

Лекция 6 Электронные компоненты систем оптической связи

6.1 Повторители и оптические усилители

Проблема расстояния

По мере распространения оптического сигнала происходит его ослабление, а также уширение импульсов из-за дисперсии. Любой из этих факторов может оказаться причиной ограничения максимальной длины безретрансляционного участка волоконно-оптического сегмента.

Если же максимальная допустимая длина между приемником и передатчиком превышена, то необходимо в промежуточных точках линии связи добавлять один или несколько ретрансляторов. В общем случае, ретранслятор выполняет функцию усиления оптического сигнала, и дополнительно (при цифровой передаче) может восстанавливать форму импульсов, уменьшать уровень шумов и устранять ошибки - такой ретранслятор называется *регенератором*.

Типы ретрансляторов

По методу усиления оптического сигнала ретрансляторы подразделяются на две категории: повторители и оптические усилители.

В волоконно-оптических системах локальных сетей повторители значительно больше распространены, чем оптические усилители, в то время как при построении оптических магистралей оптические усилители играют незаменимую роль.

Повторитель (электронно-оптический повторитель) сначала преобразует оптический сигнал в электрическую форму, усиливает, корректирует, а затем преобразовывает обратно в оптический сигнал, рис. 6.1 а. Можно представить повторитель как последовательно соединенные приемный и передающий оптические модули.

Аналоговый повторитель, в основном, выполняет функцию усиления сигнала. При этом вместе с полезным сигналом усиливается также входной шум. Однако при цифровой передаче повторитель наряду с функцией усиления может выполнять функцию регенерации сигнала, свойственную цифровому оптическому приемнику.

Обычно блок регенерации охватывает цепь принятия решения и таймер. Блок регенерации восстанавливает прямоугольную форму импульсов, устраняет шум, ресинхронизирует передачу так, чтобы выходные импульсы попадали в соответствующие тайм-слоты.

Повторитель может и не содержать таймера и восстанавливать прямоугольную форму импульсов по определенному порогу, независимо от того, на какой скорости ведется передача. Такие "среднезависимые" повторители применяются в локальных сетях, где имеет место асинхронный режим передачи.

Оптический усилитель (ОУ), в отличие от повторителя, не осуществляет оптоэлектронного преобразования, а сразу производит усиление оптического

сигнала, рис. 6.1 б.

Оптические усилители не способны в принципе производить регенерацию оптического сигнала. Они в равной степени усиливают как входной сигнал, так и шум.

Кроме этого, вносится собственный шум в выходной оптический канал.

