

Министерство образования и науки Российской Федерации
САРАТОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н. Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО

А.И. Конюхов

Оптические линии связи. Часть I. Основы теории волоконно-оптических сетей.

Учебное пособие по курсу "Телекоммуникационные устройства и системы". Рекомендовано УМ физического факультета СГУ в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся по направлению 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» и 03.03.02 «Физика».

Саратов 2018 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ЛИНИИ СВЯЗИ	6
1.1 Преимущества ВОЛС	7
1.2 Недостатки ВОЛС	8
1.3 Временное мультиплексирование	10
1.4 Волновое мультиплексирование	13
1.5 Общее описание систем DWDM	14
1.6 Сравнение TDM и WDM	15
1.7 Стандартизация DWDM	16
2 ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ВОЛОКОННЫХ ЛИНИЙ СВЯЗИ	19
2.1 Оптическое волокно	19
2.2 Передающие оптоэлектронные модули	33
2.3 Приемные оптоэлектронные модули	39
2.4 Фильтры	44
2.5 Мультиплексоры и демультиплексоры	45
2.6 Оптические усилители	52
2.7 Волновые конвертеры	63
2.8 Оптические коммутаторы	64
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	67
ЛИТЕРАТУРА	70

ВВЕДЕНИЕ

Уровень современной цивилизации определяется объемом передаваемой и перерабатываемой информации. XXI век станет веком всеобъемлющей информатизации общества. Это уже сейчас подтверждается бурным развитием информационных технологий, созданием глобальных сетей связи и телекоммуникаций, становлением и развитием всемирной компьютерной сети Internet, обусловившей взрывной рост спроса на объемы передаваемой информации. По имеющимся в литературе данным только за четыре последних года трафик сети Internet увеличился в 30 раз, а потребности в полосе частот (или скорости передаваемой информации) возрастают еще быстрее. Аналогичные прогнозы в этом направлении существуют и на ближайшие годы.

Этот информационный бум напрямую связан с экономическим развитием общества. Как показывают аналитические исследования американских специалистов, увеличение национального валового продукта в 2 раза требует 4-х кратного увеличения объема передаваемой информации. В настоящее время речь идет о практической реализации и использовании терабитных каналов связи и передачи информации. Единственной передающей средой, способной обеспечить такие информационные потоки, является оптическое волокно.

Рост потребностей в увеличении объемов связи как с точки зрения увеличения скорости передачи информации, так и охвата новых регионов привел к появлению и становлению новых волоконно-оптических технологий, в частности технологий спектрального (частотного) мультиплексирования (уплотнения) каналов, получивших название WDM- и DWDM-технологий. WDM (Wavelength Division Multiplexing) означает мультиплексирование с разделением по длинам волн, DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) - плотное мультиплексирование с разделением по длинам волн.

Эти технологии позволяют в сотни раз увеличить пропускную способность волоконно-оптических каналов и сетей связи; их применение, вместе с технологиями временного уплотнения (TDM - Time Division Multiplexing), позволило в последнее время достичь терабитных скоростей передачи информации по одному оптическому волокну.

Первоначально спектральное уплотнение было использовано в достаточно протяженных ВОЛС, связывающих отдельные крупные фрагменты локальных сетей, где возникла необходимость увеличения пропускной способности линии без дополнительной прокладки волокна. В дальнейшем, с ростом потребностей в информационных услугах и с возникновением по этой причине перегрузок в локальных сетях, которые могут постоянно

изменяться по всей сети, DWDM начала применяться и на других уровнях локальных сетей. В частности, в настоящее время за рубежом DWDM начинает достаточно широко применяться и во внутригородских локальных сетях. Большие перспективы имеет DWDM для применения в волоконно-оптических сетях передачи данных, использующих Internet Protocol (IP). Внедрение DWDM, наряду с наблюдающимся в последнее время бурным развитием работ по оптическим переключателям, позволяет надеяться на создание в ближайшем будущем полностью оптических сетей (AON - All-Optical Networks) передачи данных, в том числе и в Internet, и потенциальное снижение стоимости обмена информацией для пользователей. Снижение цен для пользователя в конечном счете должно поддерживать этот процесс и в дальнейшем.

Наибольшее распространение 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. Возможность DWDM интегрироваться с ATM, IP, ADSL (xDSL) и другими перспективными технологиями и протоколами передачи цифровой информации делает ее незаменимой в процессе конвергенции между различными видами и службами связи. В то же время DWDM-технология пригодна и для сетей будущего.

Бурный рост услуг в области передачи данных заставляет провайдеров услуг, для того чтобы преуспеть на сегодняшнем сверхконкурентном рынке, увеличивать размеры и область действия своих сетей. Такое расширение сетей продолжает идти ускоряющимися темпами, что приводит не только к увеличенному вводу в действие элементов сетей передачи данных, но и к беспрецедентному росту магистральных транспортных сетей. Этот рост выявил наличие в магистральных транспортных сетях узких мест, связанных с полосами пропускания и ограничивающих улучшение работы этих сетей. Реакция на это состояла в увеличении пропускной способности именно в этих местах. Сначала узкие места были связаны с исчерпанием возможностей оптического волокна. Как известно, по каждому волокну в сети обычно распространяется сигнал лишь на одной длине волны. С помощью таких технологических достижений, как DWDM-технология, одно оптическое волокно может теперь пропускать свыше ста сигналов на различных длинах волн; при этом дополнительную пропускную способность можно обеспечить буквально везде, где потребовались бы дополнительные оптические волокна.

Применение DWDM-технологии привело к появлению многоволновой передачи, или

«виртуальных волокон». При этом обеспечивалась громадная экономия средств по сравнению со стоимостью увеличения пропускной способности путем увеличения числа физических волокон. Некоторое DWDM-оборудование настолько интеллигентно, что оно может обеспечивать распределенную систему управления, позволяющую контролировать распространение различных длин волн от одного конца линии «точка-точка» до другого. Такой вид управления передачей является важной сетевой характеристикой. В то время имеется необходимость регулирования, в сетевом масштабе, и полосы пропускания. На сегодняшний день регулирование полосы пропускания осуществляется с помощью элементов, которые могут заниматься только одной длиной волны. Таким образом, в настоящее время эффекта масштаба в отношении регулирования полос пропускания не существует. Число сетевых элементов, необходимых для регулирования пропускной способности, возрастает по линейному закону вместе с увеличением самой пропускной способности. DWDM-технология сделала это соотношение предельно ясным.

DWDM является продолжением и развитием уже известных методов преобразования сигнала при его передаче по ВОЛС. В частности, широкое распространение в настоящее время получило оборудование синхронной цифровой иерархии (SDH - Synchronous Digital Hierarchy). В системном плане технология SDH является стандартом Международного союза электросвязи (ITU-T - International Telecoms Union-Telecoms). Эквивалентной технологией в США, которая стандартизована Американским национальным институтом стандартизации (ANSI) является технология SONET (Synchronous Optical NETwork). И SDH и SONET разрабатывались для обеспечения широкого набора услуг связи и, прежде всего, широкополосной ISDN (Integrated Services Digital Network). Технология SDH обеспечивает передачу цифрового трафика на фиксированных скоростях от 2 Мбит/с до 10 Гбит/с. Технология DWDM на сегодняшний день позволяет передавать широкополосный сигнал со скоростью от 2,5 до 160 Гбит/с. В дальнейшем верхний предел скорости передачи может быть существенно увеличен. Таким образом, технология SDH и DWDM являются взаимодополняющими, возможности которых по пропускной способности перекрываются в диапазоне скоростей передачи от 2,5 до 10 Гбит/с. Если необходима пропускная способность сети, лежащая на нижней границе диапазона скоростей передачи, то оборудование SDH оказывается даже более эффективным. В будущем оптическая сетевая инфраструктура совместимая с IP-протоколом должна обеспечивать подключение низкоскоростных периферийных каналов и трактов к высокоскоростным и сверхвысокоскоростным национальным и международным опорным сетям. В этом случае SDH-оборудование будет играть решающую роль и останется наиболее эффективным для организации линий передачи с относительно невысокой пропускной способностью.

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 (Plesiochronous Digital Hierarchy) обеспечит гибкий и безболезненный переход к полностью IP-совместимым сетям. Такой сценарий развития удовлетворяет требованиям, как к функциональности, так и к пропускной способности сетей.

Практическое использование оборудования DWDM постоянно расширяется в связи с быстрым развитием сетей связи всех уровней. Прежде всего, оно применяется не для создания новых волоконно-оптических сетей, а для модернизации и расширения существующих сетей в целях существенного повышения их пропускной способности и доступности.

В данном учебном пособии представлен обзор существующих технологических решений, необходимых для разработки новых элементов, а также выяснение перспектив применения DWDM-технологии на практике.

1. ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ЛИНИИ СВЯЗИ

Волоконно-оптическая линия связи (ВОЛС) - это вид системы передачи, при котором информация передается по оптическим диэлектрическим волноводам, известным под названием «оптическое волокно». Волоконно-оптическая сеть - это информационная сеть, связывающими элементами между узлами которой являются волоконно-оптические линии связи. Технологии волоконно-оптических сетей помимо вопросов волоконной оптики охватывают также вопросы, касающиеся электронного передающего оборудования, его стандартизации, протоколов передачи, вопросы топологии сети и общие вопросы построения сетей.

Передача информации по ВОЛС имеет целый ряд достоинств перед передачей по медному кабелю. Стремительное внедрение в информационные сети оптических линий связи является следствием преимуществ, вытекающих из особенностей распространения сигнала в

оптическом волокне.

1.1 Преимущества ВОЛС

Широкая полоса пропускания - обусловлена чрезвычайно высокой частотой несущей 10^{14} Гц [1]. Это дает потенциальную возможность передачи по одному оптическому волокну потока информации в несколько терабит в секунду. Большая полоса пропускания - это одно из наиболее важных преимуществ оптического волокна над медной или любой другой средой передачи информации.

Малое затухание светового сигнала в волокне. Малое затухание и небольшая дисперсия позволяют строить участки линий без ретрансляции протяженностью до 100 км и более.

Низкий уровень шумов в волоконно-оптическом кабеле позволяет увеличить полосу пропускания, путем передачи различной модуляции сигналов с избыточностью кода.

Высокая помехозащищенность. Поскольку волокно изготовлено из диэлектрического материала, оно невосприимчиво к электромагнитным помехам со стороны окружающих медных кабельных систем и электрического оборудования, способного индуцировать электромагнитное излучение (линии электропередачи, электродвигательные установки и т. д.). В многоволоконных кабелях также не возникает проблемы перекрестного влияния электромагнитного излучения, присущей многопарным медным кабелям.

Малый вес и объём. Волоконно-оптические кабели (ВОК) имеют меньший вес и объем по сравнению с медными кабелями в расчете на одну и ту же пропускную способность. Например, 900-парный телефонный кабель диаметром 7,5 см, может быть заменен одним волокном с диаметром 0,1 см. Если волокно «одеть» в множество защитных оболочек и покрыть стальной ленточной броней, диаметр такого ВОК будет 1,5 см, что в несколько раз меньше рассматриваемого телефонного кабеля [2, 3].

Высокая защищенность от несанкционированного доступа. Поскольку ВОК практически не излучает в радиодиапазоне, то передаваемую по нему информацию трудно прослушать, не нарушая приема-передачи. Системы мониторинга (непрерывного контроля) целостности оптической линии связи, используя свойства высокой чувствительности волокна, могут мгновенно отключить «взламываемый» канал связи и подать сигнал тревоги. Сенсорные системы, использующие интерференционные эффекты распространяемых световых сигналов (как по разным волокнам, так и разной поляризации) имеют очень высокую чувствительность к колебаниям, к небольшим перепадам давления [4]. Такие системы особенно необходимы при создании линий связи в правительственных, банковских и некоторых других специальных

службах, предъявляющих повышенные требования к защите данных.

Гальваническая развязка элементов сети. Данное преимущество оптического волокна заключается в его изолирующем свойстве. Волокно помогает избежать электрических земельных петель, которые могут возникать, когда два сетевых устройства неизолированной вычислительной сети, связанные медным кабелем, имеют заземления в разных точках здания, например на разных этажах. При этом может возникнуть большая разность потенциалов, что способно повредить сетевое оборудование. Для волокна этой проблемы просто нет.

Взрыво- и пожаробезопасность. Из-за отсутствия искрообразования оптическое волокно повышает безопасность сети на химических, нефтеперерабатывающих предприятиях, при обслуживании технологических процессов повышенного риска.

Экономичность ВОК. Волокно изготовлено из кварца, основу которого составляет двуокись кремния, широко распространенного, а поэтому недорогого материала, в отличие от меди. При этом ВОК позволяет передавать сигналы на значительно большие расстояния без ретрансляции. Количество повторителей на протяженных линиях сокращается при использовании ВОК.

Длительный срок эксплуатации. Со временем волокно испытывает деградацию. Это означает, что затухание в проложенном кабеле постепенно возрастает. Однако, благодаря совершенству современных технологий производства оптических волокон, этот процесс значительно замедлен, и срок службы ВОК составляет примерно 25 лет. За это время может смениться несколько поколений/стандартов приемо-передающих систем.

Удаленное электропитание. В некоторых случаях требуется удаленное электропитание узла информационной сети. Оптическое волокно не способно выполнять функции силового кабеля, однако, в этих случаях можно использовать смешанный кабель, когда наряду с оптическими волокнами кабель оснащается медным проводящим элементом. Такой кабель широко используется как в России, так и за рубежом.

Несмотря на многочисленные преимущества перед другими способами передачи информации, волоконно-оптические системы имеют также и недостатки, главным образом из-за дороговизны прецизионного монтажного оборудования и надежности лазерных источников излучения. Многие из недостатков вероятнее всего будут нивелированы с приходом новых конкурентоспособных технологий в волоконно-оптические сети.

1.2 Недостатки ВОЛС

Стоимость интерфейсного оборудования. Электрические сигналы должны преобразовываться в оптические и наоборот. Цена на оптические передатчики и приемники

остается пока еще довольно высокой. При создании оптической линии связи также требуются высоконадежное специализированное пассивное коммутационное оборудование, оптические соединители с малыми потерями и большим ресурсом на подключение- отключение, оптические разветвители, аттенюаторы.

Монтаж и обслуживание оптических линий. Стоимость работ по монтажу, тестированию и поддержке волоконно-оптических линий связи также остается высокой. Если же повреждается ВОК, то необходимо осуществлять сварку волокон в месте разрыва и защищать этот участок кабеля от воздействия внешней среды.

Требование специальной защиты волокна. Прочно ли оптическое волокно? Теоретически да. Стекло, как материал, выдерживает колоссальные нагрузки с пределом прочности на разрыв выше 1ГПа (10^9Н/м^2) [5]. Это, казалось бы, означает что волокно в единичном количестве с диаметром 125 мкм выдержит вес гири в 1 кг. К сожалению, на практике, это не достигается. Причина в том, что оптическое волокно, каким бы совершенным оно не было, имеет микротрещины, которые инициируют разрыв. Для повышения надежности оптическое волокно при изготовлении покрывается специальным лаком на основе эпоксиакрилата, а сам оптический кабель упрочняется, например нитями на основе кевлара (kevlar¹). Если требуется удовлетворить еще более жестким требованиям на ¹ разрыв, кабель может упрочняться специальным стальным тросом или стеклопластиковыми стержнями. Но все это влечет увеличение стоимости оптического кабеля.

Преимущества от применения волоконно-оптических линий связи настолько значительны, что несмотря на перечисленные недостатки оптического волокна, дальнейшие перспективы развития технологии ВОЛС в информационных сетях более чем очевидны.

Уникальные возможности оптических волокон передавать на огромные расстояния сигналы в суперширокой полосе частот, с одной стороны, и растущая потребность в повышении информационной емкости каналов связи, с другой, обусловили необходимость разработки методов мультиплексирования (уплотнения) информационных каналов и создания мультиплексных систем.

Первым методом мультиплексирования, который сразу же стал применяться в волоконно-оптических системах и сетях связи, явился метод временного мультиплексирования - TDM.

1 Kevlar - зарегистрированная торговая марка материала корпорации E.I. du Pont Nemours. Kevlar - неметаллический материал, выдерживающий большие нагрузки на растяжение.

1.3 Временное мультиплексирование

Эта технология 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, которые периодически повторяются. Например, в течение первого временного промежутка 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).



Рис.1 Схема временного разделения каналов в системе TDM.

Мультиплексор на одной стороне канала связи собирает данные со всех источников и передает их по волокну в течение соответствующих временных промежутков. Демультиплексор на другой стороне линии связи выделяет временные промежутки 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 приведены стандартные интерфейсы и соответствующие им скорости передачи иерархий SDH/SONET.

Таблица 1. Стандартные интерфейсы и соответствующие им скорости передачи

Оптический модуль SONET (Optical Carrier)	Синхронный транспортный модуль SDH (Synchronous Transport Module)	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

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 ITU) максимальная дальность передачи со скоростью 10 Гбит/с без компенсации и коррекции дисперсии составляет 50-75 км.

Дальнейшее увеличение скорости передачи с помощью технологии TDM требует разработки и внедрения исключительно сложных и дорогостоящих электронных компонентов. Вся стоимость их разработки ложится на плечи оптической промышленности, так как в других областях (например, компьютерные технологии) эти скорости еще не достигнуты. Точность синхронизации сигналов систем передачи, предъявляемые при модуляции тока лазеров, мультиплексировании и демуплексировании электрических сигналов на сверхвысоких частотах, очень высоки.

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 (ПМД), перекрестные помехи, и т. д.).

Несмотря на все трудности, скорость передачи в цифровых сетях связи постоянно

растет. В 1999 году была достигнута скорость 40 Гбит/с (уровень STM-256). Крупнейшие телекоммуникационные компании уже сообщили о проведении успешных лабораторных испытаний систем передачи со скоростью 40 Гбит/с на линиях связи протяженностью 100 км и более. Экспериментальные линии связи уровня STM-256 пока еще не в полном объеме поддерживают функции ввода и вывода каналов ADM (Add/Drop Multiplexing) и кросс-коммутации.

Ожидается скорое появление на рынке оборудования цифровых систем передачи SDH/SONET, обеспечивающих мультиплексирование потоков уровня STM-16 и STM-64 в высокоскоростные потоки уровня STM-256. По всей видимости, первые линии связи уровня STM-256 будут применяться в сетях городского и регионального масштаба. По мере увеличения дальности передачи и появления более совершенных методик компенсации различных негативных факторов линии связи уровня STM-256 будут находить все более широкое применение. Возможно, в некоторых случаях для увеличения дальности таких линий связи коммерчески более выгодно будет использовать регенерацию сигнала.

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. 2).

