

В.И. Иванов

СПЕКТРАЛЬНОЕ УПЛОТНЕНИЕ ВОЛС

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Рекомендовано методическим советом ПГУТИ
в качестве учебного пособия для студентов
высших учебных заведений, обучающихся по
направлению «Телекоммуникации» и специальностей
«Сети связи и системы коммутации»,
«Многоканальные телекоммуникационные системы»,
«Физика и техника оптической связи»

Введение

Мир вступил в третье тысячелетие и одновременно в информационную эпоху, тера-эру. Последнее название отражает достигнутый недавно уровень скоростей передачи и обработки информации - 10^{12} (тера) бит/с и 10^{12} операций в секунду соответственно. Информационная эра характеризуется, с одной стороны, непрерывно растущими потребностями мирового сообщества в обмене информацией, а с другой - технической возможностью практически полностью удовлетворить их.

История цивилизации - это и история развития средств связи и передачи информации, потребности, в обмене которой всегда превышали технические возможности. Поэтому любое государство особо заботилось о развитии техники связи, вкладывая большие средства и используя новейшие достижения науки и техники. В качестве примера можно привести полную драматизма историю прокладки телеграфного кабеля по дну Атлантического океана между Европой и Америкой в 1857-1858 гг., через 20 с небольшим лет после изобретения телеграфа Самюэлем Морзе. Это событие мирового значения прекрасно описано Стефаном Цвейгом в новелле "Первое слово из-за океана".

В этом же ряду - развитие радио - и волоконно-оптической связи последние достижения в этой области продемонстрировали небывало бурное ее развитие и выдающиеся результаты в увеличении скорости передачи информации по оптическому волокну (рис. 1).



Рис.1. Изменение относительной информационной емкости систем связи за последние 100 лет

Из рис. 1 видно, что за 90 лет информационная емкость линий связи возросла на пять порядков, начиная с первых телефонных линий, скорость передачи информации которых составляла 1 бит/с. Примерно такой же рост отмечен и за последние 20 лет - достигнута скорость порядка 1.6 Тбит/с. Масштабы развития волоконно-оптической связи действительно поразительны. Мировое производство оптических волокон в настоящее время составляет 60

млн. км/год, то есть каждую минуту в системах связи прокладываются более 100 км оптических кабелей. Все материки связаны между собой подводными волоконно-оптическими кабелями связи, общая длина которых достаточна, чтобы обмотать земной шар шесть раз. Разработка широкополосных оптических усилителей привела к созданию в конце 90-х годов экспериментальных волоконно-оптических систем связи со спектральным уплотнением 100 и более каналов, что позволило достичь суммарной скорости передачи информации более 1 Тбит/с.

Традиционные технологии телекоммуникаций позволяют по одному оптическому волокну передать только один сигнал. Суть же технологии спектрального уплотнения заключается в возможности организации множества отдельных сигналов АЦИ, СЦИ и др. по одному волокну, а, следовательно, многократном увеличении пропускной способности линии связи.

Основы этой технологии были заложены в 1958, еще до появления самой волоконной оптики. Однако прошло около 20 лет, прежде чем были созданы первые компоненты мультиплексных систем. Первоначально они создавались для лабораторных исследований, и лишь в 1980 году технология спектрального уплотнения (Wavelength Division Multiplexing, WDM) была предложена для телекоммуникаций. А еще через пять лет в исследовательском центре компании AT&T была реализована технология плотного спектрального уплотнения (Dense Wavelength Division Multiplexing, DWDM), когда удалось в одном оптическом волокне создать 10 каналов по 2 Gbps.

Грубое спектральное мультиплексирование было впервые использовано в 1980-х годах, для передачи цифрового видео сигнала по многомодовому оптическому волокну. Технология использовалась компанией Quante в окне 800 нм с четырьмя каналами, по 140 Мбит/с каждый. Данная технология главным образом применялась на кабельных телевизионных сетях. Однако, до недавнего времени эта технология не вызывала интереса.

В настоящее время CWDM становится очень востребованной в качестве транспортной архитектуры. В отличие от DWDM, системы, основанные на технологии CWDM, развертываются на лазерах с распределенной обратной связью и широкополосных оптических фильтрах. Эти технологии для CWDM обеспечивают ряд преимуществ, таких как низкое рассеивание энергии, меньший размер и небольшая стоимость. Коммерческая выгода CWDM систем обеспечивает ей преимущество перед DWDM системами.

Как отмечалось ранее, технология спектрального уплотнения каналов с разделением по длинам волн появилась в начале 80-х годов и поначалу предназначалась для магистральных линий связи, но с 90-х годов WDM стала широко применяться в городских и региональных сетях MAN (Metropolitan Access Network). По мнению специалистов, развитие волоконной оптики и волоконно-оптических систем передачи, включая технологию WDM, несмотря на достигнутые успехи все еще находится в середине своего пути. Городские сети очень чувствительны к стоимости оборудования и для них наиболее интересной и перспективной технологией стало «неплотное» мультиплексирование с разделением по длине волны («разреженное» спектральное уплотнение) - **CWDM** (Coarse Wavelength Division Multiplexing). Развитие систем WDM стало возможно благодаря улучшению технологии оптического волокна, позволившей на порядок расширить рабочую полосу пропускания оптического волокна: с 30 до 340 нм. Затухание в полосе пропускания плавно менялось в относительно небольших пределах: ± 3 дБ, что в свою очередь позволило значительно (в 10-50 раз) увеличить шаг несущих и тем самым существенно упростить фильтрацию несущих на приемной стороне, исключив дорогостоящие элементы. Появился новый класс решений – CWDM. CWDM является технологией передачи данных, которая позволяет дуплексную передачу различных протоколов по оптическому волокну. Технология спектрального

уплотнения применяется для более эффективного использования существующей волоконно-оптической инфраструктуры и повышения пропускной способности оптических волокон. Применение **CWDM** позволяет снизить затраты на прокладку нового оптического кабеля.

Компания Alcatel-Lucent анонсировала новый рекорд передачи данных по оптическому каналу, достигнутый усилиями исследовательского подразделения Bell Labs. Результат – 100 петабит в секунду на километр (эквивалентно 100 млн Гбит/скм). Эксперимент включал передачу объема данных, равного 400 DVD, за секунду на расстояние более 7000 км – приблизительно как между Парижем и Чикаго. Это самая высокая пропускная способность, когда-либо достигнутая для трансокеанской дистанции, и превышает возможности самых передовых коммерческих подводных линий в 10 раз. Чтобы добиться таких показателей, исследователи из Bell Labs инновационным путём использовали новую детектирующую технику и массив разнообразных технологий в области модуляции, передачи и обработки сигналов.

Высокоскоростная передача через оптический канал – это ключевой компонент архитектуры High Leverage Network, разработанной Alcatel-Lucent. Учёные в Вилларсо, Франция, использовали 155 лазеров, причём каждый работал на собственной частоте и обеспечивал 100 Гбит/с, чтобы увеличить возможности стандартной технологии WDM (Wavelength Division Multiplexing – спектральное уплотнение каналов). Число выведено путём умножения количества лазеров на обеспечиваемые ими 100 Гбит/с, а затем полученные 15,5 Тбит/с – на 7000 км дистанции. Комбинация из скорости и расстояния приводит к единице бит в секунду на километр – стандартной для измерений в высокоскоростных оптических каналах.

В использованной сети применялись расположенные через каждые 90 км повторители – устройства, поддерживающие мощность оптического сигнала. Этот отрезок на 20% превышает типичный для оптических линий. Дальнейшее увеличение было затруднено из-за шума – возмущения в сигналах, - появившегося с ростом скорости. Пропускная способность также была повышена благодаря усовершенствованному цифровому сигнальному процессору с когерентной регистрацией – новой технологии, позволяющей использовать больше свойств света, чем прямой метод детектирования в сегодняшних системах. Она дала возможность эффективно повысить ёмкость сети, увеличив количество источников света на единственной оптоволоконной линии и разделить свет на составляющие по достижении им места назначения.

Технология WDM позволяет существенно увеличить пропускную способность канала (к 2003 году достигнута скорость 10,72 Тбит/с, а к 2009 — 15,5 Тбит/с), причём она позволяет использовать уже проложенные волоконно-оптические линии. Благодаря WDM удастся организовать двустороннюю многоканальную передачу трафика по одному волокну (в обычных линиях используется пара волокон — для передачи в прямом и обратном направлениях).

Преимущества ВОЛП. Волоконно-оптические линии обладают рядом преимуществ перед проводными (медными) и радиорелейными системами связи:

- Малое затухание сигнала (0,15 дБ/км в третьем окне прозрачности) позволяет передавать информацию на значительно большее расстояние без использования усилителей. Усилители в ВОЛП могут ставиться через 40, 80 и 120 километров, в зависимости от класса оконечного оборудования.

- Высокая пропускная способность оптического волокна позволяет передавать информацию на высокой скорости, недостижимой для других систем связи.
- Высокая надёжность оптической среды: оптические волокна не окисляются, не намокают, не подвержены электромагнитному воздействию^[1].
- Информационная безопасность — информация по оптическому волокну передаётся «из точки в точку». Подключиться к волокну и считать передаваемую информацию, не повредив его, практически невозможно.
- Высокая защищённость от межволоконных влияний — уровень экранирования излучения более 100 дБ. Излучение в одном волокне совершенно не влияет на сигнал в соседнем волокне.
- Пожаро - и взрывобезопасность при измерении физических и химических параметров
- Малые габариты и масса

Недостатки ВОЛП

- Относительная хрупкость оптического волокна. При сильном изгибании кабеля (особенно, если в качестве силового элемента используется стеклопластиковый прут) возможна поломка волокон или их замутнение из-за возникновения микротрещин.
- Сложная технология изготовления как самого волокна, так и компонентов ВОЛС.
- Сложность преобразования сигнала (в интерфейсном оборудовании).
- Относительная дороговизна оптического оконечного оборудования. Однако, оборудование является дорогим в абсолютных цифрах. Соотношение цены и пропускной способности для ВОЛП лучше, чем для других систем.

Применение ВОЛП. Достоинства волоконно-оптических линий обусловило их широкое применение в телекоммуникационных сетях самых разных уровней — от межконтинентальных магистралей до корпоративных и домашних компьютерных сетей.

1. Принципы построения ВОСП

Оптоволоконная оптика рассматривается как способ передачи информации из одной точки пространства в другую. При этом переносимой информацией средой является оптическое волокно. Оптическое волокно играет ту же роль, что и медный провод, но в отличие от него по волокну переносится свет, а не электрический сигнал. В связи с этим появляется множество преимуществ, что позволяет использовать оптическое волокно как несущую среду в различных областях техники – от телефонии до компьютеров и систем автоматизации. На рис 1.1 показан оптический спектр, используемый для передачи коммуникационных сигналов.

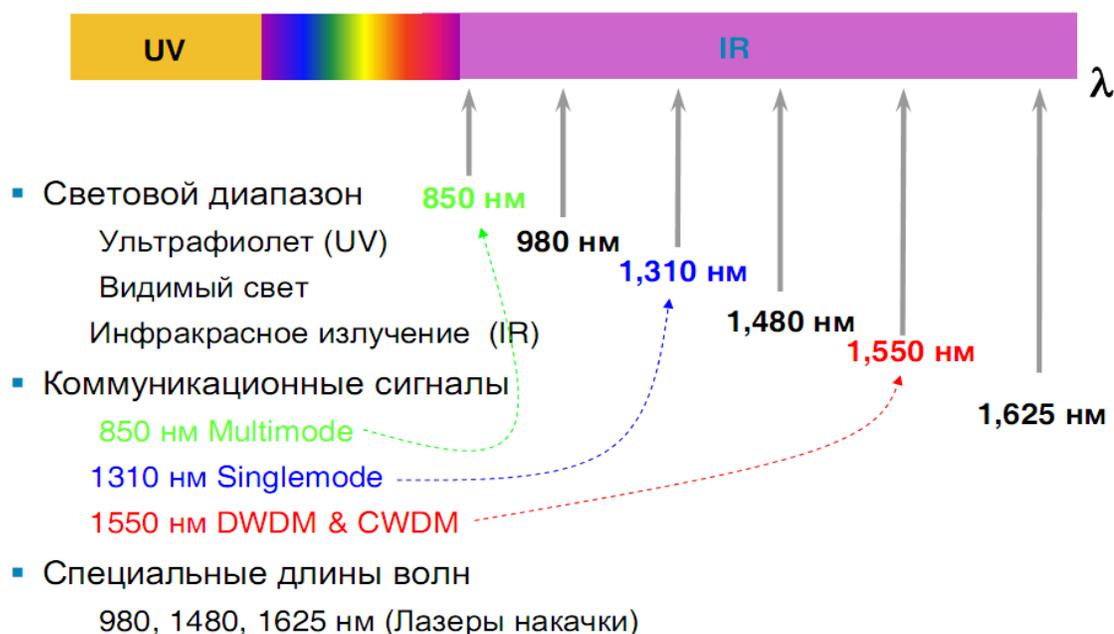


Рис. 1.1. Оптический спектр, используемый для передачи коммуникационных сигналов

Волоконно-оптическая система представляет собой линию, связывающую электрические цепи.

В настоящее время в развитых странах оптические цифровые системы передачи (ОЦСП) широко внедряются на всех участках сетей связи. По сравнению с существующими системами связи на медных кабелях ОЦСП обладают рядом преимуществ. Основными из которых являются: широкая полоса пропускания, позволяющая организовать по одному волоконно-оптическому тракту необходимое число каналов с дальнейшим их наращиванием, а также предоставлять абоненту наряду с телефонной связью любые виды услуг связи (телевидение, телефакс, широкополосное радиовещание, телематическое и справочное обслуживание, рекламу, местную связь и др.); высокая защищенность от электромагнитных помех; малое километлическое затухание и возможность организации ретрансляционных участков большой протяженности; значительная экономия меди и потенциально низкая стоимость оптического кабеля (ОК) и др.

Рассмотрим принцип построения любой цифровой системы передачи, использующей оптическое волокно для передачи информационных сигналов. Структурная схема ОЦСП показана на рис. 1.2.

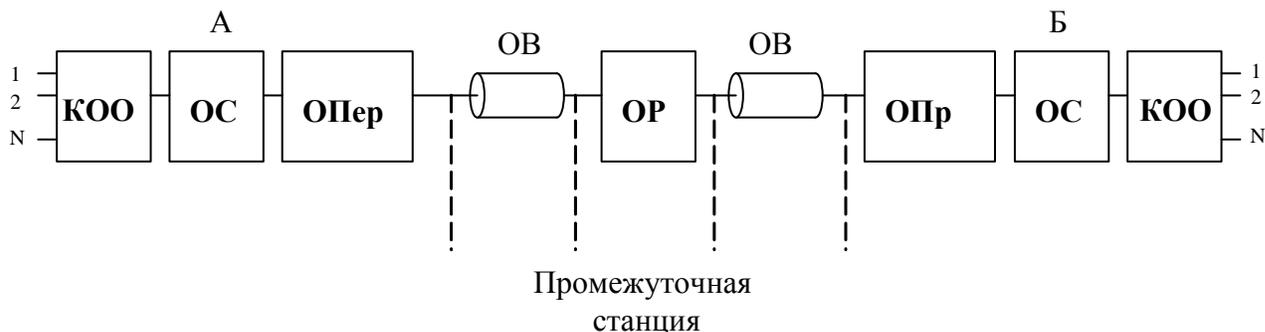


Рис. 1.2. Структурная схема оптической цифровой системы передачи (ОЦСП)

Любую систему передачи можно представить в виде трех составных частей: каналообразующего оборудования (КОО); оборудования сопряжения (ОС) и оборудования линейного тракта, в данном случае оптического линейного тракта (ОЛТ). Каждое оборудование выполняет свои, определенные функции.

КОО на передаче предназначено для формирования стандартных цифровых потоков Е1, Е2, Е3, Е4. Число основных цифровых каналов (ОЦК) на выходе КОО равно числу ОЦК в линейном тракте системы передачи. На приемной стороне происходит обратное преобразование.

ОС на передаче предназначено для преобразования цифрового сигнала в стационарный код с выхода КОО в линейный код, который передается по ОЛТ. ОС представляет из себя преобразователь кода. На приемной стороне ОС содержит электрический регенератор преобразователь линейного кода в стационарный.

ОЛТ. В состав ОЛТ входят оптический передатчик (ОПер), оптическое волокно (ОВ), оптический ретранслятор (ОР) и оптический приемник (ОПр). ОЛТ предназначено для передачи линейного сигнала на любые расстояния.

На передающей станции А (рис. 1.2) первичные сигналы в электрической форме поступают на каналообразующего оборудования, с выхода которой групповой сигнал подается в оборудование сопряжения. В ОС электрический сигнал преобразуется в форму, целесообразную для передачи по волоконно-оптическому линейному тракту. Оптический передатчик (ОПер) преобразует электрический сигнал с помощью модуляции оптической несущей в оптический сигнал. при распространении последнего по оптическому волокну (ОВ) происходят его ослабление и искажение. Для увеличения дальности связи через определенное расстояние, называемое участком ретрансляции, устанавливаются промежуточные обслуживаемые и необслуживаемые станции (оптические ретрансляторы – ОР), где осуществляются коррекция искажений и компенсация затухания.

На промежуточных станциях главным образом по техническим причинам целесообразно производить обработку (усиление, коррекцию, регенерацию и т.д.) электрического сигнала. Поэтому промежуточные станции ВОСП строятся с преобразованием на входе оптического сигнала в электрический сигнал и обратным преобразованием на выходе. В настоящее время возможно построение чисто оптических ретрансляторов на основе оптических квантовых усилителей и регенераторов. На приемной оконечной станции Б осуществляется обратное преобразование оптического сигнала в электрический.

Для модуляции оптической несущей информационным сигналом можно использовать частотную модуляцию, фазовую, амплитудную, модуляцию по интенсивности (МИ), поляризационную модуляцию (ПМ) и др. В подавляющем большинстве случаев применяется модуляция по интенсивности оптического излучения. При фиксированных пространственных координатах мгновенное значение электрического поля монохроматического оптического излучения можно записать в виде:

$$E(t) = E_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0),$$

где E_m – амплитуда поля; ω_0 и φ_0 – соответственно частота и фаза оптической несущей. Тогда мгновенное значение интенсивности равно:

$$P_{мг} = E^2(t) = E_m^2 \cos^2(\omega_0 t + \varphi_0),$$

а усреднение по периоду $T_0 = 2\pi/\omega_0$ дает величину $P = 0,5E_m^2$, которая называется средней интенсивностью или мощностью. При МИ именно величина P изменяется в соответствии с модулирующим сигналом $c(t)$. Обладая волновой природой, оптическое излучение в то же время дискретно. Оно излучается и поглощается только в виде дискретных квантов (фотонов) с энергией hf_0 , где h – постоянная Планка. Поэтому мощность оптического излучения P можно характеризовать интенсивностью (количеством в единицу времени) потока фотонов $J = P/hf_0$. Следовательно, при модуляции интенсивности $J(t) \sim c(t)$.

Применение МИ объясняется тем, что этот вид модуляции в широком диапазоне частот выполняется для используемых в оптических передатчиках полупроводниковых источников излучения (светодиодов, лазерных диодов) простыми техническими средствами. Для управления интенсивностью излучения полупроводникового источника достаточно изменять ток инжекции (накачки) в соответствии с модулирующим сигналом. Это легко обеспечивается электронной схемой возбуждения в виде усилителя тока. Модуляция по интенсивности оптического излучения приводит и к простым решениям обратного преобразования оптического сигнала в электрический сигнал. Действительно, фотодетектор, входящий в состав фотоприемника, является квадратичным прибором, выходной ток которого пропорционален квадрату амплитуды оптического поля, т. е. мощности падающего на фоточувствительную поверхность оптического сигнала.

Рассмотренный принцип приема оптического сигнала относится к методу прямого фотодетектирования (некогерентный, энергетический прием). Другим методом приема является метод фотосмещения (когерентный, гетеродинный и гомодинный прием),

Гетеродинный прием реализуется значительно сложнее метода прямого детектирования и требует совмещения волнового фронта поля гетеродинного излучения с волновым фронтом поля сигнала. В результате фотодетектирования суммарного поля выделяется сигнал промежуточной (разностной) частоты, амплитуда, частота и фаза которого соответствуют указанным параметрам принимаемого оптического сигнала.

Гомодинный прием отличается от гетеродинного тем, что частоты излучений гетеродина и передатчика совпадают. Он дает дополнительное улучшение отношения сигнал-шум до 3 дБ, но его практическая реализация еще более затруднена в связи с необходимостью фазовой автоподстройки частоты лазерного гетеродина.

В настоящее время в качестве оконечной аппаратуры ВОСП используются цифровые системы передачи, т. е. ВОСП строятся как цифровые. Это объясняется существенными преимуществами цифровых СП по сравнению с аналоговыми: - высокой помехоустойчивостью; малой зависимостью качества передачи от длины линейного тракта; высокими технико-экономическими показателями и др. Аналоговые СП не применяются на волоконно-оптических трактах из-за сравнительно высокой нелинейности источников оптического излучения и технической сложности обеспечения требуемой помехозащищенности. Тем не менее, исследования в области аналоговых ВОСП показывают их перспективность в ряде

областей (оптическое кабельное телевидение, телеметрия, системы оперативной и служебной связи).

В настоящее время ОЦСП строятся как *двухволоконные, однополосные, однокабельные*. При таком построении передача и прием оптических сигналов ведутся по двум волокнам и осуществляются на одной длине волны λ . Каждое ОВ является эквивалентом двухпроводной физической цепи. Так как взаимные влияния между оптическими волокнами кабеля практически отсутствуют тракты передачи и приема различных систем организуются по одному кабелю, т. е. ВОСП являются однокабельными.

Принцип построения *двухволоконной, однокабельной, однополосной ОЦСП* показан на рис. 1.3. Достоинством такой ВОСП является использование однотипного оборудования трактов передачи и приема конечных и промежуточных станций, а недостатком весьма низкий коэффициент использования пропускной способности ОВ.

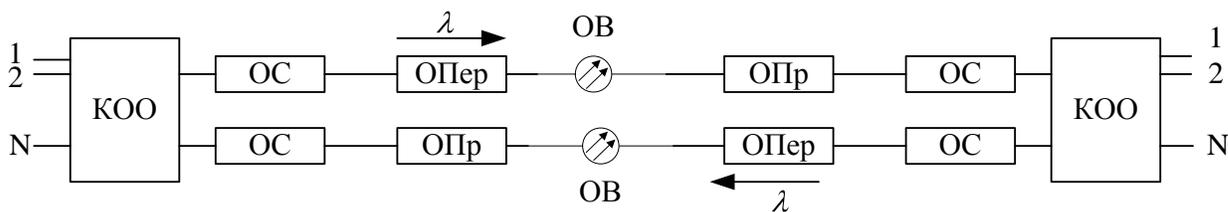


Рис. 1.3. Принцип построения двухволоконной, однополосной, однокабельной ОЦСП

С учетом того, что доля затрат на кабельное оборудование составляет значительную часть стоимости ОЦСП, а цены на оптический кабель в настоящее время остаются достаточно высокими, возникает задача повышения эффективности использования пропускной способности ОВ за счет одновременной передачи по нему большего объема информации. Этого можно добиться, например, передачей информации во встречных направлениях по одному ОВ (*однополосные, одноволоконные, однокабельные ЦОСП*) при использовании на конечных станциях оптических развязывающих устройств (ОРУ) (рис.1.4). Особенностью данной схемы является использование ОВ для передачи сигналов в двух направлениях на одной длине волны.

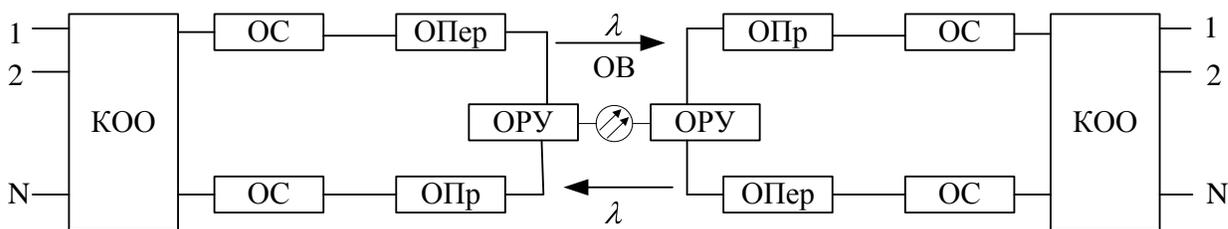


Рис. 1.4. Принцип построения одноволоконной, однополосной, однокабельной ЦОСП

Принципиальной особенностью двусторонних (дуплексных) систем является наличие переходных помех между информационными потоками, распространяющихся во встречных направлениях. Переходные помехи возникают за счет обратного рэлеевского рассеяния в ОВ, ответвителях, из-за отражения света от сварных стыков и разъемных соединений на концах линии, что ограничивает длину участка ретрансляции.

Принцип построения *одноволоконной, двухполосной, однокабельной ОЦСП* показан на рис. 1.5. Передача в одном направлении ведется на длине волны оптического излучения λ_1 в

одном окне прозрачности, а прием осуществляется в другом окне прозрачности на длине волны λ_2 . Разделение направлений передачи и приема осуществляется с помощью направляющих оптических фильтров (ОФ), настроенных на соответствующие длины волн оптического излучения.

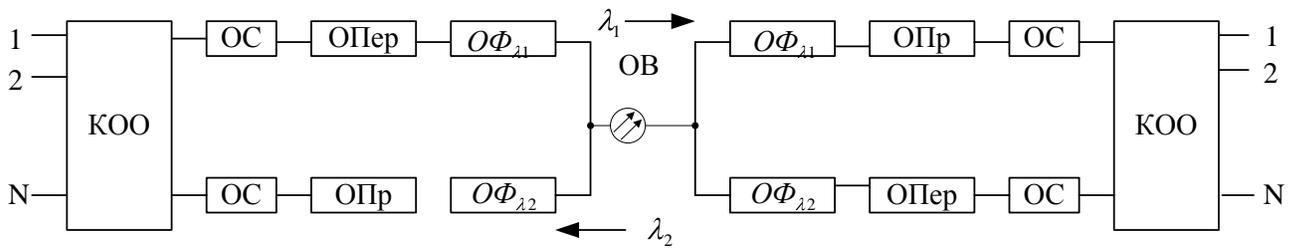


Рис. 1.5. Принцип построения одноволоконной, двухполосной, однокабельной ОЦСП

Так же системы строятся как **двухволоконные многополосные однокабельные** (рис. 1.6). На передающей станции электрические сигналы от N систем передачи поступают на передатчики, излучающие оптические несущие с длинами волн $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n$. С помощью мультиплексоров (МП) и демультиплексоров (ДМ) осуществляется их ввод в одно волокно на передаче и разделение на приеме. Таким образом, по одному ОВ организуется N спектрально разделенных оптических каналов, что значительно увеличивает коэффициент использования пропускной способности волокна.

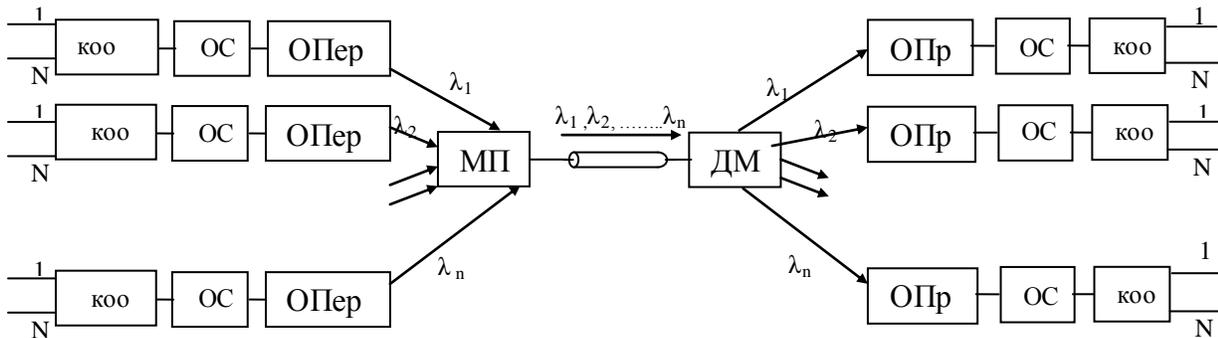


Рис. 1.6. Структурная схема двухволоконной многополосной однокабельной ОЦСП

Принцип работы мультиплексора и демультиплексора основан на известных явлениях физической оптики: дисперсии, дифракции и интерференции. В основе их структуры может быть оптическая призма, многослойный диэлектрик, дифракционная решетка и др.

В настоящее время для уплотнения сигналов в ОВ применяют следующие методы.

Временное уплотнение (Times Division Multiplexing, TDM). Данный метод предполагает объединение нескольких информационных потоков в один. Объединение может быть осуществлено на уровне электрических сигналов и на уровне оптических сигналов. При объединении электрических сигналов (рис. 1.7) две серии импульсов (может быть N источников), поступающие с входов A и B , с помощью устройства объединения (УО) суммируются в определенной последовательности чередования в групповой сигнал. Последний в оптическом передатчике модулирует оптическую несущую, Оптическое излучение распространяется по ОВ и в оптическом приемнике вновь преобразуется в электрический сигнал. Затем этот сигнал разделяется устройством разделения (УР) на две серии импульсов, подобных входным, которые поступают на выходы A' и B' . В настоящее время данный способ уплотнения ВОЛС является основным.

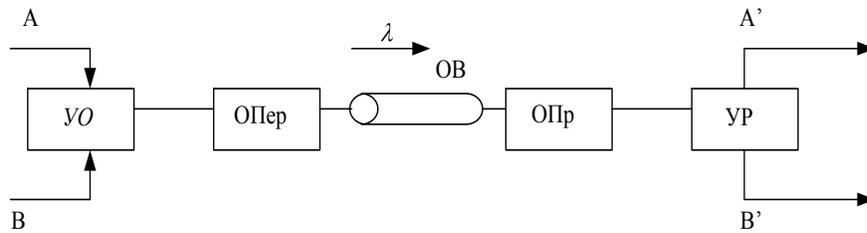


Рис. 1.7. Принцип временного уплотнения на уровне объединения электрических сигналов

Схема объединения оптических цифровых потоков показана на рис. 1.8. Электрические цифровые потоки от N источников поступают на N оптических передатчиков, в которых осуществляется преобразование электрических сигналов в оптические. Перед объединением оптических сигналов происходит их задержка на Δt ; $2\Delta t$; $3\Delta t$;..... $(N-1)\Delta t$. После такой задержки на выходе оптического смесителя (ОС) имеем последовательность оптических импульсов. На приеме осуществляется обратное преобразование.

При временном уплотнении на уровне оптических сигналов требуется передача коротких (10^{-9} с и менее) световых импульсов. Однако передача субнаносекундных импульсов предъявляет высокие требования к быстродействию оптоэлектронных компонент приемопередающего оборудования ОЦСП, близкие к их предельным возможностям. Кроме того, скорость передачи (широкополосность) ограничена дисперсионными свойствами оптического волокна.

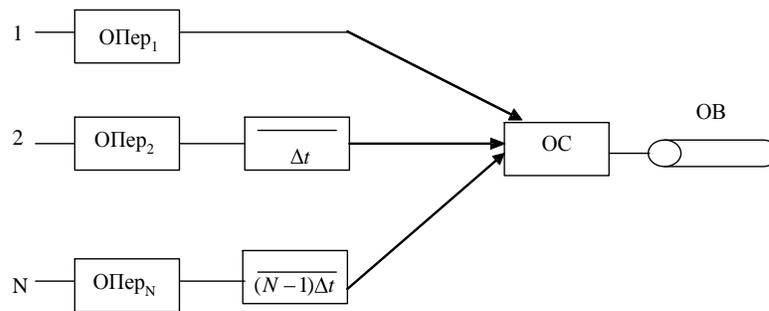


Рис. 1.8. Принцип временного уплотнения на уровне объединения оптических сигналов

К основным достоинствам временного уплотнения относятся: увеличение коэффициента использования пропускной способности оптического волокна (уже экспериментально достигнуты скорости передачи 16 Гбит/с и более); возможность создания полностью оптической сети связи.

Полоса пропускания оптического волокна значительно шире, чем требуется на практике любому отдельно взятому приложению. Необходимость максимально эффективно использовать возможности передачи информации по оптическому волокну послужила толчком для интенсивных исследований.

Технология TDM предусматривает объединение нескольких входных низкоскоростных каналов в один составной высокоскоростной канал. Входные каналы по очереди модулируют высокочастотную несущую в течение выделенных им коротких промежутков времени (тайм-слотов), которые периодически повторяются. Например, в течение первого тайм-слота несущая модулируется первым входным каналом, в течение второго – вторым, в течение

третьего – третьим, в течение четвертого – четвертым, в течение пятого – снова первым, в течение шестого – снова вторым и т. д. (рис. 1.9).

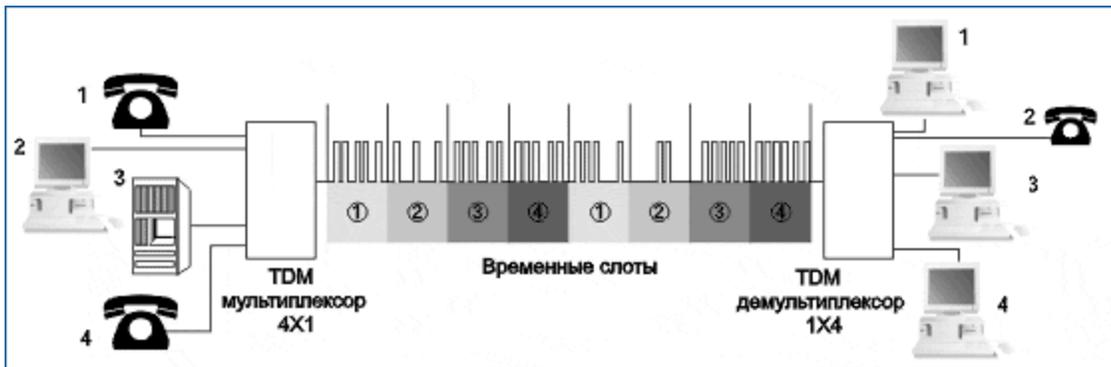


Рис. 1.9. В системах TDM все информационные каналы передаются по одному волокну на одной длине волны в течение соответствующих тайм-слотов

Мультиплексор на одной стороне канала связи собирает данные со всех источников и передает их по волокну в течение соответствующих тайм-слотов. Демультиплексор на другой стороне линии связи выделяет тайм-слоты, считывает данные и передает их соответствующим пользователям уже в виде единых выходных потоков.

Использование технологии TDM позволило увеличить пропускную способность волоконно-оптических линий связи до 10 Гбит/с. Линии со скоростью 10 Гбит/с будут постепенно заменять первоначально использовавшиеся системы TDM со скоростью 2,5 Гбит/с. Скорость передачи 10 Гбит/с в некотором роде разграничивает два типа систем TDM. Выше этой скорости некоторые основные характеристики оптического волокна – поляризационная модовая дисперсия, хроматическая дисперсия – начинают значительно влиять на качество передачи и должны приниматься во внимание при разработке систем связи. Это является серьезным препятствием для ведущихся в настоящее время разработок систем TDM со скоростями передачи 40 Гбит/с и выше. Кроме того, для дальнейшего увеличения скорости требуются новые методы модуляции лазерного излучения, что ведет к росту сложности и стоимости приемо-передающего оборудования. В табл. 1.1 приведены стандартные интерфейсы и соответствующие им скорости передачи иерархий SDH/SONET.

Таблица 1.1. Стандартные интерфейсы и соответствующие им скорости передачи

Оптический модуль SONET	Синхронный транспортный модуль SDH	Скорость передачи
OC-3	STM-1	155 (155,52) Мбит/с
OC-12	STM-4	622 (622,08) Мбит/с
OC-48	STM-16	2,5 (2,48832) Гбит/с
OC-192	STM-64	10 (9,9533) Гбит/с
OC-768	STM-256	40 (39,813) Гбит/с

Одним из существенных факторов, ограничивающих скорость передачи сигнала, является хроматическая дисперсия. Хроматической дисперсией называют как зависимость эффективного показателя преломления от длины волны, так и ее следствие – увеличение

ширины оптических импульсов при их распространении по волокну. Для узкополосного лазера (с шириной спектра не более 0,1 нм) при увеличении скорости передачи с 2,5 Гбит/с (STM-16) до 10 Гбит/с (STM-64) из-за влияния хроматической дисперсии максимально возможная протяженность линии связи уменьшается в 16 раз. Применение методов, уменьшающих влияние хроматической дисперсии, ведет к увеличению потерь, стоимости и сложности системы. Для стандартного ступенчатого одномодового волокна (G.652 по классификации ИТУ) максимальная дальность передачи со скоростью 10 Гбит/с без компенсации и коррекции дисперсии составляет 50-75 км.

Для уменьшения влияния хроматической дисперсии в качестве источников излучения применяют узкополосные лазеры с длиной волны излучения, близкой к длине волны нулевой дисперсии волокна. Работать непосредственно на длине волны нулевой дисперсии волокна не следует из-за возрастающего влияния эффекта четырехволнового смешения FWM (Four-Wave Mixing), которое мы рассмотрим далее. К сожалению, частота излучения лазеров с внутренней модуляцией может определенным образом меняться во времени. Это негативное явление называется чирпированием (Chirp), а модулированный сигнал, несущая которого меняется таким образом – чирпированным сигналом. Чирпирование приводит к значительному расширению спектра генерируемых импульсов. Его можно значительно уменьшить, используя в качестве передатчиков лазеры с внешней модуляцией, что нашло практическое применение во всех современных высокоскоростных системах передачи.

Технология помехоустойчивого кодирования FEC (Forward Error Correction) может увеличить энергетический потенциал системы на несколько дБ. FEC давно используется в беспроводной и спутниковой связи. В этой технологии данные перед передачей кодируются с добавлением избыточных битов. Избыточность позволяет исправлять случайные ошибки в цифровом сигнале без повторной передачи. В технологии FEC обнаружение и исправление ошибок передачи битов выполняется аппаратурой, как правило, на физическом уровне. Однако помехоустойчивое кодирование не в состоянии исправить все ошибки передачи, которые возникают из-за различных причин (хроматическая дисперсия, поляризационная модовая дисперсия, перекрестные помехи, и т.д.).

Поляризационная модовая дисперсия PMD (Polarization Mode Dispersion), также как и хроматическая дисперсия, приводит к уширению импульсов и начинает заметно влиять на качество передачи при высоких скоростях (частотах модуляции). PMD возникает из-за того, что оптическое излучение с различными состояниями поляризации оптического сигнала SOP (State of Polarization) распространяется вдоль волокна с различными скоростями. Это стохастическое явление, поэтому снижать влияние PMD особенно сложно. Известные практические способы не позволяют полностью компенсировать PMD в волокне.

Несмотря на все трудности, скорость передачи в цифровых сетях связи постоянно растет. В 1999 году была достигнута скорость 40 Гбит/с (уровень STM-256).

Одной из перспективных технологий сверхдальней связи считается солитонная передача данных. Солитон – это особый вид светового импульса, который при распространении в определенной среде, и в частности – оптическом волокне, сохраняет свою форму (преимущественно гауссову). При усилении солитона через равные расстояния, теоретически он может распространяться сколь угодно далеко. Это связано с тем, что показатель преломления среды, в которой распространяется солитон, имеет небольшую добавку, которая квадратично зависит от мощности сигнала. При малых мощностях сигнала этой добавкой можно пренебречь. Однако при распространении солитона, представляющего собой волновой

пакет большой мощности, нелинейные явления и хроматическая дисперсия при определенных условиях могут компенсировать изменения формы солитона. При этом солитон обладает исключительной стабильностью параметров распространения и устойчивостью к внешним возмущениям. Несмотря на то, что дальность распространения солитонов и ограничена затуханием сигнала в волокне, эта технология может успешно применяться для передачи сигналов большой мощности на большие расстояния. При солитонной передаче сигналов используют кодирование с возвратом к нулю (рис. 1.10).

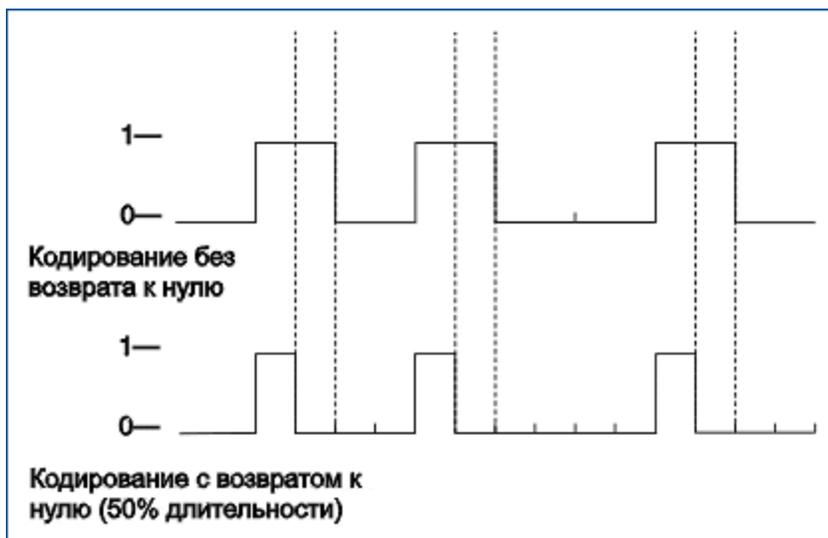


Рис. 1.10. Кодирование с возвратом к нулю

Независимо от того, станет ли технология TDM универсальным протоколом, таким как IP, или будет адаптирована в соответствии со стандартами SONET/SDH, в ближайшие годы ее будут использовать многие операторы. “Второе дыхание” технологии TDM обеспечили успехи в изучении солитонов. Какие бы проблемы не возникали в технологии TDM и какие бы пути их решения не использовались, ни одна существующая технология не может заменить ее в настоящее время. Однако технология WDM может использоваться параллельно с технологией TDM для повышения ее эффективности.

Пространственное уплотнение. Этот метод использует преимущества оптических волокон: гибкость и малые размеры. Это позволяет создавать оптический кабель, содержащий несколько десятков ОВ. При таком методе число источников информации равно числу ОВ в оптическом кабеле, а следовательно, пропускная способность определяется числом ОВ в кабеле. Недостатком пространственного уплотнения являются большой расход оптического волокна, значительные затраты на каблирование, а следовательно, и высокая относительно стоимость линейного тракта. Для магистральных ОЦП, где стоимость 1 кан/км определяется в основном стоимостью кабеля, метод пространственного уплотнения не обеспечивает улучшения технико-экономической эффективности. Свое применение он находит при построении локальных сетей.

Спектральное уплотнение. Одним из наиболее перспективных методов увеличения коэффициента использования пропускной способности ОВ – является спектральное уплотнение или мультиплексирование по длине волны (Wavelength Division Multiplexing, WDM). В настоящее время WDM играет в оптических синхронных системах ту же роль, что и мультиплексирование с частотным разделением (Frequency Division Multiplexing, FDM) в аналоговых системах передачи данных.

где: $\Delta f_{ГС}$ - спектр группового сигнала; $\Delta f_{КС}$ - спектр канального сигнала; $\Delta f_{НЧР}$ - номинальное частотное разнесение (НЧР) каналов.

Групповой сигнал усиливается оконечным оптическим усилителем ОА (бустером), с помощью которого в интерфейсе MPI-S устанавливается необходимая общая средняя мощность линейного сигнала $P_{ЛС}$.

Оптический линейный тракт (ОЛТ) содержит линейные оптические усилители (LOA), компенсирующие затухание, вносимое участками оптических волокон длиной $l_1 \dots l_i \dots l_k$. Вместо любого из усилителей может быть включен мультиплексор ввода/вывода каналов OADM с такими же интерфейсами R' и S', как и у оптического усилителя.

Приемник (RX) содержит предварительный оптический усилитель (ОА), усиливающий линейный сигнал, оптический демультиплексор (OD), разделяющий групповой сигнал на канальные сигналы, приемные трансиверы RX_i , в состав которых, в частности, входят конверторы, преобразующие длины волн $\lambda_1 \dots \lambda_n$, в длину волны λ_0 , соответствующую STM-N или ATM.

Оптический служебный канал (OSC) организуется на длине волны, лежащей либо вне диапазона спектра WDM, либо внутри его. OSC вводится и выводится как в оптических передатчике и приемнике, так и в линейных усилителях и мультиплексорах ввода/вывода (OADM) оптического тракта.

Таким образом, при построении ОЦСП-WDM используются три вида усилителя: линейный, предварительный и усилитель мощности.

Другим вариантом формирования линейного сигнала с уплотнением по длине волны (спектральное уплотнение) является *частотное или гетеродинное уплотнение*. В системах передачи с частотным уплотнением исходным сигналам различных источников информации в линейных трактах отводятся определенные полосы частот. В этом случае для получения группового линейного сигнала требуются близко расположенные стабильные оптические несущие. Однако нестабильность линии излучения полупроводниковых лазеров, особенно при высокоскоростной модуляции, приводит к тому, что расстояние по спектру между рабочими длинами волн соседних каналов во много раз превышает полосу информационного сигнала. Поэтому для получения близко расположенных спектральных каналов в ВОСП используются различные несущие не от разных источников, а от одного с помощью сдвига оптической несущей.

Оптическое излучение с выхода лазерного источника излучения (ИИ) (рис. 1.12), содержащего ряд несущих $f_1, f_2, f_3, \dots, f_n$, поступает на анализатор A_1 представляющий собой призму Глана—Тейлора, а затем, пройдя четвертьволновую призму,— на фильтр первого канала Φ_1 . Этот фильтр пропускает оптическую несущую первого канала f_1 к оптическому модулятору OM_1 , где она модулируется. Оптическое излучение с частотами f_2, f_3, \dots, f_n (т. е. кроме f_1) отражается фильтром и возвращается к анализатору A_1 , по пути к которому вторично проходит через четвертьволновую призму и попадает на анализатор A_2 . Оптическая несущая первого канала, промодулированная в оптическом модуляторе OM_1 информационным сигналом, отражаясь от зеркала, также возвращается к анализатору A_1 .

Плоскость поляризации оптического сигнала, дважды прошедшего четвертьволновую призму, поворачивается на $\pi/2$ по отношению к плоскости поляризации исходного колебания, в связи с чем световой пучок отклоняется в призме и выходит из нее. Далее общий сигнал поступает на анализатор A_2 и процесс повторяется, с той лишь разницей, что модулируется оптическое излучение с частотой f_2 . Таким образом, формируется оптический групповой сигнал, поступающий в оптическую линию связи.

На приеме оптический групповой сигнал, содержащий ряд промодулированных оптических несущих, поступает на анализатор A_1 (рис. 1.13), а затем после прохождения через четвертьволновую призму и фильтр первого канала - на оптический смеситель (ОС). Фильтр

Φ_1 пропускает только оптический сигнал с частотой f_1 , остальные сигналы отражаются и поступают на A_2 .

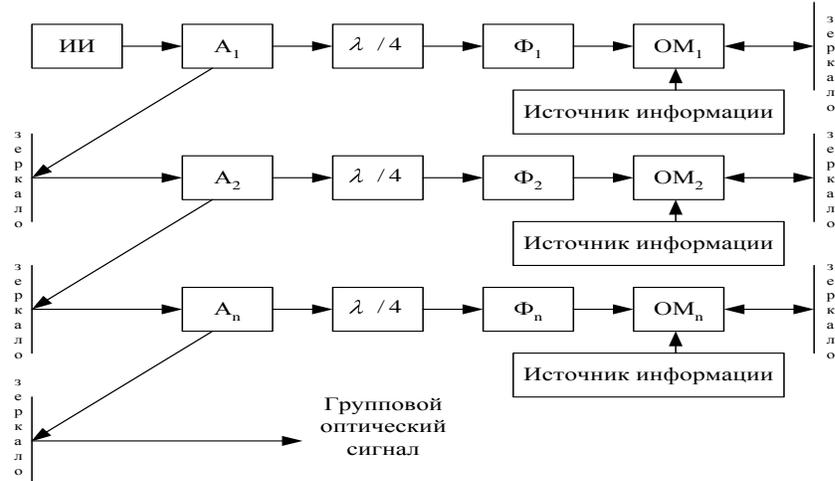


Рис. 1.12. Принцип формирования группового оптического сигнала при частотном (гетеродинном) уплотнении

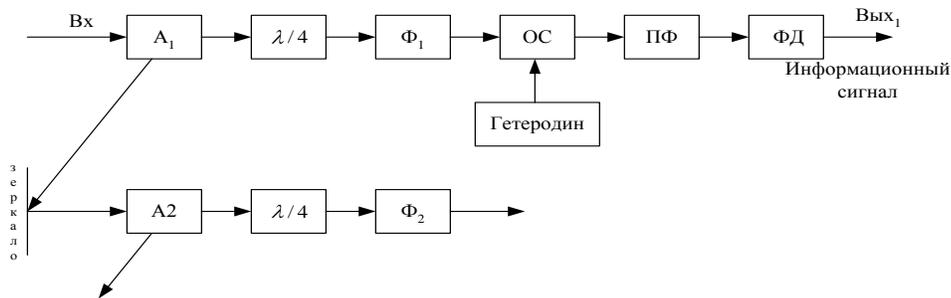


Рис.1.13. Принцип приема группового оптического сигнала при частотном (гетеродинном) уплотнении

Оптическая промодулированная несущая с частотой f_1 перемножается в ОС с частотой местного гетеродина, затем промежуточная частота f_{np} выделяется полосовым фильтром (ПФ) и поступает на фотодетектор (ФД), на выходе которого формируется электрический сигнал. Таким образом, прием осуществляется гетеродинным способом. Аналогично происходит детектирование сигнала во всех остальных каналах.

Достоинства метода частотного (гетеродинного) уплотнения заключаются в том, что длина участка регенерации за счет гетеродинного приема возрастает до 200 и более км; значительно повышается коэффициент использования пропускной способности оптического волокна. К недостаткам относится то, что при данном методе требуется оптический тракт приема и передачи с сохранением поляризации, а также целый ряд дополнительных устройств: сдвигателей частоты, оптических вентилях, контроллеров поляризации, оптических усилителей, системы автоподстройки частоты и т. п., что значительно усложняет систему и увеличивает ее стоимость.

Особо следует отметить, что с внедрением технологии WDM появилась возможность создавать многофункциональные системы передачи. Пример одной из таких схем организации связи приведен на рис. 1.14.

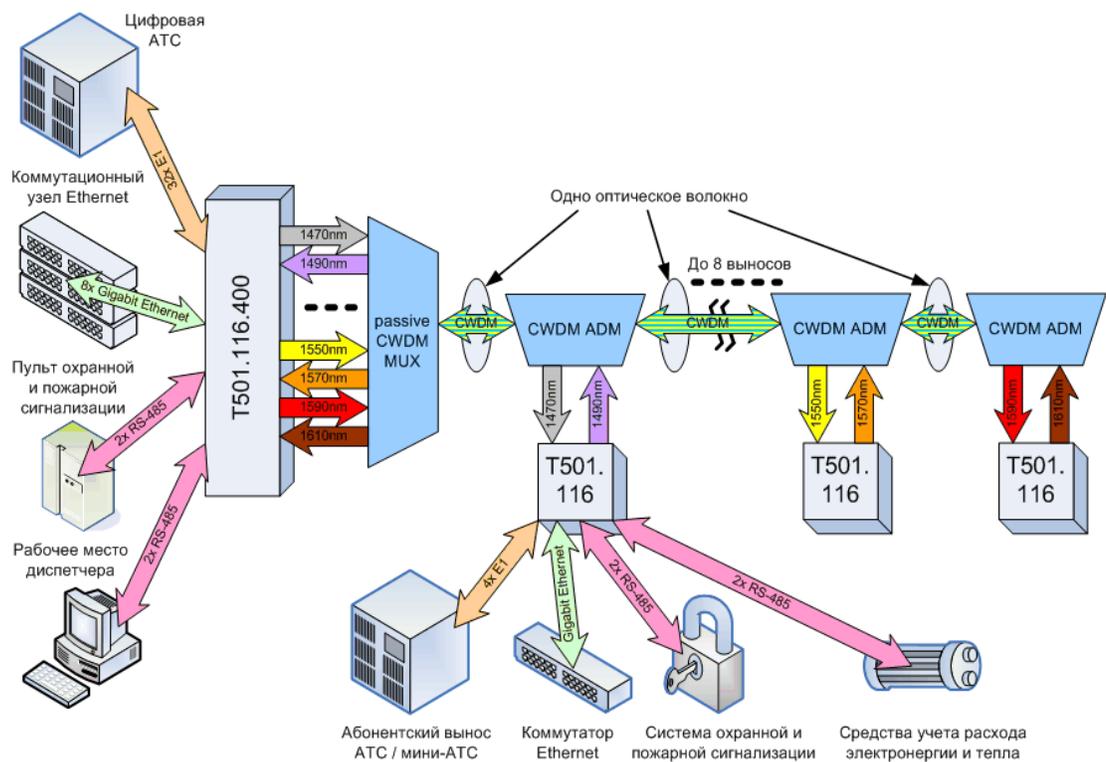


Рис. 1.14. Схема организации связи.

Вопросы для самоконтроля

1. Какой оптический спектр используется для передачи коммуникационных сигналов?
2. Какие существуют способы построения линейных трактов ВОСП? Достоинства, недостатки, область применения каждого способа.
3. Какие способы уплотнения ВОЛС Вам известны? Достоинства, недостатки область применения каждого способа.
4. В чем заключается принцип спектрального уплотнения. Структурная схема. Достоинства, недостатки.
5. Какие требования предъявляются к технологии WDM?

2. Классификация WDM

История разработки и использования окон прозрачности. Первоначально, в 70-х годах, системы волоконно-оптической связи использовали первое окно прозрачности, поскольку выпускаемые в то время GaAs-лазеры работали на длине волны 850 нм. В настоящее время этот диапазон из-за большого затухания используется только в локальных сетях. В 80-х годах были разработаны лазеры на тройных и четверных гетероструктурах, способные работать на длине волны 1310 нм и второе окно прозрачности стало использоваться для дальней связи. Преимуществом данного диапазона явилась нулевая дисперсия на данной длине волны, что существенно уменьшало искажение оптических импульсов.

Третье окно прозрачности было освоено в начале 90-х годов. Преимуществом третьего окна является не только минимум потерь, но и тот факт, что на длину волны 1550 нм приходится рабочий диапазон волоконно-оптических эрбиевых усилителей (EDFA). Данный тип усилителей, имея способность усиливать все частоты рабочей области, предопределил использование третьего окна прозрачности для систем со спектральным уплотнением (WDM).