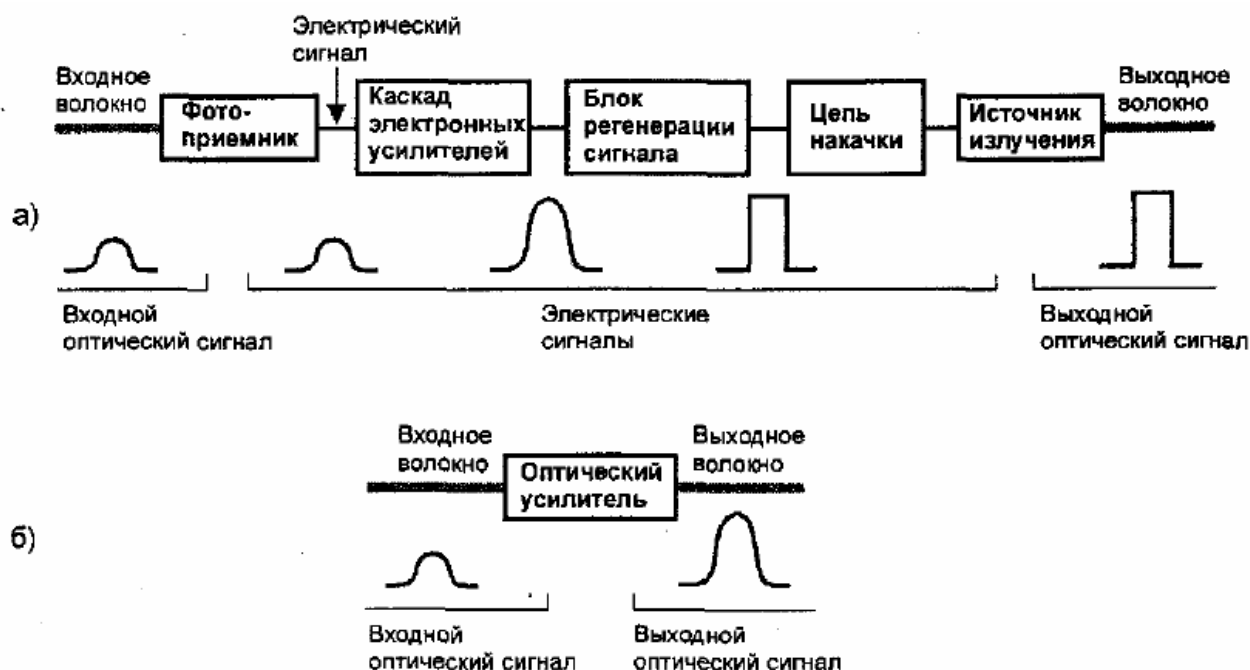


Рис. 6.1. Типы ретрансляторов: а) электронно-оптический повторитель;
б) оптический усилитель

Сравнительные характеристики повторителя и оптического усилителя приведены в табл. 6.1. Концептуальная простота - один из притягивающих факторов ОУ. Простота конструкции, в которой преобладают пассивные компоненты, в конечном счете, обещает низкую цену, так как число компонентов ОУ значительно меньше, чем у повторителя.

На практике, однако, цена ОУ значительно выше, чем у повторителей. Но, по прогнозам специалистов, цена ОУ по мере увеличения рынка продаж будет падать. ОУ имеет более высокую надежность, чем повторитель.

Это важное преимущество при создании ретрансляторов при прокладке подводного ВОК. ОУ не привязан к скорости передачи, в то время как повторитель обычно выполняется для работы на определенной скорости. Именно на эту скорость конфигурируется таймер повторителя.

Повторитель работает с одним сигналом, ОУ может одновременно усиливать несколько оптических сигналов, представленных несколькими длинами волн (WDM сигнал) в пределах определенного интервала, который называется зоной усиления.

Это позволяет наращивать пропускную возможность линии связи, на которой установлены ОУ, без добавления новых волокон.

Повторители для цифровых линий связи

Хотя повторители для цифровых линий связи могут быть независимыми от среды, большинство из них рассчитано на вполне определенный стандарт.

В локальных сетях распространены повторители, преобразующие сигналы из многомодового (mm) в одномодовое (sm) волокно.

Такие повторители получили название *конвертеры*.

Широко распространены FDDI (100 Мбит/с) [8, 9], АТМ (155 Мбит/с), АТМ (622 Мбит/с) [10] sm/mm конвертеры.

Таблица 6.1. Сравнительные Характеристики повторителей и оптических усилителей

Характеристика	Повторитель	Оптический усилитель
Конструкция	Сложная	Простая
Цена	Низкая	Высокая, но падает
Надежность	Высокая	Очень высокая
Регенерация сигнала	Допустима	Исключена
Привязка к скорости передачи	Требуется	Не требуется
Возможность одновременной передачи нескольких сигналов	Не допускается	Допускается
Рабочая длина волны, им	850, 1300, 1550	Область 1530-1560
Отношение сигнал шум	Высокое	Низкое
Область применения	Локальные сети, региональные сети, межрегиональные сети	Сейчас и в перспективе региональные сети, межрегиональные сети

Оптические усилители

Эти устройства обеспечивают внутреннее усиление оптического сигнала без его преобразования в электрическую форму. Они используют принцип индуцированного излучения, аналогично лазерам. Существует пять типов оптических усилителей, см. табл. 6.2 [4].

Таблица 6.2. Типы и области применения оптических усилителей

Типы усилителей	Область применения
Усилитель с полостью Фабри-Перо	Усиление одного канала
Усилители на волокне, использующие бриллюэновское рассеяние	Усиление одного канала
Усилители на волокне, использующие романовское рассеяние	Усиление нескольких каналов одновременно
Полупроводниковые лазерные усилители	Усиление большого числа каналов в широкой области длин волн одновременно
Усилители на примесном волокне	Усиление большого числа каналов в широкой области длин волн одновременно

1. Усилители Фабри-Перо. Усилители оснащаются плоским резонатором с зеркальными полупрозрачными стенками. Они обеспечивают высокий коэффициент усиления (до 25 дБ) в очень узком (1,5 ГГц), но широко перестраиваемом (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.