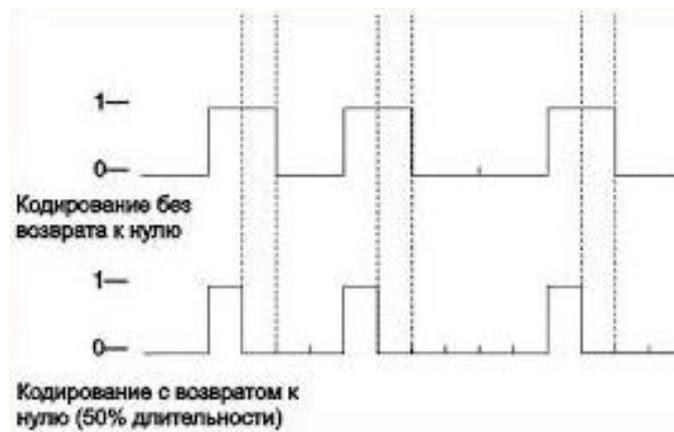


Рис. 2. Кодирование сигнала.

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.

1.4 Волновое мультиплексирование

В технологии WDM нет многих ограничений и технологических трудностей, свойственных TDM. Для повышения пропускной способности, вместо увеличения скорости передачи в едином составном канале, как это реализовано в технологии TDM, в технологии WDM увеличивают число каналов (длин волн), применяемых в системах передачи.

Рост пропускной способности при использовании технологии WDM осуществляется без дорогостоящей замены оптического кабеля. Применение технологии WDM позволяет сдавать в аренду не только оптические кабели или волокна, но и отдельные длины волн, то есть реализовать концепцию «виртуального волокна». По одному волокну на разных длинах волн можно одновременно передавать самые разные приложения - кабельное телевидение, телефонию, трафик Интернет, «видео по требованию» и т. д. Как следствие этого, часть волокон в оптическом кабеле можно использовать для резерва.

Применение технологии WDM позволяет исключить дополнительную прокладку оптических кабелей в существующей сети. Даже если в будущем стоимость волокна уменьшится за счет использования новых технологий, волоконно-оптическая инфраструктура (проложенное волокно и установленное оборудование) всегда будет стоить достаточно дорого.

Для ее эффективного использования, необходимо иметь возможность в течение долгого времени увеличивать пропускную способность сети и менять набор предоставляемых услуг без замены оптического кабеля. Технология WDM предоставляет именно такую возможность.

Технология WDM пока применяется в основном на линиях связи большой протяженности, где требуется большая полоса пропускания. Сети городского и регионального масштаба и системы кабельного телевидения потенциально также являются широким рынком для технологии WDM. Необходимость эффективно использовать проложенный кабель привела к значительному увеличению числа каналов, передаваемых по одному волокну, и уменьшению расстояния между ними. В настоящее время системы с частотным интервалом между каналами 100 ГГц ($\sim 0,8$ нм) и меньше называют системами плотного волнового мультиплексирования DWDM. Теоретически возможна передача в любом диапазоне длин волн, однако практические ограничения оставляют для использования в системах WDM узкий диапазон в окрестности длины волны 1550 нм. Но даже этот диапазон предоставляет огромные возможности для передачи данных.

Многочисленные преимущества систем DWDM отражаются на их цене. Во-первых, становятся исключительно важными многие свойства оптических компонентов и характеристики оптического кабеля. Во-вторых, требования к архитектуре сети и выбору компонентов систем WDM являются более жесткими, чем, например, для систем TDM уровня STM-16.

Совместное применение технологий TDM и WDM позволяет значительно расширить спектр предоставляемых услуг, оставляя практически без изменений большую часть имеющегося оборудования. Применение технологии WDM дает многочисленные преимущества, однако требует высокого уровня подготовки технического персонала и современного контрольно-измерительного оборудования.

1.5 Общее описание систем DWDM

Система DWDM во многом похожа на традиционную систему TDM. Сигналы разных длин волн, генерируемые одним или несколькими оптическими передатчиками, объединяются мультиплексором в многоканальный составной оптический сигнал, который далее распространяется по оптическому волокну. При больших расстояниях передачи на линии связи устанавливается один или несколько оптических повторителей. Демультимплексор принимает составной сигнал, выделяет из него исходные каналы разных длин волн и направляет их на соответствующие фотоприемники. На промежуточных узлах некоторые каналы могут быть добавлены или выделены из составного сигнала посредством мультиплексоров ввода/вывода

или устройств кросс-коммутации.

Главным отличием систем DWDM от систем TDM является то, что в системе DWDM передача ведется на нескольких длинах волн. Важно отметить, что на каждой длине волны в системе DWDM может передаваться мультиплексированный сигнал систем TDM.

Система DWDM в общем случае состоит из одного или нескольких лазерных передатчиков, мультиплексора, одного или нескольких усилителей EDFA, мультиплексоров ввода/вывода, оптического волокна (кабеля), демультиплексора и соответствующего числа фотоприемников, а также электронного оборудования, которое обрабатывает передаваемые данные в соответствии с используемыми протоколами связи, и системы сетевого управления.

1.6 Сравнение TDM и WDM

В принципе, технология TDM дает возможность передачи по линии связи каналов, разнородных по типу передаваемых данных. Технология TDM позволяет разделить волоконно-оптический кабель на множество каналов, по которым с различными скоростями передаются различные типы трафика. Возможны различные способы распределения выделенных промежутков времени. Они могут быть постоянно закреплены за определенными приложениями или выделяться по требованию DAMA (Demand Assignment Multiple Access). Можно изменять продолжительность выделенных временных промежутков или полностью их исключить. В последнем случае данные передаются в виде отдельных пакетов, каждый из которых включает адрес источника и отправителя (статистическое мультиплексирование). Несмотря на все эти возможности, технология TDM работает лучше всего, когда по всем логическим каналам передается один тип трафика, а все выделенные временные промежутки имеют одинаковую продолжительность и постоянно закреплены за отдельными каналами. Этот вариант технологии TDM достаточно прост в реализации и управлении, и его эксплуатационные издержки также меньше.

В технологии WDM каналы полностью независимы, а потому она дает большую гибкость, чем технология TDM. Технология WDM позволяет без каких-либо трудностей передавать по линии связи множество каналов, тип трафика и скорость передачи данных в каждом из которых могут существенно различаться. По различным каналам WDM в одном волокне может передаваться трафик Ethernet (10/100/1000 Мбит/с), цифровое видео и тестовые сигналы, и эта система будет легко управляться. Добавление новых каналов в существующую систему WDM не вызывает проблем и не требует заново распределять все временные промежутки, как в технологии TDM.

В технологии TDM пропускная способность увеличивается за счет увеличения

скорости передачи битов в линии связи. Насколько быстрой может быть сделана эта скорость - в пределах определенных фундаментальных ограничений оптического волокна - зависит от используемых электронных компонентов. Чтобы получать данные от каждого источника, хранить их, передавать в течение соответствующих временных промежутков, считывать и корректно доставлять получателю, требуется применение цифровых интегральных схем. Все эти цифровые компоненты должны работать со скоростью, равной или близкой к суммарной скорости передачи линии связи. То есть, для каждого канала, независимо от его пропускной способности, должно быть установлено электронное оборудование, способное поддерживать полную пропускную способность линии связи.

Оптическое волокно позволяет передавать данные со скоростью в несколько Тбит/с, в то время как коммерчески доступные цифровые электронные устройства в настоящее время выполняют лишь порядка 1 миллиарда операций в секунду (1 Гбит/с). Несмотря на то, что быстродействие электронных устройств продолжает расти, технология TDM всегда будет иметь экономические ограничения из-за необходимости установки на каждый канал самого современного оборудования. Едва ли с помощью технологии TDM когда-либо будет достигнута суммарная скорость передачи по линии связи, соизмеримая с огромной пропускной способностью волоконно-оптического кабеля. Это ограничение касается как глобальных, так и локальных сетей передачи данных.

Хотя к окончательному электронному оборудованию для отдельных каналов WDM и предъявляются определенные требования, как и в системах TDM, все остальное оборудование в канале может поддерживать только скорость передачи по этому каналу, а не полную скорость составного сигнала. Таким образом, полная пропускная способность линии связи не ограничена скоростью работы используемых электронных устройств. При необходимости, полную пропускную способность можно увеличить в любой момент, просто добавив в существующую систему WDM несколько каналов. Самую быструю линию связи TDM, которую только можно создать с использованием наиболее современной техники, в системе WDM можно передавать как один из многих каналов. Технология WDM позволяет достичь суммарной скорости передачи по линии связи, которая сопоставима с огромной пропускной способностью, предоставляемой оптическим волокном.

1.7 Стандартизация DWDM

Самым важным параметром в технологии плотного волнового мультиплексирования бесспорно является расстояние между соседними каналами. Стандартизация пространственного расположения каналов нужна, уже хотя бы по тому, что на ее основе можно

будет начинать проведение тестов на взаимную совместимость оборудования разных производителей. Сектор по стандартизации телекоммуникаций ИТУ-Т утвердил частотный план DWDM с расстоянием между соседними каналами 100 ГГц (ДА, = 0,8 нм), (табл. 2). В тоже время большие дебаты продолжают идти вокруг принятия частотного плана с еще меньшим расстоянием между каналами 50 ГГц (ДА = 0,4 нм). Без понимания того, какие ограничения и преимущества имеет каждый частотный план, операторы связи и организации, планирующие наращивание пропускной способности сети, могут столкнуться со значительными трудностями и излишними инвестициями.

Таблица 2. Частотный план ИТУ-Т

Частота, ГГц	Интервал, ГГц						Длина волны, нм
	100 (8 каналов и более)	200 (4 канала и более)	400 (только 4 канала)	400/500 (только 8)	600 (только 4 канала)	1000 (только 4 канала)	
196,1	X	X					1528,77
196,0	X						1529,55
195,9	X	X					1530,33
195,8	X						1531,12
195,7	X	X					1531,90
195,6	X						1532,68
195,5	X	X			X	X	1533,47
195,4	X						1534,25
195,3	X	X		X			1535,04
195,2	X						1535,82
195,1	X	X					1536,61
195,0	X						1537,40
194,9	X	X			X		1538,19
194,8	X			X			1538,98
194,7	X	X					1539,77
194,6	X						1540,56
194,5	X	X				X	1541,35
194,4	X						1542,14
194,3	X	X		X	X		1542,94
194,2	X						1543,73
194,1	X	X					1544,53
194,0	X						1545,32
193,9	X	X	X	X			1546,12
193,8	X						1546,92
193,7	X	X	X		X		1547,72
193,6	X						1548,51
193,5	X	X	X			X	1549,32
193,4	X			X			1550,12
193,3	X	X	X				1550,92
193,2	X						1551,72
193,1	X	X	X		X		1552,52
193,0	X			X			1553,33
192,9	X	X	X				1554,13
192,8	X						1554,94
192,7	X	X	X				1555,75
192,6	X						1556,55
192,5	X	X	X	X	X	X	1557,36
194,4	X						1558,17
192,3	X	X	X				1558,98
192,2	X						1559,79
192,1	X	X		X			1560,61

Сетка 100 ГГц. В табл. 2 показаны сетки частотного плана 100 ГГц с различной степенью разреженности каналов. Все сетки кроме одной 500/400 имеют равноудаленные каналы. Равномерное распределение каналов позволяет оптимизировать работу волновых конвертеров, перестраиваемых лазеров и других устройств полностью оптической сети, а также позволяет легче выполнять ее наращивание. Реализация той или иной сетки частотного плана во многом зависит от трех основных факторов: типа используемых оптических усилителей (кремниевое или фтор-цирконатного) скорости передачи на канал - 2,5 Гбит/с (STM-16) или 10 Гбит/с (STM-64), влияния нелинейных эффектов, причем все эти факторы сильно взаимосвязаны между собой.

Стандартные EDFA на кремниевом волокне имеют один недостаток - большую вариацию коэффициента усиления в области ниже 1540 нм (рис. 26), что приводит к более низким значениям соотношения сигнал/шум и нелинейности усиления в этой области. Одинаково нежелательны как сильно низкие, так и сильно высокие значения коэффициента усиления. С ростом полосы пропускания минимальное допустимое по стандарту соотношение сигнал/шум возрастает - так для канала STM-64 оно на 4-7 дБ выше, чем для STM-16. Таким образом, нелинейность коэффициента усиления кремниевое EDFA сильнее ограничивает размер зоны для мультиплексных каналов STM-64 (1540-1560 нм), нежели чем для каналов STM-16 и меньшей емкости (где можно использовать практически всю зону усиления кремниевое EDFA, несмотря на нелинейность).

Сетка 50 ГГц. Более плотный, пока не стандартизированный частотный план сетки с интервалом 50 ГГц позволяет эффективней использовать зону 1540-1560 нм, в которой работают стандартные кремниевые EDFA. Наряду с этим преимуществом, есть и минусы у этой сетки.

Во-первых, с уменьшением межканальных интервалов возрастает влияние эффекта четырехволнового смешивания, что начинает ограничивать максимальную длину межрегенерационной линии (линии на основе только оптических усилителей). Во-вторых, малое межканальное расстояние $\sim 0,4$ нм может приводит к ограничениям в возможности мультиплексирования каналов STM-64, (рис. 3). Как видно из рисунка, мультиплексирование каналов STM-64 с интервалом 50 ГГц не допустимо, поскольку тогда возникает перекрытие спектров соседних каналов [6]. Только если имеет место меньшая скорость передачи в расчете на канал (STM-4 и ниже), перекрытия спектров не возникает. В-третьих, при интервале 50 ГГц требования к перестраиваемым лазерам, мультиплексорам и другим компонентам становятся более жесткими, что снижает число потенциальных производителей оборудования, а также ведет к увеличению его стоимости. В настоящее время ведутся работы по созданию надежных

фтор-цирконатных EDFA, обеспечивающих большую линейность (во всей области 1530-1560 нм) коэффициента усиления. С увеличением рабочей области EDFA становится возможным мультиплексирование 40 каналов STM-64 с интервалом 100 ГГц общей емкостью 400 Гбит/с в расчете на волокно.

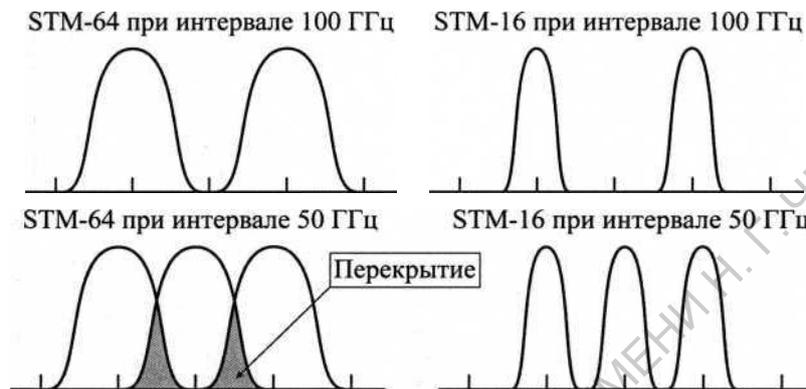


Рис. 3. Спектральное размещение каналов в волокне.

2 ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ВОЛОКОННЫХ ЛИНИЙ СВЯЗИ

2.1 Оптическое волокно

В середине 70-х годов двадцатого века после серии успешных экспериментов фирмой Coming¹ (США), была разработана технология получения оптического волокна (ОВ), обладающего потерями 4 дБ/км. Это было многомодовое (рис. 4) оптическое волокно с диаметром световедущей жилы 50 мкм, рассчитанное на работу в диапазоне длин волн 0,82-0,87 мкм. На его основе были созданы первые промышленные волоконно-оптические кабели, которые в ограниченном объеме начали применяться на практике для решения специализированных связных задач.

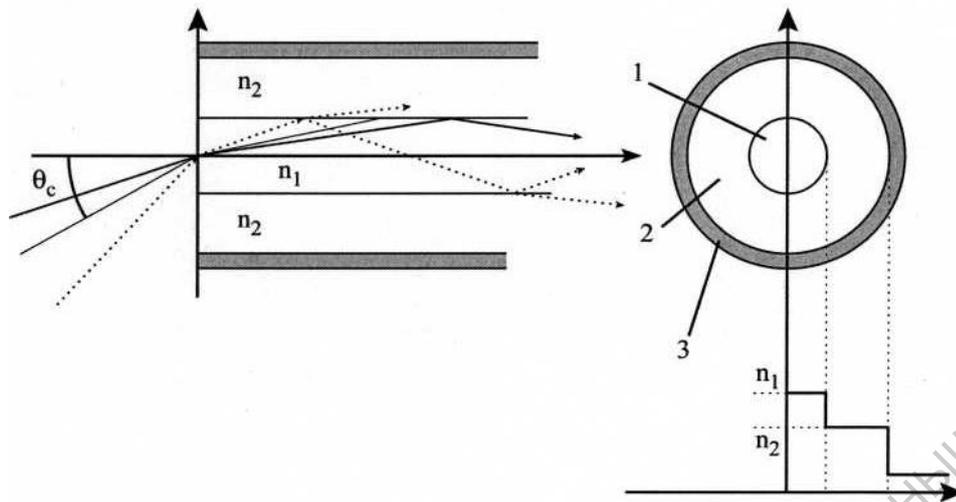


Рис. 4. Распространение света в многомодовом оптическом волокне со ступенчатым профилем показателя преломления.

Упрощенно, рис. 4, ОВ состоит из сердцевины (световедущей жилы) 1, оболочки 2 и защитной оболочки 3. Сердцевина и оболочка изготавливаются из кварцевых стекол с показателями преломления n_1 и n_2 соответственно, где $n_1 > n_2$. Известно, что луч света, падающий под углом θ на границу раздела двух сред с различными показателями преломления n_1 и n_2 испытывает явления преломления и отражения. В случае, когда $n_1 > n_2$ возможна ситуация, при которой свет полностью отразится от границы раздела, т. е. будет наблюдаться эффект полного внутреннего отражения. Условием возникновения этого эффекта является выполнение неравенства $\theta < \theta_c$, где θ_c - критический угол. Таким образом, луч света, введенный в сердцевину волокна под углом, меньшим критического, больше не покинет ОВ и будет распространяться по всей длине волновода. Такой луч получил название ведомой моды или просто моды. Величина $\sin\theta_c$ получила название числовой апертуры волокна (NA - Numerical Aperture).

Волокно характеризуется двумя важнейшими параметрами: затуханием и дисперсией. Чем меньше затухание (потери) и чем меньше дисперсия распространяемого сигнала в волокне, тем больше может быть расстояние между регенерационными участками или повторителями.

На затухание света в волокне влияют такие факторы, как: потери на поглощении; потери на рассеянии; кабельные потери.

Потери на поглощение и на рассеяние вместе называют *собственными потерями* ($\alpha_{\text{св}}$), в то время как кабельные потери в силу их природы называют также *дополнительными потерями*.

Потери на поглощении состоят как из собственных потерь в кварцевом стекле (ультрафиолетовое и инфракрасное поглощение), так и из потерь, связанных с поглощением света на примесях. Примесные центры, в зависимости от типа примеси, поглощают свет на определенных (присущих данной примеси) длинах волн и рассеивают поглощенную световую энергию в виде джоулева тепла. Даже ничтожные концентрации примесей приводят к появлению пиков на кривой потерь. Следует отметить характерный максимум в районе длины волны 1385 нм, который соответствует примесям ОН⁻. Этот пик присутствует всегда (исключение составляет волокно AllWave™ фирмы Lucent Technologies). Область спектра в районе этого пика ввиду больших потерь практически не используется.

