

ТАШКЕНТСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

На правах рукописи

Имамова Гузал Назимджановна

Исследование характеристик волоконно-оптических усилителей

Специальность: 5A522203

«Оптические системы связи и обработка информации»

ДИССЕРТАЦИЯ

На соискание степени магистра телекоммуникаций

Работа рассмотрена
и допускается к защите.
Зав. кафедрой ТСП
к.т.н., доцент Исаев Р.И.
« ____ » _____ 2010 г.

Научный руководитель
Доцент Н.Ю.Юнусов _____

Ташкент-2010 г

АННОТАЦИЯ

Увеличение пропускной способности существующей ВОСП является актуальным на сегодняшний день. Исследования показывают, что модернизация действующей сети с помощью оптических усилителей значительно снижает затраты на эксплуатацию сети. Данная магистерская диссертация посвящена исследованию особенностей функционирования оптических усилителей различного типа.

АННОТАЦИЯ

Мавжуд ОТУТ нинг ўтказиш тезлигини ошириш шу куннинг долзарб масаласи бўлмоқда. Тадқиқотлар натижалари бўйича, оптик кучайтиргичлар ёрдамида ишлаб турувчи тармоқ модернизацияланиши тармоқ сарф харажатларини анча камайтиради. Ушбу магистерлик диссертацияси, ҳар хил типдаги оптик кучайтиргичлар ишлаш хусусиятларининг тадқиқотига бағишланган.

SUMMARY

The increase of existing fiber-optic transmission system bandwidth is quite actual nowadays. The investigations show that modernization of acting network with optical amplifier significantly decreases the expenses on network exploitation. The given dissertation of masters degree is devoted to the research of different optical amplifier types and their functioning fetures.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.

1. ПРОБЛЕМЫ РАССТОЯНИЯ И СКОРОСТИ ПЕРЕДАЧИ

В ВОСП -----

1.1. Волоконно-оптические системы передачи и их достоинства--

1.2 Оптическое волокно – как передающая среда и факторы
определяющие дальность и скорость передачи информации
в ВОСП-----

1.3 Пути решения проблемы расстояния и скорости передачи
информации в ВОСП-----

Постановка задачи магистерской диссертации -----

Выводы по первой главе-----

2. Исследование характеристик волоконно-оптических
усилителей применяемых в ВОСП-----

2.1 Физические основы функционирования оптических
усилителей-----

2.2 Основные характеристики и параметры характеризующие
оптические усилители-----

2.3 Основные типы волоконно-оптических усилителей-----

2.4 EDFA усилители: устройство, физический механизм работы,
основные характеристики и параметры-----

2.5 Оптические усилители, использующие нелинейные

явления в ОВ -----

- 2.6 Волоконно-оптические усилители с использованием
Романовского рассеяния оптического излучения.

Основные характеристики и параметры -----

- 2.7 Волоконные ВРМБ усилители -----
2.8 Параметрические усилители-----

Выводы по второй главе -----

3. ВОПРОСЫ ПРИМЕНЕНИЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ
УСИЛИТЕЛЕЙ -----

- 3.1 Анализ рекомендаций ETSI и ИТИ по применению волоконно-
оптических усилителей -----

- 3.2 Сравнительная характеристика волоконно-оптических
усилителей -----

- 3.3 Особенности применения различных типов волоконно-
оптических усилителей в ВОСП -----

Выводы по третьей главе-----

Основные результаты диссертационной работы-----

Приложение -----

Список тезисов, докладов и статей представленных по
диссертационной работе-----

Список использованной литературы-----

ВВЕДЕНИЕ

Волоконно-оптические системы передачи (ВОСП) благодаря ряду ценных свойств, таких как широкая полоса пропускания, высокая помехозащищенность, высокая скорость передачи, малое затухание светового сигнала в оптическом волокне, скрытность передаваемой информации, длительный срок службы, экономичность волоконно-оптических кабелей и т. д. нашли и находят широкое применение в телефонии, кабельном телевидении, в бортовой связи летательных аппаратов, самолетов, морских судов, в локальных сетях и управлении технологическими процессами и превратились в один из наиболее конкурентно-способный и перспективный вид техники связи.

Одним из важнейшим и неотъемлемым элементом волоконно-оптических систем передачи, в том числе, ВОСП нового поколения с волновым разделением каналов по длине волны являются оптические усилители, обеспечивающие передачу информации на дальние расстояния, исчисляемые сотнями километрами.

В связи с этим исследование особенностей функционирования характеристик и параметров, а также вопросов целенаправленного и эффективного применения оптических усилителей приобретает актуальное значение.

Целью магистерской диссертационной работы является исследование характеристик волоконных оптических усилителей, в рамках которого предусматривается решение следующих задач:

- проведение обобщения и системного анализа научной и научно-технической литературы по волоконным оптическим усилителям;

- исследование особенностей функционирования характеристик и параметров различных типов волоконных оптических усилителей – примесных волоконных усилителей (EDFA усилителей), Рамановских усилителей, усилителей Бриллюэна – Мандельштама и параметрических усилителей;

- проведение сравнительного анализа характеристик и параметров волоконно-оптических усилителей с точки зрения их применения в ВОСП;

- изучение вопросов целенаправленного и эффективного применения волоконно-оптических усилителей различных типов при проектировании ВОСП.

Научная новизна магистерской диссертационной работы состоит в том, что в ней:

- обобщен и систематизирован научный и научно-технический материал по оптическим усилителям;

- проведена классификация волоконно-оптических усилителей по природе явлений, составляющих физическую основу их работы и по диапазону рабочей длины волны;

- исследованы особенности функционирования, характеристик и параметров волоконно-оптических усилителей, Рамановских усилителей, усилителей Бриллюэна – Мандельштама и параметрических усилителей;

- дана сравнительная характеристика различных типов волоконных оптических усилителей с точки зрения и применимости в ВОСП;

- изучен вопрос целенаправленного и эффективного использования различных типов волоконных оптических усилителей различных типов в ВОСП.

Практическая ценность магистерской диссертации состоит в том, что её результаты могут быть использованы при проектировании ВОСП, а также в учебном процессе при проведении занятий по дисциплине «Основы оптической связи» для бакалавров, обучающихся по направлению «Телекоммуникация».

Апробация магистерской диссертационной работы

Материалы и некоторые положения диссертационной работы доложены на научном семинаре кафедры ТСП и на научно-технической конференции докторантов, аспирантов, магистрантов и одарённых студентов ТАТУ на тему «Информационно-коммуникационные технологии», проведённой 25-27 марта 2010 года. Тезисы докладов сданы в печать.

1. ПРОБЛЕМЫ РАССТОЯНИЯ И СКОРОСТИ ПЕРЕДАЧИ В ВОСП

1.1. Волоконно-оптические системы передачи и их достоинства

Волоконно-оптические системы передачи (ВОСП) являются цифровыми системами передачи, использующими оптическое волокно в качестве среды передачи. Они появились тогда, когда доминирующей была технология PDH – технология плезиохронной цифровой иерархии (ПЦИ), которая использовала в качестве среды передачи первоначально медный кабель, но с ростом скоростей передачи быстро переориентировалась на ОВ (сначала на многомодовое, а затем и на одномодовое), как только оно стало конкурентноспособно с медным кабелем. PDH в процессе своей эволюции и возникших противоречий в управлении потоками все большей и большей емкости (достигавшей 576 Мбит/с) переросла в новую технологию – SDH – технологию синхронной цифровой иерархии (СЦИ), которая предложила, а затем и стандартизовала (1988 г.), идею транспортировки сигналов PDH путем упаковки их в стандартные контейнеры SDH первоначальная скорость распространения которых 155 Мбит/с в настоящее время выросла до величины в 40 Гбит/с в расчете на один канал. Технология SDH с самого начала была ориентирована на использование оптического волокна в качестве среды передачи. Указанного увеличения скорости передачи она достигла за 10 лет. Дальнейшее развитие по пути увеличения емкости канала связи натолкнулось на технологические ограничения на скорость передачи сигналов в одном канале (40 Гбит/с можно рассматривать как определенный практический предел). Поиск путей преодоления этого ограничения шел по двум перспективным направлениям. Одно было связано с поиском возможных путей дальнейшего увеличения скорости передачи в одном канале и преодолением возникших ограничений. Оно привело к практическому воплощению идеи использования

специальных импульсов – солитонов – в качестве носителей информации и появлению солитонных сетей связи. Другое было связано с увеличением суммарной пропускной способности оптического волокна путем использования в каждом из волокон нескольких параллельно передаваемых оптических несущих, что привело к появлению технологии WDM – технологии волнового мультиплексирования. В современных сетях связи используются аналоговые и цифровые системы передачи (СП) с тенденцией постепенного перехода к применению только цифровых систем.

Высокая стоимость линий связи обуславливает разработку систем и методов, позволяющих одновременно передавать по одной линии связи большое число независимых сообщений, т.е. использовать линию многократно. Такие системы связи называют многоканальными. Связь, осуществляемую с помощью этих систем, принято называть многоканальной. Практически все современные системы связи за редким исключением являются многоканальными. Волоконно-оптическими (ВОСП) называют системы передачи, использующие в качестве среды распространения сигнала оптическое волокно. Автор известной книги «Волоконно-оптические системы связи» Роджер Фриман так представляет упрощённую модель ВОСП:



Рис. 1.1 Упрощённая схема ВОСП.

Первоначально развитие ВОСП шло в направлении создания оптоэлектронных элементов (источников и приемников оптического излучения) и каналообразующего оборудования ЦСП. Развитие ЦСП и оптоэлектроники для применения в ЦСП шло, фактически, независимо. В качестве примера систем, построенных по такому принципу, можно привести ВОСП Российского производства "Соната-2", "Сопка-2" и ИКМ-120-4/5 со скоростью передачи 8 Мбит/с; "Сопка-3", ИКМ-480-5 со скоростью передачи 34 Мбит/с; "Сопка-4М", "Сопка-5" со скоростью передачи 140 Мбит/с. Основным преимуществом ВОСП по сравнению с ЦСП, работающими по металлическому кабелю, явилось значительное увеличение длины участка регенерации (до нескольких десятков км).

Современные волоконно-оптические системы передачи обладают большими скоростными возможностями и широкополосностью, стабильностью и надежностью, высокой степенью достоверности передачи информации. Чтобы отвечать этим качествам, все их элементы должны функционировать в строгих технических рамках.

Для волоконно-оптической системы передачи (ВОСП), как и для любой кабельной системы (на коаксиальных или симметричных кабелях), существуют общие параметры, измерять которые необходимо при строительстве, пуско-наладочных работах, сертификационных и пусковых испытаниях, а также в процессе эксплуатации при проведении профилактических работ. Вместе с тем ВОСП присущи существенные особенности, обусловленные тем, что в них носителем информации в них является поток фотонов, среди которых можно выделить следующие:

-сверхвысокая пропускная способность, обусловленная работой в оптическом диапазоне электромагнитных волн. По одному ОВ можно

передавать информацию со скоростью порядка 10^{12} - 10^{13} бит/с, что эквивалентно 15 млн. одновременных телефонных разговоров цифрового качества. На сегодняшний день полоса пропускания оптоволокна превышает все потребности существующих сетевых приложений;

- малое затухание сигнала, значения которого составляют 0.2-0.25 дБ/км на длине волны 1.55 мкм. В зависимости от скорости передачи это позволяет создавать линии с регенерационными участками более 100 км;

- невосприимчивость к электромагнитным помехам и высокая степень защищенности от прослушивания;

- малый вес и габариты кабелей (малый диаметр оптического волокна, малая удельная масса кварца, отсутствие экранов), легкость и компактность источников и приемников;

- оптические волокна, применяемые в связи на длинные и средние дистанции, в основном состоят из материала широко распространенного в природе, а потому более дешевые, чем медь;

- гальваническая развязка между входной и выходной цепями;

- большой срок службы (25 лет и более при качественном изготовлении и прокладке кабелей).

Благодаря этим свойствам ВОСП, они нашли и находят широкое применение в телефонии, кабельном телевидении, в бортовой связи летательных аппаратов, самолетов, морских судов, в локальных сетях и управлении технологическими процессами и превратились в один из наиболее конкурентно-способных и перспективных видов техники связи.

1.2 Оптическое волокно – как передающая среда и факторы определяющие дальность и скорость передачи информации в ВОСП

В волоконно-оптических системах передачи (ВОСП) информация передается электромагнитными волнами высокой частоты, около 200 ТГц, что соответствует ближнему инфракрасному диапазону оптического спектра 1500 нм. Волноводом, переносящим информационные сигналы в ВОСП, является оптическое волокно (ОВ), которое обладает важной способностью передавать световое излучение на большие расстояния с малыми потерями.

Различают следующие типы оптического волокна:

- многомодовое градиентное (GI – Gradient Index);
- одномодовое оптическое волокно (SM – single mode 1.31 мкм);
- одномодовое со смещенной дисперсией (DS – Dispersion Shifted 1.55 мкм).

К этому же семейству принадлежат одномодовые ОВ со сглаженной дисперсией (DF – Dispersion Flatted 1.3 и 1.55 мкм) и одномодовое волокно со смещенной, но не нулевой дисперсией (NZDS – None Zero Dispersion Shifted).

Различают также:

-“активные” оптические волокна (ED – Erbium Doped). Волокна этого типа используются в оптических усилителях;

-пластиковые оптические волокна (POF).

Основными факторами, влияющими на надежность и долговечность ОВ являются влага, механические деформации, водород, остаточные деформации.

Предполагается, что свет - расширение радиочастотного спектра на его высокочастотном конце. Эта концепция непрерывного спектра иллюстрируется рис. 1.2.

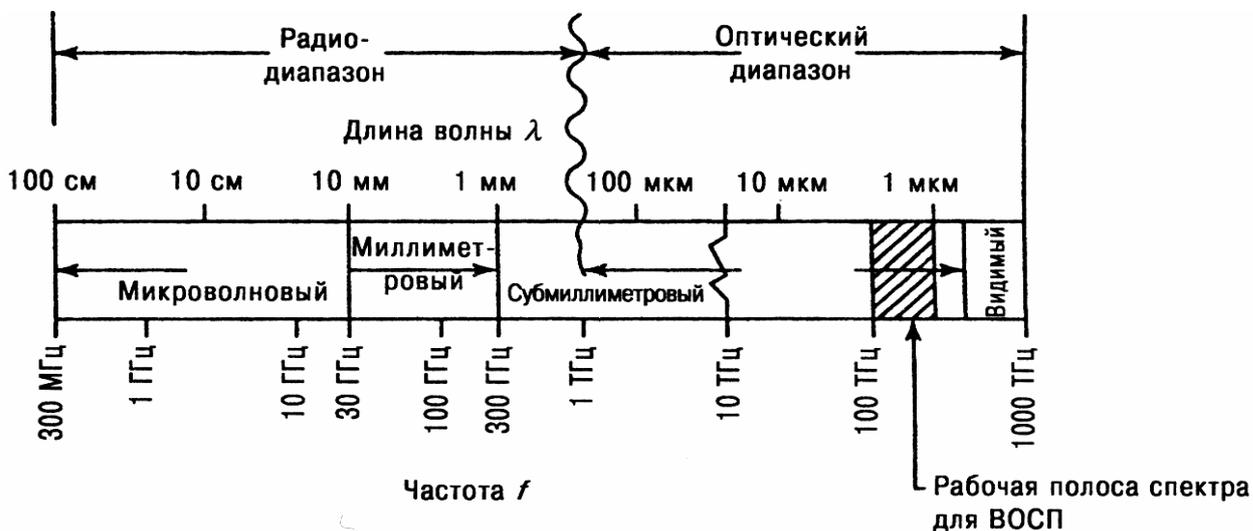


Рис. 1.2. Частотный спектр выше 300 МГц, где показано положение рабочей области ВОСП.

Потери в ОВ количественно характеризуются затуханием. Скорость и дальность передачи информации определяются искажением оптических сигналов из-за дисперсии и затухания. Волоконно-оптическая сеть - это информационная сеть, связующими 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.

Оптическое волокно в настоящее время считается самой совершенной физической средой для передачи информации, а также самой перспективной средой для передачи больших потоков информации на значительные расстояния. Основания так считать, вытекают из ряда особенностей, присущих оптическим волноводам:

- широкополосность оптических сигналов, обусловленная чрезвычайно высокой частотой несущей $f_0 = 10^{12} - 10^{14}$ Гц. Это означает, что по оптической линии связи можно передавать информацию со скоростью порядка 10^{12} бит/с (1Тбит/с). Говоря другими словами, по одному волокну можно передать одновременно 10 миллионов телефонных разговоров и миллион видеосигналов. Скорость передачи данных может быть увеличена за счет передачи информации сразу в двух направлениях, так как световые волны могут распространяться в одном волокне независимо друг от друга. Кроме того, в оптическом волокне могут распространяться световые сигналы двух разных поляризаций, что позволяет удвоить пропускную способность оптического канала связи. На сегодняшний день предел по плотности передаваемой информации по оптическому волокну не достигнут;

- очень малое (по сравнению с другими средами) затухание светового сигнала в оптическом волокне. Лучшие образцы российского волокна имеют затухание 0,22 дБ/км на длине волны 1,55 мкм, что позволяет строить линии связи длиной до 100 км без регенерации сигналов. Для сравнения, лучшее волокно Sumitomo на длине волны 1,55 мкм имеет затухание 0,154 дБ/км. В оптических лабораториях США разрабатываются еще более «прозрачные», так называемые фторцирконатные оптические волокна с теоретическим пределом порядка 0,02 дБ/км на длине волны 2,5 мкм. Лабораторные исследования показали, что на основе таких волокон могут быть созданы линии связи с регенерационными участками через 4600 км при скорости передачи порядка 1 Гбит/с;
- ОВ изготовлено из кварца, основу которого составляет двуокись кремния, широко распространенного, а потому недорогого материала, в отличие от меди;

- оптические волокна имеют диаметр около 100 мкм, то есть очень компактны и легки, что делает их перспективными для использования в авиации, приборостроении, в кабельной технике;
- т.к. оптические волокна являются диэлектриками, следовательно, при строительстве систем связи автоматически достигается гальваническая развязка сегментов. В оптической системе они электрически полностью изолированы друг от друга, и многие проблемы, связанные с заземлением и снятием потенциалов, которые до сих пор возникали при соединении электрических кабелей, теряют свою актуальность. Применяя особо прочный пластик, на кабельных заводах изготавливают самонесущие подвесные кабели, не содержащие металла и тем самым безопасные в электрическом отношении. Такие кабели можно монтировать на мачтах существующих линий электропередач, как отдельно, так и встроенные в фазовый провод, экономя значительные средства на прокладку кабеля через реки и другие преграды;
- системы связи на основе оптических волокон устойчивы к электромагнитным помехам, а передаваемая по световодам информация защищена от несанкционированного доступа. Волоконно-оптические линии связи нельзя подслушать неразрушающим способом. Всякие воздействия на ОВ могут быть зарегистрированы методом мониторинга (непрерывного контроля) целостности линии;
- важное свойство оптического волокна - долговечность.