Четвёртое окно прозрачности простирается до длины волны 1620 нм, увеличивая рабочий диапазон систем WDM.

Пятое окно прозрачности появилось в результате тщательной очистки оптического волокна от посторонних примесей. Таким образом, было получено оптическое волокно AllWave, имеющее малые потери во всей области от 1280 до 1650 нм.

Исторически первыми возникли двухволновые WDM системы, работающие на центральных длинах волн из 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. Этот способ позволяет либо удвоить скорость передачи по одному оптическому волокну, либо организовать дуплексную связь.

На начальном этапе развития технологии WDM, были рекомендованы к освоению три окна прозрачности – 0.85, 1.3 и 1.55 мкм. В зависимости от расположения каналов в этих окнах ОЦСП-WDM подразделялись на:

- простые WDM – системы (номинальное частотное разнесение каналов, НЧР, не менее 200 ГГц, число каналов не более 8);
- плотные WDM – системы DWDM (частотное разнесение каналов не менее 100 ГГц, число каналов не более 40);
- сверхплотные WDM – системы HDWDM (частотное разнесение каналов порядка 50, 25 и 12.5 ГГц, число каналов порядка 80, 160 и 320).

При этом на этапе внедрения технологии WDM предполагалось, их использование в третьем и четвертом окнах прозрачности спектра ОВ (рис. 2.1). Весь спектр разбит на два диапазона С и L (С - Band, L - Band). С-диапазон разбит на два поддиапазона S(R) и L(R). Границами этого диапазона являются длины волн 1528,77 нм и 1569,59 нм (соответственно частоты 191,0 ТГц и 196,2 ТГц). L-диапазон характеризуется граничными длинами волн 1569,59 нм и 1612,55 нм (соответственно 191,0 ТГц и 185,9 ТГц). Таким образом, ширина спектра С - диапазона - 40,8 нм (5,2 ТГц), L - диапазона - 43,1 нм (5,1 ТГц).

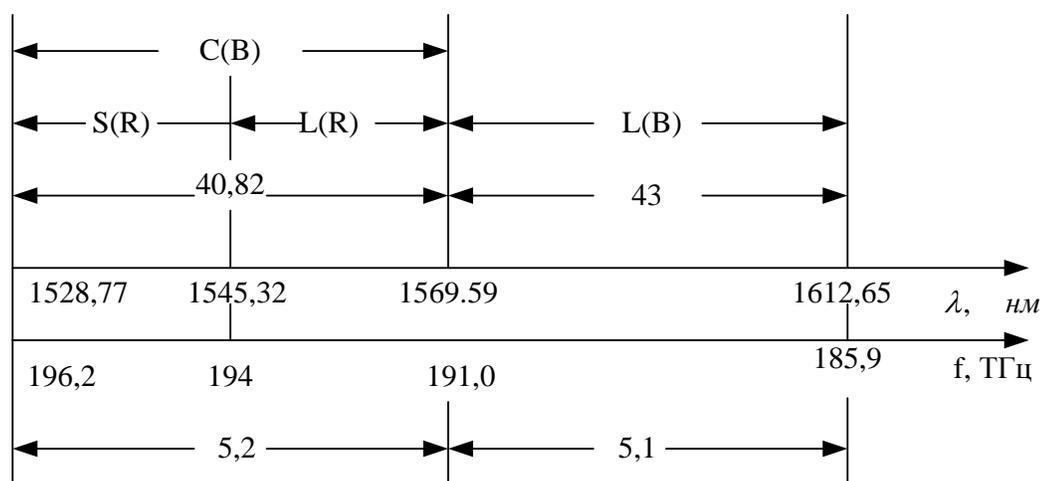


Рис. 2.1. Спектр ОЦСП-WDM

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 разнесом каналов не менее 200 ГГц, позволяющие мультиплексировать не более 18 каналов.

(Используемые в настоящее время CWDM работают в полосе от 1260 до 1620 нм, промежуток между каналами 20 нм (200 GHz), можно мультиплексировать 18 спектральных каналов.)

- плотные WDM (Dense WDM — DWDM) — системы с разнесом каналов не менее 100 ГГц, позволяющие мультиплексировать не более 40 каналов.
- высокоплотные WDM (High Dense WDM — HDWDM) — системы с разнесом каналов 50 ГГц и менее, позволяющие мультиплексировать не менее 64 каналов.

Следует отметить, что в последнее время в литературе к плотным WDM относят, также и высокоплотные – HDWDM.

В связи с расширением рабочего диапазона оптических волокон Международным союзом электросвязи были утверждены новые спектральные диапазоны в интервале 1260...1675 нм (табл. 2.1).

Таблица 2.1. Окна прозрачности оптического волокна

Обозначение	Диапазон, нм	Русское название	Английское название
O	1260...1360	Основной	Original
E	1360...1460	Расширенный	Extended
S	1460...1675	Коротковолновый	Short wavelength

C	65	1530...15	Стандартный	Conventional
L	25	1565...16	Длинноволновый	Long wavelength
U	75	1625...16	Сверхдлинноволновый	Ultra-long wavelength

Вопросы для самоконтроля.

1. Какие системы WDM относятся к грубым WDM?
2. Какие системы WDM относятся к плотным WDM?
3. Какие системы WDM относятся к сверхплотным WDM?
4. Сколько окон прозрачности рекомендованы МСЭ для освоения?
5. Назовите диапазоны длин волн, используемых для технологии WDM.

3. Технология DWDM (плотные WDM)

Функциональная схема, поясняющая технологию DWDM, показана на рис. 3.1. По мере прохождения по оптическому волокну сигнал постепенно затухает. Для того чтобы его усилить, используются оптические усилители. Теоретически это позволяет передавать данные на расстояния до 4000 км без перевода оптического сигнала в электрический (для сравнения, в SDH это расстояние не превышает 200 км).

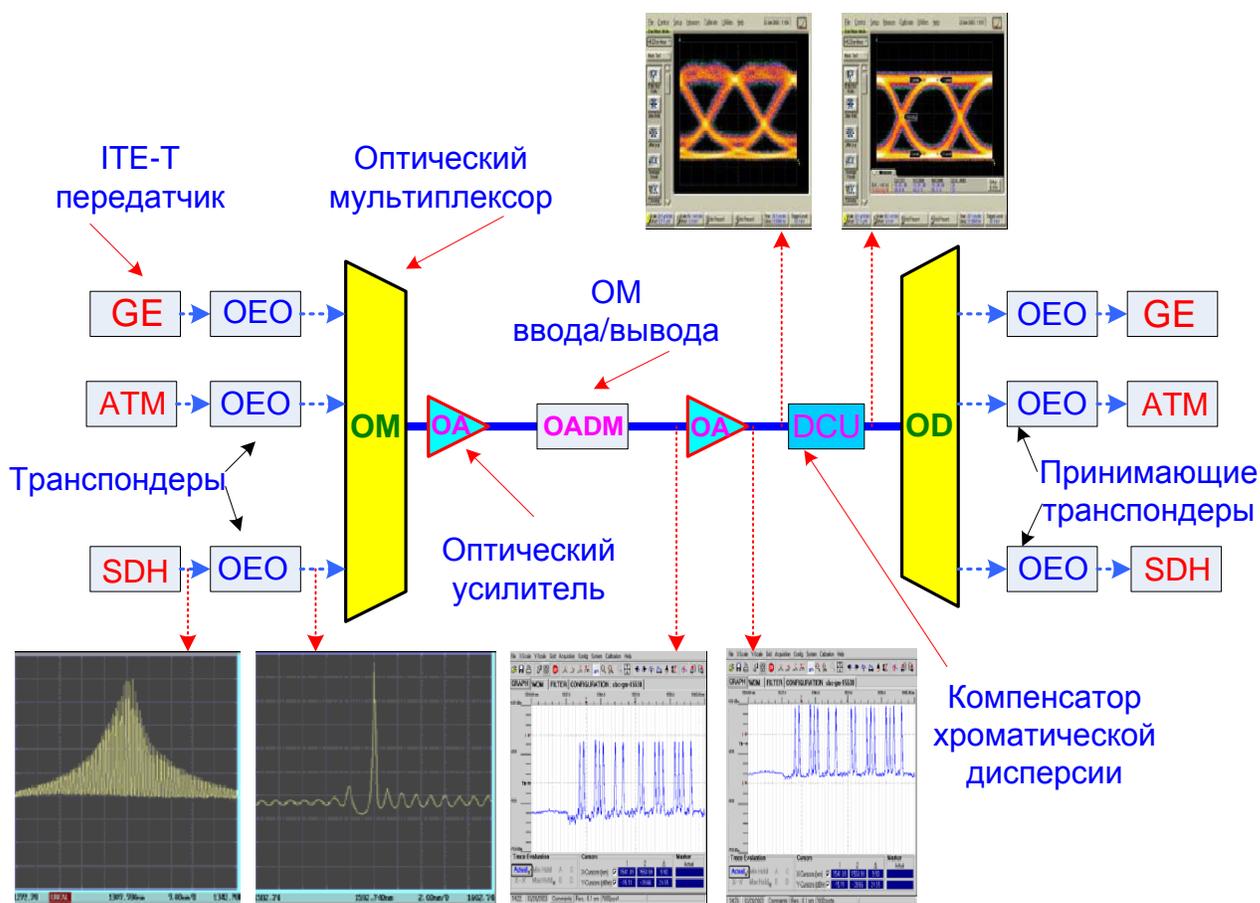


Рис. 3.1. Общая архитектура DWDM системы

Преимущества DWDM очевидны. Эта технология позволяет получить наиболее масштабный и рентабельный способ расширения полосы пропускания волоконно-оптических каналов в сотни раз. Пропускную способность оптических линий на основе систем DWDM

можно наращивать, постепенно добавляя по мере развития сети в уже существующее оборудование новые оптические каналы.

Частотный план для DWDM систем определяется стандартом ITU G.694.1. Область применения — магистральные сети. Этот вид WDM систем предъявляет более высокие требования к компонентам, чем CWDM (ширина спектра источника излучения, температурная стабилизация источника и т. д.). Толчок к бурному развитию DWDM сетей дало появление недорогих и эффективных волоконных эрбиевых усилителей (EDFA), работающих в промежутке от 1525 до 1565 нм (третье окно прозрачности кварцевого волокна).

3.1 Частотный план систем DWDM

Как уже отмечалось выше, попытки использовать спектральное уплотнение каналов для увеличения суммарной скорости передачи в волокне делались достаточно давно, более 18 лет назад. Вначале объединяли диапазоны 850 нм и 1310 нм, потом — 1310 и 1550 нм. Совместное использование этих диапазонов и сейчас предлагают многие стандартные системы SDH. Однако в дальнейшем, с развитием технологии производства лазеров, усилителей и мультиплексоров, открылись возможности формировать несколько десятков каналов в одном волокне, в диапазоне 1550 нм.

Чтобы обеспечить взаимную совместимость оборудования различных производителей, было предложено стандартизировать номинальный ряд оптических несущих, т.е. создать каналный или частотный план. Эту задачу решил сектор стандартизации Международного союза электросвязи (МСЭ), разработав стандарт ITU — Rec. G.692. Первоначально в основу проекта стандарта был положен каналный план с равномерным расположением несущих частот каналов, с их разнесом на 0,1 ТГц (100 ГГц). Выбранному спектральному диапазону длин волн, от 1528,77 нм до 1569,59 нм, соответствует область частот шириной 5,1 ТГц. При выборе постоянного шага равного 100 ГГц, в этом диапазоне можно максимально разместить 51 канал. При этом шаг по длине волны получается разным — от 0,78 нм до 0,821 нм (или в среднем 0,8 нм).

Однако в дальнейшем выяснилось, что целый ряд производителей разработал оборудование, способное формировать и выделять оптические несущие, отстоящие друг от друга на 50 ГГц (0,4 нм). В то же время, для многих приложений не требуется такого плотного заполнения рабочего диапазона и расстояние между каналами можно увеличить до 200 и даже 400 ГГц. Таким образом, окончательная версия стандарта ITU G.692 разрешает расстановку каналов с шагом 50, 100, 200 и 400 ГГц (соответственно 0,4; 0,8; 1,6 и 3,2 нм по длине волны). При шаге в 0,4 нм в диапазоне 1529 — 1565 нм удастся разместить до 102 каналов. В настоящее время ITU рекомендовал для использования диапазон между каналами 25 и 12,5 ГГц (0,2 и 0,1 нм).

Во всех случаях частотное разнесение каналов определяется следующими факторами: линейными переходами между каналами, возникающими в мультиплексорах, демultipлексорах и между оптическими фильтрами, расположенными в блоке OA/OD; нелинейными переходами между каналами, возникающими в ОВ.

Наиболее опасными являются переходы из-за четырехволнового смешивания (FWM). Так как для ОВ различных типов мощности помех от этих переходов разные, то частотные планы разрабатываются отдельно для каждого типа волокон.

В рекомендации МСЭ-Т G.692 разработаны частотные планы только для третьего окна прозрачности и волокон, соответствующих рекомендациям G.652, G.655, G.653.

Один из частотных планов, предложенных для волокон G.652/G.655 приведен в табл. 5.1. В ней даны значения оптических несущих для DWDM с числом каналов $n = 40$ (этот же план

можно применить при любом числе каналов $n > 8$, и НЧР = 1000 ГГц), а также значения оптических несущих при НЧР = 200 ГГц ($4 < n < 20$), для $n = 8$ (НЧР = 500 ГГц), $n = 4$ (НЧР = 600 ГГц и НЧР = 1000 ГГц).

Аналогичные частотные планы разработаны и для ОВ G.653.

Для уменьшения влияния четырехволнового смешивания при организации ВОСП-WDM на волокнах G.653 предлагается использовать неодинаковое НЧР между каналами.

Заметим, что максимальная скорость передачи B_{max} ВОСП - WDM во многом определяется приятым частотным планом.

$$B_{max} = B_{ch} \cdot n,$$

где B_{ch} - максимальная скорость передачи в канале; n - число каналов.

Поэтому увеличить скорость передачи системы WDM можно, увеличивая скорость передачи в канале. Например, если $n = 4$, $B = 2,5$ Гбит/сек (STM-16), то $S_{max} = 10$ Гбит/с, что соответствует 64-му уровню STM-N.

Строгая регламентация оптических частот для систем HDWDM, DWDM делает весьма актуальной постановку вопроса о стабильности и точности установления частот оптических несущих ($\lambda_1 \dots \lambda_N$). В рекомендации ITU-T G.692 отмечается, что эта проблема находится в стадии изучения и поэтому, в документах пока нет числовых значений этих параметров. Тем не менее, исходя из установленных значений спектральных каналов и частотного интервала между ними можно с достаточной точностью оценить допустимую ширину спектральной линии излучения лазера (Δ), а также допустимую величину нестабильности оптической частоты.

При передаче потоков STM-64 методом DWDM при спектральных интервалах 100 ГГц спектральная ширина линии излучения Δ не должна превышать величину $\Delta = \pm 0,08$ нм, нестабильность оптической несущей не более 10 ГГц. В случае передачи методом DWDM цифровых потоков STM-16 допустимые значения ширины спектральной линии могут быть увеличены.

Выше отмечалось, что оптические интерфейсы аппаратуры WDM и DWDM должны быть совместимыми с аппаратурой. Однако, согласно рекомендациям МСЭ G.957 для систем СЦИ (SDH) допустимые значения спектральных параметров на выходных оптических стыках (интерфейсах) имеют следующие значения: ширина спектральной линии $\Delta = 0,5$ нм (для STM-16), для STM-64 - $\Delta = 0,1$ нм, а центральная оптическая длина волны может иметь любое значение в пределах диапазона 1530... 1565 нм. В качестве примера в табл. 3.1 приведена сетка центральных частот спектральных каналов при использовании ОВ G.652/G.655.

Таблица 3.1. Значения центральных частот каналов при использовании ОВ G.652/G.655

Частота ГГц	Интервал 100 ГГц (8 каналов и более)	Интервал 200 ГГц (4 канала и более)	Интервал 400 ГГц (только 4 канала)	Интервал 500/400 ГГц (только 8 каналов)	Интервал 600 ГГц (только 4 канала)	Интервал 1000 ГГц (только 4 канала)	Длина волны, нм
196,1	*	*					1528,77
196,0	*						1529,55
195,9	*	*					1530,33
195,8	*						1531,12
195,7	*	*					1531,90
195,6	*						1532,68
195,5	*	*			*	*	1533,47
195,4	*						1534,25
195,3	*	*		*			1535,04
195,2	*						1535,82

195,1	*	*					1536,61
195,0	*						1537,40
194,9	*	*			*		1538,19
194,8	*			*			1538,98
194,7	*	*					1539,77
194,6	*						1540,56
194,5	*	*				*	1541,35
194,4	*						1542,14
194,3	*	*		*	*		1542,94
194,2	*						1543,73
194,1	*	*					1544,53
194,0	*						1545,32
193,9	*	*	*	*			1546,12
193,8	*						1546,92
193,7	*	*	*		*		1547,72
193,6	*						1548,51
193,5	*	*	*			*	1549,32
193,4	*			*			1550,12
193,3	*	*	*				1550,92
193,2	*						1551,72
193,1	*	*	*		*		1552,52
193,0	*			*			1553,33
192,9	*	*	*				1554,13
192,8	*						1554,94
192,7	*	*	*				1555,75
192,6	*						1556,55
192,5	*	*	*	*	*	*	1557,36
194,4	*						1558,17
192,3	*	*	*				1558,98
192,2	*						1559,79
192,1	*	*		*			1560,61

Очевидно, что если на оптические входы мультиплексоров подать сигналы с выходов оптических передатчиков мультиплексируемых каналов SDH, то такая система работать не будет. Поэтому на входы оптического мультиплексора должны поступать оптические сигналы, параметры которых, в особенности спектральные, должны строго соответствовать стандартам, определенным рек. G.692. Такое соответствие достигается благодаря применению в аппаратуре DWDM специального устройства - трансивера. Это устройство имеет количество оптических входов и выходов, равное числу уплотняемых оптических сигналов. Но если на любой вход трансивера может быть подан оптический сигнал, параметры которого определены рек. G.957, то выходные сигналы должны по параметрам соответствовать рек. G.692. При этом, если уплотняется N оптических сигналов, то на выходе трансивера длина волны каждого канала должна соответствовать только одному из них в соответствии с сеткой частот, т.е. допустим для первого канала оптический сигнал должен иметь длину волны λ_1 , для второго λ_2 и т.д. до λ_N . С выходов трансивера эти оптические сигналы поступают на строго определенные входы оптического мультиплексора, соответствующие указанным длинам волн $\lambda_1 \dots \lambda_N$.

Следует отметить, что при оптическом уплотнении по длинам волн в оптическом мультиплексоре (ОМ) происходят значительные потери. Так, например, в системе передачи DWDM 32-х спектральных каналов OptiX BWS 320G фирмы Huawei Technologies потери ОМ на канал составляют $\sim 7... 9$ дБ (на одной стороне). С учетом потерь на обеих сторонах (на передаче и на приеме) их общая величина составит $14...18$ дБ. Такие потери значительно сокращают энергетический потенциал системы, поэтому без оптических усилителей возможна передача на весьма небольшие расстояния. Для того чтобы скомпенсировать энергетические потери в ОМ, на передаче применяется волоконно-оптический усилитель мощности (BOOSTER). Если же этой мощности оказывается недостаточно, то оптический усилитель применяется и на приемной стороне.

После мультиплексирования, как уже отмечалось, групповой оптический информационный поток чаще всего также подвергается усилению в оптическом усилителе. При этом суммарная оптическая мощность группового потока, вводимого в линейное ОВ, может существенно превысить величину 10 мВт. Известно, что при такой мощности становится заметным влияние оптических нелинейных явлений, возникающих в ОВ в процессе распространения оптического излучения. Это следующие явления: самомодуляция фазы (SPM) оптической несущей, перекрестная модуляция фазы (CPM), четырехволновое смешивание (FWM). Эти явления проявляются, начиная с указанной мощности в виде дополнительных шумов и перекрестных помех при многоканальной передаче. Начиная с величин оптической мощности несколько десятков мВт становится заметным также эффект вынужденного рассеяния Бриллюэна SBS (или ВРМБ - вынужденное рассеяние Мандельштам - Бриллюэна), а при мощностях порядка 200 мВт преобладающим становится влияние вынужденного рассеяния Рамана SRS (или ВКР - вынужденное комбинационное рассеяние). Величина суммарной оптической мощности в системах WDM, вводимой в оптическое линейное волокно, регламентируется рекомендациями МСЭ (ITU-T) G.692 и ограничивается на уровне +17дБм (50 мВт). Такой уровень обосновывается двумя факторами — допустимым влиянием нелинейных явлений и требованиями безопасности обслуживающего персонала. В этом же документе предложен алгоритм определения величины мощности каждого компонентного оптического сигнала. Следует сказать, что величина +17 дБм установлена не окончательно и в последующих вкладах в рекомендации ITU-T увеличена до +23 дБм.

Наибольшее распространение технология DWDM получила в США, где хорошо развит рынок волоконно – оптических систем. Используется она и на сетях связи других регионов мира, особенно в Европе, Азии и Латинской Америке. Более того, DWDM рассматривается уже не только как средство повышения пропускной способности оптического волокна, а как наиболее надежная технология для опорной инфраструктуры мультисервисных и мобильных сетей, обеспечивающая резкое повышение пропускной способности сети и реализующая широкий набор принципиально новых услуг связи.

Для построения гибких сетей DWDM используются оптические Add - Drop мультиплексоры (OADM), обеспечивающие непосредственный ввод/вывод каналов в магистраль DWDM на оптическом уровне (без преобразований оптического сигнала в электрический) и позволяющие строить разветвлённые транспортные оптические сети.

У большинства ведущих производителей имеется DWDM-оборудование, которое позволяет мультиплексировать в С-диапазоне (1530-1565 нм) до 40 оптических каналов при ширине одного канала 100 ГГц или до 80 оптических каналов при его ширине 50 ГГц. В этом случае максимальная емкость одного оптического канала составляет 10 Гбит/с (уровень STM-64). В диапазоне L (1570-1605 нм) максимальное число оптических каналов может достигать 160 при ширине канала 50 ГГц.

При использовании DWDM-оборудования на 160 каналов одновременно в диапазонах C и L (C + L) возникают определенные требования к оптическим кабелям, а именно: затухание в C- и L-диапазонах должно быть примерно одинаковым. Значит, необходимо использовать оптический кабель с симметричными в этих диапазонах характеристиками по затуханию. Такие кабели разработаны сравнительно недавно. В подавляющем же большинстве случаев операторы используют кабели с несимметричными характеристиками в C- и L-диапазонах. Так, для кабелей, соответствующих требованиям рекомендации G.652, разница затухания в указанных диапазонах может достигать 0,02 дБ/км, что в пересчете на один усилительный участок дает разницу до 2 дБ. В этом случае для расчетов расположения оборудования необходимо брать наибольшее затухание, что приводит к необходимости чаще устанавливать передающее оборудование и в конечном счете увеличит его цену.

Как DWDM, так и SDH-технологии рассчитаны, прежде всего, на использование в телефонных сетях с коммутацией каналов. Однако, согласно мировым тенденциям, развитие телекоммуникаций будущего связано с пакетными и IP-сетями, в связи, с чем уже разрабатывается IP-совместимые оптические методы передачи сигналов. Поэтому в перспективе сети, базирующиеся полностью на SDH-технологии, постепенно потеряют свое значение, однако SDH-функциональность скорее всего, будет продолжать играть важную роль в IP-инфраструктуре. Особенно это касается действующих IP-сетей, поскольку функциональные возможности оборудования SDH только предполагается реализовать в будущих оптических IP-сетях. Совместное применение оборудования SDH и DWDM и широко распространенного на существующих сетях оборудования стандарта PDH обеспечит гибкий и безболезненный переход к полностью IP-совместимым сетям. Такой сценарий развития удовлетворяет требованиям, как к функциональности, так и к пропускной способности сетей.

В настоящее время на рынке появились принципиально новые, солитоновые DWDM-системы, которые позволяют существенно увеличить пропускную способность каналов и дальность передачи. Основное свойство оптического солитона - возможность распространения оптического импульса без дисперсионного расплывания. Солитон - это модулированный по интенсивности оптический импульс, который за счет нелинейного взаимодействия между спектральными составляющими поддерживает неизменной форму оптического сигнала по мере его распространения в волокне. В линейных средах спектральные составляющие оптического импульса не взаимодействуют между собой, что приводит к дисперсионному расплыванию сигнала. При учете нелинейного эффекта перераспределения энергии между спектральными составляющими можно избежать дисперсионного расплывания сигнала, распространяющегося вдоль волокна. Данная технология представляется наиболее перспективной для передачи сигнала STM-256 (40 Гбит/с) на большие расстояния. Однако солитоновые технологии накладывают определенные требования на оптические кабели, что может повлечь необходимость их полной замены на существующих сетях.

Использование технологии DWDM оправданно для передачи больших объемов трафика. С увеличением числа оптических каналов, передаваемых по одному волокну, стоимость передачи единицы информации уменьшается. Так, стоимость передачи одного бита информации по полностью загруженной 160-канальной системе меньше соответствующего показателя для 40/32-канальной системы. Однако при неполной загрузке важно учитывать тот факт, что цена оборудования для 40/32-канальной системы заметно ниже цены 160-канальной системы.

В настоящее время многие операторы переходят на оборудование уровня STM-64 и рассматривают возможность использовать DWDM-технологии для построения магистральных и городских сетей. Современные городские транспортные сети должны поддерживать работу с неоднородным трафиком, в том числе с узкополосным трафиком на базе SDH-систем и

широкополосным ATM- и Ethernet-трафиком. Технология DWDM позволяет объединить передачу разнородного трафика. Для этого каждому типу трафика выделяются свой оптический канал или своя длина волны. Можно утверждать, что технология DWDM становится экономически привлекательной при объеме трафика 40 Гбит/с и выше. Однако экономически эффективной она может быть и при объеме 10 Гбит/с.

Возможность уменьшения стоимости DWDM-оборудования - использование "цветных" интерфейсов. Как мы уже говорили, к трансиверу с одной стороны подключается SDH-оборудование, с другой - оборудование DWDM (оптический мультиплексор/демультиплексор или пассивное оптическое устройство ввода-вывода на базе брегговских решеток). Но если в оборудовании SDH использовать STM-интерфейсы с фиксированной длиной волны и узким спектром излучения, то необходимость в транспондерах отпадает. Такие STM-интерфейсы и называются "цветными". Их использование, означающее не что иное, как отказ от трансиверов, позволяет сократить количество преобразований О-Е-О и уменьшить число соединительных оптических кабелей, что повышает надежность оборудования. Кроме того, уменьшаются размеры оборудования и энергопотребление.

В технологии DWDM минимальная дискретность сигнала - это оптический канал, или длина волны. Использование целых длин волн с емкостью канала 2,5 или 10 Гбит/с для обмена трафиком между подсетями оправдано для построения больших транспортных сетей. Но транспондеры-мультиплексоры позволяют организовать обмен трафиком между подсетями на уровне сигналов STM-4/STM-1/GE. Уровень распределения можно строить и на базе SDH-технологии. Но DWDM имеет большое преимущество, связанное с прозрачностью каналов управления и служебных каналов (например, служебной связи). При упаковке SDH/ATM/IP-сигналов в оптический канал структура и содержимое пакетов не изменяются. Системы DWDM проводят только мониторинг отдельных байтов для контроля правильности прохождения сигналов. Поэтому соединение подсетей по инфраструктуре DWDM на отдельно взятой длине волны можно рассматривать как соединение парой оптических кабелей.

Основными преимуществами сетей DWDM являются:

- высокие скорости передачи;
- высокая утилизация оптических волокон;
- возможность обеспечить 100% защиту на основе кольцевой топологии;
- позволяет использование любых технологий канального уровня благодаря прозрачности каналов оптических волокон;
- возможность простого наращивания каналов в оптической магистрали.

В настоящее время наиболее распространены следующие применения сетей DWDM:

- построение высокоскоростных транспортных сетей операторов национального масштаба, на основе топологий «точка-точка» или «кольцо»
- построение мощных городских транспортных магистралей, которые могут использоваться большим количеством пользователей с потребностями в высоких скоростях передачи и использующих самые различные протоколы.

В сфере сетевой инфраструктуры формируются две основные тенденции — это IP и оптические сети. Если достоинства полностью IP – совместимых сред передачи (как наиболее простых в обслуживании, гибких и «бесшовных» служб на всем тракте от абонента до абонента) уже хорошо разрекламированы, то преимущества параллельной, полностью оптической инфраструктуры недостаточно хорошо известны.

Сегодняшние соединительные сетевые структуры неизбежно требуют преобразований и переключений между оптической и электронной частями сети. Если сейчас это проблема решается на уровне системы управления и обслуживания, то в полностью IP–совместимых сетях будущего появятся новые требования к физическому уровню (такие, как маршрутизация, IP–сигнализация и т.д.). Когда и как эти требования будут реализовываться

— пока продолжаются дискуссии. Тем временем на рынке специалисты разделились во мнениях при решении вопроса о том, как же, в конце концов, должны взаимодействовать IP–маршрутизаторы с оптическими сетями при завершении соединения между абонентами сети.

При рассмотрении сценария развития широкополосных сетей было отмечено, что технология DWDM (совместно с SDH) может сыграть свою важную роль в постепенной миграции сетей к полностью IP–совместимости. Другим многообещающим техническим новшеством в сетях будущего должна стать так называемая «мультипротокольная лямбда–коммутиация», которая является дальнейшим развитием технологии, известной под аббревиатурой MPLS (Multi protocol label switching). Лямбда–коммутиация, фактически уже доступная для внедрения, заменяет обычный заголовок в IP–формате на короткую метку, тем самым увеличивая скорость обработки информационных данных. Мультипротокольная лямбда–коммутиация вносит элемент интеллектуальности в сферу оптических телекоммуникаций, в частности, передающий транспондер теперь может выбирать наиболее короткий и высокоскоростной путь между двумя маршрутизаторами, что позволяет оптимизировать работу сети в целом. Более того, поскольку эта технология разработана на основе MPLS, вопросы о том, каким образом IP–маршрутизатор будет взаимодействовать с оптической средой передачи, как развить дальнейшую стратегию перехода к полностью оптическим IP–совместимым сетям, решаются сами собой.

Несмотря на то, что будущее за IP–совместимыми сетями, DWDM будет продолжать развиваться и совершенствоваться как самостоятельная технология передачи в отношении увеличения количества длин волн, используемых при мультиплексировании. А поскольку пропускная способность была и остается важнейшей проблемой многих операторов связи, роль DWDM как технологии, обеспечивающей поступательное развитие широкополосных мультисервисных сетей, сохранится, возможно, еще в течение длительного времени.

3.2 Эталонные цепи

Документами МСЭ, кроме указанных выше сетки оптических частот WDM систем и предельного уровня оптической мощности группового сигнала, установлены стандарты на структуры (эталонные цепи) соединений линий с WDM. Предложено три варианта структурного построения линий (рис. 3.2):

L (long) - длинная линия с пассивным участком длиной до 80 км и общими потерями до 22 дБ. В такой линии допускается включение до 7-ми промежуточных оптических усилителей при максимальной длине линии до 640 км;

V (very) - очень длинная линия с пассивным участком до 120 км и потерями до 33 дБ. При этом допускается включение до 4-х промежуточных оптических усилителей при общей длине линии до 600 км;

U (ultra) — сверхдлинная линия, состоящая из одного пассивного участка затухание на этом участке составляет 44 дБ, длина линии 160 км.

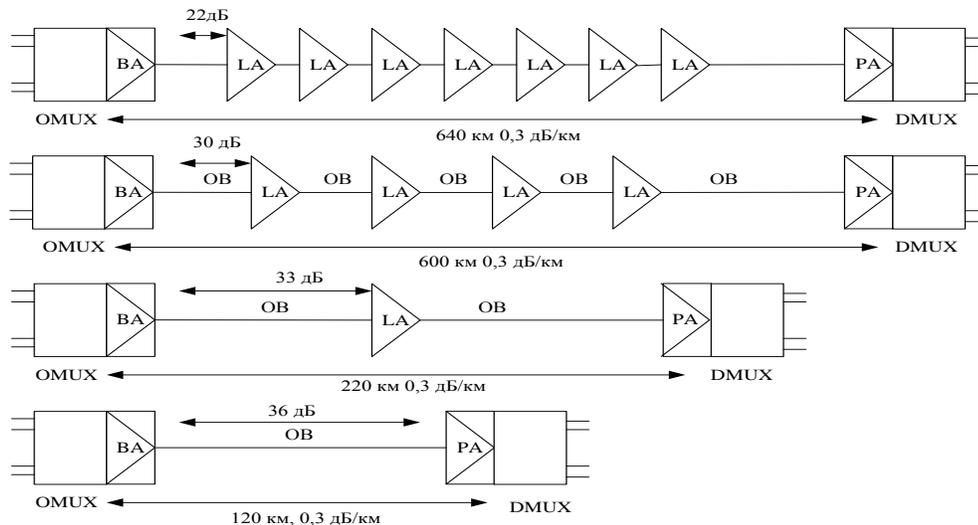


Рис. 3.2. Варианты структурного построения оптической линии WDM

В приведенных вариантах соединений с помощью оптических усилителей компенсируются потери энергии в ОБ. Однако длина оптической линии ограничивается не только величиной потерь и скоростью передачи, но и хроматической дисперсией. Это ограничение в значительной степени может быть преодолено путем компенсации хроматической дисперсии с помощью специальных компенсаторов. Компенсаторы хроматической дисперсии могут быть дискретными и протяженными. Основу дискретных компенсаторов составляют дифракционные решетки Брэгга, а протяженные - дисперсией. В качестве иллюстрации приведенных выше вариантов структур оптических линий с DWDM

Выше было отмечено, что системы DWDM работают в диапазоне оптических длин волн 1530... 1565 нм. Этот диапазон совпадает с полосой пропускания эрбиевых волоконно-оптических усилителей, которые являются одним из основных компонентов многоволновых систем передачи. В соответствии с рек. G.692, как уже отмечалось, в этом диапазоне при частотном интервале 100 ГГц размещается 41 спектральный канал, при интервале 50 ГГц — соответственно в два раза больше. Интенсивные работы по совершенствованию волоконно-оптических усилителей позволили создать усилители с расширенной полосой усиления. Фирма NTT PHOTONICS LAB (Япония) сообщает о практической разработке усилителя с полосой пропускания 80 нм. Эта же фирма сообщает о разработке рамановского волоконно-оптического усилителя с полосой усиливаемых длин волн в 113 нм. Такое расширение полосы усиливаемых длин волн позволило ряду фирм разработать и представить на рынок системы передачи с увеличенным количеством спектральных каналов. Увеличение числа передаваемых спектральных каналов позволило резко повысить информационную емкость систем с HDWDM до 1,2 Тбит/с при передаче таких потоков по одному оптическому волокну.

Выше говорилось, что разработчики DWDM систем передачи в целях увеличения количества передаваемых спектральных каналов стремятся уплотнить сетку частот в пределах диапазона 1530... 1565 нм, уменьшая частотный интервал до 50, 25 и 12,5 ГГц. Вместе с тем активно ведутся работы по внедрению систем с TDM для скорости 40 Гбит/с в многоволновые системы WDM. В Японии была осуществлена передача 30 спектральных каналов со скоростью 40 Гбит/с каждый на расстояние 85 км, т.е. общая информационная емкость системы составила 1,2 Тбит/с. Состоялась также демонстрация трансокеанской системы, по которой было передано 16 каналов по 40 Гбит/с (разработка ALCATEL). В этих системах частотный интервал был равен 100 ГГц.

Одним из важных моментов при разработке WDM систем является проблема организации каналов для передачи сигналов телеконтроля, управления и служебной связи. Для таких систем в соответствии с рек. МЭС-Т (ITU-T) было принято решение для передачи этих сигналов использовать отдельный спектральный канал. При этом его длина волны не должна входить в полосу пропускания эрбиевого волоконно-оптического усилителя. С этой целью рекомендована одна из двух длин волн - 1510 или 1625 нм.

В настоящее время в оборудовании систем связи с DWDM, рассчитанных для передачи до 32-х каналов, ряд фирм применяет длину волны 1510 нм (фирмы NEC, Huawei, SIEMENS и др.), а некоторые — 1625 нм (CIENA). Но с увеличением количества передаваемых каналов до 128 и более возникает необходимость освоения длинноволновой части оптического спектра, в частности L - диапазона (или 4-е окно прозрачности ОВ), в который будет входить длина волны 1625 нм. Для этой цели, в частности, интенсивно ведутся работы по созданию волоконно-оптических усилителей, работающих в L - диапазоне - это усилители на эрбиевом волокне, легированном, кроме ионов эрбия, также и ионами туллия и рамановские оптические усилители. По этой причине, вероятнее всего, для сервисных служб в системах DWDM будет применяться волна 1510 нм.

Создание систем передачи DWDM потребовало разработки целого ряда как активных, так и пассивных квантовых и оптических элементов и устройств с высокостабильными параметрами. Сюда относятся полупроводниковые лазеры с узкой спектральной шириной линии излучения (менее 0,05 нм) при стабильности не хуже $\pm 0,04$ нм. Для этого необходимы электронные устройства, обеспечивающие такую стабильность. Волоконно-оптические усилители должны иметь стабильный коэффициент усиления, малую неравномерность коэффициента усиления ($< \pm 0,5$ дБ) во всем спектральном диапазоне усиления и ряд других характеристик. Среди пассивных элементов наиболее ответственными являются оптические мультиплексоры/демультиплексоры для большего количества каналов при работе в одном окне прозрачности (1530...1565 нм). Расстройка по частоте или по длине волны этих элементов не должна превышать 0,05 нм. Такая стабильность обеспечивается жесткой температурой стабилизацией этих элементов с точностью не хуже $\pm 1^{\circ}\text{C}$. Все это резко повышает стоимость систем DWDM.

3.3. Расчет помехоустойчивости участка ВОЛС с оптическими усилителями

Для увеличения пропускной способности в современных ВОЛС применяется метод спектрального уплотнения каналов — технология DWDM. Поскольку в оптическом волокне происходит ослабление сигнала, через определенное расстояние требуется его восстановление. Для этой цели в системах с DWDM используются оптические усилители (ОУ). Наибольшее распространение получили эрбиевые волоконно-оптические усилители (EDFA).

Оптические усилители являются аналоговыми устройствами и, обеспечивая усиление мощности передаваемого оптического сигнала, накапливают искажения (шумы усилителя, хроматические и поляризационные дисперсионные искажения оптического кабеля и т.д.), возникающие на различных участках многопролетной ВОЛС содержащей несколько ОУ, что приводит к снижению отношения сигнал/шум на фотоприемнике в конце магистрали. Накопление шумов — это фундаментальное свойство аналоговых усилителей.

Поэтому, необходимо предусмотреть такой исходный запас помехоустойчивости для каждого спектрального канала, который позволил бы обеспечить требуемую помехозащищенность переданного информационного сигнала в конце ВОЛС.

Определение требуемого значения отношения сигнал-шум

Функционирование цифровых систем передачи оценивается коэффициентом битовых ошибок ВЕК, определяемым числом ошибок на заданное количество переданных битов информация, т.е. вероятностью появления ошибок. Для расчета BER, достаточно знание одного параметра — (Q-фактора, который определяется следующим выражением):

$$Q = \frac{\mu_0 - \mu_1}{\sigma_0 + \sigma_1}, \quad (1)$$

где μ_0, μ_1 — уровни сигналов, соответствующие 0 и 1; σ_0, σ_1 — их среднеквадратичные отклонения.

Если задано требуемое значение BER, то, пользуясь выражением (2), можно найти требуемое значение Q -фактора.

$$\text{BER}(Q) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right). \quad (2)$$

Рассчитаем Q -фактор, исходя из типичного для современных ВОЛС коэффициента ошибки $\text{BER} = 10^{-10}$, подставляя его в выражение (2), получаем требуемое значение $Q = 6,36$.

Помимо вышеизложенных параметров качество оптического сигнала характеризуют величиной, которую принято называть оптическим отношением сигнал/шум (OSNR). OSNR равно отношению мощности полезного сигнала к мощности шума в спектральном интервале $\Delta\nu$ оптического канала. По мере распространения сигнала между регенераторами значение Q-фактора может только убывать.

Допустимый уровень OSNR, который обеспечивает заданное значение Q - фактора, определяется выражением (3).

$$\text{OSNR} = 4 * Q^2. \quad (3)$$

Подставляя рассчитанное значение, в выражение (3), определяем минимальный допустимый уровень оптического отношения сигнал-шум на выходе ВОЛС $\text{OSNR} = 161,87$ (или 22,09 дБ - в логарифмических единицах).

Рассчитаем коэффициента усиления ОУ. Коэффициент усиления ОУ должен обеспечить компенсацию оптических потерь на участке усиления:

$$g = \alpha_{OB} + \alpha_{OC},$$

(4)

где α_{OB} - потери в оптическом волокне, дБ; α_{OC} — потери в соединениях, дБ. Потери в оптическом волокне определяются как:

$$\alpha_{OB} = \alpha * \sum L_i,$$

где i - средняя строительная длина ОК, км; α а - значение коэффициента затухания оптического волокна, дБ/км;

Потери в соединениях складываются из потерь на разъёмных и неразъёмных соединениях.

$$\alpha_{OC} = \alpha_{nc} * N_{nc} + \alpha_{pc} * N_{pc},$$

(5)

где α_{nc} - потери на неразъёмных соединениях, $\alpha_{nc} = 0,05$ дБ; N_{nc} - количество неразъёмных соединений; α_{pc} - потери на разъёмных соединениях, $\alpha_{pc} = 0,25$ дБ; N_{pc} - количество разъёмных соединений.

Количество неразъёмных соединений зависит от строительной длины оптического кабеля и от общей протяженности линии:

$$N_{pc} = \frac{L}{L_i} - 1,$$

где N_{nc} - количество неразъемных соединений; L - общая протяженность линии.

Рассчитаем коэффициент усиления ОУ, считая заданными следующие параметры:

длина усилительного участка $L_y = 100$ км; волокно G.655 $\alpha = 0,21$ дБ; средняя строительная длина ОК $L_i = 5$ км; количество разъемных соединений $N_{pc} = 2$ (на входе и выходе участка усиления).

Потери в кабеле:

$$\alpha_{ov} = \alpha * L_y = 0,21 * 100 = 21 \text{ дБ.}$$

Количество неразъемных соединений:

$$N_{nc} = \frac{L_y}{L_i} - 1 = \frac{100}{5} - 1 = 19.$$

Тогда по формуле (5) $\alpha_{oc} = \alpha_{nc} * N_{nc} + \alpha_{pc} * N_{pc} = 0,05 * 19 + 0,25 * 2 = 1,45$ дБ. В итоге коэффициент усиления ОУ в рассматриваемой ВОЛС = 22,45 дБ.

Рассчитаем отношения сигнал-шум на выходе РУ. Шумовые свойства оптического усилителя оцениваются с помощью коэффициента шума показывающего, насколько ухудшилось отношение сигнал/шум на выходе усилителя по сравнению с величиной отношения сигнал/шум на входе.

Коэффициент шума (или шум-фактор) одиночного оптического усилителя NF равен:

$$NF = (P_{c,вх}/P_{ш,вх})/(P_{c,вых}/P_{ш,вых}) = (P_{c,вх} * P_{ш,вых})/(P_{ш,вх} * P_{c,вых}), \quad (6)$$

где $P_{c,вх}$ - мощность сигнала на входе ОУ; $P_{ш,вх}$ - мощность шума на входе ОУ; $P_{c,вых}$ - мощность сигнала на выходе ОУ; $P_{ш,вых}$ - мощность шума на выходе ОУ.

Так как $P_{c,вх}/P_{c,вых} = 1/G$, где G - коэффициент усиления ОУ, то выражение (6) можно представить в виде:

$$NF = P_{ш,вых}/G * P_{ш,вх}. \quad (7)$$

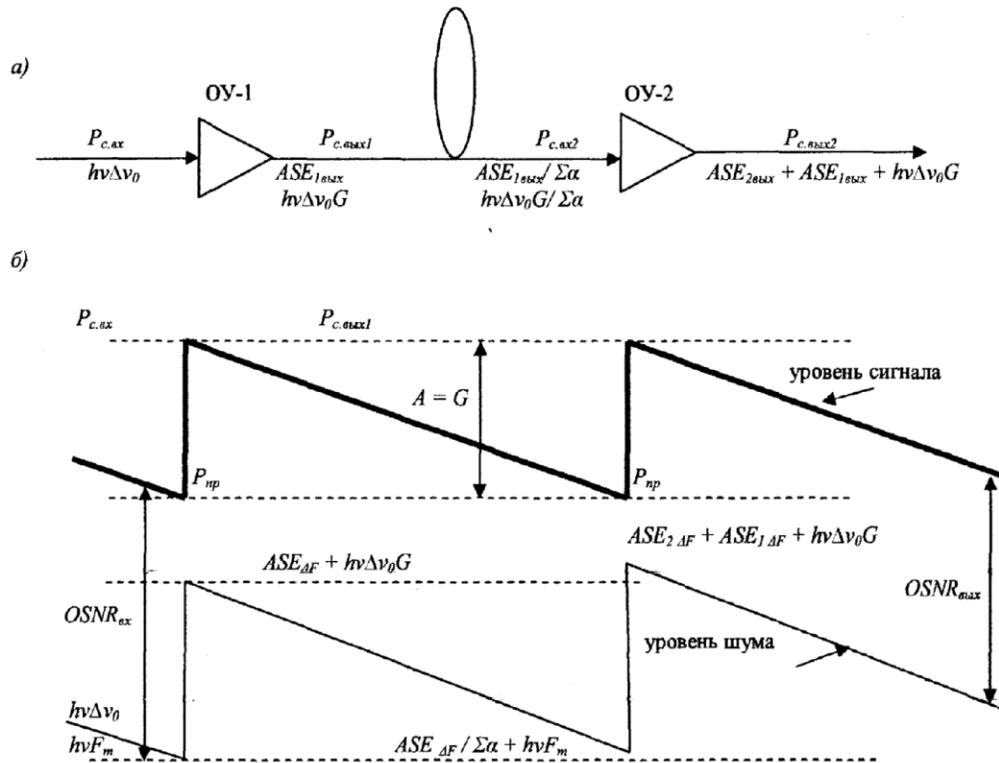
Рассмотрим, как изменяется коэффициент шума для многопролетной линии связи, содержащей ОУ. Примем для упрощения, что:

- все пролеты (усилительные участки) ВОЛС имеют одинаковые потери оптического сигнала A ($\sum \alpha = 10 \lg A$);

- каждый ОУ имеет коэффициент усиления G , причем $G = A$, т.е. усиление ОУ полностью компенсирует потери передаваемого сигнала в каждом пролете;

- система регулирования оптических усилителей обеспечивает режим стабилизации выходной мощности в каждом спектральном канале, величина которой одинакова для всех ОУ.

На рис. 3.3 показан фрагмент многопролетной ВОЛС с оптическими усилителями и диаграммы уровней для сигнала и шума.



а – фрагмент линии с оптическими усилителями;
 б – диаграмма уровней сигнала и шумов для фрагмента ВОЛС
 Рис. 3.3. Накопление шумов в многопролетной ВОЛС с оптическими усилителями

Минимальная мощность шума, действующего на входе оптического усилителя в полосе передаваемого оптического сигнала, определяется квантовым шумом:

$$P_{ш.вх} = h\nu \Delta \nu_0 = N_0, \quad (8)$$

где $h = 6,6252 \cdot 10^{-34}$ Дж*с — постоянная Планка; ν - оптическая частота; $\Delta \nu_0$ — спектральная полоса канала.

Шумы на выходе оптического усилителя складываются из усиленных квантовых шумов и шумов усиленного спонтанного усиления ASE (Amplified Spontaneous Emission).

Мощность шумов усиленного спонтанного излучения ASE, действующих на выходе ОУ в полосе передаваемого информационного сигнала, обозначим $ASE_{\Delta F}$. Тогда полная мощность шумов на выходе первого оптического усилителя ОУ-1 равна:

$$P_{ш.вых} = ASE_{1\Delta F} + G \cdot N_0.$$

Коэффициент шума усилителя ОУ-1 определяется как:

$$NF_1 = P_{ш.вых} / G \cdot P_{ш.вх} = (ASE_{1\Delta F} + G \cdot N_0) / G \cdot N_0 = 1 + ASE_{1\Delta F} / G \cdot N_0. \quad (9)$$

Мощность шумов, действующих на входе следующего оптического усилителя (ОУ-2), равна:

$$P_{ш.вх2} = ASE_{1\Delta F} / A + G * N_0 / A = ASE_{1\Delta F} / A + N_0.$$

На выходе ОУ-2 мощность шумов составит:

$$P_{ш.вх2} = ASE_{1\Delta F} * G / A + G * N_0 + ASE_{2\Delta F}.$$

Так как уровень передачи одинаков для всех оптических усилителей в ВОЛС, то принимаем, что мощность шумов ASE, вносимых каждым ОУ, также одинакова, т.е. $ASE_{1\Delta F} = ASE_{2\Delta F} = ASE_{\Delta F}$, тогда:

$$P_{ш.вх2} = 2 * ASE_{\Delta F} + G * N_0.$$

На выходе линии, содержащей k последовательно включенных оптических усилителей, мощность шума будет равна:

$$P_{ш.вых.k} = k * ASE_{\Delta F} + G * N_0.$$

Тогда коэффициент шума для такой ВОЛС $NF_{волс}$ определяется как:

$$NF_{волс} = P_{ш.вых.k} / G * N_0 = 1 + k * ASE_{\Delta F} / G * N_0.$$

Учитывая соотношение (9), можно выразить величину коэффициента шума для ВОЛС через коэффициент шума одного оптического усилителя NF_1 .

$$\begin{aligned} NF_{волс} &= (1 + k * ASE_{\Delta F} / G * N_0) + (k-1) * ASE_{\Delta F} / G * N_0 = NF_1 + (k-1) * (NF_1 - 1) = \\ &= NF_1 + k * NF_1 - NF_1 - k + 1 = k * NF_1 - (k-1). \end{aligned}$$

Ухудшение отношения сигнал/шум на выходе ВОЛС (в децибелах) по отношению ко входному OSNR составит:

$$\Delta OSNR_{дБ} = 10 \lg(k * NF_1 - k + 1). \quad (10)$$

Мощность шумов ASE практически не зависит от мощности шумов, действующих на входе оптического усилителя, и каждый ОУ просто добавляет «квант» шумов ASE, который проходит на выход ВОЛС практически без изменений (усиление этих шумов в каждом ОУ только компенсирует затухание предшествующего участка линии).

В итоге на выходе ВОЛС отношение сигнал/шум будет равно:

$$OSNR_{вых дБ} = p_{пер} - \sum \alpha - N_0 - 10 \lg(k * NF_1 - k + 1). \quad (11)$$

Произведем расчет участка ВОЛС протяженностью $L = 1000$ км, содержащего 9 последовательно включенных ОУ через каждые $L_y = 100$ км, для одного оптического канала со скоростью передачи $B = 2,5$ Гбит/с (STM-16). При этом OSNR в конце линии уменьшится на:

$$\Delta OSNR = 10 \lg(k * NF_1 - k + 1) = 10 \lg(9 * 3,16 - 9 + 1) = 13,12 \text{ дБ},$$

где $k=9$ – число усилителей; $NF_1=3,16$ раза (5 дБ) – типичное значение коэффициента шума одного ОУ типа EDFA.

При этом входное ОИЖ должно быть не менее, чем:

$$OSNR_{вх} = OSNR + \Delta OSNR = 22,09 + 13,12 = 35,21 \text{ дБ}.$$

Мощность шума, действующего на входе первого оптического усилителя в полосе передаваемого оптического сигнала, определяется квантовым шумом N_0 . Тогда для обеспечения полученной помехозащищенности уровень принимаемой оптической мощности определяется:

$$P_{пр} = OSNR_{вх} - N_0 = OSNR_{вх} - 10 \lg(h\nu \Delta \nu_0 * 10^3) = -29,74 \text{ дБм},$$

где $\nu = 1,934 * 10^{14}$ Гц оптическая частота несущей канала ($\lambda = 1550$ нм); $\Delta \nu_0 = 2,5 * 10^9$ Гц – спектральная полоса канала.

Таким образом, для одного канала $P_{пр} = -29,74$ дБм

Уровень передачи будет равен $p_{пер} = p_{пр} + g = -29,74 + 22,45 = -7,29$ дБм.

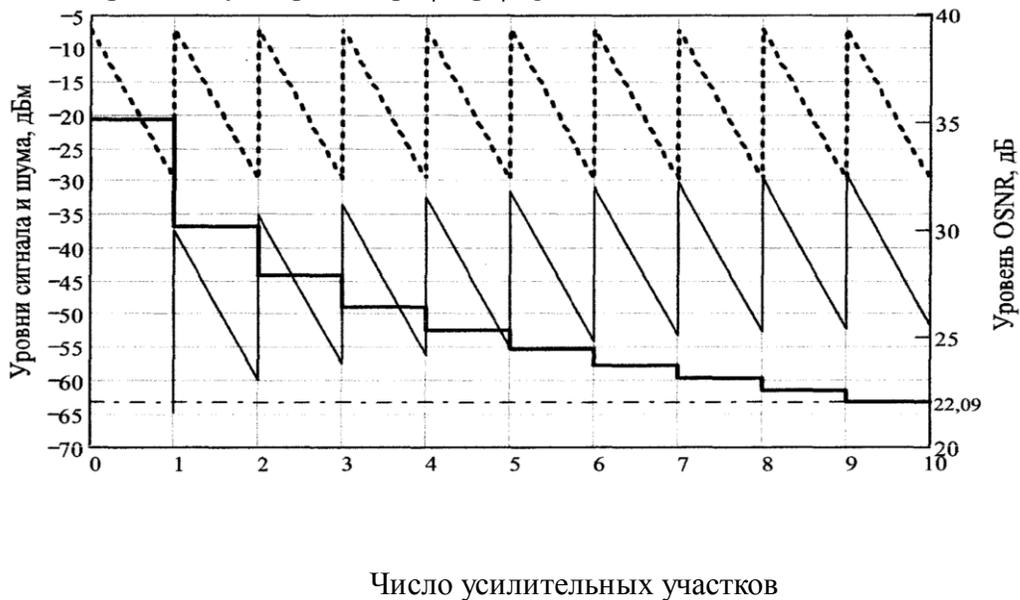


Рис. 3.4. Диаграмма уровней участка ВОЛС протяженностью 1000 км содержащего 9 ОУ

На основании полученных результатов, построим диаграмму уровней участка ВОЛС протяженностью 1000 км, содержащего 9 оптических усилителей для одного оптического канала (рис. 3.4.).