Собственные потери на поглощении растут и становятся значимыми в ультрафиолетовой и инфракрасной областях. При длине волны излучения выше 1,6 мкм обычное кварцевое стекло становится непрозрачным из-за роста потерь, связанных с инфракрасным поглощением.

Потери на рассеянии. Уже к 1970 году изготавливаемое оптическое волокно становится настолько чистым (99,9999%), что наличие примесей перестает быть главенствующим фактором затухания в волокне. На длине волны 800 нм затухание составило 1,5 дБ/км. Дальнейшему уменьшению затухания препятствует так называемое рэлеевское рассеяние света. *Рэлеевское рассеяние* вызвано наличием неоднородностей микроскопического масштаба в волокне. Свет, попадая на такие неоднородности, рассеивается в разных направлениях. В результате часть его теряется в оболочке. Эти неоднородности неизбежно появляются во время изготовления волокна.

Потери на рэлеевском рассеянии зависят от длины волны по закону λ^4 и сильнее проявляются в области коротких длин волн.

Длина волны на которой достигается нижний предел собственного затухания чистого кварцевого волокна, составляет 1550 нм и определяется разумным компромиссом между потерями вследствие рэлеевского рассеяния и инфракрасного поглощения.

На рис. 5 приводится общий вид спектральной зависимости собственных потерь с указанием характерных значений четырех основных параметров (минимумов затухания в трех окнах прозрачности 850 нм (первое окно), 1310 нм (второе окно или S-диапазон), 1550 нм (третье окно или C-диапазон), и пика поглощения на длине волны 1385 нм) для современных одномодовых (SMF) и многомодовых (MMF) волокон.

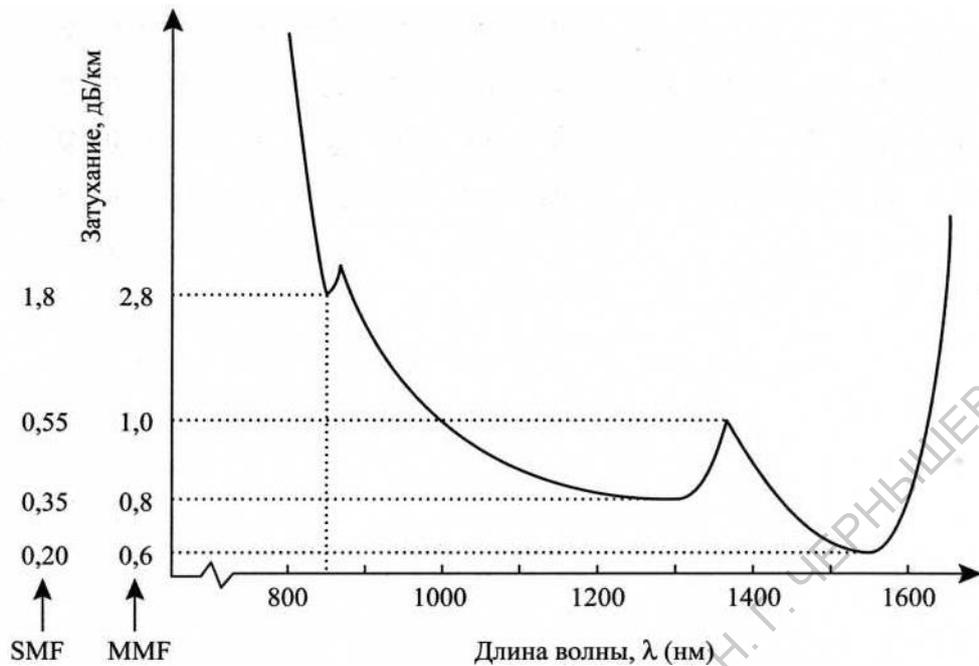


Рис.5 Собственные потери в оптическом волокне.

Кабельные (радиационные) потери обусловлены скруткой, деформациями и изгибами волокон, возникающими при наложении покрытий и защитных оболочек, производстве кабеля, а так же в процессе инсталляции ВОК. При соблюдении ТУ на прокладку кабеля номинальный вклад со стороны радиационных потерь составляет не больше 20% от полного затухания. Дополнительные радиационные потери появляются, если радиус изгиба кабеля становится меньше минимального радиуса изгиба, указанного в спецификации на ВОК.

Не принимая во внимание дисперсию, то есть искажение сигнала по мере распространения по волокну, рассмотрим потенциальные возможности волокна. Несмотря на большие ресурсы волокна, реализовать передачу на скорости 25 Тбит/с с помощью технологии TDM в настоящее время невозможно, поскольку соответствующая частота модуляции пока недостижима. Однако технология WDM позволяет увеличить пропускную способность волокна не за счет увеличения частоты модуляции (при наличии одной передающей длины волны - одной несущей), а за счет добавления новых длин волн (новых несущих). Единственное условие, которое необходимо выполнить - это исключение перекрытий между спектральными каналами. Интервал между соседними длинами волн должен быть больше ширины спектра излучения. Современные одномодовые лазеры с распределенным брэгговским отражением (DBR лазеры) дают спектральную полосу меньше 0,1 нм. Так при интервале 0,8 нм между соседними длинами волн в окне 1530-1560 нм, соответствующем рабочей области оптического усилителя EDFA, может разместиться около 40 длин волн - 40 каналов. Причем

полоса пропускания на каждый канал достигает 10 Гбит/с и более [7]. Технически реализованы оптические передатчики на основе TDM, способные вводить в волокно оптический сигнал с частотой 100 ГГц в расчете на один канал, в результате чего полная емкость одного волокна составляет 4 Тбит/с (при 40 каналах волнового уплотнения) [8]. Но передать такой сигнал на большие расстояния не просто. Одним из главных факторов, препятствующих этому, является дисперсия.

По оптическому волокну передается не просто световая энергия, но также полезный информационный сигнал. Импульсы света, последовательность которых определяет информационный поток, в процессе распространения расплываются. При достаточно большом уширении импульсы начинают перекрываться, так что становится невозможным их выделение при приеме.

Дисперсия вызывает уширение импульсов. В более узком смысле под этим термином понимается зависимость показателя преломления вещества от частоты световой волны. Хроматическую дисперсию τ_{chr} (обычно измеряется в пикосекундах) можно рассчитать по формуле

$$\tau_{chr} = D(\lambda) \cdot \Delta\tau \cdot L,$$

где $D(\lambda)$ - коэффициент хроматической дисперсии (пс/(нм км)), а L - протяженность линии связи (км). Заметим, что данная формула не точна в случае ультра узкополосных источников излучения.

Обычно дисперсия нормируется в расчете на 1 км, и измеряется в пс/км. Дисперсия в общем случае характеризуется тремя основными факторами, рассматриваемыми ниже:

- различием скоростей распространения направляемых мод (межмодовой дисперсией),
- направляющими свойствами световодной структуры (волноводной дисперсией)
- свойствами материала оптического волокна (материальной дисперсией).

Межмодовая дисперсия возникает вследствие различной скорости распространения у мод, и имеет место только в многомодовом волокне, которое не используется в DWDM-технологии, и здесь рассматриваться не будет.

Хроматическая дисперсия состоит из материальной и волноводной составляющих и имеет место при распространении как в одномодовом, так и в многомодовом волокне. Однако наиболее отчетливо она проявляется в одномодовом волокне из-за отсутствия межмодовой дисперсии.

Материальная дисперсия $M(\lambda)$ обусловлена зависимостью показателя преломления волокна от длины волны. Волноводная дисперсия $N(\lambda)$ обусловлена зависимостью постоянной распространения моды β от длины волны:

Результирующее значение коэффициента удельной хроматической дисперсии определяется как $D(\lambda)=M(\lambda)+N(\lambda)$. Удельная дисперсия имеет размерность пс/(нм км). Если коэффициент волноводной дисперсии всегда больше нуля, то коэффициент материальной дисперсии может быть как положительным, так и отрицательным. При определенной длине волны происходит взаимная компенсация $M(\lambda)$ и $N(\lambda)$, а результирующая дисперсия $D(\lambda)$ обращается в ноль. Длина волны, при которой это происходит, называется длиной волны нулевой дисперсии λ_0 . Обычно указывается некоторый диапазон длин волн, в пределах которых может варьироваться λ_0 для данного конкретного волокна.

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 смешивания (FWM - Four-Wave Mixing). Суть его в том, что при передаче четырех достаточно мощных сигналов разной частоты возникают компоненты на кратных частотах. Возникает этот эффект из-за взаимодействия световой волны большой амплитуды со средой, волна, как бы модулирует среду, создаст в ней «бегущую решетку». Другие волны, в свою очередь, взаимодействуют с этой решеткой. Эффект четырехволнового смешивания приводит к тому, что становится невозможным демультимплексирование сигнала. Решить эту проблему позволяет создание в волокне небольшого уровня дисперсии. Дисперсия приводит к расфазированию «бегущих решеток» и исчезновению паразитных компонент сигнала. 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.

Поляризационная модовая дисперсия $T_{\text{PM}}(\lambda)$ (PMD - Polarization Mode Dispersion) - это дисперсия, вызываемая разностью в скоростях распространения двух основных ортогонально-поляризованных мод, существующих в одномодовом волокне. Наличие ПМД приводит к тому, что фотоприемник видит комбинацию этих мод после прохождения волокна; результирующий выходной импульс света уширяется по сравнению с входным (рис. 6). В идеальном волокне эти

моды являются вырожденными, имеют одинаковые скорости распространения и поэтому ПМД отсутствует.

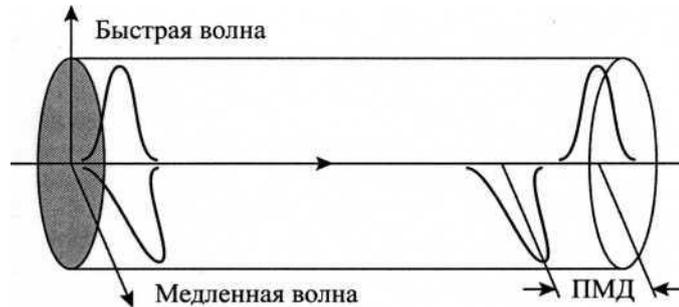


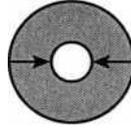
Рис. 6. Поляризационно-модовая дисперсия волокон.

Разность в скоростях распространения ортогональных мод в волокне может быть вызвана целым рядом причин, которые в общем случае влияют на такие характеристики волокна как двулучепреломление и взаимодействие или смешение мод. Двойное лучепреломление (или двулучепреломление) обусловлено разницей значений показателей преломления для двух ортогональных мод. Чем выше двулучепреломление в волокне, тем больше его ПМД. Взаимодействие или смешение мод происходит на тех участках волокна, где осуществляется обмен энергией световой волны между быстрыми и медленными модами, например в местах соединения волокон или изгибах. Так как эти возмущения (соединения, изгибы) носят случайный характер, то ПМД одного участка волокна может складываться или вычитаться из ПМД другого участка. Следовательно, результирующая ПМД складывается случайным образом и значение ПМД носит случайный характер. Именно поэтому на длинных отрезках волокна значение ПМД пропорционально квадратному корню из длины волокна L .

Величина двулучепреломления волокна и степень взаимодействия мод зависят как от внутренних, так и от внешних факторов. К внутренним факторам относятся асимметричность световедущей жилы волокна (отклонение геометрических размеров световедущей жилы и распределения профиля показателя преломления от кругового), возникающая после вытяжки волокна из-за несовершенства заготовок. К внешним факторам относятся сжатие, изгиб, растяжение, скручивание волокна, возникающие, например, в процессе изготовления кабеля или при его прокладке (рис. 7).

Внутренние:

геометрия, напряжение.



Внутренние:

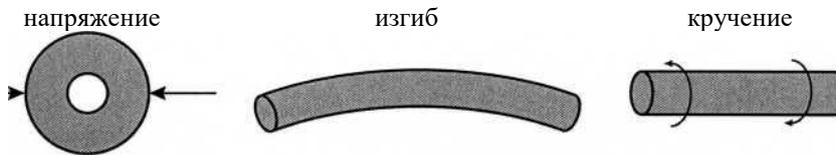


Рис. 7. Причины возникновения ПМД в оптическом волокне.

МД влияет на работу ВОЛС так же, как и хроматическая дисперсия, но механизм уширения импульсов в этих случаях различен. Существенным отличием ПМД от хроматической дисперсии является тот факт, что влияние хроматической дисперсии в линии можно компенсировать, в то время как методов компенсации влияния ПМД в настоящее время не существует. В прошлом влияние ПМД не принималось во внимание, поскольку скорости передачи, а также расстояния между регенераторами в ВОЛС были относительно невелики. В настоящее время, когда скорости передачи достигают сотен Гбит/с, а расстояния между оптическими регенераторами в ВОЛС -- сотен километров, ПМД становится ограничивающим фактором при разработке ВОЛС. Таким образом, чтобы дать разработчикам ВОЛС возможность эффективно учитывать роль ПМД в технических характеристиках ВОЛС, становится необходимым оговаривать величину ПМД в спецификации волокна и кабеля. ПМД может быть ограничивающим фактором как для цифровых, так и аналоговых систем. По данным фирмы Corning при создании высококачественных аналоговых систем кабельного телевидения протяженностью более 50 км уже необходимо учитывать ПМД, так как в таких системах предъявляются высокие требования к отношению сигнал/шум. Сейчас, по-видимому, уже и волоконные сети доступа будут нуждаться в спецификации ПМД, иначе они могут не обеспечивать высококачественную передачу сигналов, а также возможность дальнейшего развития систем.

Для оценки максимальной величины ПМД, которую должно иметь волокно, чтобы не ухудшать работу ВОЛС, нужно знать допустимое время простоя ВОЛС и функцию вероятности распределения для ПМД. На основании этих величин производится расчет допустимого отношения ПМД к периоду бита информации. Умножив полученную величину на период бита, получаем допустимое для всей ВОЛС дифференциальное групповое время запаздывания сигнала, причиной которого является ПМД. Разделив величину группового времени запаздывания на корень квадратный из длины волокна, мы получим допустимую

величину ПМД, которую должно иметь волокно.

Увеличение скоростей передачи означает уменьшение периода бита и ужесточение спецификаций на ПМД. В настоящее время Международным телекоммуникационным союзом утверждена спецификация на ПМД волокна, которая включает ПМД, равную 0,5 пс/ д/км для систем на скорости передачи 10 Гбит/с и протяженных аналоговых систем.

Оптические волокна производятся разными способами, обеспечивают передачу оптического излучения на разных длинах волн, имеют различные характеристики и выполняют разные задачи. Все оптические волокна делятся на две основные группы: многомодовые (MMF - Multi Mode Fiber) и одномодовые (SMF - Single Mode Fiber) (рис. 8).

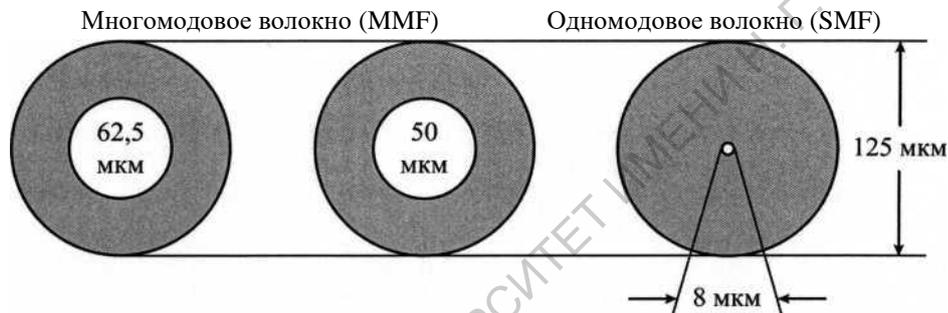


Рис. 8. Типичные размеры MMF и SMF.

В многомодовом ОВ может распространяться одновременно большое число мод. Многомодовое ОВ обладает относительно большим диаметром сердцевины (стандартные значения 50 и 62,5 мкм) и, соответственно, большой числовой апертурой, что облегчает его монтаж и эксплуатацию. Область применения многомодового волокна в основном локальные и внутриобъектовые сети.

Потребность в увеличении полосы пропускания и дальности передачи сигнала привела к необходимости применения одномодового оптического волокна, т. е. волокна со ступенчатым профилем показателя преломления, диаметр сердцевины и соотношение показателей преломления сердцевины и оболочки которого выбраны таким образом, что в нем может распространяться только одна мода. Явление межмодовой дисперсии в таком волокне отсутствует, а ширина полосы пропускания ограничивается хроматической дисперсией. Стандартное одномодовое волокно (SF - Standard Fiber) предназначено для работы в диапазоне длин волн 1285-1330 нм, в котором величина хроматической дисперсии в ОВ достигает минимального, близкого к нулю значения. Возможно также использование этого ОВ в спектральном диапазоне 1525-1565 нм, затухание на этих длинах волн очень мало (~0,2дБ/км), а дисперсия составляет 16-18 пс/нм'км. Параметры стандартного одномодового ОВ

регламентируются рекомендацией G.652 ITU-T. Это исторически первое и наиболее широко распространенное волокно, используемое промышленно с 1983 г.

Растущая потребность в увеличении полосы пропускания и протяженности оптических линий привела к возникновению ряда модификаций стандартного одномодового волокна.

Одномодовое волокно со смещенной (в область длины волны 1,55 мкм) *нулевой дисперсией* (DSF - Dispersion-Shifted Single Mode Fiber). В этом волокне область минимума оптических потерь совпадает с областью минимальной хроматической дисперсии. Параметры этого ОВ регламентируются рекомендацией G.653 ITU-T. Волокно со смещенной дисперсией хорошо совместимо с оптическими усилителями, поскольку интервал длин волн в котором ОВ имеет наилучшие параметры по затуханию и дисперсии совпадает с полосой максимального усиления оптических усилителей на эрбиевом волокне. Такой тип волокна предпочтителен для высокоскоростных линий связи с большой длиной регенерационного участка, без применения технологий оптического уплотнения. Возможно также применение этого ОВ в системах со спектральным уплотнением (WDM) при ограниченной протяженности регенерационного участка, пониженной мощности передаваемого сигнала и ограниченной плотности спектральных компонент.

Одномодовое ОВ со смещенной ненулевой дисперсией (NZDSF - Non-Zero Dispersion-Shifted Single Mode Fiber) (рис. 9). Внедрение технологий «плотного» частотного уплотнения вкупе с использованием эрбиевых оптических усилителей привело к разработке нового типа оптических волокон. При использовании технологии DWDM накладываются определенные требования на само ОВ как на среду передачи оптического излучения.