Время жизни волокна, то есть сохранение им своих свойств в определенных пределах, превышает 25 лет, что позволяет проложить волоконно-оптический кабель один раз и, по мере необходимости, наращивать пропускную способность канала путем замены приемников и передатчиков на более быстродействующие.

Но существуют также некоторые недостатки волоконно-оптических

технологий:

- при создании линии связи требуются высоконадежные активные элементы, преобразующие электрические сигналы в свет, и свет в электрические сигналы. Для соединения ОВ с приемо-передающим оборудованием используются оптические коннекторы (соединители), которые должны обладать малыми оптическими потерями и большим ресурсом на подключение-отключение. Погрешности при изготовлении таких элементов линии связи должны быть порядка доли микрона, т.е. соответствовать длине волны излучения. Поэтому производство этих компонентов оптических линий связи очень дорогостоящее;
- для монтажа оптических волокон требуется прецизионное, а потому дорогое, технологическое оборудование.

Как следствие, при аварии (обрыве) оптического кабеля затраты на восстановление выше, чем при работе с медными кабелями. Преимущества от применения волоконно-оптических линий связи настолько значительны, что, несмотря, на перечисленные недостатки оптического волокна, эти линии связи все шире используются для передачи информации.

Затухание сигнала в оптическом волокне

По мере распространения света в оптической среде он ослабевает, что носит название затухания среды — *затухания* ОВ. Затухание зависит от длины волны излучения, вводимого в волокно. В настоящее время передача сигналов по волокну осуществляется в трех диапазонах: 850 нм, 1300 нм, 1550 нм, так как именно в этих диапазонах кварц имеет повышенную прозрачность. Затухание (рис. 1.3) обычно измеряется в дБ/км и определяется потерями на поглощение и на рассеяние излучения в оптическом волокне. Оно состоит из следующих составляющих:

- рэлеевское рассеяние;
- рассеяние на дефектах волокна;

- собственное поглощение кварцевого стекла;
- примесное поглощение;
- поглощение на микро и макроизгибах.

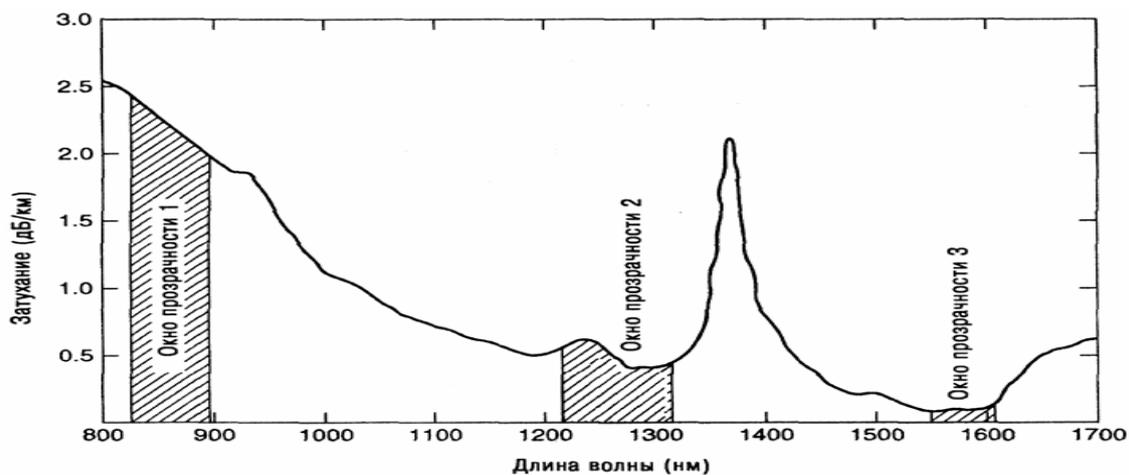


Рис. 1.3. Затухание оптического волокна в зависимости от длины волны (показаны три окна прозрачности, используемые для ВОСП).

Как следует из рисунка, существуют три основных окна прозрачности, которые являются рабочими диапазонами длин волн для ВОСП. Это: 820-900 нм; 1280-1350 нм; 1528-1561 нм. Причем последнее окно прозрачности может быть расширено до 1620 нм (Эта область обычно называют четвертым окном прозрачности).

Степень потерь в оптическом волокне определяется коэффициентом затухания α , который в общем виде равен:

$$\alpha = \alpha_n + \alpha_p + \alpha_{np} + \alpha_k + \alpha_{ик}, \quad (1.1)$$

где α_n — коэффициент затухания, обусловленный потерями на поглощение световой энергии. Собственное поглощение кварцевого стекла определяется поглощением фотонов при котором энергия фотона переходит в энергию электронов или в колебательную энергию решетки. Спектр собственного электронного поглощения кварцевого стекла лежит в ультрафиолетовой области ($\lambda < 0,4$ мкм). Спектр поглощения решетки лежит

в инфракрасной области ($\lambda > 7$ мкм). Поскольку структура кварцевого стекла аморфная, полосы поглощения имеют размытые границы, а их «хвосты» заходят в видимую область спектра. Во втором и третьем окнах прозрачности в диапазоне длин волн 1,3-1,6 мкм потери, вызванные собственным поглощением, имеют порядок 0,03 дБ/км.

α_p — коэффициент затухания, обусловленный рэлеевским рассеиванием на неоднородностях материала ОВ, размеры которых значительно меньше длины световой волны, и тепловыми флуктуациями показателя преломления. Этот вид рассеяния определяет теоретическую границу, ниже которой затухание не может быть уменьшено и в современных ОВ является основным источником потерь в рабочих областях спектра. Рэлеевское рассеяние вызывается рассеянием на неоднородностях показателя преломления, возникших в расплавленном кварце в связи с локальными термодинамическими флуктуациями концентрации молекул (плотности) кварца из-за их хаотического движения в расплавленном состоянии. При затвердевании волокна неоднородности, возникшие в расплавленной фазе, застывают в структуре кварцевого стекла. Колебания плотности приводят к случайным флуктуациям показателя преломления в масштабе, меньшем, чем длина световой волны λ .

α_{np} — коэффициент затухания, вызванный присутствующими в ОВ примесями, приводящими к дополнительному поглощению оптической мощности, это ионы металлов (Fe, Cu, Ni, Mn, Cr), вызывающие поглощение в диапазоне длин волн 0,6-1,6 мкм, и гидроксильные группы (ОН), из-за которых появляются резонансные всплески затухания $\alpha(\lambda)$ на длинах волн 0,75 мкм, 0,97 мкм и 1,39 мкм.

α_k — дополнительные потери, определяемые деформацией ОВ в процессе изготовления кабеля, вызванной скруткой, изгибом, отклонением от прямолинейного расположения и термомеханическими воздействиями,

имеющими место при наложении оболочек и покрытий на сердцевину волокна при изготовлении ОК (их называют кабельными).

$\alpha_{ик}$ — коэффициент затухания, зависящий от длины волны оптического излучения и за счет поглощения в инфракрасной области возрастающий в показательной степени с ростом длины волны.

В настоящее время в технике связи в основном применяются кварцевые ОВ, область эффективного использования которых находится в диапазоне длин волн до 2 мкм. На более длинных волнах в качестве материала для волокна используются галоидные, халькогенидные и фторидные стекла. По сравнению с кварцевыми волокнами они обладают большей прозрачностью и обеспечивают снижение потерь на несколько порядков. С появлением ОВ из новых материалов становится реальным создание ВОСП без ретрансляторов.

Затухание оптического волновода учитывается при расчете энергетического бюджета.

Затухание оптоволоконной линии с учетом потерь на разъёмных соединениях и сростках (неразъёмных соединениях) определяется по формуле:

$$A = A_{нс} \cdot n_{нс} + \alpha \cdot L + A_{рс} \cdot n_{рс}, \quad (1.2)$$

где $A_{нс}$ и $A_{рс}$ - значение потерь на сростке и разъеме соответственно, $n_{нс}$ и $n_{рс}$ - количество сростков и разъёмных соединений на протяжении оптоволоконной линии длиной L , α - километрический коэффициент затухания оптического волокна, измеряемый в дБ/км.

Тогда энергетический бюджет рассчитывается по формуле:

$$A_{эб} = P_{вых} - P_{фпр} - A_{эза} - A_{эзк} - A, \quad (1.3)$$

где $P_{вых}$ и $P_{фпр}$ - мощность источника оптического излучения и чувствительность фотоприемника в дБ соответственно; $A_{эза}$ и $A_{эзк}$ - эксплуатационный запас для аппаратуры и для кабеля, (дБ), которые берутся

из технических условий (контрактных спецификаций) для оборудования ВОЛС.

Дисперсия в оптическом волокне

Световой сигнал в цифровых системах передачи поступает в световод импульсами, которые вследствие некогерентности реальных источников излучения содержат составляющие с различной частотой. Уширение светового импульса, вызываемое различием времени распространения его спектральных и поляризационных компонент, и называется дисперсией.

Световая волна, распространяющаяся вдоль направления x , описывается уравнением:

$$\xi(x, t) = A \cos(\omega \cdot t - kx) \quad (1.4)$$

где A - амплитуда световой волны; ω - ее угловая частота, k - волновое число.

Если взять фиксированное значение фазы волны:

$$\omega \cdot t - kx = \text{const}, \quad (1.5)$$

то скорость перемещения фазы в пространстве или *фазовая скорость* будет:

$$v = \frac{\omega}{k}. \quad (1.6)$$

Световой импульс, распространяющийся в ОВ представляет собой суперпозицию электромагнитных волн с частотами, заключенными в интервале $\Delta\omega$, которая называется *группой волн* вида (1.4). В момент времени t в разных точках для разных x волны будут усиливать друг друга, что приводит к появлению максимума интенсивности группы волн (*центр группы волн*), или ослаблять. Центр группы волн перемещается со скоростью:

$$u = \frac{d\omega}{dk}, \quad (1.7)$$

называемой *групповой*. Заменяв $k=2\pi/\lambda$ и выразив $\omega = vk$, получим соотношение, выражающее зависимость групповой скорости от длины волны:

$$u = v - \lambda \frac{dv}{d\lambda}. \quad (1.8)$$

Это и является причиной, приводящей к различию скоростей распространения частотных составляющих излучаемого спектра по оптическому волокну. В результате по мере распространения по оптическому волокну частотные составляющие достигают приемника в разное время. Вследствие этого импульсный сигнал на выходе ОВ видоизменяется, становясь «размытым». Это явление называется *волноводной дисперсией*, определяемой показателем преломления ОВ и шириной спектра излучения источника $\Delta\lambda$ и имеющей размерность времени:

$$\tau_w(\Delta\lambda, L) = \Delta\lambda \cdot L \cdot \frac{2n_1^2 \Delta}{c\lambda} = \Delta\lambda \cdot L \cdot N(\lambda), \quad (1.9)$$

где Δ - относительная разность показателей преломления сердцевинки и оболочки, L - длина ОВ, $N(\lambda)$ - коэффициент волноводной дисперсии, называемый удельной волноводной дисперсией. Зависимость удельной волноводной дисперсии от длины волны показана на рис. 1.4

Скорость распространения волны зависит не только от частоты, но и от среды распространения. Для объяснения этого явления электроны внутри атомов и молекул рассматриваются в теории дисперсии квазиупруго связанными. При прохождении через вещество световой волны каждый электрон оказывается под воздействием электрической силы и начинает совершать вынужденные колебания. Колеблющиеся электроны возбуждают вторичные волны, распространяющиеся со скоростью c , которые, складываясь с первичной, образуют результирующую волну. Эта результирующая волна распространяется в веществе с фазовой скоростью v , причем, чем ближе частота первичной волны к собственной частоте электронов, тем сильнее будут вынужденные колебания электронов и

различие между v и c будет больше, что объясняет зависимость $v = v(\omega)$. В результате смещения электронов из положений равновесия молекула вещества приобретает электрический дипольный момент. То есть при взаимодействии электромагнитной волны со связанными электронами отклик среды зависит от частоты светового импульса, что и определяет зависимость показателя преломления от длины волны, которая характеризует дисперсионные свойства оптических материалов:

$$n^2 = 1 + \frac{Ne^2}{\pi mc^2} \sum_i \frac{(e_i^2/m_i)\lambda_{0i}^2\lambda^2}{\lambda_{0i}^2 - \lambda^2}, \quad (1.10)$$

где N - плотность частиц (число частиц в единице объема), m и e - масса и заряд электрона соответственно, λ_{0i} - резонансные длины волн, $f_i = e_i^2/m_i$ - вынуждающие осцилляции электрические силы. В широком спектральном диапазоне, включающем обычный ультрафиолет, видимую область и ближнюю инфракрасную область, кварцевое стекло прозрачно и данная формула Солмейера применима с очень высокой точностью.

Явление, возникновение которого связано с характерными частотами, на которых среда поглощает электромагнитное излучение вследствие осцилляции связанных электронов, и которое определяет уширение длительности светового импульса после его прохождения через дисперсионную среду, называется в технике волоконно-оптической связи материальной дисперсией:

$$\tau_{mat}(\Delta\lambda, L) = \Delta\lambda \cdot L \cdot \frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_1}{d\lambda^2} = \Delta\lambda \cdot L \cdot M(\lambda), \quad (1.11)$$

где коэффициент $M(\lambda)$ называется удельной материальной дисперсией. На длине волны $\lambda = 1276$ нм у кварца величина $d^2 n_1 / d\lambda^2 = 0$, следовательно коэффициент материальной дисперсии $M(\lambda) = 0$ (см. рис. 1.5). При длине волны $\lambda > 1276$ нм $M(\lambda)$ меняет знак и принимает отрицательные значения, в результате чего на длине волны (примерно 1310 ± 10 нм для

ступенчатого одномодового волокна) происходит взаимная компенсация $M(\lambda)$ и $N(\lambda)$. 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 оптического волокна.

Результирующая дисперсия складывается из волноводной и материальной и называется хроматической дисперсией. Дисперсию в оптических волокнах принято характеризовать коэффициентом дисперсии или удельной дисперсией, измеряемом в пс/(нм·км). Коэффициент дисперсии численно равен увеличению длительности светового импульса (в пикосекундах), спектральная ширина которого равна 1 нм, после прохождения отрезка ОВ длиной 1 км. Значение коэффициента хроматической дисперсии определяется как $D(\lambda) = M(\lambda) + N(\lambda)$. Удельная дисперсия имеет размерность пс/(нм·км).

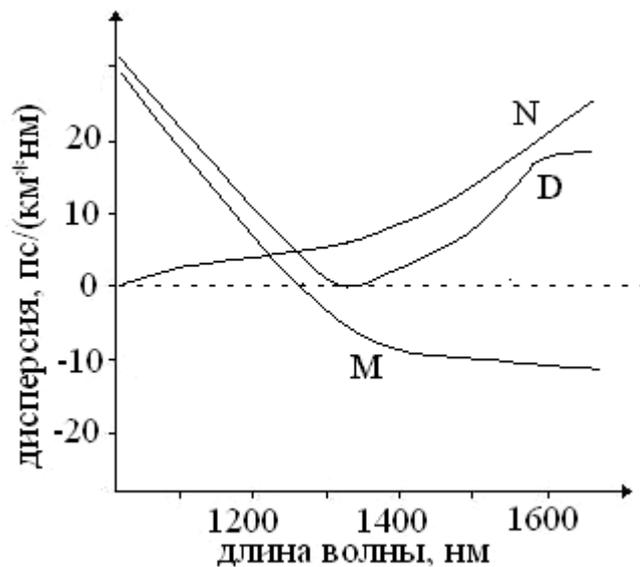


Рис. 1.4 Зависимости коэффициентов волноводной, материальной и результирующей хроматической дисперсии от длины волны.

При допущениях, которые исходят из результатов опытов для различных веществ, из выражения (1.10) может быть получена приближенная формула зависимости показателя преломления от длины волны:

$$n(\lambda) = a + b/\lambda^2 + c/\lambda^4 + \dots, \quad (1.12)$$

где a , b и c - постоянные, значения которых определяются экспериментально для каждого вещества.