Также на основании вышеизложенных расчетов при такой же мощности передачи оптических сигналов ($p_{пер} = -7,29$ дБм) определены предельные длины усилительных участков рассматриваемой ВОЛС, при различных значениях скоростей передачи синхронной цифровой иерархии и коэффициентов ошибок. Результаты представлены в табл. 3.2.

Таблица 3.2. Предельные длины усилительных участков ВОЛС, содержащей 9 ОУ, при различных скоростях передачи, В и коэффициентах ошибок, BER.

BER \ B	L _y , км			
	STM-1 155 Мбит/с	STM-4 622 Мбит/с	STM-16 2,5 Гбит/с	STM-64 10 Гбит/с
10 ⁻⁹	159,95	131,22	102,45	73,78
10 ⁻¹⁰	157,52	128,78	100	71,34
10 ⁻¹¹	155,34	126,6	97,83	69,17
10 ⁻¹²	153,36	124,62	95,85	67,18

Стоит отметить, что в современных ОУ уровень выходной оптической мощности может достигать до плюс (20 - 27) дБ; это позволяет повысить оптическую мощность на входе усилителя, чтобы устранить воздействие других источников шумов и помех в ОУ, в оптическом кабеле и фотоприемном устройстве.

Результаты расчета показывают, что использование оптических усилителей в ВОЛС ведет к снижению отношения сигнал-шум передаваемых информационных сигналов. Основным источником шумов ОУ является усиленное спонтанное излучение (ASE), которое влияет на ограничение минимальной мощности в канале. Проведенные оценки снижения помехоустойчивости системы связи при различных параметрах позволяют выбрать соответствующее приемное и передающее оборудование, обеспечивающее требуемую помехозащищенность передаваемых сигналов.

Вопросы для самоконтроля.

1. Что такое технология DWDM?
2. Какие требования предъявляются к источнику оптического излучения?
3. Какие требования предъявляются к оптическим мультиплексорам (демультиплексорам)?
4. Какие окна прозрачности предназначены для технологии DWDM?
5. Сколько спектральных каналов можно организовать в диапазонах C и L?
6. В чем смысл эталонных цепей для технологии DWDM?
7. Какие факторы ограничивают длину участка ретрансляции?
8. Какое излучение является источником шумов в оптических усилителях?

4. Технология CWDM

Развитие систем WDM (Wavelength Division Multiplexing), цель которых - увеличение ширины полосы канала связи для пользователя, шло сначала по интенсивному пути за счет сокращения шага оптических несущих. Причина была в том, что рабочая полоса систем WDM ограничивалась полосой активного усиления оптических усилителей (ОУ) EDFA, составляющей 30 нм (1530-1560 нм). Системы развивались в направлении WDM - DWDM (Dense WDM) - HDWDM (High-Dense WDM), что вело не только к увеличению числа несущих (то есть к уменьшению их шага), но и к существенному удорожанию плотных (шаг

0,8-0,4 нм) и сверхплотных (шаг 0,2-0,1 нм) систем WDM. Последний фактор стал тормозить процесс их внедрения.

Экстенсивный путь развития систем WDM стал возможен только в последние несколько лет благодаря улучшению технологии оптического волокна (ОВ), позволившей на порядок расширить рабочую полосу пропускания ОВ: с 30 до 340 нм. Затухание в полосе пропускания плавно менялось в относительно небольших пределах: ± 3 дБ, что в свою очередь позволило значительно (в 10-50 раз) увеличить шаг несущих и тем самым существенно упростить фильтрацию несущих на приемной стороне, исключив дорогостоящие элементы систем WDM.

В результате появился новый класс решений **WDM - разреженные системы WDM, или CWDM (Coarse WDM)**, в которых используется очень большой стандартный шаг между несущими (20 нм) и дешевые средства их выделения - многослойные тонкопленочные оптические фильтры. Системы CWDM быстро завоевали признание специалистов и стали широко применяться в городских сетях (MAN), получив название систем WDM класса Metro. Решения CWDM рассматриваются как дешевая замена более дорогих систем DWDM в тех случаях, когда пользователям требуется не более 8-16 каналов WDM.

Применение систем WDM такого класса стало возможным после того, как удалось ликвидировать "водяной" пик поглощения на кривой затухания ОВ в районе длины волны 1383 нм. В соответствии с рекомендацией МСЭ G.694.2 следует использовать не более 18 несущих с фиксированным шагом 20 нм: 1270, 1290, 1310 ... 1570, 1590, 1610, если требуемый диапазон длин волн не превышает 340 нм. Естественно, что затухание на краях такого диапазона достаточно велико, особенно на его левом крае в области коротких волн. Поэтому при передаче сигнала по стандартному одномодовому волокну (SSF) число несущих следует ограничить 8 длинами волн, лежащими в диапазоне 1470-1610 нм шириной в 140 нм.

Если требуется использовать больше несущих, то, оставаясь в рамках стандарта CWDM, мы имеем, еще 200 нм полосы, или 10 дополнительных каналов с шагом 20 нм.

В 2002 г. МСЭ принял стандарт, определяющий несущие частоты для систем CWDM – рекомендация ИТУ-Т G.694.2. Кроме известных диапазонов C, S и L, в системах CWDM появляются два новых диапазона длин волн – диапазон O (1260-1360нм) и диапазон E (1360-1460 нм). На рис. 4.1 приведено распределение длин волн по диапазонам:

В 2003 г. МСЭ утвердил рекомендацию ИТУ-Т G.695, определяющую допустимые значения затухания сигнала, уровень мощности и перекрываемого расстояния.

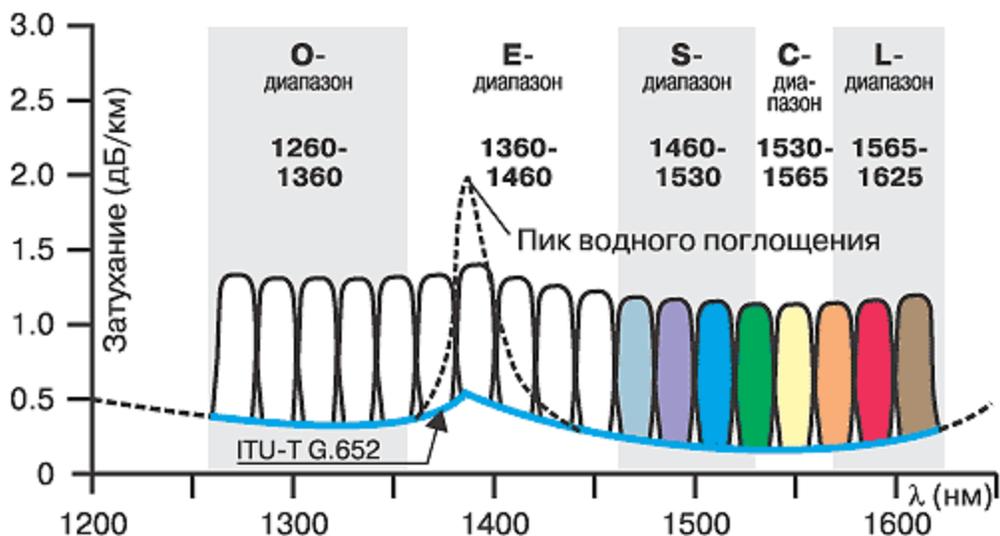


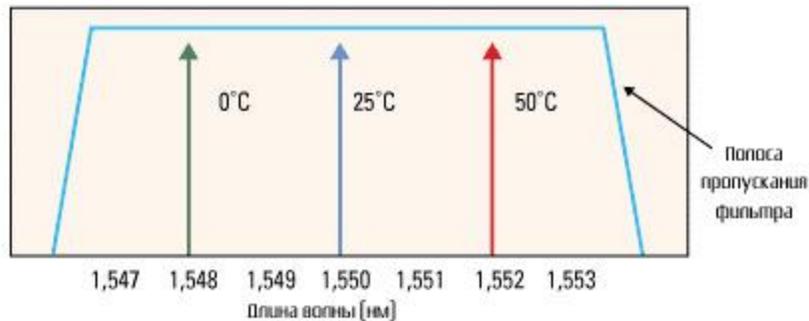
Рис.4.1. Распределение длин волн по диапазонам

Наряду с ранее выбранной скоростью 2.5 Гбит/с была регламентирована новая скорость передачи – 1.25 Гбит/с, что позволило упростить и унифицировать применение преобразователей Gigabit Ethernet в мультиплексорах CWDM. Технология CWDM применяется для волнового (спектрального) уплотнения нескольких каналов Gigabit Ethernet в одну пару физического оптоволокна, что экономит ресурс волокна и дает возможность получить новые топологические решения с использованием оптических мультиплексоров. Технология CWDM может применяться везде, где используется передача Ethernet-трафика по оптической линии, и при этом она не предъявляет новых требований к оптоволокну. Таким образом, один и тот же ресурс используется для нескольких Gigabit потоков (на одно волокно – до 9 потоков).

CWDM системы используют лазеры, которые не нуждаются в охлаждении. Эти системы обычно используются при температуре от 0⁰ до 70⁰ С с отклонением длины волны лазера от этого диапазона примерно на 6 нм. Это смещение длины волны складывается со смещением, вносимым самим лазером (±3 нм), в результате суммарное отклонение длин волн составляет ±12 нм.

Полоса пропускания оптических фильтров и разделение каналов лазера должны быть достаточно широкими, чтобы обеспечить (поддержать) колебание длин волн неохлажденного лазера в системах CWDM (рис.4.2). Разделение каналов в таких системах обычно составляет 20 нм с полосой пропускания канала 13 нм.

Неохлаждаемый лазер с распределенной обратной связью
(длина волны - 1.55 нм)



Рису. 4.2. Колебания длин волн неохлаждаемого лазера с распределенной обратной связью (длина волны – 1.55 нм)

Проблемы реализации систем WDM связаны, главным образом, с преодолением воздействия трех факторов:

- влияния эффекта ЧВС (четырёхволнового смещения);
- воздействия помех от соседних каналов;
- ограничения суммарной мощности светового сигнала, вводимого в волокно.

Влияние первого фактора достаточно успешно снижается за счет использования волокна с ненулевой смещенной дисперсией (NZDSF), неравномерного распределения частот несущих, а также за счет использования схем интерливинга.

Волокно G.653 оказалось непригодным для новой стремительно развивающейся технологии спектрального мультиплексирования WDM из-за нулевой дисперсии на 1550 нм, приводившей к резкому возрастанию искажений сигнала от четырехволнового смещения в этих системах. Наиболее приспособленным для плотного и высокоплотного WDM (DWDM и HDWDM) оказалось оптическое волокно G.655, а для разреженного WDM (CWDM) – недавно стандартизованное оптическое волокно G.656 (табл. 4.1).

Таблица 4.1. Применение различных типов волокон

Тип волокна	G.652.C/D	G.655	G.655, G.656
Основное применение	Системы SDH/CWDM/DWDM Магистральная, зонавая, городская сеть, кабельное телевидение, PON, сети FTTH Замена волокна G.652.A/B с окном прозрачности на 1400 нм	Системы SDH/DWDM От 2.5 до 10 Gbit/s на один оптический канал Магистральная, зонавая, городская сеть	Системы SDH/CWDM/DWDM От 10 до 100 Gbit/s на один оптический канал Магистральная, зонавая, городская сеть

Создание волокон без «водяного пика», позволило использовать в системах связи все волны в диапазоне от 1260 до 1625 нм, – т.е. там, где кварцевое оптическое волокно обладает наибольшей прозрачностью.

Влияние второго фактора (который имеет разную природу на передающем и приемном концах) может быть снижено разными способами: увеличением шага несущих (действует на обоих концах), использованием внешнего модулятора (уменьшающего уширение несущей), применением солитонной технологии или техники модуляции с подавлением одной боковой полосы (ОБП). Все три метода действуют на передающем конце. Кроме того, можно применить процедуру интерливинга, при которой плотный набор из n несущих длин волн (с шагом s) разделяется на приемном конце на два или четыре (каскадно 2×2) набора по $n/2$ (с шагом $2s$) или $n/4$ (с шагом $4s$) несущих.

Влияние третьего фактора обусловлено тем, что максимальная мощность каждой оптической несущей $P_{C \max}$ (в дБм) зависит от полной оптической мощности, подаваемой с выхода транспондера на вход волокна P_{total} (оптическая мощность в дБм на выходе агрегатного канала WDM) и числа мультиплексированных длин волн n . Согласно стандарту,

$$P_{C \max} = P_{ном} - 10 \lg n.$$

Мощность $P_{ном}$ ограничена безопасным уровнем излучения лазера (или допустимым уровнем суммарных нелинейных искажений в сердцевине волокна) и составляет для разных производителей оборудования WDM величину от 17 до 30 дБм. По табл. 4.2 можно оценить, как меняется эта мощность в расчете на 1 несущую для разного числа несущих в системе WDM при равномерном распределении.

Таблица 4.2. Максимальная мощность на одну несущую WDM, дБм

Число несущих, n								
				6	2	4	28	56
$P_{ном}=17$ дБм	4	1				1	4	7
$P_{ном}=30$ дБм	7	4	1	8	5	2		

Из табл.4.2 видно, что при большом числе несущих падение мощности может составить (против исходного уровня для двух несущих) 21 дБ. В результате не использования WDM исключается возникновение проблемы обеспечения нужного уровня BER в оптическом канале. Единственный способ борьбы с этим - увеличение эффективной площади сечения волокна, то есть использование специально разработанных волокон, например LEAF, Siesor, брэгговских волокон или волокон на основе фотонных кристаллов.

Область применения CWDM. Многие сети крупных городов не модернизировались уже десять лет. Постоянное увеличение трафика привело некоторые зоны к тому, что у них уже почти не осталось ресурсов для роста. Недостаточная пропускная способность сети, известная также под названием «истощение волокон», является той проблемой, которую операторы связи хотели бы разрешить незамедлительно. Добавление CWDM в оптическую транспортную систему является простым и экономически выгодным решением проблемы истощения (нехватки) волокон. По уже существующему оптическому волокну может производиться дополнительное обслуживание без прерывания обслуживания уже имеющихся абонентов.

Условия, в которых целесообразно применение CWDM систем:

- городские и региональные оптические сети;
- строительство сети в условиях дефицита ОВ (или высокой стоимости аренды ОВ);
- необходимость увеличения пропускной способности существующих сетей на базе ВОЛС;
- предоставление множества услуг по оптоволоконной паре;
- построение оптических сетей для предоставления в аренду «виртуального» волокна
- CWDM решения независимы к различным протоколам передачи информации. Это позволяет создавать различные телекоммуникационные услуги в одной транспортной среде.

4.1. Оборудование CWDM

CWDM системы являются частью сети оператора связи и устанавливаются между двумя или более узлами связи. Для того, что бы обеспечить работу CWDM системы на узле связи необходимо наличие активных сетевых устройств с достаточным суммарным количеством портов для установки CWDM SFP трансиверов. Такими сетевыми устройствами обычно являются коммутаторы и маршрутизаторы. В случае недостаточного количества активных сетевых устройств с необходимым суммарным количеством SFP портов возможно использование медиаконверторов со слотами под CWDM SFP трансиверы. Такое решение в ряде случаев так же является экономически выгодным.

Например, основными элементами CWDM систем, предлагаемых "Контур-М" являются:

- CWDM мультиплексоры/демультиплексоры (MUX/DEMUX); позволяют суммировать и разделять оптические сигналы.
- OADM модули - CWDM мультиплексоры ввода/вывода; позволяют выделить и добавить в волокно сигнал по определенным несущим.
- SFP CWDM модули (SFP трансиверы), формируют и принимают оптические сигналы (длины волн) в CWDM системе; переводят сигнал из электрического (активное оборудование) в оптический и обратно.

На рис. 4.3 показан пример системы передачи с использованием комплекса оборудования CWDM. Стоит обратить внимание на то, что мультиплексоры/демультиплексоры и CWDM SFP трансиверы работают в парах. Соответственно это оборудование Type I и Type II. Такая необходимость обусловлена тем, что каждый канал на разных концах имеет зеркальные значения по приему (RX) и передаче (Tx) т.к. сформирован из двух несущих (длин волн).

CWDM SFP трансиверы SFP - Small Form Factor Pluggable является общепризнанным промышленным форматом производства сменных трансиверов. Трансиверы SFP широко используются в активном сетевом оборудовании: маршрутизаторах, коммутаторах, медиаконверторах. Лазеры с распределенной обратной связью (DFB, Distributed Feedback), в случае использования в CWDM-системах, не требуют термической стабилизации, громоздких

и сложных схем управления, являются малогабаритными, экономичными и имеют малую стоимость. Типичный DFB-лазер имеет температурную стабильность, что дает изменение генерируемой длины волны в пределах 6–8 нм в диапазоне температур 0–70°C CWDM SFP трансиверы предназначены для формирования оптических CWDM сигналов «основной несущей» с 1270 по 1610нм (шаг 20нм). Каждый SFP CWDM трансивер работает по двум волокнам и, в отличие от стандартных двухволоконных трансиверов 1000Base LX на двух разных длинах волн – приемник по одной длине волны и передатчик по другой. Для образования канала данных в системе CWDM SFP трансиверы комплектуются «попарно» - Type I и Type II (табл. 4.3).

В силу того, что CWDM системы являются пассивными, осуществление мониторинга состояния CWDM оборудования и всей трассы в целом в режиме реального времени представляется затруднительным. Для мониторинга в режиме реального времени (on-line мониторинга) используются CWDM SFP трансиверы с функцией DDM (Digital Diagnostic Monitoring). Функция DDM позволяет в режиме реального времени контролировать параметры, которые имеет SFP трансивер: мощность входящего сигнала (RX), мощность исходящего сигнала (TX), температурные параметры работы трансивера. Изменения данных параметров позволяют судить об износе CWDM системы и состоянии трассы в целом. Функция DDM также

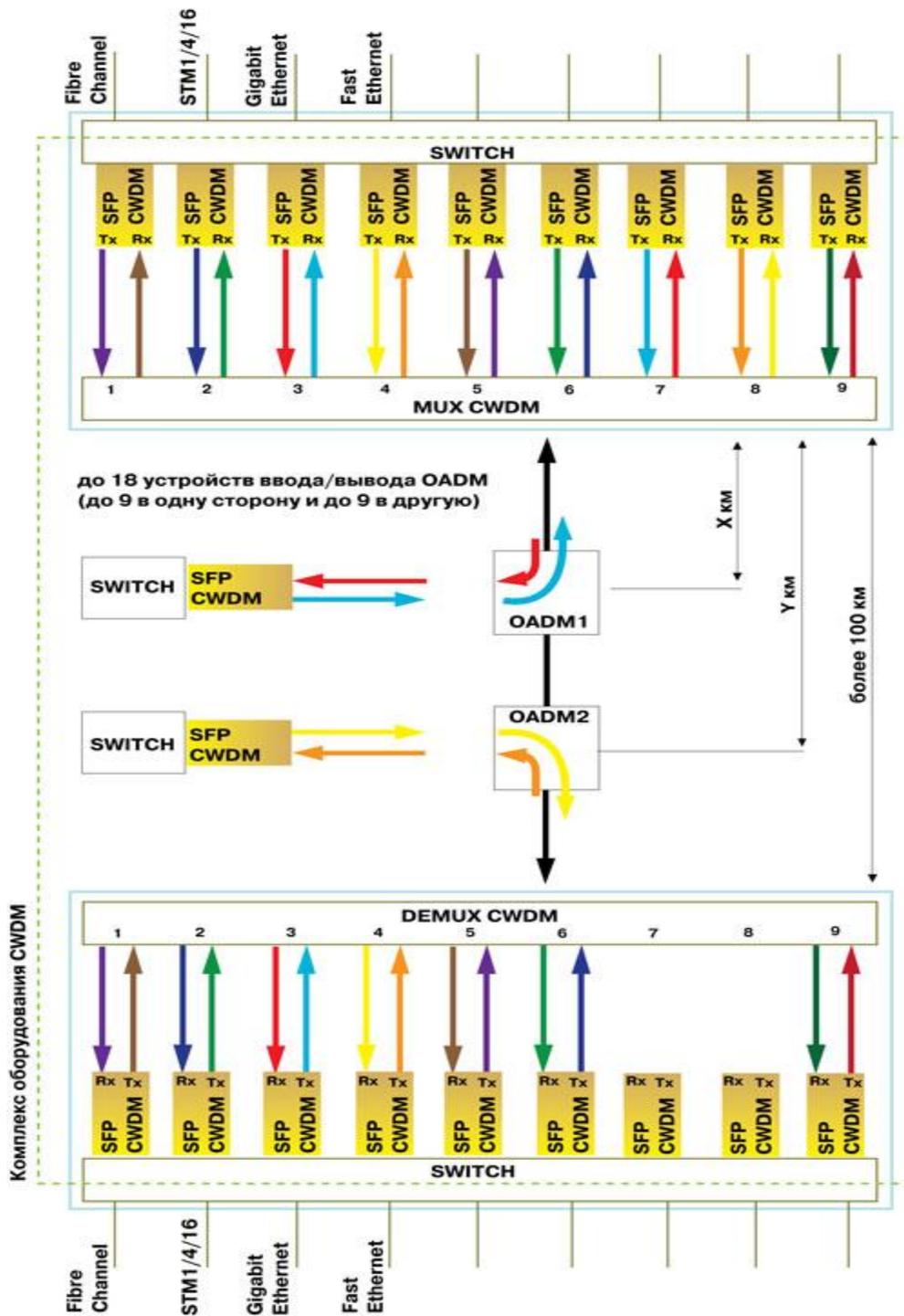


Рис. 4.3. Система передачи с использованием комплекса оборудования CWDM.

используется при оценке оптического бюджета CWDM решения. Сравнение данных SFP трансиверов позволяет определить реальные потери по несущим в волокне.

Таблица 4.3. Комплектация трансиверов

Цвет	Type I	Type II
Серый	Tx1470/Rx1310 nm	Tx1310/Rx1470 nm
Розовый	Tx1490/Rx1330 nm	Tx1330/Rx1490 nm
Синий	Tx1510/Rx1350 nm	Tx1350/Rx1510 nm
Зеленый	Tx1530/Rx1370 nm	Tx1370/Rx1530 nm
Желтый	Tx1550/Rx1390 nm	Tx1390/Rx1550 nm
Оранжевый	Tx1570/Rx1410 nm	Tx1410/Rx1570 nm
Красный	Tx1590/Rx1430 nm	Tx1430/Rx1590 nm
Коричневый	Tx1610/Rx1450 nm	Tx1450/Rx1610 nm

SFP трансивер так же отличается по дальности своей работы (мощности сигнала). CWDM SFP трансивер имеет стандартный километраж 10 км, 20 км, 40 км или 80 км. Стандартный тип разъема для коннектора на SFP трансивере – LC.

Оптические мультиплексоры. Оптический мультиплексор/демультиплексор (рис. 4.4) предназначен для суммирования и разделения оптических сигналов, передаваемых на CWDM длинах волн по одномодовому (Single Mode) оптическому кабелю. Прибор предназначен для совместной работы с трансиверами SFP CWDM сигналов, образуя 4 или 8 каналов на 8-и или 16-ти длинах волн в одном волокне или до 32 каналов на двух волокнах.

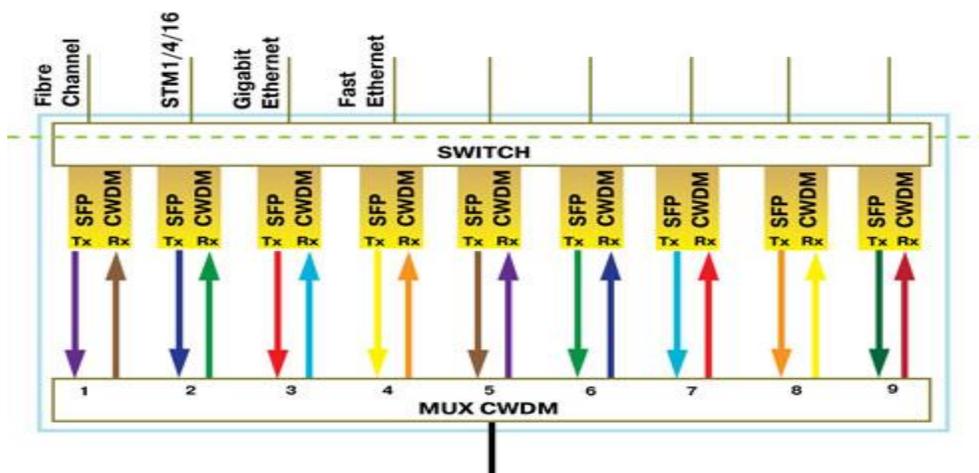


Рис. 4.4. Оптический мультиплексор/демультиплексор

Устройства отличаются низким отражением сигнала, высокой изоляцией каналов и малыми потерями. WDM мультиплексоры являются устройствами двунаправленного действия, т.е. могут, как разделять, так и смешивать оптические сигналы. Устройства доступны в различных исполнениях, что позволяет использовать их в различных системах передачи. В зависимости от поставленной задачи конфигурация CWDM

мультиплексора/демультиплексора (Mux/Demux) определяется по следующим характеристикам:

- двухволоконный мультиплексор (2 fiber);
- одноволоконный мультиплексор (1 fiber (single fiber) или bidirectional);
- 4-х или 8-ми канальный мультиплексор (8 или 16 длин волн), работающий на одном волокне;
- 8-ми или 16-ти канальный, работающий на двух волокнах;
- мультиплексор с двумя «общими» (COMMON) выводами для реализации «кольцевой» топологии;
- для топологий «Точка-Точка» или «Кольцо» необходима «попарная» (порты Tx–Rx) комплектация мультиплексоров – Mux/Demux Type I, Mux/Demux Type II;
- коннекторы – FC,SC,LC,ST,FA,SA.

OADM модули. Модули Ввода/Вывода (Add/Drop (OADM) CWDM выделяют определенные длины волн из CWDM потока (оптической линии).

Основные свойства:

- ввод/вывод одного CWDM канала (две несущие, частотная сетка совпадает с частотной сеткой SFP CWDM модулей);
- пассивная оптика;
- низкие вносимые потери для транзитных CWDM каналов;
- выделенная длина волны конечному пользователю.

Принципиально выделяются OADM модули одноканальные и двухканальные. Их отличие заключается в способности принимать и получать оптический сигнал от одного или двух мультиплексоров и физически обусловлено наличием одного или двух приемо-передающих блоков. Соответственно одноканальный OADM модуль имеет один приемо-передающий блок и способен работать только с одним мультиплексором (см. далее топология «Точка с ответвлениями») в «одну сторону». Двухканальный OADM модуль имеет два приемо-передающих блока и способен работать «в две стороны» с двумя мультиплексорами / демультиплексорами. Варианты топологии показаны на рис. 4.5.

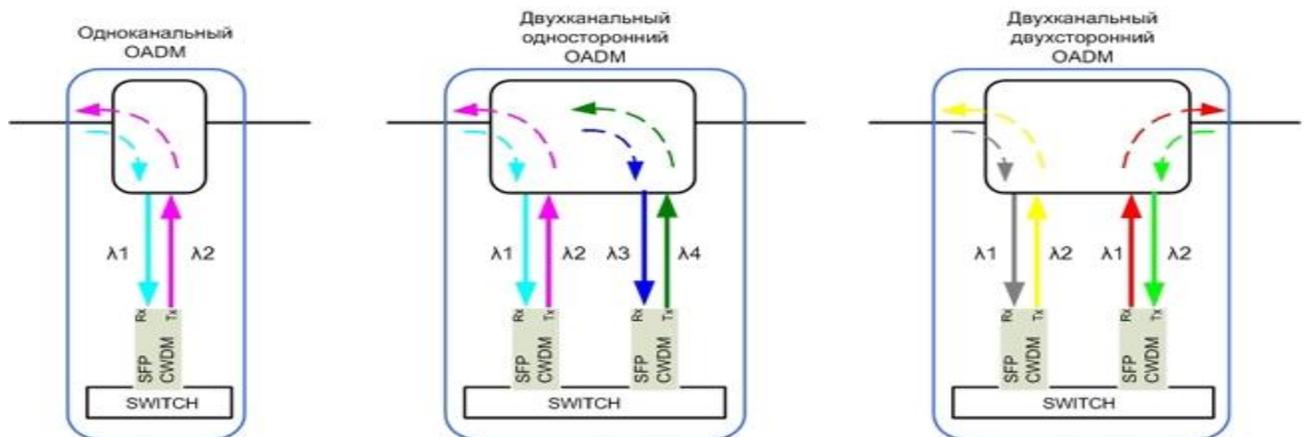


Рис. 4.5. Топология модулей ввода/вывода (Add/Drop (OADM) CWDM)

Приемо-передающий блок одноканального OADM модуля имеет четыре интерфейса:
Com порт – получает сигнал со стороны мультиплексора
Express порт – пропускает сигнал на другие элементы CWDM системы

Add порт – добавляет в линию канал на определенной длине волны CWDM,
Drop порт – извлекает из линии канал на определенной длине волны CWDM.

Ограничений по протоколам или ширине полосы такие устройства не имеют. Соответственно двухканальный OADM модуль обладает двумя дополнительными портами Add и Drop. В случае использования двухволоконной системы так же добавляются порты Com2 и Express2. Одноканальный OADM модуль работает в паре с 1 CWDM SFP трансивером, двухканальный OADM – с двумя (Type I и Type II).

Вопросы для самоконтроля.

1. В чем состоит сущность технологии CWDM?
2. В чем состоят принципиальные отличия технологий CWDM и DWDM?
3. Какие требования предъявляются к оптическим мультиплексорам (демультиплексорам)?
4. Какие окна прозрачности предназначены для технологии CWDM?
5. Сколько спектральных каналов можно организовать при использовании технологии CWDM?
6. Какие диапазоны длин волн используются при использовании технологии CWDM?
7. Какие факторы ограничивают длину участка ретрансляции?
8. Что входит в состав оборудования CWDM?

5. Гибридные модели с использованием технологии CWDM

5.1. Гибридная модель частотного плана

Для простоты модели ограничимся частотным планом DWDM с шагом 100 ГГц, а в CWDM рассмотрим восемь основных каналов в диапазоне 1470-1610 нм. На рис. 5.1 приведены оба плана с указанием области пересечения. В верхней части рисунка показан план DWDM с шагом 0,8 нм (полоса С) и пересекающаяся область, в нижней - план CWDM с шагом 20 нм, а на нем позиции полос С и L плана DWDM. Известно, что в каждой из полос С и L можно разместить по 41 стандартному каналу с шагом 100 ГГц.

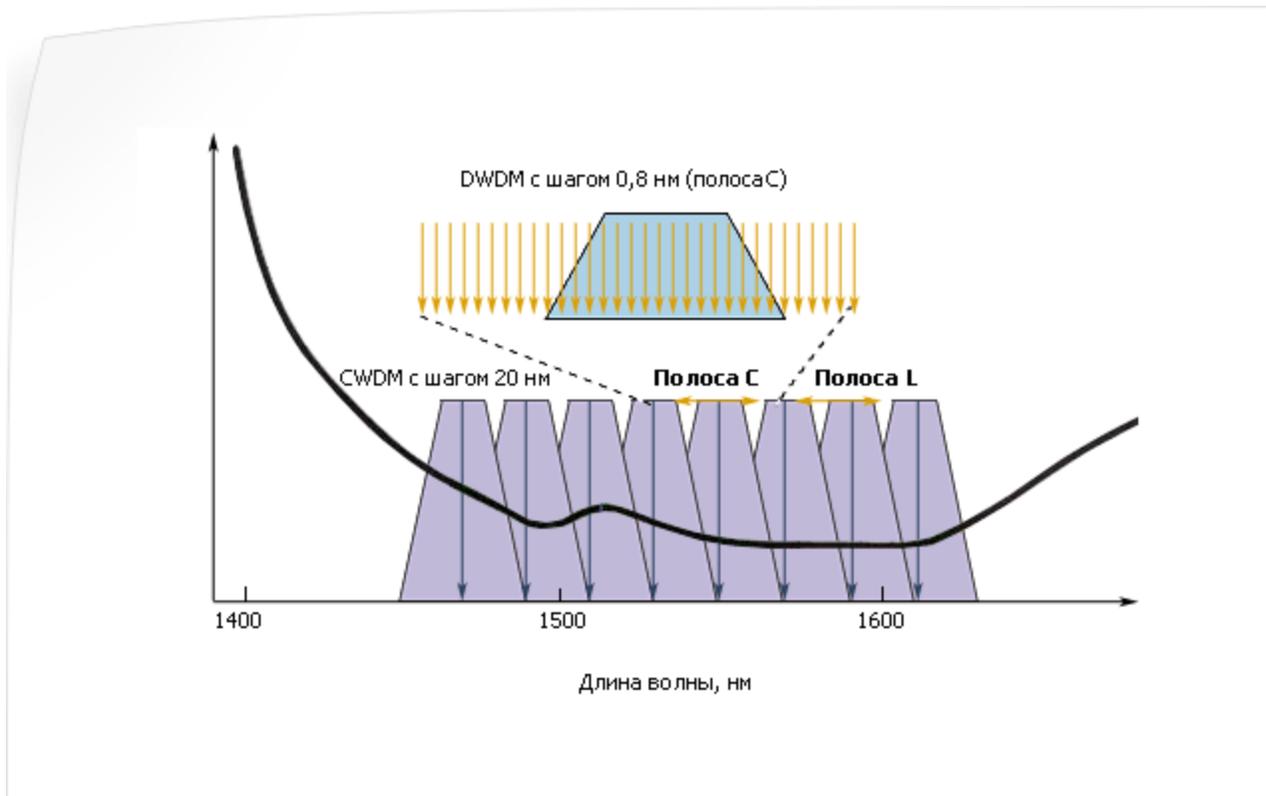


Рис. 5.1. Волновые планы CWDM и DWDM

Полоса С содержит длины волн в диапазоне 1528,77-1560,61 нм, а полоса L - 1566,31-1612,65 нм. В них попадают следующие несущие CWDM: 1530,1550,1570,1590 и 1610 нм. С другой стороны, как видно из рис. 5.1, в полосе пропускания фильтра одной из несущих CWDM может разместиться восемь несущих DWDM полосы С.

Из сказанного выше следует, казалось бы, простой метод формирования гибридного частотного плана и первая стратегия расширения числа несущих: а) используя план CWDM, разместить восемь основных каналов (1470-1610 нм); б) при необходимости увеличения числа каналов, заменить один из каналов CWDM на восемь каналов DWDM.

Однако эта стратегия имеет определенные недостатки. Во-первых, не все несущие DWDM попадают в полосу пропускания фильтров системы CWDM - примерно 50% приходится на переходную полосу фильтров. Во-вторых, часть общей полосы пропускания фильтров CWDM перекрывается полосами С и L не полностью. По этой причине несущую 1610 нм (CWDM) не используют для замены наряду с несущими 1470,1490 и 1510 нм, а у оставшихся четырех (1530, 1550, 1570 и 1590 нм) полоса пропускания используется частично, принимая во внимание, что полоса С начинается с длины волны 1528,77 нм.

В результате получается, что первая стратегия обеспечивает использование четырех незаменяемых длин волн CWDM и четырех длин волн, полосы которых заменяются возможными наборами длин волн DWDM. Наилучшей в этом случае является несимметричная схема (рис. 5.2), в которой незаменяемая полоса А состоит из трех расположенных слева каналов (несущие 1470, 1490 и 1510 нм) и одного канала справа (несущая 1610 нм), а заменяемая полоса В расположена внутри общей полосы А + В. Согласно расчетам, максимально возможное число каналов в этом случае равно 32 (4 канала CWDM + 28 каналов DWDM). Таким образом, общее число каналов увеличивается в четыре раза: с 8 до 32.

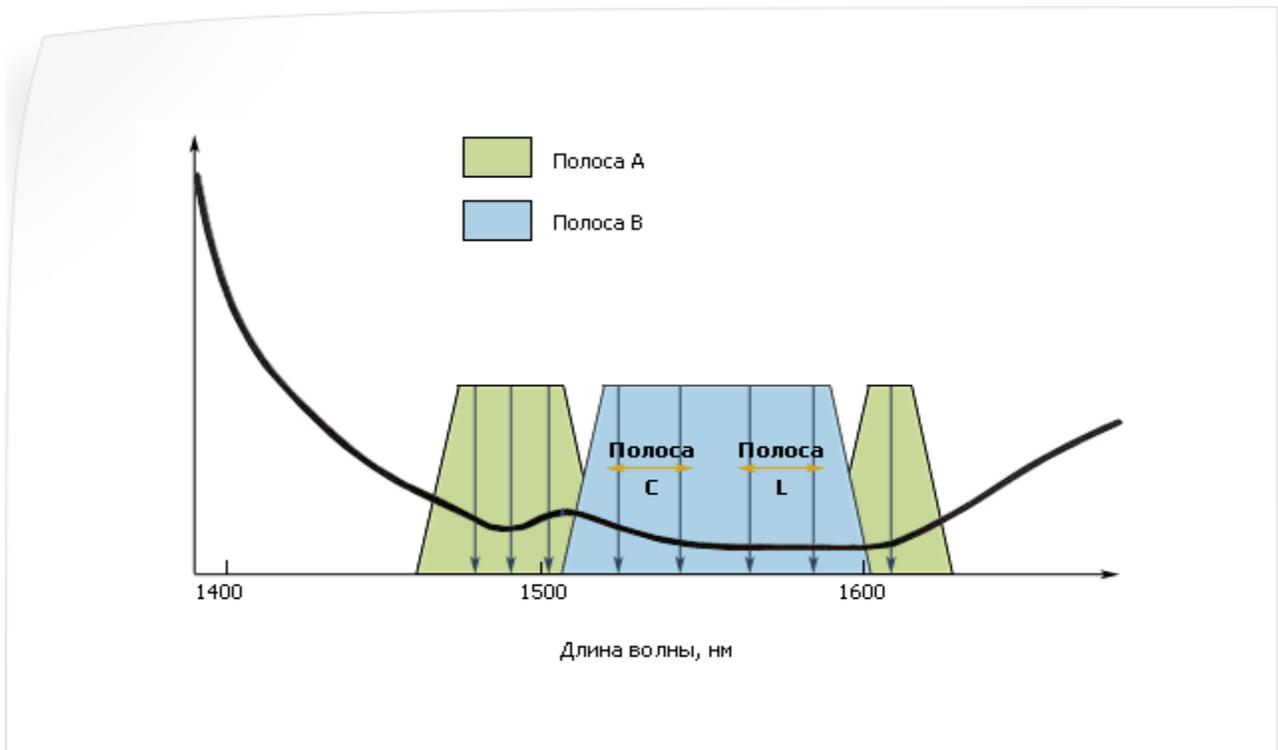


Рис.5. 2. Схема гибридного несимметричного частотного плана

Существует и вторая стратегия расширения числа несущих. Она оставляет ту же исходную расстановку несущих: 4 незаменяемых + 4 заменяемых, но использует всю освобождаемую формирующими фильтрами несущих полосу. То есть для этих каналов полностью меняются карты в оборудовании и используются не только канальные, но и полосовые фильтры DWDM. В результате оказывается возможным в полосе четырех заменяемых каналов сформировать 32 канала в полосе С и 32 канала в полосе L; таким образом, общее число каналов может достигать 68 (4 канала CWDM + 64 канала DWDM). При этом схема мультиплексирования каналов может быть такой, как показано на рис.5.3, а именно: 4 (CWDM-A) + 32 (DWDM-C) + 32 (DWDM-L).

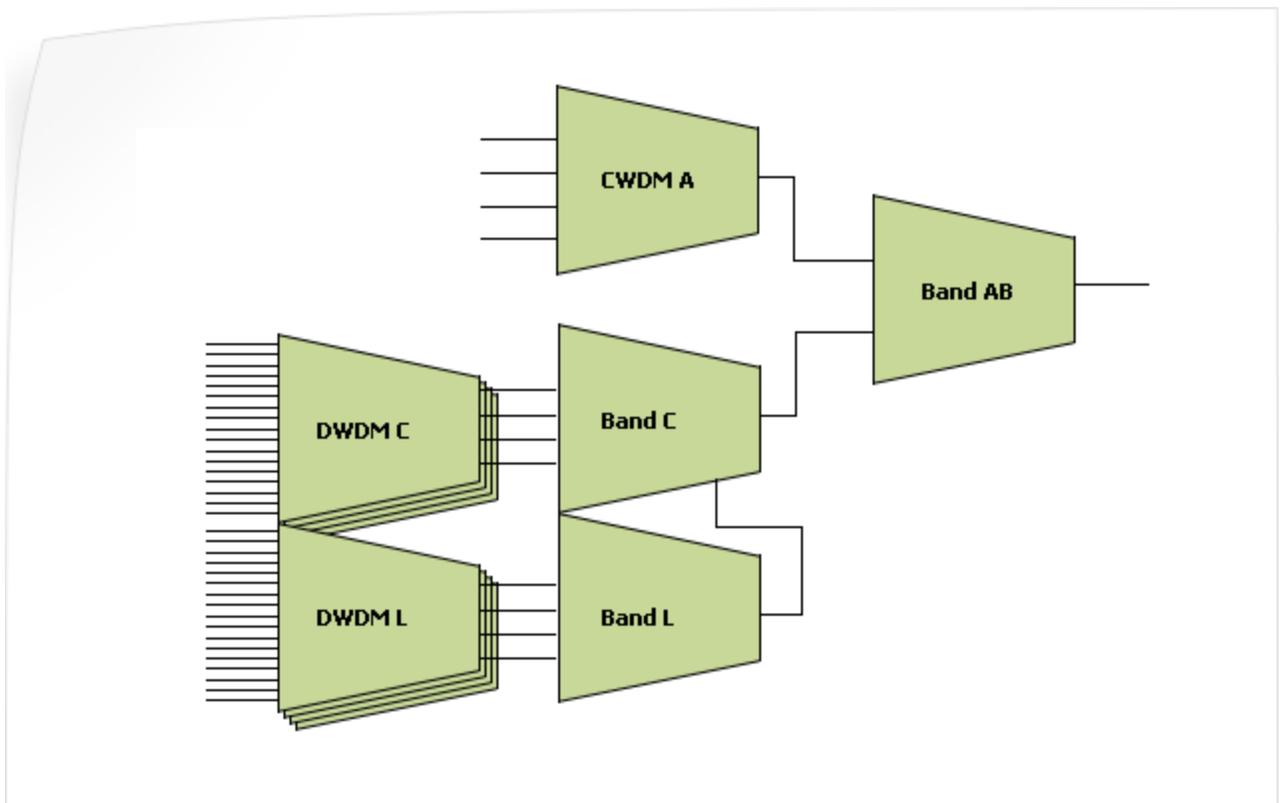


Рис. 5.3. Схема мультиплексирования каналов CWDM DWDM

В результате гибридный альтернативный план выглядит так: несущие CWDM 1470, 1490, 1510 нм + 64 несущие полос C и L DWDM + несущая CWDM 1610 нм.

Альтернативы использования CWDM и DWDM (Неполное использование CWDM). В полную ширину спектра 360 нм с занимаемой областью 1270—1610 нм входят 18 стандартных каналов с шагом 20 нм. Будучи наложенной на характеристику затухания стандартного ОВ, например SMF-28e компании Corning, эта область содержит сглаженный максимум затухания на 1383 нм. Приблизительные значения затухания в характерных точках данной области приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1. Затухание стандартного волокна SMF-28e в характерных точках

Характерные точки, нм	0	127	0	130	0	131	3	138	0	155	5	162
	Затухание, дБ/км		0,3 6-0,38		0,3 5-0,36		0,3 3-0,35		0,3 1-0,35		0,1 9-0,20	

Хотя вероятность увеличения максимального затухания в районе 1383 нм мала, нужно иметь в виду, что три стандартных канала CWDM: 1370, 1390 и 1410 нм - расположены около этого пика. Они могут быть причиной определенных трудностей (вызванных необходимостью индивидуальной подстройки коэффициентов усиления каналов в тракте ОЦСП) при реализации полного (18 каналов) варианта использования полосы CWDM. Если исключить эти три канала, то возможности расширения ограничиваются семью каналами и максимальное общее число рабочих каналов составит 15, что вполне может удовлетворить многих пользователей.

С точки зрения использования большего числа каналов данная альтернатива была описана выше и в целом ясна. Что касается потери вложенных средств, то при локальном или корпоративном использовании и наличии свободного ОВ, на котором можно развернуть DWDM, таких потерь можно избежать. Однако при отсутствии свободного ОВ или в случае применения ВОСП в рамках глобальной сети, учитывая наложение спектров CWDM и DWDM, пользователь может потерять средства, вложенные в развертывание оборудования CWDM. При этом нужно помнить, что обоснованием этой альтернативы была необходимость получения большего, чем 15, числа каналов WDM.

Использование гибридной модели частотного плана. Как было показано выше, эта альтернатива при использовании второй стратегии позволяет сначала наращивать число каналов в рамках частотного плана CWDM (блоками по 4 канала), а затем - в рамках частотного плана DWDM (блоками по 32 канала), задействовав каналы как в полосе С, так и в полосе L.

5.2. Гибридная схема CWDM + DWDM

Технология спектрального уплотнения позволяет создавать различные гибридные схемы и использовать одно волокно для одновременной передачи цифровых и аналоговых сигналов. Основной задачей, для решения которой применяется оборудования спектрального уплотнения, было и остается увеличение пропускной способности транспортной сети. При этом не предполагается прокладка новых волоконно-оптических кабелей и аренда волокон.

Расширение возможностей CWDM систем с применением оборудования DWDM стало особенно актуальным после того, как пропускная способность 10 Гбит/с стала практически стандартной при построении городских сетей связи. Реализация схемы CWDM+DWDM стала еще и доступной с финансовой точки зрения: стоимость пассивного оборудования CWDM и DWDM практически сравнялась. Существует 2 варианта совмещения технологий CWDM и DWDM.

Первая схема (рис. 5.4) подразумевает использование вместо CWDM трансиверов, работающих на длинах волн 1530 и 1550 нм, 10 Гбит/с трансиверов DWDM 1530.3 и 1550,1 нм. Прохождение сигналов на данных длинах волн через стандартные CWDM фильтры будет беспрепятственным и в волокне будет организован один дуплексный или два симплексных канала 10 Гбит/с.

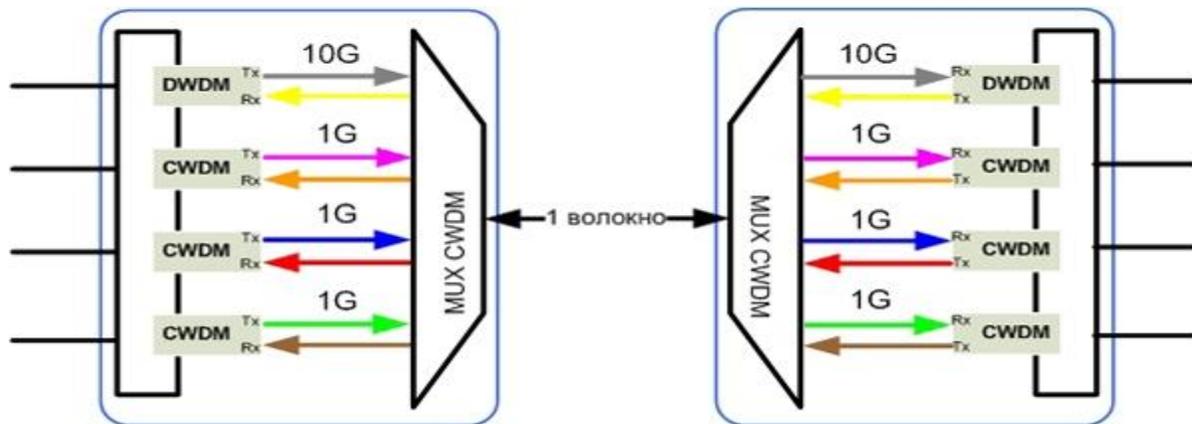


Рис. 5.4. Структурная схема CWDM+DWDM с использованием длин волн 1530 и 1550 нм

Вторая схема CWDM+DWDM (рис. 5.5) предполагает последовательное подключение мультиплексоров CWDM и DWDM, при этом каналы DWDM передаются в промежутке

между каналами CWDM. Следует отметить, что в данном варианте рассматривается пассивная система DWDM. Для активных систем необходимо рассматривать более сложные схемы, исходя хотя бы из того, что в таких системах применяются усилители EDFA, пропускающие сигнал в одном направлении и являющиеся, по сути, оптическими изоляторами. Реализация схемы CWDM +DWDM возможна за счет того, что длины волн DWDM из диапазона «С» (1528,77-1560,61 нм) пересекаются лишь с двумя длинами волн CWDM – 1530 и 1550 нм, из диапазона «L» (1566,31-1612,65 нм) с тремя -1570, 1590 и 1610 нм. Таким образом, если исключить из системы совпадающие длины волн CWDM и использовать широкополосные фильтры взамен стандартных фильтров CWDM, мы сможем пропустить через мультиплексоры CWDM излучение на необходимых длинах волн DWDM.

При использовании большого количества DWDM каналов 10 Гбит возникает вопрос о целесообразности использования каналов CWDM, которые будут вносить относительно небольшой «вклад» в общее расширение пропускной способности линии. Хотя, с появлением CWDM трансиверов для организации каналов 10 Гбит/с этот вопрос снимается.

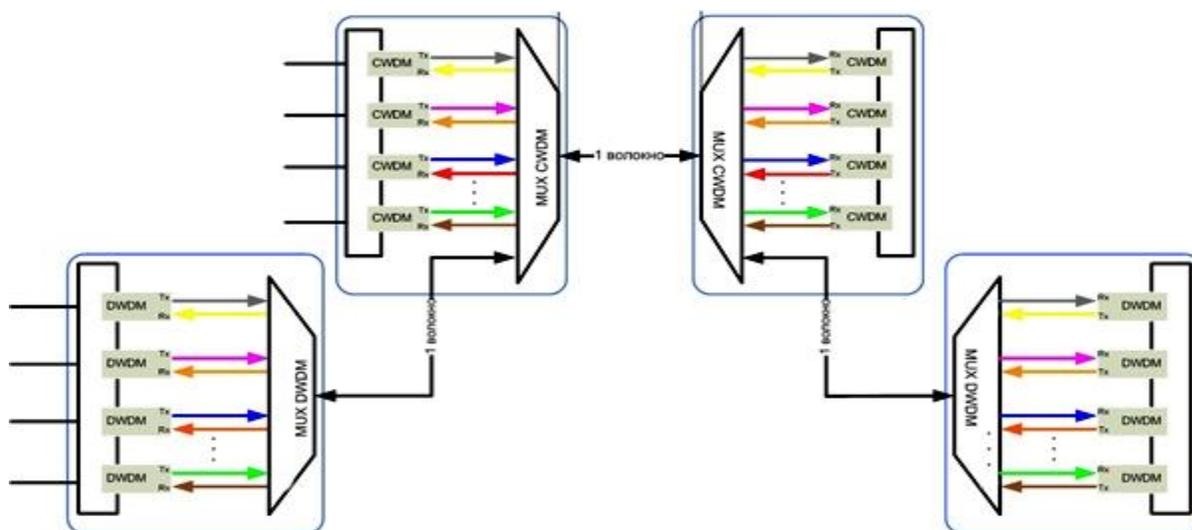


Рис. 5.5. Структурная схема CWDM+DWDM с использованием последовательного подключения мультиплексоров CWDM и DWDM

Во второй гибридной схеме CWDM+DWDM необходимо иметь в виду, что использование CWDM OADM модулей возможно только для длин волн из сетки CWDM или максимально приближенных к ним длин волн из сетки DWDM. Дополнительное ограничение на вывод каналов накладывается полосой пропускания CWDM фильтров - она не позволит разделить соседние каналы DWDM и пропустит "лишнее" излучение. В этом случае трансивер примет неверный сигнал и канал не будет работать. Переконфигурация мультиплексоров должна настраиваться отдельно для каждого конкретного случая.

5.3 Применение технологии TDM в CWDM системах передачи

Применение технологии спектрального уплотнения CWDM является наименее затратным способом расширения пропускной способности сетей передачи данных. У операторов связи есть возможность с небольшими затратами увеличить скорость передачи данных по линиям в 9 раз. При этом, до недавнего времени, дальнейшее увеличение скорости передачи данных с применением спектрального уплотнения было затруднительно: в CWDM системе задействованы все доступные длины волн в диапазоне от 1270 нм до 1610 нм, а реализация гибридной схемы «CWDM+DWDM» не всегда целесообразна с финансовой точки зрения. В данной ситуации разумно рассмотреть вопрос о возможности применения временного

уплотнения – технологии TDM (рис. 5.6). Двухканальные мультиплексоры TDM позволяют передавать по одному волокну на одной длине волны два различных виртуальных канала со скоростью передачи данных до 1.25 Гбит/с каждый. Каждый мультиплексор имеет три слота для SFP модулей, два из которых предназначены для соединения с активным сетевым оборудованием, а третий используется для передачи уже уплотненного сигнала.

Использование модификации TDM мультиплексора с двумя 2 портами 1000BASE-T и 1 слотом для SFP модуля позволяет использовать в CWDM системе активное сетевое оборудование без оптических портов. То есть такой TDM мультиплексор выполняет еще и функции медиаконвертора.

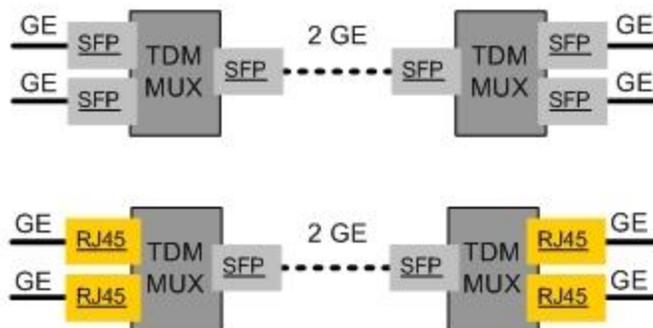


Рис. 5.6. Схема технологии TDM в CWDM системах

В отличие от мультиплексоров спектрального уплотнения CWDM, мультиплексоры TDM не являются пассивными. Требование к наличию питания не доставляет неудобств, так как оборудование TDM имеет крайне низкое энергопотребление и предназначено для установки на узлах связи. TDM мультиплексоры могут поставляться в шасси высотой 2 RU для установки в телекоммуникационные стойки 19" и в миниатюрных корпусах "standalone". Количество каналов для мультиплексора в 19" шасси можно регулировать, доступны конфигурации от 1 до 17 каналов.