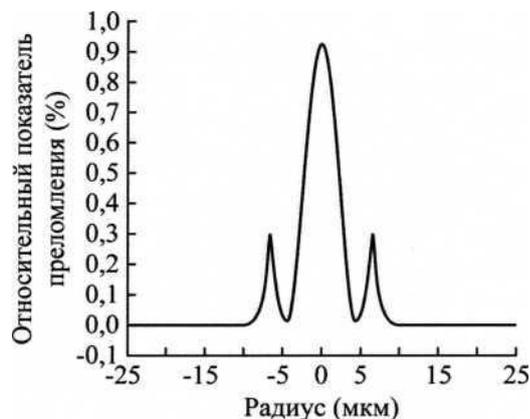


Рис. 9. Профиль показателя преломления одномодового волокна со смещенной дисперсией - модификация профиля показателя преломления увеличивает волноводную составляющую дисперсии

Первым из них является отсутствие искажений сигнала передаваемого каждой спектральной компонентой по отдельности, что в данном случае эквивалентно отсутствию хроматической дисперсии, поскольку именно она приводит к искажению цифрового сигнала и соответственно возникновению битовых ошибок.

Однако в случае отсутствия хроматической дисперсии возникает проблема нелинейных эффектов, обусловленная высокой мощностью оптических сигналов в волокне, что связано с необходимостью передачи на большие расстояния и применением оптических усилителей при высокой плотности спектральных компонент. Наиболее важным для систем, использующих DWDM-технологии, является эффект четырехволнового смешивания. Как выяснилось, наличие в ОВ некоторого уровня хроматической дисперсии эффективно подавляет влияние нелинейных эффектов. NZDS-волокно как раз отвечает вышеперечисленным требованиям. Это волокно предназначено для использования в линиях с большой протяженностью регенерационного участка с DWDM уплотнением сигнала. Рабочий диапазон для этих ОВ 1530-1565 нм, уровень хроматической дисперсии в рабочем диапазоне 0,1-6,0 пс/нм/км. Такой уровень дисперсии достаточно низок для того, чтобы обеспечить скорость передачи до 10 Гбит/с в каждом спектральном канале, и в то же время достаточно высок для эффективного подавления нелинейных эффектов при использовании DWDM-технологий (табл. 3) [10]. Даже без использования DWDM-технологии этот тип волокон обеспечивает большую пропускную способность и протяженность регенерационного участка, чем стандартное одномодовое волокно. Интересной особенностью данного типа волокон является возможность получения волокон с одинаковой по величине, но разной по знаку дисперсией (NZDS+ и NZDS- волокна), что дает возможность построения линий со скомпенсированной, близкой к нулю дисперсией, без применения дополнительных устройств. Принцип балансировки дисперсии показан на рис. 10. Суть его в том что отрезки волокон с положительной и отрицательной дисперсией чередуются, в результате чего вызванные дисперсией искажения импульса сигнала в «плюс»- волокне компенсируются в «минус»-волокне. При этом в любой точке линии существует необходимый для подавления нелинейных эффектов уровень дисперсии.

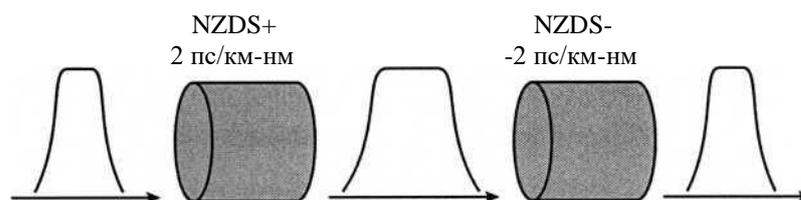


Рис.10. Принцип балансировки дисперсии.

Спектральные зависимости затухания и дисперсии NZDS-волокон показаны на рис. 11. На сегодняшний день выпуск волокон со смещенной ненулевой дисперсией налажен фирмами Fujikura, Lucent Technologies, Coming и Alcatel.

Таблица 3. Предельное расстояние передачи сигнала без компенсации дисперсии в волокне

Скорость передачи	NZDS (G.652)	SF (G.652)
STM 16 (2,5 Гбит/с)	4400 км	640 км
STM 64 (10 Гбит/с)	300-500 км	50-100 км
STM 256 (40 Гбит/с)	20-30 км	~ 5 км

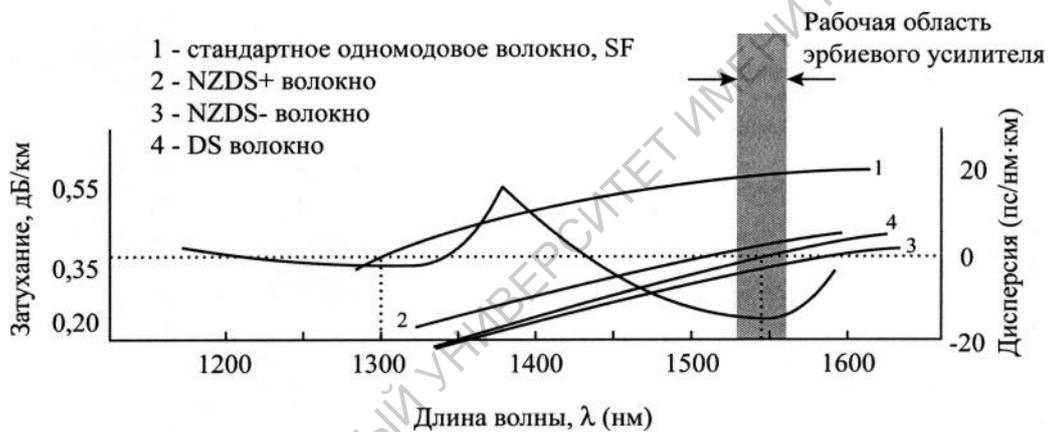


Рис.11 Спектральные зависимости затухания и дисперсии различных типов волокон.

Оба вышеперечисленных типа волокон в равной мере обеспечивают подавление нелинейных эффектов. Однако волокна Lucent Technologies и Fujikura обладают меньшими потерями на сгибах и более пологой дисперсионной кривой. Доля рынка NZDS-волокон Lucent Technologies и Fujikura составляет 70%, Coming - 30%. Судя по всему, данный тип волокон является наиболее перспективным для использования в отрасли связи и дальнейшее развитие волоконно-оптических технологий будет двигаться именно в этом направлении.

В настоящий момент перспектива использования NZDS-волокна в России представляется следующим образом: время жизни оптической линии составляет порядка 25-ти лет, учитывая тенденции развития технологии, весьма вероятно, что за 25 лет придется от 2-х до 4-х раз обновить окончное оборудования. Исходя из этого, представляется целесообразным уже сейчас использовать при прокладке линий NZDS-волокно с учетом будущей перспективы перехода на частотное уплотнение или другие, возможные технологические новшества в

области передачи сигнала.

Многие фирмы за рубежом и ряд отечественных компаний уже используют при прокладке линий кабель, содержащий NZDS-волокна. Существуют два варианта прокладки кабеля с NZDS-волокном: чередование отрезков кабеля, содержащих волокна с разным знаком дисперсии, или использование «сбалансированного» по дисперсии кабеля. «Сбалансированный» кабель содержит пары волокон как с положительной, так и с отрицательной дисперсией, «плюс» и «минус» волокна окрашены в разные цвета. При монтаже волокна просто «перекрещиваются», как показано на рис. 12. Второй вариант, очевидно, является более предпочтительным, поскольку оставляет возможность для изменения конфигурации сети и ответвлений (в каждой точке линии есть и «плюс» и «минус» волокна), а также гарантирует от ошибок при прокладке. Механические свойства волокон со смещенной ненулевой дисперсией и требования по их каблированию не отличаются от аналогичных свойств стандартных одномодовых волокон. Поэтому при производстве оптического кабеля на основе NZDS-волокна можно использовать стандартные, хорошо отработанные технологии.

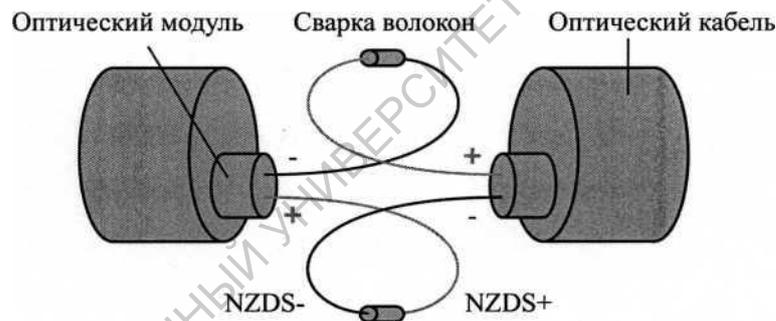


Рис. 12. Схема монтажа сбалансированного по дисперсии оптического кабеля.

Фирмой Lucent в последнее время также начат выпуск усовершенствованного ОВ данного типа – TrueWave™ RS [11], в котором несколько расширен рабочий спектральный диапазон до 1603 нм (четвертое окно прозрачности или L-диапазон) (рис. 13), что дополнительно увеличивает пропускную способность ОВ.

Волокно AllWave™. Данный тип ОВ, производимый фирмой Lucent Technologies является достаточно интересным усовершенствованием стандартного одномодового волокна. В отличие от SF-волокна данное ОВ (рис. 14) не имеет так называемого «водяного пика», т. е. увеличения поглощения на длине волны 1385 нм, соответствующего спектру поглощения ионов ОН⁻. На этой длине волны поглощение составляет 0,31 дБ/км [12].

Данный тип ОВ предлагается использовать в локальных и местных сетях связи с небольшой протяженностью регенерационных участков, но с одновременным использованием всего спектрального диапазона от 1,3 до 1,6 мкм (пятое окно прозрачности).



Рис. 13. Спектральная зависимость затухания в волокне TrueWave™ RS.



Рис. 14. Спектральная зависимость затухания в волокне AllWave™.

Волокно на основе фотонных кристаллов (Photonic Crystal Fiber) и так называемое «дырчатое» волокно (HF - Holey Fiber), которое в поперечном разрезе имеет сложную структуру.

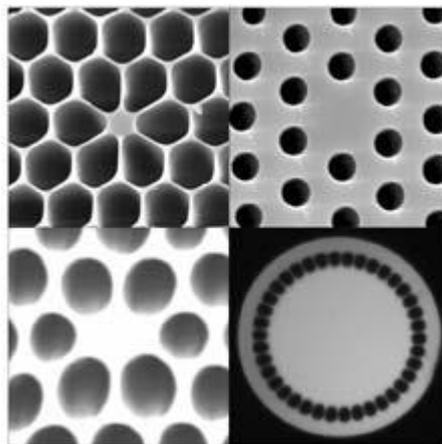


Рисунок 15. Структура «дырчатого волокна» (HF). Показан поперечный срез для четырех

различных образцов.

HF представляет собой сердцевину из сплошного кварцевого стекла и оболочку из кварцевого стекла с воздушными полостями фотонного кристалла, который в среднем имеет более низкий коэффициент преломления. Волноведущие свойства HF обеспечиваются одновременно эффектом полного внутреннего отражения (как в обычном волокне) и наличием так называемых фотонных щелей, которые «разрешают» или «запрещают» распространение излучения в спектральных диапазонах, определяемых размерами полостей в структуре волокна и их количеством. В настоящее время уже разработана технология и созданы образцы таких оптических волокон. На этих образцах показано, что в HF-волокнах количество направляемых мод определяется только отношением суммарных площадей воздушных полостей и кварца в поперечном сечении волокна. Наличие полостей в волокне позволяет более чем на порядок увеличить отношение показателей преломления жила-оболочка по сравнению со стандартными волокнами. Этим в основном и определяются принципиально новые свойства, отличающие HF от обычных световодов, что дает возможность создания одномодовых HF с необычными дисперсионными свойствами на широкий диапазон спектра. HF могут иметь аномальную дисперсию в значительно более коротковолновой части спектра, причем абсолютные значения дисперсии могут превышать 10^3 пс/нм/км, а зависимость дисперсии от длины волны может быть значительно более слабой [13].

Возможные области применения таких волокон достаточно широки: это телекоммуникационные системы, компенсаторы дисперсии в ВОЛС, волноведущие системы для передачи световых потоков высокой интенсивности, возможность реализации многожильных волокон (одна оболочка и несколько световедущих жил). В HF снижаются энергетические пороги всех нелинейных эффектов (рамановского и бриллюэновского рассеяния, четырехволнового смешивания), что представляет большой интерес для создания эффективных рамановских лазеров и усилителей, оптических переключателей, генерации суперконтинуума излучения в очень широком спектральном диапазоне волн от ультрафиолетового до $\lambda = 3,3$ мкм («лазер белого света») [14].

2.2 Передающие оптоэлектронные модули

Передающие оптоэлектронные модули (ПОМ), применяемые в волоконно-оптических системах, предназначены для преобразования электрических сигналов в оптические. Последние должны быть введены в волокно с минимальными потерями. Производятся весьма разнообразные ПОМ, отличающиеся по конструкции, а также по типу источника излучения.

Основные требования, которым должен удовлетворять источник излучения:

- излучение должно вестись на длине волны одного из окон прозрачности волокна;
- источник излучения должен выдерживать необходимую частоту модуляции для обеспечения передачи информации на требуемой скорости;
- источник должен быть эффективным, в том смысле, что большая часть излучения источника попадала в волокно с минимальными потерями;
- источник излучения должен иметь достаточно большую мощность, чтобы сигнал можно было передавать на большие расстояния, но и не на столько, чтобы излучение приводило к нелинейным эффектам или могло повредить волокно или оптический приемник;
- температурные вариации не должны сказываться на функционировании источника излучения;
- стоимость производства источника излучения должна быть относительно невысокой.

Два основных типа источников излучения, удовлетворяющие перечисленным требованиям, используются в настоящее время - светодиоды (LED - Light-Emitting Diodes) и полупроводниковые лазерные диоды (LD). Главная отличительная черта между светодиодами и лазерными диодами - это ширина спектра излучения. Светоизлучающие диоды имеют широкий спектр излучения (ДА, $\sim 30-50$ нм), в то время как лазерные диоды имеют значительно более узкий спектр (ДА. $\sim 1-3$ нм для многомодового лазера и ДА-0,1-0,4 нм для одномодового лазера). Оба типа устройств весьма компактны и хорошо сопрягаются со стандартными электронными цепями.

Светоизлучающие диоды (LED - Light-Emitting Diodes) являются относительно медленными устройствами, пригодными для использования на скоростях меньше 1 Гбит/с. Поэтому, благодаря своей простоте и низкой стоимости, они широко используются в сетях, использующих многомодовое волокно. В системах DWDM, использующих одномодовое волокно, применяются лазерные диоды, благодаря своим скоростным характеристикам.

Для применения в ВОЛС полупроводниковые лазеры и передающие модули на их основе должны обеспечивать непрерывный и импульсный режимы работы, иметь низкие пороговые токи, широкую полосу модуляции, линейную зависимость мощности излучения от тока накачки, малую излучающую площадь, низкие шумы, высокую стабильность мощности и большой ресурс работы.

Современный ПЛ представляет собой многослойную полупроводниковую структуру с характерными размерами в несколько сотен микрон, снабженную резонатором, а также системами вывода излучения, подачи питания и управления выходной мощностью (модуляции). Для изготовления лазерных структур применяются методы жидкостной эпитаксии, химического осаждения из газовой фазы, молекулярной эпитаксии. Две типичные структуры лазерных диодов показаны на рис. 16.

В ВОЛС применяются лазеры полосковой геометрии, в которых область протекания тока ограничена по плоскости p-n перехода. Ширина полосковых контактов обычно равна 3-5 мкм. Такое ограничение, во-первых, необходимо для уменьшения площади свечения и рабочего тока. Во-вторых, при ширине полосок менее 5 мкм происходит генерация света в одном канале и в основной поперечной моде, в результате чего повышается коэффициент ввода излучения в волокно и линейность ватт-амперной характеристики лазера. Мощность выходного излучения P_{out} или выходная мощность излучения светодиода (output power) отражает мощность вводимого в волокно излучения. Наряду с традиционной единицей измерения Вт она может измеряться в дБм. Мощности P_{out} , измеренной в мВт (10^3 Вт), будет соответствовать мощность $p_{out} = 10 \lg P_{out}$ (дБм). Использование единицы измерения дБм упрощает энергетический расчет бюджета линий.

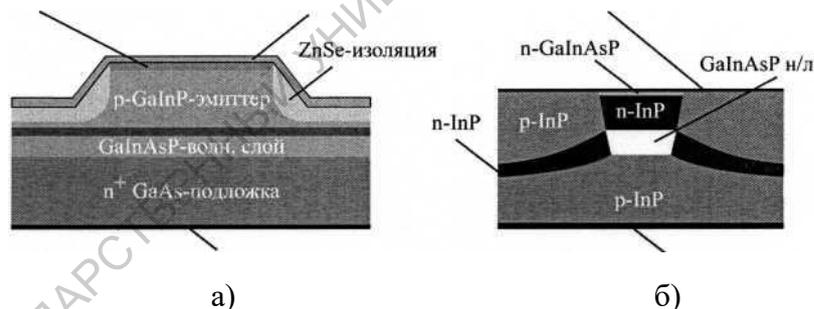


Рис. 16. Конструкция лазерного диода а) с недотравленной мезополосковой структурой; б) с зарощенной мезополосковой структурой

Четыре основных типа лазерных диодов получили наибольшее распространение: с резонатором Фабри-Перо; с распределенной обратной связью; с распределенным брэгговским отражением; с внешним резонатором.

Лазерные диоды с резонатором Фабри-Перо (FP лазеры, Fabry-Perot). Резонатор в таком лазерном диоде образуется торцевыми поверхностями, окружающими с обеих сторон гетерогенный переход. Одна из поверхностей отражает свет с коэффициентом отражения, близким к 100%, а другая является полупрозрачной, обеспечивая, таким образом, выход

излучения наружу. В спектре излучения промышленного FP лазерного диода наряду с главным пиком, в котором сосредоточена основная мощность излучения, существуют побочные максимумы. Причина их возникновения связана с условиями образования стоячих волн. Для усиления света определенной длины волны необходимо выполнение двух условий. Первое, длина волны должна удовлетворять соотношению $2D = N\lambda$, где D - диаметр резонатора Фабри-Пери, а N – некоторое целое число. Второе, длина волны должна попадать в диапазон, в пределах которого свет может усиливаться индуцированным излучением. Если этот диапазон достаточно мал, то имеет место одномодовый режим с шириной спектра меньше 1 нм. В противном случае в область генерации могут попасть два или более соседних максимума, что соответствует многомодовому режиму с шириной спектра от одного до нескольких нанометров. FP лазер имеет далеко не самые высокие технические характеристики, поэтому в силу более простой конструкции он подходит для тех приложений, где не требуется очень высокая скорость передачи данных.

Следует отметить, что даже в том случае, когда соседние максимумы малы, то есть когда реализуется одномодовый режим излучения и ΔX мало, с ростом скорости передачи у FP лазера наблюдается перераспределение мощности в модах, которое приводит к паразитному эффекту - динамическому уширению спектра ΔX (до 10 нм при частоте модуляции 1-2 ГГц).

Этот эффект отсутствует у перечисленных трех других более совершенных типов лазерных диодов, отличающихся способом организации оптического резонатора, и являющихся в некоторой степени модернизацией резонатора Фабри-Перо [9].