Для одномодового ступенчатого и многомодового градиентного оптических волокон для расчета дисперсии применима эмпирическая формула Селмейера:

$$\tau(\lambda) = A + B\lambda^2 + C\lambda^{-2}. \quad (1.13)$$

Коэффициенты A , B , C являются подгонными и определяются для каждого материала ОВ экспериментальным путем. Тогда удельная хроматическая дисперсия вычисляется по формуле:

$$D(\lambda) = \partial\tau/\partial\lambda = 2(B\lambda - C\lambda^{-3}) = S_0(\lambda - \lambda_0^4/\lambda^3)/4, \quad (1.14)$$

где $\lambda_0 = (C/B)^{1/4}$ - длина волны нулевой дисперсии, новый параметр $S_0 = 8B$ - наклон нулевой дисперсии (размерность пс/(нм²·км), а λ - рабочая длина волны, для которой определяется удельная хроматическая дисперсия.

Хроматическая дисперсия связана с удельной хроматической дисперсией простым соотношением:

$$\tau_{chr}(\lambda) = D(\lambda) \cdot \Delta\lambda \cdot L. \quad (1.15)$$

К уменьшению хроматической дисперсии ведет использование более когерентных источников излучения, например лазерных передатчиков, и использование рабочей длины волны более близкой к длине волны нулевой дисперсии.

Дисперсия, возникающая вследствие различной скорости распространения у мод, которая имеет место только в многомодовом волокне называется межмодовой дисперсией (рис. 1.5).

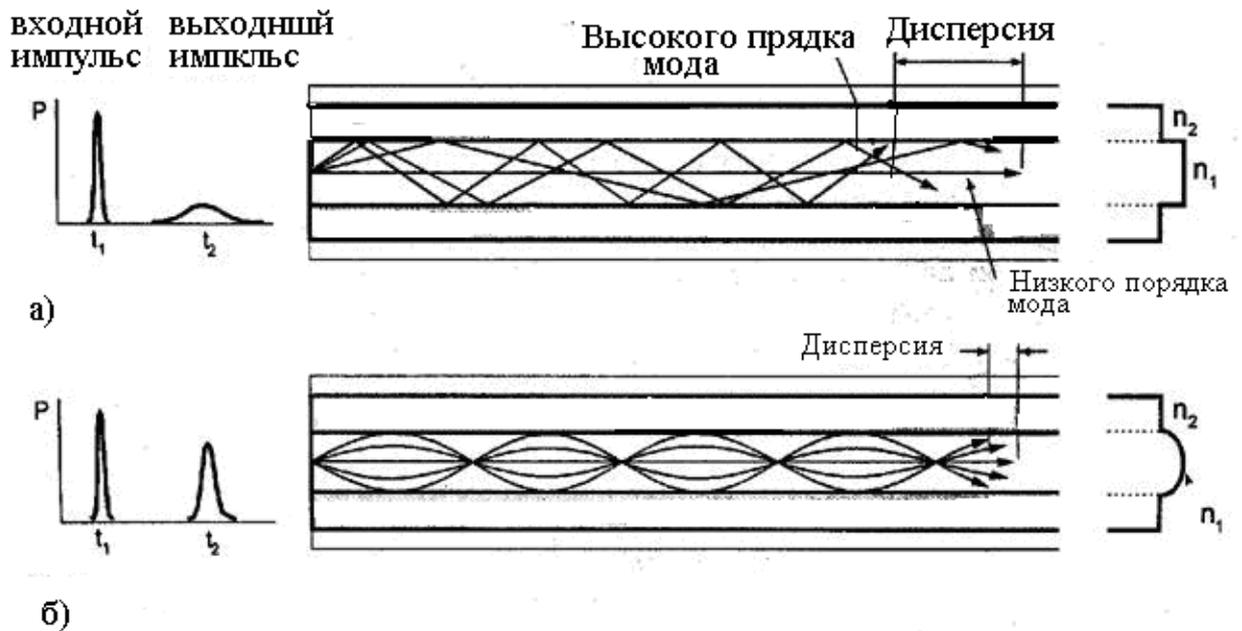


Рис 1.5. Распространение света по разным типам волокон:

а) многомодовое ступенчатое волокно, б) многомодовое
градиентное волокно.

Изменение закона дисперсии с линейного на квадратичный связано с неоднородностями, которые есть в реальном волокне. Эти неоднородности приводят к взаимодействию между модами, и перераспределению энергии внутри них. При $L > L_c$, наступает установившийся режим, когда все моды в определенной установившейся пропорции присутствуют в излучении. Обычно длины линий связи между активными устройствами при использовании многомодового волокна не превосходят 2 км и значительно меньше длины межмодовой связи. Поэтому можно пользоваться линейным законом дисперсии.

Вследствие квадратичной зависимости L от значения межмодовой дисперсии у градиентного волокна значительно меньше, чем у ступенчатого, что делает более предпочтительным использование градиентного многомодового волокна в линиях связи.

В реальных оптических волокнах из-за нарушения круговой симметрии возникает небольшая анизотропия, потому, учитывая, что световая энергия распределяется между состояниями поляризации различные константы распространения вызывает увеличение длительности импульса на выходе ОВ.

Анизотропия или двулучепреломление оптического волокна может быть связано либо с нарушением идеальной круговой формы сердцевинки, либо с наведенным двулучепреломлением вещества, например, из-за несимметричных напряжений в материале ОВ как это показано на рис. 1.5 а, или из-за несовпадения геометрических центров сердцевинки и оболочки.

Потеря круговой симметрии приводит к появлению анизотропии, при этом, в оптическом волокне распространяются две ортогонально поляризованные моды с различными фазовыми и групповыми скоростями.

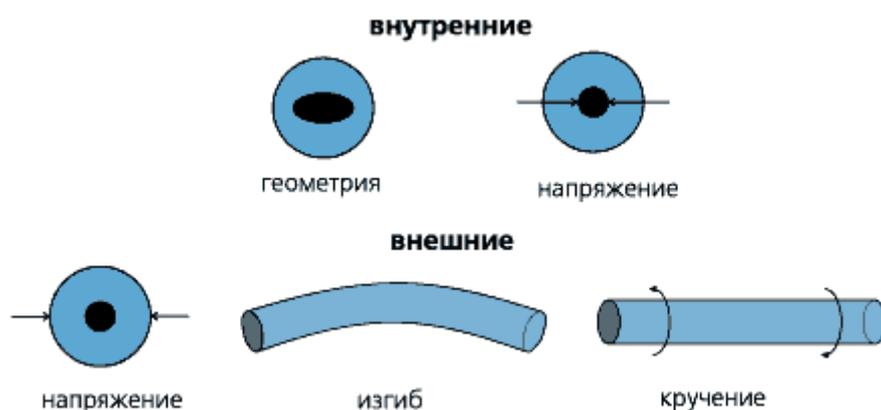


Рис. 1.5. Причины возникновения анизотропии оптического волокна.

Скорости распространения поляризационных компонентов светового импульса различны, что приводит к возникновению временной задержки $\delta\tau$, которую принято называть дифференциальной групповой задержкой, приводящей к уширению результирующего сигнала. Состояния поляризации, задающие самое быстрое и самое медленное распространение сигнала, называются быстрым и медленным главными состояниями поляризации PSP

(Principal State of Polarization). Оси линейных поляризаций быстрого и медленного PSP называются «быстрой» и «медленной» осями анизотропной среды. Различие скоростей приводит к отставанию импульса, поляризованного вдоль медленной оси PSP (см. рис. 1.5 б) от импульса, поляризованного вдоль быстрой оси PSP на величину относительной задержки $\delta\tau$.

Возникновение дифференциальной групповой задержки вызывает ряд искажений информационного сигнала, включая увеличение длительности импульса. Но в отличие от хроматической дисперсии, PMD не является стабильной, а имеет статистическую природу. Существует несколько факторов роста анизотропии профиля волокна, в том числе следующие статические факторы:

- несовершенство заводского процесса вытяжки волокон;
 - скрутка волокон при изготовлении волоконно-оптического кабеля (ВОК);
 - изгибы ВОК и как следствие механические деформации волокон, возникающие в процессе укладки кабеля;
- и динамические факторы:
- вариации температуры окружающей среды – для ВОК, проложенных в грунт;
 - динамические деформации волокон (ветровые нагрузки, вариации температуры окружающей среды, деформации вследствие оледенения кабеля) – для подвесных ВОК.

Из-за наличия динамических факторов даже в пределах отдельного сегмента волокна невозможно определить направление поляризации сигнала после прохождения этого сегмента. Тем более, невозможно определить пропорцию, в которой распределиться энергия между PSP на следующем участке волокна. Итак, дифференциальная групповая задержка $\delta\tau$

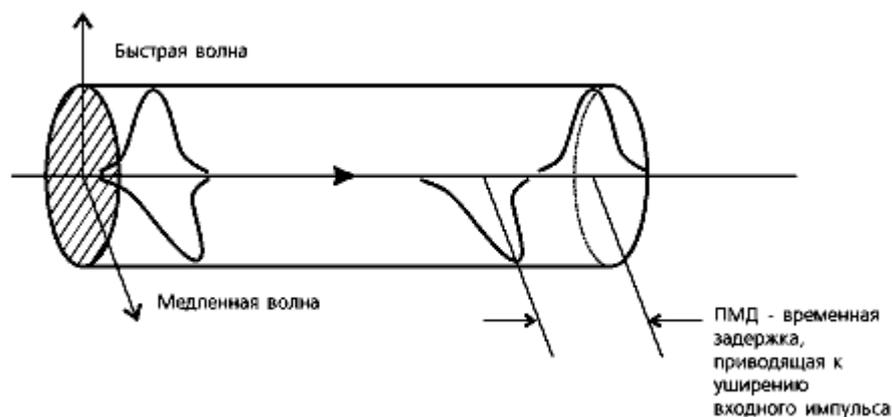


Рис. 1.6 Появление PMD при распространении световых импульсов в оптическом волокне.

не постоянная величина, а изменяется со временем, причем случайным образом. Детальный анализ динамического поведения DGD показывает, что эта случайная величина наилучшим образом подпадает под распределение Максвелла, а среднеквадратичное отклонение $\langle \delta\tau^2 \rangle$ связано со средним значением дифференциальной групповой задержки соотношением:

$$\langle \delta\tau^2 \rangle = \frac{3\pi}{8} \langle \delta\tau \rangle_{Max}^2, \quad (1.13)$$

где индекс *Max* – обозначает усреднение по функции распределения Максвелла.

Поляризационной модовой дисперсией PMD называют среднеквадратичное значение дифференциальной групповой задержки:

$$\tau_{PMD} = \sqrt{\langle \delta\tau^2 \rangle}. \quad (1.14)$$

Она обычно измеряется в пс.

В линии с большим числом сегментов значение PMD определяется в зависимости от суммарного расстояния по формуле:

$$\tau_{PMD} = D_{PMD} \sqrt{L}, \quad (1.15)$$

где L - протяженность оптической линии связи (км), D_{PMD} - коэффициент PMD оптического волокна (пс/км^{1/2}).

Значение коэффициента D_{PMD} для типичных ОВ находится в пределах от 0,1 до 2 пс/км^{1/2}. В табл. 1.1 для них при разных скоростях цифровой передачи приведены значения максимальной протяженности линии связи.

Таблица 1.1

Значения максимальной протяженности волоконно-оптической линии связи.

	D_{PMD} (пс/км ^{1/2})	0,1	0,5	2,0
V=2,5Гбит/с	L (км)	160 000	6 400	400
V=10Гбит/с	L (км)	10 000	400	25
V=40Гбит/с	L (км)	625	25	1,56

Задержка световой волны, поляризованной вдоль медленной оси, относительно волны, поляризованной вдоль быстрой оси, приводит к появлению разности фаз $\Delta\varphi$ между двумя поляризационными компонентами, прямо пропорциональной DGD $\delta\tau$ и угловой частоте ω световой волны:

$$\Delta\varphi = \varphi_s - \varphi_f = \omega\Delta\tau. \quad (1.16)$$

Линейная зависимость разности фаз двух поляризационных компонент приводит к периодической зависимости поляризации выходного излучения от частоты.

1.3 Пути решения проблемы расстояния и скорости передачи информации в ВОСП

Регенераторы и оптические усилители

По мере распространения оптического сигнала, как уже отмечено, происходит его ослабление, а также уширение импульсов из-за дисперсии. Любой из этих факторов может оказаться причиной ограничения максимальной длины без ретрансляционного 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*.

По методу усиления оптического сигнала ретрансляторы подразделяются на две категории: регенераторы и оптические усилители. В волоконно-оптических системах локальных сетей регенераторы значительно больше распространены, чем оптические усилители, в то время как при построении оптических магистралей оптические усилители играют незаменимую роль.

Регенератор (электронно-оптический повторитель) сначала преобразует оптический сигнал в электрическую форму, усиливает, корректирует, а затем преобразовывает обратно в оптический сигнал,

рис.1.7 а. Можно представить регенератор как последовательно соединенные приемный и передающий оптические модули. Аналоговый регенератор, в основном, выполняет функцию усиления сигнала. При этом вместе с полезным сигналом усиливается также входной шум. Однако при цифровой передаче регенератор наряду с функцией усиления может выполнять функцию регенерации сигнала, свойственную цифровому оптическому приемнику, рис. 1.7б. 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. Регенератор может и не содержать таймера и восстанавливать прямоугольную форму импульсов по определенному порогу, независимо от того, на какой скорости ведется передача. Такие "среднезависимые" регенераторы применяются в локальных сетях, где имеет место асинхронный режим передачи.

Оптический усилитель (ОУ), в отличие от регенератора, не осуществляет оптоэлектронного преобразования, а сразу производит усиление оптического сигнала, рис. 1.7 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.

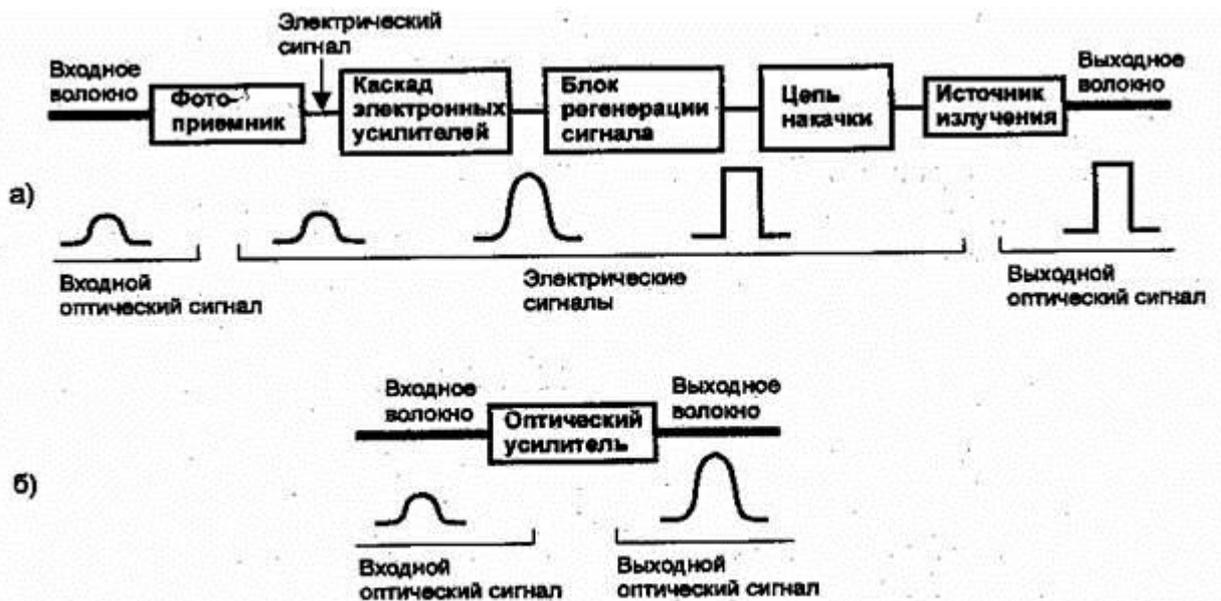


Рис. 4.12. Типы ретрансляторов: а) электронно-оптический повторитель; б) оптический усилитель

Сравнительные характеристики регенератора и оптического усилителя приведены в табл.1.2. 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 регенератора. На практике, однако, цена ОУ значительно выше, чем у регенератора. Но, по прогнозам специалистов, цена ОУ по мере увеличения рынка продаж будет падать. ОУ имеет более высокую надежность, чем регенератор. Это важное преимущество при создании ретрансляторов при прокладке подводного ВОК. ОУ не привязан к скорости передачи, в то время как регенератор обычно исполняется для работы на определенной скорости. Именно на эту скорость конфигурируется таймер регенератора.

Регенератор 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.

Одной из причин невысокой эффективности волоконно-оптических линий связи является то, что одиночный преобразователь электрических сигналов в оптические может использовать очень небольшую долю оптического спектра, в связи с чем реально достижимая пропускная способность ограничивается примерно 2,5 Гбит/с. Кроме того, применяемое до недавних пор при передаче информации по оптическим кабелям временное мультиплексирование не позволяло вести одновременную передачу с разными скоростями, типами фреймов или протоколами.

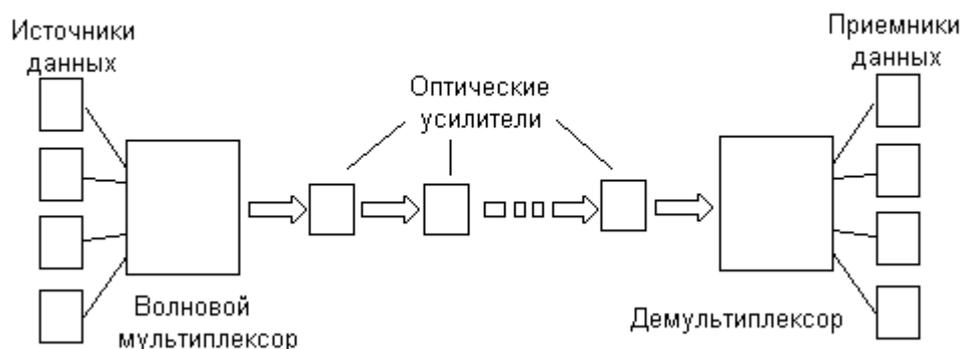


Рис. 1.7 Организация потока данных в WDM

Обойти ограничения, накладываемые сетевыми аппаратными средствами на скорость передачи, удаётся применением WDM-систем которые обрабатывают одновременно несколько видов световых сигналов, соответствующих разным длинам волн. Каждый канал можно использовать для передачи данных со скоростью в несколько гигабит в секунду, обеспечиваемой современной электроникой, и таким образом удаётся построить сети с чрезвычайно высокой производительностью. Используя методы WDM, можно в одном световоде диаметром 250 мкм достичь пропускной способности от 10 Гбит/с до 1.2 Тбит/с, обычный же кабель диаметром 18 мм содержит до 200 таких световодов.