Идея схемы уплотнения CWDM+TDM заключается в том, чтобы на входы мультиплексора CWDM подавать сигналы, предварительно уплотненные по технологии TDM. Подключение оборудования уплотнения по такой схеме возможно в силу того, что CWDM каналы являются физической средой передачи данных и не накладывают ограничений на передаваемый сигнал. Сетевое оборудование подключается к TDM мультиплексору стандартным способом, а во «внешний» порт устанавливается CWDM SFP трансивер, который будет в соединении с соответствующим портом CWDM мультиплексора. Таким образом, сигнал сначала делится на таймслоты и уплотняется по технологии TDM, затем на одной из длин волн CWDM диапазона отправляется в CWDM мультиплексор. На втором узле связи происходит обратный процесс: из общего излучения выбирается сигнал на необходимой длине волны, а TDM демультимплексор объединяет соответствующие таймслоты в исходный канал. Использование временного уплотнения совместно со спектральным позволяет увеличить скорость передачи данных по одному волокну до 22,5 Гбит/с (рис. 5.7).

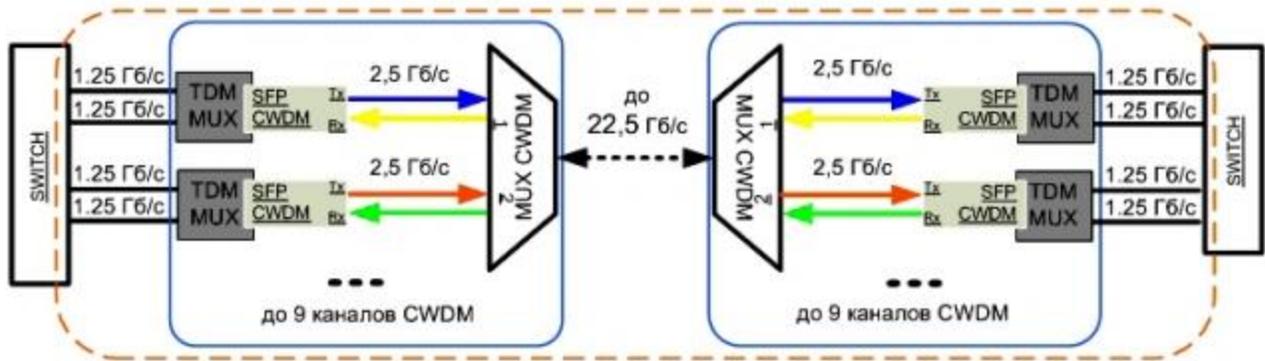


Рис. 5.7. Пример построения системы передачи CWDM+TDM

На сигналы TDM дисперсия оказывает меньшее влияние, чем на сигналы CWDM, потому максимальная дальность передачи максимальна.

5.4. Особенности передачи TV сигнала в системах CWDM

В последнее время наблюдается интерес российских операторов связи к различным способам передачи аналогового телевизионного сигнала. О строительстве коаксиальной сети речи быть не может и передавать TV-сигнал, имеет смысл только через существующую кабельную инфраструктуру, а у большинства операторов сети – волоконно-оптические. Передача телевизионного сигнала по оптоволокну уже не новость, но выделять отдельное волокно для передачи TV нецелесообразно. Поэтому возник вопрос: как уместить в оптическом волокне аналоговый телевизионный сигнал и цифровые протоколы передачи данных (например, Ethernet или STM)?

Ответ на этот вопрос оказался не таким сложным – достаточно использовать спектральное уплотнение CWDM. Технология спектрального уплотнения CWDM не нова, но до недавнего времени информации по применению технологии было категорически мало, а стоимость CWDM решений была запредельной, поэтому технология стала активно применяться российскими компаниями относительно недавно.

В технологии CWDM используется сетка значений длин волн от 1270 до 1610 нм с шагом 20 нм (стандарт ITU-T G.694.2). Среди значений сетки есть и необходимые - 1310 нм и 1550 нм. Именно на этих длинах волн работает большинство оптических телевизионных передатчиков (рис. 5.8, 5.9).

Основная особенность интеграции аналогового сигнала и цифровых протоколов передачи данных в системах CWDM заключается в том, что телевизионные передатчики могут быть как узкополосными (с длиной волны ± 5), так и широкополосными (разброс до ± 30 нм). В первом случае колебания длины волны не оказывают влияния на систему, и излучение на несущей длине волны 1310 или 1550 нм беспрепятственно распространяются совместно с остальным излучением, при этом допустимо использование стандартных фильтров CWDM с полосой пропускания 5-7,5 нм.

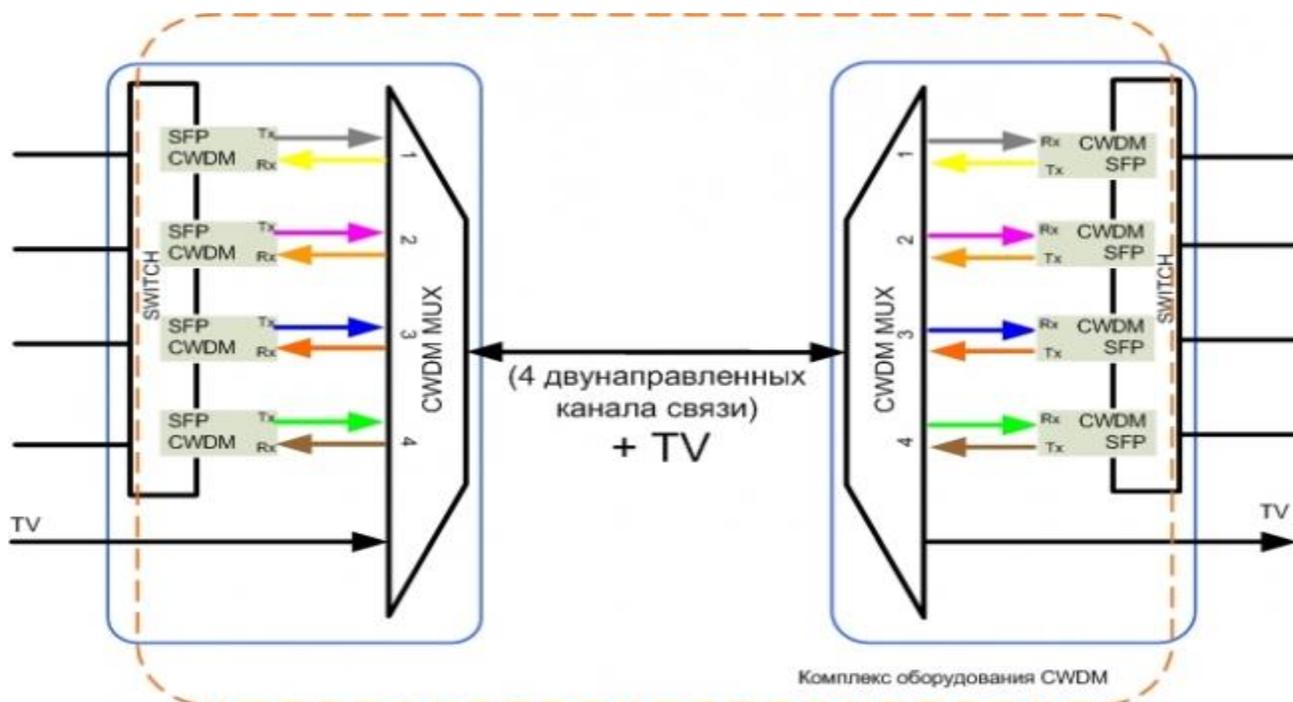


Рис. 5.8. Структурная схема TV - CWDM

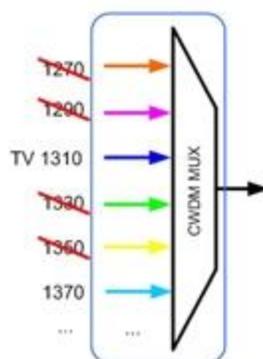


Рис. 5.9. Мультиплексор/демультиплексор TV - CWDM

В случае, когда колебания длины волны достигают ± 30 нм, аналоговый сигнал в CWDM системе не только искажается сам, но и делает систему неработоспособной. Связано это с тем, что через фильтры мультиплексора CWDM, пропускающие излучение на длинах волн, приближенных к 1310 нм (или 1550 нм), будет проходить аналоговый сигнал, создающий шум и делающий невозможным прием данных. Например, широкополосный аналоговый сигнал на длине волны 1310 сделает невозможным использование в CWDM системе длин волн 1290 и 1330 нм, при этом не рекомендуется использование 1270 нм и 1350 нм. Если отказаться от "занятых" длин волн мы можем без переконфигурации оборудования CWDM, то стандартные фильтры CWDM не позволят TV-сигналу распространяться без искажений. Поэтому требуется использовать фильтры с полосой пропускания ± 30 - ± 40 нм.

5.5. Применение технологии CWDM при резервировании каналов связи

Технология CWDM представляется многим средством, используемым только для расширения пропускной способности каналов связи. Действительно, при помощи волнового

уплотнения можно добиться очень значительного увеличения скорости передачи данных в уже эксплуатируемых сетях связи. На этом возможности применения данной технологии не заканчиваются. Спектральное уплотнение отлично подходит для резервирования каналов связи в сетях с топологией «кольцо» (рис. 5.10).

В стандартной топологии «кольцо» с тремя узлами порты узлов соединяются так, что бы получилось 3 участка сети: 1-2, 2-3, 3-1. При разрыве на одном из участков сети, все узлы соединяются по «запасному» маршруту. Например, при разрыве на участке 1-2, данные будут передаваться по направлению 1-3-2.

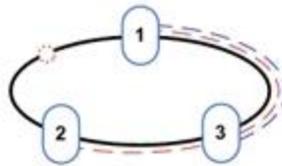


Рис. 5.10. Сеть связи с топологией «кольцо»

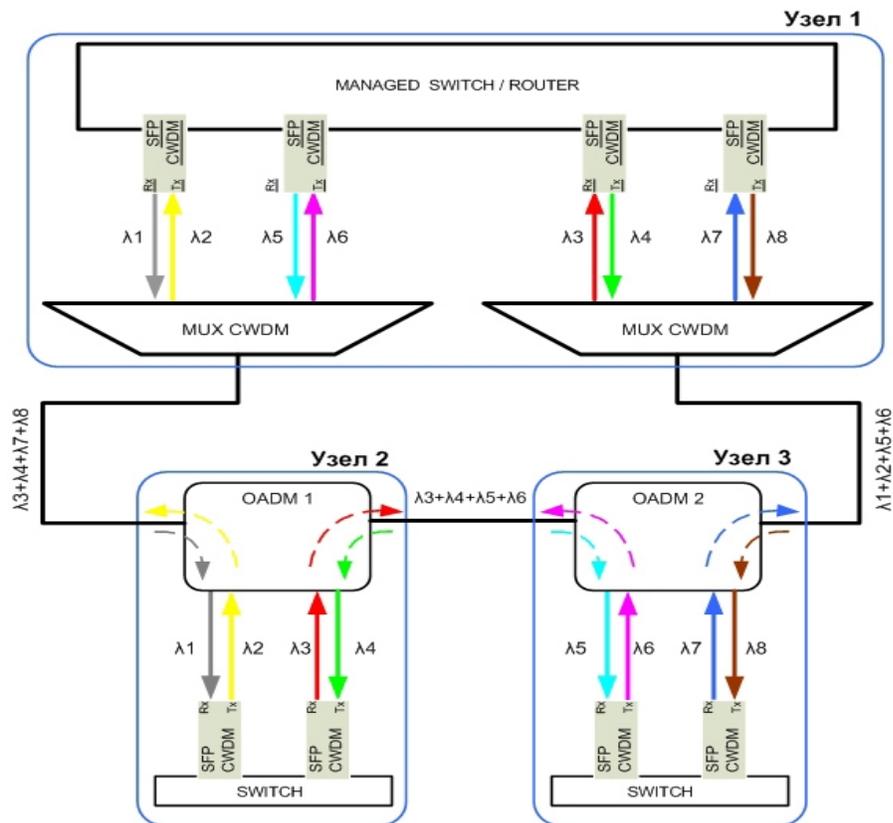


Рис. 5.11. Схема резервирования

В случае использования решения на базе технологии спектрального уплотнения CWDM, схема резервирования каналов между узлами 1 и 2,3 выглядит следующим образом (рис. 5.11): на узле 1 устанавливается 2 двухканальных мультиплексора, на узлах 2 и 3 двухканальные, двухсторонние OADM модули. Мультиплексор 1 образует по направлению «Узел 1- Узел 2- Узел 3» (далее 1-2-3) два дуплексных канала для обмена информацией с узлами 2 и 3. Мультиплексор 2 дублирует эти каналы на направлении «Узел 1- Узел 3- Узел 2» (далее 1-3-2). Таким образом, обмен информацией между узлом 1 и 2 может производиться по двум направлениям: 1-2 и 1-3-2. Аналогичная ситуация и для узла 3 участок 1-3 резервируется

участком 1-2-3. В случае разрыва связи на одном из направлений, для передачи данных будет задействовано второе. Для осуществления такого перенаправления на узле 1 должен быть установлен управляемый коммутатор или роутер. Мультиплексор 1 работает в 4-мя длинами волн: λ_1 , λ_2 , λ_5 и λ_6 . Из них λ_1 , λ_2 обрабатываются модулем OADM 1 и предназначены для обмена данными с узлом 2, а λ_5 и λ_6 доходят до узла 3 и обрабатываются OADM 2. Мультиплексор 2 на узле 1 работает с длинами волн λ_3 , λ_4 , λ_7 и λ_8 . Сигналы λ_7 и λ_8 предназначены для OADM 2 на узле 3, λ_3 , λ_4 – для OADM 1 на узле 2. Таким образом, при разрыве одного из участков 1-2, 2-3 или 3-1 трафик будет перенаправлен по дублирующему каналу.

Вопросы для самоконтроля.

1. В чем смысл «гибридных» схем?
2. Как выглядит гибридная модель частотного плана CWDM и DWDM?
3. Как выглядит структурная схема CWDM+DWDM с использованием последовательного подключения мультиплексоров CWDM и DWDM?
4. Что такое технология TDM?
5. В чем смысл применения технологии TDM в CWDM системах передачи?
6. В чем заключаются особенности передачи TV сигнала в системах CWDM?
7. В каких сетях спектральное уплотнение можно использовать для резервирования каналов связи?

6. Пассивные компоненты системы WDM

6.1. Мультиплексоры и демультиплексоры

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 (рис. 6.1), 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.

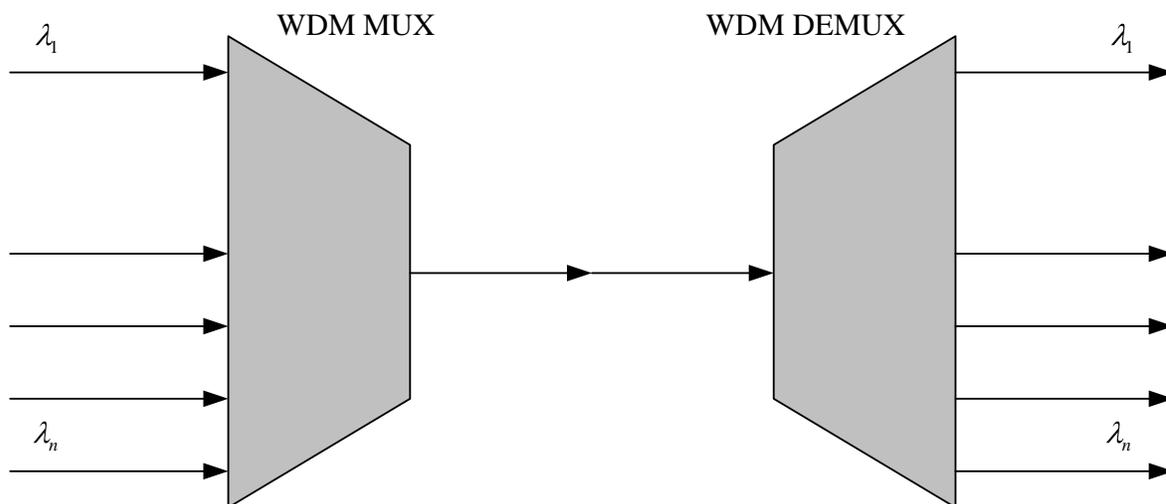


Рис. 6.1. Мультиплексор и демультиплексор

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, 25 и 12,5 ГГц. 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.

В качестве мультиплексора можно использовать широкополосный разветвитель. Однако вносимые при этом потери были бы слишком велики - до 4 дБ для двухканальных систем, 7 дБ для четырехканальных, 13 дБ для 16-тиканальных и т.д. Поэтому для мультиплексирования входных каналов обычно используют другие методы, основанные на применении оптических фильтров. Существующие узкополосные мультиплексоры DWDM объединяют каналы с разными длинами волн в один общий оптический канал с минимально возможными потерями.

Рассмотрим некоторые технологии мультиплексирования.

Тонкопленочные фильтры (интерференционные 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 (рис. 6.2).

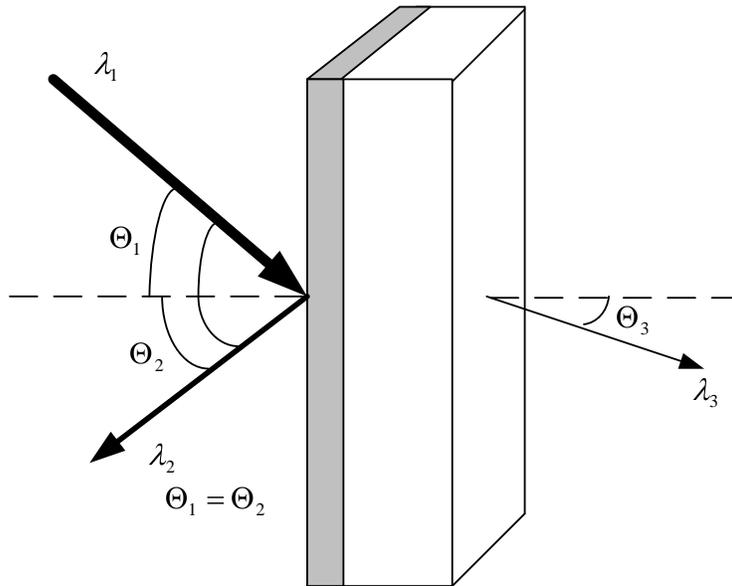


Рис. 6.2. λ_1 - падающая волна, λ_2 - отраженная, λ_3 – прошедшая

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 демultipлексорах 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. 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 (рис. 6.3).

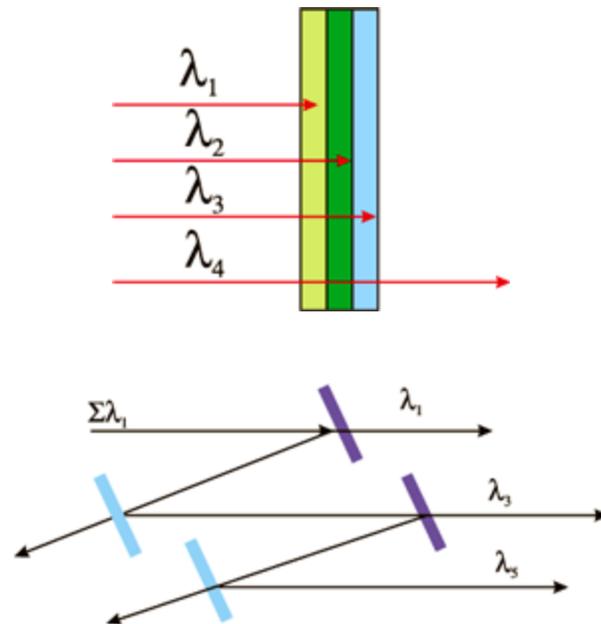
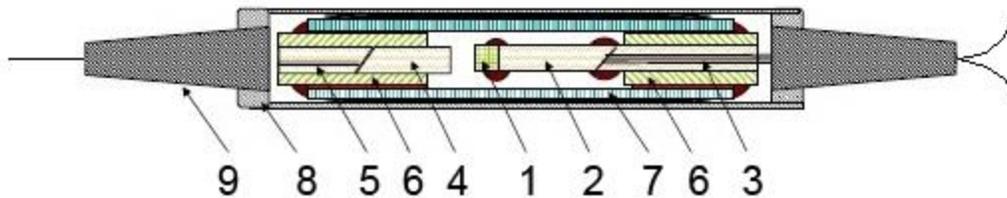


Рис.6.3. Многоступенчатая система тонкопленочных фильтров для демультиплексирования составного сигнала

Оптические мультиплексоры/демультиплексоры (MUX/DEMUX) нашли широкое применение в технологии CWDM (DWDM), поэтому рассмотрим их подробнее. Основными их составляющими являются устройства (далее одноканальные фильтры CWDM), сделанные с использованием многослойных тонкопленочных фильтров Thin Film Filter (Рис. 6.4, 6.5).



Основные составляющие части: 1 – тонкопленочный фильтр, 2 – G линза, 3 – двухволоконный пигтейл, 4 - C линза, 5 одноволоконный пигтейл, 6 – стеклянная трубка, 7 – кварцевая трубка, 8 – стальная или пластиковая трубка, 9 – защитный наконечник.

Рис. 6.4. Конструкция одноканальных фильтров CWDM

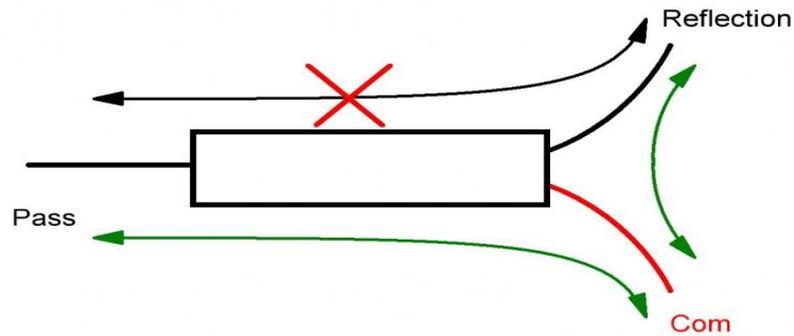


Рис. 6.5. Схема одноканальных фильтров CWDM

Каждый фильтр работает следующим образом: оптический сигнал на частоте, соответствующей одной из длин волн частотной сетки CWDM может передаваться между портами фильтра Pass и Com (рис. 6.5). Величина вносимого затухания между данными портами составляет от 0,3 dBm до 0,8 dBm**. Остальные длины волн диапазона CWDM, между данными портами не передаются, т.е. фильтруются и передаются между портами Reflection и Com. Вносимое затухание оптического сигнала между этими портами составляет также от 0,3 dBm до 0,8 dBm. Порты Pass и Reflection изолированы относительно друг друга, оптический сигнал между ними не передается. При выборе фильтров CWDM, отдельное внимание следует уделить следующей характеристике – частотному диапазону или полосе пропускания (рис. 6.6) между портами Pass и Com, на который настроен фильтр.

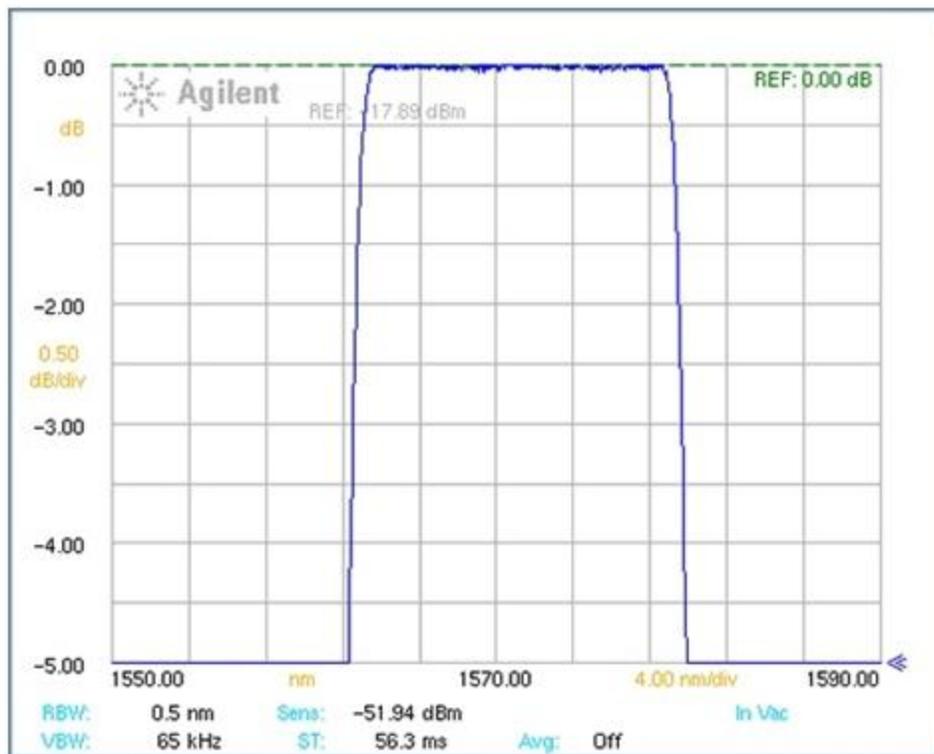


Рис. 6.6. Полоса пропускания фильтра между портами Pass и Com

Ширина спектра передаваемого сигнала у трансиверов CWDM составляет 1 нм, лазеры, используемые в таких трансиверах, не стабилизированы по температурному режиму, поэтому частота несущей у них может меняться. У качественных трансиверов длина волны может меняться в диапазоне от -6 до +7,5 нм от центральной частоты несущей, однако, существуют образцы трансиверов, где этот диапазон существенно шире. При несоответствии частоты лазера рабочему диапазону фильтра может возникнуть ситуация (например, при нагреве лазера), когда передаваемый оптический сигнал, при прохождении через фильтр, будет существенно ослаблен или полностью подавлен фильтром. Поэтому, при создании и проектировании систем CWDM необходимо сопоставлять характеристики используемых оптических трансиверов и фильтров.

Традиционная схема мультиплексора CWDM. Рассмотрим принципиальную схему оптического мультиплексора/демультиплексора CWDM, собранного на основе тонкопленочных фильтров. Наиболее распространена схема с последовательным соединением фильтров CWDM (рис. 6.7). В данном случае это mux/demux на 16 длин волн или 8 каналов CWDM. Фильтры, настроенные каждый на свою длину волны диапазона CWDM, соединяются друг с другом, таким образом, Com предыдущего с Ref последующего. Порт Ref первого фильтра в цепи, маркируется как Upgrade, порт Com последнего часто маркируется как Line, он включается в линию. Вносимое затухание на всем мультиплексоре для каждого канала N можно посчитать по формуле:

$$IL = IL_{Pass-Com} + (IL_{Ref-Com} * (N-1))$$

Где, $IL_{Pass-Com}$ – вносимое затухание на участке Pass-Com фильтра N, $IL_{Ref-Com}$ – усредненное значение вносимого затухания на участке Ref-Com одного фильтра. Данное устройство позволяет использовать для приема и передачи любые комбинации длин волн, в большинстве случаев они определяются исходя из характеристик трансиверов CWDM. В связи с тем, что величина вносимого затухания в оптическом волокне зависит от длины волны, например, для 1550 нм оно составляет приблизительно 0,2 дБм на километр, а для 1310 нм приблизительно 0,4 дБм на километр, поэтому предпочтительнее располагать фильтры таким образом, чтобы фильтры для “нижних” длин волн (1290, 1310, 1330...) располагались ближе к порту Com мультиплексора. В этом случае общее вносимое затухание для каналов, работающих на этих частотах, будет меньше, чем для ”верхних” длин волн. Указываемое в технических характеристиках устройства (мультиплексора) значение максимального вносимого затухания рассчитывается исходя из величины затухания для самого удаленного от порта Com устройства фильтра, в данном случае оно составляет <6 дБм.

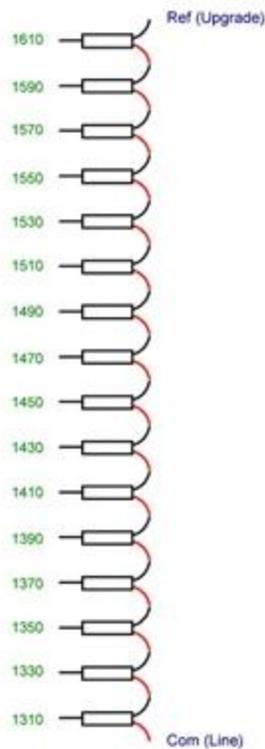


Рис. 6.7. Схема с последовательным соединением фильтров CWDM

Мультиплексор CWDM с уменьшенным вносимым затуханием. Помимо наиболее распространенной "классической" схемы соединения фильтров, которая представлена на рис. 6.7, компания Prointech использует альтернативные схемы. Одна из них – решение с уменьшенным вносимым затуханием на мультиплексоре CWDM, представлена на рис. 6.8 (Мультиплексор/демультиплексор на 16 длин волн). В данном случае берутся два отдельных устройства, собранные по традиционной последовательной схеме. Первое устройство состоит из восьми CWDM фильтров, настроенных на длины волн от 1610 нм до 1470 нм. Второе устройство аналогично первому, состоит из восьми CWDM фильтров, настроенных на длины волн от 1310 нм до 1450 нм. Порты Com обоих устройств соединяются с полосовым тонкопленочным фильтром.

Конструкция полосового фильтра по принципу схожа с конструкцией одноканального фильтра (рис. 6.4), его главная отличительная особенность - диапазон пропускаемых длин волн между портами Pass и Com 1260 нм – 1620 нм, и между портами Ref и Com 1460 нм – 1610 нм. Иными словами, данный фильтр делит диапазон длин волн CWDM пополам. Вносимое затухание полосового фильтра такое же, как и у одноканального фильтра. Значение максимального вносимого затухания нетрудно посчитать по приведенной выше формуле, у данного устройства оно не превышает 3,3 дБм.

По сравнению с классической схемой сборки оптических мультиплексоров, вносимое затухание в данном случае меньше почти на 3 дБ или в два раза при одинаковых выполняемых функциях. Используя устройства с уменьшенным вносимым затуханием, можно увеличить дальность работы системы CWDM примерно на 7,5 километров для "нижних" длин волн и на 15 километров для "верхних" длин волн, не меняя при этом оптические трансиверы.

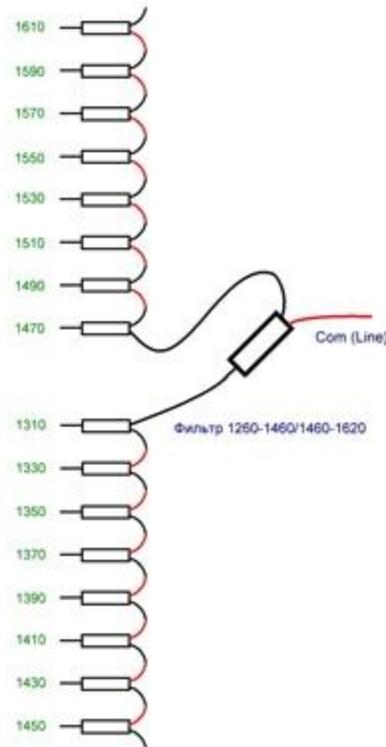


Рис. 6.8. Схема мультиплексор CWDM с уменьшенным вносимым затуханием

Правда, по сравнению с традиционным CWDM устройством, устройство с уменьшенным вносимым затуханием на такое же количество длин волн будет стоить несколько дороже. Если необходимо увеличить дальность передачи сигнала без расходов на дополнительную регенерацию, данное решение является наиболее актуальным.

Мультиплексор CWDM с PLC сплиттером. Еще одна альтернативная схема мультиплексора CWDM на 4 канала или 8 длин волн, собранного с использованием PLC сплиттера, представлена на рис. 6.9. В данном случае в качестве оптического мультиплексора устройства CWDM используется 1x4 PLC сплиттер.

Оптический демультиплексор построен по "классической" схеме – последовательно соединенные одноканальные фильтры CWDM. Сплиттер соединяется с портом Ref оптического демультиплексора и выполняет функцию мультиплексора. Максимальное вносимое затухание у данного комбинированного устройства составляет <9,5 дБм.

При расчете затухания в системе, состоящей из таких устройств, необходимо учитывать вносимое затухание на обоих мультиплексорах/демультиплексорах (рис. 6.10), поскольку данные устройства не являются симметричными. Например, для длины волны 1530, суммарное вносимое затухание на устройствах будет состоять из затухания на PLC сплиттере, 4-х одноканальных фильтрах на ближнем демультиплексоре и 4-х одноканальных фильтров на удаленном демультиплексоре.

Из-за высокого вносимого затухания PLC сплиттерами дальность работы систем передачи CWDM, собранных с использованием таких устройств, уменьшается более чем на 30 км, для "верхних" длин волн по сравнению с традиционной схемой (рис. 6.7). По мере увеличения количества портов PLC сплиттера 1xN существенно увеличивается

вносимое затухание, по этой причине число длин волн мультиплексора CWDM, собранного на основе PLC не превышает 8.

Однако, у данной схемы есть преимущество – такое устройство существенно дешевле мультиплексора на 8 длин волн, собранного по традиционной схеме.

В отличие от предыдущих схем CWDM при инсталляции устройств, собранных с использованием PLC сплиттеров необходимо уделять особое внимание тому, что порты IN (входящие порты) и OUT (исходящие порты) жестко привязаны. Неправильное подключение хотя бы одного порта ведет к неработоспособности всей системы.

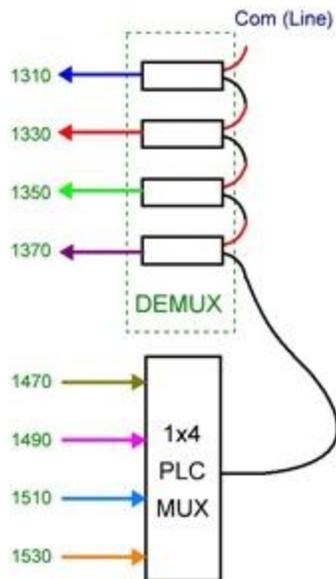


Рис. 6.9. Мультиплексор CWDM с PLC сплиттером

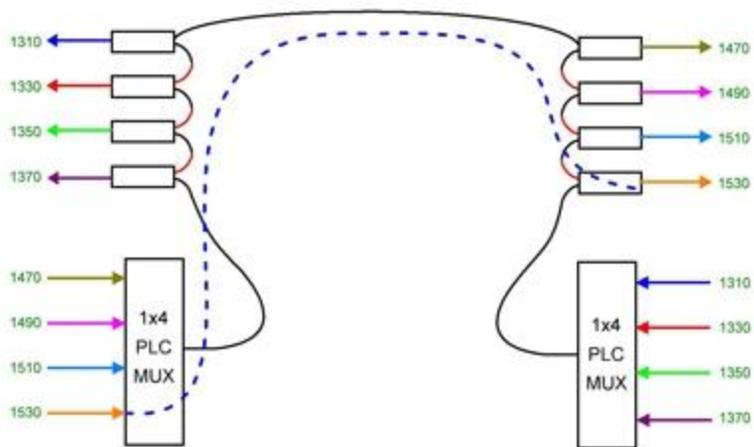


Рис. 6.10. К расчету затухания с PLC сплиттером

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. Брэгговская дифракционная решетка. Вторым типом спектрально-селективных элементов, используемых в системах DWDM, являются дифракционные решетки, чаще всего брэгговские дифракционные решетки. Вообще то, дифракция Брэгга — это дифракция на стоячей ультразвуковой волне, возбужденной в прозрачном твердом материале (рис.6.11). При этом в нем возникают чередующиеся максимумы и минимумы коэффициента преломления, которые могут играть роль дифракционной решетки. Период решетки пропорционален длине ультразвуковой волны, чем меньше длина волны, тем меньше период решетки, тем выше ее разрешающая способность, тем лучше она может разделить близко стоящие по длине волны. В дальнейшем брэгговскими стали называть решетки на основе структуры с периодически изменяющимся коэффициентом преломления, вне зависимости от того, каким путем эти изменения созданы. Это может быть участок материала специального состава, облученный, например, ультрафиолетовым излучением. Таким путем можно сформировать решетки со значительно меньшим периодом, нежели механическим путем (гравировкой) или путем химического травления через специальную маску.

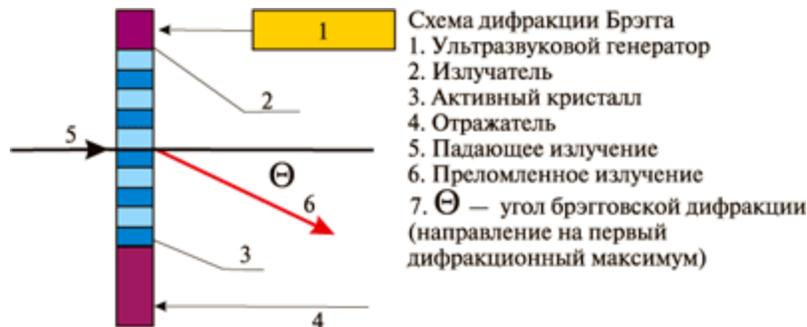


Рис. 6.11. Брэгговская дифракционная решетка

Величина угла (угла дифракции) зависит от длины волны падающего излучения, и если на решетку направить световой поток излучения нескольких длин волн, то после прохождения решетки он разделится на отдельные составляющие, каждую из которых можно наблюдать под своим углом.

Выше было рассмотрено явление дифракции в случае, когда излучение падает нормально к плоскости решетки. Однако эффект спектральной селекции можно наблюдать и если излучение направить вдоль структуры с периодическим изменением показателя преломления (рис. 6.12).

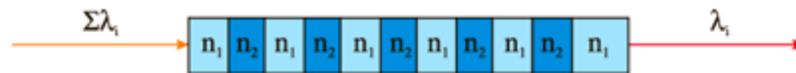


Рис. 6.12. Спектральная селекция в брэгговской дифракционной решетке

На границе сред с различным коэффициентом преломления всегда происходит отражение излучения. Подбирая шаг решетки в направлении распространения и материал среды, можно добиться или того, что только излучение с определенной длиной пройдет через решетку или же того, что только это излучение отразится от нее. (Фактически добиваются того, чтобы падающее и отраженное излучения со всеми другими длинами волн приходили к концу или началу решетки в противофазе). Рабочая полоса частот такого фильтра определяется длиной решетки. Поскольку и шаг и длина зависят от температуры материала, то необходимо

принимать специальные меры для поддержания температуры решетки постоянной, помещая ее в термостат.

Волоконная брэгговская решетка может использоваться как оптический фильтр в устройствах мультиплексирования и демultipлексирования как компенсатор хроматической дисперсии или в комбинации с оптическими циркуляторами в мультиплексорах ввода/вывода каналов.

Для компенсации хроматической дисперсии в линейном волокне применяются брэгговские решетки с изменяющимся периодом

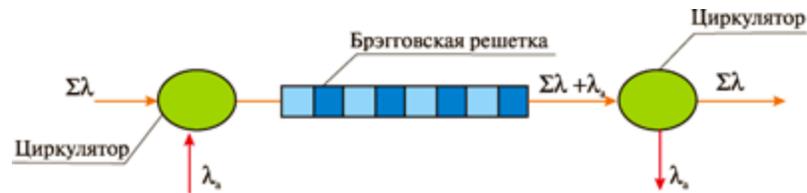


Рис. 6.13. Устройство ввода/вывода излучения одного канала в групповой поток

Используя брэгговскую решетку и оптический циркулятор, можно сделать устройство ввода/вывода излучения одного канала в групповой поток (рис. 6. 13). (Оптический циркулятор — это невзаимное устройство, по-разному воздействующее на излучение, в зависимости от направления его распространения).

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 принцип, что и в тонкопленочных фильтрах – подавление или усиление света за счет интерференции падающих и отраженных волн (рис. 6.14).

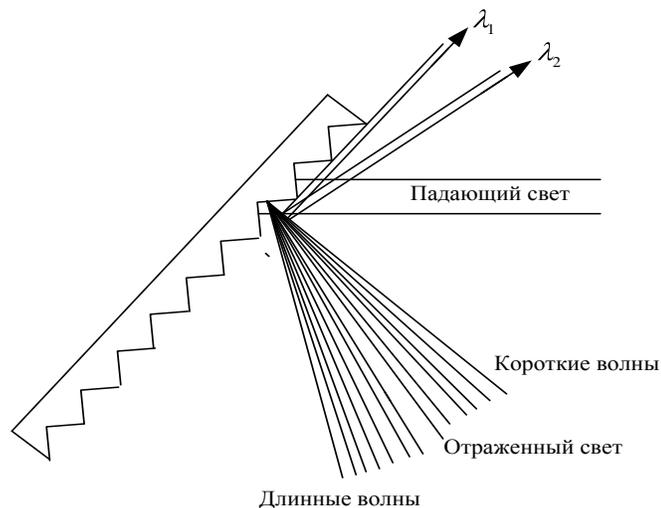


Рис. 6.14. Отражение составного сигнала дифракционной решеткой

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 добавлять в него. Хотя устройство 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 компенсации дисперсии. Оптическое волокно и некоторые компоненты систем WDM обладают хроматической дисперсией. Показатель преломления волокна зависит от длины волны сигнала, что приводит к зависимости скорости распространения сигнала от длины волны (материальная дисперсия). Даже если показатель преломления не зависел бы от длины волны, сигналы разных длин волн все равно распространялись бы с разной скоростью из-за внутренних геометрических свойств волокна (волноводная дисперсия). Результирующее воздействие материальной и волноводной дисперсий называется хроматической дисперсией.

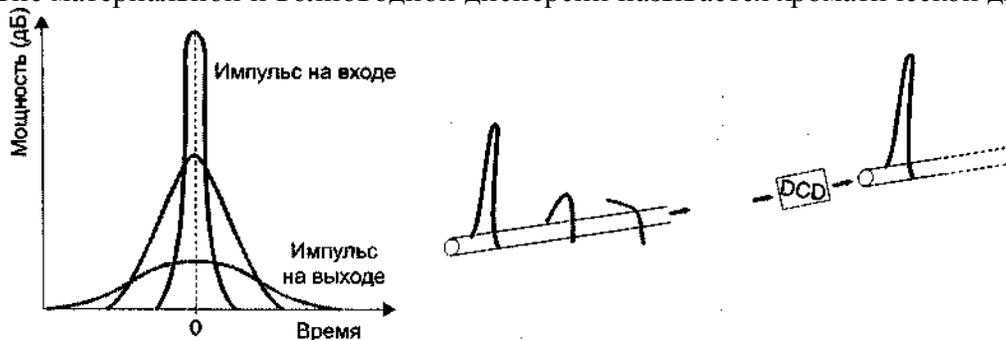


Рис 6.15. Уширение импульсов, вызванное дисперсией, и его компенсация

Хроматическая дисперсия приводит к уширению оптических импульсов по мере их распространения по волокну, рис. 6.15. При большой протяженности линии связи это проявляется в том, что близко идущие импульсы начинают перекрываться, ухудшая сигнал. Устройства компенсации дисперсии DCD (Dispersion Compensation Devices) придают сигналу равную по величине, но противоположную по знаку дисперсию и восстанавливают первоначальную форму импульсов. Наиболее распространены два типа устройств DCD - волокна, компенсирующие дисперсию DCF (Dispersion Compensating Fibers) и решетки, компенсирующие дисперсию DCG (Dispersion Compensating Gratings). На рис 6.16 показаны осциллограммы глаз – диаграммы до компенсации хроматической дисперсии (а) и после (б).

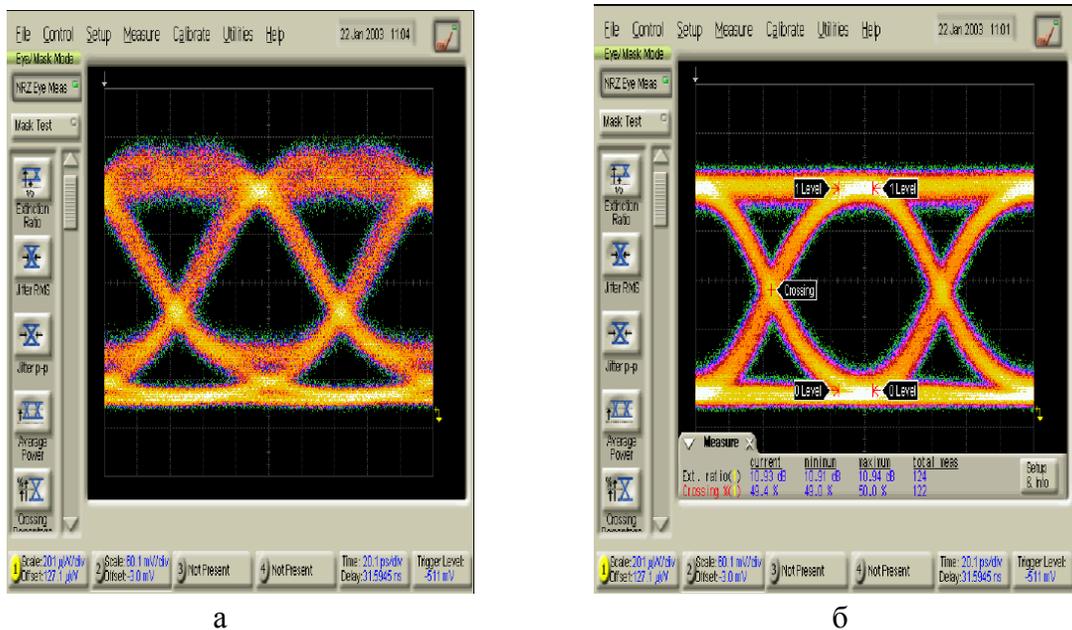


Рис 6.16. Глаз - диаграммы до компенсации хроматической дисперсии (а) и после (б)

Волноводные мультиплексоры на основе технологий интегральной оптики. Они основаны на использовании интерференции световых потоков с разными фазовыми сдвигами после прохождения волоконных световодов разной длины. Эти устройства чаще всего используются в качестве коммутаторов, когда необходимо перераспределить каналы с одной длиной волны в другие световоды или ввести в магистральное волокно дополнительные каналы. Схема такого коммутатора мультиплексора показана на рис. 6.17.

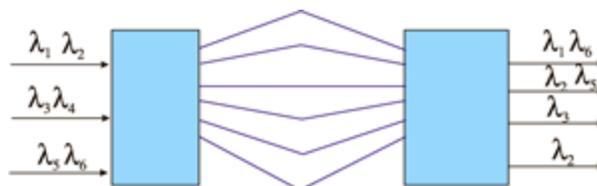


Рис. 6.17. Схема коммутатора – мультиплексора на основе технологий интегральной оптики

Входные сигналы с длинами волн $\lambda_1 - \lambda_6$, сгруппированные в пакеты, по разным волокнам попадают на входной разветвитель, где происходит расщепление каждого из них на N световых потоков. (В данном случае $N = 6$). Из разветвителя эти потоки попадают в планарные световоды, сформированные методами интегральной оптики на одной пластине. В каждом световоде распространяется излучение всех N длин волн. Длины световодов различны и выбраны таким образом, чтобы излучение различных каналов в результате интерференции на торце выходного разветвителя формировалось в другие, по сравнению с входными, группы. Естественно, все это так просто только на словах, а в действительности требуются сложные расчеты по выбору длин световодов матрицы и формы входного и выходного разветвителей, не говоря уже о собственно технологии изготовления. Такие мультиплексоры называют фазовыми матрицами или фазарами.

В качестве мультиплексоров/демультиплексоров могут использоваться планарные световоды, изготовленные по схеме интерферометра Маха — Цандера. Цепочку соединенных

последовательно таких световодов применяют для ввода — вывода сигналов отдельных каналов. Достоинство их в том, что матрица мультиплексора может быть изготовлена методом интегральной оптики на одной подложке.

6.2. Соединение оптических волокон

Для соединения оптических волокон используются **оптические разъемы и неразъемные соединения (сварка) волокон**. Волоконно-оптический кабель поставляется в катушках и для некоторых применений (например, дальняя связь) разделен на части - строительные длины. Наиболее целесообразным выглядит следующий принцип соединения оптических волокон: оптические разъемы используются в точках подключения волокон к телекоммуникационному оборудованию, а сварка оптических волокон производится на промежуточных этапах. Связано это с тем, что сварка оптических волокон позволяет достигнуть значения вносимых соединением потерь на уровне 0,01-0,04 дБ на одну сварку, тогда как оптические разъемы вносят потери не менее 0,3 дБ. Больше того, сварка оптических волокон позволяет точно устанавливать, какие потери в линию вносит соединение волокон. Оптические разъемы применяются в случаях, когда необходимо многократное соединение и разъединение волокон, т.е. в местах стыковки оптических волокон с пассивным или активным телекоммуникационным оборудованием. Очевидно, что если есть необходимость заменить сетевое устройство, то это значительно удобнее сделать при использовании оптического разъема, чем сварного соединения

Оптические разъемы. При монтаже ВОЛС применяются 2 типа соединений оптических волокон - разъемные и неразъемные. Разъемные соединения осуществляются с помощью разнообразных коннекторов (разъемов). К не разъемным относятся механические соединения и сварка оптических волокон.

На рынке представлено большое количество специализированных оптических разъемов. Волоконно-оптические разъемы доступны в двух типоразмерах: разъемы стандартного размера (SC, FC) и миниатюрные оптические разъемы (LC). Существуют оптические разъемы, которые могут соединить как одно, так и несколько волокон.

Оптический разъем состоит из оболочки, внутри которой расположен керамический наконечник (ферул рис.6.18) прецизионным продольным концентрическим каналом. Наиболее распространенный внешний диаметр ферула — 2,5 мм, но в оптических разъемах с малым форм-фактором используются ферулы диаметром 1,25 мм.



Рис. 6.18. Оптический разъем

Ферул соединяется с оптическим волокном: отрезок волокна без оболочки вставляется в канал наконечника и фиксируется, выступающий конец волокна скалывается параллельно с поверхностью торца ферула, сам торец ферула полируется. Далее ферул с волокном совмещается с корпусом разъема. После соединения волокна и ферула, качество сборки тестируется на наличие дефектов (например, на микроскопе и интерферометре). Для

одномодового волокна точность выравнивания должна быть выше, чем 0,1 мкм, угловое отклонение не более 5 гр., а возвратные потери не менее 40 дБ.

Существует несколько наиболее часто используемых типов разъемов, каждый из которых требует своего метода сборки. Но минимум два шага этих методов являются общими для всех типов.

Волокно закрепляется в оптическом разьеме с помощью эпоксидной смолы. Этот процесс важен с точки зрения обеспечения надежности оптического разъема. Эпоксидная смола минимизирует температурные перемещения волокна, позволяя осуществлять полировку торца без боязни повредить волокно, кроме того она предохраняет волокно от воздействия окружающей среды.

Оптоволоконный торец на конце оптического разъема должен быть отполирован. Существует несколько типов полировки PC (Physically Contact), UPC (Ultra PC), APC (Angled PC), SPS (Super PC). Подразумевается, что концы волокон будут физически соприкасаться внутри адаптера оптического разъема. Отсутствие полировки привело бы к образованию воздушных зазоров между волокнами и увеличению затухания, вносимого в линию (рис. 6.19).



Рис. 6.19. Торцы оптических волокон без полировки

Выбор метода полирования зависит от материала наконечника. Если материал наконечника очень твердый, например керамика, то, как правило, наконечник закруглен в районе торцевого конца и на него ссылаются как на предварительно закругленный. Мягкие материалы наконечника, такие, как композитные термопластики или стеклокерамика, могут полироваться плоско. Эти материалы изнашиваются примерно с такой же скоростью, что и оптоволокно, могут интенсивно использоваться и поддерживать качество физического контакта.

Торцевые концы волокна закругляются, для того, чтобы свет не отражается непосредственно назад к источнику (так как угол отражения равен углу падения). В случае закругления торца он отражается назад под углом и рассеивается, а волокна касаются наиболее выступающими точками, приходящимися на среднюю часть светонесущей сердцевины волокна. Таким образом, волокна касаются всегда и воздушный зазор исключен.

Обратное отражение может быть снижено еще больше, если использовать угловой физический контакт APC (Angled Physically Contact). Угловой контакт отражает свет в оболочку волокна, а не в сердцевину.

Возвратные потери оптического разъема должны быть, как уже говорилось, не меньше 40 дБ. Еще одна важная характеристика оптического разъема — количество циклов соединения. Оно относится к числу соединений/разъединений, начиная с которого характеристики разъема станут ухудшаться. Это число, как показывает опыт, колеблется от 200 до 600 сочленений. Существуют следующие типы оптических разъемов.

Оптический разъем ST (рис. 6.20). Этот тип разъема использует быстро сочленяемое байонетное соединение, которое требует повернуть разъем на четверть оборота для осуществления соединения/разъединения. Встроенный ключ обеспечивает хорошую повторяемость параметров соединения, потому что разъем всегда будет всегда одинаково

соединен с соединительной втулкой. Разъем типа ST в настоящее время заменяется на более прогрессивный разъем типа SC. Уровень вносимых потерь разъема типа ST составляет 0,5 дБ.



Рис.6.20. Оптический разъем ST

Оптический разъем SC (рис.6.21). Этот тип разъема широко используется как для одномодового, так и для многомодового волокна. Разъем SC относится к классу разъемов общего пользования и применяется как в сетях с большой длиной секций, так и в локальных сетях. В разьеме используется механизм сочленения "push-pull". Разъем SC базового типа состоит из сборки (вилки), содержащей наконечник, вставленной в оболочку разъема, центрирующую наконечник.



Рис.6.21. Оптический разъем SC

Оптический разъем SC в том, что он может объединяться в модуль, состоящий из нескольких разъемов. В этом случае модуль может использоваться для дуплексного соединения (одно волокно которого используется для передачи в прямом, а другое в обратном направлениях). Разъем имеет ключ, предотвращающий неправильное соединение волокон. Вносимые потери оптического разъема SC составляют 0,4 дБ и ниже.

Оптический разъем FC (рис. 6.22). Разъемы FC наиболее широко используются для одномодового волокна, и имеет уровень вносимых потерь порядка 0,4 дБ. Разъем типа FC имеет средства для настройки. Ключ настройки позволяет настраивать уровень вносимых потерь до нескольких десятых дБ. После того, как позиция минимальных потерь найдена, ключ может быть зафиксирован. Разъем типа FC выпускается как для одномодового, так и для многомодового волокон. Используемое в разъемах резьбовое соединение обеспечивают надежную защиту от случайного разъединения.