2. Усилители на волокне, использующие бриллюэновское рассеяние.

Стимулированное бриллюэновское рассеяние - это нелинейный эффект, возникающий в кремниевом волокне, когда Энергия от оптической волны на частоте, скажем, f_1 переходит в энергию новой волны на смещенной частоте f_2

Если мощная накачка производится на частоте f_1 , стимулированное бриллюэновское рассеяние способно усиливать слабый входной сигнал на частоте f_2 . Выходной сигнал сосредоточен в узком диапазоне, что позволяет выбирать канал с погрешностью 1,5 ГГц.

3. Усилители на волокне, использующие рамановское рассеяние.

Стимулированное рамановское рассеяние - также нелинейный эффект, который подобно бриллюэновскому рассеянию может использоваться для преобразования части энергии из мощной волны накачки в слабую сигнальную волну. Однако, при рамановском рассеянии частотный сдвиг между сигнальной волной и волной накачки ($|f_2 - f_1|$) больше, а выходной спектральный диапазон усиления шире, что допускает усиление сразу нескольких каналов в WDM сигнале. Большие переходные помехи между усиливаемыми каналами представляют основную проблему при разработке таких усилителей.

4. Полупроводниковые лазерные усилители (ППЛУ).

Основу ППЛУ составляет активная среда, аналогичная той, которая используется в полупроводниковых лазерах [11, 12]. В ППЛУ отсутствуют зеркальные резонаторы, характерные для полупроводниковых лазеров. Для уменьшения френелевского отражения с обеих сторон активной среды наносится специальное покрытие толщиной $\lambda/4$ с согласованным показателем преломления, рис. 6.2.

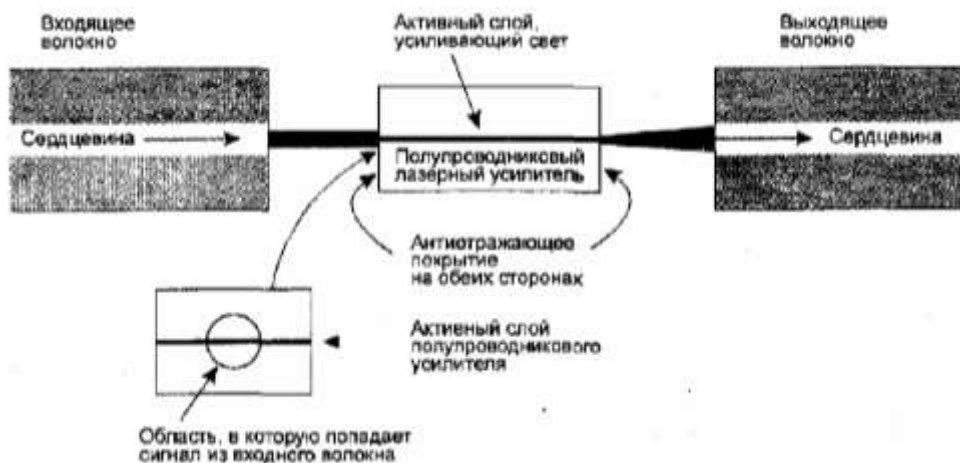


Рис. 6.2. Полупроводниковый лазерный усилитель

Полупроводниковые лазерные усилители не получили столь широкого распространения, как усилители на примесном волокне. Дело в том, что ППЛУ свойственны два существенных недостатка.

Светоизлучающий активный слой имеет поперечный размер несколько микрон, но толщину в пределах одного микрона, что много меньше, чем диаметр светонесущей части оптического волокна (9 мкм - для одномодового волокна).

Вследствие этого большая часть светового потока из входящего волокна не попадает в активную область и теряется, что уменьшает КПД усилителя. Увеличить КПД можно, поставив между входящим волокном и активной средой линзу, но это приводит к усложнению конструкции.