Термин DWDM (dense wavelength division multiplexer) – плотное волновое мультиплексирование – используется по отношению к WDM устройствам с расстоянием между соседними каналами 1.6 нм и менее. Для построения многоканальных WDM систем наряду с пассивными WDM фильтрами также требуются узкополосные лазеры, стабильно выдерживающие нужную длину волны. Пока именно лазеры остаются наиболее дорогим элементом в таких системах, несколько сдерживая их развитие. В настоящее время поставляются системы с числом каналов 4-8 и 16. Предполагается рост числа мультиплексных каналов до 60 и более.

Основные технические параметры WDM фильтров

Терминология одинаково применима ко всем WDM устройствам. Рассмотрим простейший двухканальный мультиплексор (рис.1.8). Наряду с функцией объединения (рис.1.8а) устройства WDM также могут выполнять обратную функцию (функцию демультиплексирования) – выделения сигналов разных длин волн из волокна, рис.1.2б. Большинство производимых WDM устройств совмещают режимы мультиплексирования и демультиплексирования в одном устройстве. Такие устройства могут также использоваться для мультиплексирования и демультиплексирования двунаправленных потоков, рис.1.8в.

В идеале сигнал λ_1 , поступающий на полюс 1 (рис. 1.8а), должен полностью проходить в общий выходной полюс 3 (common). На практике, однако, доля сигнала на длине волны λ_1 ответвляется и проходит через полюс 2.

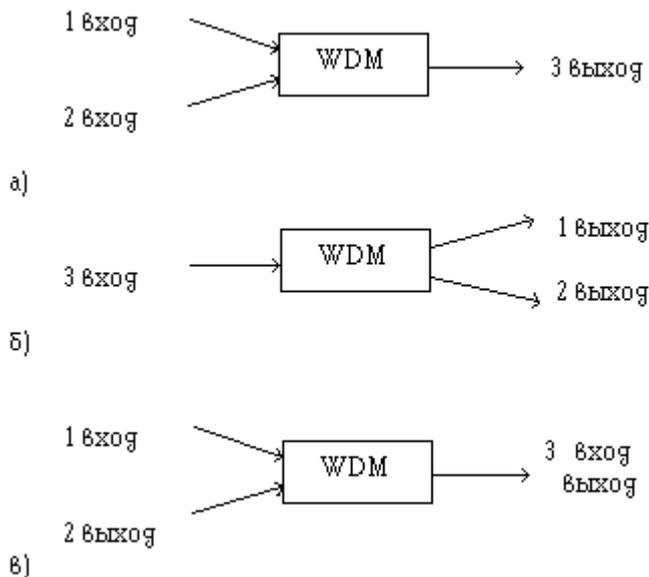


Рис.1.8. Устройство WDM:

а) мультиплексирование с уплотнением по длинам волн;

б) демультиплексирование;

в) мультиплексирование / демультиплексирование встречных потоков. через полюс 1 и наоборот.

Для оценки паразитных явлений используют понятие переходных помех. Переходные помехи показывают, насколько эффективна работа WDM устройства. Они состоят из ближних и дальних переходных помех. Ближние переходные помехи NEXT (near-end crosstalk или directivity) аналогичны коэффициенту направленности и определяются как доля мощности, регистрируемая на длине волны λ_1 на полюсе 2, соответствующем длине волны λ_2 , при условии, что сигнал на длине волны λ_1 подается на полюс 1 (рис.1.8а). Дальние переходные помехи FEXT (far – end crosstalk, также называют isolation) являются мерой изоляции между выходными полюсами по сигналам разных длин волн. Так, если сигнал поступает на длине волны λ_1 на полюс 3 (common), (рис.1.8б), то для него FEXT – это доля мощности, регистрируемая на длине волны λ_1 на полюсе 2, соответствующем длине волны λ_2 .

В общем случае WDM модуль при работе в режиме мультиплексирования/демультиплексирования может иметь n входных /выходных полюсов 1, 2, ..., n , которым соответствуют длины волн $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$, и один общий выходной/входной полюс (com) соответственно, рис.1.8в. Такой модуль обозначается - 1: n .

Широкозонные и узкозонные WDM фильтры

Широкозонные WDM фильтры предназначены для работы с двумя, максимум с тремя длинами волн при расстоянии между каналами более,

чем 70 нм (1310, 1550, 1625 нм). Они наиболее часто применяются в системах кабельного телевидения 1310/1550 нм, или в цифровых телекоммуникационных системах передачи. Допускается также использование пары длин волн 1550/1625 нм при осуществлении дистанционного мониторинга ВОЛС на длине волны 1625 нм.

Для справки приведем основные технические параметры широкозонного WDM фильтра производства фирмы DiCon: длина волны 1310/1550 нм; режимы работы – мультиплексор, демультиплексор или двунаправленная передача сигнала; ближние переходные помехи – 60 дБ; дальние переходные помехи -40 дБ (по выходному порту 1) и -20 дБ (по выходному порту 2); вносимые потери не больше 1.0 и 0.7 дБ (в выходных портах 1 и 2 соответственно); обратные потери –55 дБ; используется стандартное одномодовое волокно фирмы Corning SFM – 28.

Узкозонные WDM (DWDM) фильтры предназначены для мультиплексирования и демультиплексирования сигналов в многоканальных системах с расстоянием между каналами от минимального 1.6 нм (или еще меньше 0.8 нм) до 70 нм. Основные технические характеристики, за исключением рабочих длин волн, схожи с предыдущим типом. Основные области применения: волоконно-оптические системы с использованием оптических усилителей EDFA, мультиплексные системы “add/drop”, полностью оптические сети.

На рис.1.9 показана одна из реализаций источника мультиплексного многоволнового излучения, в котором полупроводниковые лазерные усилители (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.

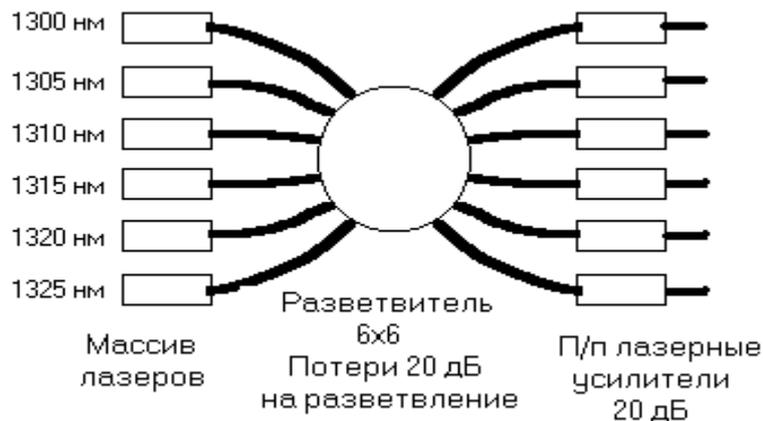


Рис. 1.9 Источник мультиплексированного излучения и демультиплексор.

WDM и Интернет

Исследования в области WDM и других методов оптического мультиплексирования продолжают уже почти десять лет, однако рыночный успех пришел к данной технологии лишь в 1996 г., в период бурного взлета популярности Internet и WWW.

По оценкам экспертов, ежегодное увеличение объема IP-трафика варьируется в диапазоне от 100 до 1000 процентов. Провайдеры междугородной телефонной связи видят в WDM спасительную возможность для резкого увеличения пропускной способности без кардинального обновления имеющейся коммуникационной инфраструктуры, так как WDM допускает использование оптоволоконных линий почти всех известных типов. Однако при этом и представители этих компаний, и аналитики сходятся во мнении, что, даже если развернуть средства WDM в общемировом масштабе, это не устранит всех проблем.

Технология мультиплексирования по длине волны WDM и близкая к ней DWDM дает крупным корпоративным пользователям, операторам систем связи и Internet-провайдерам возможность быстро увеличить пропускную способность своих каналов связи.

Особенно полезной эта технология может оказаться для крупных компаний, которым нужны высокоскоростные соединения между географически удаленными филиалами. Кроме того, она может найти применение в корпорациях, располагающих несколькими центрами данных для увеличения процессорной мощности, выполнения распределенных приложений, восстановления после разного рода катастроф. Соединения на базе технологии WDM позволяют сблизить инфраструктуры локальных и территориально распределенных сетей и сетей связи без прокладки новых кабелей. К тому же Internet создает все большую нагрузку на глобальные сети, формируя все новые и новые виды трафика, сильно отличающиеся от традиционного телекоммуникационного трафика. Возникающие видеослужбы нуждаются в гарантированном качестве обслуживания; с невиданной скоростью распространяется телефония в Internet. Для операторов и конечных пользователей решение вопроса об увеличении пропускной способности может обойтись в миллиарды долларов.

Технологии DWDM и WDM хороши еще тем, что позволяет передавать различные типы компьютерных данных, такие как ATM или пакеты локальной сети, в одном потоке света. Коммутаторы WDM и DWDM позволяют пользователям управлять приоритетами трафика. Например, их можно настроить таким образом, чтобы трафик ATM поступал прежде IP. Развитие технологии WDM подталкивается целым рядом факторов. Дело в том, что приемлемые реализации альтернативных технологий, например, временного мультиплексирования, появятся еще не скоро. Другим

потенциальным приложением является возможность передавать по одному и тому же волокну сигналы с разной скоростью передачи. По данным Transformation, в марте 1997 года Pacific Bell реализовала этот подход в одной части своей сети и реализовала OC-48 (2,5 Гбит/с) и OC-192 (10 Гбит/с) по одному и тому же волокну. WDM реализует полностью оптическую передачу, без преобразования оптических и электрических сигналов друг в друга.

WDM используется также в межконтинентальных кабельных системах. Теоретически, любой, кто имеет волоконно-оптическую сеть, в том числе компании кабельного телевидения и коммунальные компании, может использовать WDM. Считается, что, по крайней мере, в ближайшем будущем сфера применения этой технологии будет ограничена каналами дальней и сверхдальней связи, так как на небольших расстояниях она не рентабельна. Однако при использовании только пассивных компонентов, WDM может быть применена и для ближней связи.

Достоинства технологий WDM и DWDM

Наиболее очевидное достоинство WDM состоит в том, что эта технология позволяет увеличить пропускную способность, как правило, без весьма дорогостоящей прокладки нового оптического кабеля. В некоторых случаях, например в крупных городах прокладка оптического волокна вообще невозможна из-за плотного использования земельных ресурсов. Тогда такой вариант, как реализация WDM на основе уже имеющегося оптического кабеля, позволяет решить немало проблем.

Технология мультиплексирования по длине волны - самый оперативный способ построить сетевую инфраструктуру, способную обеспечить большую пропускную способность. Организовать WDM-магистраль намного быстрее, чем прокладывать новые оптические кабели и переводить клиентские рабочие места на непривычные технологии.

Коммутаторы с мультиплексированием по длине волны - отличное решение для конечных пользователей и операторов, которым необходимо создать инфраструктуру, поддерживающую сразу несколько сетевых технологий. Так, WDM поддерживает высокоскоростные соединения для сетей ATM, одновременно осуществляя связь между сегментами локальных сетей, глобальными сетями и сетями связи.

Примеры организации скоростных линий на основе WDM

(DWDM)

Компания MCI Communications стала первым оператором сети связи, использовавшим новую технологию мультиплексирования WDM. По данным NEWSBYTE компания MCI в начале 1996года заявила о распространении новой технологии, которая позволяет вчетверо увеличить пропускную способность сети, не добавляя к ней новых линий связи. MCI использовала технологию под названием уплотнение каналов с разделением четырех длин волн (Four- Wavelength Wave Division Multiplexing - 4WL-WDM или Quad-WDM), которая позволяет по одному волокну в волоконно- оптической линии передавать четыре световых сигнала вместо одного. Каждый из этих световых сигналов имеет свою длину волны благодаря использованию узкополосного оборудования для уплотнения с разделением каналов, что позволяет в четыре раза увеличить имеющийся трафик. С помощью стандартной технологии WDM, два и более оптических сигнала, имеющих различные длины волн распространяются в одном направлении по одному волокну. На другом конце волокна эти сигналы затем разделяются. При этом резко увеличивается объем информации передаваемой по одному волокну в одном направлении. При использовании Quad-WDM- системы, которая передает два сигнала в различными длинами волн в каждом направлении, суммарная пропускная способность одного волокна возрастает с 2,5 Гбит до

10 Гбит. В начале 1998 года компания MCI разработала систему передачи данных по волоконно-оптическому кабелю на восьми различных длинах волн со скоростью 10 Гбит/с (OC-192) на каждой несущей, что дает суммарную скорость 80 Гбит/с. На данный момент эта технология используется на магистрали длиной 170 миль.

В развернутой MCI системе WDM были использованы производимые Nortel устройства - S/DMS Transport Node OC-192 пропускной способностью 10 Гбит/с. Они подключались к системам оптических повторителей, работающим на разных длинах волн (Multi-Wavelength Optical Repeater Systems), что и позволяло достичь пропускной способности 80 Гбит/с. В 1996 г. сотрудники корпорации Nippon Telegraph and Telephone (NTT) продемонстрировали экспериментальную систему, способную обеспечить полосу пропускания 400 Гбит/с.

Сверхкогерентный источник света (патентованная лазерная установка) генерирует последовательность импульсов длительностью в доли пикосекунды каждый, которые занимают непрерывный диапазон длин волн шириной свыше 200 нм. Демультимплексор WDM выбирает из светового потока четыре последовательности импульсов с разными длинами волн. Схема оптического TDM-мультиплексирования объединяет каждые 16 импульсов входной последовательности, обладающих пропускной способностью 6,3 Гбит/с, в один 100-Гбит/с сигнал. Затем WDM-мультиплексор из четырех полученных 100-Мбит/с сигналов формирует оптический сигнал, передающий 400 Гбит/с. После этого все сигналы усиливаются широкополосным волоконно-оптическим усилителем с эрбиевыми добавками (Erbium Doped Fiber Amplifier - EDFA) и транспортируются по оптоволоконной линии длиной 100 км.

На противоположной стороне оптический приемник с помощью WDM-демультиплексора разделяет 400-Гбит/с сигналы по четырем каналам на 100-Гбит/с составляющие с разными длинами волн. В каждом канале 100-Гбит/с сигнал в свою очередь расчленяется на два компонента: один поступает в схему восстановления тактовой синхронизации в составе системы фазовой подстройки частоты (phase-locked loop, PLL), где из сигнала извлекается задающий импульс с частотой 6,3 ГГц, а другой попадает в оптический TDM-демультиплексор, где 100-Гбит/с сигналы разветвляются по 16 каналам, передающим 6,3-Гбит/с сигналы.

В заключение оптико-электрический конвертер преобразует демультиплексированные оптические 6,3-Гбит/с сигналы в электрические, после чего специальные схемы оценивают коэффициенты битовых ошибок.

В начале (февраль, март) 1999 года концерн Siemens завершил тестирование системы передачи данных по одному оптическому волокну со скоростью 1,2 Тбит/с. В ходе экспериментов применялась технология уплотнения по длине волны (WDM). 60 каналов по 20 Гбит/с каждый использовались для одновременной передачи данных по оптическому волокну на расстояние 80 км. Эти 20-Гбит/с каналы формировались с использованием разработанного Siemens процесса Electronic Time Division Multiplexing (ETDM), позволяющего объединять различные потоки данных, помещая их в соответствующие временные слоты одного канала связи. Представители Siemens убеждены, что по различным каналам можно одновременно передавать трафик протоколов ATM, Gigabit Ethernet, SONET и др. Даже новейшие маршрутизаторы, включая изделия фирмы Juniper Networks и подобные им, не поддерживают достаточно высоких скоростей передачи данных или плотностей портов, чтобы полностью задействовать

пропускную способность основанной на технологии WDM оптоволоконной сети.

Сложности WDM

Как и в случае любой новой технологии мультиплексирование по длине волны (WDM) имеет свою обратную сторону, поскольку реализация данной технологии сопряжена с некоторыми техническими трудностями.

Это сложность адекватного контроля за конкретными волнами в системе, которые должны, кроме того, соответствовать полосе пропускания оптического фильтра. (Такие фильтры выборочно передают или блокируют волны определенных диапазонов, которые называются, соответственно, полоса пропускания и полоса запираения.). Затем, оптические усилители по-разному усиливают волны различной длины, а это приводит к неравномерному распределению мощности между различными каналами.

Кроме того, одна из главных проблем здесь - дисперсия. Импульс света состоит из множества частот, каждая из которых обладает своей скоростью. При дисперсии - а это явление наиболее ярко проявляется в случае дальней связи - одиночный короткий импульс размазывается по времени. Это размазывание означает, что окно, в которое он прибывает, становится все шире и шире. Таким образом, качество сигнала становится хуже, и вероятность ошибок возрастает.

