная аппаратура временного мультиплексирования, а увеличивать скорость передачи по отдельному каналу до 10 Гбит/с и выше не требуется. Благодаря WDM удается организовать двустороннюю многоканальную передачу трафика по одному волокну (в обычных линиях используется пара волокон - для передачи в прямом и обратном направлениях).

Существенно и то, что в сетях SONET/SDH появилась возможность выбирать для отдельного канала значение скорости (уровень иерархии), не зависящее от скорости других каналов, и затем использовать разные методы передачи. Наконец, распространению WDM способствуют последние технологические достижения: создание узкополосных полупроводниковых лазеров, имеющих ширину спектра излучения менее 0,1 нм, широкополосных оптических усилителей и оптических фильтров для разделения близких каналов.

У читателя могло сложиться представление, что технология WDM является универсальным решением проблемы увеличения пропускной способности, некой панацеей от всех бед, с которыми сталкиваются пользователи глобальных сетей. Между тем ее применение тормозится рядом факторов как экономического, так и чисто технического характера.

Если говорить об экономической стороне дела, то внедрение WDM в местных сетях сдерживается высокой стоимостью соответствующей аппаратуры, особенно передающих устройств, и сложностью коммутации трафика. Вместе с тем исследования показывают, что решения на базе WDM могут оказаться экономически эффективными и в сетях меньшего масштаба. Для этого, в частности, в них должны применяться недорогие мультиплексоры ввода/вывода, устанавливаемые в местах сопряжения местных и опорных сетей.

Фактор высокой стоимости аппаратуры оказывается еще более существенным для реализации технологии DWDM. При использовании близких частот требуются узкополосные полупроводниковые лазеры с высокой стабильностью длины волны генерируемого излучения, которые являются наиболее дорогим элементом DWDM-систем, сдерживающим распространение последних.

Среди технических проблем следует упомянуть значительные потери мощности сигналов в мультиплексорах/демультиплексорах, несовпадение, во многих случаях, рабочих длин волн WDM-оборудования и устройств временного мультиплексирования, необходимость повышения производительности узлов коммутации, усложнение управления сетью из-за различий в технологиях передачи данных по мультиплексируемым каналам, отсутствие промышленных стандартов. Наконец, не последнее место в этом перечне занимают нелинейные явления, которые при одновременной передаче на нескольких несущих способны приводить не только к ослаблению и искажению сигнала, но и к его проникновению в другие каналы.

**4.1 Сравнение DWDM c SWDM**

Исторически первыми возникли двухволновые WDM системы, работающие на центральных длинах волн их второго и третьего окон прозрачности кварцевого волокна (1310 и 1550 нм). Главным достоинством таких систем является то, что из-за большого спектрального разноса полностью отсутствует влияние каналов друг на друга.  Это способ позволяет либо удвоить скорость передачи по одному оптическому волокну, либо организовать дуплексную связь.

Современные WDM системы на основе стандартного частотного плана (ITU-T Rec. G.692) можно подразделить на три группы:

-     грубые WDM (Coarse WDM – CWDM) – системы с частотным разносом каналов не менее 200 ГГц, позволяющие мультиплексировать не более 16 каналов;

-     плотные WDM (Dense WDM – DWDM) – системы с разносом каналов не менее 100 ГГц, позволяющие мультиплексировать не более 32 каналов;

-     высокоплотные WDM (High Dense WDM – HDWDM) – системы с разносом каналов 50 ГГц и менее, позволяющие мультиплексировать не менее 64 каналов.

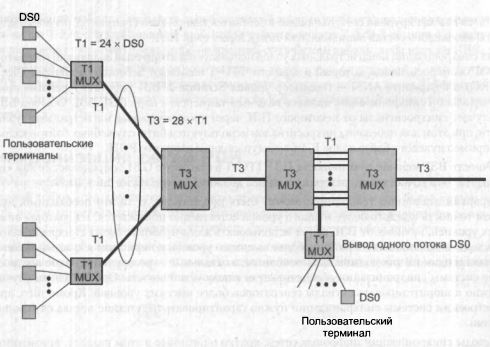
Частотный план для CWDM систем определяется стандартом ITU G.694.2. Область применения технологии CWDM – городские сети с расстоянием до 50 км. Достоинством этого вида WDM систем является низкая (по сравнению с остальными типами) стоимость оборудования, вследствие меньших требований к компонентам.