Рис. 6.22. Оптический разъем FC

Оптический разъем LC (рис. 6.23). Миниатюрные разъемы LC имеют размеры примерно в два раза меньшие, чем обычные варианты SC, FC, ST, диаметр наконечника составляет 1,25 мм, а не 2,5 мм. Это позволяет реализовать большую плотность при установке на коммутационной панели и плотную схему установки в стойку. Разъем фиксируется с помощью прижимного механизма, исключая случайное разъединение.



Рис. 6.23. Оптический разъем LC

Оптический разъем D4. Этот тип оптических разъемов особенно широко используется для одномодового волокна. Он во многих отношениях похож на разъем FC, но имеет наконечник меньшего диаметра — 2,0 мм. Вносимые потери разъема D4 составляют около 0,4 дБ.

Оптический разъем FDDI. Разъем FDDI спроектирован как двухканальный, использует два керамических наконечника и механизм боковых защелок. Прочный кожух защищает наконечники от случайных повреждений, тогда как плавающий стык обеспечивает ему плотное сочленение без усилий. Уровень вносимых потерь составляет порядка 0,3 дБ для одномодового волокна и порядка 0,5 дБ для многомодового. FDDI — технология локальных сетей, используемая для пакетной передачи данных со скоростью 100 Мбит/с в соответствии со стандартом ANSI.

Оптический разъем E-2000 и F-3000 (рис. 6.24). Разъемы E-2000 представляют собой достаточно сложную конструкцию. Для разъединения разъема требуется специальный ключ, поэтому вероятность случайного разъединения разъема E-2000 сводится к нулю. После разъединения коннектора, отверстие закрывают специальные шторки. Данные разъемы отличает большое количество циклов соединений - до 2000. Оптические разъемы F-3000 являются усовершенствованной версией разъема E-2000. Отличие заключается в диаметре ферулы - 1,25 мм (у F-3000) и в материале шторок - у F-3000 они металлические.



Рис. 6.24. Оптический разъем E-2000 и F-3000

Существует еще большое количество типов оптических разъемов - HDSC, FJ, SC-Compact, MU, SCDC, SCQC, Mini-MT, MT-RJ, Mini-MPO, Optoclip II, VF-45 и прочие. Эти разъемы имеют узкое прикладное назначение и в настоящее время не получили широкого применения.

Соединительные розетки и адаптеры. Соединительные розетки (рисунки 6.25-6.27) обеспечивают физический контакт соединяемых коннекторов. Материал корпуса розетки ST и FC – никелированная латунь, SC – пластик. Розетки для многомодовых применений содержат бронзовый разрезной центратор, розетки для одномодовых применений – керамический центратор.



Рис. 6.25. Розетка ST



Рис. 6.26. Розетка FC



Рис.6.27. Розетка SC

Вносимые потери на соединение стандартных шнуров: одномодовые – 0,2 , 0,3 дБ, многомодовые – 0,05 , 0,2 дБ. Соединительные розетки SC могут быть спаренными. Переходные розетки (рис.6.28) используются для соединения шнуров различных стандартов, для сопряжения аппаратуры различных производителей.



Рис. 6.28. Переходная розетка

Адаптеры различаются своим назначением. **Адаптеры для обнаженного волокна** – это устройства для оперативного временного оконцевания одномодового или многомодового волокна в буферном покрытии диаметром 900 мкм. Адаптеры используются при ремонте и оптических измерениях. Адаптеры для обнаженного волокна состоят из коннектора определенного типа (FC,ST,SC) и специализированного зажимного устройства, которое может удерживать волокно в буферном покрытии. Типовые потери 0,4 , 0,8 дБ.

Адаптеры типа FM используются в измерительной аппаратуре. Они подключаются к оптическому входу прибора и защищают приборы от риска повреждения излучателей и фотоприемников при многократных включениях. FM адаптеры представляют собой комбинацию розетки и коннектора. В коннекторную часть вклеен отрезок волокна. Типовые потери 0,4 , 0,8 дБ.

6.3. Оптические аттенюаторы

Оптические аттенюаторы применяются с целью уменьшения мощности оптического сигнала. Существует несколько разновидностей аттенюаторов.

Переменные аттенюаторы – розетки (рис.6.29) имеют соединительные размеры стандартных проходных розеток типа ST и FC и взаимозаменяемы с ними. Аттенюаторы допускают плавную регулировку величины затухания за счет изменения воздушного зазора. Точность установки 0,5 дБ. Диапазон плавной регулировки ST и FC: 0 , 15 дБ для многомодового применения, 0 , 20 дБ для одномодового применения. Переменный

аттенюатор FC/APC разработан на базе стандартного аттенюатора FC и отличается более высокой точностью установки и большей величиной затухания (0 , 30 дБ).



Рис. 6.29. Переменные аттенюаторы-розетки

Фиксированные аттенюаторы-розетки (рис.6.30) имеют присоединительные размеры и внешний вид стандартных проходных розеток ST, FC. Затухание определяется калиброванным воздушным зазором. Типовые значения затуханий: 5, 10, 15, 20, 25, 30 дБ.



Рис.6.30. Фиксированные аттенюаторы-розетки

Аттенюаторы – FM адаптеры используются в измерительной и телекоммуникационной аппаратуре для оперативного снижения уровня сигнала. Типовые значения затуханий: 5, 10, 15, 20 дБ. Переменные аттенюаторы – FM адаптеры имеют внешний вид стандартных FM адаптеров, однако, отличаются наличием регулировочной гайки и стопорного кольца. Регулировка затухания осуществляется за счет воздушного зазора. Используются в качестве построечных. Величина затухания 0 20 дБ. Точность установки 0,5 дБ.

6.4 Оптические кроссы

Оптические кроссы используются для коммутации многоволоконного оптического кабеля, соединительных шнуров и электронного оборудования. Оптические кроссы делятся на настенные, стоечные и поддонные (рэковые). Корпус кросса представляет собой коробку или шкаф.

Настенные кроссы (пример на рисунке 6.31) различаются числом розеточных портов: 8, 12, 16, 32. В розеточные порты вставляются розетки FC, ST, SC или дуплексные розетки SC.



Рисунок 6.31. Настенный кросс

Столечные кроссы различаются способом установки (к стене или в ряд с оборудованием) и числом розеток (до 80).



Рис. 6.32. Стоечные кроссы

Кроссы в виде поддонов (называемые рэковыми) имеют три варианта исполнения – 1U, 2U, 3U – и рассчитаны на 16, 32 и 48 розеток. Эти кроссы лучше защищены от пыли (рис. 6.33).



Рис. 6.33. Рэковые кроссы

Шкафы и стойки напольные. Предназначены для размещения телекоммуникационного оборудования, в том числе и кроссов (рис. 6.34).



Рис 6.34. Напольный шкаф (а) и напольная стойка (б)

6.4. Оптические ответвители (разветвители)

Оптический разветвитель представляет собой многополюсное устройство, в котором излучение, подаваемое на часть входных оптических полюсов, распределяется между его остальными оптическими полюсами.

Различают следующие виды разветвителей: однонаправленные, двунаправленные, чувствительные к длине волны (частотнозависимые) и нечувствительные к длине волны (частотнонезависимые). В двунаправленном разветвителе каждый полюс может работать на прием и на передачу или осуществляет прием и передачу одновременно.

Частотнонезависимые разветвители подразделяются на звездообразные, древовидные и ответвители.

Звездообразные разветвители обычно имеют одинаковое число входных и выходных полюсов. Оптический сигнал приходит на один из n входов и в равной степени распределяется между n выходными полюсами. Большое распространение получили разветвители 2' 2 и 4' 4. Распределение мощности происходит равномерно.

Древовидные разветвители расщепляют входной оптический сигнал на несколько выходных, или наоборот, объединяют несколько сигналов в один выходной. Распределение мощности от одного входа к n выходам равномерное. Нашли применение разветвители от 2 до 32 и более выходов (рис. 6.35).

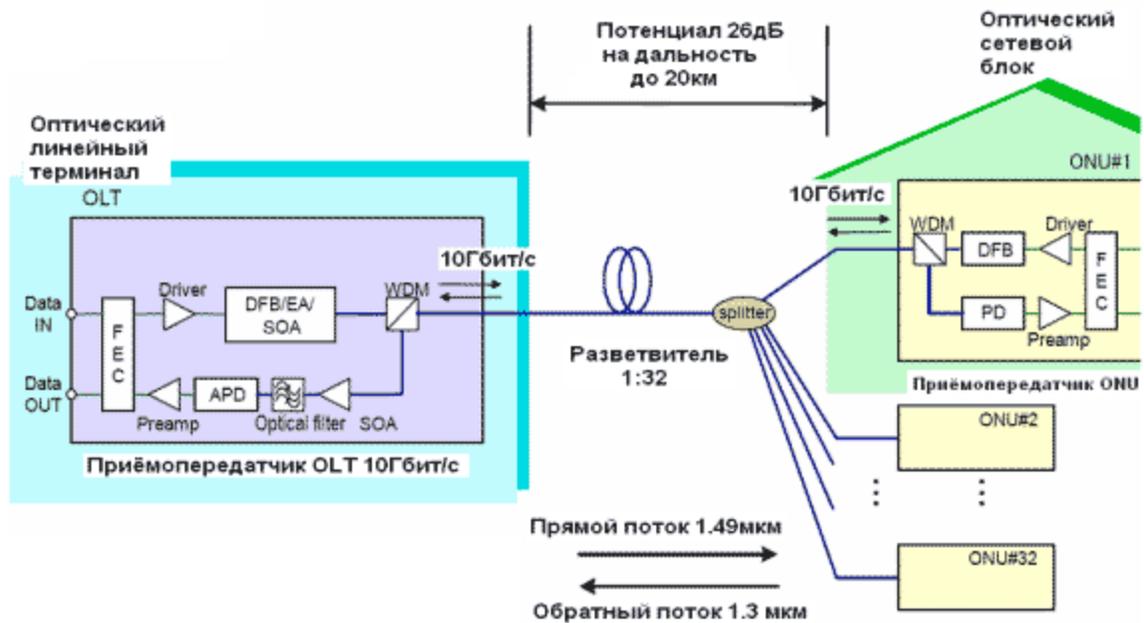


Рис. 6.35. Пример использования разветвителей в пассивной оптической сети

Ответитель отличается неравномерным распределением мощности от одного входа к n выходам.

Частотнозависимые разветвители могут использоваться в качестве устройств многоволнового мультиплексирования WDM. С их помощью можно объединять и разделять сигналы различных длин волн.

Примеры характеристик некоторых широко применяемых разветвителей приведены в табл. 6.1.

Таблица 6.1 Оптические двухоконные разветвители (1310 ± 40 нм, 1550 ± 40 нм)

Но мер	Тип	Коэффицент деления, %	Максимальные вносимые потери, дБ	Типичные вносимые потери, дБ
2000	1×2	50/50	3.7/3.7	3.1/3.1
2200	1×2	60/40	2.7/4.7	2.3/4.1
2400	1×2	70/30	2.0/6.0	1.7/5.4
2600	1×2	80/20	1.3/7.8	1.1/7.1
28	1×2	90/10	0.8/11.2	0.6/10.2

00				
29 00	1×2	95/5	0.5/14.4	0.4/13.2
20 30	2×2	50/50	3.7/3.7	3.1/3.1
39 00	1×3	33/33/33	5.9/5.9/5.9	5/5/5
49 00	1×4	25/25/25/2 5	7.4/7.4/7.4/7.4	6.2/6.2/6.2/6.2
53 00	1×5	20/..../20	8.6/..../8.6	7.3/..../7.3
60 00	1×6	16.6/..../1 6.6	9.8/..../9.8	8.1/..../8.1
80 00	1×8	12.5/..../1 2.5	11.3/.../11.3	9.5/..../9.5
A1 10	1×1 0	10/..../10	12.1/..../12.1	10.4/..../10.4
C1 12	1×1 2	8.3/..../8.3	13.3/..../13.3	11.3/..../11.3
G1 16	1×1 6	6.25/.../6. 25	14.9/.../14.9	12.6/..../12.6
M 132	1×3 2	3.13/.../3. 13	18.5/.../18.5	15.8/..../15.8

6.5. Оптические изоляторы (вентили)

Оптический изолятор обеспечивает пропускание света в одном направлении почти без потерь, а в другом направлении – с большим затуханием. В основе работы оптического изолятора лежит эффект Фарадея – вращение плоскости поляризации света оптически неактивными веществами под действием продольного магнитного поля. Принцип действия поясняет рисунок 6.36. Прямой луч света благодаря поляризатору имеет вертикальную поляризацию. Отраженный луч после обратного прохождения через ячейку Фарадея получает горизонтальную поляризацию. По этой причине он не пройдет через поляризатор к источнику прямого луча. Максимальная изоляция может составить 16 - 36 дБ. Вносимые потери для прямого луча не превышают 1,5 дБ.

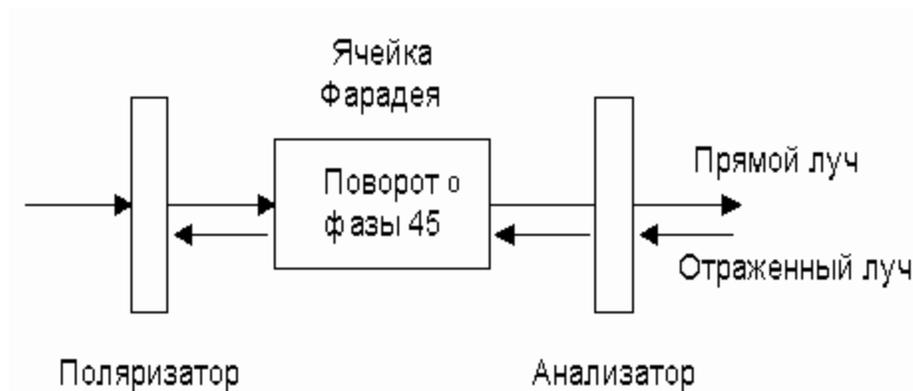


Рис. 6.36. Конструкция изолятора

6.6. Оптические кабели

Вот уже свыше двух десятилетий оптические кабели (ОК) активно используются на сетях связи различных типов. Основными элементами конструкции ОК, обеспечивающими передачу информации, являются оптические волокна. В настоящее время в локальных сетях чаще всего используют многомодовые волокна, более технологичные при монтаже и имеющие приемлемую широкополосность. В телекоммуникационных же сетях различных типов практически везде применяются кабели с одномодовыми оптическими волокнами (ООВ). На современном этапе развития техники они представляют собой самую широкополосную систему в мире.

Поскольку ООВ находят применение в сетях с различными требованиями по дальности и объему передаваемой информации, то в соответствии с действующими стандартами они подразделяются на несколько различных типов. Но в последние годы каждый тип волокна, в свою очередь, разделился еще и на несколько видов. Это связано, прежде всего, с совершенствованием технологий и необходимостью как можно более точно соответствовать потребностям применяемых на сетях решений.

Типы одномодовых оптических волокон. Все основные типы ООВ, их параметры и характеристики описаны в двух группах стандартов. Во-первых, в стандартах Международной электротехнической комиссии (IEC) серии IEC 60793-1, а также в Рекомендациях Сектора Стандартизации Телекоммуникаций Международного Союза Электросвязи (ITU-T) серии G.65x. Не будем рассматривать положения первой группы стандартов, поскольку ООВ рассматриваются там преимущественно как электротехнические изделия, в то время как в документах ITU-T прослеживается отношение к ООВ как к направляющей системе для передачи информации. К таким документам, в частности, относятся семь Рекомендаций ITU-T (табл. 6.2).

Каждая Рекомендация описывает определенный тип ООВ, физический смысл его параметров и технические требования к ним, с учетом подразделения на отдельные виды.

Таблица 6.2. Стандарты параметров ООВ серии G.65x

G.652	Характеристики одномодового оптического волокна и кабеля
G.653	Характеристики одномодового оптического волокна и кабеля со смещенной дисперсией

G.654	Характеристики одномодового оптического волокна и кабеля со смещенной длиной волны отсечки
G.655	Характеристики одномодового оптического волокна и кабеля с ненулевой смещенной дисперсией
G.656	Характеристики одномодового оптического волокна и кабеля с ненулевой дисперсией для широкополосных транспортных сетей
G.657	Характеристики одномодового оптического волокна и кабеля, не чувствительного к потерям на макро-изгибах, для использования в сетях доступа

Рассмотрим все стандартизированные типы и виды ООВ и проведем сравнительный анализ их некоторых характеристик, а также рассмотрим вопросы оптимального выбора волокон для конкретного применения.

Отметим, что в значительной степени возможные потери и сложности при монтаже оптического кабеля обуславливают именно геометрические параметры ООВ (особенно допуски на них). Напомним главные характеристики.

Коэффициент затухания определяет длину регенерационного (усилительного) участка, особенно для систем со скоростью передачи до 2,5 Гбит/с. **Хроматическая дисперсия** ограничивает скорость передачи либо длину регенерационного участка (для высокоскоростных систем). **Длина волны отсечки** характеризует электродинамический режим в волокне и, в зависимости от выбранной длины волны, потери на изгибах. Наконец, **поляризационная дисперсия** ограничивает максимальную дальность линии без использования регенераторов, особенно для систем со скоростью передачи до 2,5 Гбит/с.

В результате анализа указанных параметров выработаны рекомендации относительно возможности использования ООВ на телекоммуникационных сетях различных типов.

Для наглядности выбора рабочего диапазона длин волн для всех типов ООВ далее приведены спектральные характеристики основных параметров (коэффициента затухания и коэффициента хроматической дисперсии).

В табл. 6.3 представлены диапазоны, используемые для передачи сигналов по одномодовым оптическим волокнам в соответствии с Рекомендациями ИТУ-Т серии G, а также их сокращенные обозначения.

Таблица 6.3. Диапазон длин волн оптической связи

Диапазон длин волн, нм	Наименование диапазона (полное и сокращенное)
1260...1360	Основной (Original), O
1360...1460	Расширенный (Extended), E
1460...1530	Коротковолновый (Short wavelength), S
1530...1565	Стандартный (Conventional), C
1565...1625	Длинноволновый (Long wavelegth), L
1625...1675	Сверхдлинноволновый (Ultra-long wavelength), U

Стандартные **одномодовые волокна (SM)** (волокна G.652) со ступенчатым профилем показателя преломления появились на рынке телекоммуникаций в начале 1980-х годов как реальная альтернатива многомодовым волокнам при построении волоконно-оптических линий дальней связи. Конструктивное уменьшение диаметра сердцевины с 50 мкм до 8–10 мкм при передаче на длинах волн 1310 нм и выше позволяло обеспечить одномодовый режим передачи.

В этом случае в оптических волокнах полностью отсутствует наибольшая составляющая дисперсии — модовая дисперсия, что увеличивает реальную полосу пропускания более чем на порядок (коэффициент хроматической дисперсии составлял примерно 20 пс/(нм·км)). (Единица измерения хроматической дисперсии пс/(нм·км) показывает, на сколько пикосекунд расширяется импульс при прохождении 1 км линии и ширине спектра источника излучения 1 нанометр.) Таким образом, впервые по волокну заработали системы передачи со скоростями 100 Мбит/с и выше на межстанционных городских сетях и междугородных линиях. К тому же, переход на длины волн оптических несущих 1310 нм и 1550 нм позволял значительно уменьшить затухание в волоконно-оптических линиях связи (ВОЛС) и увеличить длины регенерационных участков до 40–50 км. В 1988 г. ИТУ-T впервые стандартизировал этот тип ООВ — Рекомендация G.652 вошла в так называемую Синюю книгу.

Дальнейшее активное применение одномодовых волокон в 1990-х годах обусловила относительная простота технологии их производства, а, соответственно, и относительно невысокая стоимость, а также активное построение транспортных сетей связи в мире. Коэффициент затухания у большинства производителей был уменьшен до 0,2–0,25 дБ/км.

В последнее время одномодовые волокна стали использовать на длине волны 1550 нм для организации **систем со спектральным уплотнением (WDM)** при небольшом количестве несущих (поскольку хроматическая дисперсия достаточно велика). Развитие таких систем заставило задуматься о возможности использования диапазона E (1360–1460 нм), который был недоступен из-за пика поглощения на ионах гидроксильной группы (1383 нм). В результате, после совершенствования технологии дегидратации, появились одномодовые волокна с так называемым сглаженным водным пиком (LWP, Low Water Peak) (пунктирная линия на рис. 6.37). Достаточно удачным моментом является то, что для ООВ этого типа длина волны отсечки (пунктирная линия λ_c) находится рядом с основной рабочей длиной волны 1310 нм. В этом случае волокна менее чувствительны к потерям вследствие изгибов и других деформаций.

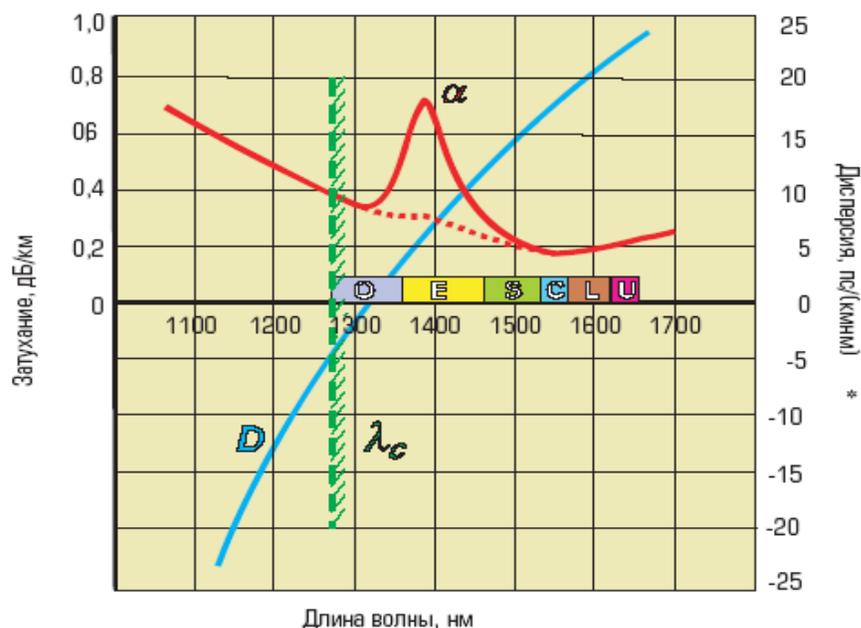


Рис. 6.37. Спектральные зависимости коэффициента затухания и коэффициента хроматической дисперсии ООВ типа G.652

Потребность в интегрированной передаче пользователям голосовых сообщений, видеосигналов и данных дала толчок активному развитию оптических технологий на сетях доступа. Здесь одномодовые волокна из-за своей низкой стоимости и широкополосности нашли применение в пассивных оптических сетях (PON) и других технологиях.

Большая пропускная способность систем на одномодовых волокнах обусловила их использование в локальных сетях для организации Gigabit Ethernet и 10 Gigabit Ethernet. А для кампусных линий (соединяющих здания). Это наиболее удачный тип среды передачи, ведь здесь широкополосность сочетается с малым затуханием.

Таким образом, стандартные одномодовые волокна (G.652) находят широкое применение на сетях связи самых различных типов из-за своей технологичности, невысокой стоимости, пригодности для работы во всех спектральных диапазонах, как с системами спектрального уплотнения, так и без них.

Последняя редакция Рекомендации G.652 (2005 г.) содержит параметры и характеристики четырех типов одномодовых ОВ, несколько отличающихся по свойствам и, соответственно, по назначению (табл. 6.4). В частности, для волокон типов G.652C и G.652D как раз характерен «сглаженный водный пик».

Таблица 6.4. Параметры (характеристики) ООВ G.652

Параметр (характеристика)	Тип волокна, в соответствии с Рекомендациями ITU-T			
	G.652A	G.652B	G.652C	G.652D
Диаметр модового пятна, мкм (на длине волны 1310 нм)	8,6...9,5 ± 0,6	8,6...9,5 ± 0,6	8,6...9,5 ± 0,6	8,6...9,5 ± 0,6
Диаметр оболочки, мкм	125 ± 1	125 ± 1	125 ± 1	125 ± 1
Максимальный эксцентриситет сердцевинцы/оболочки, мкм	0,6	0,6	0,6	0,6
Максимальная некруглость оболочки, %	1,0	1,0	1,0	1,0
Максимальная длина волны среза ОВ в кабеле, мкм	1260	1260	1260	1260
Максимальные потери на макронизме (100 витков радиусом 30 мм), дБ, на длине волны: 1550 нм; 1625 нм	0,1 –	– 0,1	– 0,1	– 0,1
Минимальное проверочное напряжение на разрыв, МПа	0,69	0,69	0,69	0,69
Длина волны нулевой дисперсии, мкм	1300...1324	1300...1324	1300...1324	1300...1324
Наклон кривой хроматической дисперсии возле нулевого значения, ps/(nm ² ·км)	0,092	0,092	0,092	0,092
Максимальный коэффициент затухания, дБ/км, в диапазоне длин волны: 1310 нм; 1310 ... 1625 нм; 1383 нм; 1550 нм; 1625 нм	0,5 – – 0,4 –	0,4 – – 0,35 0,4	– 0,4 0,4 0,3 0,4	– 0,4 0,4 0,3 0,4
Максимальный коэффициент PMD ¹ , ps/nm ²	0,50	0,20	0,50	0,20

Примечание: PMD – поляризационная модовая дисперсия.

Современные одномодовые ОВ обычно имеют коэффициент хроматической дисперсии порядка 2–3,5 пс/(нм·км) на длине волны 1310 нм и 17–18 пс/(нм·км) на длине волны 1550 нм, а также коэффициент затухания — соответственно 0,32–0,38 дБ/км (1310 нм) и 0,17–0,25 дБ/км (1550 нм).

Различия в применении волокон G.652 четырех видов рассмотрены ниже.

Волокна G.652A находят сейчас самое широкое применение. Они предназначены для работы в составе ОК на транспортных сетях связи для поддержки систем передачи SDH до STM-16 (2,5 Гбит/с), ограниченно STM-64 (10 Гбит/с) и STM-256 (40 Гбит/с) для внутристанционных соединений. Кроме того, благодаря невысокой стоимости, их активно используют для построения оптических сетей доступа, например PON при скорости передачи до 2,5 Гбит/с, а также в локальных сетях для поддержки Gigabit Ethernet и 10 Gigabit Ethernet для внутренних и кампусных (до 40 км) линий.

Волокна G.652B отличаются более низкими коэффициентами затухания и поляризационной дисперсии, что позволяет использовать их на транспортных сетях более высокоскоростных систем передачи — до STM-64 (10 Гбит/с) и STM-256 (40 Гбит/с) для внутристанционных и межсетевых интерфейсов. Также возможно использование в системах с WDM для передачи потоков до STM-64 (10 Гбит/с) при ограниченном числе несущих в диапазоне длин волн 1550 нм (диапазон С).

Волокна G.652C аналогичны виду G.652A, однако имеют подавленный водный пик на 1383 нм, благодаря чему их можно использовать, кроме всех указанных применений, еще и в диапазоне E (1360–1460 нм).

Волокна G.652D подобны виду G.652B, но также имеют подавленный водный пик на 1383 нм и могут быть использованы в диапазоне E (1360–1460 нм), а системы WDM — в расширенном диапазоне длин волн 1360–1565 нм (диапазоны E, S, C).

Практика использования ОК с одномодовыми волокнами в 1980-х годах показала неоптимальность работы во втором (1310 нм) и третьем (1550 нм) «окне прозрачности» (оптическом диапазоне). На длине волны 1310 нм ООВ имели минимальную дисперсию, а, следовательно, и максимальную пропускную способность, в то время как на длине волны 1550 нм — минимальный коэффициент затухания и, как результат, максимальную длину регенерационного участка ВОЛС. Поэтому были разработаны волокна с более сложными профилями показателя преломления (треугольный, трапециевидный и др.) (волокна G.653), позволяющие сместить спектральную характеристику дисперсии таким образом, чтобы ее минимальное значение находилось в диапазоне 1550 нм. Используя подобные **ООВ со смещенной дисперсией (DSF)**, можно было обеспечить максимальную широкополосность и дальность связи в одном «окне прозрачности».

Этот тип волокон был стандартизирован ИТУ-Т впервые в 1988 г. Свое распространение они получили в основном на североамериканских магистральных сетях большой протяженности. В европейских странах, где нет особой потребности в таких масштабах, эти ООВ почти не применялись из-за явно более высокой стоимости вследствие сложности изготовления. В последнее время, в связи с внедрением систем WDM, возникла проблема их использования с волокнами типа G.653. Оказалось, что при отсутствии дисперсии в диапазоне С практически невозможно достичь спектрального уплотнения из-за сильного влияния нелинейных эффектов. В какой-то степени выход был найден — это системы WDM с неравномерным шагом несущих, не соответствующим стандартной сетке частот (Рекомендация ИТУ-Т G.694 и другие). Последняя версия Рекомендации G.653 (2006 г.) рассматривает два вида одномодовых ОВ этого типа (табл. 6.5). Более поздняя разработка G.653B, в частности, содержит не просто фиксированное значение коэффициента хроматической дисперсии, а еще и две ограничивающие кривые (рис. 6.38).

Таблица 6.5. Характеристики (параметры) ООВ G.653

Параметр (характеристика)	Тип волокна, в соответствии с Рекомендациями ИТУ-Т	
	G.653A	G.653B
Диаметр модового пятна, нм (на длине волны 1550 нм)	7,8...8,5 ± 0,8	7,8...8,5 ± 0,6
Диаметр оболочки, мкм	125 ± 1	125 ± 1
Максимальный эксцентриситет сердцевины/оболочки, мкм	0,8	0,6
Максимальная некруглость оболочки, %	2,0	1,0
Максимальная длина волны среза ОВ в кабеле, мкм	1270	1270
Максимальные потери на макроизгибе (100 витков радиусом 30 мм), дБ, на длине волны 1550 нм	0,5	0,1
Минимальное проверочное напряжение на разрыв, ГПа	0,69	0,69
Длина волны нулевой дисперсии, мкм	1500...1600	–
Максимальный коэффициент хроматической дисперсии, пс/(нм км), в диапазоне длин волн: 1525...1575 нм 1460...1525 нм 1525...1625 нм 1460...1575 нм 1575...1625 нм	3,5	-9...-3,5 -3,5...+1,7 -1,9...+3,5 +3,5...+7,8
Наклон кривой хроматической дисперсии вблизи нулевого значения, пс/(нм ² км)	0,085	–
Максимальный коэффициент затухания, дБ/км, в диапа-	0,35	0,35

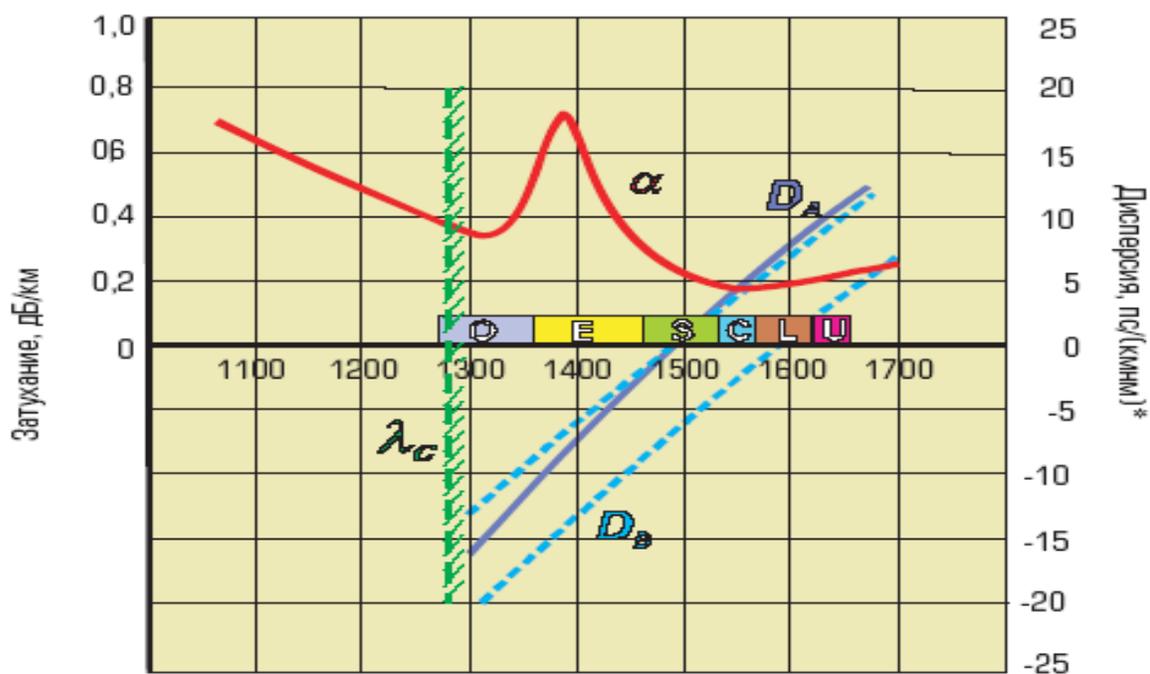


Рис. 6.38. Спектральные зависимости коэффициента затухания и коэффициента хроматической дисперсии ООВ типа G.653

Современные одномодовые ОВ имеют обычно коэффициент хроматической дисперсии порядка 2...3,5 пс/(нм·км), а коэффициент затухания 0,19...0,25 дБ/км на длине волны 1550 нм. Несмотря на свою высокую стоимость, они продолжают оставаться хорошим средством построения участков сетей значительной протяженности для передачи больших объемов информации.

Волокна G.653A обычно находят свое применение на транспортных сетях связи на участках с большой протяженностью для поддержки систем передачи SDH до STM-64 (10 Гбит/с) и STM-256 (40 Гбит/с) для внутростанционных соединений. Также возможно их использование в системах с WDM для передачи потоков до STM-64 (10 Гбит/с) с неравномерным разносом несущих для работы в диапазоне длин волн вблизи значения 1550 нм (диапазон С).

Волокна G.653B аналогичны виду G.652A, однако, за счет уменьшенной поляризационной дисперсии, могут применяться и для систем STM-256 (40 Гбит/с) для ВОЛС протяженностью более 400 км. Поскольку для таких волокон коэффициент хроматической дисперсии стандартизирован в диапазоне длин волн от 1460 нм до 1625 нм, то возможно использование систем с разреженным волновым мультиплексированием (CWDM) в расширенном диапазоне S–C–L.

Волокна G.654. Появление этого типа волокон связано с прокладкой первых морских и трансокеанских ВОЛС в середине 1980-х годов. В таких линиях требовалось, в первую очередь, обеспечить очень большие длины регенерационных участков, т.е. минимизировать коэффициент затухания. Для этого в качестве сердцевины использовался не легированный оксидом германия кварц (как это делается в волокнах G.652), а чистый кварц. А необходимая разность показателей преломления сердцевины и оболочки обеспечивалась добавлением фтора в кварцевый материал оболочки ООВ. Характерно, что дисперсия при этом не минимизировалась в районе 1550 нм (как в волокнах G.653). Это связано с тем, что не было смысла применять на длинных линиях дорогостоящие волокна, да и потребности в передаче по океанским кабелям сверхскоростных потоков тоже особой не было.

Впервые ИТУ-T подготовил Рекомендацию G.654 поэтому типу ООВ еще в 1988 г. Тогда она называлась «Характеристики одномодового оптического волокна и кабеля с затуханием, минимизированным на длине волны 1550 нм».

Еще одной особенностью волокон G.654 является смещение длины волны отсечки поближе к несущей 1550 нм, а именно на значении 1530 нм (рис. 6.39). Это обеспечивает более благоприятный электродинамический режим, при котором наибольшая часть передаваемой энергии сосредотачивается в сверхчистой кварцевой сердцевине. Во всяком случае, с 2000 г. в названии Рекомендации G.654 вместо минимизации затухания стала фигурировать *смещенная длина волны отсечки (CSF)*.

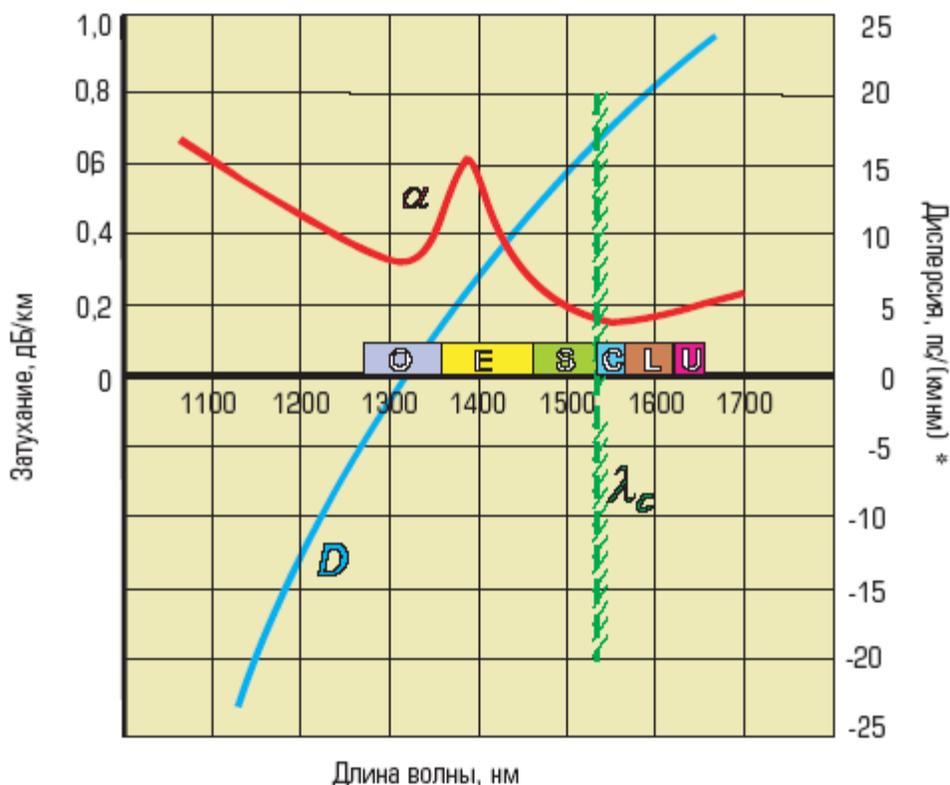


Рис. 6.39. Спектральные зависимости коэффициента затухания и коэффициента хроматической дисперсии ООВ типа G.654

С началом внедрения систем со спектральным уплотнением оказалось, что волокна G.654 достаточно легко позволяют модернизировать системы с одной несущей до систем с WDM. Ведь в диапазоне 1550 нм они имеют достаточно большую дисперсию при малом наклоне кривой, и не очень опасаются нелинейных эффектов. Тем не менее, хроматическая дисперсия в ОК на таких волокнах великовата для передачи без ее компенсации потоков 10 Гбит/с и выше на отдельных несущих. Еще одним ограничением является невозможность использования в системах WDM на волокнах G.654 спектральных диапазонов **O**, **E** и **S** из-за слишком большой длины волны отсечки.

В настоящее время рассматриваемые ООВ достаточно активно используются в океанских и морских (реже — протяженных наземных) ВОЛС, как с оптическими усилителями и регенераторами, так и без них, как с системами WDM (при небольшом количестве несущих), так и без них. Возможно, в перспективе для расширения возможностей WDM с волокнами этого типа будет задействован диапазон U.

Последняя редакция Рекомендации G.654 (2006 г.) содержит параметры и характеристики трех различных типов одномодовых ОВ (табл. 6.6).

Таблица 6.6. Параметры (характеристики) ООВ типа G.654

Параметр (характеристика)	Тип волокна, в соответствии с Рекомендациями ITU-T		
	G.654A	G.654B	G.654C
Диаметр модового пятна, нм (на длине волны 1310 нм)	9,5...10,5 ± 0,7	9,5...13,0 ± 0,7	9,5...10,5 ± 0,7
Диаметр оболочки, мкм	125 ± 1	125 ± 1	125 ± 1
Максимальный эксцентриситет сердцевины/оболочки, мкм	0,8	0,8	0,6
Максимальная некруглость оболочки, %	2,0	2,0	2,0
Максимальная длина волны среза ОВ в кабеле, мкм	1530	1530	1530
Максимальные потери на макроизгибе (100 витков радиусом 30 мм), дБ (на длине волны 1625 нм)	0,5	0,5	0,5
Минимальное проверочное напряжение на разрыв, ГПа	0,69	0,69	0,69
Максимальный коэффициент хроматической дисперсии, пс/(нм км), в районе длины волны 1550 нм	20	22	20
Наклон хроматической дисперсии вблизи нуле- вого значения, пс/(нм ² км)	0,07	0,07	0,07
Максимальный коэффициент затухания, дБ/км (в районе длины волны 1550 нм)	0,22	0,22	0,22
Максимальный коэффициент PMD, пс/км ^{1/2}	0,50	0,20	0,20

Современные одномодовые ОВ со смещенной длиной волны отсечки обычно имеют на длине волны 1550 нм коэффициент хроматической дисперсии порядка 18...20 пс/(нм·км) и коэффициент затухания 0,16...0,18 дБ/км.

Волокна G.654A находят применение, в первую очередь, в подводных ОК для передачи по морским и трансокеанским линиям потоков до STM-16 (2,5 Гбит/с) или до STM-64 (10 Гбит/с) с ограничением длины из-за хроматической дисперсии. Также они могут применяться в системах с WDM в диапазонах **C** и **L**.

Волокна G.654B имеют параметры, а, соответственно, и возможности применения, сходные с G.654A. Однако больший диаметр модового поля предполагает большие возможности использования их совместно с подводными оптическими усилителями. Кроме того, более жесткие требования к поляризационной дисперсии позволяют использовать эти волокна для передачи потоков STM-64 (10 Гбит/с) или STM-256 (40 Гбит/с) и на значительные расстояния, при условии компенсации хроматической дисперсии.

Волокна G.654C аналогичны виду G.654A, однако благодаря жестким требованиям к поляризационной дисперсии расширяют возможности своего использования для передачи потоков с большей скоростью (до 40 Гбит/с) и на большие расстояния, при условии компенсации хроматической дисперсии.

Волокна G.655. Появление этого специфического типа одномодовых волокон в 1990-х годах непосредственно связано с развитием систем спектрального мультиплексирования. Использование нескольких несущих и, соответственно, увеличение плотности мощности в сердцевине волокна привело к проявлению при передаче нескольких нелинейных эффектов (четырёхволновое смешение, перекрестная фазовая модуляция, рассеяние Рамана, рассеяние Бриллюэна и др.). Самое заметное их воздействие возникает в ООВ при значениях дисперсии, близких к нулю. Поэтому были разработаны оптические волокна, оптимизированные для работы в «окне прозрачности» 1550 нм в системах с WDM. На этой длине волны такие волокна имеют небольшую (для поддержки высокоскоростных приложений), но отличную от нуля хроматическую дисперсию. Причем знак коэффициента хроматической дисперсии не имеет особого значения (рис. 6.40).

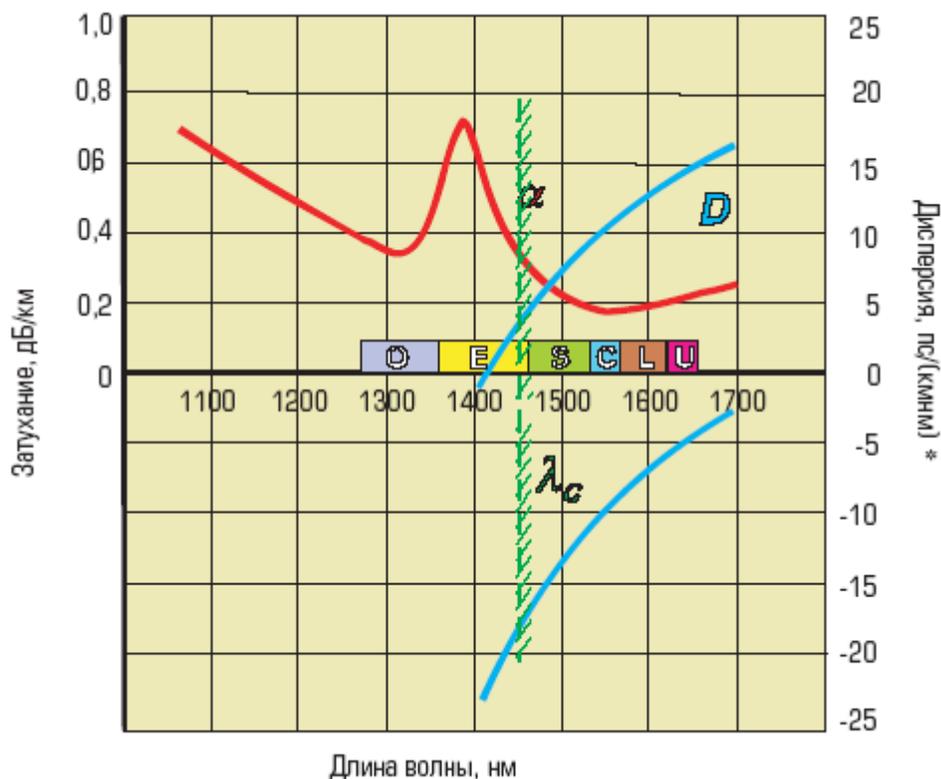


Рис. 6.40. Спектральные зависимости коэффициента затухания и коэффициента хроматической дисперсии ООВ типа G.655

Реализовать конструкцию такого волокна — задача достаточно непростая. Используются сложные профили показателя преломления (треугольный на «пьедестале» с депрессированной оболочкой и др.). Сейчас лишь несколько ведущих производителей в мире стабильно выпускает *волокна с ненулевой смещенной дисперсией (NZDSF)*. Поэтому высокой остается и их стоимость. Однако возможность организации работы нескольких несущих по одному ООВ достаточно быстро окупает такие затраты.

В 1996 г. ITU-T впервые стандартизировал этот тип ОВ. К 2000 г. в пределах Рекомендации были выделены три различных вида волокон G.655 — G.655A, G.655B, G.655C, — отличающиеся коэффициентом хроматической дисперсии (от 1 до 6 пс/(нм·км) и до 10 пс/(нм·км)) и коэффициентом поляризационной дисперсии. Последняя версия Рекомендации G.655 определяет еще два вида волокон — G.655D и G.655E, которые имеют стандартную хроматическую дисперсию также в диапазонах S и L (табл. 6.7).

Таблица 6.7. Параметры (характеристики) ООВ типа G.655.

Параметр (характеристика)	Тип волокна, в соответствии с Рекомендацией ITU-T				
	G.655A	G.655B	G.655C	G.655D	G.655E
Диаметр модового пятна, нм (на длине волны 1310 нм)	8,0...11,0 ± 0,7	8,0...11,0 ± 0,7	8,0...11,0 ± 0,7	8,0...11,0 ± 0,6	8,0...11,0 ± 0,6
Диаметр оболочки, нм	125 ± 1	125 ± 1	125 ± 1	125 ± 1	125 ± 1
Максимальный эксцентриситет сердцевинной оболочки, нм	0,8	0,8	0,8	0,6	0,6
Максимальная некрутость оболочки, %	2,0	2,0	2,0	1,0	1,0
Максимальная длина волны среза ОВ в кабеле, нм	1450	1450	1450	1450	1450
Максимальные потери на изгиб (100 витков радиусом 30 мм), дБ, на длине волны 1625 нм	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Минимальное проверочное напряжение на разрыв, МПа	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69
Максимальный коэффициент хроматической дисперсии, пс/(нм·км), в диапазоне длин волн: 1530...1565 нм	+/- (0,1...6)	+/- (1...10) $D_{1530} - D_{1565} \leq 5$	+/- (1...10) $D_{1530} - D_{1565} \leq 5$		
1460...1550 нм 1550...1625 нм				- 4,2...+ 6,2 + 2,8...+11,3	+ 0,2...+ 5,8 + 4,7...+13,4
Максимальный коэффициент затухания, дБ/км, в диапазоне длин волн: 1550 нм 1625 нм	0,35 0,4	0,35 0,4	0,35 0,4	0,35 0,4	0,35 0,4
Максимальный коэффициент PMD, пс/км ^{1/2}	0,20	0,50	0,20	0,20	0,20

В последнее десятилетие тип волокна с ненулевой смещенной дисперсией очень активно используется в ОК при построении транспортных сетей различных уровней с системами спектрального уплотнения. Волокна NZDSF лучше всего подходят для работы систем плотного волнового мультиплексирования (DWDM) в диапазоне С (1530–1565 нм) с оптическими усилителями. Есть потенциал для увеличения числа несущих DWDM за счет диапазонов S и L, а также для работы систем CWDM во всем диапазоне 1460–1625 нм.

Практически все новые кабельные линии имеют в своем составе хотя бы несколько волокон типа G.655 для будущего развития.

Современные одномодовые ОВ имеют обычно в диапазоне С положительный или отрицательный коэффициент хроматической дисперсии порядка 1...10 пс/(нм·км), а также коэффициент затухания порядка 0,2...0,25 дБ/км (на 1550 нм).

Рассмотрим отличия в применении волокон G.655 различных видов.

Волокна G.655A рекомендуется применять на транспортных сетях связи в системах с WDM STM-64 (10 Гбит/с) и STM-256 (40 Гбит/с) при ограниченной вводимой мощности (небольшом числе несущих) и канальном интервале 200 ГГц в диапазоне длин волн 1530–1564 нм (С).

Волокна G.655B также можно применять на транспортных сетях связи в системах с WDM. Но из-за более высокой поляризационной дисперсии предельным считается их использование для передачи потоков STM-64 (10 Гбит/с) на расстояние до 400 км. При этом допускается большая вводимая мощность, чем для G.655A, и более плотное расположение оптических несущих (канальный интервал — 100 ГГц) в диапазоне длин волн 1530–1564 нм (С).

Волокна G.655C аналогичны виду G.655B, однако за счет уменьшенной поляризационной дисперсии могут применяться для передачи потоков STM-64 (10 Гбит/с) на расстояние более 400 км и для работы STM-256 (40 Гбит/с).

Волокна G.655D также можно использовать на транспортных сетях связи в системах с WDM для приложений, указанных для волокон G.655C, но в расширенном диапазоне длин волн: 1460–1625 нм (S–C–L). Кроме того, возможна работа систем CWDM на несущих от 1471 нм и выше.

Волокна G.655E по предназначению сходны с видом G.655D, но более высокие значения коэффициента хроматической дисперсии позволяют их использовать в системах DWDM с наименьшим разнесением каналов.

Волокна G.656. В начале 2000-х годов продолжалось совершенствование систем спектрального мультиплексирования, особенно плотного DWDM. Работы по наращиванию каналов проводили в двух направлениях. С одной стороны, пытались расширить используемый спектральный диапазон (хотя этому мешала неравномерность коэффициентов затухания и хроматической дисперсии на разных длинах волн). А со второй — более плотно расположить оптические несущие (сузить канальный интервал). Препятствовало тому несовершенство активных (лазеров) и пассивных (фильтров, мультиплексоров/демультиплексоров и т. п.) компонентов. Тем не менее, постоянный прогресс технологий обусловил необходимость разработки одномодовых волокон, максимально оптимизированных именно для работ систем DWDM с самыми узкими канальными интервалами (100 ГГц и меньше).

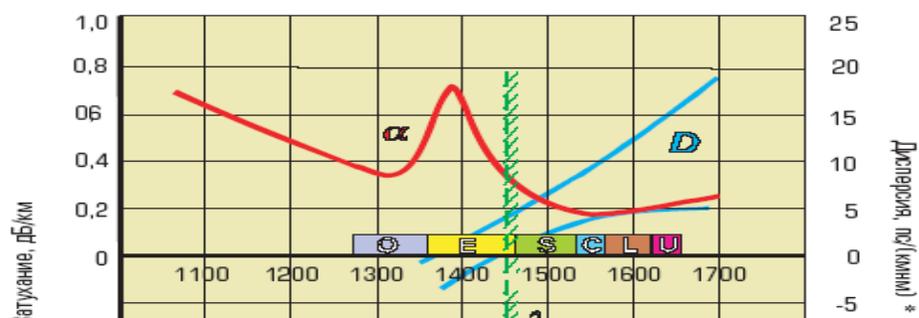


Рис. 6.41. Спектральные зависимости коэффициента затухания и коэффициента хроматической дисперсии ООВ типа G.656

Такие ООВ были созданы и впервые стандартизированы ИТУ-Т в 2004 г. От схожих по параметрам волокон G.655E их отличал несколько меньший диаметр модового поля, большее положительное значение коэффициента хроматической дисперсии на длине волны 1550 нм (рис. 6.41) и наличие спецификации не только дисперсии, но и коэффициента затухания в расширенном диапазоне длин волн 1460–1625 нм (S–C–L).

Несмотря на относительную сложность технологии и поэтому немалую стоимость, *волокна с ненулевой дисперсией для широкополосных транспортных сетей (NZDSF-WTN)* находят свое применение на транспортных сетях различного назначения и протяженности. Выигрыш волокон — в их, можно сказать, «масштабируемости». В значительной части спектра специфицированы основные характеристики, которые позволяют применять их как в CWDM, так и в DWDM, т.е. наращивать пропускную способность сети по необходимости.

Последняя редакция Рекомендации G.656 (2006 г.) содержит всего одну модификацию этого типа ООВ (табл. 6.8.). Вероятна его дальнейшая модификация за счет появления дополнительных видов, возможно с расширением в диапазон E.

Таблица 6.8. Параметры (характеристики) ООВ типа G.656

Параметр (характеристика)	Тип волокна, в соответствии с Рекомендациями ИТУ-Т G.656
Диаметр модового пятна, нм (на длине волны 1310 нм)	7,0...11,0 ± 0,7
Диаметр оболочки, мкм	125 ± 1
Максимальный эксцентриситет сердцевин/оболочки, мкм	0,8
Максимальная некруглость оболочки, %	2,0
Максимальная длина волны среза ОВ в кабеле, мкм	1450
Максимальные потери на макроизгибе (100 витков радиусом 30 мм), дБ, на длине волны 1625 нм	0,5
Минимальное проверочное напряжение на разрыв, ГПа	0,69
Максимальный коэффициент хроматической дисперсии, пс/(нм км), в диапазоне длин волн: 1460...1550 нм 1550...1625 нм	1...9,3
	3,6...14,0
Максимальный коэффициент затухания, дБ/км, в диапазоне длин волн:	

Современные ООВ G.656 в расширенном диапазоне S–C–L обычно имеют положительный коэффициент хроматической дисперсии порядка 1...14 пс/(нм·км), а также коэффициент затухания порядка 0,2...0,25 дБ/км (диапазон C) и 0,25...0,3 дБ/км (в диапазонах S и L).