Дисперсия начинает проявляться, когда протяженность линии превышает несколько сот километров или темп передачи превосходит уровень нескольких гигабит в секунду. Чем короче световой импульс, тем серьезнее проблема, потому что времени до прибытия следующего импульса остается меньше. Частично эта проблема решается посредством

использования бездисперсионного оптоволокна как в межконтинентальной глубоководной связи.

Другая проблема возникает, когда сигналы WDM передаются по линии SONET (Synchronous Optical Network). Системы с применением технологий ATM и SONET, например, требуют решения ряда сложных задач управления сетью. Появление здесь плюс ко всему WDM добавляет еще один трудный в управлении компонент.

Необходимо тщательно продумать процедуру "передачи эстафеты" между технологиями. Если TDM-системы уже исчерпали все ресурсы действующих сетевых компонентов и средств коммутации, то развитие WDM еще идет по нарастающей. Главное препятствие на пути развертывания гибридных структур, целесообразных на переходном этапе, - это несоответствие между различными сетями с точки зрения администрирования и производительности. Кроме того, до сих пор еще не выработаны стандарты взаимодействия, призванные обеспечить совместимость WDM-продуктов разных производителей. В настоящее время исследовательская группа ITU 15/WP4 Q.25 занимается определением стандартного набора длин волн, на базе которого можно будет достичь требуемого взаимодействия аппаратных средств WDM.

Теоретически, например, одной волоконно-оптической нити достаточно для обслуживания всех телефонных разговоров, происходящих в США в течение дня. Однако сетевая инфраструктура современного типа и сами элементы сети (такие, как коммутаторы и маршрутизаторы) в своей работе связаны определенными внутренними ограничениями. Процессору маршрутизатора приходится выполнять большой объем действий с каждым пакетом. Он должен прочитать адрес назначения, решить, куда следует послать пакет, и направить его по соответствующему каналу.

Уровень требований к полосе пропускания растет стремительными темпами, чего нельзя сказать о возможностях коммуникационных инфраструктур - всех, кроме оптоволоконной. Кроме того, появляется еще другой потенциальный недостаток как с технической, так и с финансовой точки зрения. Увеличение емкости WDM системы может потребовать замены и других элементов сети.

Технологии WDM, DWDM и TDM требуют создания и применения новых элементов. К этим элементам предъявляют более высокие требования по устойчивости их работы и качеству изготовления. Т.к. экспериментальное создание подобного оптического устройства требует больших капиталовложений нужно использовать компьютерное моделирование. Такие программы, как BeamPROP и iFROST позволяют достаточно точно моделировать различные волоконно-оптические линии.

2. Исследование характеристик волоконно-оптических усилителей, применяемых в ВОСП

Волоконно-оптические системы передачи (ВОСП) начали широко использоваться в 1980-х. Каждое волокно передавало один поток импульсов, представляющих двоичные 1 и 0. Модель такой системы в 1980-х могла бы включать источник света, подключенный к нему волоконно-оптический кабель, и детектор света, удаленный на какое-то расстояние. Максимальное расстояние между источником и детектором зависело от уровня выходной мощности лазерного источника, потерь в оптических разъемах, в сращениях, в волокне, а также от скорости передачи и чувствительности детектора света. Если нужно было увеличить длину линии связи, то устанавливали регенератор. Регенератор принимает искаженный оптический сигнал на свой вход и преобразует его в почти идеальную копию сигнала, похожую на ту, которая была передана предыдущим передатчиком. Этот регенерированный сигнал практически свободен от искажений. Функция регенерации выполняется полностью цифровым передатчиком и приемником. емкость этой системы связи могла составлять сотни мегабит в секунду. Эта полная емкость могла бы передаваться по одному волокну в одном направлении, для обеспечения полнодуплексной связи можно было бы использовать другое волокно, для передачи в противоположном направлении. При увеличении емкости в такой системе регенераторные секции становились короче и короче. Число активных элементов в такой схеме формирования системы заметно ухудшало доступность системы в целом. Кроме этого также возрастал уровень джиггера.

С появлением волоконно-оптических усилителей расширились возможности ВОСП. При наличии усиления в 20 дБ у такого усилителя

волоконно-оптическая линия могла быть использована на значительно большую длину, прежде чем ей требовался бы регенератор, тем более, если можно было бы установить последовательно несколько таких усилителей. Использование усилителей позволило также использовать системы WDM, а также способствовало внедрению оптической коммутации.

Регенератор имеет два преимущества, которых не имеет усилитель. Усилитель не регенерирует цифровой сигнал, тогда как регенератор делает это. Преимущество здесь состоит в том, что на вход усилителя подается сигнал, в котором аккумулярованы все формы искажений. Этот же цифровой сигнал, содержащий те же самые плюс добавленные усилителем шумы и искажения, выходит из усилителя. В противоположность этому, регенератор устраняет большинство искажений и ухудшений цифрового сигнала и подает на выход прямоугольную последовательность двоичных импульсов.

Второе преимущество регенератора состоит в том, что он имеет доступ к заголовку поля OA&M (управления, эксплуатации и технического обслуживания) в SONET или SDH для обеспечения статуса регенератора и битового потока, проходящего через него. Этот статус сообщается в сетевой центр управления, ответственный за данную сеть. Это обеспечивает сетевому оператору прекрасную возможность для мониторинга и технического обслуживания.

Усилитель же не имеет такого легкого доступа к битовому потоку, так как он не занимается демодуляцией-демодуляцией двоичного потока, в отличие от регенератора.

Одно из преимуществ оптического усилителя над регенератором в том, что в многоканальной системе WDM на каждый канал требуется отдельный регенератор, тогда как на всю систему WDM требуется только один усилитель. Пусть, например, система WDM имеет 16 каналов. Тогда для

этой конфигурации требуется 16 регенераторов и всего один оптический усилитель. Более того, оптический усилитель прозрачен по отношению к проходящему потоку бит, тогда как регенератор рассчитан на определенную скорость потока. При большой длине системы (например, больше 700 км) требуется использовать по крайней мере один регенератор для того, чтобы ослабить действие дисперсии и восстановить форму сигнала.

2.1 Физические основы функционирования оптических усилителей

На линейных оптических явлениях в оптическом волокне оптические усилители обеспечивают внутреннее усиление оптического сигнала без его преобразования в электрическую форму. Они используют принцип индуцированного излучения, аналогично лазерам. Если существует некая активная среда, имеющая только два энергетических состояния E_1 и E_2 (см. рис.2.1), причем $E_2 > E_1$, т.е. E_2 является возбужденным по отношению к E_1 состоянием, то в равновесных условиях число рабочих частиц (электронов, ионов или молекул - потенциальных усилительных агентов среды) распределено по статистике Больцмана так, что $N_1 > N_2$. В результате, если на вход такой среды попадает фотон, то он с большей вероятностью будет поглощен этой средой, что может сопровождаться переходом частицы с уровня E_1 на уровень E_2 , если энергия фотона $h\omega > (E_2 - E_1)$. Усиление в такой среде невозможно, хотя и существует малая вероятность эмиссии (испускания) фотона, если электрон спонтанно перейдет с верхнего возбужденного уровня на нижний релаксационный уровень. Усиление станет возможным, если удастся создать инверсию населенностей уровней, когда $N_2 > N_1$. Для этого используется система энергетической накачки.

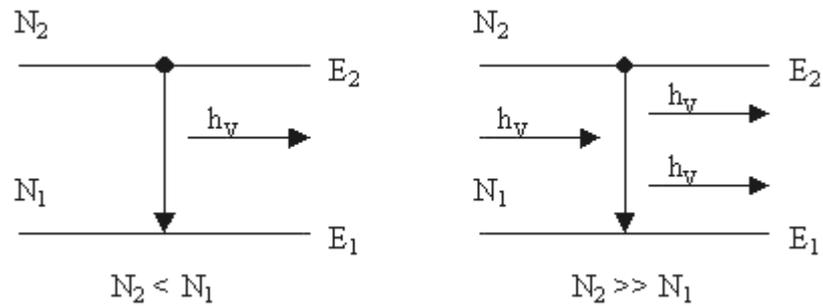


Рис.2.1 Схема двухуровневой модели оптического усилителя.

В качестве накачки можно использовать инжекцию электронов или излучение лазера соответствующей длины волны для создания фотонов нужной энергии. В результате накачки и создания определенной инверсии населенности активная среда становится способной генерировать вторичные фотоны (той же частоты и направления распространения) с коэффициентом размножения K при попадании на ее вход возбуждающего фотона из светового потока усиливаемого сигнала. В результате осуществляется его усиление за счет возбуждаемой эмиссии. Усиление носит распределенный характер - следствие генерации вторичных фотонов в течении всего времени прохождения усиливаемого оптического сигнала через активную среду, имеющую конечную длину L , что и обуславливает появление этого параметра в формулах для коэффициента усиления оптического усилителя.

Усиление неизбежно сопровождается двумя другими процессами:

- поглощением энергии светового сигнала, которое обычно носит экспоненциальный характер, возрастая с ростом L ;

- спонтанной эмиссией вхз торичных фотонов, которая может быть усилена, приводя к появлению так называемого усиленного спонтанного излучения .

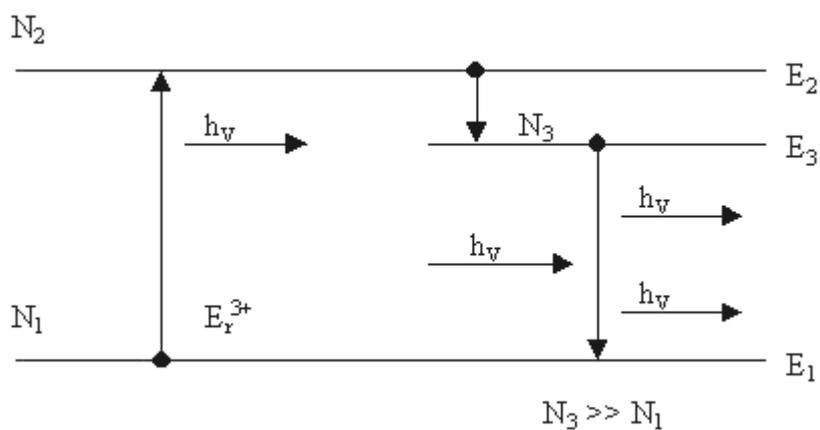


Рис.2.2.Схема трехуровневой модели оптического усилителя.

2.2 Основные характеристики и параметры характеризующие, оптические усилители

Оптические усилители можно рассматривать в тех же терминах и используя те же параметры, что и электронные усилители, т.е. имеют место параметры:

- коэффициент усиления;
- динамический диапазон;
- амплитудно-фазовую характеристику (АФХ);

Однако они имеют и свои (для ряда применений существенные) параметры:

- коэффициент усиления среды;
- мощность насыщения;
- усиленное спонтанное излучение (УСИ);
- чувствительность к поляризации сигнала;

- амплитудно-волновую характеристику (АВХ);

В общем случае коэффициент усиления оптического усилителя для одного сигнала на центральной частоте имеет вид:

$$G_0(\omega) = \frac{P_{\text{вых}}(\omega)}{P_{\text{вх}}(\omega)} \quad (2.1)$$

где $P_{\text{вх}}(\omega)$ и $P_{\text{вых}}(\omega)$ -

входные и выходные мощности оптического сигнала на входе и выходе усилителя, измеренные на рабочей угловой частоте (или соответствующей длине волны) при малом уровне входного сигнала, гарантирующем отсутствие насыщения выходного сигнала. Основным активным агентом оптических усилителей является фотон, следовательно, идеальный оптический усилитель с коэффициентом усиления K должен синфазно генерировать на выходе ровно K фотонов на каждый фотон, попавший на его вход. То есть оптический усилитель должен пропорционально усиливать интенсивность входного оптического сигнала, оставляя его форму неизменной, независимо от его интенсивности, длины волны, состояния поляризации, формы отображаемой двоичной последовательности. Фактически же указанные факторы, а также ряд других факторов влияют на АФХ усилительной (или активной) среды $g(\omega)$ или ее частотный спектр, а затем уже на АФХ собственно ОУ.

Коэффициент усиления среды и усилителя

Практика показывает, что большинство оптических усилительных (активных) сред можно рассматривать как однородную распределенную двухуровневую среду, для которой коэффициент усиления среды на единицу длины может быть описан выражением вида [1]:

$$g(f) = \frac{g_0}{1 + \delta f^2 T_d^2 + \frac{P_c}{P_h}} \quad (2.2)$$

- g - Максимальное (вычисленное для малого входного сигнала значение коэффициента усиления) зависящее от мощности накачки;
- δf - Разность частоты входного оптического сигнала и частоты квантового перехода электронов с верхнего уровня на нижний;
- T - время релаксации диполей из одного равновесного состояния в другое (имеет порядок 0,01-1 нс в зависимости от типа диполей);
- P_c - оптическая мощность входного сигнала;
- P_h - мощность насыщения;

Мощность насыщения

Аналогично электронным усилителям модуль усиления ОУ зависит от уровня входного сигнала. До определенного (малого) уровня входной мощности усиление практически постоянно, затем оно начинает экспоненциально падать (см. рис. 2.3) ростом уровня входной мощности. Этот "падающий" участок характеристики является областью насыщения усилителя и объясняется уменьшением коэффициента размножения, вызванным возрастающим с ростом входного сигнала дефицитом частиц, которые способны генерировать вторичные фотоны, на том уровне, где

создается инверсия населенности. Эта область численно характеризуется мощностью насыщения P_n на выходе усилителя, определяемой по выходной характеристике на уровне -3 дБм, при котором коэффициент усиления среды $g(\omega)$ падает в два раза.

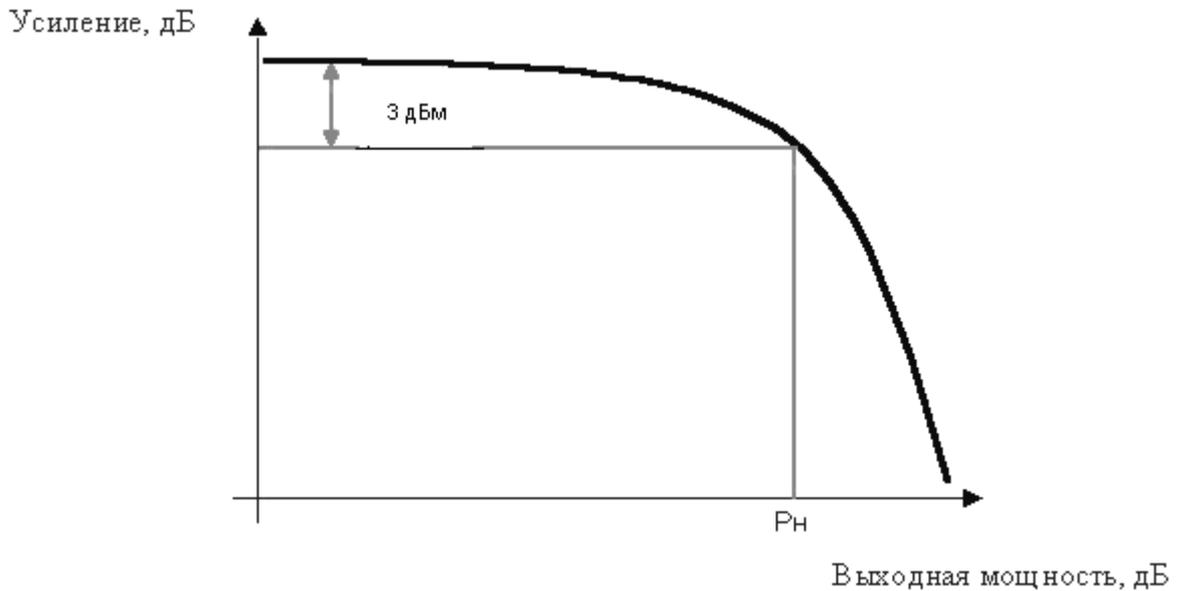


Рис. 2.3. Зависимость коэффициента усиления от выходной мощности и определение мощности насыщения

Амплитудно-фазовая характеристика ОУ зависит от ряда специфических для ОУ параметров, влияние основных из них оценены ниже.



Рис.2.4. Вид нормированных АФХ коэффициентов усиления среды и ОУ

в целом.

Влияние насыщения на АФХ

Оно обусловлено третьим слагаемым в числителе выражения (2.2.) которое может приводить к существенному снижению усиления среды в целом, даже в области, казалось бы, далекой от насыщения. Являясь ограничительным фактором, насыщение может играть и регулирующую роль в стабилизации общего коэффициента усиления при каскадном соединении многих усилителей в линии связи, что имеет место, например, на трансокеанских линиях связи.

Влияние времени релаксации диполей на АФХ

Из выражения (2.2) видно, что АФХ определяется двумя слагаемыми в знаменателе. Если принимать во внимание зависимость от частоты только второго слагаемого, то грубо, в первом приближении, ее можно аппроксимировать профилем Лоренца (см. рис. 2.4) Тогда используя его, можно получить, что полная ширина спектра на уровне половины от T_D

$$\text{т.е. } \Delta f g = \frac{2}{T_D}$$

максимума обратно пропорциональна:

Влияние длины активной (усиливающей) среды

Мощность усиливаемого оптического сигнала зависит от длины участка среды L от точки входа потока сигнала в усилитель до его выхода. Учитывая это, АФХ усилителя при условии постоянного коэффициента усиления среды $g(f)$ будет иметь вид :

$$G(f) = e^{g(f)L} \quad (2.3)$$

Учитывая экспоненциальный характер этой зависимости, можно констатировать, что спектр $G(f)$ усилителя будет существенно уже спектра $g(f)$ среды, что и видно на рис. 2.4, где приведены нормированные характеристики $G(f)$ и $g(f)$ в зависимости от расстройки $(f - f_0)$.