**ЛЕКЦИЯ 4**

# Технология PDH (Плезиохронная цифровая иерархия)

# Плезиохронная цифровая иерархия (PDH, Plesiochronous Digital Hierarchy) – цифровой метод передачи данных и голоса, основанный на [временном разделении канала](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D1%83%D0%BB%D1%8C%D1%82%D0%B8%D0%BF%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%81%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%B5_%D1%81_%D1%80%D0%B0%D0%B7%D0%B4%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5%D0%BC_%D0%BF%D0%BE_%D0%B2%D1%80%D0%B5%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D0%B8) и технологии представления сигнала с помощью импульсно-кодовой модуляции ([ИКМ](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%98%D0%9A%D0%9C)).

Технология PDH, несмотря на свой солидный, по современным меркам, возраст, продолжает активно использоваться при развертывании новых сетей и расширении существующих. Безусловно, на данный момент технология PDH не является образцом передовой технической мысли, но ее надежность в совокупности с экономичностью позволяют ей на равных конкурировать с более современными технологиями.



## Обзор технологии PDH

Технология PDH (Plesiochronous Digital Hierarchy, плезиохронная цифровая иерархия) - это способ организации цифровых систем передачи, использующих мультиплексированный ИКМ сигнал, собранный из 30-канальных цифровых потоков. Передаваемые потоки называются плизиохронными, т. е. в дословном переводе «почти синхронными» из-за небольших допустимых различий в их скорости. Эти различия устраняются добавлением синхронизирующих битов, которые должны быть распознаны на принимающей стороне.

В Европе действует отличный от остальных стран стандарт технологии PDH, согласно европейскому стандарту для передачи объединяется 32 канала по 64 кбит/с. 30 из этих каналов используются для передачи данных, 2 служебных канала используются для передачи сигналов управления и сигнализации. В России данный стандарт также называется ИКМ-30. Скорость передачи данных в суммарном потоке составляет 2048 Кбит/c ( 2048000 бит/с).

Последующие уровни иерархии образуются мультиплексированием четырех потоков предыдущего уровня. Таким образом, скорость передачи на следующих уровнях составляет 8 Мбит/с, 34 Мбит/с и 140 Мбит/с. На более высоких уровнях агрегация потоков происходит побитно, а не побайтно, как на первом уровне.

Япония и Северная Америка использует другие стандарты технологии PDH, отличающиеся количеством объединямых потоков. По этому стандарту на первом уровне объединяется 24 канала по 64 кбит/с. Соответственно на втором и третьем уровне цифровые потоки передаются на скоростях 6 Мбит/с и 45 Мбит/с соответственно.

**Таблица 1.1.**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Уровень иерархии** | **Европа** | **Северная Америка, Япония** |
| 0 | 64 кбит/с | 64 кбит/с |
| 1 | 2 Мбит/с | 1,5 Мбит/с |
| 2 | 8 Мбит/с | 6 Мбит/с |
| 3 | 34 Мбит/с | 45 Мбит/с |
| 4 | 140 Мбит/с | - |

### Электрические интерфейсы**[**[**править**](https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%A1%D0%B8%D0%BD%D1%85%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D1%86%D0%B8%D1%84%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%8F_%D0%B8%D0%B5%D1%80%D0%B0%D1%80%D1%85%D0%B8%D1%8F&veaction=edit&section=2)**|**[**править код**](https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%A1%D0%B8%D0%BD%D1%85%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D1%86%D0%B8%D1%84%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%8F_%D0%B8%D0%B5%D1%80%D0%B0%D1%80%D1%85%D0%B8%D1%8F&action=edit&section=2)**]**