Второй недостаток имеет более тонкую природу. Дело в том, что выход (коэффициент усиления) ППЛУ зависит от направления поляризации и может отличаться на 4-8 дБ для двух ортогональных поляризаций. Это нежелательно, так как в стандартном одномодовом волокне поляризация распространяемого светового сигнала не контролируется. Мощность светового потока данной поляризации может флуктуировать вдоль длины. Отсюда вытекает, что коэффициент усиления ППЛУ зависит от неконтролируемого фактора.

Можно уменьшить эту зависимость от поляризации путем установки двух лазеров - возможно как параллельное (требуется пара разветвителей), так и последовательное их подключение. Но это снова приводит к усложнению конструкции и росту стоимости.

Два приведенных недостатка нивелируются в тех случаях, когда ППЛУ интегрирован с другими оптическими устройствами. И именно так преимущественно используются ППЛУ. Одна из возможностей - производство совмещенного с вето излучающего лазерного диода, непосредственно на выходе которого устанавливается ППЛУ.

На рис. 6.3 показана еще одна реализация источника мультиплексного многоволнового излучения, в котором ППЛУ используются в качестве широкополосного усилителя. Несколько узкополосных полупроводниковых лазеров на разных длинах волн генерируют световые сигналы, которые мультиплексируются и размножаются посредством оптического разветвителя. ППЛУ устанавливаются на конечном участке, чтобы усилить ослабленные после разветвления оптические мультиплексные сигналы.

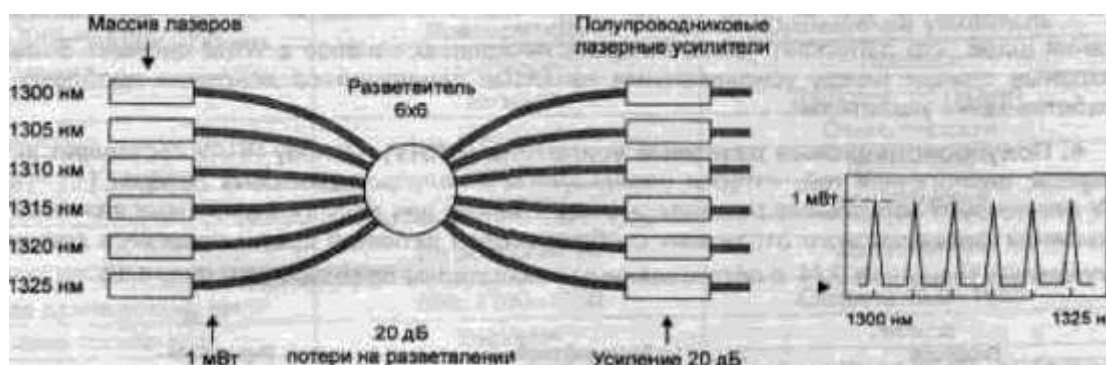


Рис. 6.3. Источник мультиплексного излучения, (полупроводниковые лазерные усилители интегрированы с массивом лазерных светодиодов и оптическим разветвителем)

5. Усилители на примесном волокне. Этот тип оптического усилителя наиболее широко распространен и является ключевым элементом в технологии полностью оптических сетей, поскольку он позволяет усиливать сигнал в широком спектральном диапазоне [13, 14, 15].

На рис. 6.4 приведена схема усилителя на примесном волокне. Слабый входной оптический сигнал (1) проходит через оптический изолятор (2), который пропускает свет в прямом направлении - слева направо, 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, легированным примесью из редкоземельных элементов (4). Длина такого участка волокна составляет несколько метров. Этот участок волокна подвергается сильному непрерывному излучению полупроводникового лазера (5), установленного с противоположенной стороны, с более короткой длиной волны накачки. Свет от лазера накачки - волна накачки (6) - 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 (7) перенаправляет усиленный полезный сигнал (8) в выходное волокно (9). Дополнительный оптический изолятор на выходе (10) 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. 6.5. Лазер накачки возбуждает электронную подсистему примесных атомов. В результате чего электроны с основного состояния (уровень А) переходят в возбужденное состояние (уровень В). Далее происходит релаксация электронов с уровня В на промежуточный уровень С. Когда заселенность уровня С становится достаточно высокой, так что образуется инверсная заселенность уровней А и С, то такая система способна индуцировано усиливать входной оптический сигнал в определенном диапазоне длин волн. Если же входной сигнал не нулевой, то происходит спонтанное излучение возбужденных атомов примесей, приводящее к шуму.