Волокна G.657. Во второй половине 1990-х, на волне явного успеха «полной волоконизации» всех транспортных сетей, операторы связи в поисках новых рынков обратили свои взоры на сети доступа. Там началось постепенное внедрение оптических технологий. Благодаря исключительной широкополосности и протоколонеависимости стало возможно передавать пользователям сообщения различных видов (голосовые + видео + данные) посредством одной пары волокон. Были продуманы и опробованы различные архитектурные решения и различные степени внедрения волоконной оптики в сети доступа, пиком которых стали сети ФТТН («волокно в квартиру»).

Первоначально в сетях доступа использовали волокна типа G.652. Дополнительные технические требования не выставляли. Отчасти это было связано и с медленными темпами внедрения ФТТН, недостаточно разработанным пакетом предоставляемых «по волокну» услуг.

В последние годы во всем мире стремительно развиваются разнообразные технологии для сетей широкополосного доступа. Естественно, для широкополосных услуг понадобились и широкополосные направляющие системы — одномодовые волокна. Такие сети имели существенные отличия от транспортных и, соответственно, предъявляли иные технические требования к параметрам и характеристикам ООВ. Например, коэффициент затухания и коэффициент поляризационной дисперсии не имели принципиального значения из-за очень малой длины линий (2–3 км), хроматическая дисперсия практически не ограничивала дальность и скорость передачи. С другой стороны, возросла важность параметров, связанных с монтажом и прокладкой кабелей. В частности, из-за большого количества волокон в кабелях и высокой степени интеграции в кроссовом, соединительном и распределительном оборудовании весьма существенно повысились потери на изгибах (2–3 дБ и более).

После появления первых разработок в 2006 г. ИТУ-Т впервые стандартизировал ООВ, малочувствительное к потерям на макроизгибах, специально для использования в сетях доступа. Рекомендация G.657 содержит параметры и характеристики двух типов ООВ, несколько отличающихся по свойствам (табл. 6.9).

Таблица 6.9. Параметры (характеристики) ООВ типа G.657

Параметр (характеристика)	Тип волокна, в соответствии с Рекомендациями ITU-T	
	G.657A	G.657B
Диаметр модового пятна, нм (на длине волны 1550 нм)	8,6...9,5 ± 0,4	6,3...9,5 ± 0,4
Диаметр оболочки, мкм	125 ±0,7	125 ±0,7
Максимальный эксцентриситет сердцевин/оболочки, мкм	0,5	0,5
Максимальная некруглость оболочки, %	1,0	1,0
Максимальная длина волны среза ОВ в кабеле, мкм	1260	1260
Максимальные потери на макроизгибе, дБ, 10 витков радиусом 15 мм на длине волны: 1550 нм 1625 нм 1 виток радиусом 10 мм, на длине волны: 1550 нм 1625 нм 1 виток радиусом 7,5 мм, на длине волны: 1550 нм 1625 нм	0,25 1,0 0,75 1,5 – –	0,03 0,1 0,1 0,2 0,5 1,0
Минимальное проверочное напряжение на разрыв, ГПа	0,69	0,69
Длина волны нулевой дисперсии, мкм	1300...1324	1300...1420
Наклон кривой хроматической дисперсии вблизи нулевого значения, пс/(нм ² •км)	0,092	0,1
Максимальный коэффициент затухания, дБ/км, в диапазоне длин волн: 1310 нм 1300...1625 нм 1383 нм 1550 нм 1625 нм	– 0,4 0,4 0,3 –	0,5 – – 0,3 0,4
Максимальный коэффициент PMD, пс/км ^{1/2}	0,20	–

Вид G.657A обеспечивает минимальный радиус изгиба 10 мм. Другие его параметры в значительной степени напоминают тип G.652D со сглаженным водным пиком (рис. 6.42). Это дает возможность, в частности, уменьшить потери при соединении волокон типов G.657 и G.652.

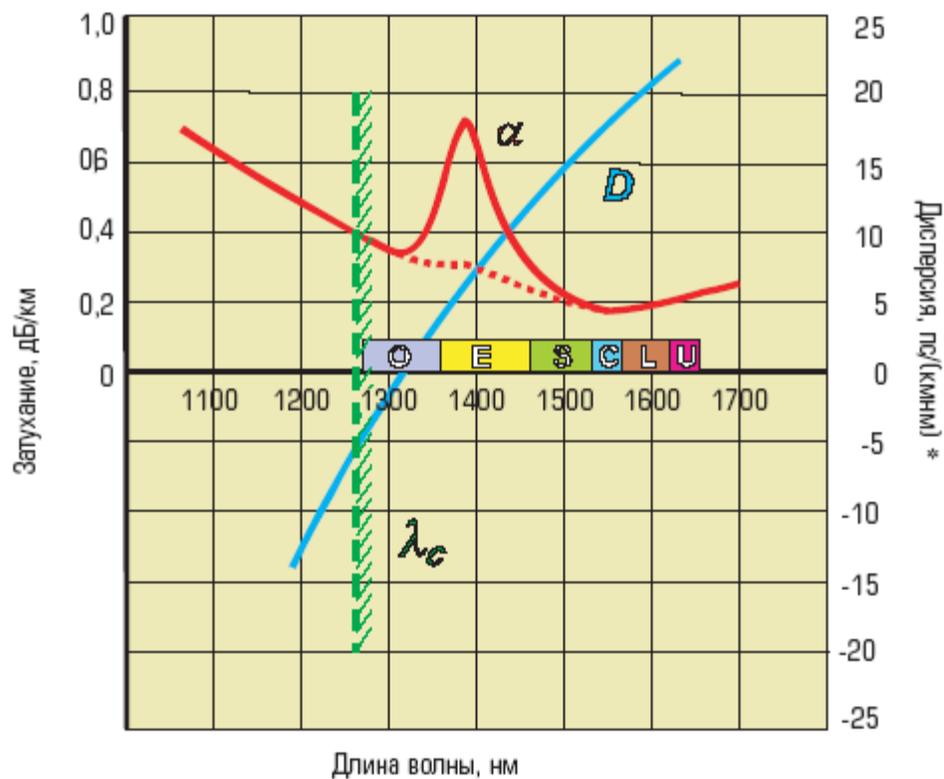


Рис. 6.42. Спектральные зависимости коэффициента затухания и коэффициента хроматической дисперсии ООВ типа G.657

Второй вид (G.657B) хоть и позволяет уменьшить минимальный радиус изгиба до 7,5 мм, но не совместим со стандартным одномодовым волокном типа G.652. Это принципиально важно для прокладки оптических кабелей с маленькими радиусами изгибов при плотном размещении их в кроссовом оборудовании (практически как для медных кабелей).

Однако технология производства таких ООВ достаточно сложна. В этом случае создаются волокна с уменьшенным диаметром или повышенным показателем преломления сердцевинки. Выпускаются также волокна с сильно пониженным показателем преломления оболочки за счет легирования фтором. В обоих случаях создаются условия для сосредоточения поля моды в сердцевине ООВ даже при изгибах.

Сейчас продолжаются работы по созданию принципиально новых конструкций, сочетающих малые потери на изгибах и совместимость с традиционными видами одномодовых волокон.

Волокна G.657A предназначены для использования с различными приложениями на сетях доступа. Они оптимизированы по потерям на макроизгибе, а значения других параметров остаются в диапазоне, рекомендованном для G.652D.

Волокна G.657B имеют параметры, необходимые для установки оптимизированной сети доступа с очень малыми радиусами изгиба, применяемыми в различных кроссовых и распределительных устройствах, а также при прокладке в пределах помещений. В тоже время, значения диаметра модового пятна и коэффициента хроматической дисперсии могут превышать значения, рекомендованные для G.652D.

Линейно-кабельные сооружения зачастую являются самой дорогостоящей частью проекта. Из-за своей протяженности они в значительной степени определяют качество принимаемого сигнала. От них, в конечном счете, зависит экономическая и техническая эффективность проекта. Поэтому очень важен оптимальный подбор параметров кабельных линий, максимально точное «попадание в цель», в зависимости от дальности связи, планируемой скорости передачи, рабочей длины волны, возможности дальнейшего развития сети и т.д.

Рассмотренные выше ООВ практически при любой постановке задачи смогут обеспечить технико-экономическую эффективность проекта, если правильно выбрать их тип и вид. Причем, кроме основных параметров передачи ООВ, коэффициента затухания и коэффициента хроматической дисперсии, в последнее время решающую роль стали играть коэффициент поляризационной дисперсии, потери на изгибах и геометрические параметры, определяющие потери при монтаже. Это обусловлено все более специфическими, конкретными условиями применения оптических кабелей. Варианты применения оптических волокон в зависимости от диапазона длины волны приведены в табл. 6.10.

Таблица 6.10. Варианты применения оптических волокон в зависимости от диапазона длинны волны

Обозначение	Диапазон длин волн, нм	Возможный выбор типа волокна в соответствии с Рекомендациями ИТУ-Т
O - original	1260-1360	G.652, G.652C
E - extended	1360-1460	G.652, G.652C
S - short	1460-1530	G.652, G.652C, G.654, G.655
C - conventional	1530-1565	G.652, G.652C, G.654, G.655
L - long	1565-1625	G.652, G.652C, G.654, G.655
U - ultralong	1625-1675	В стадии рассмотрения

За последние 8 лет число типов одномодовых волокон и их модификаций, стандартизированных ИТУ-Т, резко возросло. Это связано с новыми потребностями рынка телекоммуникаций, новыми научными разработками, совершенствованием технологий производства, а также желанием стандартизированных организаций и подразделений наиболее полно отвечать в своей работе уровню развития техники волоконно-оптической связи. Этот процесс продолжается — каждые два-три года изменяются действующие рекомендации ИТУ-Т и стандарты ИЕС, появляются новые документы. Наверняка в скором времени будут стандартизированы волокна для систем WDM, работающие в расширенном диапазоне 1360–1460 нм, специфические волокна для использования в локальных сетях, микроструктурированные волокна, волокна с фотонной запрещенной зоной, волокна с устойчивой поляризацией и другие

Поэтому современным проектным организациям необходимо постоянно отслеживать ситуацию со стандартами и пытаться использовать в своих проектах самые современные решения.

Вопросы для самоконтроля.

1. Какое назначение имеют разъемные оптические соединители?
2. Где применяются разъемные соединители?
3. Какое назначение аттенуаторов ВОСП?
4. Какие функции выполняют оптические разветвители?
5. Как устроен и работает оптический вентиль?
6. Что общего между оптическими фильтрами, мультиплексорами и демультимплексорами?
7. Для чего применяются оптические циркуляторы?
8. Что обеспечивают компенсаторы дисперсии?
9. Почему дифракционная решетка может быть использована для компенсации дисперсии?
10. Когда требуется преобразование длины волны излучения?
11. Какие типы оптических волокон используются в системах передачи со спектральным уплотнением?
12. Как классифицируются ООВ?
13. Что такое хроматическая дисперсия?
14. Как влияет хроматическая дисперсия на передачу информационных сигналов?

7. Активные компоненты WDM

7.1 Оптические усилители

Основными ограничивающими факторами в волоконно-оптических системах передачи являются затухание, дисперсия и нелинейные оптические эффекты. Оптические усилители, которые компенсируют потери оптической мощности, возникающие в оптических волокнах, соединителях, пассивных разветвителях и т. д.

Усиление света в оптических системах осуществляется за счет энергии внешнего источника. Основой усилителя является активная физическая среда, в которой благодаря энергетической подкачке увеличивается мощность излучения. В качестве активной среды применяются полупроводники и оптические волокна с различными примесями, например, редкоземельными эрбием (Er), неодимом (Nd), празеодимом (Pr), тулием (Tm). Накачка этих сред осуществляется непрерывно или импульсно. При усилении может происходить преобразование спектра входного сигнала, т.е. выходной сигнал может быть смещен по частоте.

К усилителям, которые используются в оптических системах передачи, предъявляется ряд требований:

- высокий коэффициент усиления в заданном диапазоне оптических частот;
- малые собственные шумы;
- нечувствительность к поляризации;
- хорошее согласование с волоконно-оптическими линиями;
- минимальные нелинейные и линейные искажения оптических сигналов;

- большой динамический диапазон входных сигналов;
- требуемое усиление многочастотных (многоволновых) оптических сигналов;
- длительный срок службы;
- минимальная стоимость и т.д.

Этим требованиям в наибольшей степени отвечают волоконные и нелинейные усилители, настроенные на окна прозрачности оптического волокна.

Волоконно-оптические усилители применяются в качестве усилителей мощности, совмещаемых с оптическими передатчиками, в качестве предусилителей перед фотоприемниками и в качестве промежуточных линейных усилителей в линейных трактах оптических систем передачи.

Принципиально устройства усиления оптических сигналов можно разделить на несколько категорий.

Усилители на основе оптических волокон, использующих рассеяние Мандельштама-Брилюена. Стимулированное рассеяние Мандельштама-Брилюена – нелинейное явление, при котором энергия оптической волны (на частоте f_1) переходит в энергию другой волны (на частоте f_2). При накачке такой усилитель способен усиливать сигнал на частоте f_2 . Явление рассеивания Мандельштама-Брилюена возникает при мощности накачки порядка 10 мВт. Уровень пороговой мощности, при котором возникает рассеяние Мандельштама-Брилюена, прямо пропорционально ширине спектральной линии лазера накачки, эффективной площади сердцевины волоконного световода и обратно пропорционально длине волокна.

Полупроводниковые оптические усилители. Полупроводниковым оптическим усилителем называется такой усилитель, оптически активным веществом в котором служит полупроводниковый материал, а энергия накачки – электрическая. Полупроводниковые оптические усилители используют стимулированную эмиссию фотонов, которая возникает в результате взаимодействия фотонов передаваемого сигнала и излучаемой рекомбинации носителей заряда в полупроводнике. К преимуществам полупроводниковых оптических усилителей можно отнести непосредственное преобразование электрической энергии накачки в энергию светового сигнала и отсутствие необходимости применения мультиплексора (селективного разветвителя). Эти усилители имеют небольшие размеры (рис.7.1), что значительно облегчает их использование с оптическими компонентами системы.

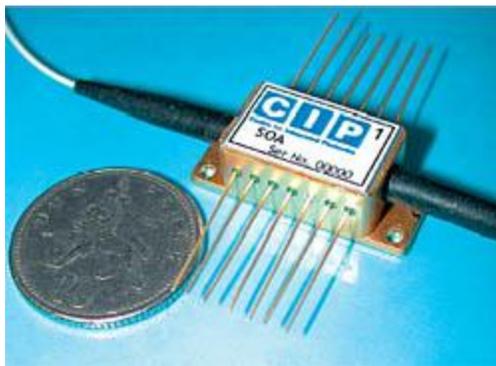


Рис. 7.1. Внешний вид полупроводникового оптического усилителя

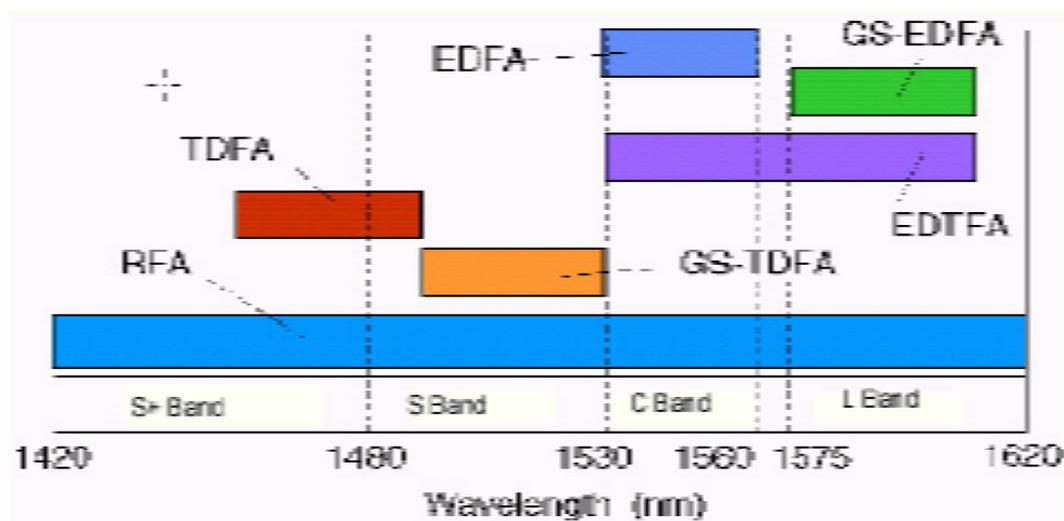
Такой тип оптических усилителей является достаточно перспективным, поскольку позволяет функционировать широкополосным системам, например WDM (Wavelength Division Multiplexing), с возможностью независимой передачи информации по одному оптическому волокну на различных длинах волн (охватывая диапазоны O E S C L одновременно).

Параметрические оптические усилители. Оптические усилители, называемые параметрическими, используют эффект четырехволнового смешения. Такие усилители требуют значительной мощности накачки (порядка 30..70 Вт) и обладают большим коэффициентом усиления – около 50 дБ. Однако их реализация достаточно сложна, что сдерживает распространение этих усилителей.

Оптические усилители на основе легированных волокон. Основой для оптических усилителей этого семейства служат оптические волокна, легированные примесями некоторых редкоземельных элементов, относящихся к группе лантанидов (с 57-го по 71-й элемент в периодической таблице Менделеева). Как правило, для окна прозрачности в диапазоне 1300 нм это неодим (Nd) и празеодим (Pr), а для окна прозрачности в диапазоне 1500 нм – эрбий (Er) и итербий (Yb). С учетом того, что современные системы передачи работают в диапазонах L и C, большее распространение приобрели усилители на основе оптических волокон, легированных ионами эрбия Er³⁺ (Erbium Doped Fiber Amplifier – EDFA). Такие усилители благодаря использованию оптических волокон со смещенной дисперсией позволили увеличить длину регенераторного участка до 400 км и более.

Усилители на основе оптических волокон, использующих комбинационное рассеяние Рамана. Такие усилители используют нелинейное явление, связанное со стимулированным Рамановским рассеянием. Рамановское рассеяние названо в честь индийского физика Рамана, открывшего этот эффект в 1928 году. Принцип действия усилителя заключается в том, что частица энергии распространяющегося в волокне излучения с частотой f_1 возбуждает молекулы вещества, вызывая появление компонента светового потока с частотой f_2 (антистоксовый компонент, где f_2 меньше f_1). Если на этой частоте передавать полезный сигнал, а мощность накачивания на частоте f_2 достаточно велика, энергия сигнала с частотой f_1 переходит к сигнальному потоку, то есть оптическое волокно играет роль распределенного усилителя с коэффициентом усиления, пропорциональным мощности сигнала.

Таким образом, принцип действия Рамановских усилителей идентичен принципу действия усилителей с рассеиванием Мандельштама-Бриллюена, однако смещение между частотой полезного сигнала, который усиливается, и частотой волны накачки – больше. Полоса пропускания усилителя также более широкая, что позволяет усиливать сразу несколько каналов системы. Явление рассеивания Рамана возникает при мощности накачки порядка 0,5..1,4 Вт в зависимости от длины оптического волокна.



- EDFA – эрбиевый оптический усилитель для диапазона C (1530-1565 нм) (Erbium-doped fiber amplifier); GS-EDFA – эрбиевый оптический усилитель для диапазона L (1570-1610 нм) (Gain-shifted - EDFA); EDTFA - оптический усилитель на основе волокна, легированном теллурием для диапазонов C и L (1530 – 1610 нм) (Tellurium-based gain-shifted TDFA);
- GS-TDFA – оптический усилитель на фторидных оптических волокнах, легированных тулнием для диапазона S (1490-1530 нм) (Gain-shifted thulium-doped fiber amplifier);
- TDFA - оптический усилитель на фторидных оптических волокнах, легированных тулнием для диапазона S (1450-1490 нм) (Thulium-doped fluoride-based fiber amplifier);
- RFA – оптические усилители на основе оптических волокон, использующих комбинационное рассеяние Рамана для диапазона S, C и L (1420-1620 нм) (Raman fiber amplifier).

Рис. 7.2. Рабочие диапазоны различных типов усилителей

Однако в современных оптических коммуникационных системах наибольшее распространение получили усилители на оптических волокнах, легированных эрбием (Erbium-Doped Fiber Amplifiers – EDFA), и на основе эффекта Рамана, или, как часто он называется в отечественной литературе, комбинационного рассеяния света. Рассмотрим принцип их работы подробнее.

Рабочие диапазоны различных типов усилителей показаны на рис. 7.2.

7.1.1 Эрбиевые волоконно оптические усилители (EDFA)

Усилители на волокне, легированном эрбием EDFA (ErbiumDoped 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 (рис. 7.3). Именно благодаря появлению усилителей с таким сочетанием качеств линии связи и сети на основе систем DWDM стали экономически привлекательными.



Рис. 7.3. Зависимость коэффициента усиления EDFA от длины волны

Усилитель EDFA состоит из отрезка волокна, легированного эрбием (рис. 7.4). 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.

Редкоземельный элемент эрбий добавляют в незначительных количествах в отрезок волокна (обычно длиной несколько метров) центральной кремниевой жилы. Во время прохождения по нему ослабленного сигнала лазером накачки вводится световой пучок с несколько меньшей длиной волны, что препятствует их интерференции. Обычно для накачки используют лазерный диод, излучающий на длине 1480 нм. В результате взаимодействия с квантами светового пучка накачки электроны в ионах эрбия переходят на более высокий квазистационарный энергетический уровень. При прохождении по такому отрезку сигнала с длиной волны, соответствующей окну прозрачности волокна (1550 нм), возникает индуцированное излучение с равной или очень близкой длиной волны. Обычно усиление достигается в диапазоне длин волн 1530–1640 нм.

Активной средой усилителя является одномодовое волокно, сердцевина которого легируется примесями редкоземельных элементов с целью создания трехуровневой атомной системы, рис. 7.5. Лазер накачки возбуждает электронную подсистему примесных атомов. В результате чего электроны с основного состояния (уровень А) переходят в возбужденное состояние (уровень В). Далее происходит релаксация электронов с уровня В на промежуточный уровень С. Когда заселенность уровня С становится достаточно высокой, так что образуется инверсная заселенность уровней А и С, то такая система способна индуцировано усиливать входной оптический сигнал в определенном диапазоне длин волн. Если же входной сигнал нулевой, то происходит спонтанное излучение возбужденных атомов примесей, приводящее к шуму.

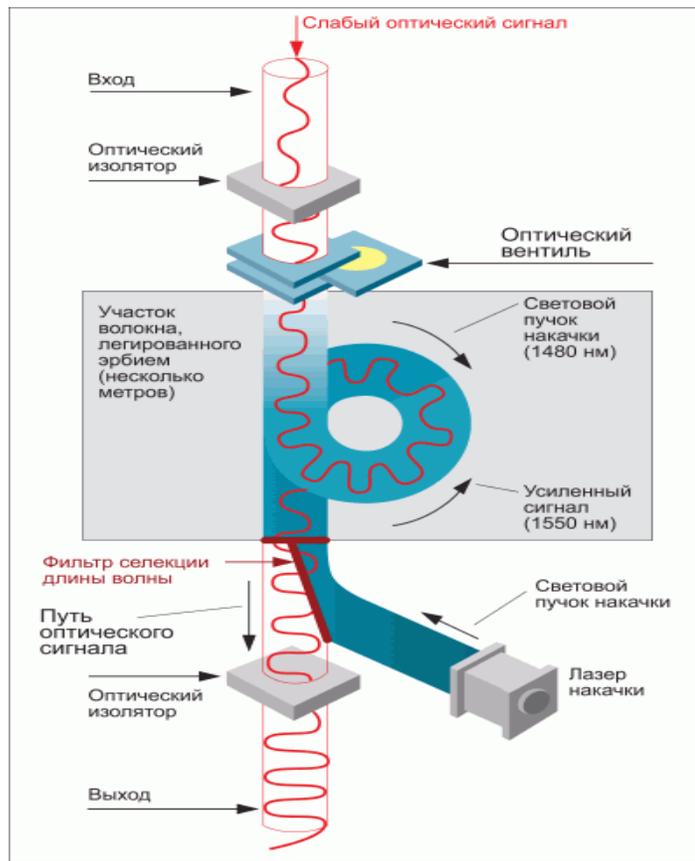


Рис. 7.4. Схема усилителя EDFA

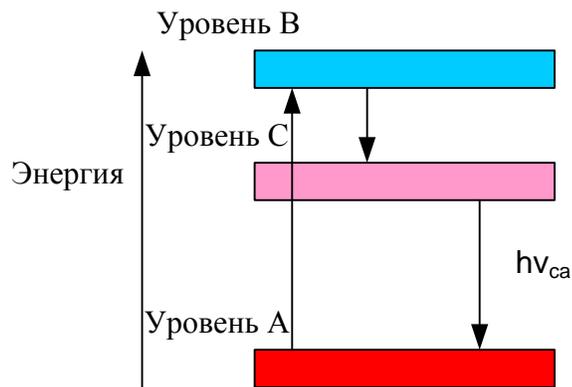


Рис. 7.5. Энергетическая диаграмма уровней атомной системы усилителя на приемном волокне

Особенности работы усилителя во многом зависят от типа примесей и от диапазона длин волн, в пределах которого он должен усиливать сигнал. Наиболее широко распространены усилители, в которых используется кремниевое волокно, легированное эрбием. Такие усилители получили название EDFA. Межатомное взаимодействие является причиной очень важного положительного фактора - уширения уровней, что, в конечном итоге, обеспечивает усилителю широкую зону усиления сигнала. В EDFA наиболее широкая зона усиления от 1530 до 1560 нм, соответствующая переходу $h\nu_{ca}$, достигается при оптимальной длине волны лазера накачки 980 нм.

Усиление в другом окне прозрачности 1300 нм можно реализовать с использованием примесей празеодимия, однако такие оптические усилители не получили большого распространения.

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 АТМ 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. 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).

Лазеры накачки. Важнейший компонент усилителя EDFA - лазер накачки (рис. 7.6). Он является источником энергии, за счет которой усиливается оптический сигнал. Энергия лазера накачки распределяется в усилителе EDFA между всеми оптическими каналами. Чем больше число каналов, тем большая требуется мощность накачки. В усилителях EDFA, рассчитанных на большое количество каналов, часто используется несколько лазеров накачки.

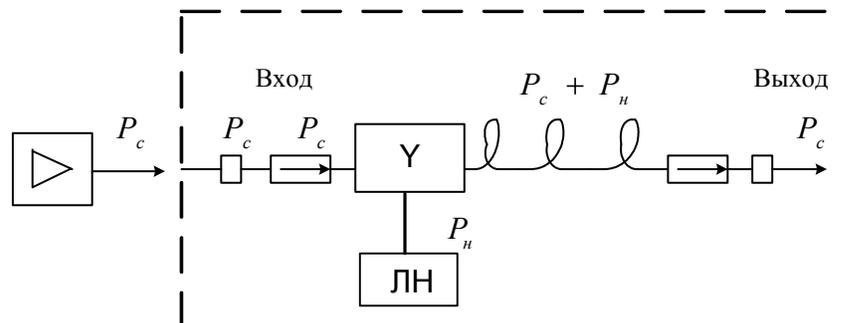


Рис. 7.6. Схема EDFA

Для накачки усилителей EDFA подходят лазеры с длинами волн излучения 980 нм и 1480 нм. Излучение обеих длин волн соответствует уровням энергии возбужденных ионов и хорошо поглощается волокном, легированным эрбием. Однако при выборе того или иного типа лазеров накачки приходится идти на компромисс. С одной стороны, усилители EDFA с лазерами 980 нм обладают более низким коэффициентом шума, чем усилители с лазерами 1480 нм, что лучше для многоканальных систем и предусилителей систем DWDM. С другой стороны, использование лазеров 1480 нм позволяет создать более мощные усилители за меньшую цену. Выбор осложняется тем, что тип лазеров накачки необходимо определить в самом начале проектирования сети, когда еще не известно окончательное число каналов и

достаточно сложно определить, что важнее - высокая мощность усилителя или низкий уровень его шума. В некоторых усилителях EDFA используется накачка на двух длинах волн, что позволяет совместить преимущества обоих способов.

Возможно несколько схем накачки EDFA на длинах волн 1480 нм или 980 нм (рис. 7.7). Прямое: направление накачки (рис. 7.7а) дает наиболее низкий уровень шума. Это предпочтительно при небольшой мощности входного сигнала и максимальных значениях коэффициента усиления (область А, рис. 7.8). При обратном направлении накачки (рис. 7.7б) проще достигается режим насыщения. Это предпочтительно в тех случаях, когда требуется на выходе сигнал максимально возможную мощность (область С, рис. 7.8). В EDFA с одноступенчатой накачкой максимальная мощность выходного сигнала, достигаемая в режиме насыщения (область С), составляет около +16 дБм. В этом режиме усилитель работает - как усилитель мощности (бустер) сразу после лазера передатчика. Бустер повышает мощность сигнала и позволяет максимально увеличить расстояние до первого линейного усилителя.

При совместном применении двух лазеров накачки различных длин волн (рис. 7.7в) рекомендуется осуществлять накачку на 1480 нм в обратном направлении, а накачку на 980 нм - в прямом. Это позволяет наилучшим образом использовать преимущества обоих методов. Лазер накачки 1480 нм обладает более высокой квантовой эффективностью, но при этом и несколько более высоким коэффициентом шума, в то время как для лазера 980 нм можно снизить уровень шумов почти до уровня квантовых флуктуаций.

Коэффициент шума в области сигнала низкой мощности (область А, рис. 7.8.) равен 5-6 дБ. В EDFA с двумя лазерами накачки (980 нм и 1480 нм) достигается более высокая мощность выходного сигнала - до +26 дБм. Чтобы снизить уровень шумов почти до уровня квантовых флуктуации (что необходимо для многих предусилителей) применяют многокаскадную конструкцию (рис. 7.7г): сразу за первым каскадом усиления помещается оптический изолятор (вентиль), который препятствует распространению в обратном направлении усиленной спонтанной эмиссии ASE (Amplified Spontaneous Emission) второго каскада.

Таким образом, усилители EDFA могут использоваться по-разному в зависимости от выбранной области коэффициента усиления (рис. 7.8):

- в режиме наименьшего шума (область А, рис. 7.8) - как предусилитель перед приемником. Предусилитель повышает мощность слабого сигнала в конце линии связи и практически всегда используется вместе с узкополосным фильтром;

- в режиме промежуточных значений усиления и шума (область В, рис. 7.8.) – как линейный усилитель. Он усиливает сигнал, насколько это возможно, внося при этом как можно меньше шума;

- в режиме усилителя мощности (область С, рис. 7.8).

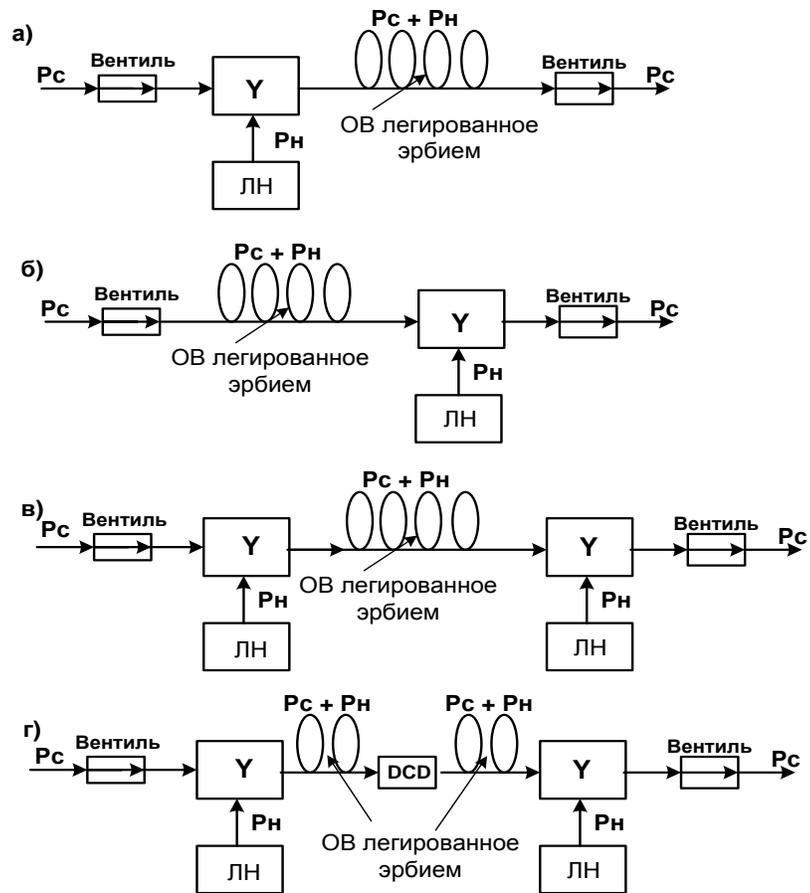


Рис. 7.7. Типовые схемы накачки EDFA (DCD - устройство компенсации дисперсии, dispersion compensation device)

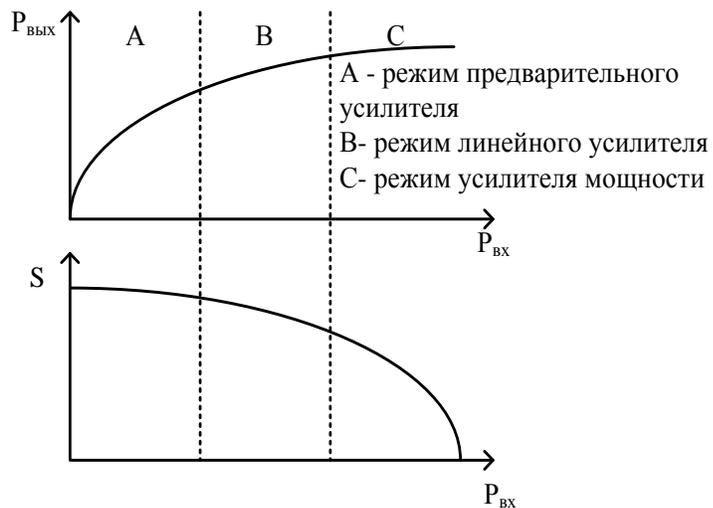


Рис. 7.8. Зависимость коэффициента усиления от мощности входного сигнала и различные режимы работы EDFA

Усиление сигнала в традиционных усилителях на кварцевой основе связано с одной технологической проблемой – нерегулярностью коэффициента усиления как функции длины волны. Спектральное распределение коэффициента усиления для усилителей EDFA на кварцевой основе менее однородное, чем для усилителей на фторидной основе (рис. 7.9).

Усилители EDFA на кварцевой основе раньше появились на рынке и получили более широкое распространение благодаря низкому коэффициенту шума и широкому рабочему диапазону. Усилители EDFA на фторидной основе имеют несколько более широкий рабочий диапазон и намного более равномерное спектральное распределение коэффициента усиления, но при этом обладают и более высоким уровнем шума.

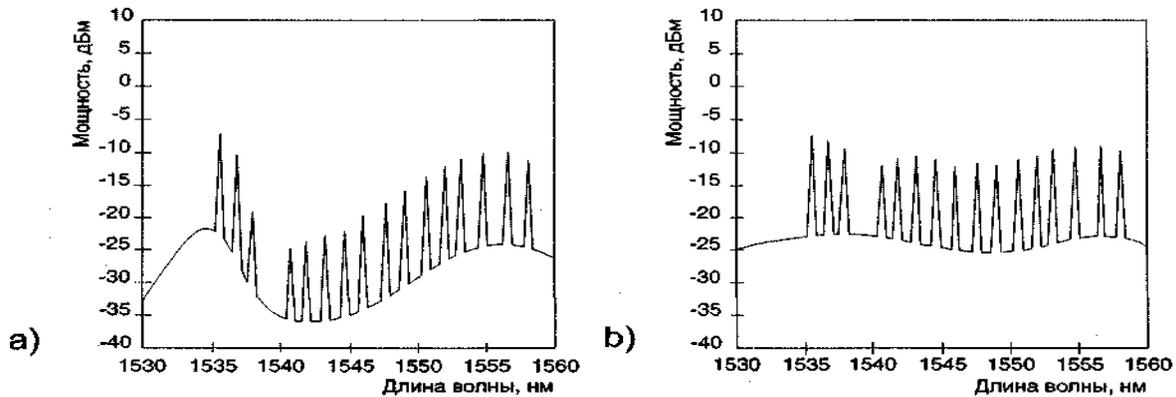


Рис 7.9. Спектральное распределение коэффициента усиления EDFA на кварцевой основе (а), на фторидной основе (б).

Для наглядности некоторые характеристики усилителей изображены на рис. 7.10, 7.11, 7.12. Это зависимости усиления от длины активного волокна, мощности накачки и входного сигнала.

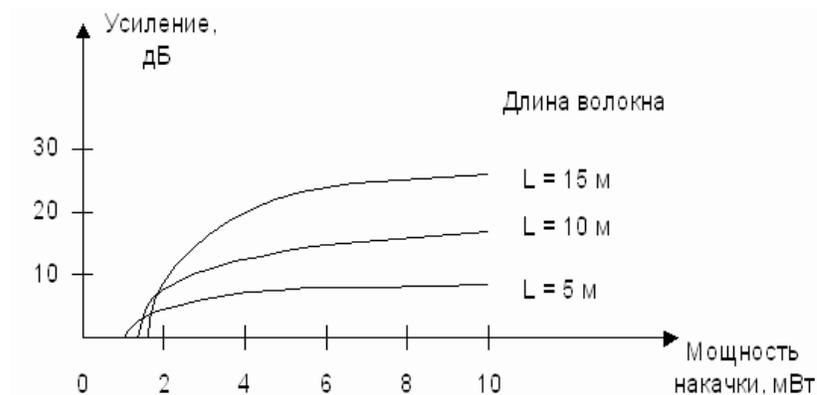


Рис. 7.10. Усиление эрбиевого усилителя в зависимости от длины волокна и мощности накачки

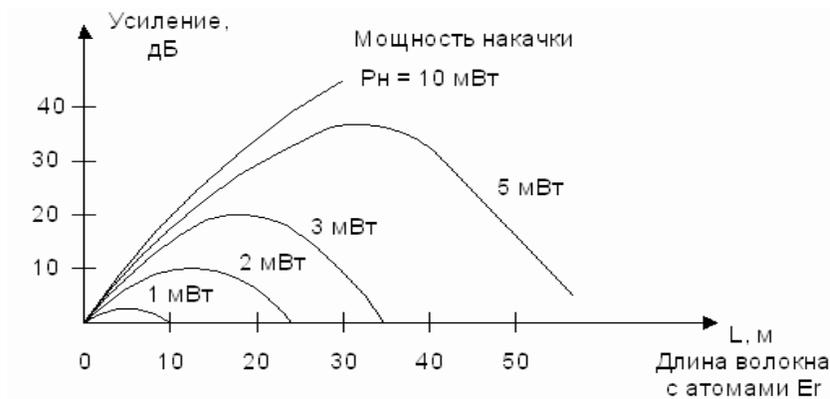


Рис. 7.11. Усиление эрбиевого усилителя в зависимости от длины волокна и мощности накачки

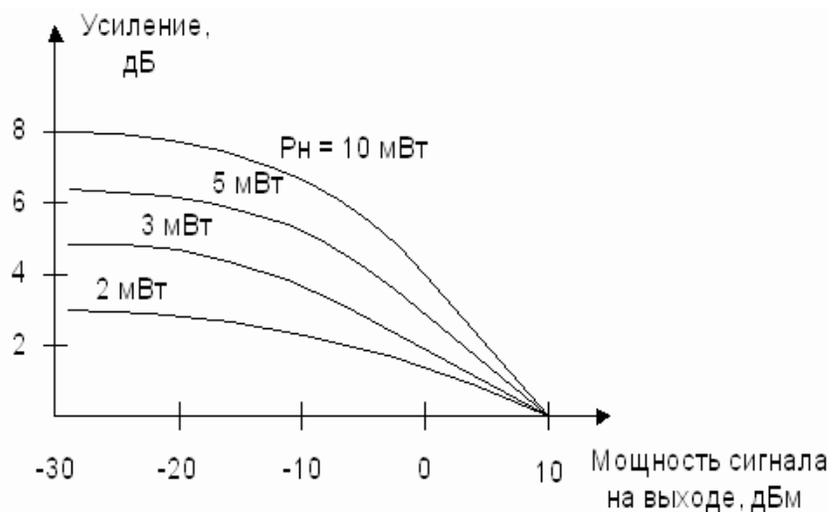


Рис. 7.12. Усиление эрбиевого усилителя в зависимости от выходного сигнала

7.1.2. Усилители на основе ОВ, использующих комбинационное рассеяние Рамана.

Весьма интересный подход к построению оптических усилителей предполагает использование эффекта Рамана в самом оптическом волокне. Рамановское усиление заключается в следующем. При прохождении света подходящей длины волны в кварцевом волокне происходит взаимодействие квантов пучка с атомами (ионами) вещества, в результате чего электроны переходят на возбужденные энергетические уровни. Если через такое волокно пропустить свет с близкой длиной волны, то он вызовет индуцированное излучение. На рис. 7.14 приведена схема переходов при рамановском усилении. Лазер накачки, излучающий на длине волны 1480 нм, переводит электроны на высокоэнергетический квазистационарный уровень. Под действием стимулирующего излучения они переходят на более низкий уровень – колебательный, испуская квант с длиной волны 1580 нм, а затем происходит безызлучательный переход (вернее, с излучением фона) с колебательного уровня в основное состояние.

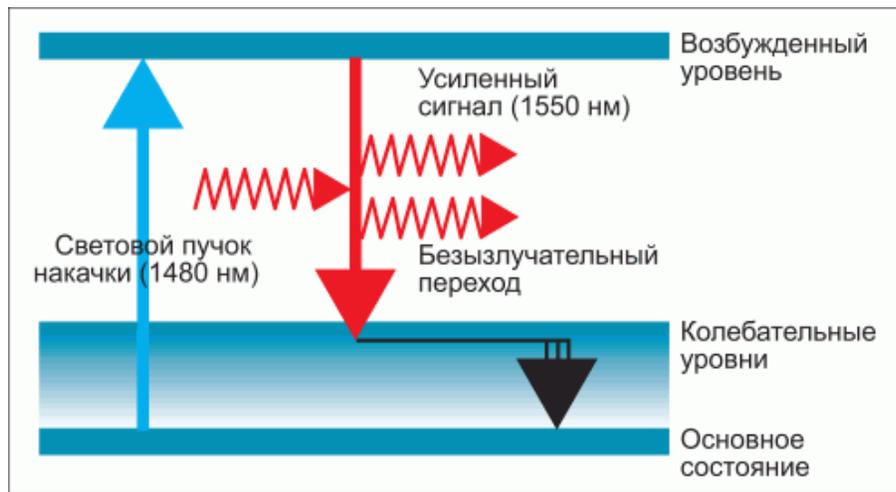


Рис. 7.14. Энергетическая диаграмма уровней атомной системы при рамановском усилении

Поскольку имеется широкий набор колебательных состояний выше основного, то рамановский спектр не привязан к фиксированным энергетическим уровням, как в случае с редкоземельными элементами. Поэтому при достаточно мощном лазере накачки усиление может быть получено на любой длине волны в инфракрасной области. Эта особенность позволяет применять рамановские усилители во всем диапазоне передачи кремниевых оптоволоконных кабелей, что крайне важно для сетей с использованием WDM. Реальные величины коэффициентов усиления рамановских усилителей могут принимать значения от 3...5 дБ до 20...35 дБ в зависимости от примесного состава стекловолокна и мощности накачки. Пример схемы усилителя рамановского типа приведен на рис. 7.15. Особенность схемы - это встречная по отношению к сигналу накачка от мощного лазерного диода (до 1 Вт).

При построении оптоволоконных сетей с рамановскими усилителями перед разработчиками встает вопрос: как направить луч накачки – в прямом или в обратном направлении по отношению к распространению информационного сигнала? Схема обратного распространения луча применяется чаще, так как она обладает рядом преимуществ. Дело в том, что при прямом распространении на сигналы сильное влияние оказывает шум лазера накачки, который обусловлен небольшими флуктуациями его мощности, что почти всегда имеет место. Поскольку рамановский процесс происходит почти мгновенно, то отдельные информационные биты могут усиливаться по-разному, что приводит соответственно к флуктуациям амплитуд. Если же применяется схема обратного распространения, то флуктуации мощности усредняются, так как каждый индивидуальный бит «видит» рамановскую накачку несколько миллисекунд (рис. 7.15).

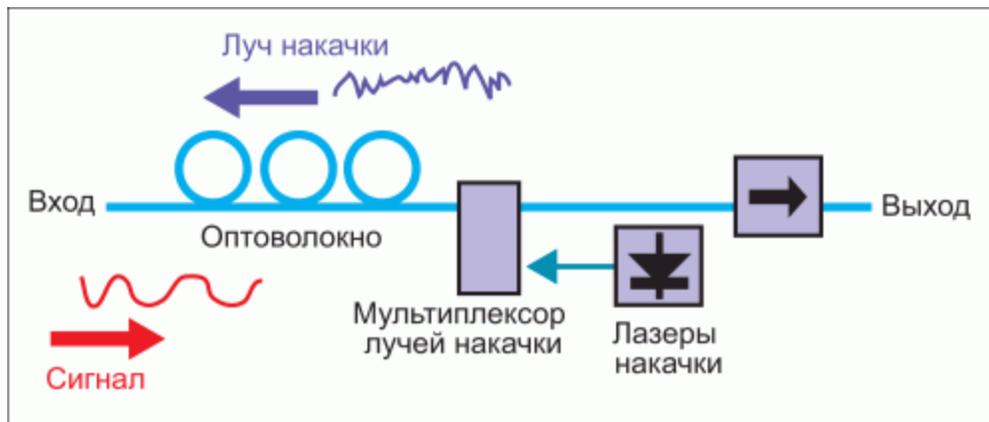


Рис. 7.15. Схема рамановского усилителя

В последнее время все большее распространение получают гибридные оптические усилители на базе EDFA и рамановского эффекта (рис. 7.16). Они помогают добиться необходимого отношения сигнал/шум в системах DWDM и достичь больших расстояний между последовательно устанавливаемыми усилителями. При этом легированный участок накачивается удаленно через передающее оптоволоконно, в котором происходит рамановское усиление. ВОУ могут иметь большую неравномерность амплитудно-частотной характеристики, что неприемлемо для мнговолновых систем передачи (систем с WDM). Известен ряд решений по сглаживанию АЧХ эрбиевых усилителей и расширению их полосы частот усиления, например, применением автоматически перестраиваемых аттенуаторов по каждой волне передачи. На практике возможно использование каскадного включения эрбиевого и рамановского усилителей с дополнительным фильтром-выравнивателем (корректором), которое позволяет увеличить полосу усиления до 100 нм (рисунок 7.17). Такое включение существенно уменьшает величину шума усиленной спонтанной эмиссии ASE.

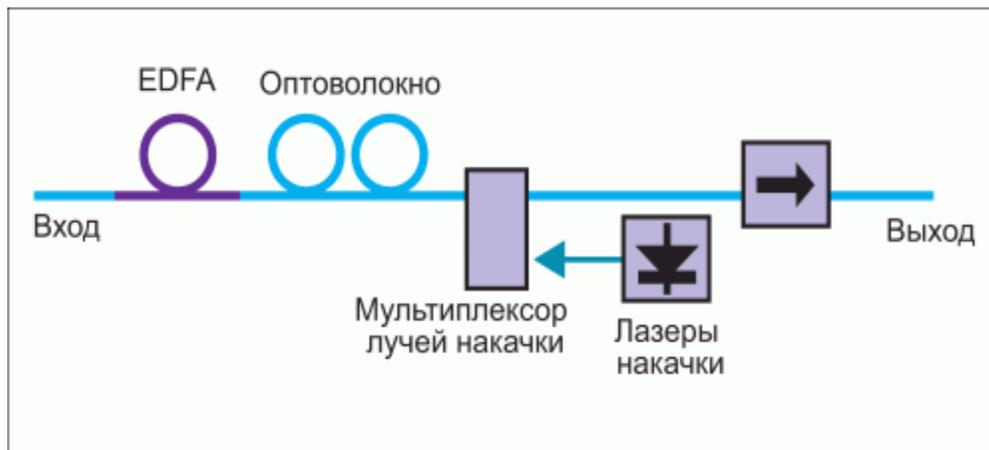


Рис. 7.16. Структурная схема гибридного оптического усилителя с расширением полосы усиливаемых частот

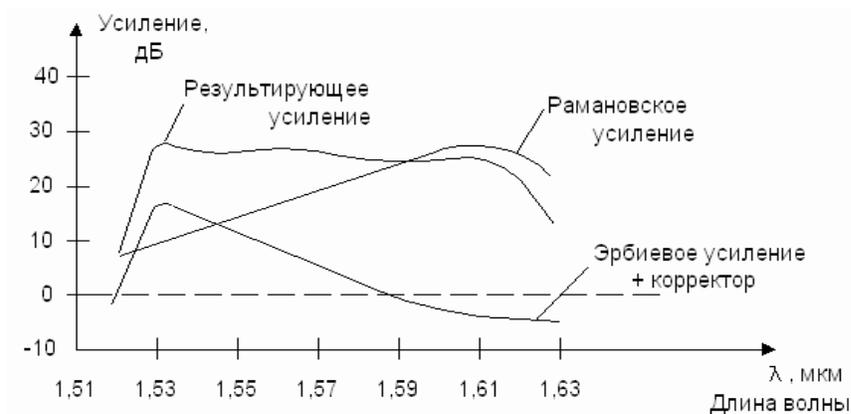


Рис. 7.17. Характеристика усиления гибридного усилителя (рамановское и эрбиевое с корректором)

На рис. 7.18 представлена конструкция волоконного усилителя мощности для монтажа в составе модуля оборудования ВОСП.



Рис. 7.18 Конструкция VOУ

Усилитель Рамана может быть использован для увеличения скорости передачи существующих линий с 2.5 Гбит/с до 40 Гбит/с. Широкополосность усилителя превышает 5 ТГц и полоса усиления может смещаться в зависимости от выбора оптической частоты накачки. Пример конструктивного исполнения модуля накачки усилителя Рамана приведен на рис. 7.19.



Рис. 7.19. Конструктив модуля накачки рамановского VOУ

Схема оптических и электрических цепей модуля накачки рамановского ВОУ представлена на рис. 7.20.

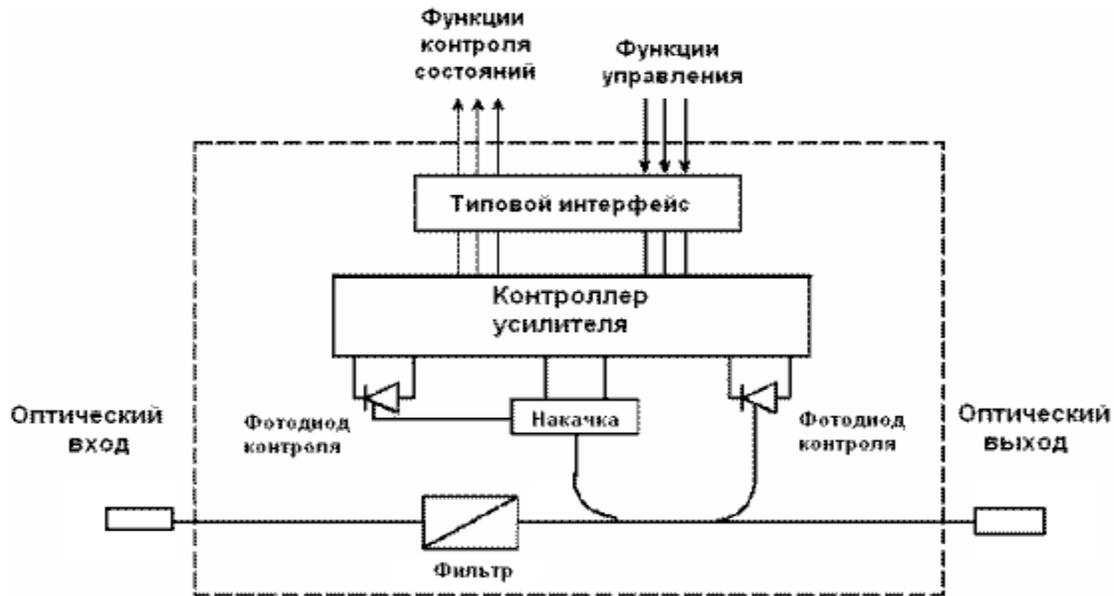


Рис. 7.20 Структура схемы накачки рамановского усилителя

Таким образом, рамановские усилители перспективны в силу следующих принципиальных преимуществ:

- они могут усиливать на любой длине волны;
- в качестве их активной среды может использоваться сам волоконный световод;
- спектр их усиления зависит от спектра накачки, поэтому подбором источников накачки можно формировать очень широкую (более 100 нм) полосу усиления;
- низкий уровень шумов.

Основной же их недостаток - не очень высокая эффективность, приводящая к необходимости использовать довольно мощную непрерывную накачку (~1 Вт), чтобы получить усиление около 30 дБ (типичная величина для систем оптической связи).

Контрольные вопросы

1. Что такое оптический усилитель?
2. Почему возможно усиление света?
3. Как классифицируются оптические усилители?
4. Каким требованиям должны удовлетворять оптические усилители систем передачи?
5. Какие виды полупроводниковых оптических усилителей могут быть использованы в ВОСП?
6. Что представляют собой редкоземельные элементы?
7. Какие устройства входят в состав оптического усилителя?
8. Сколько энергетических уровней задействовано в атомах эрбия для усиления?
9. На каких длинах волн у атомов эрбия наблюдается поглощение энергии?
10. Что порождает шум оптических усилителей?
11. Чем определяется величина усиления ВОУ?

12. Каким образом корректируется АЧХ усилителя?
13. Чем принципиально отличаются усилители на основе эффекта рассеяния от волоконных усилителей с редкоземельными материалами?

8. Трансиверы (транспондеры)

Функциональная схема трансивера показана на рис. 8.1. Оптический сигнал со стороны клиента в оптическом приемнике (ОПр) преобразуется в электрический. Далее этот сигнал управляет оптическим передатчиком (ОПер), который отвечает требованиям ITU для технологии WDM.