Стандартизация [интерфейсов](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%98%D0%BD%D1%82%D0%B5%D1%80%D1%84%D0%B5%D0%B9%D1%81_(%D0%BE%D0%B1%D1%8A%D0%B5%D0%BA%D1%82%D0%BD%D0%BE-%D0%BE%D1%80%D0%B8%D0%B5%D0%BD%D1%82%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D0%BE%D0%B5_%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B3%D1%80%D0%B0%D0%BC%D0%BC%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%B5)) определяет возможность соединения различного оборудования разных производителей. Система SDH обеспечивает универсальные стандарты для [сетевых узловых](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D1%80%D0%BE%D1%82%D0%BE%D0%BA%D0%BE%D0%BB%D1%8B_%D1%81%D0%B5%D1%82%D0%B5%D0%B2%D0%BE%D0%B3%D0%BE_%D1%83%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%BD%D1%8F) [интерфейсов](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%98%D0%BD%D1%82%D0%B5%D1%80%D1%84%D0%B5%D0%B9%D1%81_(%D0%BE%D0%B1%D1%8A%D0%B5%D0%BA%D1%82%D0%BD%D0%BE-%D0%BE%D1%80%D0%B8%D0%B5%D0%BD%D1%82%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D0%BE%D0%B5_%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B3%D1%80%D0%B0%D0%BC%D0%BC%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%B5)), включая стандарты на уровне [цифровых скоростей](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%BA%D0%BE%D1%80%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C_%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%B4%D0%B0%D1%87%D0%B8_%D0%B4%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8B%D1%85), структуру фрейма, метод мультиплексирования, линейные интерфейсы, [мониторинг](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%BE%D0%BD%D0%B8%D1%82%D0%BE%D1%80%D0%B8%D0%BD%D0%B3) и [управление](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A3%D0%BF%D1%80%D0%B0%D0%B2%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5). Поэтому SDH оборудование разных производителей может легко соединяться и устанавливаться в одной линии, что наилучшим образом демонстрирует системную совместимость.

Система SDH обеспечивает стандартные уровни информационных структур, то есть набор стандартных скоростей. Базовый уровень скорости — [STM-1](https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%A1%D0%B8%D0%BD%D1%85%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D1%82%D1%80%D0%B0%D0%BD%D1%81%D0%BF%D0%BE%D1%80%D1%82%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D0%BC%D0%BE%D0%B4%D1%83%D0%BB%D1%8C&action=edit&redlink=1) (155,52 [Mбит/с](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B5%D0%B3%D0%B0%D0%B1%D0%B8%D1%82_%D0%B2_%D1%81%D0%B5%D0%BA%D1%83%D0%BD%D0%B4%D1%83" \o "Мегабит в секунду))[[1]](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%B8%D0%BD%D1%85%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D1%86%D0%B8%D1%84%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%8F_%D0%B8%D0%B5%D1%80%D0%B0%D1%80%D1%85%D0%B8%D1%8F#cite_note-1). [Цифровые скорости](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%BA%D0%BE%D1%80%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C_%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%B4%D0%B0%D1%87%D0%B8_%D0%B4%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8B%D1%85) более высоких уровней определяются умножением скорости потока STM-1, соответственно, на 4, 16, 64 и т. д.: STM-4 (622 [Мбит/с](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B5%D0%B3%D0%B0%D0%B1%D0%B8%D1%82_%D0%B2_%D1%81%D0%B5%D0%BA%D1%83%D0%BD%D0%B4%D1%83)), STM-16 (2,5 [Гбит/с](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%93%D0%B8%D0%B3%D0%B0%D0%B1%D0%B8%D1%82_%D0%B2_%D1%81%D0%B5%D0%BA%D1%83%D0%BD%D0%B4%D1%83)), STM-64 (10 [Гбит/с](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%93%D0%B8%D0%B3%D0%B0%D0%B1%D0%B8%D1%82_%D0%B2_%D1%81%D0%B5%D0%BA%D1%83%D0%BD%D0%B4%D1%83)) и STM-256 (40 [Гбит/с](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%93%D0%B8%D0%B3%D0%B0%D0%B1%D0%B8%D1%82_%D0%B2_%D1%81%D0%B5%D0%BA%D1%83%D0%BD%D0%B4%D1%83)).

### Оптические интерфейсы**[**[**править**](https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%A1%D0%B8%D0%BD%D1%85%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D1%86%D0%B8%D1%84%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%8F_%D0%B8%D0%B5%D1%80%D0%B0%D1%80%D1%85%D0%B8%D1%8F&veaction=edit&section=3)**|**[**править код**](https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%A1%D0%B8%D0%BD%D1%85%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D1%86%D0%B8%D1%84%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%8F_%D0%B8%D0%B5%D1%80%D0%B0%D1%80%D1%85%D0%B8%D1%8F&action=edit&section=3)**]**

Линейные (оптические) интерфейсы работают, используя универсальные стандарты. Линейный сигнал только [скремблируется](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%BA%D1%80%D0%B5%D0%BC%D0%B1%D0%BB%D0%B5%D1%80) ([англ.](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BD%D0%B3%D0%BB%D0%B8%D0%B9%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9_%D1%8F%D0%B7%D1%8B%D0%BA) *scrambled* — [шифровать](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A8%D0%B8%D1%84%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%B5_%D0%B1%D0%B0%D0%B7%D1%8B_%D0%B4%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8B%D1%85), перемешивать), вставки избыточного кода нет.