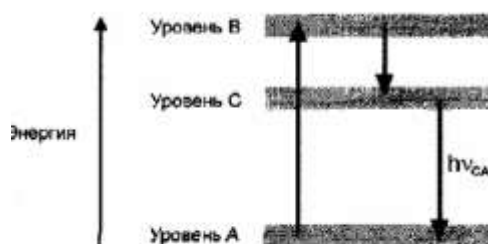


Рис. 6.5. Энергетическая диаграмма уровней атомной системы усилителя на примесном волокне

Особенности работы усилителя во многом зависят от типа примесей и от диапазона длин волн, в пределах которого он должен усиливать сигнал. Наиболее широко распространены усилители, в которых используется кремниевое волокно, легированное эрбием. Такие усилители получили название EDFA, Межатомное взаимодействие является причиной очень важного положительного фактора - уширения уровней, что, в конечном итоге, обеспечивает усилителю широкую зону усиления сигнала [16]. В EDFA наиболее широкая зона усиления от 1530 до 1560 им, соответствующая переходу $h\nu_{CA}$. достигается при оптимальной длине волны лазера накачки 980 им.

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

Коэффициент усиления сигнала зависит от его входной амплитуды и длины волны. 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 (-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.

На рис. 6.6 показано, как ведет себя коэффициент усиления K для EDFA в зависимости от длины волны и при различных значениях мощности входного сигнала. Уменьшение K при $P_{in} = 1$ мВт связано с насыщением усилителя. На кривой зависимости K от длины волны при малых значениях мощности входного сигнала заметны минимумы и максимумы. Отсутствие плато в широком диапазоне длин волн (от 1530 до 1560 им) заставляет дополнительно на линии из каскада оптических усилителей устанавливать эквалайзеры с целью выравнивания амплитуд мультиплексных сигналов разных длин волн. В то же время ведутся интенсивные исследования по выравниванию кривой усиления. Следует подчеркнуть, что построение усилителей с такими характеристиками не является непреодолимой задачей, но скорее требует тщательно отработанной технологии производства всех элементов усилителя.

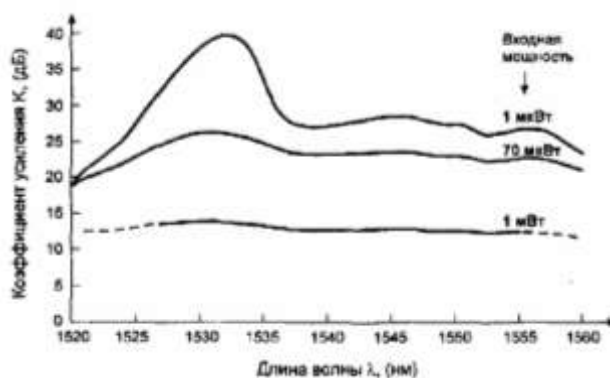


Рис. 6.6. Коэффициент усиления кремниевого EDFA при различных значениях мощности входного оптического сигнала (по материалам фирмы Coming)

Характерным для оптических усилителей является широкополосный собственный шум, рис. 6.7. Этот шум, которого избежать невозможно, главным образом связан со спонтанным излучением инверсно-заселенных уровней на примесных атомах.

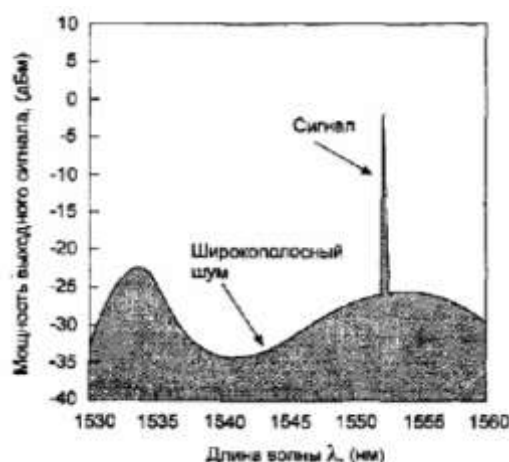


Рис. 6.7. Мощность выходного сигнала и шума в EDFA

6.2 Разновидности усилителей EDFA

Две разновидности усилителей EDFA с примесным волокном преобладают в коммерческих реализациях сегодня: на кремниевой основе, и на фтор-цирконатной основе [14]. При очень схожем внутреннем строении эти усилители отличаются только заготовочным волокном.