Лазерные диоды с распределенной обратной связью (DFB лазер, Distributed FeedBack) и с распределенным брэгговским отражением (DBR лазер, Distributed Bragg Reflector). Резонаторы у этих двух довольно схожих типов представляют собой модификацию плоского резонатора Фабри-Перо, в которой добавлена периодическая пространственная модуляционная структура. В DFB лазерах периодическая структура совмещена с активной областью (рис. 17а), а в DBR лазерах периодическая структура вынесена за пределы активной области (рис. 17б). Периодическая структура влияет на условия распространения и характеристики излучения. Так, преимуществами DFB и DBR лазеров по сравнению с FP лазером являются: уменьшение зависимости длины волны лазера от тока инжекции и температуры, высокая стабильность одномодовости и практически 100- процентная глубина модуляции. Температурный коэффициент $\Delta X/\Delta T$ для FP лазера порядка 0,5-1,0 нм/°С, в то время как для DFB лазера порядка 0,07-0,09 нм/°С. Основным недостатком DFB и DBR лазеров является сложная технология изготовления и, как следствие, более высокая цена.

Лазерный диод с внешним резонатором (EC - External-Cavity лазер). В EC лазерах один

или оба торца покрываются специальным слоем, уменьшающим отражение, и соответственно, одно или два зеркала ставятся вокруг активной области полупроводниковой структуры. На рис. 17в показан пример ЕС лазера с одним внешним резонатором. Антиотражательное покрытие уменьшает коэффициент отражения примерно на четыре порядка, в то время как другой торец активного слоя отражает до 30% светового потока благодаря френелевскому отражению. Зеркало, как правило, совмещает функции дифракционной решетки. Для улучшения обратной связи между зеркалом и активным элементом устанавливается линза.

Увеличивая или уменьшая расстояние до зеркала, а также одновременно разворачивая зеркало-решетку, - это эквивалентно изменению шага решетки — можно плавно изменять длину волны излучения, причем диапазон настройки достигает 30 нм. В силу этого, ЕС лазеры являются незаменимыми при разработке аппаратуры волнового уплотнения и измерительной аппаратуры для ВОЛС [14]. По характеристикам они схожи с DFB и DBR лазерами.

Также важными характеристиками источников излучения являются: быстродействие источника излучения; деградация и время наработки на отказ.

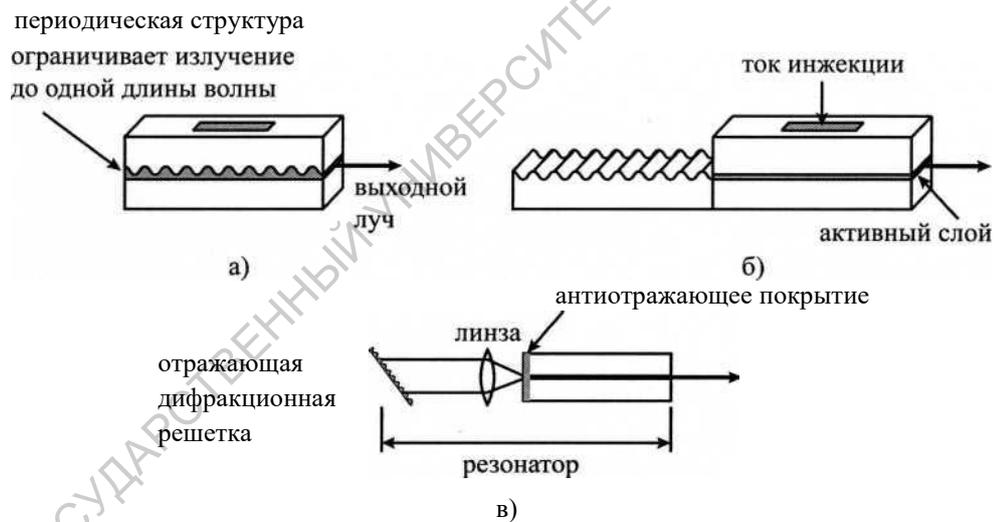


Рисунок 17. Три основных типа лазерных диодов: а) лазер с распределенной обратной связью, DFB лазер; б) лазер с распределенным брэгговским отражением, DBR лазер; в) лазер с одним внешним резонатором, ЕС лазер.

Быстродействие источника излучения. Экспериментально измеряемым параметром, отражающим быстродействие источника излучения, является максимальная частота модуляции. Предварительно устанавливаются пороги на уровне 0,1 и 0,9 от установившегося значения мощности светового излучения при низкочастотной модуляции прямоугольными импульсами тока. По мере роста частоты модуляции, т. е. при переходе на меньшие масштабы

по временной шкале, форма световых фронтов становится более полой. Для описания фронтов вводят времена нарастания T_{rise} и спада T_{fall} мощности излучения, определяемые как временные интервалы, за которые происходит нарастание от 0,1 до 0,9 и, наоборот, спад светового сигнала от 0,9 до 0,1. Максимальная частоты модуляции определяется как частота входных электрических импульсов, при которой выходной оптический сигнал перестает пересекать пороговые значения 0,1 и 0,9, оставаясь при этом во внутренней области. Для светодиодов эта частота может достигать до 200 МГц, а у лазерных диодов - значительно больше (несколько ГГц). Времена нарастания и спада предоставляют информацию о полосе пропускания Ω . Если предположить, что они равны между собой (а это не всегда так), то полосу пропускания можно определить по формуле: $\Omega = 0,35/T_{\text{rise}}$.

Деградация и время наработки на отказ. По мере эксплуатации оптического передатчика его характеристики постепенно ухудшаются - падает мощность излучения, и, в конце концов, он выходит из строя. Это связано с деградацией полупроводникового слоя. Надежность полупроводникового излучателя определяется средней наработкой на отказ или интенсивностью отказов. Лазерные диоды, выпускаемые десять лет назад, обладали значительно меньшей надежностью по сравнению со светодиодами. Однако в настоящее время, благодаря совершенствованию конструкций и технологии изготовления, удалось значительно повысить надежность лазерных диодов и приблизить их к светодиодам по времени наработки на отказ, которое составляет до 50000 часов и более (5-8 лет).

В системах DWDM в качестве источников излучения используются специализированные лазеры с распределенной обратной связью (DFB), предназначенные для работы в окне 1550 нм и обеспечивающие скорость до 10 Гбит/с.

Основные характеристики таких лазеров [15, 16]:

- обеспечивают одновременную передачу до 200 каналов по одному волокну (в диапазоне 1530-1610 нм);
- расстояние между смежными длинами волн составляет 0,4 нм, что соответствует сетке 50 ГГц стандартного частотного плана ITU-T;
- стабильность излучения $\pm 0,1$ нм за период более 15 лет в широком интервале температур (от минус 5 °С до плюс 70°С);
- обратная связь, реализованная в самом устройстве с помощью фильтра Фабри-Перо и двух фотодиодов, позволяет фиксировать излучаемую длину волны с точностью до 20 пм ($20 \cdot 10^{-12}$ м) и делает возможным переход в будущем на сетку 25 ГГц (расстояние между смежными длинами волн - 0,2 нм);
- в одном устройстве реализуется излучение до 8 смежных длин волн, что позволяет

снизить расходы на развертывание системы;

- будучи разработанными для компенсации суммарных потерь в пассивных WDM-мультиплексорах, обеспечивают выходную мощность от 2 до 40 мВт.

Новые устройства - регулируемые лазеры (Tunable Laser), имеющие перенастройку излучаемых длин волн - позволяют решить проблему роста числа мультиплексируемых каналов. Узкополосные регулируемые лазеры (8 каналов с расстоянием в 50 ГГц) используют мощные DFB резонаторы. Принцип их работы основан на естественной зависимости длины волны излучения от температуры (0,1 нм/°C). Широкополосные регулируемые лазеры (40 каналов с расстоянием в 50 ГГц) основаны на DBR структуре. Настройка длин волн происходит с помощью изменения тока инжекции.

При передаче со скоростями до 2,5 Гбит/с на расстояния до 200 км (или со скоростями до 10 Гбит/с на короткие расстояния до 10 км) можно модулировать непосредственно DFB лазер. Однако на больших расстояниях хроматическая дисперсия ограничивает полосу пропускания, поэтому применяется внешний модулятор. Можно достичь расстояний в несколько тысяч километров при скоростях до 10 Гбит/с, или сотен километров при скоростях до 40 Гбит/с. В настоящее время используются интегрированные лазерные модуляторы (ILM - Integrated Laser Modulator) на основе InP [16].

Крупными поставщиками ПОМ являются фирмы: Alcatel, Epitaxx Inc., Ericsson Components Ab, Fujitsu Microelectronics Inc., Hamamatsu Corp., Hewlett-Packard, Hitachi, Lasertron Inc., Laser Diode Inc., NEC Electronics Inc., OKI Semiconductors, Optek Technology Inc., Optical Communication Product Inc., Ortel Corp., Siemens Corp, и др.

2.3 Приемные оптоэлектронные модули

Приемные оптоэлектронные модули (ПРОМ) являются важными элементами волоконно-оптической системы. Их функция - преобразование оптического сигнала, принятого из волокна, в электрический. Последний обрабатывается далее электронными устройствами.

Основными функциональными элементами ПРОМ являются:

- фотоприемник, преобразующий полученный оптический сигнал в электрическую форму;
- каскад электрических усилителей, усиливающих сигнал и преобразующих его в форму, пригодную к обработке;
- демодулятор, воспроизводящий первоначальную форму сигнала.

На практике функциональные элементы могут несколько отличаться у разных ПРОМ.

Например, детектор типа лавинный фотодиод обеспечивает внутреннее усиление, в результате чего собственные шумы последующего электронного усилителя становятся не столь заметными по сравнению с уровнем полезного сигнала. В некоторых ПРОМ отсутствует демодулятор, или цепь принятия решения, поскольку электрический сигнал с выхода каскада усилителей приемлем для непосредственной обработки другими электронными устройствами. Иногда для более эффективной работы ПРОМ перед детектором устанавливается оптический усилитель.

Аналоговые ПРОМ принимают аналоговый оптический сигнал и на выходе также выдают аналоговый электрический сигнал. К аналоговым приемникам предъявляются требования высокой линейности преобразования и усиления сигнала при минимуме вносимых шумов - в противном случае возрастают искажения сигнала. На протяженных линиях с большим количеством приемо-передающих узлов искажения и шумы накапливаются, что снижает эффективность аналоговых многоретрансляционных линий связи.

При цифровой передаче не требуется очень точная ретрансляция форм импульсов. Цифровой приемник должен включать узел принятия решения или дискриминатор, имеющий установленные пороги на принятие сигналов 0 и 1, который распознает, какой сигнал пришел, устраняет шумы и восстанавливает необходимую амплитуду сигнала. Правильное выделение нужного сигнала может происходить при большом уровне шумов.

Основным элементом ПРОМ является фотоприемник, изготавливаемый обычно из полупроводникового материала. Из фотоприемников применяемых в ВОЛС, в DWDM системах получили распространение p-i-n фотодиоды (PIN - Positive-Intrinsic-Negative), лавинные фотодиоды (APD - Avalanche Photodiode).

PIN фотодиоды работают по принципу, схожему с обратным принципом работы светодиода. То есть свет поглощается, а не излучается, и фотоны преобразуются в электроны в соотношении 1:1. Лавинные фотодиоды схожи с PIN фотодиодами, но дают дополнительный выигрыш в виде процесса усиления: каждый фотон вызывает множество электронов. PIN фотодиоды обладают множеством преимуществ, таких как цена и надежность, лавинные фотодиоды напротив обладают большей чувствительностью и точностью. Тем не менее, APD более дороги, по сравнению с PIN фотодиодами, и требуют больших значений по току, а также их режим работы зависит от температуры.

Факторы влияющие на технические характеристики фотоприемников, сложны и сильно взаимосвязаны между собой. На первый взгляд может показаться, что достаточно выбрать только три параметра - чувствительность, быстродействие, цену. На практике эти факторы часто оказываются зависящими от других факторов, включая рабочую длину волны,

выбор волокна и передатчика, темновой ток, шумовые характеристики, тип кодировки передаваемого сигнала и др.

Токовая чувствительность (монохроматическая) S_{ph} (А/Вт) определяется как $S_{ph} = I_{ph}/P(\lambda)$, где I_{ph} - фототок, а $P(\lambda)$ - полная оптическая мощность излучения на длине волны λ , падающего на фоточувствительную площадку. Токовая чувствительность характеризует фотоприемник при низких частотах модуляции.

Квантовая эффективность η (безразмерная величина) определяется как $\eta = N_e/N_{ph}$, где N_{ph} - количество фотонов, падающих за единицу времени на приемник, а N_e - количество рожденных в результате этого свободных электронов. Квантовая эффективность для PIN фотодиодов не может быть больше 1 (100%).

Между токовой чувствительностью и квантовой эффективностью существует простая связь $S_{ph} = e\lambda/(hc)\eta$, где e - заряд электрона ($1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл), λ - длина волны, h - постоянная Планка ($6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж сек), c - скорость света. С подстановкой значений констант получаем $S_{ph} = \eta\lambda/1.24$. Типичное значение токовой чувствительности для PIN фотодиодов в их рабочих диапазонах составляет 0,5-0,8 А/Вт, а для лавинных фотодиодов 20-60 А/Вт. Характеристики S_{ph} и η используют при создании ПРОМ, когда необходимо согласовывать последующие каскады электронных усилителей.

Темновой ток I_d (А) протекает при обратном смещении через нагрузку в отсутствие падающего на фотодиод излучения. Его величина зависит от материала полупроводника, температуры окружающей среды, конструкции фотоприемника. Максимальные значения этот ток утечки имеет в фотодиодах, изготовленных из германия, и составляет от долей до единиц миллиампера (табл. 4). Этот ток добавляется к току полезного сигнала, когда на фотодиод поступает свет.

Таблица 4. Типовые характеристики фотоприемников

Фотоприемник	Токовая чувствительность, А/Вт	Темновой ток, нА	Время нарастания, нс
PIN фотодиод (InGaAs)	0,8	0,1-3	0,01-5
PIN фотодиод (Si)	0,5	10	0,1-5
Лавинный фотодиод (InGaAs)	20-60	30	0,3
Лавинный фотодиод (Ge)	20-60	400	0,3-1

Время нарастания T_{rise} (спада T_{fall}) - это самая важная динамическая характеристика фотоприемника. Она определяется как время, необходимое сигналу, чтобы возрасти от уровня 0,1 до 0,9 (упасть от 0,9 до 0,1) от установившегося максимального значения при условии, что на вход подаются строго прямоугольные импульсы света большой длительности. Эти времена зависят от геометрии фотодиода, материала, напряженности электрического поля в слаболегированной области, температуры. Максимальная из двух величин (обычно T_{rise}) берется в качестве характеристики времени отклика фотоприемника. С увеличением частоты модуляции входных оптических сигналов максимальное значение фототока уменьшается. Предельная частота определяется как частота модуляции, при которой токовая чувствительность составляет 0.707 от значения токовой чувствительности при низких частотах модуляции.

Если внутренние задержки прямо не влияют на полосу пропускания или скорость передачи, то времена нарастания и спада главным образом определяют полосу пропускания. Различные фотоприемники могут очень сильно отличаться по быстродействию (табл. 4). Наиболее быстрыми являются PIN фотодиоды. У лавинных фотодиодов увеличение коэффициента умножения сопровождается уменьшением быстродействия по сравнению с PIN фотодиодами.

Эквивалентная мощность шума P_n (Вт) - это одна из наиболее важных характеристик, учитывающих шумовые свойства фотоприемников. Она определяет минимальную мощность оптического сигнала на входе фотоприемника, при которой отношение сигнал/шум равно единице. По определению, эквивалентная мощность шума пропорциональна квадратному корню из полосы пропускания. P_n можно пронормировать, поделив на $B^{1/2}$, где B - полоса пропускания. Такая нормированная эквивалентная мощность шума имеет размерность Вт/Гц^{1/2} и не зависит от полосы пропускания.

Соотношение сигнал/шум и чувствительность аналоговых систем. Для аналоговых систем отношение сигнал/шум измеряется количественно. На практике приемлемое соотношение сигнал/шум зависит от приложения - для одних хорошим соотношением может быть величина 50-60 дБ, для других 30 дБ. *Чувствительность аналогового ПР ОМ* - минимальный входной сигнал, при котором вносимые искажения и шумы будут в пределах нормы. Этот параметр указывается производителями для фотоприемников при поставке сетевого оборудования с вполне определенной областью приложения. Если входной сигнал ниже чувствительности приемника, то соотношение сигнал/шум может быть не достаточно большим, чтобы корректно выполнялось данное приложение. Принятой единицей измерения чувствительности фотоприемников, также как мощности у светоизлучающих диодов, является

дБм.

Частота появления ошибок и чувствительность цифровых систем. В цифровых системах, когда информация передается битами, мерой качества принятого сигнала является вероятность некорректной передачи 0 или 1, которая называется *частотой появления ошибок* (BER - Bit Error Rate). Она определяется как отношение неправильно принятых битов к полному числу принятых битов. Частота появления ошибок очень резко зависит от мощности входного сигнала. В определенном диапазоне уменьшение на 5 дБ амплитуды входного сигнала приводит к увеличению BER с 10^{-12} до 10^{-3} . Удовлетворительное значение BER, также как и соотношение сигнал/шум, может быть разным для разных приложений. В цифровых системах, применяемых для нужд телекоммуникаций, BER должна быть не больше 10^{-9} . В вычислительных сетях требования к BER более высокие - 10^{-12} . BER зависит от скорости передачи - чем меньше скорость передачи, тем меньше BER. *Чувствительностью цифрового ПРОМ* называется минимальная мощность сигнала, при которой BER не выходит за рамки максимального допустимого значения, установленного для данного приложения. Для нормальной работы приложения мощность входного оптического сигнала должна быть не меньше чувствительности ПРОМ. Чувствительность цифровых приемников также принято измерять в дБм.

Насыщение ПРОМ. В аналоговых ПРОМ каскад электронных усилителей имеет участок линейного усиления, что означает линейную зависимость амплитуды выходного электрического сигнала от входной мощности. Это справедливо до тех пор, пока входной сигнал не превышает определенного значения, которое называется насыщением ПРОМ. В цифровых ПРОМ работа каскада усилителей в нелинейной области не столь опасна, однако при больших входных оптических сигналах могут появляться «хвосты» фототока, остающиеся даже тогда, когда на фотоприемник уже не подается сигнал. В такой ситуации нулевой сигнал на входе, следующий непосредственно за единицей, может неправильно интерпретироваться, что приводит к росту частоты ошибок. Насыщением цифрового ПРОМ называется максимальная входная мощность, выше которой BER начинает превосходить максимально допустимую величину для данного приложения.

Диапазон значений мощности от чувствительности до насыщения ПРОМ называется *динамическим диапазоном* ПРОМ.