[Стандарт](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D1%82%D0%B0%D0%BD%D0%B4%D0%B0%D1%80%D1%82) [скремблирования](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%BA%D1%80%D0%B5%D0%BC%D0%B1%D0%BB%D0%B5%D1%80) — универсальный. Поэтому и на приеме, и на передаче должны использоваться стандартные скремблер и дескремблер. Цель скремблирования — сделать вероятность возникновения «1» [бита](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%B8%D1%82) и «0» бита близкой к 50 % для облегчения извлечения синхросигнала из линейного сигнала. Поскольку линейный сигнал только скремблируется, [линейная скорость](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%BA%D0%BE%D1%80%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C) сигнала SDH соответствует стандартной скорости сигнала на электрическом интерфейсе SDH. Таким образом, потребление оптической мощности передающими [лазерами](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9B%D0%B0%D0%B7%D0%B5%D1%80) остается неизменным, однако, снижается их [тепловыделение](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D1%80%D0%B5%D0%B1%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D1%8F_%D0%BA_%D1%81%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B5_%D0%BE%D1%85%D0%BB%D0%B0%D0%B6%D0%B4%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F_%D0%BF%D1%80%D0%BE%D1%86%D0%B5%D1%81%D1%81%D0%BE%D1%80%D0%B0) (так как исключается возможность следования большого количества «1» подряд), что увеличивает их [ресурс](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D0%B5%D1%81%D1%83%D1%80%D1%81). Еще одной причиной по которой используется скремблирование — длительная последовательность «1» («0») автоматической петлей регулировки усиления воспринимается как увеличение (уменьшение) уровня входного сигнала, что может привести к неправильной регулировке.

**Синхронная цифровая иерархия** (СЦИ: [англ.](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BD%D0%B3%D0%BB%D0%B8%D0%B9%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9_%D1%8F%D0%B7%D1%8B%D0%BA) *SDH — Synchronous Digital Hierarchy*, SONET) — это система передачи данных, основанная на [синхронизации](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%B8%D0%BD%D1%85%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%B8%D0%B7%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F_(%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%B4%D0%B0%D1%87%D0%B0_%D1%81%D0%B8%D0%B3%D0%BD%D0%B0%D0%BB%D0%BE%D0%B2)) по времени передающего и [принимающего устройств](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D0%B0%D0%B4%D0%B8%D0%BE%D0%BF%D1%80%D0%B8%D1%91%D0%BC%D0%BD%D0%B8%D0%BA). Стандарты СЦИ определяют характеристики [цифровых сигналов](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A6%D0%B8%D1%84%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B9_%D1%81%D0%B8%D0%B3%D0%BD%D0%B0%D0%BB), включая структуру [фреймов](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%B0%D0%B4%D1%80_(%D1%82%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D0%BE%D0%BC%D0%BC%D1%83%D0%BD%D0%B8%D0%BA%D0%B0%D1%86%D0%B8%D0%B8)) (циклов), метод [мультиплексирования](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D1%83%D0%BB%D1%8C%D1%82%D0%B8%D0%BF%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%81%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%B5), иерархию цифровых скоростей и кодовые шаблоны [интерфейсов](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%98%D0%BD%D1%82%D0%B5%D1%80%D1%84%D0%B5%D0%B9%D1%81) и т. д.

## **Принцип работы SDH[**[**править**](https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%A1%D0%B8%D0%BD%D1%85%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D1%86%D0%B8%D1%84%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%8F_%D0%B8%D0%B5%D1%80%D0%B0%D1%80%D1%85%D0%B8%D1%8F&veaction=edit&section=4)**|**[**править код**](https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%A1%D0%B8%D0%BD%D1%85%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D1%86%D0%B8%D1%84%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%8F_%D0%B8%D0%B5%D1%80%D0%B0%D1%80%D1%85%D0%B8%D1%8F&action=edit&section=4)**]**