Усилители EDFA на кремниевой основе первыми появились на рынке и определили развитие благодаря возможности усиления WDM сигнала в широком спектральном интервале при небольших вносимых шумах на разных длинах волн. Сегодня оба типа усилителей (кремниевые и фтор-цирконатные) способны работать во всем диапазоне выхода оптического излучения эрбия от 1530 нм до 1560 нм. Однако оптические усилители на кремниевой основе не имеют столь ровной передаточной кривой коэффициента усиления, как усилители на фтор-цирконатной основе, рис. 6.8.

В силу особенностей конструкции усилители EDFA вносят определенный шум в усиливаемый сигнал, приводя к уменьшению отношения сигнал/шум и ограничивая число каскадов и расстояние между двумя электронными регенераторами. Этот недостаток не помешал дальнейшему стремительному развитию технологии и серийного производства усилителей EDFA. Четырехволновое мультиплексирование в окне 1550 нм, появившееся всего несколько лет назад, сегодня сменяется мультиплексными системами с числом волновых каналов более 40. Плата за увеличение числа каналов выражается в уменьшении удельной мощности (мощности на канал) в выходном сигнале, которая ослабевает примерно на 3 дБ при удвоении числа каналов.

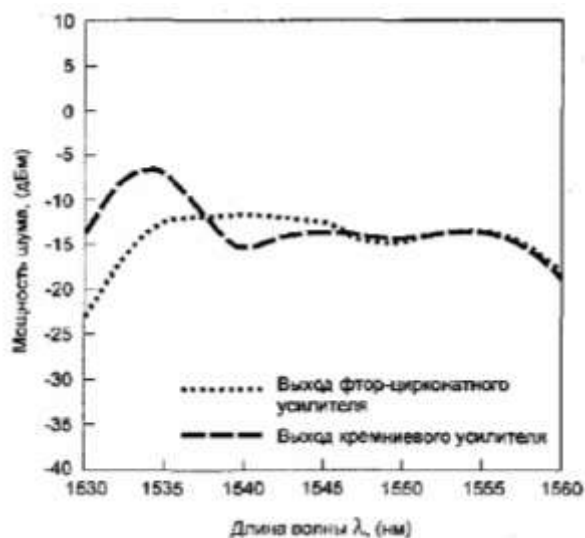


Рис. 6.8. Кривая выходной мощности, представляющей собой мощность входного шума, при отсутствии сигнала на входе

Усилители на кремниевой основе

Усиление DWDM сигнала в традиционных усилителях на кремниевом волокне связано с одной технологической проблемой - нерегулярностью коэффициента усиления как функции длины волны. На рис. 6.9 а показана кривая выходной мощности при усилении 16-канального мультиплексного сигнала со скоростью на канал STM-16 (2,5 Гбит/с). Как видно, на некоторых каналах сохраняется довольно высокое отношение сигнал/шум (SNR), в то время как на других, особенно в районе 1540 нм, значение SNR низкое. В результате может оказаться, что DWDM сигнал, проходящий через усилитель на одних каналах (например, выше 1545 нм) будет иметь приемлемое SNR, а на других (район 1540 нм) не удовлетворительное для используемого приложения соотношение SNR.