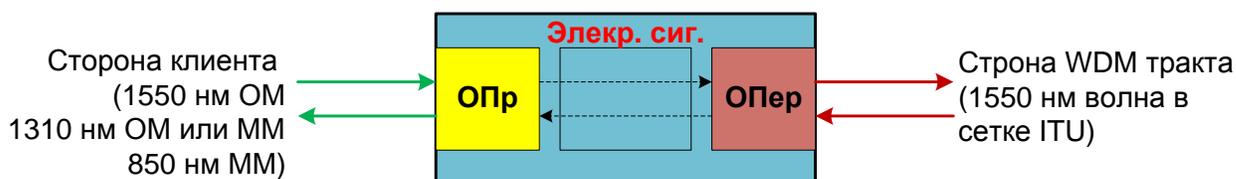


Рис. 8.1. Функциональная схема трансивера

Трансиверы выполняются в виде модулей типов: WDM SFP, SFP, CWDM SFP, DWDM SFP, MultiRate SFP, MultiRate WDM, XENPAK, SFP+, XFP, X2. Основными частями трансиверов являются оптические передатчики и оптические приемники.

Оптические передатчики реализуются в форме электронно-оптического преобразователя, осуществляющего преобразование электрических сигналов в оптические сигналы. Обобщенная структурная схема оптического передатчика приведена на рис. 8.2, где приняты следующие обозначения:

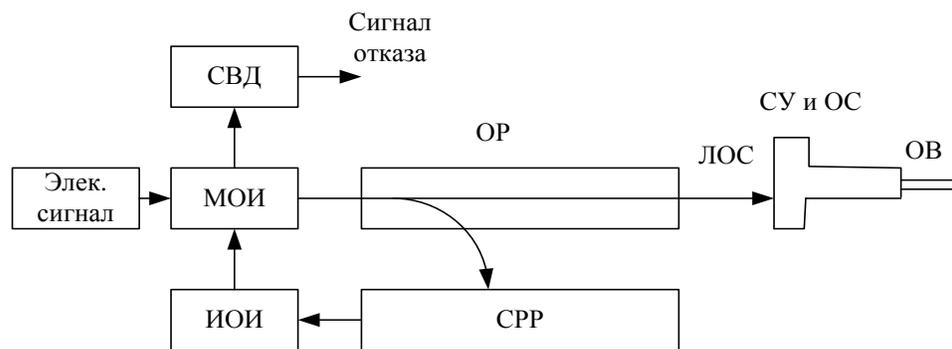


Рис. 8.2. Обобщенная структурная схема оптического передатчика

ФМС — формирователь модулирующего сигнала, осуществляющий преобразование сигнала, поступающего с выхода оборудования сопряжения, к виду, обеспечивающему оптимальный режим работы оптического модулятора или источника оптического излучения; МОИ — модулятор оптического излучения, здесь осуществляется модуляция одного из параметров оптического излучения (интенсивности, частоты, фазы, поляризации и др.); ИОИ — источник оптического излучения; ОР — оптический разветвитель, обеспечивающий отвод оптического сигнала на СРР (стабилизатор режима работы источника оптического излучения), ЛОС — линейный оптический сигнал (модулированное оптическое излучение, передаваемое по оптическому кабелю; СВД — схема встроенной диагностики, предназначенная для контроля работоспособности ПОМ; СУ и ОС — согласующее устройство и оптический соединитель, обеспечивающие ввод оптического сигнала в оптический кабель; ОВ — оптическое волокно.

Основным блоком, определяющим качество функционирования оптических передатчиков, является источник оптического излучения. К источникам оптического излучения предъявляются следующие требования: длина волны

оптического излучения должна соответствовать сетке частот CDWM и DWDM; достаточно большая мощность выходного излучения и эффективность его ввода в оптическое волокно; возможность модуляции оптического излучения различными способами; достаточно большой срок службы; минимальное потребление электрической энергии или высокая эффективность; минимальные габариты и вес; простота технологии производства, обеспечивающая невысокую стоимость и высокую воспроизводимость параметров и характеристик.

Известны три класса источников оптического излучения для ВОСП: планарные полупроводниковые; волоконные; объемные микрооптические источники (микролазеры).

Все они в той или иной мере удовлетворяют изложенным выше требованиям, однако только планарные полупроводниковые источники – светоизлучающие диоды и лазеры – широко используются в реальных системах. Интенсивное развитие полупроводниковых источников света связано, в первую очередь, с уникальным сочетанием важных для ВОСП положительных свойств, таких как непосредственное преобразование энергии электрического тока в оптическое излучение с высокой эффективностью, возможность прямой модуляции параметров излучения током накачки с высокой скоростью, малые масса и габаритные размеры.

Лазерные источники оптического излучения. Для ВОСП, использующих мультиплексирование с разделением по длине волны, или волновое мультиплексирование (WDM), требуются динамически стабильные одночастотные лазеры с очень узкой спектральной линией. Этим требованиям больше всего отвечают лазеры с фиксированной волной излучения трех типов:

- с распределенной обратной связью (РОС или Distributed FeedBack, DFB);
- с распределенной брэгговской решеткой (РБО или Distributed Bragg Reflector, DBR);
- на вертикальных резонаторах (Vertical-cavity surface-emitting laser, VCSEL).

В генераторах первых двух типов для получения излучения узкого спектра используются волоконные решетки Брэгга (Fiber Bragg Gratings). Они, в сущности, представляют собой 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 своеобразную дифракционную решетку. То есть, такое волокно будет отражать свет определенного, заранее заданного диапазона длин волн, и пропускать свет всех остальных длин волн. Отраженный свет и является выходным сигналом генератора (рис. 8.3).

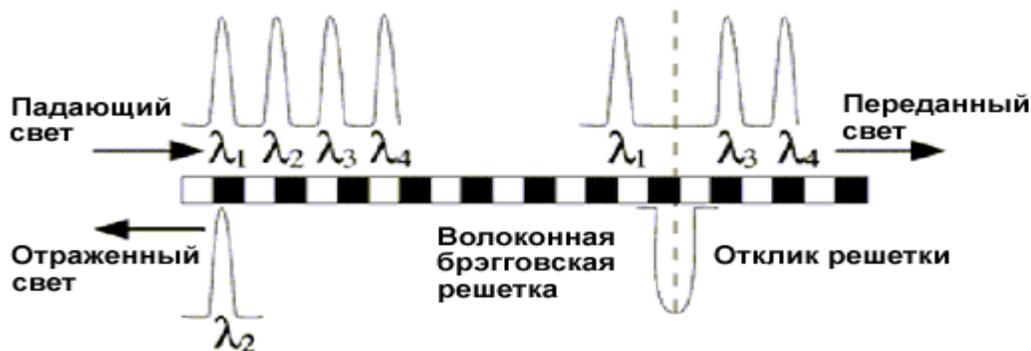


Рис. 8.3. Принцип работы брэгговской решетки

Наиболее широко в ВОСП применяются лазеры с длиной волны излучения 1300 и 1550 нм. Они используют диапазон рабочих температур до 100°C без охлаждения и имеют мощность излучения до 50 мВт. По спектральному составу лазеры, используемые в ВОСП, могут иметь как многомодовый, так и одномодовый (а в пределе одночастотный) режим генерации в зависимости от скорости и дальности передачи информации. Самыми перспективными источниками излучения для ВОСП являются инжекционные лазеры (ИЛ), так как они сочетают в себе свойства генератора несущей частоты и модулятора в широком диапазоне частот.

В отличие от обычных лазеров, в лазерах с РОС резонатор образован не на излучающих торцах, а на гранях, параллельных оптической оси (рис.8.4).

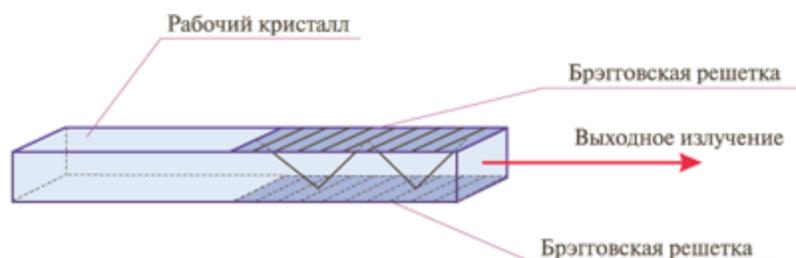


Рис. 8.4. Структура РОС лазера

В генераторах DFB брэгговская решетка формируется в активной зоне лазера, поэтому технология изготовления таких устройств достаточно сложна. Ширина спектра таких генераторов обычно составляет менее 100МГц.

У генераторов DBR решетка расположена в неактивной зоне лазера, поэтому эффективная длина резонатора может быть существенно больше, чем у генераторов DFB, а полоса излучения - уже, до 1 МГц.

В лазерах VCSEL генерация происходит поперек p - n перехода. Преимуществом таких генераторов является высокая технологичность: на одном чипе можно разместить матрицу лазеров, каждый из которых может излучать заданную длину волны в соответствии с требуемым планом частот.

Кроме фиксированных, существуют также перестраиваемые генераторы, которые используются для тестирования систем WDM, а также для построения оптических кросс-коннекторов. В перестраиваемом генераторе чаще всего используется внешний резонатор на основе дифракционной решетки, поворот которой вызывает изменение длины выходной волны.

При этом излучение с рабочей длиной волны распространяется не вдоль оси кристалла, а переотражается от граней кристалла, на которых образована дифракционная решетка. (Решетка может формироваться путем травления или облучения грани ультрафиолетовым излучением через специальную маску). Такая конструкция резонатора позволяет в несколько десятков раз сузить ширину спектральной линии.

Но, кроме ширины линии, для систем DWDM важна стабильность частоты, с тем чтобы излучение одного канала не попадало в рабочую область соседнего. В то же время, пропускание больших токов через кристалл приводит к его разогреву и, вследствие этого, к флуктуации частоты генерации. Для решения этой проблемы была предложена схема лазера (а точнее, передатчика) с внешним модулятором и оптическим усилителем. При такой схеме лазер может быть маломощным, обладать хорошей системой стабилизации частоты и мощности излучения и работать в непрерывном режиме, что существенно облегчает задачу стабилизации. А модуляция излучения осуществляется электрооптическим модулятором, который не влияет на центральную частоту. Электрооптический модулятор представляет собой двулучепреломляющий кристалл (т.е., его коэффициент преломления зависит от направления распространения излучения), к двум граням которого прикладывается модулирующее напряжение. Основная оптическая ось кристалла совпадает с направлением распространения излучения. В качестве рабочего тела модулятора чаще всего используют ниобат лития (LiNbO_3). Этот материал имеет более чем на порядок меньшее управляющее напряжение, нежели используемые ранее дигидрофосфат натрия или калия. Электрооптические модуляторы были созданы достаточно давно, практически одновременно с первыми газовыми лазерами. Однако в то время они не нашли применения, как не нашли применения, из-за большого затухания в атмосфере, и открытые линии, для которых они разрабатывались.

Таким образом, один из вариантов оптической схемы современного передатчика системы DWDM с внешним резонатором лазера показан на рис. 8.5.

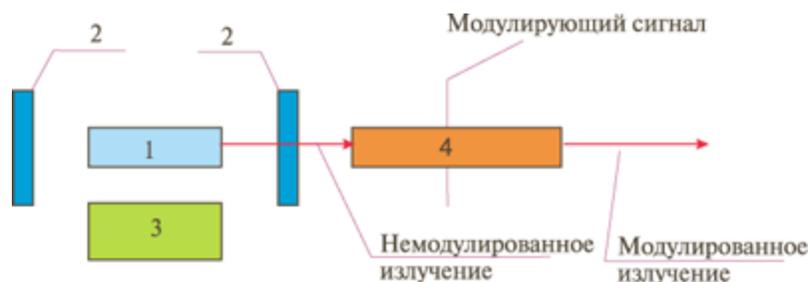


Рис. 8.5. Передатчик с внешним резонатором

Кроме того, для увеличения стабильности частоты генерации применяют термостабилизацию активного кристалла и модулятора. Стабилизация температуры с точностью $+ 0.1^\circ\text{C}$ обеспечивает стабильность длины волны генерации не хуже $+ 0,01$ нм.

Методами интегральной оптики созданы недорогие и удобные в эксплуатации оптические передающие модули, объединяющие в одном кристалле лазер, оптический модулятор и полупроводниковый ОУ. Разработаны также оптические передающие модули, объединяющие мультилазеры, независимо генерирующие сигналы на нескольких длинах волн, мультиплексор и полупроводниковый оптический усилитель.

Основными характеристиками источников оптического излучения являются: спектральная характеристика излучения (рис. 8.6); ватт-амперная характеристика $W_o=f(I_n)$, описывающая зависимость мощности оптического излучения W_o от тока накачки I_n (рис. 8.7 а) и от изменения температуры окружающей среды (рис. 8.7 б); диаграмма направленности, представляющая пространственную характеристику излучения (рис. 8.8). После выхода света из источника начинается расширение светового пучка, и только малая его часть в

действительности попадает в оптическое волокно. Чем уже диаграмма направленности, тем большая часть света может попасть в волокно.

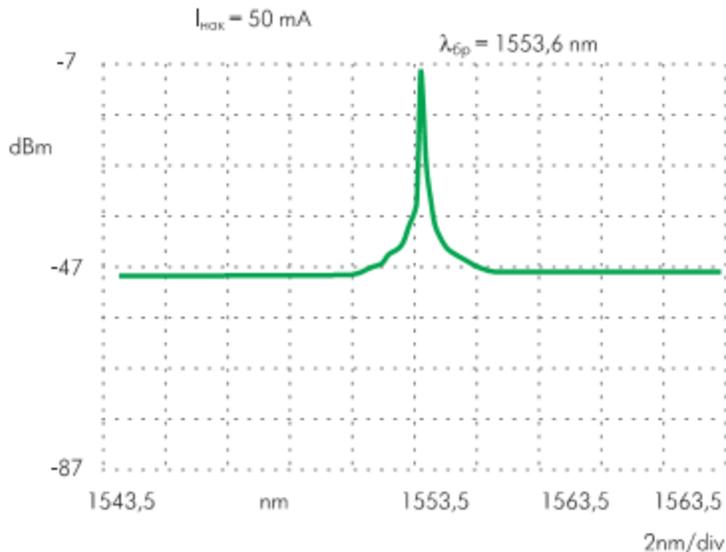


Рис. 8.6. Спектральная характеристика одномодового источника оптического излучения

Хорошие источники излучения должны иметь малые диаметры выходных пучков света и малую апертуру (NA). Диаметр выходного пучка определяет величину поперечного сечения пучка излучения, а апертура NA — диапазон углов, в которых происходит излучение света. Если диаметр выходного пучка или его апертура превышают соответствующие параметры волокна, в которое вводится излучение, часть излучения не попадает в волокно.

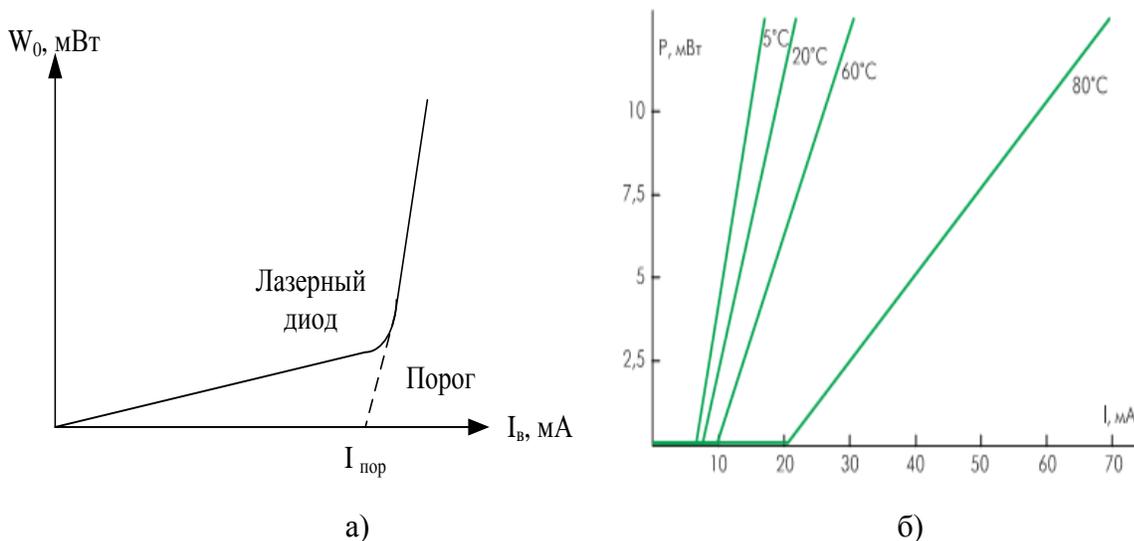


Рис. 8.7. . Ватт-амперные характеристики источников оптического излучения

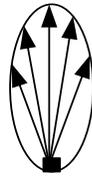


Рис. 4.12. Диаграмма направленности лазерного диода

Как отмечалось ранее, трансиверы выполняются в виде модулей. Ниже приводится описание некоторых модулей.

SFP модули (Small Form-factor Pluggable — компактный сменный форм-фактор) это компактные оптические трансиверы. "Классические" SFP модули используются для организации двунаправленной передачи данных по двум одномодовым или многомодовым волокнам (по одному волокну для каждого направления). SFP модуль устанавливается в активное телекоммуникационное оборудование и служит оптическим интерфейсом (например, коммутаторов, маршрутизаторов и т.д.). SFP модули обеспечивают передачу данных по разным протоколам: SONET/SDH, Gigabit Ethernet, Fibre Channel и другие. На сегодняшний день SFP модули это наиболее часто встречающийся тип трансиверов, пришедший на смену модулям GBIC. SFP модули имеют меньшие размеры, что позволяет более плотно располагать порты на оборудовании, до 48 портов на один 19" RU. Для мониторинга параметров SFP модулей используется функция DDM (Digital Diagnostic Monitoring). Данная функция позволяет в режиме реального времени контролировать параметры SFP модулей: мощность входящего сигнала (RX), мощность исходящего сигнала (TX), температурные параметры работы модуля. Изменения данных параметров позволяют судить об износе оптической системы и состоянии трассы в целом. На SFP модулях устанавливаются приемники и передатчики, которые отличаются в зависимости от дальности работы SFP модуля (мощности сигнала), типа используемого волокна, используемых длин волн и ширины спектра. Двухволоконные оптические SFP модули, как правило, делятся на три категории: SX, LX/LH, ZX, а так же трансиверы DWDM/CWDM. Так же можно выделить несколько разновидностей SFP модулей:

- двухволоконные SFP;
- одноволоконные SFP (WDM);
- CWDM SFP;
- мультирейтовые SFP.

В зависимости от задачи используется конкретный тип SFP модулей, в одном устройстве могут быть установленный SFP модули разных типов.

WDM SFP (Eng.: Small Form-factor Pluggable — компактный сменный форм-фактор) являются компактными оптическими трансиверами. Модули используются для двунаправленной (дуплексной) передачи данных по одному одномодовому (Single Mode) оптическому волокну. Модуль выступает в качестве оптического интерфейса для активного оборудования (коммутатора, маршрутизатора, либо другого оборудования). SFP модули поддерживают SONET/SDH, Gigabit Ethernet, Fibre Channel и другие протоколы передачи данных.

SFP модули пришли на замену использовавшимся ранее модулям GBIC. Они обладают более компактным дизайном и возможностью организации более плотного расположения портов на один стандартный 19" юнит (до 48 портов). Для мониторинга в режиме реального

времени (on-line мониторинга) используются SFP модули с функцией DDM (Digital Diagnostic Monitoring). Функция DDM позволяет в режиме реального времени контролировать параметры SFP модуля: мощность входящего сигнала (RX), мощность исходящего сигнала (TX), температурные параметры работы модуля. Изменения данных параметров позволяют судить об износе оптической системы и состоянии трассы в целом.



Рис. 8. 13. Внешний вид модулей *WDM SFP*

На модуле установлена оптическая сборка типа BOSA (Bi-directional Optical Sub Assembly), позволяющая осуществлять передачу и прием данных на двух разных длинах волн по одному одномодовому оптическому волокну.

WDM SFP модули с разъемом SC пользуются высокой популярностью благодаря сравнительно низкой стоимости патч-кордов и коннекторов SC. WDM SFP модули с разъемом LC пользуются популярностью благодаря более высокой надежности коннектора LC, обладающего более надежным механизмом закрепления, чем коннекторы SC. UpNet предлагает серию SFP модулей для передачи данных по протоколам OC-48/STM-16, Gigabit Ethernet с использованием передатчиков работающих на длинах волн 1310/1550 (1310/1490) и приемников, работающих на волнах 1550/1310 (1490/1310). Благодаря 20-ти пиновому коннектору модули поддерживают режим горячей замены. В передающей части используются лазеры типа А и В, соответствующие первому классу безопасности Международного Стандарта Безопасности (International Safety Standard) IEC 60825. В приемной части используется интегрированный детектор усилитель, установленный в оптической сборке BOSA. Модули UpNet производятся в соответствии с требованиями SFP Multi-source Agreement (MSA) №SFF-8472.

Особенности:

- Скорость передачи данных до 2,5Gb/s.
- Тип А: 1310nm DFB Tx/1490nm Rx или 1310nm DFB Tx/1550nm Rx.
- Тип В: 1490nm DFB Tx/1310nm Rx или 1550nm DFB Tx/1310nm FP Rx.
- Дистанция от 300 м до 40 км.
- Электропитание 3.3V и логический интерфейс TTL.
- Тип разъема SC или LC.
- Температура эксплуатации: 0C~+70C.
- Высокая надежность.
- Сертификаты: RoHS, CE, FDA, FCC и проч.
- Функция DDM (Digital Diagnostic Monitoring).

CWDM SFP модуль (Small Form-factor Pluggable — компактный сменный форм-фактор) являются компактными оптическими трансиверами. Модули используются при передаче данных по оптической среде для двунаправленной (дуплексной) передачи данных по двум волокнам (одномодовым или мультимодовым). Модуль выступает в качестве оптического интерфейса для активного оборудования (коммутатора, маршрутизатора, либо другого

оборудования). CWDM SFP модули поддерживают SONET/SDH, Gigabit Ethernet, Fibre Channel и другие протоколы передачи данных.

SFP модули пришли на замену использовавшимся ранее модулям GBIC. Они обладают более компактным дизайном и возможностью организации более плотного расположения портов на один стандартный 19" юнит (до 48 портов).

CWDM SFP модули являются двухволоконными и на них устанавливаются оптические сборки типа TOSA (передатчик) и ROSA (приемник). Устанавливаемые приемники (фотоприемники) и передатчики отличаются в зависимости от дальности работы модуля (мощности сигнала) и используемых длин волн. На CWDM SFP модули устанавливаются лазеры (в составе передатчика — TOSA) с распределенной обратной связью (DFB, Distributed Feedback), которые не требуют термической стабилизации, громоздких и сложных схем управления, являются малогабаритными, экономичными и имеют малую стоимость. Типичный DFB-лазер имеет высокую температурную стабильность, что дает изменение генерируемой длины волны в пределах 6–8 нм в диапазоне температур 0–70С.

Таблица 8.1. Характеристики CWDM SFP различных моделей.

Модель	Скорость передачи	Длины волн	Тип лазера	Оптическая мощность	Чувствительность	Дальность	Тип волокна
CWDM SFP-G 20дБ без DDM	1,25 Гбит/с	1270-1610 нм с шагом 20 нм	DFB	-2~+2 дБм	-22 дБм	до 60 км	SM
CWDM SFP-G 24дБ DDM	1,25 Гбит/с	1270-1610 нм с шагом 20 нм	DFB	-1~+1 дБм	-24 дБм	до 80 км	SM
CWDM SFP-G 32дБ DDM	1,25 Гбит/с	1270-1610 нм с шагом 20 нм	DFB	0~+2 дБм	-32 дБм	до 100 км	SM
CWDM SFP-G 36дБ DDM	1,25 Гбит/с	1270-1610 нм с шагом 20 нм	DFB	+3~+5 дБм	-33 дБм	до 120 км	SM
CWDM SFP-G 41дБ DDM	1,25 Гбит/с	1270-1610 нм с шагом 20 нм	DFB	+3~+5 дБм	-38 дБм	до 120 км	SM
CWDM SFP-2,5G 18дБ DDM	2,5 Гбит/с	1270-1610 нм с шагом 20 нм	DFB	-1~+1 дБм	-18 дБм	до 40 км	SM
CWDM SFP-2,5G 28дБ DDM	2,5 Гбит/с	1270-1610 нм с шагом 20 нм	DFB	0~+2 дБм	-28 дБм	до 80 км	SM
CWDM SFP-4,5G 18дБ DDM	4,5 Гбит/с	1270-1610 нм с шагом 20 нм	DFB	-1~+1 дБм	-18 дБм	до 40 км	SM
CWDM SFP-4,5G 26дБ DDM	4,5 Гбит/с	1270-1610 нм с шагом 20 нм	DFB	0~+2 дБм	-26 дБм	до 80 км	SM
CWDM SFP-1M 36дБ DDM	155 Мбит/с	1270-1610 нм с шагом 20 нм	LD	0~+5 дБм	-36 дБм	до 120 км	SM
CWDM SFP-1M 29дБ DDM	622 Мбит/с	1270-1610 нм с шагом 20 нм	LD	-3~+1 дБм	-32 дБм	до 100 км	SM

CWDM SFP модули предназначены для формирования оптических CWDM сигналов «основной несущей» в диапазоне с 1310 по 1610 нм (шаг 20нм): 1270, 1290, 1310, 1330, 1350, 1370, 1390, 1410, 1430, 1450, 1470, 1490, 1510, 1530, 1550, 1570, 1590, 1610.

Для образования дуплексного канала передачи данных в системе CWDM модули SFP используются «попарно» по аналогии со стандартными WDM SFP модулями. Для мониторинга в режиме реального времени (on-line мониторинга) используются CWDM SFP модули с функцией DDM (Digital Diagnostic Monitoring). Функция DDM позволяет в режиме реального времени контролировать параметры CWDM SFP модуля: мощность входящего сигнала (RX), мощность исходящего сигнала (TX), температурные параметры работы модуля. Изменения данных параметров позволяют судить об износе CWDM системы и состоянии трассы в целом. На CWDM SFP модулях стандартно используется типоразмер коннекторов LC. В табл. 8.1 в качестве примера, приведены характеристики CWDM SFP различных моделей.

Модули DWDM SFP (Small Form-factor Pluggable — компактный сменный форм-фактор) используются для организации передачи данных на разных длинах волн по одному оптическому волокну. Модули DWDM SFP играют роль оптических интерфейсов телекоммуникационного оборудования. DWDM SFP могут использоваться для передачи данных по протоколам Gigabit Ethernet, SONET/SDH, Fibre Channel и пр. Модули с форм-фактором SFP пришли на замену модулям с форм-фактором GBIC, однако, DWDM трансиверы в форм-факторе GBIC не использовались. DWDM SFP обладают компактным дизайном и обеспечивают возможность размещения до 48 SFP слотов на одной планке 19" высотой 1RU.

Устанавливаемые на DWDM SFP приемники (фотоприемники) и передатчики отличаются в зависимости от дальности работы модуля (мощности сигнала) и используемых длин волн. В качестве передатчиков в DWDM SFP модулях используются лазеры DFB (Distributed Feedback, распределенная обратная связь). DFB лазеры не требуют крупных радиаторов охлаждения, имеют малые размеры и оптимальное для использования в трансиверах энергопотребление. Малый шаг сетки частот DWDM требует от передатчиков высокой точности и стабильности излучения на всем диапазоне рабочих температур. Для образования дуплексного канала передачи данных в системе DWDM модули SFP используются «попарно» по аналогии со стандартными WDM SFP модулями.

Для мониторинга параметров DWDM модулей используются DWDM SFP модули с функцией DDM (Digital Diagnostic Monitoring). Функция DDM позволяет в режиме реального времени контролировать параметры DWDM SFP модуля: мощность входящего сигнала (RX), мощность исходящего сигнала (TX), температурные параметры работы модуля. Изменения данных параметров позволяют судить об износе DWDM системы и состоянии трассы в целом. На DWDM SFP модулях используются разъемы типа LC.

Трансиверы MultiRate SFP выполнены в стандартизованном форм факторе SFP. Применяются для подключения по двухволоконным одномодовым кабелям и используют стандартные длины волн 1310 или 1550 нм. Несмотря на то, что оптимизированы для работы в оптических сетях передачи данных OC-48 / STM-16, являются универсальными и могут быть использованы на скоростях от 155 Мбит/с до 2.7 Гбит/с. Данные наносятся на шильды MultiRate SFP модулей. MultiRate SFP модуль является многорежимным и обеспечивает работу на различных скоростях в оптических сетях передачи данных с применением технологий OC-48 / STM-16, Gigabit Ethernet 1000BASE, Fibre Channel 1x/2x SM-LC-L FC-PI. MultiRate SFP модуль имеет 20-ти контактный разъем позволяющий "горячую" замену. В передатчике MultiRate SFP используется лазер 1-го класса типа DFB с распределенной обратной связью, который соответствует стандартам безопасности IEC 60825. В приемной части используется интегрированный InGaAs детектор с предусителем.

Модули MultiRate WDM SFP являются многорежимными и обеспечивают работу на различных скоростях в оптических сетях передачи данных. Трансиверы MultiRate WDM SFP выполнены в стандартизованном форм факторе SFP. Не смотря на то, что оптимизированы для работы в оптических сетях передачи данных OC-48 / STM-16, являются универсальными и могут быть использованы на скоростях от OC-3 (155 Mb/s) до 2.7 Gb/s. Модуль имеет 20-ти пиновый разъем позволяющий горячую замену. В передатчике используется лазер A type/ B type, который является лазером 1-го класса и соответствует стандартам безопасности IEC 60825. В приемник используется интегрированный B type/ A type детектор с предусилителем.

XFP модуль (10 Gigabit Small Form Factor Pluggable) – независимый оптический приемо-передатчик, работающий с длинами волн 850nm, 1310nm, 1550nm или длинами волн из сетки CWDM и DWDM. Являясь протоколнезависимым, применим при организации оптических сетей передачи данных на скоростях до 10 Гбит/с, таких как – SONET/SDH, Fibre Channel, gigabit Ethernet, 10 gigabit Ethernet и другие, включая сети с использованием технологий CWDM и DWDM. Имеет встроенную систему цифровых диагностических функций для мониторинга как самого модуля XFP, так и состояния оптических линий.

XFP модули CWDM предназначены для использования с одномодовыми оптическими волокнами и длинами волн из сетки CWDM. XFP модули DWDM работают на длинах волн из диапазонов "C" и "L". XFP модули применяются для организации линий связи с большой протяженностью без использования оптических усилителей и регенераторов. WDM XFP модули позволяют осуществлять передачу данных на скорости 10 Гбит/с по одному волокну без применения дополнительных устройств уплотнения.



Рис. 8.14. Внешний вид XFP модулей CWDM

SFP+ модули используются при организации для организации высокоскоростных дуплексных каналов со скоростью передачи данных до 10 Гбит/с. WDM SFP+ предназначены для организации дуплексного канала связи в одном волокне. CWDM SFP+ позволяют организовывать каналы 10 Гбит/с в пассивных CWDM системах. SFP+ модули поддерживают функцию DDM, которая в реальном времени позволяет проследить параметры работы устройства, такие как рабочая температура, отклонение тока лазера, излучаемая оптическая мощность, принимаемая оптическая мощность, также поддерживается система сигнализации о выходе параметров за пределы установленных допусков. Особенности модулей SFP+ :

- Позволяют организовать двухстороннее соединение на скорости до 10.3Gb/s;
- Горячая замена;
- Соответствуют рекомендациям SFF-8472 (MSA);
- Дуплексный LC коннектор;
- DFB лазер, не требующий дополнительного охлаждения;
- Рабочая температура -5...+70 °C;
- 2 контакта для интеграции DDM;
- Модули соответствуют требованиям IEC-60825.

ХЕНПАК модули - это трансиверы в первом форм-факторе, получившем массовое распространение, предназначенные для передачи данных на скорости до 10 Гбит/с. Массовое применение ХЕНПАК модули получили в городских сетях и в центрах обработки данных. Модули ХЕНПАК поддерживают различные сетевые протоколы. Передача данных модулями ХЕНПАК производится по двухволоконным одномодовым или многомодовым оптическим кабелям. Для подключения волокон к модулю ХЕНПАК используются оптические разъемы типа SC. В зависимости от протяженности линии, используются ХЕНПАК модули с лазерами VCSEL или DBF с рабочими длинами волн 850, 1310 или 1550 нм. Для многомодовых волокон возможна передача данных на расстояние до 500 метров. Для более длинных дистанций (10-40 километров) применяется одномодовое волокно. Функции цифрового мониторинга позволяют отслеживать состояние ХЕНПАК модуля и окружающей среды



Рис. 8.15. Внешний вид ХЕНПАК модулей

10G X2 модули предназначены для построения оптических линий связи со скоростью передачи данных до 10 Гбит/с. Модули X2 устанавливаются в телекоммуникационное оборудование для сетей 10 Гбит/с с различными протоколами передачи данных и имеющее соответствующие слоты. Передачу данных модули X2 осуществляют по двум одномодовым или многомодовым оптическим волокнам, оконцованным коннекторами SC. Использование новейших DBF и EML лазеров позволило добиться низкой рассеиваемой мощности модулей X2, что, в свою очередь, значительно снизило требования к системе охлаждения. Функции мониторинга состояния модуля X2 позволяют контролировать параметры излучения, состояние приемника, параметров окружающей среды и пр.



Рис. 8.16. Внешний вид 10G X2 модулей

Оптические приемники. Обобщенная структурная схема оптического приемника, реализуемого в виде приемного модуля, представлена на рис. 8.17, где приняты следующие обозначения:

ОК — оптический кабель; ОС — оптический соединитель; ФД — фотодиод или фотодетектор; ПМШУ — предварительный малошумящий усилитель; МУ с АРУ — мощный усилитель с автоматической регулировкой усиления; ФК — фильтр-корректор.

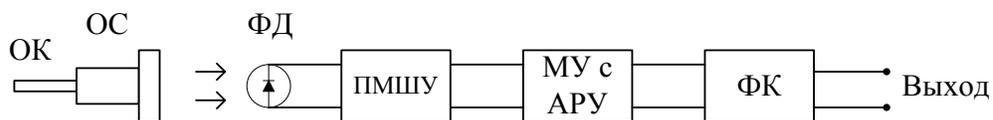


Рис. 8.17. Обобщенная структурная схема оптического приемника

Оптический сигнал с выхода оптического кабеля (ОК) через оптический соединитель (ОС) поступает на фотодетектор (ФД), где происходит его преобразование в электрический сигнал. На выходе ФД электрический сигнал весьма мал и сопровождается различного вида шумами. Для его усиления без существенной потери в шумозащищенности используется предварительный малошумящий усилитель (ПМШУ). Усиленный электрический сигнал далее усиливается мощным усилителем с автоматической регулировкой усиления (МУ с АРУ) и затем с помощью фильтра-корректора (ФК) осуществляется отфильтровывание помех и коррекция формы электрического сигнала, который и подается на оборудование сопряжения тракта приема ВОСП.

Базовым элементом оптического приемника ВОСП является фотодетектор — оптоэлектронный прибор, преобразующий оптический сигнал в электрический сигнал соответствующей формы.

Фотодетектор реализуется на основе полупроводниковых фотодиодов (ФД) с р-п обратносмещенными переходами, работающих на принципах внутреннего фотоэффекта.

В технике ВОСП широкое применение находят два типа фотодиодов: р-і-п и лавинный ФД.

Сущность внутреннего фотоэффекта в полупроводниковом материале заключается в поглощении фототока, энергия которого $hf = hc/\lambda$ более ширины запрещенной зоны материала E_g полупроводникового материала, а длина волны оптического излучения не превышает критического значения $\lambda_{кр} = 1,24/E_g$, и сопровождается переходом электрона из валентной зоны в зону проводимости, а дырок — из зоны проводимости в валентную зону (генерация пар «электрон-дырка»). Фотоны с энергией, меньшей ширины запрещенной зоны, или длиной волны больше критической, не поглощаются и, следовательно, не происходит генерации пары «электрон-дырка».

Эффективное поглощение падающего излучения, как правило, связано с эффектом примесного поглощения.

Примесное поглощение имеет место в примесных полупроводниковых материалах, электрические свойства которых получаются путем добавки небольшого количества примесей в структуру собственных полупроводников, например, германия — Ge, кремния — Si, а также соединений элементов третьей и пятой групп Периодической системы элементов Д. И. Менделеева (ПСЭМ): алюминия — Al, галлия — Ga, индия — In из третьей группы и фосфора — P, мышьяка — As и сурьмы — Sb из пятой группы, например, арсенид галлия — GaAs и фосфид индия — InP. Возможно образование тройных и четверных соединений типа арсенида галлия с добавкой алюминия — GaAlAs или галлий-индий-арсенид фосфора — GaInAsP.

Примеси могут создать избыток электронов (полупроводник n⁺-типа) или дырок (полупроводник p⁺-типа). Процесс добавки примесей называется легированием. В легированном полупроводниковом материале имеются основные носители (свободные электроны в материале n⁺-типа и дырки в материале p⁺-типа). Такие материалы известны как примесные полупроводники. В этих материалах концентрация примесей настолько велика, что она (не температура) является основным фактором, определяющим число свободных носителей и, следовательно, электрическую проводимость и быстродействие прибора.

Собственные полупроводники четвертой группы ПСЭМ кремний и германий могут быть полупроводниками n-типа после введения небольших концентраций донорных примесей

элементов пятой группы ПСЭМ — мышьяка или фосфора. Они же могут стать полупроводниками р-типа в результате введения акцепторных примесей из группы элементов третьей группы ПСЭМ — галлия или индия.

Во многих полупроводниковых материалах одновременно присутствуют как донорные, так и акцепторные примеси и такие материалы становятся полупроводниками соответствующего вида проводимости.

Р-і-п- фотодиоды. Структурная схема обратносмещенного р-і-п-ФД представлена на рис. 8.10. Сконструированный таким образом полупроводниковый прибор, получил название р-і-п-фотодиода, происходящего из сокращенных названий составляющих его слоев: р — positive (положительный), і — intrinsic (внутренний), п — negative (отрицательный). Обедненный і слой такого ФД сделан максимально широким из полупроводникового материала, легированного в такой степени, чтобы не относиться ни к полупроводникам п-типа с электронным видом проводимости, ни к полупроводникам р-типа с дырочкой проводимостью.

Как следует из рис. 8.18 структура такого диода состоит из сильно легированного n^+ -слоя (подложки), слаболегированного І-слоя и тонкого сильнолегированного р-и-слоя. Толщина і-слоя должна быть во много раз больше, чем длина поглощения оптического излучения соответствующих длин волн. Так, если толщина тонкого p^+ -слоя не превышает 0,3 мкм, то ширина і-слоя составляет несколько десятков мкм.

Так как сильное легирование р- и п-слоев увеличивает их проводимость, то обратное смещение напряжением $E_{см}$, приложенное к этим слоям, создает в І-слое сильное внутренне электрическое поле напряженностью E_v . При этом образуется обедненная зона, толщина которой сравнима с размером диода.

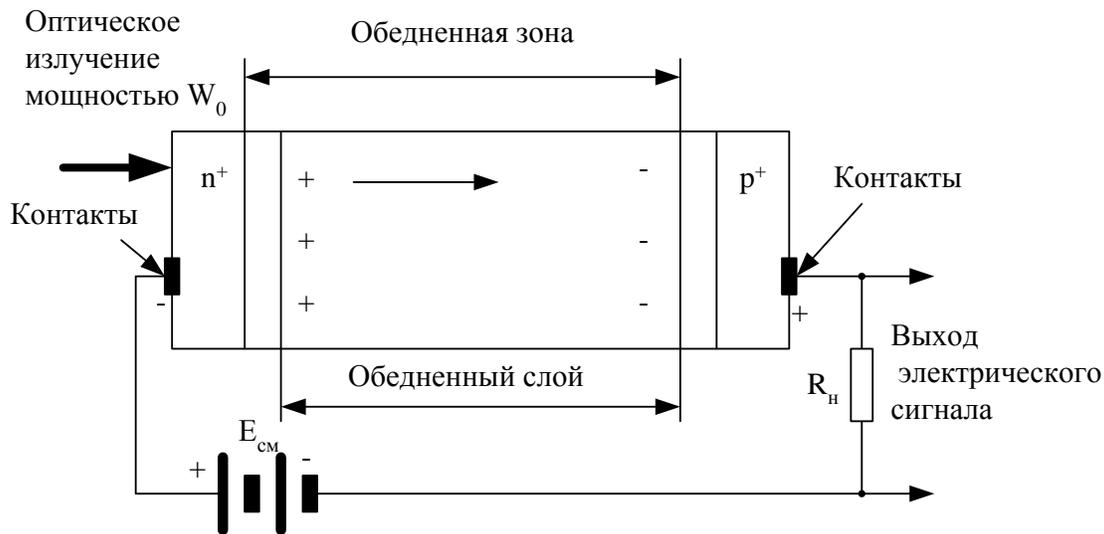


Рис. 8.18. Структурная схема р-і-п-фотодиода

Широкий і- слой приводит к увеличению интенсивности поглощения фотонов в обедненном слое. В результате чего падающие фотоны возбуждают ток во внешней цепи более эффективно и с меньшим запаздыванием. Носители, возникающие внутри обедненной зоны, мгновенно сдвигаются в сильном электрическом поле к p^+ и n^+ областям диода.

В результате поглощения кванта света с энергией hf в нагрузке диода R_n протекает импульс тока. Если каждый поглощенный квант рождает электронно-дырочную пару, то число носителей тока N , равное отношению мощности оптического излучения W к энергии кванта, умноженное на величину носителя q , определит средний ток I_f , протекающий через нагрузку R_n :

$$I_{\phi} = q \cdot N = q \cdot \frac{W}{h \cdot f}.$$

Как правило, не все поглощенные кванты света приводят к появлению импульсов тока. Этот факт необходимо учитывать коэффициентом, характеризующим эффективность преобразования фотонов в электрический сигнал. Этот коэффициент η_{ϕ} называется квантовой эффективностью (выходом) фотодетектора. Следовательно, средний фототок, протекающий через нагрузку фотодетектора, будет равен:

$$I_{\phi} = \eta_{\phi} \cdot q \cdot \frac{W}{h \cdot f}.$$

Коэффициент полезного действия фотодетектора, определяемый как отношение среднего значения фототока I_{ϕ} к среднему значению оптической мощности (А/Вт), называется токовой чувствительностью:

$$S = \frac{1}{W} = \frac{\eta_{\phi} \cdot q}{h \cdot f}.$$

Отсюда следует, что чувствительность оптического приемника тем выше, чем больше квантовый выход η_{ϕ} , т.е. чем больше доля светового потока, поглощаемая в активной зоне фотодиода.

Токовая чувствительность зависит от длины волны падающего излучения. Характер этой зависимости определяется спектральной характеристикой квантового выхода, которая обычно имеет вид плавной кривой с более или менее выраженным максимумом и определяется материалом полупроводника (рис. 8.19).

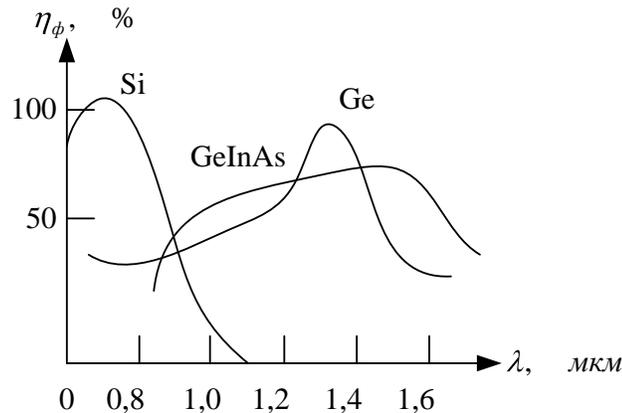


Рис. 8.19. Спектральная характеристика квантового выхода – квантовой эффективности

Квантовый выход фотодиода однозначно связан с токовой чувствительностью следующей зависимостью: $\eta = 1,24S/\lambda$, где λ — длина волны, мкм.

Конструктивно р-і-п — ФД выполняется так, чтобы максимально уменьшить долю поглощения излучения вне і-слоя. С этой целью переход формируется у самой поверхности кристалла. Следовательно, постоянная времени такого ФД определяется временем перехода носителей заряда через обедненный слой в сильном электрическом поле.

При отсутствии внешнего оптического излучения и наличии обратного смещающего напряжения в р-і-п — фотодиодах обедненный слой поляризуется и через нагрузку протекает постоянный ток I_m малой величины, который называется темновым током. Значение этого тока определяется свойствами полупроводникового материала, толщиной р-і-п- структуры и температурой окружающей среды.

В настоящее время р-і-п-фотодиоды являются довольно распространенным типом фотодетектора. Это объясняется простотой их изготовления, достаточно высокой временной и температурной стабильностью и относительно широкой полосой рабочих частот, они обладают хорошей линейностью в широком динамическом диапазоне (от нескольких пиковатт до нескольких милливольт), обеспечивают детектирование оптических сигналов, модулируемых частотами гигагерцевого диапазона.

Для изготовления таких ФД обычно используют кремний (Si), германий (Ge), арсенид галлия (GaAs), соединения вида InAs, InGaAs, AlGaSb и InGaAsP. Кремниевые ФД считаются идеальными для применения в ВОСП, работающих на длине волны от 0,6 до 1 мкм с максимальной чувствительностью около 0,9 мкм и квантовой эффективностью до 0,9. Для длин волн 1 мкм и выше (вплоть до 1,8 мкм) часто используют ФД на основе Ge. При использовании соединения вида $AixGa_{1-x}AsSb$ получены ФД для работы на длинах волн от 0,9 до 1,3 мкм с квантовой эффективностью не хуже 0,8.

В фотодиодах р-і-п — типа каждый поглощенный фотон в идеале приводит к образованию одной пары «электрон-дырка», которая приводит к генерации тока во внешней цепи. Квантовую эффективность ФД можно повысить путем использования лавинного усиления (умножения), реализуемого в структуре, называемой лавинным фотодиодом (ЛФД), где один фотон порождает M электронов.

Лавинные фотодиоды (ЛФД). В основе работы ЛФД лежит процесс ударной ионизации в сильном электрическом поле, т.е. образования положительных и отрицательных ионов и свободных электронов из электрически нейтральных молекул и атомов полу- проводника. При этом электроны в зоне проводимости могут приобрести кинетическую энергию, большую, чем ширина запрещенной зоны, и «выбивать» электроны из валентной зоны. В валентной зоне образуются дырки, в зоне проводимости вместо каждого «быстрого» электрона появляются два «медленных», которые, ускоряясь в сильном электрическом поле, становятся «быстрыми» и вызывают повторную ударную ионизацию. Вероятность ударной ионизации возрастает с напряженностью электрического поля (или ростом обратного смещающего напряжения) Отметим, что при некоторой напряженности поля ударная ионизация приводит к резкому увеличению плотности тока, т.е. к электрическому пробоему полупроводника. Следовательно, для создания условий ударной ионизации в структуре фотодиода необходимо создать сильное электрическое поле. Такое поле создается добавлением в структуру р-і- фотодиода дополнительного n-p — перехода, усиленное обратным смещением, рис. 8.20.

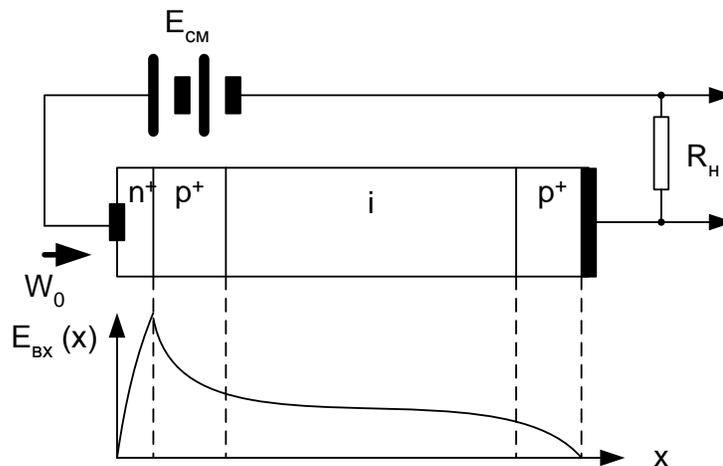


Рис. 8.20. Структура ЛФД и распределение его электрического поля

При воздействии оптического излучения мощностью W на i -слой образуются пары «электрон-дырка», называемые первоначальными носителями. Благодаря относительно небольшому полю i -слоя, происходит направленное движение носителей к соответствующим полюсам батареи смещения.

При попадании свободных электронов из i -слоя в p -слой их ускорение становится более ощутимым из-за высокой напряженности электрического поля n^+-p — перехода. Ускоряясь в зоне проводимости p -слоя, такие «быстрые» электроны накапливают кинетическую энергию достаточную, чтобы «выбить» (возбудить) два «медленных» электрона из валентной зоны в зону проводимости. В результате появляются свободные носители, называемые вторичными. В зоне проводимости p -слоя происходит их повторное ускорение до получения кинетической энергии, соответствующей «быстрому» электрону, который снова порождает ударной ионизацией пару «медленных» электронов из валентной зоны. Этот процесс называется лавинным усилением или лавинным умножением.

Условия лавинного умножения достигаются увеличением напряжения обратного смещения до значения, чуть меньше напряжения пробоя полупроводника, так чтобы на n^+-p — переходе установилось очень сильное поле (с напряженностью не менее 10 В/см). Электроны и дырки, двигаясь в таком поле, приобретают значительную кинетическую энергию, необходимую для образования вторичных носителей путем ударной ионизации. Энергия получаемых при этом электронов, обеспечивает их перенос из валентной зоны в зону проводимости.

Процесс лавинного умножения (усиления) ЛФД оценивается коэффициентом умножения M , который приближенно может быть представлен эмпирической формулой:

$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{U_{см}}{U_{пр}}\right)^n},$$

где $U_{см}$ — напряжение обратного смещения; $U_{пр}$ — напряжения пробоя; величина $n = 2...6$ и определяется материалом проводника и конструкцией фотодиода.

Величина фототока через нагрузку R_n для ЛФД определяется по формуле:

$$I_{\phi} = 0,8 \cdot \lambda \cdot \eta_{\phi} \cdot M \cdot W.$$

Лавинный эффект приводит к увеличению темнового тока ЛФД в M раз по сравнению с темновым током $p-i-n$ — фотодиода. Коэффициент умножения принимает различные значения в зависимости от напряжения смещения. При $U_{см} = U_{пр}$ происходит резкое увеличение коэффициента M , которое может принимать высокие значения. При низком напряжении $U_{см}$ ЛФД работает как $p-i-n$ -фотодиод без усиления (умножения). Существует пороговое напряжение $U_{д}$, для получения лавинного процесса ударной ионизации. Выше этого порога ЛФД будет генерировать ток без наличия возбуждающего оптического излучения. Отметим, что коэффициент умножения сильно зависит от температуры, что является серьезным недостатком ЛФД. Поэтому в схемах смещения ФЛД необходимо предусмотреть меры, которые устраняли бы влияние изменений напряжения и температуры. Типовой компромисс между величиной умножения и стабильностью работы ЛФД достигается при напряжении смещения, равном $0,95 U_{пр}$.

Лавинный фотодиод с коэффициентом $M=100$ может породить как 95, так и 105 вторичных носителей. Такого рода вариации являются причиной возникновения шумов, ограничивающих предел чувствительности ЛФД. Отметим, что темновой ток ЛФД растет при увеличении приложенного смещающего напряжения и, следовательно, зависит от коэффициента умножения M .

Квантовая эффективность ФД зависит от коэффициента отражения R на границе «полупроводник-воздух». Для уменьшения френелевского отражения обычно покрывают поверхность прозрачной диэлектрической пленкой толщиной в четверть длины волны принимаемого оптического излучения и показателем преломления, в идеальном случае равным $\sqrt{n_1 \cdot n_2}$, где n_1 и n_2 — показатели преломления полупроводникового материала и воздуха.

На практике более удобна тонкая кварцевая пленка, заметно увеличивающая пропускание оптического излучения; иногда используют нитрид кремния Si_3N_4 . Такая пленка играет роль линзы, повышающей квантовую эффективность на 20%

Шумы приемников оптического излучения. Фотодиоды обычно характеризуются следующими основными параметрами: токовой чувствительностью S ; квантовой эффективностью η_ϕ ; предельной частотой, т.е частотой гармонической модуляции падающего на ФД модулированного по интенсивности излучения, при которой чувствительность ФД уменьшается до 0,707 чувствительности при немодулированном излучении; отметим, что предельная частота численно равна ширине полосы пропускания фотодиода ΔF_ϕ ; быстродействию, под которым понимается время нарастания τ_n или время спада τ_c , фототока $I_\phi(t)$ при воздействии на ФД импульса оптического излучения $W(t)$ достаточно большой длительности (рис. 8.21).

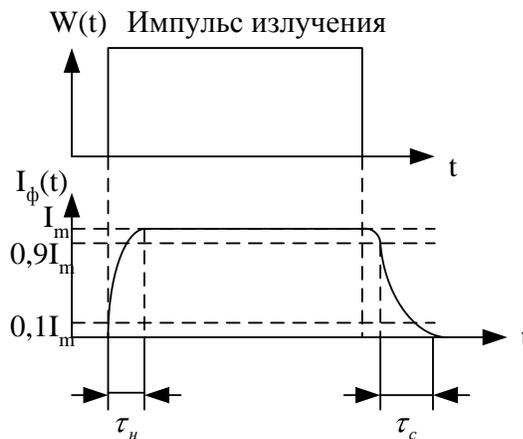


Рис. 8.21. К определению быстродействия ФД

Время спада импульса тока и время его нарастания определяются длительностью переднего и заднего фронтов между значениями 0,1 и 0,9 установившегося значения фототока I_m . В совокупности время спада и время нарастания называются временем отклика, т.е. временем, необходимым для преобразования мощности излучения в электрический ток. Быстродействие оценивается максимальным значением одной из составляющих времени отклика (обычно это время нарастания). Между временем нарастания и шириной полосы пропускания существует зависимость вида:

$$\Delta F_\phi = \frac{0,35}{\tau_n}.$$

Для ЛФД увеличение коэффициента усиления сопровождается уменьшением быстродействия. Поэтому параметром, характеризующим быстродействие ЛФД является его добротность, под которой понимается произведение коэффициента умножения (усиления) M на ширину полосы пропускания F_ϕ , численно равной предельной частоте.