### Процедура контейнирования нагрузки**[**[**править**](https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%A1%D0%B8%D0%BD%D1%85%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D1%86%D0%B8%D1%84%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%8F_%D0%B8%D0%B5%D1%80%D0%B0%D1%80%D1%85%D0%B8%D1%8F&veaction=edit&section=5)**|**[**править код**](https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%A1%D0%B8%D0%BD%D1%85%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D1%86%D0%B8%D1%84%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%8F_%D0%B8%D0%B5%D1%80%D0%B0%D1%80%D1%85%D0%B8%D1%8F&action=edit&section=5)**]**

Вся информация в системе SDH передается в контейнерах. Контейнер представляет собой структурированные данные, передаваемые в системе. Если система [PDH](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BB%D0%B5%D0%B7%D0%B8%D0%BE%D1%85%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D1%86%D0%B8%D1%84%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%8F_%D0%B8%D0%B5%D1%80%D0%B0%D1%80%D1%85%D0%B8%D1%8F) генерирует трафик, который нужно передать по системе SDH, то данные PDH как и SDH сначала структуризуются в контейнеры, а затем к контейнеру добавляется заголовок и указатели, в результате образуется синхронный транспортный модуль STM-1. По сети контейнеры STM-1 передаются в системе SDH разных уровней (STM-n), но во всех случаях расформированный STM-1 может только складываться с другим транспортным модулем, то есть имеет место мультиплексирование транспортных модулей.

### Понятие виртуального контейнера**[**[**править**](https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%A1%D0%B8%D0%BD%D1%85%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D1%86%D0%B8%D1%84%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%8F_%D0%B8%D0%B5%D1%80%D0%B0%D1%80%D1%85%D0%B8%D1%8F&veaction=edit&section=6)**|**[**править код**](https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%A1%D0%B8%D0%BD%D1%85%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D1%86%D0%B8%D1%84%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%8F_%D0%B8%D0%B5%D1%80%D0%B0%D1%80%D1%85%D0%B8%D1%8F&action=edit&section=6)**]**

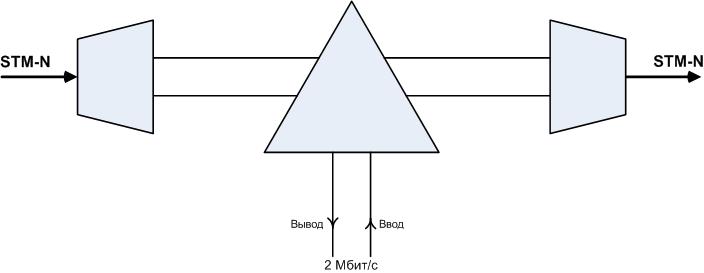
Еще одно важное понятие, непосредственно связанное с общим пониманием технологии SDH — это понятие виртуального контейнера **VC**. В результате добавления к контейнеру трактового (маршрутного) заголовка получается виртуальный контейнер. Виртуальные контейнеры находятся в идеологической и технологической связи с контейнерами, так что контейнеру **C-12** соответствует виртуальный контейнер **VC-12** (передача [потока E1](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A6%D0%B8%D1%84%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B9_%D0%BF%D0%BE%D1%82%D0%BE%D0%BA_E1)), **C-3** — **VC-3** (передача потока E3), **C-4** — контейнер **VC-4** (передача потока STM-1).

### Понятие маршрута**[**[**править**](https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%A1%D0%B8%D0%BD%D1%85%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D1%86%D0%B8%D1%84%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%8F_%D0%B8%D0%B5%D1%80%D0%B0%D1%80%D1%85%D0%B8%D1%8F&veaction=edit&section=7)**|**[**править код**](https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%A1%D0%B8%D0%BD%D1%85%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D1%86%D0%B8%D1%84%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%8F_%D0%B8%D0%B5%D1%80%D0%B0%D1%80%D1%85%D0%B8%D1%8F&action=edit&section=7)**]**

### Метод мультиплексирования**[**[**править**](https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%A1%D0%B8%D0%BD%D1%85%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D1%86%D0%B8%D1%84%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%8F_%D0%B8%D0%B5%D1%80%D0%B0%D1%80%D1%85%D0%B8%D1%8F&veaction=edit&section=8)**|**[**править код**](https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%A1%D0%B8%D0%BD%D1%85%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D1%86%D0%B8%D1%84%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%8F_%D0%B8%D0%B5%D1%80%D0%B0%D1%80%D1%85%D0%B8%D1%8F&action=edit&section=8)**]**

Поскольку низкоскоростные сигналы PDH мультиплексируются в структуру фрейма высокоскоростных сигналов SDH посредством метода побайтового мультиплексирования, их расположение во фрейме высокоскоростного сигнала фиксировано и определено или, скажем, предсказуемо. Поэтому низкоскоростной сигнал SDH, например 155 Мбит/с (STM-1) может быть напрямую добавлен или выделен из высокоскоростного сигнала, например 2.5 Гбит/с (STM-16). Это упрощает процесс мультиплексирования и демультиплексирования сигнала и делает SDH иерархию особенно подходящей для высокоскоростных волоконно-оптических систем передачи, обладающих большой производительностью.