Максимально допустимое обратное напряжение U_r — это напряжение превышение которого может привести к пробое фотоприемника и его разрушению. Наряду с этим значением или вместо него изготовители фотоприемников могут указывать просто обратное рабочее напряжение. Если выбрать меньшее значение напряжения, то будет ограничена

область линейной характеристики фотоприемника.

Рабочий диапазон температур (°C). Есть две характеристики, на которые сильно влияет изменение рабочей температуры фотоприемника. Во-первых это квантовая эффективность, которая может вести себя в общем случае довольно сложным образом с изменением температуры. Во-вторых, рост температуры приводит к экспоненциальному росту термических возбужденных электронно-дырочных пар, в результате чего также экспоненциально возрастает темновой ток. Утечка тока удваивается при повышении температуры на 8-10°C.

Наработка на отказ (тыс. часов). При правильной эксплуатации ресурс фотоприемников значительно выше, чем у светоизлучающих диодов.

Геометрия фотодиода является ключевым параметром, ограничивающим полосу пропускания. Для скоростей передачи до 10 Гбит/с лучше всего подходят фотодиоды (например на основе InP), в которых свет падает ортогонально поверхности (Surface-Illuminated Photodiodes), в то время как для скоростей порядка 40 Гбит/с оптимальнее использовать фотодиоды с чувствительной поверхностью расположенной параллельно падающему свету (Edge-Illuminated Photodiodes). Интеграция предусилителей увеличивает общую производительность и является единственным успешным путем достижения более высоких скоростей передачи данных. Современные ПРОМ включают в себя фотодиод с предусилителем (особенностью которого является низкий уровень вносимых шумов) и усилителем мощности, за которым следует стадия выравнивания (ACG - Automatic Gain Controlled stage), которая позволяет восстановить правильное соотношение амплитуд для высоких и низких частот [16].

Крупными поставщиками ПРОМ являются фирмы: Epitaxx Inc., Hamamatsu Corp., Hewlett-Packard, Hitachi, Honeywell Inc, Lasertron Inc., Laser Diode Inc., NEC Electronics Inc., OKI Semiconductors, Optek Technology Inc., Optical Communication Product., Ortel Corp., Siemens Corp., Sumitomo Electric Industries Ltd., Toshiba и др.

2.4 Фильтры

Фильтры предназначены для выделения одного нужного канала из множества мультиплексных каналов, распространяемых в волокне. Поскольку фотоприемники имеют обычно широкую спектральную область чувствительности, то фильтр необходим для того, чтобы подавить (ослабить) соседние каналы. Например, используются диэлектрические фильтры, состоящие из слоев, в которых каждая волна определенной длины фильтруется многослойной структурой. Организация слоев позволяет выделять волну заданной длины [11].

Наряду с фильтрами, предназначенными для работы на определенной длине волны, выпускаются также фильтры с перенастраиваемой длиной волны. Функции фильтра может выполнять оптический демультиплексор.

2.5 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, 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), рис. 18. 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.

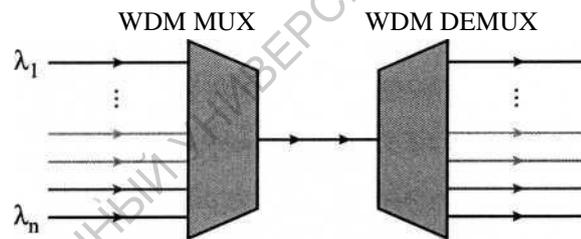


Рис. 18. Мультиплексор и демультиплексор

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

В настоящее время наибольшее распространение получили устройства оптического мультиплексирования и демультиплексирования с частотным интервалом между отдельными каналами в 100 ГГц (~ 0,8 нм). Появляющиеся в последнее время мультиплексные устройства могут обеспечить большую плотность размещения каналов с частотным интервалом 50 ГГц и меньше. Современные оптические мультиплексоры создаются преимущественно на основе тонкопленочных фильтров и, немного реже - на матрицах волноводных дифракционных

решеток и волоконных брэгговских решетках. При дальнейшем увеличении плотности размещения каналов в системах DWDM и ужесточении требований к оптическим устройствам MUX/DEMUX, по-видимому, будет меняться и спектр используемых технологий.

Тонкопленочные фильтр. 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. 19).

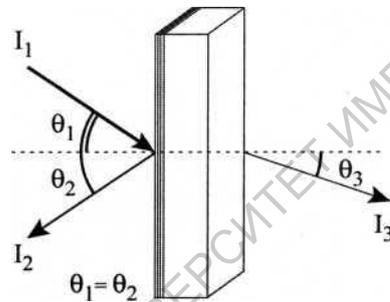


Рис. 19. I_1 - падающая волна, I_2 - отраженная, I_3 – прошедшая.

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 демультиплексорах используются обычно одноступенчатые тонкопленочные фильтры, каждый из которых выделяет из составного сигнала (или добавляет в него) один канал. Фильтры расположены под наклоном к оптической оси, чтобы отраженный свет не попадал обратно в систему. 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. 20).

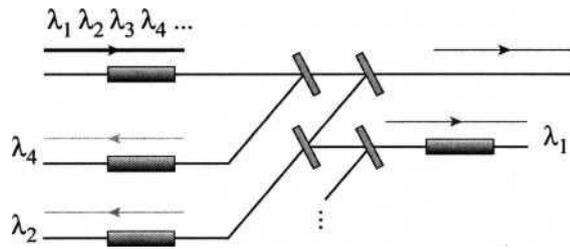


Рис. 20. Многоступенчатая система тонкопленочных фильтров для демультиплексирования составного сигнала

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

Волоконные брэгговские решетки. Волоконная брэгговская решетка (рис. 21) - это, по сути, оптический интерферометр, встроенный в волокно. Волокно, легированное некоторыми веществами (обычно германием), может изменять свой показатель преломления под воздействием ультрафиолетового света. Если облучить такое волокно ультрафиолетовым излучением с определенной пространственной периодической структурой, то волокно превращается в своего рода дифракционную решетку. Другими словами, это волокно будет практически полностью отражать свет определенного, наперед заданного диапазона длин волн, и пропускать свет всех остальных длин волн.

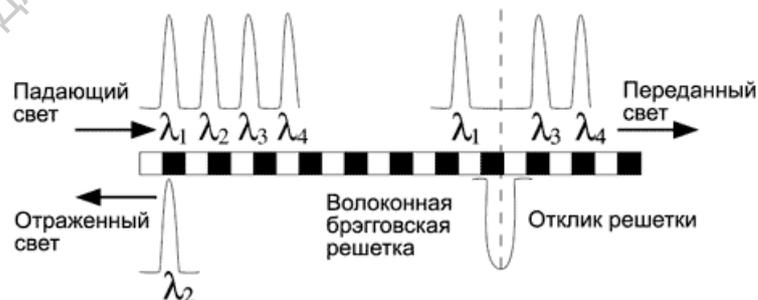


Рис 21. Волоконная брэгговская решетка выделяет из составного сигнала канал определенной длины волны

Если структура не вполне периодическая, и период модуляции ее показателя преломления изменяется монотонно (происходит чирпирование), то получается

дифракционная решетка с линейно изменяющимся периодом. Такие решетки используются для компенсации хроматической дисперсии в волоконной линии связи или для коррекции chirпированного сигнала лазерного источника.

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

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

¹ Оптический циркулятор - это многополюсное устройство, которое позволяет направлять излучаемую мощность с одного полюса на другой строго определенный полюс.

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

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

Дифракционные решетки. Наиболее распространенные в оптике обычные дифракционные решетки отражают световой пучок под разными углами в плоскости падения, причем угол, в которых отраженный свет достигает максимальной интенсивности, зависит от длины волны. В дифракционных решетках используется тот же физический принцип, что и в тонкопленочных фильтрах - подавление или усиление света за счет интерференции падающих и отраженных волн (рис. 22).

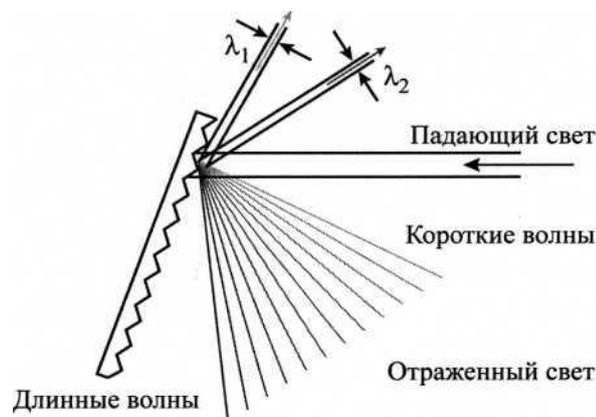


Рис. 22. Отражение составного сигнала дифракционной решеткой

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

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

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

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

Интегральная оптика успешно применяется для создания решеток на основе массива планарных волноводов (более 100) различной длины между двумя планарными линзами смесителями AWG (Arrayed Waveguide Gratings), рис. 23.



Рис. 23. Решетка на основе массива волноводов AWG - принцип работы

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

Решетки на основе массива волноводов AWG используются для того, чтобы перераспределять сигналы различных длин волн (каналы) между двумя наборами волокон (рис. 23) или выделить (демультиплексировать) отдельные каналы составного сигнала в отдельные волокна. Эта технология сейчас становится основной для производителей мультиплексоров и демультиплексоров систем DWDM. Благодаря легко масштабируемой структуре, она может широко применяться в системах с сотнями каналов.

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

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

Если два таких разветвителя расположены последовательно (рис. 24), и два рукава имеют разные оптические пути между местами сварки, то такая комбинация действует подобно интерферометру Маха-Цендера. Мощность входного сигнала распределяется между выходными волноводами в зависимости от длины волны с определенной периодичностью. Если составной входной сигнал содержит оптические каналы двух различных длин волн, то при определенном подборе параметров эти каналы на выходе окажутся в разных выходных волокнах. Второе входное волокно не используется.



Рис. 24. Входной сигнал распределяется между двумя выходами.

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

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

Мультиплексорам DWDM (в отличие от более традиционных WDM) присущи две отличительные черты:

- использование только одного окна прозрачности 1550 нм, в пределах области усиления EDFA (1530-1560 нм);
- малые расстояния ДА между мультиплексными каналами: 3,2/1,6/0,8 или 0,4 нм.

Кроме этого, поскольку мультиплексоры DWDM рассчитаны на работу с большим числом каналов до 32 и более, то наряду с устройствами DWDM, в которых мультиплексируются (демультиплексируются) одновременно все каналы, допускаются также новые устройства, не имеющие аналогов в системах WDM и работающие в режиме добавления или вывода одного и более каналов в/из основного мультиплексного потока (OADM - Optical Add-Drop Multiplexer), представленного большим числом других каналов. Так как выходные порты/полюса демультиплексора закреплены за определенными длинами волн, говорят, что такое устройство осуществляет пассивную маршрутизацию по длинам волн. OADM является ключевым моментом при переходе к полностью оптическим сетям.

На рис. 25 схематически изображен процесс ввода/вывода каналов. Этот пример включает усиление сигнала на входе и на выходе. DWDM мультиплексоры, являясь чисто пассивными устройствами, вносят большое затухание в сигнал. Например, потери для устройства (рис. 23), работающего в режиме демультиплексирования составляют 10-12 дБ, при

полуширине спектра сигнала 1 нм, (по материалам OKI Electric Industry). Из-за больших потерь часто возникает необходимость установления оптического усилителя перед и/или после DWDM мультиплексора.

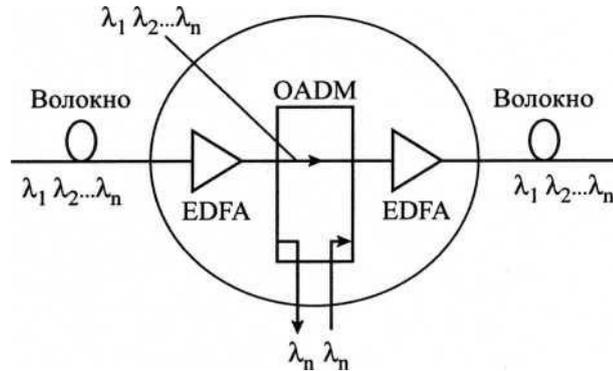


Рис. 25. Избирательный ввод/вывод каналов.

Существует два основных типа OADM. К первому поколению относятся фиксированные устройства, сконфигурированные для выделения определенных длин волн наряду с добавлением других. Такими устройствами являются, например, тонкопленочные фильтры, из-за их стабильности и низкой стоимости. Устройства второго поколения имеют возможность динамической перенастройки длин волн для ввода/вывода. В таких OADM используют волоконные брэгговские решетки [18].

Из-за малых расстояний между каналами и необходимости работы с большим числом каналов одновременно, изготовление мультиплексоров DWDM требует значительно большей прецизионности по сравнению с WDM мультиплексорами (использующими обычно окна прозрачности 1310 нм, 1550 нм или дополнительно область длин волн в окрестности 1650 нм). Все это приводит к более высокой стоимости DWDM устройств по сравнению WDM.

Крупными поставщиками оптических разветвителей и WDM устройств являются: ADC, Amphenol, DiCon, FOCI, Lucent Technologies, Molex, Nortel, OKI Electric Industry и др.

2.6 Оптические усилители

Если лазерный передатчик выдает в волокно с типичным затуханием 0,2 дБ/км в области длины волны 1550 нм сигнал мощностью плюс 16 дБм, то после прохождения 80 км мощность этого сигнала упадет до уровня 0 дБм (1 мВт) (не учитываются другие источники потерь, таких как стыки и т. д.). Если же лазер выдает сигнал мощностью 0 дБм, то при прохождении тех же 80 км он понизится до уровня минус 16 дБм. На первых этапах развития волоконно-оптической связи лазеры имели относительно низкую мощность, и сигнал необходимо было восстанавливать электронными методами при прохождении расстояний

много меньших, чем 80 км. Электронный повторитель получал оптический сигнал, преобразовывал его в электрический, усиливал и снова преобразовывал в оптический. Хотя эта технология не имела спектральных ограничений и позволяла с равным успехом восстанавливать сигналы как на 1310 нм, так и на 1550 нм, она была достаточно сложной, а увеличение скорости передачи системы требовало замены повторителей.

В начале 1980-х годов Пэйн (Payne) и Ламинг (Laming) из Саутгэмптонского университета (University of Southampton) в Великобритании предложили усиливать оптические сигналы без оптоэлектронного преобразования с помощью волокна, легированного эрбием. С этого момента началась эпоха полностью оптических повторителей. У предложенной технологии было одно небольшое ограничение: она позволяла усиливать сигналы только в узком спектральном диапазоне с центром на длине волны 1550 нм.

В настоящее время для волоконно-оптических систем связи разработаны несколько типов оптических усилителей: усилители Фабри-Перо, полупроводниковые оптические усилители, эрбиевые волоконные усилители (EDFA - Erbium-Doped Fiber Amplifier) и рамановские (ВКР) волоконные усилители.

Усилители Фабри-Перо оснащаются плоским резонатором с зеркальными полупрозрачными стенками. Они обеспечивают высокий коэффициент усиления (от 25 дБ) в очень узком (1,5 ГГц), но широко перенастраиваемом (800 ГГц) спектральном диапазоне. Кроме этого, эти устройства не чувствительны к поляризации сигнала и характеризуются сильным подавлением боковых составляющих (ослабление на 20 дБ за пределами интервала в 5 ГГц). В силу своих характеристик, усилители Фабри-Перо идеально подходят для работы в качестве демультиплексоров, поскольку они могут всегда быть перестроены для усиления только одной определенной длины волны одного канала из входного многоканального WDM сигнала.

Полупроводниковые оптические усилители не нашли применения в системах со спектральным уплотнением каналов, поскольку физические особенности их функционирования приводят к неприемлемой величине перекрестных помех между каналами.

Наиболее широкое применение в настоящее время находят волоконные усилители. Современный уровень развития технологий позволяет вводить в световедущую жилу кварцевого волокна различные примеси, в частности, редкоземельные элементы, имеющие спектр люминесценции в окнах прозрачности волокна ($\lambda=1,54$ мкм, $\lambda = 1,32$ мкм и др.) и пики поглощения в области генерации полупроводниковых лазеров ($\lambda = 808$ нм; $\lambda = 980$ нм; $\lambda=1480$ нм), через которые может осуществляться накачка активированного оптического волокна.

Эрбиевые волоконные усилители 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. 26). Именно благодаря появлению усилителей с таким сочетанием качеств линии связи и сети на основе систем DWDM стали экономически привлекательными.

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

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).

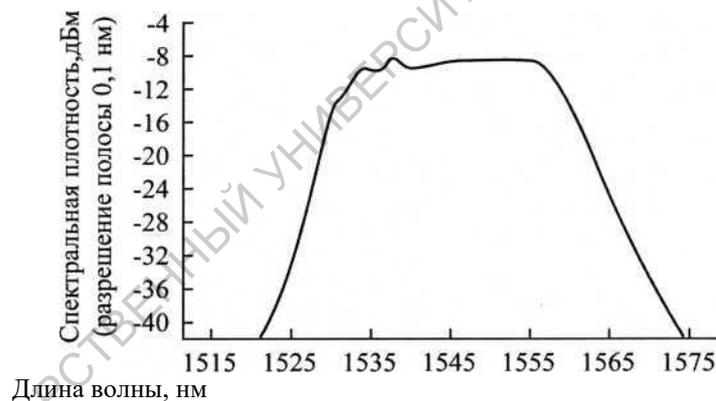


Рис. 26. Зависимость коэффициента усиления EDFA от длины волны.

Важнейший компонент усилителя EDFA - лазер накачки (рис. 27, 1). 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.

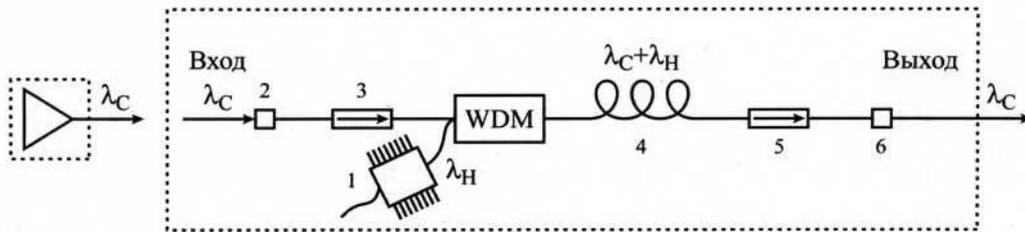


Рис.27. Схема EDFA.

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.

Рассмотрим принцип работы EDFA, рис 27. Слабый входной оптический сигнал проходит через оптический изолятор 2, который пропускает свет в прямом направлении, но не пропускает рассеянный свет в обратном направлении, далее проходит через блок фильтров 3, которые блокируют световой поток на длине волны накачки, но прозрачны к длине волны сигнала. Затем сигнал попадает в катушку с волокном 4, легированным примесью из редкоземельных элементов. Длина такого участка волокна составляет несколько метров. Этот участок волокна подвергается сильному непрерывному излучению полупроводникового лазера, с более короткой длиной накачки. Свет от лазера накачки возбуждает атомы примесей. Возбужденные состояния имеют большое время релаксации, чтобы спонтанно перейти в основное состояние. Однако при наличии слабого сигнала происходит индуцированный переход атомов примесей из возбужденного состояния в основное с излучением света на той же длине волны и с той же самой фазой, что и повлекший это сигнал. Селективный разветвитель 5 перенаправляет усиленный полезный сигнал в входное волокно. Дополнительный оптический изолятор 6 на выходе предотвращает попадание обратного рассеянного сигнала из выходного сегмента в активную область оптического усилителя.