Чувствительность усиления к поляризации сигнала

Еще одним ограничивающим коэффициент усиления G фактором является чувствительность усиления ОУ к поляризации усиливаемого сигнала, когда усиление может меняться, и иногда значительно, в зависимости от поляризации. Ситуация ухудшается в ВОЛС, учитывая, что в них состояние поляризации сигнала не только не контролируется, но в волокне, даже одномодовом, может хаотически меняться под действием случайных изменений формы сердцевины и анизотропии, вызванной статическим напряжением отрезка оптоволокна (эффекты, известные, применительно к одномодовому ОВ, как модовое двойное лучепреломление). Аналогично страдают и системы с WDM, в которых степень поляризации входных сигналов может быть различной. Изменение поляризации приводит к паразитной амплитудной модуляции (ПАМ) усиления, которая может носить периодический характер (как, например, для усилителей бегущей волны). Степень такой чувствительности зависит от типа ОУ.

Источники шума и динамический диапазон

Динамический диапазон определяется как диапазон входной мощности оптического сигнала, при котором коэффициент усиления G остается постоянным. Он тесно связан с другим параметром - коэффициентом шума, зависящим от уровня усиленного спонтанного излучения, остаточного сигнала накачки и перекрестной помехи, которые кратко рассмотрены ниже.

Усиленное спонтанное излучение

Оптические усилители добавляют шум к усиливаемому оптическому сигналу. Этот шум обусловлен усиленным спонтанным излучением. Оно возникает под действием случайных возмущающих факторов различной

физической природы, вызывающих спонтанное излучение, например нагрева усилителя (тепловые фотоны), а также за счет наличия рассеянных фотонов. Шум приводит не только к уменьшению динамического диапазона, но и к снижению максимально допустимого усиления. Уменьшение динамического диапазона обычно характеризуется известным параметром F - коэффициентом шума:

$$F = \frac{SNR_{\text{вх}}}{SNR_{\text{вых}}} \quad (2.4)$$

где $SNR_{\text{вх}}$ и $SNR_{\text{вых}}$ значения динамического диапазона на входе и выходе усилителя.

Оценка этого параметра оптических усилителей осуществляется на "электрическом уровне" путем преобразования оптического сигнала в электрический с помощью фотодетектора. Для уменьшения коэффициента шума, вызванного усилением спонтанного излучения, сигнал на выходе ОУ фильтруют с помощью полосового оптического фильтра.

Остаточный сигнал накачки

Существует и еще один специфический источник шума в усилителях с накачкой - остаточный сигнал накачки на выходе усилителя, влияние которого (на передатчик или детектор в системе связи) может быть уменьшено как с помощью фильтра на выходе ОУ, так и путем соответствующего выбора частоты источника накачки.

Перекрестные помехи

Этот вид помех характерен для многоканальных усилителей в системах WDM. Он проявляется как паразитные амплитудная или частотная модуляции сигнала одного канала другими сигналами.

2.3 Основные типы волоконно-оптических усилителей

Существует пять типов оптических усилителей (см. таблицу 2.1)

Таблица 2.1

Типы 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

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 демультимплексоров, поскольку они могут всегда быть перестроены для усиления только одной определенной длины волны одного канала из входного многоканального WDM сигнала.

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.

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.

Полупроводниковые лазерные усилители (ППЛУ)

Основу ППЛУ составляет активная среда, аналогичная той, которая используется в полупроводниковых лазерах. 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.

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.

2.4 EDFA усилители: устройство, физический механизм работы, основные характеристики и параметры

На рисунке 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.

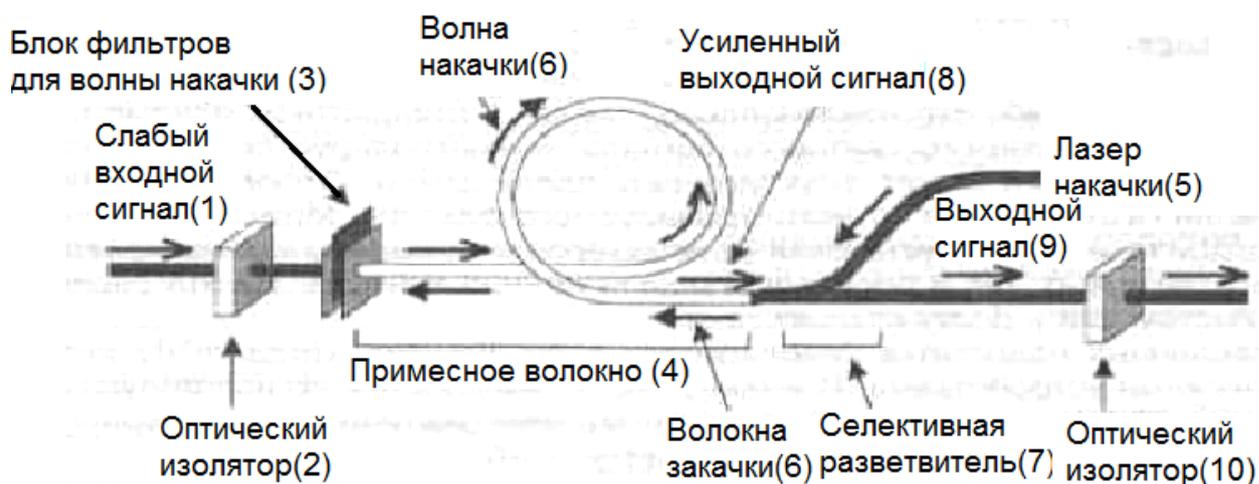


Рис. 2.5. Оптический усилитель на примесном волокне.

Механизм работы EDFA

Активной средой усилителя является одномодовое волокно, сердцевина которого легируется примесями редкоземельных элементов с целью создания трехуровневой атомной системы, рис. 2.6. Лазер накачки возбуждает электронную подсистему привесных 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. 2.6. 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. В EDFA наиболее широкая зона усиления от 1530 до 1560 нм, соответствующая переходу достигается при оптимальной длине волны лазера накачки 980 нм. Усиление в другом окне прозрачности 1300 нм можно реализовать с

использованием примесей празеодимия, однако такие оптические усилители не получили большого распространения.

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 мкВт (-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. 2.7. показано, как ведет себя коэффициент усиления для EDFA в зависимости от длины волны и при различных значениях мощности входного сигнала. Уменьшение K при $P = 1$ мВт связано с насыщением усилителя. На кривой зависимости от длины волны при малых значениях мощности входного сигнала заметны минимумы и максимумы. Отсутствие плато в широком диапазоне длин волн (от 1530 до 1560 нм) 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.

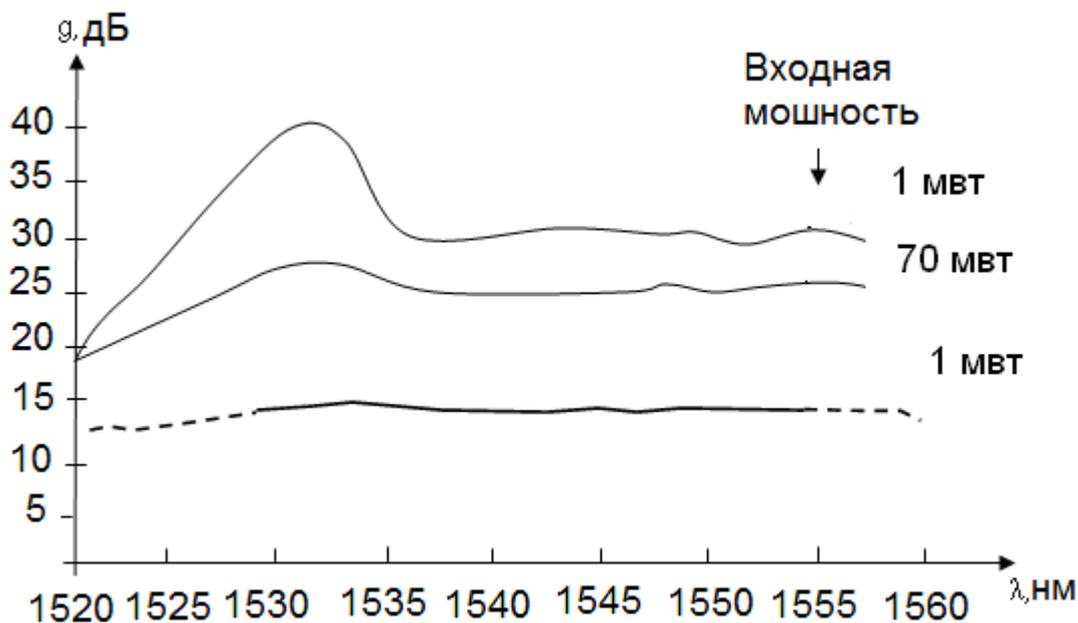


Рис. 2.7. Коэффициент усиления кремниевого EDFA при различных значениях мощности входного оптического сигнала (по материалам фирмы Corning)

Разновидности усилителей EDFA

Две разновидности усилителей EDFA с примесным волокном преобладают в коммерческих реализациях сегодня:

- на кремниевой основе
- на фтор-цирконатной основе

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.

В силу особенностей конструкции усилители EDFA вносят определенный шум в усиливаемый сигнал, приводя к уменьшению соотношения 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.

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. 2.8 а показана кривая выходной мощности при усилении 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. 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 нм, 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.

В результате чего оптимизация системы становится сложной итерационной процедурой. 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. 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.

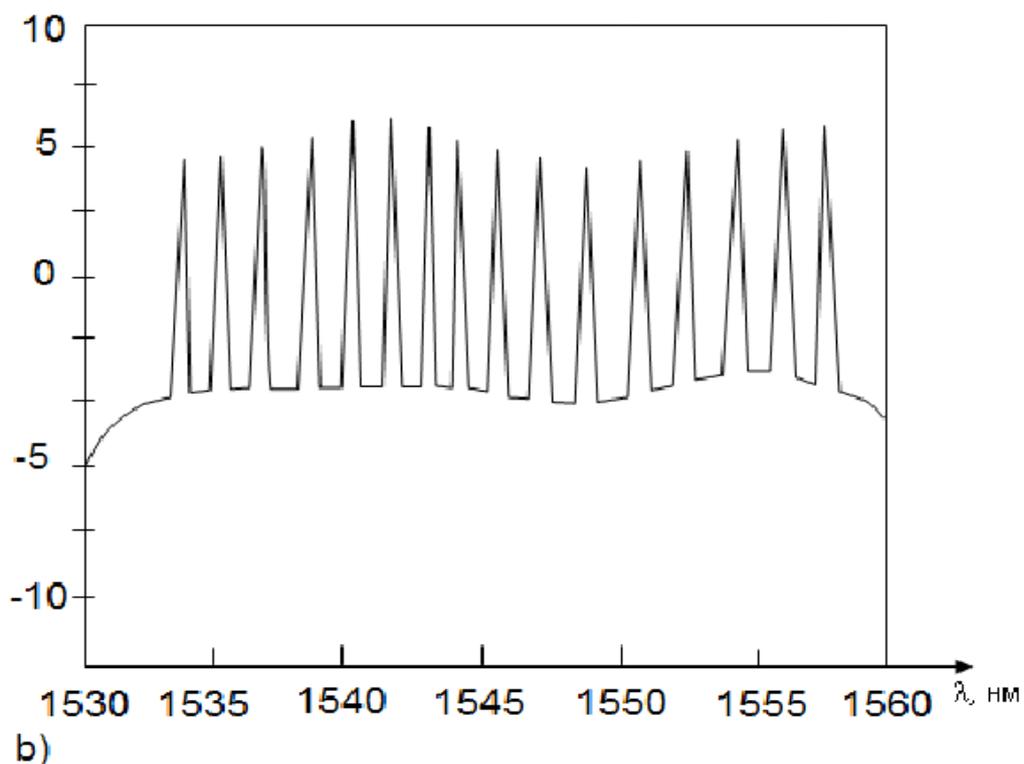
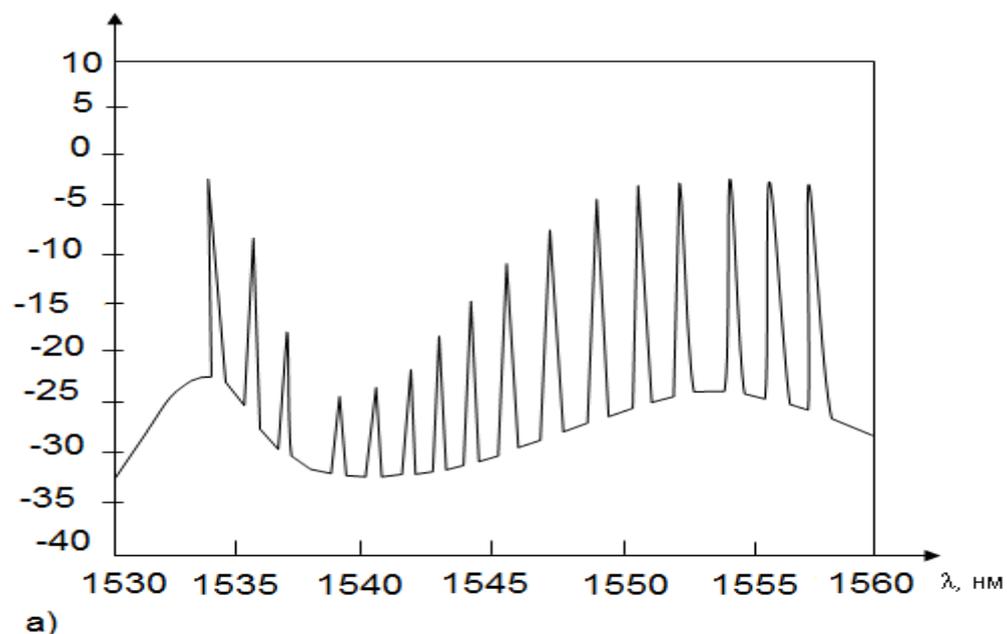


Рис. 2.8..Кривые выходной мощности: а - усилители на кремниевой основе, б - усилители на фтор - цирконатной основе.

Производители оборудования, понимая эту проблему, начинают внедрять различные самооптимизирующиеся алгоритмы в элементы полностью оптической сети. 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 фторсодержащее волокно способно поглотить больше эрбия, что и приводит к улучшению профиля в области 1530-1542 нм, которая теперь открывается для усиления DWDM сигнала. Рис. 2.8 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 нм. Дело в том, что длина волны накачки 980 нм, характерная для кремниевого EDFA, не эффективна для работы фторидного усилителя EDFA, поскольку на этой длине волны велико сечение поглощения, сопровождающееся возбуждением других состояний. Указанный недостаток проявляется при строительстве сверхпротяженных безрегенерационных сегментов с каскадом оптических усилителей, ограничивая расстояния между усилителями. Есть пути преодоления этой проблемы, и производители собираются поставлять следующее поколение фтор -цирконатных усилителей EDFA, имеющих ровный профиль, низкий уровень шумов и более высокую надежность.

Лазеры накачки для EDFA

Важнейший компонент усилителя EDFA – лазер накачки (рис. 2.9). 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.

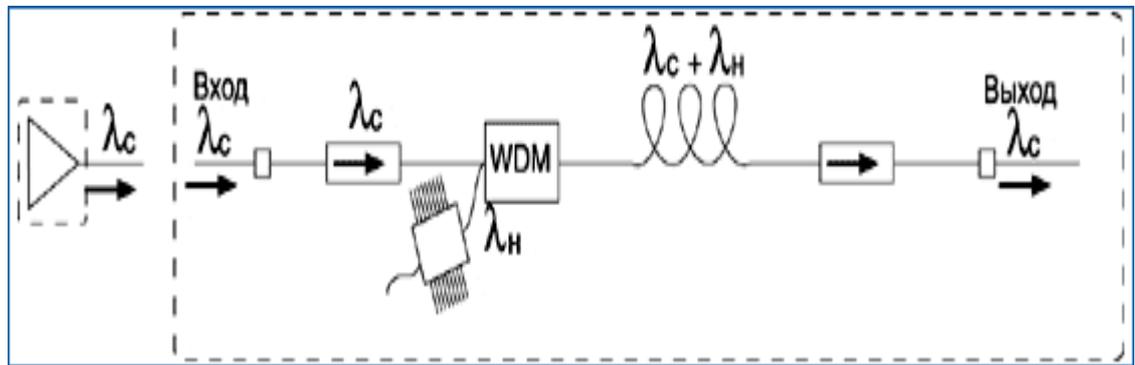


Рис. 2.9. Схема применения лазера накачки в EDFA усилителях.

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.

Если лазерный передатчик выдает в волокно с типичным затуханием 0,2 дБ/км в области длины волны 1550 нм сигнал мощностью +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 -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 регенератор 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 регенераторов.

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.

Схемы накачки EDFA усилителей

Возможно несколько схем накачки EDFA на длинах волн 1480 нм или 980 нм (рис. 2.10).

Прямое направление накачки (рис. 2.10-а) дает наиболее низкий уровень шума. Это предпочтительно при небольшой мощности входного сигнала и максимальных значениях коэффициента усиления. При обратном направлении накачки (рис. 2.10-б) проще достигается режим насыщения. Это предпочтительно в тех случаях, когда требуется на выходе сигнал с максимально возможной мощностью.