Поскольку принят метод синхронного мультиплексирования и гибкого отображения структуры, низкоскоростные сигналы [PDH](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BB%D0%B5%D0%B7%D0%B8%D0%BE%D1%85%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D1%86%D0%B8%D1%84%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%8F_%D0%B8%D0%B5%D1%80%D0%B0%D1%80%D1%85%D0%B8%D1%8F) (например, 2 Мбит/с) также могут быть мультиплексированы в сигнал SDH (STM-N). Их расположение во фрейме STM-N также предсказуемо. Поэтому низкоскоростной трибутарный сигнал (вплоть до сигнала DS-0, то есть одного [тайм-слота](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B0%D0%B9%D0%BC%D1%81%D0%BB%D0%BE%D1%82_(TDMA)) PDH, 64 kbps) может быть напрямую добавлен или извлечен из сигнала STM-N. Заметьте, что это не одно и то же с вышеописанным процессом добавления/выделения низкоскоростного сигнала SDH в/из высокоскоростного сигнала SDH. Здесь это относится к прямому добавлению/выделению низкоскоростного трибутарного сигнала такого как 2 Мбит/с, 34 Мбит/с и 140 Мбит/с в/из сигнала SDH. Это устраняет необходимость использования большого количества оборудования мультиплексирования / демультиплексирования (взаимосвязанного), повышает надежность и уменьшает вероятность ухудшения качества сигнала, снижает стоимость, потребление мощности и сложность оборудования. Добавление/выделение услуг в дальнейшем упрощается.

[](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%B0%D0%B9%D0%BB:Pryamoe_mux_v_system_sdh.jpg)

Этот метод мультиплексирования помогает выполнять функцию [цифровой кросс-коммутации](https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%9A%D1%80%D0%BE%D1%81%D1%81-%D0%BA%D0%BE%D0%BC%D0%BC%D1%83%D1%82%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F_%D1%86%D0%B8%D1%84%D1%80%D0%BE%D0%B2%D1%8B%D1%85_%D0%BA%D0%B0%D0%BD%D0%B0%D0%BB%D0%BE%D0%B2&action=edit&redlink=1) ([DXC](https://ru.wikipedia.org/wiki/DXC)) и обеспечивает сеть мощной функцией самовосстановления. Абонентов можно динамически соединять в соответствии с потребностями и выполнять отслеживание трафика в реальном времени.

## **Оперирование, администрирование и техобслуживание[**[**править**](https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%A1%D0%B8%D0%BD%D1%85%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D1%86%D0%B8%D1%84%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%8F_%D0%B8%D0%B5%D1%80%D0%B0%D1%80%D1%85%D0%B8%D1%8F&veaction=edit&section=9)**|**[**править код**](https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%A1%D0%B8%D0%BD%D1%85%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D1%86%D0%B8%D1%84%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%8F_%D0%B8%D0%B5%D1%80%D0%B0%D1%80%D1%85%D0%B8%D1%8F&action=edit&section=9)**]**

Для функций оперирования, [администрирования](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%B4%D0%BC%D0%B8%D0%BD%D0%B8%D1%81%D1%82%D1%80%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%B5_%D0%B4%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8B%D1%85) и [техобслуживания](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%B5_%D0%BE%D0%B1%D1%81%D0%BB%D1%83%D0%B6%D0%B8%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%B5_%D0%B8_%D1%80%D0%B5%D0%BC%D0%BE%D0%BD%D1%82) (ОАМ) в структуре фрейма сигнала SDH организованы многочисленные [биты](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%B8%D1%82). Это намного облегчает функцию сетевого мониторинга, то есть автоматическое техобслуживание. Несколько избыточных битов должны быть добавлены во время линейного [кодирования](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%B5_(%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B3%D1%80%D0%B0%D0%BC%D0%BC%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%B5)) для мониторинга рабочих характеристик линии, поскольку совсем мало байтов организовано в сигнале PDH. Например, в структуре фрейма сигнала PCM30/32 только биты в TS0 и TS16 используются для функций OAM.