Активной средой усилителя является одномодовое волокно, сердцевина которого

легируется примесями редкоземельных элементов с целью создания трехуровневой атомной системы, рис. 28. 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 индуцированно усиливать входной оптический сигнал в определенном диапазоне длин волн. Если же входной сигнал не нулевой, то происходит спонтанное излучение возбужденных атомов примесей, приводящее к шуму.

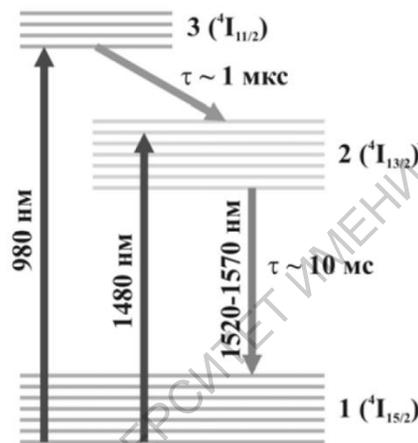


Рис. 28. Энергетическая диаграмма уровней атомной системы Er^{+3} усилителя.

Возможно несколько схем накачки EDFA на длинах волн 1480 нм или 980 нм (рис. 29). Прямое направление накачки (рис. 29а) дает наиболее низкий уровень шума. Это предпочтительно при небольшой мощности входного сигнала и максимальных значениях коэффициента усиления (область А, рис. 30). При обратном направлении накачки (рис. 29б) проще достигается режим насыщения. Это предпочтительно в тех случаях, когда требуется получить на выходе сигнал максимально возможной мощности (область С, рис. 30).

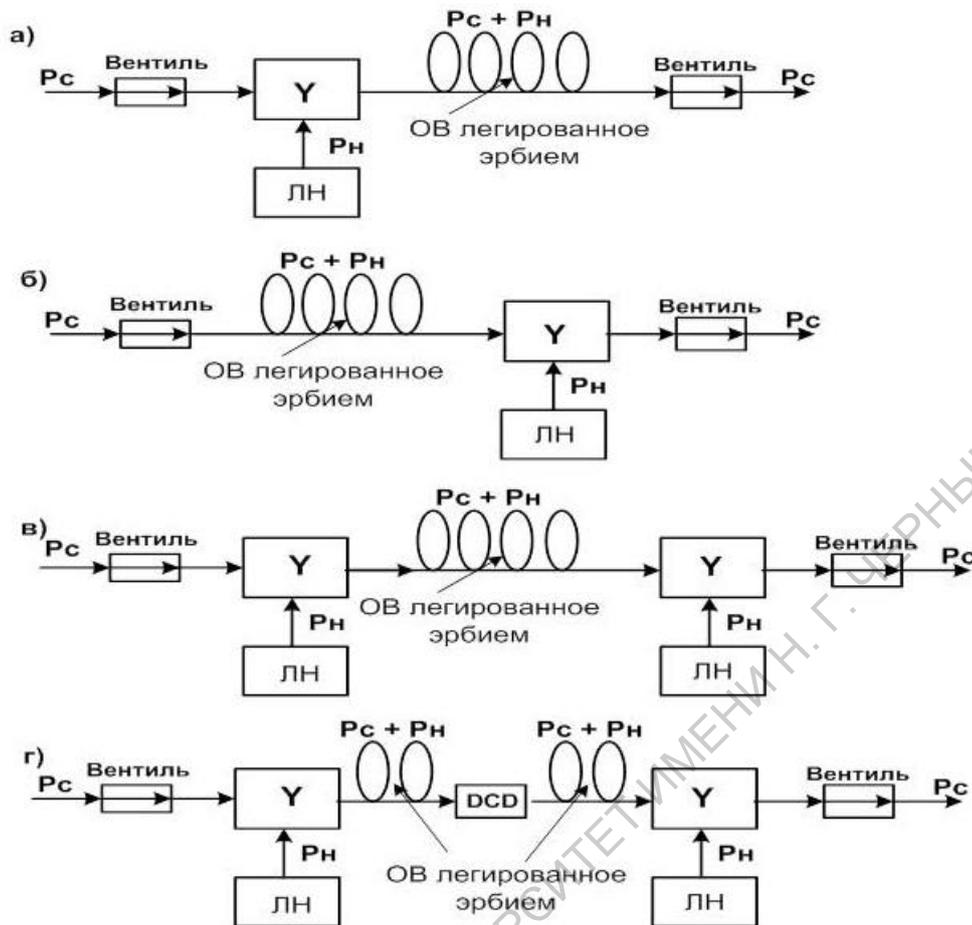


Рис. 29. Типовые схемы накачки EDFA.

При совместном применении двух лазеров накачки различных длин волн 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.

В EDFA с одноступенчатой накачкой максимальная мощность выходного сигнала, достигаемая в режиме насыщения (область С, рис. 30), составляет около плюс 16 дБм. Его коэффициент шума в области сигнала низкой мощности (область А, рис. 30) равен 5-6 дБ. В EDFA с двумя лазерами накачки (980 нм и 1480 нм) достигается более высокая мощность выходного сигнала - до плюс 26 дБм. Чтобы снизить уровень шумов почти до уровня квантовых флуктуаций (что необходимо для многих предусилителей) применяют многокаскадную конструкцию: сразу за первым каскадом усиления помещается оптический изолятор, который препятствует распространению в обратном направлении усиленной

спонтанной эмиссии (ASE - Amplified Spontaneous Emission) второго каскада.

Усилители EDFA могут использоваться по-разному в зависимости от выбранной области коэффициента усиления (рис. 30):

- В режиме насыщения (область С, рис. 30) - как усилитель мощности (бустер) сразу после лазера передатчика. Бустер повышает мощность сигнала и позволяет максимально увеличить расстояние до первого повторителя.
- В режиме промежуточных значений усиления и шума (область В, рис. 30) - как повторитель. Повторитель усиливает сигнал, насколько это возможно, внося при этом как можно меньше шума.
- В режиме наименьшего шума (область А, рис. 30) - как предусилитель перед приемником. Предусилитель повышает мощность слабого сигнала в конце линии связи. Предусилитель практически всегда используется вместе с узкополосным фильтром.

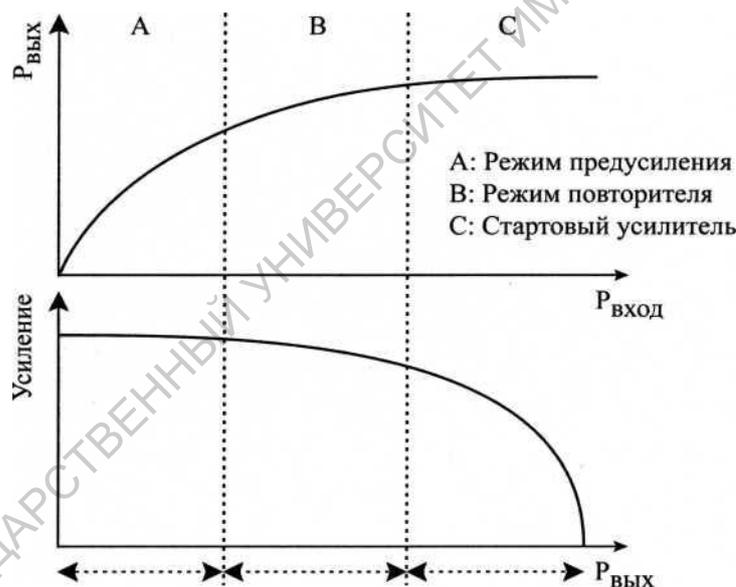


Рис. 30. Зависимость коэффициента усиления от мощности входного сигнала и различные режимы работы EDFA.

Усилитель EDFA имеет неравномерное спектральное распределение коэффициента усиления для слабых входных сигналов.

В спектральном распределении коэффициента усиления EDFA имеется широкий максимум на длине волны 1535 нм и относительно ровная область между 1540 нм и 1560 нм. Эта узкая область шириной около 20 нм и является рабочим диапазоном усилителя EDFA, в пределах которого должны лежать длины волн всех каналов систем DWDM.

Коэффициент усиления сигнала зависит и от его входной мощности. При малых

входных сигналах амплитуда выходного сигнала линейно растет с ростом входного сигнала, коэффициент усиления достигает при этом своего максимального значения. Например, если входной сигнал 1 мВт (минус 30 дБм), то выходной сигнал может быть на уровне 1 мВт (0 дБм), что соответствует усилению в 30 дБ. Но при большом входном сигнале сигнал на выходе достигает своего насыщения, что приводит к падению коэффициента усиления.

Например, на той же длине волны входной сигнал 1 мВт приведет к генерации выходного сигнала 20 мВт в режиме насыщения, что будет соответствовать коэффициенту усиления всего лишь 13 дБ.

Было предложено множество методов, позволяющих выровнять спектр усиления и расширить рабочий диапазон усилителя EDFA до 40 нм и более. Ровный спектр усиления необходим для того, чтобы при прохождении последовательно расположенных по линии связи усилителей EDFA происходило равномерное усиление сигналов с различными длинами волн. В усилителе LWEDFA, описанном выше, верхняя граница рабочего диапазона достигает 1610 нм. Это позволяет передавать каналы DWDM в обоих направлениях в двух взаимно не пересекающихся окнах и в то же время снижает уровень технических требований при более плотной упаковке каналов DWDM.

В современных усилителях EDFA имеется ряд компонентов, которые увеличивают их надежность. Изоляторы подавляют обратное распространение усиленной спонтанной эмиссии ASE и предохраняют усилитель от попадания всевозможных отраженных сигналов и излучения накачки от EDFA, расположенных ниже по линии связи. Устройства компенсации дисперсии выравнивают временные задержки, возникающие при распространении сигналов различных длин волн, особенно между двумя каскадами двухкаскадного EDFA (рис. 29д).

В современных EDFA используется волокно на кварцевой или фторидной основе. Применение других материалов пока находится в стадии исследования. Оба типа волокна имеют практически одинаковую внутреннюю структуру, но волокно на фторидной основе обеспечивает более высокий уровень легирования эрбием. Обе технологии обеспечивают приемлемое усиление в окне 1525-1560 нм, однако, спектральное распределение коэффициента усиления для усилителей EDFA на кварцевой основе менее однородное, чем для усилителей на фторидной основе (рис. 31).

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.

Современные эрбиевые волоконные усилители обеспечивают усиление модулированных оптических сигналов в полосе до 40 ГГц. Имеются экспериментальные работы, в которых показана возможность усиления модулированных сигналов с скоростями модуляции до 160 Гбит/с.

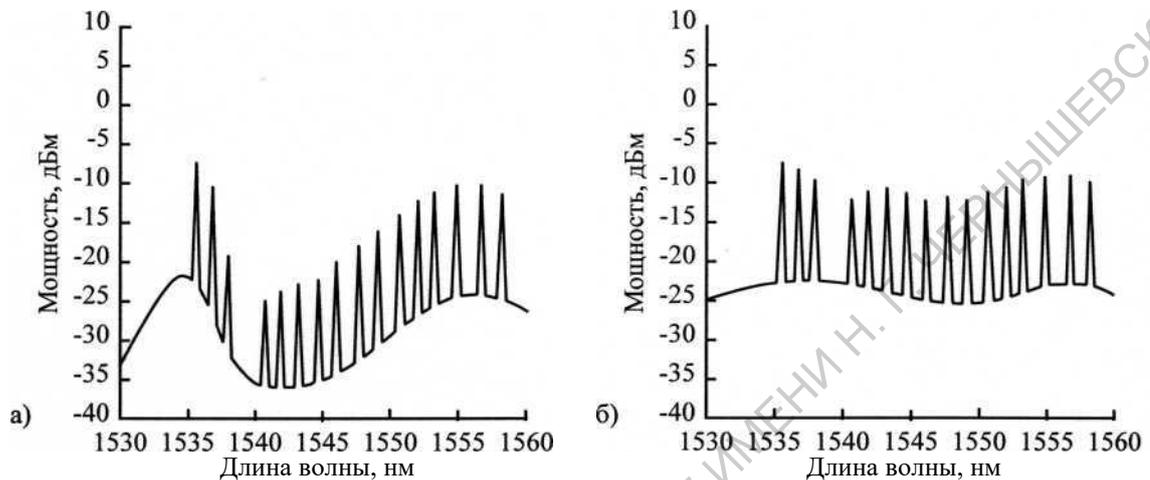


Рис. 31. а) Спектральное распределение коэффициента усиления EDFA на кварцевой основе; б) Спектральное распределение коэффициента усиления EDFA на фторидной основе.

Для многоканальных волоконно-оптических систем со спектральным мультиплексированием очень важным является спектральная полоса усиления и ее равномерность (плоскостность). Поскольку в настоящее время число каналов достигает 100, и практически трудно реализовать разделение отдельных спектральных каналов с интервалами менее чем 0,4 нм (50 ГГц), то эти параметры начинают оказывать определяющее влияние на полосу пропускания системы или скорость передачи информации.

Полоса пропускания, ее равномерность, динамический диапазон и другие перечисленные выше характеристики усилителя напрямую зависят от параметров активированного световода (его длины, диаметра световедущей жилы, распределения ионов эрбия по диаметру световедущей жилы, степени однородности накачки и т. д.), а также топологии усилителя. В связи с тем, что невозможно создать усилители с одним активным элементом (световодом), полностью удовлетворяющие требованиям DWDM-систем, в последнее время стали разрабатываться многокаскадные эрбиевые волоконно-оптические усилители. Так, фирма Lucent Technologies сообщила о создании двухкаскадных эрбиевых волоконных усилителей, имеющих спектральную полосу усиления $\Delta\lambda = 35$ нм с максимальным отклонением коэффициента усиления не более 0,6 дБ (или 2,5%) в пределах всей полосы. Современная технология изготовления активированных эрбиевых световодов позволяет

сдвигать границы полосы усиления в пределах длин волн $\lambda_X = 1530\text{-}1650$ нм, перекрывая тем самым С- и L-диапазоны DWDM-систем. Фирмой Alcatel разработан эрбиевый волоконный усилитель для DWDM-систем, работающий в L-диапазоне ($\lambda_X = 1570\text{-}1603$ нм) и имеющий среднее значение коэффициента усиления, равное 34 дБ с отклонением не более 1,8 дБ по всей полосе усиления. При мощности накачки, равной 1,76 Вт, выходная мощность усилителя составляла плюс 26 дБм.

Последним достижением является разработка *эрбиевых усилителей на основе теллуридного волокна* (легированного примесями теллура), имеющих спектральную полосу $\Delta\lambda = 80$ нм, которая перекрывает С- и L-диапазоны систем DWDM. Именно с помощью таких усилителей была реализована экспериментальная система, обеспечивающая полную скорость передачи информации 3 Тбит/с (19 спектральных каналов емкостью 160 Гбит/с в каждом канале).

Помимо EDFA, имеются и другие варианты оптических усилителей. Альтернативные разработки направлены как на расширение или смещение рабочего диапазона, так и на упрощение конструкции и, соответственно, уменьшение стоимости оптических усилителей.

Один из подходов заключается в использовании в качестве легирующей добавки не эрбия, а празеодима. *Усилитель на волокне на фторидной основе, легированном празеодимом* (PDFFA - Praseodymium Doped Fluoride-based Fiber Amplifier) усиливает сигналы в области длины волны 1310 нм. Усилители PDFFA обладают низкой дисторсией и низким уровнем коэффициента шума, но энергетически менее эффективны, чем усилители EDFA. Мощность выходного сигнала усилителя PDFFA в режиме насыщения достаточно высока, а коэффициент его усиления не зависит от поляризации, также как и у усилителя EDFA. Хотя затухание сигнала в оптическом волокне в области длины волны 1310 нм несколько выше, чем в области длины волны 1550 нм, (рис. 5), дисперсия в области длины волны 1310 нм ниже и достичь высокой мощности лазера намного легче.

К сожалению, приемлемая эффективность накачки для волокна, легированного празеодимом, достигается только тогда, когда его диаметр значительно меньше диаметра стандартного волокна. Из-за разности диаметров волокон на обоих стыках возникают оптические потери. Достаточно сложно обеспечить механическую надежность стыков. В настоящее время нет экономичных способов решения этих проблем, а потому возможность широкого коммерческого использования усилителей PDFFA пока исключена.

Другая комбинация, которая исследуется в настоящий момент - волокно и тулий. *Усилитель на волокне на фторидной основе, легированном тулием* (TDFFA - Thulium Doped Fluoride-based Fiber Amplifier) имеет два рабочих диапазона: в области длины волны 1460 нм и

в области длины волны 1650 нм. К его преимуществам относятся высокая мощность выходного сигнала в режиме насыщения, не зависящий от поляризации коэффициент усиления и низкий коэффициент шума. В усилителях с очень высокой мощностью выходного сигнала в качестве легирующей примеси используется также иттербий.

В основе функционирования *рамановских усилителей* лежит явление вынужденного комбинационного рассеяния. Усиление оптического сигнала происходит в том случае, если он распространяется в световоде вместе с интенсивной волной накачки, а его длина волны лежит в полосе частот комбинационного рассеяния света в световоде.

Рамановские усилители перспективны для применения в волоконно-оптических системах связи в силу их следующих принципиальных преимуществ:

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

Основным недостатком рамановских усилителей является их невысокая эффективность преобразования, что требует использования довольно мощного непрерывного излучения накачки (~ 1 Вт) для получения типичной для оптических систем связи величины усиления сигнала 30 дБ. Также в рамановских усилителях при усилении возникает значительная перекрестная модуляция между усиливаемыми каналами, что ограничивает применение таких усилителей либо одноканальными системами, либо системами DWDM с очень большим числом каналов, где влияние такой модуляции устраняется за счет усреднения. Кроме того, рамановские усилители имеют определенные недостатки, связанные с нелинейными эффектами и зависимостью от поляризации. С учетом низкого уровня преобразования сигнала в эффекте рассеяния Рамана в кварцевом волокне, их применение ограничено узким кругом специфических областей, по крайней мере, на данный момент.

Перспективным направлением является также разработка и создание гибридных волоконных усилителей, состоящих из различных комбинаций, включающих распределенный рамановский усилитель и эрбиевый волоконный усилитель [19].