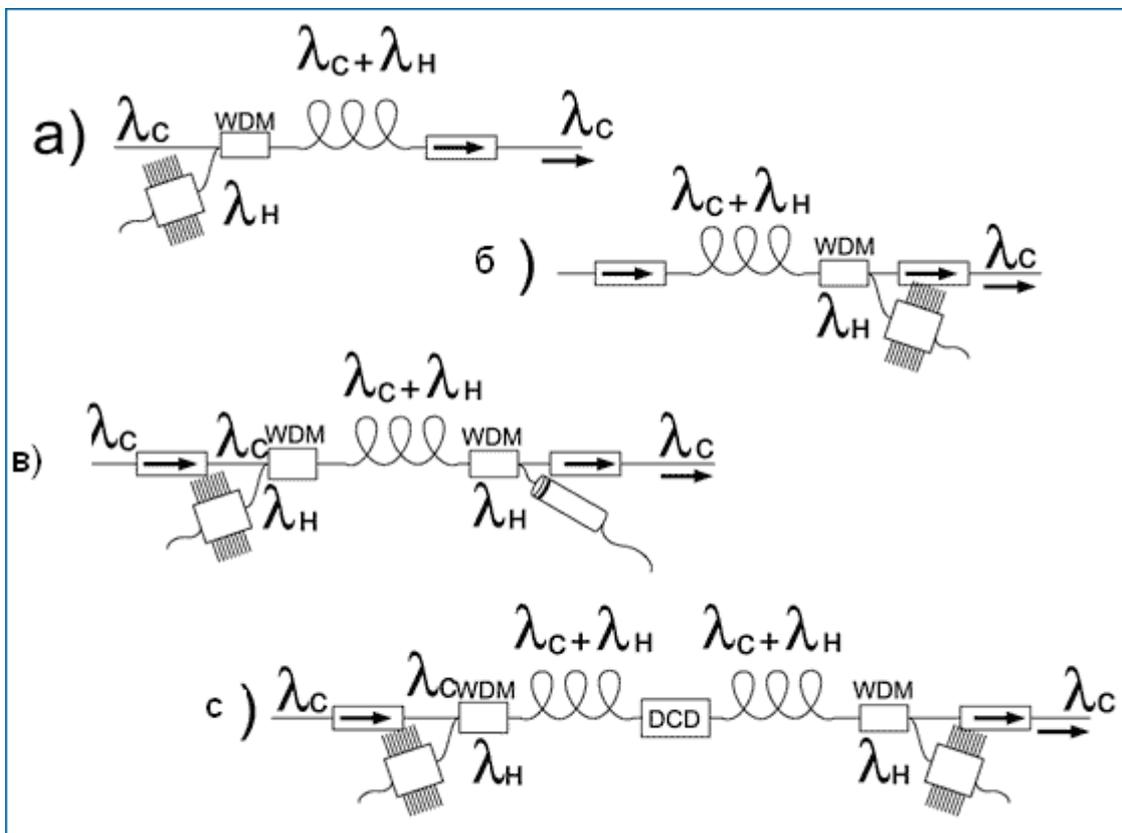


Рис. 2.10. Типовые схемы накачки EDFA (DCD – устройство

компенсации дисперсии, dispersion compensation device)

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.

Волоконные эрбиевые усилители обеспечивают “прозрачное” усиление произвольно поляризованного оптического сигнала в С2-диапазоне (1535-1565 нм) с максимальной выходной мощностью до 25дБм на один спектральный канал. В усилителях используется уникальная технология накачки мощными многомодовыми диодами специального волокна легированного эрбием. Усилители на основе эрбиевого волокна имеют малый шум-фактор, что позволяет передавать оптический сигнал на большие расстояния без его регенерации.

2.5 Оптические усилители, использующие нелинейные явления в ОВ

В оптических системах, использующих волоконно-оптический кабель, для усиления сигналов можно использовать нелинейные явления в оптическом волокне, такие, как ВКР или эффект Рамана, ВРМБ и параметрическое усиление.

Оптический световод, как и любой диэлектрик, демонстрирует нелинейное поведение в сильном электромагнитном поле. Такие поля образуются даже при использовании относительно маломощных источников излучения за счет большой плотности мощности, реализуемой в силу малого поперечного сечения одномодового кабеля (порядка $5 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$). Ситуация усугубляется в системах с оптическими усилителями, используемых для обеспечения большой длины регенерационного участка, а также в высокоплотных системах с разделением по длинам волн, где используются источники интенсивного лазерного излучения. Наиболее явно проявляются нелинейные эффекты низших порядков:

-нелинейное преломление - явление, при котором показатель преломления зависит от интенсивности электрического поля E ;

-вынужденное неупругое рассеяние - явление, при котором оптическая волна передает часть своей энергии нелинейной среде в результате взаимодействия с молекулами;

-модуляционная неустойчивость - явление модуляции стационарного волнового состояния под действием нелинейных и дисперсионных эффектов

-параметрические процессы - явления, вызванные взаимодействием оптических волн с электронами внешних оболочек (четырёхволновое смешение (ЧВС), генерация гармоник и параметрическое усиление) .

Нелинейное преломление, фазовая самомодуляция и фазовая кросс-модуляция.

Показатель преломления оптической среды не только зависит от частоты (этот факт рассматривается в рамках линейной теории), но и от интенсивности света I и квадрата напряженности электрического поля E :

$$n(\omega, |E|^2) = n_1(\omega) + n_2(|E|^2), \quad (2.5)$$

где n_1 - линейная часть, описываемая уравнением Селлмейера и зависящая от частоты, n_2 - нелинейная составляющая показателя преломления, зависящая от электрического поля. Нелинейная составляющая n_2 может быть выражена следующим уравнением:

$$n_2 = \frac{3 \cdot \chi_1^{(3)}}{8 \cdot n \cdot |E|^2} = k_n \cdot |E|^2 \quad (2.6)$$

где k_n - коэффициент нелинейности показателя преломления, $\chi_1^{(3)}$ - составляющая нелинейной диэлектрической восприимчивости 3-го порядка. Зависимость n от $|E|^2$ приводит к таким нелинейным эффектам, как фазовая самомодуляция (ФСМ) и фазовая кросс-модуляция (ФКМ):

-ФСМ обусловлена нелинейным набегом фазы, который оптическое поле приобретает при распространении в световоде, причем набег фазы увеличивается с увеличением длины распространения z , приводя к симметричному спектральному уширению коротких импульсов;

- ФКМ обусловлена набегом фазы, наведенным электрическим полем источника, излучающего на другой длине волны; эта волна распространяется совместно с исходной и вызывает асимметричное спектральное уширение совместно распространяющихся импульсов.

Изменение фазы при появлении ФСМ вызывает паразитную частотную модуляцию (ПЧМ) импульса, глубина которой растет с ростом z , что и объясняет уширение спектра импульса. Этот спектр имеет обычно осциллирующий характер и зависит от формы импульса и его начальной паразитной частотной модуляции (ПЧМ), которая наблюдается у многих источников излучения. Если на ФСМ накладывается ДГС, то для волокна с положительной дисперсией ее влияние обычное и сводится к уширению

спектра и расплыванию импульса со временем. Если же дисперсия волокна отрицательна, то ее влияние необычное - гауссовский импульс несколько расширяется, затем стабилизируется, а спектр импульса сужается. Если же импульс имеет форму гиперболического секанса (близок к гауссовскому), то в отсутствие начальной ПЧМ импульс ведет себя как солитон - ни форма, ни спектр импульса не изменяются при распространении.

Таким образом, совместное действие ФСМ и ДГС в световоде в области отрицательных дисперсий является одной из основных причин, которая объясняет существование оптических солитонов (см. ниже).

Вынужденное неупругое рассеяние.

Это явление, в отличие от упругого взаимодействия (изучаемого в линейной теории), обусловлено неупругим взаимодействием, при котором оптическое поле передает часть своей энергии нелинейной среде. С ним связаны два явления:

- вынужденное рамановское/комбинационное рассеяние (ВКР)
- вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна (ВРМБ)

Квантовый механизм рассеяния состоит в том, что фотон падающего пучка (например пучка лазерной накачки оптического усилителя) распадается на фотон меньшей (комбинационной или разностной) частоты и фонон. Если принять, что f_c и $f_{\text{нак}}$ - частоты сигнала и накачки, то это происходит по схеме: $f_{\text{нак}} - f_c = f_p$. Излучение разностной частоты ω_p называется стоксовой волной. Для ВКР стоксовая волна может распространяться в обоих направлениях, но преимущественно распространяется по направлению падающего пучка, для ВРМБ - в противоположном направлении.

Оба эти явления носят пороговый характер, но имеют и существенные различия: одно наблюдается при мощностях накачки порядка 1 Вт (ВКР), другое - порядка 10 мВт (ВРМБ). Важной особенностью этих явлений является то, что их интенсивность в волоконных световодах может увеличиваться на много порядков (до 10^9 раз на длине волны 1550 нм при

затухании $0,2$ дБ/км), создавая возможность для оптического усиления. Благодаря этому оба эти явления используются в оптических усилителях, имеющих одноименные названия:

Явление ВРМБ стало предметом более пристального изучения в последнее время в связи с значительным усовершенствованием систем передачи с одной несущей и достижением близких к предельным показателей по длине пролета (участка перекрытия – аврал), за счет использования все более мощных лазерных источников излучения, а также показателей по скорости передаваемого сигнала, за счет увеличения разрешающей способности (степени монохроматичности) лазерного сигнала. В обоих случаях происходит увеличение плотности потока световой энергии, приводящее к усилению нелинейных эффектов, которые в первую очередь проявляются через ВРБМ, учитывая, что оно имеет самый низкий порог возникновения. Возникнув, ВРБМ само приводит, при определенных уровнях излучения накачки, к возникновению пороговых явлений, ограничивающих мощность полезного распространяющегося сигнала.

Физическая суть явления такова. Фонон, рождаемый в схеме процесса, возбуждает акустические волны, распространяющиеся в том же направлении, но со значительно меньшей скоростью 5 км/с за счет эффекта электрострикции (основная волна распространяется в одномодовом ОВ с фазовой скоростью порядка 204000 км/с). Они создают пространственные колебания плотности в волокне (сгустки и разрежения), приводя к локальному изменению показателя преломления. Фотон, также рождаемый в схеме этого процесса, формирует стоксовую волну, которая распространяется в обратном направлении и называется волной обратного рассеяния. Ее интенсивность тем выше, чем больше эффект фотоупругости, а он, в свою очередь, тем больше, чем выше уровень накачки. При некотором его уровне, называемом пороговым уровнем ВРБМ, начинает резко увеличиваться интенсивность волны обратного рассеяния, что ухудшает эффективность передачи основного сигнала. При дальнейшем увеличении

подаваемого в ОВ сигнала интенсивность основного сигнала перестает расти и даже начинает падать.

Итак, очевидно, что ВРБМ приводит к двум эффектам:

- установлению верхней границы оптической мощности, эффективно используемой системой (увеличение длины перекрытия, например, за счет увеличения мощности источника сигнала оказывается ограниченным величиной порогового уровня ВРБМ)

- ухудшению качества основного сигнала за счет взаимодействия основной волны с волной обратного рассеяния, а также с волной двойного обратного рассеяния, возникающей за счет отражения волны обратного рассеяния.

Пороговый уровень ВРБМ зависит от ряда факторов:

- ширины линии лазерного источника (чем она шире, тем пороговый уровень выше)
- эффективной площади поперечного сечения ОВ (чем он больше, тем лучше)
- длины ОВ (при длине до 10 км проблем с ВРБМ не возникает)
- технологии модуляции сигнала (лазерный источник с прямой модуляцией имеет ширину порядка 1 ГГц, а с внешней модуляцией – 1МГц).

2.6 Волоконно-оптические усилители с использованием Рамановского рассеяния оптического излучения. Основные характеристики и параметры

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

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

Для накачки используются лазеры, функционирующие на длине волны, равной 0,98 мкм или 1,48 мкм. Одновременно по оптическому волокну передаются сигналы линейного тракта, служащие для передачи информации, и сигналы накачки, энергия которых расходуется для усиления сигналов, переносящих информацию.

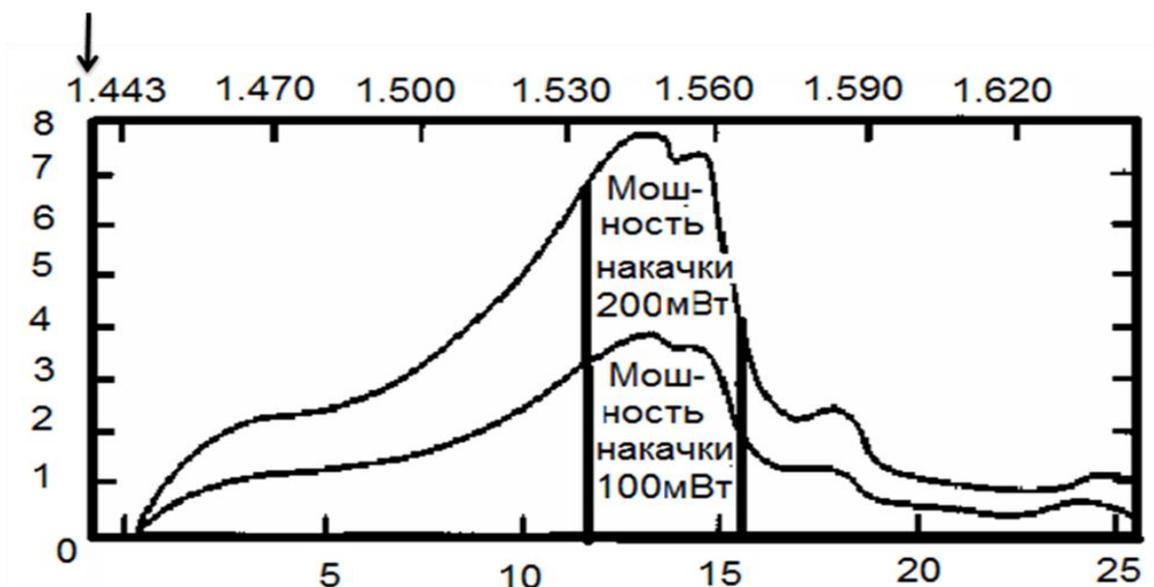


Рис. 2.11. Спектр рамановского усиления в ОВ

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

Амплитудно-частотная характеристика малосигнального рамановского усиления в диапазоне S+C+L (1470-1620 нм) показана на рис. 2.11 для случая использования длины волны накачки 1443 нм мощностью 100 и 200 мВт в кварцевом ОВ.

Из рисунка видно, что ширина полосы примерно соответствует 30 нм и укладывается в диапазон C, однако характеристика достаточно неравномерна и требует выравнивания для систем DWDM

Для случая, когда интенсивность сигнала I_c меньше интенсивности накачки $I_{нак}$, усиление рамановского ОУ определяется следующим выражением [3]:

$$G_0 = \exp(g_{\text{э}} P_{\text{нак}} L_{\text{эфф}} / A_{\text{эфф}}), \quad (2.7)$$

где $P_{\text{нак}} = I_{\text{нак}} A_{\text{эфф}}$ - мощность накачки; $L_{\text{эфф}}$ и $A_{\text{эфф}}$ - эффективные длина и площадь поперечного сечения ОВ, а $g_{\text{э}}$ - эквивалентная крутизна усиления оптического усилителя.

Использование эффективной $L_{\text{эфф}}$ вместо действительной L длины световода позволяет учесть факт поглощения волны накачки путем введения коэффициента потерь на частоте накачки $\alpha_{\text{нак}}$. Соотношение между ними может быть записано в виде :

$$L_{\text{эфф}} = [1 - \exp(-\alpha_{\text{нак}} L)] / \alpha_{\text{нак}} \quad (2.8)$$

Усиление G_0 растет почти линейно с ростом мощности накачки вплоть до $P_{\text{нак}} = 1$ Вт, затем зависимость становится характерно экспоненциальной за счет насыщения, которое происходит при очень большой мощности накачки (несколько Вт). Типичными параметрами для Рамановских усилителей являются, согласно [3], мощность накачки порядка 1 Вт, коэффициент усиления порядка 17-30 дБ. Причем коэффициент усиления уменьшается с ростом длины волны накачки. На практике, однако, используются более низкие уровни накачки, порядка 100-200 мВт, позволяющие реализовать, как видно из рис. 2.1.1, рамановское усиление порядка 4-8 дБ. Мощность насыщения P_n у рамановских усилителей может быть значительно больше, чем у ППОУ (2-3 Вт против 1 мВт при больших мощностях накачки) [3], причем накачка может быть как сонаправленная, так и противонаправленная, хотя в большинстве случаев используется последняя.

В качестве накачки обычно используются лазеры с длиной волны 1060 нм (для усиления сигналов 1300 нм) и 1320 или 1443 нм (для усиления сигналов с длиной волны 1550 нм).

Этот тип усилителей достаточно широкополосный (5-10 ТГц), однако крайне неравномерен и пригоден для усиления коротких импульсов (пикосекундного диапазона). При усилении сигналов в системах WDM требуется выравнивание АВХ. Ориентировочные значения параметров усилителей Рамана приведены в табл. 4.3-1 (по материалам [3]).?

При практической реализации усилителей Рамана свет накачки вводится в ОВ усилителя противонаправленно. В этом варианте усилитель Рамана работает как малозумящий предусилитель, практически не вносящий дополнительной нелинейности в ОВ.

На рис. 2.12. приведена блок-схема распределенного рамановского усилителя [10]. В этой схеме ортогонально поляризованные сигналы диодов лазерной накачки мультиплексируются по состоянию поляризации в П-мультиплексоре, а затем подаются в мультиплексор WDM для создания противонаправленной накачки в передающем волокне. В результате распространяющийся в прямом направлении сигнал получает рамановское усиление в передающем волокне. Использование противонаправленной накачки уменьшает общий уровень шума.