Как функциональные элементы p-i-n и лавинные фотодиоды могут быть представлены в виде обобщенной эквивалентной схемы (рис. 8.22), где приняты следующие обозначения: $I_\phi = WS$ — фототок; R_ϕ — дифференциальное сопротивление обратносмещенного перехода фотодиода; обычно это сопротивление настолько велико, что его шунтирующим действием можно пренебречь; R_s — внутреннее сопротивление диода, состоящее из сопротивления необедненной зоны диода, контактного сопротивления и общего сопротивления, связанного с удельным сопротивлением поверхностного слоя, величина этого сопротивления не превышает нескольких десятков Ом; C_ϕ — емкость обратносмещенного перехода, зависящая от его площади; R_n — сопротивление нагрузки ФД (входное сопротивление предварительного усилителя). Для большинства случаев анализа эквивалентную схему ФД можно представлять генератором тока I_ϕ и шунтируемого емкостью C_ϕ . Можно показать, что для эквивалентной схемы ширина полосы пропускания или предельная частота равна $\Delta F_\phi = \frac{1}{2\pi \cdot C_\phi \cdot R_n}$, здесь R_n — сопротивление нагрузки ФД (как правило, входное сопротивление предварительного малошумящего усилителя фототока).

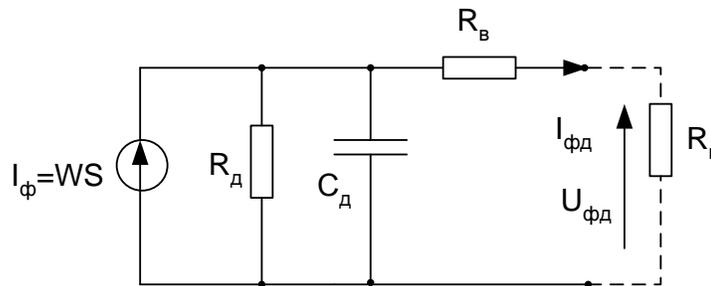


Рис. 8.22. Эквивалентная схема фотодиода

В состав тока $I_{\phi\delta}$ на выходе схемы входят: фототок I_ϕ , темновой ток I_m , а также токи шумов различного происхождения, являющиеся естественным ограничением чувствительности фотодиодов. Значения этих токов являются одним из ключевых параметров приемников оптического излучения и оцениваются среднеквадратическими величинами соответствующих токов.

Среднеквадратическое значение тока фотодиода определяется следующей формулой:

$$I_\phi^2 = 2 \cdot (W_{oc} \cdot S)^2 \cdot M_2 = 2 \cdot I_\phi^2 \cdot M^2.$$

Здесь: W_{oc} — мощность оптического сигнала, поступающего на вход фотодетектора — фотодиода; S — чувствительность фотодиода на соответствующей рабочей длине волны оптического излучения; M — коэффициент лавинного умножения (усиления) ЛФД (для p-i-n фотодиода $M = 1$); I_ϕ — средний ток фотодиода, генерируемый оптическим излучением.

Важной составляющей шумов фотодиодов являются дробовые шумы, обусловленные дискретной природой фотонов и генерируемых ими пар «электрон-дырка». Фототок не является непрерывным и однородным потоком, а представляет поток отдельных дискретных электронов. Фототок флуктуирует в зависимости от того, насколько много или мало пар «электрон-дырка» возникает в данный момент времени. Дробовые шумы присутствуют и тогда, когда свет не падает на фотодиод. Даже в отсутствие оптического сигнала малые флуктуации фототока генерируются за счет темнового тока и температурных колебаний, причем его значение увеличивается, приблизительно на 10 % при росте температуры на 1 °С. Типичные значения тока дробовых шумов составляют 22...25 нА при 25 °С.

Среднеквадратическое значение тока дробовых шумов (дробный шум) фотодиода равно:

$$I_{dp}^2 = 2 \cdot q \cdot I_{\phi} \cdot M^2 \cdot F(M) \cdot \Delta F_{\phi},$$

где q — заряд электрона; $F(M)$ — коэффициент избыточного шума лавинного умножения (усиления), учитывающий увеличение дробовых шумов ЛФД из-за нерегулярного характера процесса умножения; для некоторых типов ЛФД коэффициент $F(M)$ вблизи напряжения пробоя может быть представлен в форме:

$$F(M) = M^x,$$

где показатель степени x для кремниевых ЛФД лежит в пределах 0,2...0,5 и для германиевых — 0,9...1, для ЛФД на основе гибридного соединения вида InGaAs — 0,7...0,8; ΔF_{ϕ} — ширина полосы пропускания фотодиода.

Среднеквадратическое значение темнового тока определяется по формуле:

$$I_m^2 = 2 \cdot q \cdot I_m \cdot M^2 \cdot F(M) \cdot \Delta F_{\phi}.$$

Здесь: I_m — среднее значение темнового тока; его величина для кремниевых p-i-n — фотодиодов лежит в пределах (1...8)10 А, а для германиевых — на два порядка выше. Темновой ток возрастает примерно на 10% с ростом температуры на 1°C.

Помимо дробовых шумов и шумов темнового тока в приемниках оптического излучения следует учитывать тепловые шумы (или шумы Джонсона-Найквиста), обусловленных флуктуациями отдельных электронов в проводнике, создающих на его концах напряжение случайного характера. Электроны в пространстве между электродами фотодиода ведут себя непостоянно. Их тепловая энергия позволяет им случайным образом смещаться. В каждый момент времени суммарный поток случайного движения электронов может быть направлен к одному либо к другому электроду. Таким образом, появляется постоянно меняющийся случайный ток. Он накладывается на полезный сигнал и изменяет его. Среднеквадратическое значение тока тепловых шумов определяется выражением:

$$I_{mth}^2 = \frac{4KT\Delta F_{\phi}}{R_n},$$

где $K=1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура по шкале Кельвина; ΔF_{ϕ} — ширина полосы пропускания фотодиода (фотодетектора); R_n — сопротивление нагрузки.

Среднеквадратическое значение суммарных шумов (полного шума) на выходе фотодетектора определяется суммой вида $I_{ш}^2 = I_{dp}^2 + I_m^2 + I_{mth}^2$.

Помехозащищенность полезного электрического сигнала от полного шума на выходе фотодетектора определяется отношением сигнал — шум, которое можно представить в виде

$$A_{ш} = 10 \lg \frac{W_c}{W_{ш}},$$

или

$$R_n = \frac{W_c}{W_{ш}} = \frac{I_{\phi}^2}{I_{ш}^2} = \frac{2 \cdot I_{\phi}^2 \cdot M^2}{2 \cdot q \cdot M^2 \cdot F(M) \cdot \Delta F_{\phi} (I_{dp}^2 + I_m^2) + 4KT \cdot \Delta F_{\phi}},$$

где W_c — мощность фототока на единичном сопротивлении нагрузки $R_n = 1$ Ом; $W_{ш}$ — полная мощность шумов на единичном сопротивлении нагрузки

Шумы на выходе фотодетектора при передаче цифровой информации порождают ошибки, и в этом случае интегральной оценкой качества передачи является вероятность ошибки.

Вопросы для самоконтроля.

1. Что такое трансивер (транспондер)?
2. Как выглядит структурная схема трансивера?
3. Чем отличается, длина волны на входе трансивера от длины волны на его выходе?
4. Что такое одномодовый источник оптического излучения?
5. Какие типы источников оптического излучения применяются в системах со спектральным уплотнением?
6. Как работают РОС – лазеры?
7. Как работают РБО – лазеры?
8. Как выглядит схема оптического передатчика?
9. Как выглядит схема оптического приемника?
10. Как работают лавинные фотодиоды?
11. Как работают Р-I-N фотодиоды?
12. Какие виды шумов присутствуют на выходе фотодиодов?

9. Оптический бюджет

С распространением технологий спектрального уплотнения (CWDM и DWDM) и пассивных оптических сетей (PON) в сетях важное значение имеет «оптический бюджет» (энергетический потенциал линии). Ранее это понятие использовалось в основном организациями, осуществляющими проектирование и монтаж ВОЛС. Внедрение CWDM и PON заставили вспомнить про «оптический бюджет» и эксплуатирующие организации. Элементы оптической системы, в том числе и CWDM, можно условно разделить на 2 группы: создающие в линии сигнал и снижающие мощность сигнала, т.е. вносящие затухание. К первой категории относятся оптические трансиверы (SFP, XFP и т.д.) и усилители сигнала. Все остальные элементы – коннекторы, мультиплексоры, модули OADM, разветвители – вносят в линию потери. Очевидно, что оптическая система будет функционировать только при условии, что мощность системы будет больше затухания на всех элементах системы. Соответственно, для проверки работоспособности системы достаточно посчитать разность между мощностью системы и потерями в системе. Оптические трансиверы имеют два важных для нас показателя – мощность лазера и чувствительность приемника. Разность этих показателей дает нам оптическую мощность, обеспечиваемую трансивером. Остается добавить значение мощности оптических усилителей, что бы получить суммарную мощность системы.

При расчетах оптического бюджета ВОЛС необходимо учитывать следующие источники затухания:

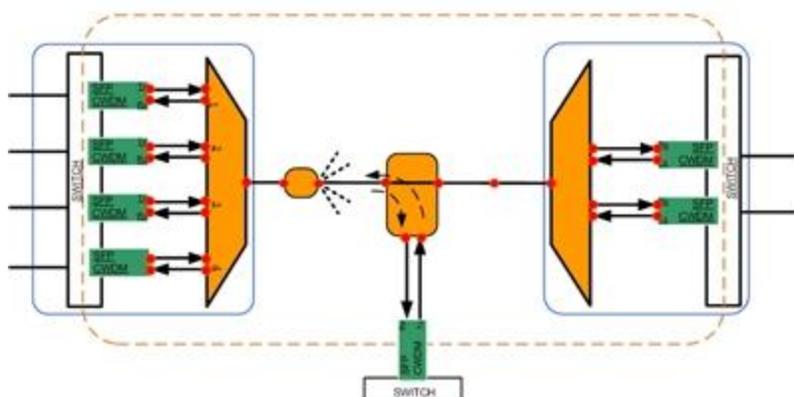


Рис. 9.1. Затухание сигнала в оптическом волокне

При распространении сигнала в оптическом волокне происходит естественное затухание сигнала. Величина затухания в волокне зависит от большого количества факторов, однако при расчетах учитывают только два из них – длину линии и длину волны сигнала. Средние потери для сигнала в одномодовом волокне составляют 0,2 дБ/км для длины волны 1550 нм, и 0,35 дБ/км для 1310 нм. Как известно, в системах CWDM используются длины волн от 1270 до 1610 нм, но для расчета затухания в линии для этих длин волн можно ориентироваться на значения для волн 1310 нм и 1550 нм. Приближенные к этим значениям длины волн будут иметь затухание того же порядка. При определении затухания в волокне при расчете оптического бюджета CWDM систем не достаточно рассматривать значение для наиболее короткой длине волны, т.к. доступны CWDM трансиверы разной мощности, и на короткие длины волн можно устанавливать более мощные трансиверы, балансируя, таким образом, систему.

CWDM мультиплексоры. На мультиплексоре потери рассчитываются по каждой несущей (длине волны) и оцениваются между портом (коннектором) ввода / вывода по несущей и Com

портом. Соответственно средние вносимые потери на каждой несущей составляют от 1,2 до 2,6 дБ. CWDM SFP модули бывают с излучаемой мощностью от 22 до 35 дБ. Типичные вносимые потери для пассивных CWDM устройств:

- CWDM мультиплексор на 4 порта – от 2 до 3 дБ
- CWDM мультиплексор на 8 портов – от 4,5 до 5,5 дБ
- CWDM мультиплексор на 16 портов – от 7 до 8 дБ
- CWDM OADM мультиплексор на 1 порт – от 0,5 до 1 дБ

DADM модули. Для OADM модулей потери рассчитываются как по выделяемым (добавляемым) несущим, так и по линии в целом:

- между портами (коннекторами) Com и Express – средние вносимые потери в линию от 0,5 до 0,9 дБ;
- между портами Com и Add – средние вносимые потери по несущей от 0,5 до 0,9 дБ;
- между портами Com и Drop-средние вносимые потери по несущей от 0,3 до 0,9 дБ.

Необходимо учитывать, что в OADM модулях для двухканальных систем (топология «точка-точка» с ответвлениями) 2 пары Com-Add и Com-Drop.

Точки соединения:

- коннекторы – от 0,3 дБ;
- места сварок – от 0,02 дБ;
- механические соединители – от 0,7 дБ.

Оптические разветвители. При расчете затухания на оптических разветвителях необходимо отталкиваться от спецификации конкретного разветвителя.

Запас мощности. Для обеспечения надежной работы оптической системы необходимо учитывать возможность увеличения оптических потерь при изменении внешних факторов и ухудшении характеристик компонентов ВОЛС, связанных с их старением. Для компенсации данных потерь необходим запас 3-6 «запасных» дБ.

После расчета потерь в линии можем оценить надежность системы в разрезе оптического бюджета. Для упрощения процесса расчета оптического бюджета ВОЛС предлагается использовать программу [«Калькулятор оптического бюджета»](#) (рис. 9.2).

Калькулятор оптического бюджета предназначен для расчета оптического бюджета (энергетического потенциала) линий связи с учетом применения в них оборудования спектрального уплотнения CWDM. Калькулятор оптического бюджета дает возможность рассчитать суммарные потери в ВОЛС по всем направлениям распространения оптического сигнала и сформировать для проекта сбалансированный комплекс CWDM оборудования.

Особенности:

- расчет потерь в зависимости от длины волны излучения;
- унифицированные базовые значения потерь на элементах ВОЛС;
- возможность установки параметров;
- краткий тест работоспособности системы.

Мощность системы

Мощность передатчика: +3 дБ
 Чувствительность приемника: -24 дБ
 Мощность усилителей: 0 дБ
 Итого: 27 дБ

Потери системы

Длина волны, нм: 1310 1550

Компонент	Кол-во	Затухание	Результат
Длина линии	15,2 км	0,35 дБ	5,586 дБ
Сварные соединения	6 шт.	0,05 дБ	0,3 дБ
Оптические разъемы	10 шт.	0,5 дБ	5 дБ
Механические соединители	0 шт.	0,5 дБ	0 дБ
CWDM мультиплексор	2 шт.	3,2 дБ	6,4 дБ
ОADM модуль, шт.	4 шт.	1,2 дБ	4,8 дБ
			Итого: 25,09 дБ

Проектный запас мощности: 3 дБ

Система работоспособна
Избыток 1,914 дБ

Расчитать

Рис. 9.2. Калькулятор оптического бюджета

Вопросы для самоконтроля.

1. Что такое оптический бюджет ВОСП?
2. Что такое энергетический запас?
3. Как определяется оптический бюджет ВОСП?
4. Какие составляющие ВОСП учитываются при определении оптического бюджета?
5. Для чего предназначен калькулятор оптического бюджета?

10. Принципы нормирования элементарных кабельных участков и кабельных секций регенерации ВОСП со спектральным уплотнением

С течением времени спектральное уплотнение становится основной технологией повышения пропускной способности волоконно-оптических систем передачи (ВОСП). Эта технология используется при модернизации существующих линий передачи. Новые линии передачи должны сооружаться с учетом возможности последующего применения этой технологии. Законченными элементами ВОСП является элементарный кабельный участок (ЭКУ) и кабельная секция регенерации (КСР). На каждом ЭКУ и КСР проводятся приемосдаточные измерения, регламентирующие взаимоотношения организаций, осуществляющих строительство и эксплуатацию ВОСП. Нормы таких измерений для ВОСП с одной длиной волны содержит требования к относительному и абсолютному значениям затухания оптического волокна и к распределению оптических потерь на их неразъемных соединениях.

Теоретический анализ и практика применения показали, что для систем передачи со спектральным уплотнением целесообразно существенно расширить номенклатуру проверяемых параметров ЭКУ и КСР и дополнительно нормировать: локальную неоднородность оптического волокна внутри строительной длины (для контроля за качеством прокладки кабеля); затухание ЭКУ на четырех длинах волн в третьем и на пяти длинах волн в четвертом окне прозрачности; затухание ЭКУ на длине волны телеконтроля; хроматическую и поляризационную модовую дисперсию на длине волны 1,55 мкм.

Многие параметры ЭКУ и КСР зависят от их длины. Фактором, ограничивающим длину кабельного участка в высокоскоростных ВОСП, являются не только оптические потери среды передачи, но и ее дисперсия. Поэтому необходимо задать способ расчета допустимой длины ЭКУ и КСР с учетом оптических потерь и дисперсии.

В основу соответствующего НТД положен принцип статистического нормирования, учитывающий случайную природу основных параметров оптической среды передачи.

Далее применяются следующие термины:

- окончание участка – граница, выбранная условно в качестве стыка оптического волокна с регенератором или с оптическим линейным усилителем;
- элементарный кабельный участок – физическая среда передачи между соседними окончаниями участка,
- кабельная секция регенерационного участка – совокупность всех ЭКУ - вся физическая среда передачи оптического линейного тракта ВОСП;
- максимальная длина элементарного кабельного участка – протяженность, при которой оптические потери в 99,99 % случаев меньше максимально допустимых в бюджете мощности ВОСП.

Общие положения нормирования. Элементарные кабельные участки организуются в высокоскоростных волоконно-оптических системах передачи, включая ВОСП с плотным спектральным уплотнением со скоростью цифровых потоков на каждой длине волны до 10 Гбит/с.

ЭКУ ВОСП, включая ВОСП с плотным спектральным уплотнением, организуются на оптических кабелях с оптическими волокнами G.652 и G.655.

В оптическом кабеле ВОСП различают действующие, резервные и свободные оптические волокна. Действующие оптические волокна (ОВ) используются в сооружаемой ВОСП в качестве основных, резервные – в качестве резервных; будущее назначение свободных ОВ определяется проектом.

В процессе приемосдаточных испытаний ЭКУ и КСР проверяются качественные характеристики всех ОВ кабеля.

Как правило, в оптической кабеле ВОЛП используются ОВ одного и того же завода-изготовителя.

В оптической кабеле ВОЛП могут использоваться разные типы ОВ, например G.652 и G.655.

Для двухволоконных ВОСП, у которых прямое и обратное направления передачи организуются в двух ОВ одного и того же типа, необходимое количество ОВ в ОК должно быть кратно 4 для обеспечения возможности резервирования цифровых потоков на уровне физической среды передачи по схеме 1+1.

Для одноволоконных ВОСП, у которых прямое и обратное направления передачи организуются в одном и том же ОВ, необходимое количество ОВ в ОК должно быть кратно 2 для обеспечения возможности резервирования цифровых потоков на уровне физической среды передачи по схеме 1+1.

ВОСП должны иметь суммарную общую мощность оптического сигнала, как правило, не более 17 дБм.

Длина ЭКУ после окончания строительства определяется оптическим рефлектометром на рабочей длине волны 1,55 мкм с учетом эффективного значения группового показателя преломления сердцевины ОВ, заданного заводом-изготовителем ОВ. Длина кабельной секции регенерации определяется как сумма длин последовательно соединенных ЭКУ на КСР. Длина ЭКУ также может быть определена по данным фиксации трассы ВОЛП с учетом длины запасов в соединительных муфтах и длины станционных кабелей.

Нормы на параметры ЭКУ и КСР задаются для построенных участков ВОЛП со смонтированными оконечными кабельными устройствами. Рассмотрим необходимые для нормирования параметры ВОСП.

Параметры оптических систем передачи. Код применения ВОСП обозначается: $nWx-z \cdot y$,

где

n – максимальное количество передаваемых длин волн (спектральных каналов);

$W = L$ при номинальной длине ЭКУ 80 км,

$= V$ при номинальной длине ЭКУ 120 км,

$= U$ при номинальной длине ЭКУ 160 км;

x – максимальное количество усилительных участков, допустимое в рамках данного кода применения;

y – уровень СТМ;

$z = 2$ для ОВ G.652, и 5 для ОВ G.655.

Номинальные значения длин заданы только для классификации ВОСП. Конкретные значения длин ЭКУ и затухания вычисляются для каждого регенерационного участка ВОСП с учетом бюджета мощности и шумов спонтанной эмиссии.

Диапазоны затухания для кодов применения без оптических линейных усилителей приведены в табл. 10.1, а с оптическими линейными усилителями – в табл. 10.2.

Таблица 10.1. Диапазоны затуханий без оптических усилителей

Код применения	$nL - z \cdot y$	$nV - z \cdot y$	$nU - z \cdot y$
Затухание, дБ	22	33	44

Таблица 10.2. Диапазоны затуханий с оптических усилителей.

Код применения	$nLx - z \cdot y$	$nVx - z \cdot y$
Затухание, дБ	22	33

Максимальная удельная дисперсия ВОСП, задается с учетом хроматической и поляризационной модовой дисперсии. Значения максимальной удельной дисперсии ВОСП разных кодов применения приведены в табл. 10.3.

Таблица 10.3. Значения максимальной удельной дисперсии ВОСП разных кодов применения

Код применения	L	V	U	nV3 – z·y	nL5 – z·y	nV5 – z·y	nL8 – z·y
Максимальная дисперсия, пс/нм	1600	2400	3200	7200	8000	12000	12800
- Для систем STM-16 и при значениях дисперсии более 10000 пс/нм требуется использовать технику согласования дисперсией. Считается, что потери, связанные с применением этой техники не включаются в бюджет мощности.							

Максимальная допустимая дисперсия на КСР рассчитывается по формуле:

$$D_{\max} = D \cdot \lambda \Delta,$$

(1)

где D – максимальная удельная дисперсия, пс/нм; $\lambda \Delta$ - ширина спектра источника оптического излучения, нм.

Требуемая вероятность ошибки в линейном тракте оптических систем передачи достигается, если длины ЭКУ и КСР не превышают максимально допустимых значений.

Расчет допустимой длины ЭКУ и КСР с учетом оптических потерь и дисперсии включает в себя:

- определение среднего квадратического значения коэффициента поляризационной модовой дисперсии;
- расчет поляризационной модовой дисперсии на кабельной секции регенерационного участка;
- расчет максимальной допустимой длины КСР по дисперсии;
- расчет эквивалентного значения потерь, приведенного к длине 1 км;
- расчет максимальной допустимой длины ЭКУ регенерационного участка без линейных оптических усилителей и расчет максимальной допустимой длины ЭКУ регенерационного участка с линейными усилителями.

Определение среднего квадратического значения коэффициента поляризационной модовой дисперсии. Измеренным (паспортным) значениям коэффициента поляризационной модовой дисперсии $D_{\text{пмд}}$ присписываются номера от 1 до N . Обычно $N = 100$. Каждому значению коэффициента ПМД присписывается знак «+» или «-» с вероятностью 0,5. Для этого может быть использован любой генератор случайных чисел с равномерным распределением. Тогда выпадение нечетного числа означает «-», а четного - «+». В сформированной таким образом выборке значений $D_{\text{пмд}}$ определяется среднее квадратическое значение коэффициента ПМД - $\sigma(D_{\text{пмд}})$.

Расчет поляризационной модовой дисперсии на кабельной секции регенерационного участка. Расчет ожидаемого максимального значения поляризационной модовой дисперсии на кабельной секции регенерационного участка $D_{\text{пмд}}$ (КСР) проводят по формуле:

$$D_{\text{ПМД}} (\text{КСР}) = 4\sigma(k_{\text{ПМД}}) \sqrt{L_{\text{крс}}}, \quad (2)$$

где

$\sigma(k_{\text{ПМД}})$ – среднее квадратическое значение коэффициента ПМД, определенное по методу, изложенному выше, $L_{\text{крс}}$ – длина КСР, км.

Расчет максимальной допустимой длины КСР по дисперсии, L_{max} при учете системного ограничения по дисперсии производится на основе соотношения

$$D_{\text{хд}} * L_{\text{max}} * \Delta\lambda + 4\sigma(k_{\text{ПМД}}) * \sqrt{L_{\text{max}}} - D_{\text{кд}} \leq D_{\text{max}}, \quad (3)$$

$$D_{\text{кд}} < D_{\text{хд}} * L_{\text{max}} * \Delta\lambda, \quad (4)$$

где

$D_{\text{хд}}$ – коэффициент хроматической дисперсии, пс/(нм*км),

$\sigma(k_{\text{ПМД}})$ – среднее квадратическое значение коэффициента ПМД, пс/км,

D_{max} – значение максимальной допустимой дисперсии, рассчитанное по формуле (1),

$D_{\text{кд}}$ – общая дисперсия компенсаторов дисперсии, пс,

$\Delta\lambda$ – ширина спектра источника оптического излучения.

Эквивалентное значение потерь, приведенное к длине 1 км α_3 , рассчитывается по формуле:

$$\alpha_3 = \bar{\alpha} + \Delta\alpha \sqrt{L} + 4\sigma_\alpha \sqrt{L/L_0} + A_{\text{нс}} * L + 4\alpha_{\text{нс}} \sqrt{L} / L, \quad (5)$$

где

σ_α – среднее квадратическое отклонение коэффициента затухания, дБ/км;

$\sigma_{\text{нс}}$ – среднее квадратическое отклонение потерь в сростках ОВ, дБ;

$\bar{\alpha}$ – среднее значение коэффициента затухания, дБ/км;

$\Delta\alpha$ – максимальное отклонение коэффициента затухания в используемом диапазоне длин волн от коэффициента затухания на номинальной длине волны, дБ/км;

L – длина ЭКУ, км;

L_0 – единичная длина, равная 1 км;

l – строительная длина ОК, км.

Расчет максимальной допустимой длины ЭКУ регенерационного участка без линейных оптических усилителей. Максимальная допустимая длина ЭКУ регенерационного участка ВОЛП с подземным ОК без линейных оптических усилителей рассчитывается по формуле:

$$L_{\text{max}} = A_s / \alpha_3, \quad (6)$$

$$A_s = P_{\text{out}} - P_{\text{in}} - A_{\text{каб}} - A_D - \Delta A$$

Максимальная допустимая длина ЭКУ регенерационного участка ВОЛП с подвесным ОК без линейных оптических усилителей рассчитывается по формуле:

$$L_{\text{max}} = A_s / (\alpha_3 + \delta\alpha), \quad (7)$$

где

A_s – общие допустимые оптические потери на ЭКУ в конце срока службы ОК, дБ;

P_{out} – минимальный абсолютный уровень средней оптической мощности индивидуального канала, вводимой в ОВ ЭКУ на λ_i в конце срока службы ВОСП, дБм;

P_{in} – абсолютный уровень средней оптической мощности индивидуального канала на выходе ЭКУ, дБм;

$A_{\text{каб}}$ – эксплуатационный запас энергетического потенциала для кабеля

A_D – эксплуатационный запас энергетического потенциала, учитывающий уменьшение амплитуды оптического сигнала за счет дисперсии;

ΔA – абсолютная погрешность измерения затухания ЭКУ, дБ;

$\Delta\alpha$ - максимальное увеличение затухания оптического волокна в подвесных кабелях при низких температурах (от минус 50 до минус 60 °С).

Расчет максимальной допустимой длины ЭКУ регенерационного участка с линейными усилителями производится на основе соотношения

$$A_s \leq P_{out} \left(\frac{P_{in}}{P_{out}} \right)^n - NF - 10Lg m - A_{каб} - A_D - R_{SN},$$

$$\left\{ \begin{array}{l} L_{max} = A_s / \alpha_s, \text{ для ВОСП с подземным ОК,} \\ L_{max} = A_s / \left(\alpha_s + 0,03 \right), \text{ для ВОСП с подвесным ОК,} \\ P_{out} \left(\frac{P_{in}}{P_{out}} \right)^n = P_{out} \sum - 10Lg n, \end{array} \right. \quad (8)$$

где

$P_{out}(\lambda_i)$ - мощность сигнала оптического канала, дБм;

$P_{ш} = -58$ мощность шума на входе приемника оптического сигнала, дБм;

$P_{out\sum}$ - общая мощность источника оптического излучения, дБм;

NF - коэффициент шума оптического усилителя, дБ;

m - количество усилительных участков на КСР;

$A_{каб}$ - эксплуатационный запас энергетического потенциала для кабеля

A_D - эксплуатационный запас энергетического потенциала, учитывающий уменьшение амплитуды оптического сигнала за счет дисперсии, дБ;

R_{SN} - логарифмическое отношение сигнал/шум, обеспечивающее заданную вероятность ошибки, дБ.

Значения $P_{out\sum}$, n, NF, R_{SN} задаются в спецификациях на оборудование DWDM; ориентировочные значения этих характеристик, отражающие современный технический уровень ВОСП, приведены в табл. 10.4.

Таблица 10.4. Значения $P_{out\sum}$, n, NF, R_{SN}

Характеристика	Значение
$P_{out\sum}$, дБм	17 – 20
n	32 – 100
NF, дБ	5 – 7,5
R_{SN} , дБ	15 – 18

Точное значение ожидаемого отношения сигнал/шум на регенерационном участке рассчитывается так же, как на линейном тракте аналоговых систем передачи.

Принципы нормирования оптических параметров ЭКУ и КСР.

На ЭКУ нормируются:

- относительное значение оптических потерь – затухание на номинальной рабочей длине волны 1,3 мкм или 1,55 мкм, приведенное к длине 1 км;

- абсолютное значение оптических потерь – суммарное продольное затухание одинаково идентифицированных оптических волокон соединенных строительных длин, суммарные потери на их сростках, потери в станционных пигтейлах и потери на разъёмных соединителях оптических кроссов, если таковые имеются в составе ЭКУ, на номинальной рабочей длине волны 1,3 мкм или 1,55 мкм;

- распределение значений потерь в сростках ОВ на номинальной рабочей длине волны 1,3 мкм или 1,55 мкм;

- локальная неоднородность оптического волокна внутри строительной длины на номинальной рабочей длине волны 1,55 мкм;
- затухание ЭКУ в диапазоне рабочих длин волн при спектральном уплотнении ОВ в третьем окне прозрачности на длинах волн 1530, 1540, 1550 и 1560 нм, в четвертом окне прозрачности на длинах волн 1570, 1580, 1590, 1600 и 1610 нм;
- затухание ЭКУ на длине волны системы телеконтроля 1310, 1480, 1510, 1625 нм или 1650 нм.

На КСР нормируются:

- хроматическая дисперсия КСР на номинальной рабочей длине волны 1,55 мкм;
- поляризационная модовая дисперсия КСР на номинальной рабочей длине волны 1,55 мкм.

Норма относительного значения оптических потерь. Затухание ЭКУ на номинальной рабочей длине волны 1,3 мкм или 1,55 мкм, приведенное к длине 1 км α_n , должно быть не более:

$$\text{- на } \lambda = 1.3 \text{ мкм} \quad \alpha_n \leq \left[\sum_{i=1}^n \alpha_i l_i + 0.2 m_{nc} + A_{pc} \right] / L, \quad (9)$$

$$\text{- на } \lambda = 1.55 \text{ мкм} \quad \alpha_n \leq \left[\sum_{i=1}^n \alpha_i l_i + 0.1 m_{nc} + A_{pc} \right] / L, \quad (10)$$

где

α_i - коэффициент затухания оптического волокна на i -ой строительной длине, указанный в ее паспорте-сертификате;

l_i - протяженность i -ой строительной длины;

n - количество строительных длин ЭКУ;

m_{nc} - количество неразъемных соединений (сварок) оптического волокна ЭКУ;

A_{pc} - паспортные значения потерь разъемных соединителей оптических кроссов, если таковые имеются в составе ЭКУ.

Норма абсолютного значения оптических потерь. Суммарное продольное затухание одинаково идентифицируемых оптических волокон соединенных строительных длин, суммарные потери на их сростках, потери в станционных пигтейлах и потери на разъемных соединителях оптических кроссов, если таковые имеются в составе ЭКУ, на номинальной рабочей длине волны 1,3 мкм или 1,55 мкм, измеренное между оптическими стыками S и R, не должно быть более допустимого значения, определяемого по формуле:

$$A_{SR} = A_S - A_{\text{каб}} - A_D - \Delta A, \quad (11)$$

где

A_{SR} - допустимое значение оптических потерь на рабочей длине волны 1,3 мкм

или 1,55 мкм между оптическими стыками S и R, заданное в таблицах 1 и 2. (Если изготовитель аппаратуры гарантирует большее допустимое значение оптических потерь, чем в таблице 1 или 2, то в формуле (11) следует использовать это лучшее значение)

$A_{\text{каб}} = A_{\text{эзд}} + A_{\text{эзв}}$, эксплуатационный запас долговечности $A_{\text{эзд}}$, рассчитываемый по формуле:

$$A_{\text{эзд}} = 0.01 * L * \left(-T/25 \right), \quad (12)$$

где

L - длина ЭКУ, км, T - время эксплуатации ВОЛП, год, 25 - срок службы ОК, год; эксплуатационный запас на ремонтные вставки $A_{\text{эзв}}$, рассчитываемый по формуле:

$$A_{\text{эзв}} = p * 2 \alpha_{\text{нс}} \sqrt{L/100}, \quad (13)$$

где

$p = 0,2$ – средняя плотность повреждений на 100 км подземных ВОЛП и ВОЛП с ОКГТ, подвешенным на опорах ВЛ с напряжением 110 кВ,

$p = 0,1$ – средняя плотность повреждений на 100 км ВОЛП с ОКГТ, подвешенным на опорах ВЛ с напряжением 220 кВ и более;

A_D – значение запаса энергетического потенциала на дисперсию, дБ, берется из технических условий (контрактных спецификаций) ВОСП,

ΔA – значение абсолютной погрешности измерения затухания, дБ, берется из технического описания применяемого измерительного прибора.

Требования к распределению значений потерь в сростках ОВ на номинальной рабочей длине волны 1,3 мкм или 1,55 мкм. Распределение потерь в неразъемных соединениях ЭКУ, определяемое для каждого волокна по отдельности, должно соответствовать требованиям, заданным в табл. 10. 5.

Таблица 10.5. Распределение потерь в неразъемных соединениях ЭКУ

Длина волны λ , мкм	Потери $A_{\text{нс}}$, дБ, не более, в %-тах неразъемных соединений	
	100	50
1,3	0,2	0,1
1,55	0,1*	0,05
* В исключительных случаях допускается максимальное значение потерь на стыке не более 0,15 дБ, если меньшее значение не достигнуто после трех повторений сварки. При этом в монтируемой муфте на кассете должен остаться запас оптического волокна из трех витков.		

Значение потерь для каждого неразъемного соединения $A_{\text{нс}}$ определяется как среднее арифметическое результатов измерений оптическим рефлектометром с двух сторон ЭКУ.

Требования к локальной неоднородности оптического волокна внутри строительной длины на номинальной рабочей длине волны 1,55 мкм. Локальная неоднородность оптического волокна внутри строительной длины на ЭКУ должна быть не более 0,1 дБ.

Норма оптических потерь в рабочем диапазоне частот при спектральном уплотнении ОВ. Затухание ЭКУ на длинах волн 1530, 1540, 1550, 1560, 1570, 1580, 1590, 1600 и 1610 нм, измеренное между точками S и R, не должно быть более допустимого значения, определяемого по формуле:

$$A = P_{\text{out}}(\lambda_i) - P_{\text{in}}(\lambda_i) - A_{\text{каб}} - \Delta A, \quad (14)$$

где

$P_{\text{out}}(\lambda_i)$ – минимальный абсолютный уровень средней оптической мощности индивидуального канала, вводимой в ОВ ЭКУ на λ_i в конце срока службы ВОСП, дБм

$P_{\text{in}}(\lambda_i)$ – абсолютный уровень средней оптической мощности индивидуального канала на выходе ЭКУ на λ_i , дБм;

$A_{\text{каб}}$ – эксплуатационный запас энергетического потенциала ВОСП для кабеля, дБ.

Затухание ЭКУ на длине волны телеконтроля 1410, 1480, 1510, 1625 или 1650 нм измеряется, но не нормируется.

Хроматическая дисперсия КСР на номинальной рабочей длине волны 1,55 мкм, D_{ch} - не должна быть более допустимого значения, определяемого по формуле:

$$D_{ch} = k_D * L_{крс} * \Delta\lambda, \quad (15)$$

где

k_D - максимальное значение коэффициента хроматической дисперсии, указанное в паспорте-сертификате данного ОВ, пс/(нм*км);

$L_{крс}$ - длина КСР, км;

$\Delta\lambda$ - ширина спектра источника оптического излучения.

Поляризационная модовая дисперсия ЭКУ. $D_{пмд}$ на номинальной рабочей длине волны 1,55 мкм не должна быть более допустимого значения, определяемого по формуле:

$$D_{пмд} = k_{пмд} * L_{крс}^{0,5}, \quad (16)$$

где

$k_{пмд}$ - максимальное значение коэффициента поляризационной модовой дисперсии данного типа ОВ, пс/км^{0,5},

$L_{крс}$ - длина КСР, км.

Рекомендации по проведению приемо-сдаточных измерений ЭКУ и КСР. Приемо-сдаточные измерения производятся в полном объеме на всех элементарных кабельных участках сооружаемой волоконно-оптической линии передачи.

Измерения производятся на ЭКУ, образуемых из действующих, резервных и свободных ОВ.

Относительное и абсолютное значения оптических потерь, распределение значений потерь в сростках и локальная неоднородность ОВ измеряются оптическим рефлектометром по методике, изложенной в его инструкции по эксплуатации.

Оптический рефлектометр должен обладать техническими характеристиками не хуже приведенных в табл. 10.7.

Измерение ЭКУ рефлектометром производится с двух сторон. Результат измерения определяется по усредненной рефлектограмме. Технологические измерения в процессе монтажа ЭКУ целесообразно проводить при помощи линейных рефлектометров с динамическим диапазоном от 20 дБ.

Здесь уместно высказаться о необходимости измерения оптических параметров ЭКУ спектральным рефлектометром. Нормы, приведенные выше, гарантируют достижение в оптическом линейном тракте вероятности ошибки не более 10^{-10} .

Таким образом, они, с одной стороны, необходимы и достаточны, а с другой, - минимизируют затраты на проведение приемо-сдаточных измерений (ПСИ). Включение в перечень ПСИ испытаний оптических волокон спектральным рефлектометром существенно увеличит затраты на ПСИ, не добавив значимой информации об испытываемом объекте.

В этом случае, спектральный рефлектометр должен использоваться как стационарный прибор для отладки технологии производства ОК и периодической проверки качества оптического кабеля на заводе в процессе производства (при возникновении сомнений в стабильности технологии изготовления кабеля).

Оптические потери в рабочем диапазоне частот при спектральном уплотнении ОВ и затухание ЭКУ на длине волны телеконтроля измеряются методом разности уровней с

помощью источника оптической мощности с перестраиваемой длиной волны и измерителя уровня оптической мощности с соответствующими измеряемой длине волны оптическими фильтрами.

Таблица 10.7. Техническими характеристиками рефлектометр

Характеристика	Значение
Рабочая длина волны, нм	1300; 1550
Динамический диапазон измеряемых значений затухания при отношении сигнала к средне - квадратическому значению шума равном 1, дБ, при длине волны: 1300±20 нм 1550±20 нм	37 или $A_{SR} + 2$ 35 или $A_{SR} + 2$, где A_{SR} – затухание ЭКУ
Измеряемая длина, км, при длине волны: 1300±20 нм 1550±20 нм	100 175
Погрешность измерения затухания (относительная нелинейность вертикальной шкалы рефлектометра) %, не более	5
Диапазон изменения устанавливаемого значения показателя преломления	1,4000 – 1,6000
Точность установки показателя преломления	0,0001
Погрешность по длине на ЭКУ, %	0,01
Минимальная мертвая зона, м	40
Разрешающая способность по вертикали, дБ	0,001

Измерительный комплект должен обладать техническими характеристиками не хуже приведенных в табл. 10. 8.

Измерение хроматической дисперсии производится методом амплитудной модуляции специализированным комплектом приборов с относительной погрешностью не более 10 %.

Измерение поляризационной модовой дисперсии производится при помощи интерферометрического метода специализированным комплектом приборов с относительной погрешностью не более 10 %.

Таблица 10.8. Технические характеристики измерительного комплекта

Характеристика	Значение
Диапазоны измеряемых длин волн, нм	1310 – 1350 1530 – 1650
Точность установки измеряемой длины волны, нм	0,1
Уровень оптической мощности, дБм	0; +10
Стабильность выходного уровня во времени, дБм	±1
Погрешность измерения затухания, %	5
Разрешающая способность по уровню, дБм	0,01

Перечень необходимых исходных данных для нормирования ЭКУ и КСР приведен в табл. 10.9.

Таблица 10.9. Перечень необходимых исходных данных для нормирования ЭКУ и КРС

Характеристика	Условное обозначение	Размерность
Оптический кабель		
Среднее значение коэффициента затухания на номинальной длине волны ($\lambda = 1,3$ мкм или $\lambda = 1,55$ мкм)	$\bar{\alpha}$	дБ/км
Среднее квадратическое отклонение коэффициента затухания на номинальной длине волны	$\sigma(\alpha)$	дБ/км
Максимальное отклонение коэффициента затухания в используемом диапазоне длин волн от среднего значения на номинальной длине волны	$\Delta\alpha$	дБ/км
Максимальное увеличение затухания оптического волокна в подвесных кабелях при низких температурах (от минус 50 до минус 60 °С)	$\delta\alpha$	дБ/км
Коэффициент поляризационной модовой дисперсии на номинальной длине волны для каждого ОВ каждой строительной длины ОК на номинальной длине волны	$K_{\text{ПМД}}$	пс/ $\sqrt{\text{км}}$
Среднее квадратическое отклонение коэффициента ПМД для нормального распределения с нулевым средним в партии кабеля, поставляемой в один адрес	$\sigma(K_{\text{ПМД}})$	пс/ $\sqrt{\text{км}}$
Максимальное значение коэффициента хроматической дисперсии на номинальной длине волны	K_D	пс/нм* км
Номинальная строительная длина	l	км
Система передачи		
Минимальный абсолютный уровень средней оптической мощности индивидуального канала, вводимой в ОВ ЭКУ на λ_i в конце срока службы ВОСП	$P_{\text{ош}}(\lambda_i)$	дБм
Абсолютный уровень средней оптической мощности индивидуального канала на выходе ЭКУ на λ_i	$P_{\text{ин}}(\lambda_i)$	дБм
Коэффициент шума оптического усилителя	NF	дБ
Эксплуатационный запас энергетического потенциала ВОСП для кабеля	$A_{\text{каб}}$	дБ
Эксплуатационный запас энергетического потенциала ВОСП, учитывающий уменьшение амплитуды оптического сигнала за счет дисперсии	A_D	дБ
Общие допустимые оптические потери на ЭКУ в конце срока службы ОК	A_S	дБ
Логарифмическое отношение сигнал/шум, соответствующее вероятности ошибки 10 ⁻¹²	R_{NS}	дБ
Максимальное допустимое значение потерь разъемных соединений	$A_{\text{рс}}$	дБ
Динамический диапазон приемника оптического сигнала	$A_{\text{дд}}$	дБ
Ширина спектра источника оптического излучения	$\Delta\lambda$	нм
Максимальное допустимое значение дисперсии на регенерационном участке	D_{max}	пс
Измерительные приборы		
Погрешность измерительного прибора, измеряющего затухание ЭКУ	ΔA	дБ
Погрешность измерения мощности светового сигнала на выходе источника оптического излучения	M_{out}	%
Погрешность измерения мощности светового сигнала на входе оптического приемника	M_{in}	%
Технология строительства		
Среднее значение оптических потерь сварных соединений	$\bar{A}_{\text{нс}}$	дБ
Среднее квадратическое значение оптических потерь сварных соединений	$\sigma_{\text{нс}}$	дБ

Вопросы для самоконтроля.

1. Что такое элементарный кабельный участок (ЭКУ)?
2. Что называется кабельной секцией регенерации (КСР)?
3. В чем заключаются особенности нормирования ЭКУ и КСР ВОСП со спектральным уплотнением?
4. Рекомендации по проведению приемо-сдаточных измерений ЭКУ и КСР

Список используемых источников

1. Федеральный закон: Выпуск 86. О связи. – М.: Инфра. –М, 2003.
2. Слепов Н.Н. Технология разреженных систем WDM (CWDM). Особенности и применение. Технологии и средства связи №1, 2007.
3. Слепов Н. Особенности современной технологии WDM // Электроника: НТВ. 2004. № 6.
4. Слепов Н.Н. Особенности, проблемы и перспективы разреженных систем WDM (CWDM) // Электроника: НТВ. 2004. № 7. С. 56-59.
5. Слепов Н.Н. Современные технологии цифровых оптоволоконных сетей связи. 2-е испр.// изд. - М.: Радио и связь, 2003.
6. Слепов Н.Н. Фотонно - кристаллическое волокно - уже реальность // Электроника: НТВ. 2004. № 5. С. 80-84.
7. Слепов Н.Н. Оптическое мультиплексирование с разделением по длине волны // Сети, 1999, №4, – с. 24 – 31.
8. Цифровые и аналоговые системы передачи: Учебник для вузов/ Иванов В.И., Гордиенко В.Н., Попов Г.Н. и др.; Под ред. В.И. Иванова, 2 –е изд. -М.: Горячая линия – Телеком, 2003.-232с.: ил
9. Оптические системы передачи: Учебник для вузов/ Б.В.Скворцов, В.И.Иванов, В.В. Крухмалев и др.; Под ред. В.И.Иванова. - М.: Радио и связь, 1994.-224 с ил.
10. Иванов В.И., Адамович Л.В. Волоконно – оптические системы передачи. Учебное пособие/ - Самара: Самарский региональный телекоммуникационный трейнинг центр, 2007. -137с.: ил.
11. ITU-T G.694.2. Spectral grids for WDM applications: CWDM wavelength grid (6.02).
12. Hinderthur H., Friedric L. WDM hybrid transmission based on CWDM plus DWDM // Lightwave Europe. July 2003. P. 9-12.
13. ITU-T G.692. Optical interfaces for multi-channel systems with optical amplifiers (10.98, Corr. 1,2-6.02).
14. Bautista J., Shine B. Untangling the wavelength Web: Separating DWDM Channels with Interleaves // Photonics Spectra. February 2001. P. 90-92.
15. Jun- Ichi - Kani et. al. Triple-wavelength-band WDM transmission technologies. - OFC-2002, Anaheim, Paper TuR5, p. 122-123,
16. Borella A., Cancelleri G., Chiaraluce F. Wavelength Division Multiple Access Optical Networks. - Artech House. Boston-London. 1998.
17. CWDM Technology and Applications. White Paper WP011, CIENA Corporation, 2004, p. 1-9.
18. ITU-T G.695. Optical Interfaces for Coarse Wave-length Division Multiplexing Applications (2.04).

19. РД 45.286-2002, «Аппаратура волоконно-оптической системы передач со спектральным разделением. Технические требования».
20. Light Reading News, «CWDM Gets a Boost», 05.11.2003.
21. Б.К.Чернов, И.С. Каминецкий. Технология грубого спектрального уплотнения CWDM // Lightwave Russian edition №2, 2004.
22. В.Никитин. Оптимальный вариант транспортной среды //БДИ, №2(59), апрель 2005.
23. Хеннинг Хиндертюр, Ларс Фридрих. От грубого мультиплексирования к точному // LAN №06/2004.
24. А.М. Меккель. Перспективы развития магистральных транспортных сетей // IKS online №6.2005.
25. В.Таценко, А.Шишов. Системы со спектральным уплотнением каналов (системы WDM и DWDM) в волоконно-оптических системах передачи информации (ВОСПИ). Часть 2.// Теле - Спутник - 2(100), Февраль 2004 г.
26. Дианов Е. М. От тера-эры к пета – эре. //Вестник Российской Академии Наук, том 70, № 11, с. 1010-1015, 2000 г.
27. Погорелый Л., Никитченко Ю. Одномодовые оптические кабели и волокна на сетях связи// «Энергосвязь» № 3 (40) 2008.
28. Багаветдинов Д.Н., Миронов С.А. Расчет помехоустойчивости участка ВОЛС с оптическими усилителями.//fpro.ifmo.ru/kmu/kmu6/ВЫПУСК_4/Ready_инф_телеком.
29. Фриман Р. Волоконно-оптические системы связи.// - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Техносфера, 2006. - С. 512.
30. А.Ю.Цым, В.С.Ромбро. Принципы нормирования элементарных кабельных участков и кабельных секций регенерации ВОСП со спектральным уплотнением.// На сайте www.asvoweb.ru.
31. Andre Girard, EXFO "Технология и тестирование систем WDM".13-12-2001
Перевод ТЕЛЕКОМ ТРАНСПОРТ, 2001.
32. В. Дураев, А. Казаков, С. Медведев. Полупроводниковый оптический усилитель.//«Новая Лазерная Техника» (Нолатех), nolatech@mail. Ru
33. Убайдуллаев Р.Р. Волоконно-оптические сети.// – М.: ЭКО-ТРЕНДЗ, 1998. – 267 с.
34. Иванов А.Б. Волоконная оптика. Компоненты, системы передачи, измерения.// – М.: SYRUS SYSTEMS, 1999. – 671 с.
35. Слепов Н.Н. Современные технологии цифровых оптоволоконных сетей связи (АТМ, РДН, SDH, SONET и WDM).// – М.: Радио и связь, 2000. – 468 с.
36. Волоконно-оптическая техника: история, достижения, перспективы. Сб. статей под ред. Слепова Н.Н., Дмитриева С.А. //– М.: Connect. 2000, - 376 с.

37. Заславский К.Е. Волоконно-оптические системы передачи (ВОСП). Учебное пособие. Часть 1.// – Новосибирск, НЭИС, 1994. – 76 с.
38. Заславский К.Е. ВОСП. Учебное пособие. Часть 2.//– Новосибирск СибГАТИ, 1995,- 68 с.
39. Заславский К.Е. ВОСП. Учебное пособие. Часть 3./ – Новосибирск СибГАТИ, 1995,- 62 с.
40. Скляров О.К. Современные волоконно-оптические системы передачи. Аппаратура и элементы.// – М.: Солон-Р, 2001. – 237 с.
41. Нормы на электрические параметры цифровых каналов и трактов магистральной и внутризональных первичных сетей. Приказ №92 Министерства связи Российской Федерации от 10.08.96. М.: МС РФ, 1996. – 105 с.
42. Инструкция по паспортизации ВОЛС с использованием ЦСП СЦИ (первая редакция). – М.:ГЦУМС, 1997, - 26 с.
43. Слепов Н.Н. Оптические волновые конверторы и модуляторы // Электроника: НТБ, 2000, №6, – с. 6 – 10.
44. Заркевич Е.А., Скляров О.К., Устинов С.А. Приоритеты и тенденции развития волоконно-оптической связи // Электросвязь, 2000, №5. – с. 7 – 11.
45. Черемискин И.В., Чехлова Т.К. Волноводные оптические системы спектрального мультиплексирования / демультимплексирования // Электросвязь, 2000, №2, – с. 23 – 29.
46. Крейкин Р.Б., Цым А.Ю. Спектральное уплотнение оптических кабелей на транспортной сети ОАО "Ростелеком" // Электросвязь, 2000, №8, – с. 12 – 16.
47. Полунин А. Магистральные сети: быстрее, еще быстрее....Обзор оборудования SDH и DWDM// Журнал сетевых решений / LAN, июль – август 2001,-с.44-51.
48. ITU-T Recommendation G.955. Digital line systems based on the 1544 kbit/s and the 2048 kbit/s hierarchy on Optical Fibre Cables. (11/96)
49. ITU-T Recommendation G.651. Characteristics of 50/125 mkm Multimode Graded Index Optical Fibre Cable. (03/93)
50. All-Optical Wavelength Conversion : Technologies and Applications in DWDM Networks// IEEE Commun. Mag. 2000, march, - p. 86-89.
51. Скляров О.К. Волоконно-оптические сети и системы связи. //-М.: СОЛОН-Пресс, 2004.- 272с.
52. Фриман Р. Волоконно-оптические системы связи. //- М.: Техносфера, 2003. -440с.
53. Андрэ Жирар. Руководство по технологии и тестированию систем WDM. –М.: EXFO, 2001.-252с.
54. Рекомендация ITU-T G.665 (01/2005). Типовые характеристики рамановских усилителей и рамановских усилительных систем.
55. Наний О.Е. Фотонно-кристаллические волокна// Lightwave Russian edition, 2004, №3. -С. 47-53.

56. Курков А.С., Наний О.Е. Эрбиевые волоконно-оптические усилители// Lightwave Russian edition, 2003, №1. -С. 14-19.
57. Masafumi Koga, Toshio Morioka. Next Generation Optical Communication Technologies for Realizing Bandwidth Abundant Networking Capability// Optical revive, vol. 11, 2004, №2. 87-97.
58. Yutaka Miyamoto, Akira Hirano, Novel Modulation and Detection for Bandwidth-Reduced RZ Formats Using Duobinary-Mode Splitting in Wideband PSK/ASK Conversion// Journal of Lightwave Technology, 12, December, 2002. pp. 2067-2078.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
1. Принципы построения ВОСП.....	7
2. Классификация WDM.....	20
3. Технология DWDM (плотные WDM).....	23
3.1 Частотный план систем DWDM.....	24
3.2 Эталонные цепи.....	30
3.3. Расчет помехоустойчивости участка ВОЛС с оптическими усилителями.....	32
4. Технология CWDM.....	38
4.1. Оборудование CWDM.....	42
5. Гибридные модели с использованием технологии CWDM.....	47
5.1. Гибридная модель частотного плана.....	47
5.2. Гибридная схема CWDM + DWDM.....	50
5.3. Применение технологии TDM в CWDM системах передачи.....	51
5.4. Особенности передачи TV сигнала в системах CWDM.....	53
5.5. Применение технологии CWDM при резервировании каналов связи.....	54
6. Пассивные компоненты системы WDM.....	57
6.1. Мультиплексоры и демультиплексоры.....	57
6.2. Соединение оптических волокон.....	69
6.3. Оптические аттенюаторы.....	73
6.5. Оптические ответвители (разветвители).....	76
6.6. Оптические изоляторы (вентили).....	78
6.7. Оптические кабели.....	79
7. Активные компоненты WDM.....	96
7.1 Оптические усилители.....	99
7.1.1. Эрбиевые волоконно оптические усилители (EDFA).....	97
7.1.2. Усилители на основе ОВ, использующих комбинационное рассеяние Рамана.....	105
8. Трансиверы (транспондеры).....	110
9. Оптический бюджет.....	130
10. Принципы нормирования элементарных кабельных участков и кабельных секций регенерации ВОСП со спектральным уплотнением.....	133
Список используемых источников.....	144