В настоящее время разрабатываются также *полупроводниковые оптические усилители* (SOA - Semiconductor Optical Amplifiers). В них излучение фотонов стимулируется рекомбинацией электронов и дырок в полупроводнике посредством прямой инжекции тока (а

не внешней накачкой оптическим излучением, как в случае волокна, легированного эрбием). Такие усилители представляют значительный интерес, поскольку позволяют достичь высокой эффективности усиления и гибкости рабочей длины волны, пусть и с достаточно высоким коэффициентом шума (обычно на 5-6 дБ больше, чем у EDFA, в основном за счет неизбежных потерь на стыке активного слоя с волокном). Как и в рамановских усилителях, в SOA возникает значительная перекрестная модуляция между усиливаемыми каналами, что препятствует их применению в системах DWDM с небольшим числом каналов. Однако, эта же перекрестная модуляция может стать преимуществом при использовании усилителей SOA для коммутации или преобразования длин волн.

Для усилителей SOA, как и для PDFFA, возникает проблема стыковки с волокном, поскольку толщина активного слоя полупроводникового усилителя значительно отличается от диаметра сердцевины стандартного оптического волокна [20].

2.7 Волновые конвертеры

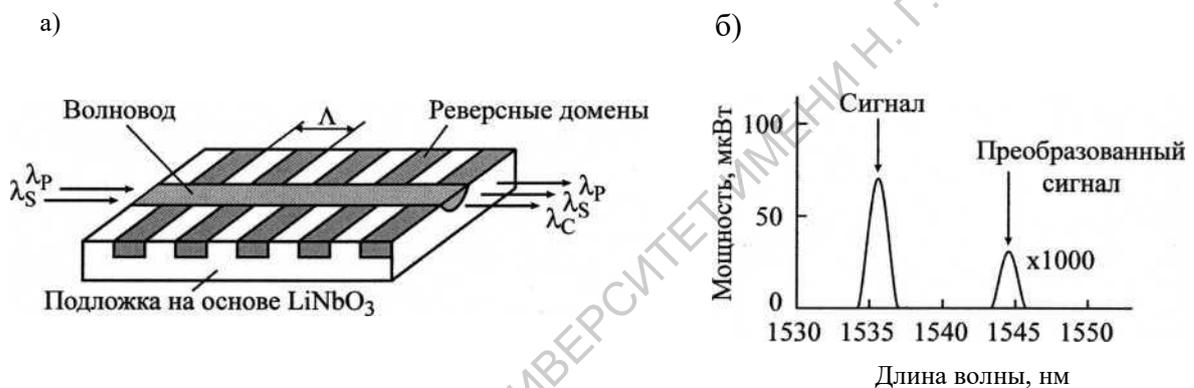
В рамках концепции оптических сетей, волновой конвертер осуществляет чисто оптическое преобразование длины волны входящего сигнала в другую длину волны. Принцип действия такого преобразования, также известного как X-конверсия, основан на эффектах нелинейного взаимодействия исходного оптического сигнала со специальным сигналом от лазера накачки, в результате чего образуется излучение новой длины волны. Преобразование полностью прозрачно по отношению к частоте модуляции и в отличие от оптоэлектронных преобразований не вносит задержки и способно работать вплоть до очень высоких частот модуляции (10 Гбит/с и выше). В перспективе ожидается появление волновых конвертеров, осуществляющих одновременно преобразование длин волн сразу нескольких входящих сигналов, причем в пределах широкого волнового диапазона и малыми вносимыми шумами.

Один из методов волновой конверсии основан на использовании ферроэлектрического кристалла, внутри которого создаются условия для нелинейного оптического взаимодействия (рис. 32а). Периодическая структура с чередующейся сменой направлений поляризаций увеличивает эффективность волнового преобразования. При одновременном распространении входного сигнала и сигнала от лазера накачки происходит генерация света на частоте, равной разности частоты волны накачки входного сигнала, т. е. выполняется закон сохранения энергии: $1/\lambda_c = 1/\lambda_p - 1/\lambda_s$.

На рис. 32б показан пример экспериментальных профилей мощности входного ($\lambda_s=1536$ нм) и выходного ($\lambda_c=1545$ нм) сигналов при длине волны накачки $\lambda_p = 770$ нм, полученных с использованием такой периодической структуры. Основные технические

параметры системы: мощность лазера накачки 10 мВт; диапазон длин волн перестраивания лазера накачки - 100 нм; полная длина кристаллической структуры 10 мм.

Другое решение реализовано в работе [21]. В качестве нелинейной среды используется волокно с нулевой смещенной дисперсией DSF длиной 2 км. Нелинейный эффект, приводящий к генерирующей новой длине волны, основывается на четырехволновом смешивании, причем закон сохранения энергии записывается в виде $2/\lambda_p = 1/\lambda_s + 1/\lambda_c$ (используются прежние обозначения). Разумеется, наибольшая эффективность достигается в окрестности точки нулевой дисперсии, где значительно возрастает сечение четырехволнового смешивания. Для накачки следует выбирать как можно ближе к длине волны нулевой дисперсии волокна DSF.



.Рис. 32. Схема и профили мощности волнового конвертера: а) схема волнового конвертера с периодической ферроэлектрической структурой. Длина волны накачки: λ_p Длина волны исходного сигнала: λ_s Преобразованная длина волны: λ_c ; б) профили мощности входного и выходного сигналов (по материалам фирмы OKI Electric Industry).

2.8 Оптические коммутаторы

Оптический коммутатор - это один из важных элементов полностью оптической сети, без которого невозможно строить масштабируемые архитектуры. Большинство основных конструкций оптических коммутаторов должно иметь, по крайней мере, два выхода. Основными параметрами коммутатора являются: перекрестные помехи, вносимые помехи, скорость переключения, управляющее напряжение. В настоящее время используются разнообразные типы оптических коммутаторов - направленные ответвители, мостовой балансировый интерферометр и коммутатор на скрещивающихся волноводах. В основе работы оптического коммутатора используется линейный электрооптический эффект Поккельса

(Pockels), который заключается в изменении показателя преломления материала пропорционально напряженности приложенного электрического поля. Эффект Поккельса может наблюдаться только в кристаллах не обладающих центром симметрии.

Устройства мультиплексирования/демультиплексирования WDM, волновые фильтры и оптические коммутаторы имеют одну общую деталь - в основе их работы лежат в той или иной степени интерференционные эффекты. Основные принципы работы легче рассмотреть на простейшем четырехполюснике - разветвителе-коммутаторе 2x2 (элемент 2x2).

На рис. 33 показана общая схема сплавного разветвителя X-типа. Излучение, введенное в один волновод, проникает в другой за счет перекрытия реактивных полей двух волноводов. Погонный коэффициент связи k зависит от параметров волновода, длины волны λ и ширины зазора g между волноводами. Прикладывая электрическое напряжение к электродам, расположенным по бокам или сверху и снизу волноводов, образующих так называемую ячейку Поккельса, можно регулировать фазовую расстройку за счет линейного электрооптического эффекта.

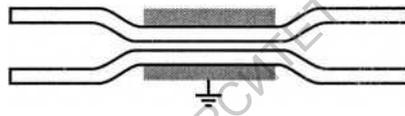


Рис. 33. Общая схема направленного ответвителя-переключателя.

С помощью такой ячейки, прикладывая различные напряжения, можно обеспечить полную (кроссовую) передачу мощности или параллельное прохождение сигналов. Разветвитель-коммутатор 2x2 осуществляет коммутацию без блокировки.

Еще одна реализация разветвителя-коммутатора 2x2, состоящая из двух последовательных X-разветвителей, представлена на рис. 34. Оптические сигналы после прохождения по разным плечам интерферируют во втором разветвителе. Путем изменения напряжения на электродах, охватывающих одно из плеч, можно регулировать разность фаз между приходящими во второй разветвитель сигналами и тем самым влиять на характер интерференции.

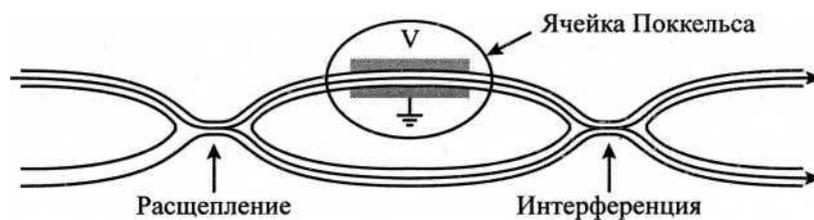


Рис. 34. Двухплечевой оптический разветвитель-коммутатор.

Наряду с электрооптическим эффектом, для осуществления коммутации также широко

используется акустооптический эффект [22,23]. Имеется ряд технических реализаций пространственных коммутаторов 2×2 на основе полупроводниковых оптических усилителей [24, 25].

На основе простых оптических разветвителей-коммутаторов 2×2 -элементов - строятся более сложные оптические коммутаторы $N \times N$. Поскольку составные элементы 2×2 принимают на входные полюсы сигналы одной и той же длины волны, то и весь коммутатор $N \times N$ изготавливается для работы с поступающими оптическими сигналами одной и той же заданной длины волны. Другими важными характеристиками коммутатора, кроме рабочей длины волны, являются максимальные вносимые потери и поперечные помехи на выходных полюсах.

Существует направление оптоэлектроники, которое условно можно назвать «оптическая микромеханика». Сущность этого направления заключается в создании и применении микро-электро-механических систем (MEMS) для управления световыми потоками и каналами. MEMS представляют собой различные структуры микронных размеров (микромембраны, микроплоскости, микробалки и т. д.), которые могут приводиться в движение электрическим полем. Эти структуры уже широко используются в различных областях науки и техники, в частности в химии, в биологии, в точной механике, в авиакосмической промышленности и т. д. Производятся они из кремния методами стандартной полупроводниковой технологии.

На основе MEMS могут быть созданы новые типы оптических переключателей, модуляторов, аттенюаторов, эквалайзеров, мультиплексоров, устройств ввода-вывода, перестраиваемых лазерных источников излучения и других оптических элементов [13].

MEMS обладают такими преимуществами, как: миниатюрные размеры, малая потребляемая мощность, высокая надежность. MEMS легко интегрируются с другими оптическими компонентами, технология их изготовления хорошо отработана.

Применение MEMS позволило решить проблему создания первых коммерчески доступных оптических переключателей. В настоящее время на рынке имеются переключатели 8×8 , 16×16 и 32×32 канала. Ожидается появление переключателей 64×64 и 256×256 каналов, а рядом фирм уже проводятся разработки переключателей 1024×1024 канала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

США традиционно рассматриваются как передовой телекоммуникационный рынок, в котором все новейшие телекоммуникационные технологии, включая оптические, внедряются достаточно быстро. Тем не менее, операторы и других регионов мира вкладывают значительные средства в развитие DWDM-технологии. Например, в 2001 г. бельгийская компания Belgacom объявила о планах создания инфраструктуры DWDM, которая должна стать составной частью национальной опорной сети страны для обеспечения спроса на высокоскоростной трафик и широкополосные услуги. На первоначальном этапе строительства компанией Ericsson организуется 17 трактов между крупнейшими городами Бельгии, имеющими высокий телекоммуникационный трафик. Финская компания Sonera также создает оптический «DWDM-highway» длиной 7500 км. В связи с этим проектом директор компании по продажам на зарубежные рынки Туомо Коккила заявил, что сегодня основными требованиями их пользователей является обеспечение IP-трафика и передача услуг мобильной связи третьего поколения (3G). О своих инвестициях в сеть DWDM объявила также и компания Korea Telecom, которая обеспечит связь между крупными территориально разнесенными городами Кореи. Благодаря этой сети Korea Telecom сможет предоставлять высокоскоростной доступ в Интернет. Другая корейская компания Thrunet, являющаяся провайдером услуг связи на базе кабельных линий и модемов, также решила прибегнуть к использованию технологии DWDM. Этот пример интересен тем, что упомянутый оператор хочет использовать систему защиты трафика непосредственно на оптическом уровне.

Другой пример: компания Alcatel, мировой лидер в области интеллектуальных оптических сетей, провела успешные лабораторные испытания, в ходе которых был установлен еще один рекорд: организовав на базе оптического волокна TeraLight™ Ultra 125 40-гигабитных каналов DWDM с общей пропускной способностью 5 Тбит/сек., она осуществила передачу данных на расстояние свыше 1500 километров. Это достижение пополнило список рекордов, установленных компанией Alcatel в прошедшем году. Таким образом, компания продолжает наращивать усилия, направленные на максимизацию пропускной способности и увеличение дальности передачи по одному оптическому волокну, при одновременном снижении издержек, связанных с использованием технологии DWDM. Этому достижению способствовало применение разработанных компанией Alcatel двухфазных гибридных эрбиевых/рамановских усилителей, 40-гигабитных систем DWDM, технологии упреждающего исправления ошибок FEC (Forward Error Correction), и оптического волокна TeraLight Ultra, специально адаптированного к условиям высокоскоростной передачи на дальние и сверхдальние расстояния. Продемонстрированная общая пропускная способность, среди прочего, означает

возможность осуществлять за 1 секунду одновременную передачу 80 миллионов телефонных вызовов или свыше 500000 высокоскоростных интернет-соединений ADSL по одному единственному оптическому волокну» [26].

Примеры использования DWDM технологии в России можно найти в работах [26, 27].

Коммерческие системы с DWDM могут обеспечивать пропускную способность до 400 Гбит/с при передаче 80 волн по одному волокну. Экспериментальные исследования показывают огромную потенциальную емкость оптических систем, которая удваивается в коммерческих системах каждые 12 месяцев. Лаборатории Белла (Bell Labs) осуществили передачу сигнала со скоростью 320 Гбит/с на расстояние 200 км с помощью одноволновой системы TDM. В другом эксперименте - с использованием лазера с линейной модуляцией частоты по одному волокну - была реализована передача 1022 длин волн [27].

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 отмечается, 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-коммутация», которая является дальнейшим развитием технологии, известной под аббревиатурой MPLS. Технология быстрой коммутации пакетов в многопротокольных сетях, основанная на использовании меток. MPLS позиционируется как способ построения высокоскоростных IP-магистралей, однако область ее применения не ограничивается протоколом IP, а распространяется на трафик любого маршрутизируемого сетевого протокола (Multi Protocol Label Switching). Лямбда-коммутация, фактически уже доступная для внедрения, заменяет обычный заголовок в IP-формате на короткую метку, тем самым увеличивая скорость

обработки информационных данных. Мультипротокольная лямбда-коммутация вносит элемент интеллектуальности в сферу оптических телекоммуникаций, в частности, передающий транспондер (приемопередатчик) 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 [30].

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.

ЛИТЕРАТУРА

1. Р.Р. Убайдуллаев, Волоконно-оптические сети. М.: Эко-Трендз 2001г 267с.
2. И. С. Гольдфарб. Развитие техники оптических кабелей: Обзор информации / ЦНИИ Связи. - М.: ЦНТИ «Информсвязь», 1996. - 84 с.
3. Строительство и техническая эксплуатация волоконно-оптических линий связи: Учебник для ВУЗов / под. ред. Б. В. Попова - М.: Радио и связь, 1996. - 200 с.
4. J. Hecht. Understanding Fiber Optics, Sams Publishing, 1993. - 477 p.
5. W. Hioki. Telecommunications, 2nd ed., Prentice Hall, 1995. - 501 p.
6. G.P. Agrawal, Fiber-Optic Communications Systems, Third Edition. The Institute of Optics. University of Rochester. Rochester: NY. WILEY, 2002.
7. B. Mukherjee, Optical WDM Networks, Springer US, New-York, 956 C., 2006.
8. Волоконно-оптические системы передачи и кабели: Справочник / И. И. Гроднев, А. Г. Мурадян, Р. М. Шарафутдинов и др. - М.: Радио и связь, 1993. - 264 с.
9. Новые типы оптических волокон для высокоскоростных систем передач. Фотон-экспресс 15, май 1999 г, <http://www.tkc.ru/foton/15/newtypes.html>
10. J. J. Refi. Optical Fibers For Optical Networking, Bell Labs Technical Journal, January- March 1999,-246-261 p.
11. Lucent Technologies AllWave(r) optical fiber for metro networks scores two technology «firsts» in Argentina field trial. Lucent Technologies May 29, 2001 Press release, <http://www.lucent.com/press/0501/010529.nsa.html>
12. В. Т. Потапов. Эволюция волоконно-оптических систем и технологий. Фотон-Экспресс 24, январь 2002 г, <http://www.tkc.ru/foton/24/vols evolution.html>
13. Конюхов А.И., Романова Е.А., Мельников Л.А., Современная фотоника, учебное пособие для студентов физического факультета, обучающихся по специальностям 01.04.00 "Физика" и 01.38.00 "Радиофизика и электроника", Саратовский гос. ун-т им. Н. Г. Чернышевского. Саратов, 2007.
14. Highly manufacturable and reliable multicolor lasers for telecommunication applications. Alcatel, <http://www.alcatel.com/telecom/optronics/articles/highlv.htm>
15. G. Chretien. Optical components for the new millennium, Alcatel Telecommunications Review - 3rd Quarter 2000, - 221-229 p.
16. P. Bregi. Optical components lead the way to dense WDM optical networking. Infrastructure Summit. Alcatel TELECOM 99 Forum.
17. Fundamentals of DWDM Technology Cisco Systems, 2001,

http://www.pluscom.ru/univercd/cc/td/doc/product/mels/cml500/dwdm/dwdm_ovr.htm

18. В. Т. Потапов, Ф. А. Егоров. Усилители оптических сигналов в ВОЛС Фотон-Экспресс 21, декабрь 2001 г, <http://www.tkc.ru/foton/21/amplifiers.html>
19. A. Girard. Компоненты системы DWDM: оптические усилители EDFA EXF O, http://www.fiberdriver.ru/?do=stech_1&id=5_5
20. All-Optical Frequency Conversion. All-Optical Networking Consortium: WDM Slide Presentation, 1996, <http://www.ll.mit.edu/aon/WDMslide20.html>
21. K. M. Kissa, D. J. Fritz. AOTFs Route Traffic in WDM Networks. //Lightwave, June 1996 (pp. 64-66).
22. А. И. Конюхов [и др.], Вычислительные методы в лазерной физике. Учебное пособие для студентов физического факультета, обучающихся по специальности 01.40.00 "Физика" и 01.38.00 "Радиофизика и электроника" / А. И. Конюхов [и др.]. Саратов, 2007. Том Моделирование распространения световых пучков и импульсов в оптических волноводах
23. Р. Б. Крейнин, А. Ю. Цым. Спектральное уплотнение оптических кабелей на транспортной сети ОАО «Ростелеком»// Электросвязь, №8, 2000, с. 12
24. Енсен Т., Функе О., Вагеманн У. на пути к 40 гбит/с: измерение потерь и дисперсии в компонентах плотного мультиплексирования с разделением по длинам волн. //Фотон-Экспресс, №2, С. 28-31. 2006.
25. Гуркин Н.В., Трешиков В.Н., Наний О.Е. Оптические когерентные DWDM системы связи с канальной скоростью 100 гбит/с.//Фотон-Экспресс, №4 (116), С. 24-27. 2014.
26. G.P. Agrawal, N.K. Dutta, Semiconductor Lasers, 2nd edn. Van Nostrand Reinhold, New York, 1993.
27. S. Bigo, W. Idler, Multi-terabit/s transmission over Alcatel TeraLight™ fiber. Alcatel Telecommunications Review - 4th Quarter 2000, - 288-296 p.