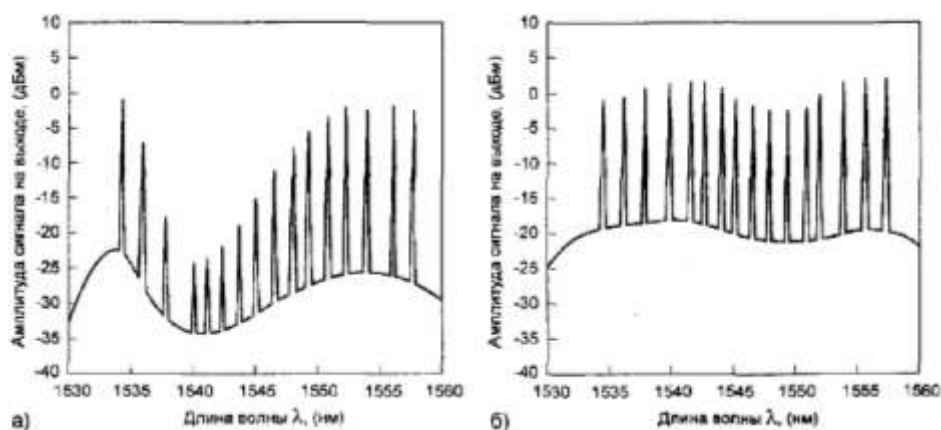


Рис. 6.9. Кривые выходной мощности (сигнала и шума) при поступлении на вход усилителя DWDM сигнала для усилителей: а) на кремниевой основе (наблюдается завал в окрестности 1540 нм); б) на фтор-цирконатной основе

В результате того, что признание технологии усилителей EDFA на кремниевой основе произошло раньше, на сегодняшний день большее распространение имеет именно эти разновидности EDFA.

Некоторые потребители (операторы связи) решают проблему завала кривой простым исключением области низкого усиления от 1530 до 1542 им, довольствуясь более узким окном. Но это может повлечь в некоторых случаях к очень высокой плотности каналов, что нежелательно, так как с ростом плотности сильнее начинают проявляться нелинейные эффекты, как, например, четырехволновое смешивание. Кроме этого, принимая во внимание настоящее состояние дел по технологии фильтрации, стоимость выделения отдельных каналов из более плотного DWDM сигнала будет выше.

Другой способ решения проблемы завала состоит в намеренном предварительном селективном ослаблении входного сигнала с целью получения более ровной картины амплитуд выходных сигналов и более согласованных значений SNR на разных каналах. При выполнении селективного ослабления приходится принимать во внимание то, что энергия на других каналах также перераспределяется. В результате чего оптимизация системы становится сложной итерационной процедурой. Дополнительные сложности возникают, когда битовые скорости добавляемых или удаляемых каналов различны. Например, соотношение SNR для передачи STM-64 (10 Гбит/с) должно быть на 6 дБ больше, чем для передачи STM-16 (2,5 Гбит/с). В последнем случае, дополнительная мощность должна быть добавлена в канал STM-64.

Производители оборудования, понимая эту проблему, начинают внедрять различные самооптимизирующиеся алгоритмы в элементы полностью оптической сети [17, 18]. Обеспечение возможности динамического оптического балансирования по энергии между каналами важно не только для работы с EDFA на кремниевой основе, но и само по себе, поскольку позволяет значительно повысить надежность сети,

Усилители на фтор-цирконатной основе

Эти усилители обладают более регулярным плато. Дело в том, что фторосодержащее волокно способно поглотить больше эрбия, что и приводит к улучшению профиля в области 1530-1542 им, которая теперь открывается для усиления DWDM сигнала.

Рис. 6.9 б показывает, насколько эффективно усиливается DWDM сигнал. Мультиплексированные каналы практически по всей полосе пропускания имеют близкие значения SNR. Это значительно упрощает процедуру оптического балансирования при воспроизведении сигналов, когда каналы добавляются или удаляются.

Фтор-цирконатный усилитель EDFA имеет один недостаток - выше (чем у кремниевого) уровень шума, что является следствием большей рабочей длины волны лазера накачки 1480 им. Дело в том, что длина волны накачки 980 им, характерная для кремниевого EDFA, не эффективна для работы флюоридного усилителя EDFA, поскольку на этой длине волны велико сечение поглощения, сопровождающееся возбуждением других состояний. Указанный недостаток появляется при строительстве сверхпротяженных безрегенерационных сегментов с каскадом оптических усилителей, ограничивая расстояния между усилителями. Есть пути преодоления этой проблемы, производители собираются поставлять следующее поколение фтор-цирконатных усилителей EDFA, имеющих ровный профиль, низкий уровень шумов и более высокую надежность.