Многочисленные заголовки в сигналах SDH составляют 1/20 от общего количества байтов во фрейме. Это намного облегчает функцию ОАМ и уменьшает стоимость системы техобслуживания, что очень важно, так как она составляет значительную часть от общей стоимости оборудования.

## **Совместимость[**[**править**](https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%A1%D0%B8%D0%BD%D1%85%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D1%86%D0%B8%D1%84%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%8F_%D0%B8%D0%B5%D1%80%D0%B0%D1%80%D1%85%D0%B8%D1%8F&veaction=edit&section=10)**|**[**править код**](https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%A1%D0%B8%D0%BD%D1%85%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D1%86%D0%B8%D1%84%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%8F_%D0%B8%D0%B5%D1%80%D0%B0%D1%80%D1%85%D0%B8%D1%8F&action=edit&section=10)**]**

SDH имеет высокую совместимость. Это означает, что сеть передачи SDH и существующая сеть PDH могут работать совместно, пока идет установление сети передачи SDH. Сеть SDH может быть использована для передачи услуг PDH, а также сигналов других иерархий, таких как [ATM](https://ru.wikipedia.org/wiki/ATM), Ethernet ([Ethernet over SDH](https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=Ethernet_over_SDH&action=edit&redlink=1)[[en]](https://en.wikipedia.org/wiki/Ethernet_over_SDH), [10GBASE-W](https://ru.wikipedia.org/wiki/10-%D0%B3%D0%B8%D0%B3%D0%B0%D0%B1%D0%B8%D1%82%D0%BD%D1%8B%D0%B9_Ethernet#%D0%A4%D0%B8%D0%B7%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B5_%D1%83%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%BD%D0%B8_WAN_(10GBASE-W))) и [FDDI](https://ru.wikipedia.org/wiki/FDDI).

Базовый транспортный модуль (STM-1) может размещать и три типа сигналов PDH, и сигналы ATM, FDDI, DQDB. Это обуславливает двустороннюю совместимость и гарантирует бесперебойный переход от сети PDH к сети SDH и от SDH к АТМ. Для размещения сигналов этих иерархий SDH мультиплексирует низкоскоростные сигналы различных иерархий в структуру фрейма STM-1 сигнала на границе сети (стартовая точка — точка ввода) и затем демультиплексирует их на границе сети (конечная точка — точка вывода). Таким образом цифровые сигналы различных иерархий могут быть переданы по сети передачи SDH.

## **Защита[**[**править**](https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%A1%D0%B8%D0%BD%D1%85%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D1%86%D0%B8%D1%84%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%8F_%D0%B8%D0%B5%D1%80%D0%B0%D1%80%D1%85%D0%B8%D1%8F&veaction=edit&section=11)**|**[**править код**](https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%A1%D0%B8%D0%BD%D1%85%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D1%86%D0%B8%D1%84%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%8F_%D0%B8%D0%B5%D1%80%D0%B0%D1%80%D1%85%D0%B8%D1%8F&action=edit&section=11)**]**

В системах SDH термин «защита» используется для описания способа повышения надежности сети. Для этого все сети SDH стараются строить в виде замкнутых колец, передача по которым ведётся одновременно в обоих направлениях. При этом в случае повреждения кабеля сеть продолжает работать. Вопреки распространённому мнению, эти возможности доступны и в оборудовании [PDH](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BB%D0%B5%D0%B7%D0%B8%D0%BE%D1%85%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D1%86%D0%B8%D1%84%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%8F_%D0%B8%D0%B5%D1%80%D0%B0%D1%80%D1%85%D0%B8%D1%8F) некоторых производителей.

Обратной стороной такого повышения надёжности является уменьшение количества резервных оптических волокон в ка́белях сети.

В SONET и SDH используются схемы защиты: 1+1, 1:N, UPSR, [SNCP](https://ru.wikipedia.org/wiki/SNCP), BLSR / MS-SPRing[[2]](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%B8%D0%BD%D1%85%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D1%86%D0%B8%D1%84%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%8F_%D0%B8%D0%B5%D1%80%D0%B0%D1%80%D1%85%D0%B8%D1%8F#cite_note-_e758fbee3bc0389d-2).