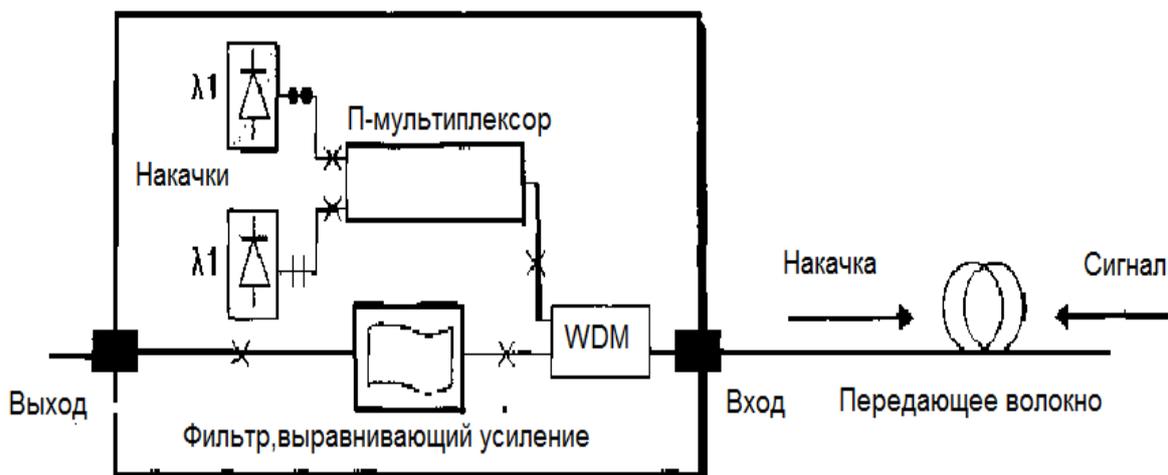


Рис. 2.12. Блок-схема усилителя Рамана

Усиление и выходная характеристика рамановского усилителя, как видно из рис 2.11 и 2.12, зависят от мощности накачки, эффективной площади и длины волокна, рамановского сдвига между частотами накачки и сигнала (который в полосе усиления может составлять 13-13,2 ТГц) и коэффициента поглощения сигнала накачки в передающем волокне. На практике используемые уровни накачки позволяют реализовать усиление на уровне 3,75-7,78 дБ [10], при котором неравномерность усиления может быть снижена до приемлемой для систем WDM/DWDM величины. Различные сигналы принципиально получают различное усиление, зависящее от рамановского сдвига, следовательно, колебания уровня усиления неизбежны.

По сравнению с широко применяемыми в настоящее время усилителями EDFA Рамановские усилители значительно лучше по шумовым характеристикам и менее чувствительны к температурным колебаниям.

Рамановские усилители могут быть распределенными или выполняться в виде дискретных устройств. Распределенные усилители характеризуются тем, что эффект усиления сигнала в них достигается путем использования определенных участков или всего оптического волокна,

применяемого для передачи. Распределенные Рамановские усилители могут классифицироваться на три подкатегории:

-Рамановский усилитель с накачкой вперед – энергия накачки и передаваемый сигнал распространяются по волокну передачи в одном направлении.

-Рамановский усилитель с накачкой назад – энергия накачки и передаваемый сигнал распространяются по волокну передачи в противоположных направлениях.

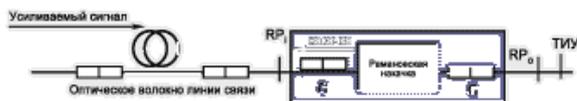
-Рамановский усилитель с накачкой в обе стороны – энергия накачки распространяется по волокну передачи в обе стороны. В этом случае часть энергии накачки распространяется в одном направлении с передаваемым сигналом, а часть – в направлении, противоположном направлению сигнала, передаваемого средствами связи.

Дискретный Рамановский усилитель – устройство, усиливающие оптические сигналы, в котором применяется оптическое волокно с SRS-эффектом, и все физические составляющие расположены внутри устройства.

Применение рамановского волоконно-оптического усилителя

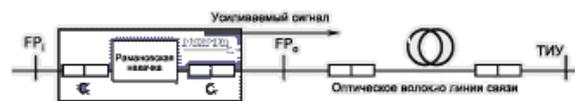
Рамановский волоконно-оптический усилитель предназначен для увеличения протяженности оптических многоканальных цифровых линий связи без промежуточного усиления и регенерации сигнала.

Рамановский усилитель с накачкой назад



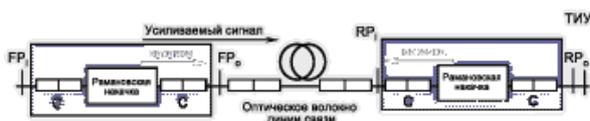
RPi - контрольная точка входа сигнала, усиливаемого накачкой назад;
 RPo - контрольная точка входа сигнала усиливаемого накачкой назад;
 TIU - контрольная точка измерения усиления;
 C - оптические разъемы, оконечивающие усилитель.

Рамановский усилитель с накачкой вперед



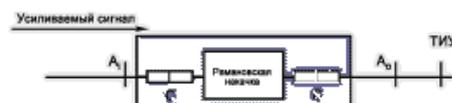
FPi - контрольная точка входа сигнала, усиливаемого накачкой вперед;
 FPo - контрольная точка выхода сигнала усиливаемого накачкой вперед;
 TIU - контрольная точка измерения усиления;
 C - оптические разъемы, оконечивающие усилитель.

Рамановский усилитель с накачкой в обе стороны



RPi - контрольная точка входа сигнала, усиливаемого накачкой назад;
 RPo - контрольная точка входа сигнала, усиливаемого накачкой назад;
 FPi - контрольная точка входа сигнала, усиливаемого накачкой вперед;
 FPo - контрольная точка выхода сигнала, усиливаемого накачкой вперед;
 TIU - контрольная точка измерения усиления;
 C - оптические разъемы, оконечивающие усилитель

Рамановский усилитель с накачкой в обе стороны



Ai - вход дискретного Раманского усилителя;
 Ao - выход дискретного Раманского усилителя;
 TIU - контрольная точка измерения усиления;
 C - оптические разъемы, оконечивающие усилитель.

Рис. 2.13 Рамановский усилитель с накачкой назад

Прибор включает в себя волоконный лазер накачки, определяющий рабочий спектральный диапазон устройства, и схему управления, посредством которой осуществляется изменение и контроль значения коэффициента усиления. Взаимодействие сигнала и накачки осуществляется при помощи их объединения через мультиплексор, и сам процесс усиления происходит непосредственно в линии связи.

Типичными параметрами рамановского волоконно-оптического усилителя являются мощность накачки 1 Вт, коэффициент усиления порядка 30 дБм (1000 раз). Мощность насыщения P_n ВКР-усилителей значительно больше, чем ППОУ (1Вт против 1 мВт), причем накачка может быть как попутная, так и встречная. В качестве накачки используются лазеры с длиной волны 1060 нм (для усиления сигналов 1300 нм) и 1320 нм (для усиления

сигналов с длиной волны 1550 нм). Этот тип усилителей достаточно широкополосен (5-10 ТГц) и годится для усиления сигналов в схемах с WDM и усиления коротких импульсов (пикосекундного диапазона)

Рамановский волоконно-оптический усилитель используется для увеличения мощности оптических сигналов в диапазоне длин волн 1548-1561 нм в магистральных, внутризонах, местных первичных сетях и оптических сетях доступа. Выход оптического усилителя передачи подключается к оконечному оборудованию, а вход – к волоконно-оптической линии связи.

Исполнение

Рамановский волоконно-оптический усилитель выполнен в корпусе высотой 6U в стандартной стойке шириной 19 дюймов.

Рамановский волоконно-оптический усилитель характеризуется следующими достоинствами:

- возможность работать при любой скорости передачи данных;
- возможность присоединения с различными оптическими стыками (интерфейсами);
- возможность управлять коэффициентом усиления ;
- возможность изменения рабочего спектрального диапазона;
- высокое соотношение качества и цены .

Ниже приведены основные технические характеристики Рамановских волоконно-оптический усилителей:

Диапазон мощности накачки	10 .. 30 дБм
Коэффициент усиления	3.0 .. +23.0 дБ
Спектральный диапазон	1548 – 1561 нм
Неравномерность коэффициента усиления (внутри спектрального диапазона)	< 3.0 дБ
Рабочая температура	+5 .. +45 °С
Допустимый уровень влажности, %	от 5 до 95
Время включения:	
- до начала работы	0.6 сек
- до полной стабилизации	3 мин
Оптические разъемы	FC/APC SC/APC и другие по заказу
Конструкция	Корпус 6U, 19”
Потребляемая мощность	< 20 Вт 5/12 В,
Напряжение питания	DC 42-72 В, AC 220 В
Размеры блока,	ВхШхГ 265x32.5x265 мм

Широкополосные усилители Рамана

Использование систем WDM, как известно, требует определенной широкополосности используемых усилителей, причем в последнее время эти требования уже простираются за границы диапазона C+L. Выше было отмечена принципиальная широкополосность рама-новского усиления в

целом, однако это усиление принципиально неравномерно, если обратить внимание на характер его спектра (см. рис. 2.14).

Однако этот спектр характерен только для усилителей с одной длиной волны накачки. Если определенным образом подобрать несколько длин волн накачки в требуемой полосе усиления и оптимизировать уровни накачки, то можно получить выровненное по полосе (без использования специальных выравнивающих фильтров) широкополосное усиление. Сделать это, однако, не так просто, учитывая наличие существенного взаимодействия между волнами коротковолновой и длинноволновой накачки. Это можно сделать достаточно аккуратно, если воспользоваться методами численного моделирования, позволяющего достаточно просто вычислить суперпозицию АВХ усиления от отдельных волн накачки G ;

$$G_{\text{total}}(\lambda) = G_1 G_2 \dots G_n. \quad (2.13)$$

Эта принципиальная простота подхода к решению задачи создания широкополосного рамановского усилителя, причем с оптимизацией неравномерности АВХ без использования выравнивающих фильтров начинает приносить свои плоды. Так, в [13] сообщается о распределенном рамановском усилителе с непрерывной АВХ шириной 95 нм (1520-1615 нм), неравномерностью порядка 2 дБ при среднем усилении 12 дБ, полученной при использовании 4 волн накачки: 1423, 1443, 1464 и 1495 нм. Другой источник [14] сообщает о рамановском усилителе с непрерывной АВХ шириной 80 нм (1530-1610 нм), неравномерностью порядка 0,5 дБ при среднем усилении 9 дБ, полученной при использовании 5 волн противонаправленной накачки (3 слева (1,2,3) и 5 справа): 1423,2 (1), 1438,5 (2), 1451,8

(3), 1466 (4) и 1495,2 (5) нм. На начало 2003 года наибольшая зафиксированная в публикациях ширина полосы усилителя Рамана составила 136,6 нм (1503-1640 нм) с использованием 5 волн накачки: 1408, 1439, 1470, 1502 и 1535 нм, тогда как для усилителей типа EDFA она достигла только 132 нм при использовании двухполосной схемы усилителя, аналогично описанной ниже в разд. 4.3.7.1 [15].

2.7 Волоконные ВРМБ усилители

Явление ВРМБ также может быть использовано для усиления оптического сигнала. Однако ширина полосы такого усиления значительно меньше, чем у ВКР- усилителей (десятки мегагерц против терагерц). Кроме того, частота накачки должна отличаться от частоты усиливаемого сигнала на малую величину (< 100 МГц), что делает их непригодными для усиления сигналов в схемах с WDM. Формула для коэффициента усиления аналогична коэффициенту усиления у ВКР- усилителей, с той только разницей, что $P_{\text{нак}}$ и мощность насыщения усилителя P_n составляют около 1 мВт.

Принцип усиления оптических усилителей основан на рассеянии Мандельштама -Бриллюэна. При распространении в среде свет рассеивается неоднородно. Частным случаем такой неоднородности является движущаяся волна распределения плотности вещества, которую называют фононом или звуком. Одной из разновидностей фононов (тепловых колебаний атомов решетки) являются акустические. Наглядно такие фононы легко представить себе как цепочки положительно и отрицательно заряженных ионов. В цепочке акустических фононов смещения атомов подобны бегущей волне в длинной струне.

В обычных условиях акустические фононы существуют в твердых телах за счет тепловой энергии. Если же в этом материале распространяется свет (будем называть его падающим), то возникают процессы рассеивания

падающего света на акустических фононах, приводящие как к поглощению, так и испусканию фононов. Когда при рассеянии возникает новый фонон, то частота световой волны уменьшается. Поскольку вероятность рассеивания пропорциональна числу соответствующих фононов, а их число зависит от температуры, то оказывается, что этот эффект при обычных условиях довольно слаб.

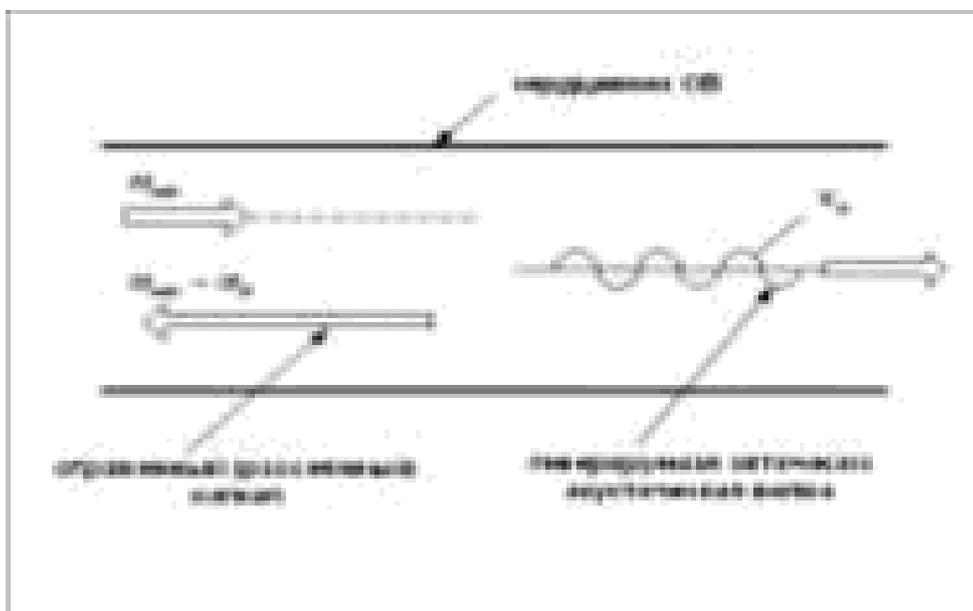


Рис. 2.18. Распространение волны накачки, звуковой волны и рассеянной волны.

Однако если увеличивать интенсивность падающего света, то начиная с некоторого значения интенсивности (порога) ситуация резко меняется. Дело в том, что наличие в материале кроме падающей еще и рассеянной световой волны увеличивает вероятность рассеяния. Совместное воздействие падающей и рассеянной волны благодаря некоторым механизмам

(например, явлению электрострикции в твердых телах) приводит к возникновению новых неоднородностей плотности вещества, то есть к появлению новых фононов, на которых, в свою очередь, рассеивается падающая волна. Как только рассеяние становится настолько эффективным, что начинает превосходить затухание света, так рассеивание начинает лавинообразно нарастать, и интенсивность рассеянного света быстро становится сравнимой с интенсивностью падающего. Процесс с участием акустических фононов, когда активную роль играет рассеянный свет (рис. 2.18), называется вынужденным рассеянием Мандельштама-Бриллюэна (ВРМБ).

Усиление ВРМБ в световодах можно использовать для усиления слабых сигналов, частота которых смещена от частоты накачки на величину сдвига ν_B . Однако из-за исключительно узкой полосы усиления ВРМБ ($\Delta \nu_B < 100$ МГц) полоса пропускания такого усилителя обычно меньше 100 МГц, в то время как в усилителях Рамана полоса составляет приблизительно 5 ТГц. По этой причине, несмотря на возможность заметного усиления при мощности накачки лишь в несколько милливатт, усилители ВРМБ до недавнего времени не привлекали большого внимания. Активность, заметная в этой области в последнее время, объясняется в основном потенциальной возможностью применения таких усилителей в системах связи.

Несколько примеров применения усилителей.

1. Усилитель Мандельштама - Бриллюэна в качестве оптического фильтра

Любой усилитель с шириной полосы, меньшей чем разнесение каналов, можно использовать в качестве оптического фильтра. Это делает его пригодным для выделения нужных каналов вещания на промежуточных станциях. Настройка достигается изменением длины волны,

соответствующей пику усиления. Стимулированное рассеяние Бриллюэна (SBS) можно использовать для выборочного усиления канала, так как полоса усиления относительно мала (~100 МГц). Эффект SBS также включает взаимодействие оптических и акустических волн и определяется теми же законами сохранения энергии и количества движения, которые характерны для акустооптических фильтров.

Чтобы использовать усиление SBS в качестве перестраиваемого оптического фильтра, немодулированный луч накачки подается на приемном конце оптического волокна в направлении, обратном распространению многоканального сигнала, и длина волны накачки изменяется для выбора сигнала. Луч накачки передает часть своей энергии каналу, сдвинутому вниз по частоте от частоты накачки точно на величину сдвига Бриллюэна (около 10 ГГц при длине волны 1,55 мкм). В этом подходе настраиваемый лучом накачки лазер является исходным. Скорость передачи каждого канала ограничена значением 100 Мбит/с, если использовать узкополосный сигнал накачки. Полосу можно увеличить, расширяя спектр накачки, так как при этом ширина полосы усиления SBS также увеличивается.

2. Применение усилителя Бриллюэна при когерентном приеме

Узкий диапазон частот этих усилителей может быть использован в когерентных системах передачи по оптическому волокну. Основная идея - усилить оптическую несущую отдельно, оставляя боковые полосы модуляции неусиленными; усиленная несущая действует как местный генератор, фаза которого автоматически соответствует фазе, передаваемой несущей. Усилители Бриллюэна идеально подходят для этой цели, поскольку имеют узкий диапазон частот. Волоконные усилители Бриллюэна могут быть также использованы в качестве предварительных усилителей для улучшения чувствительности приемника.

2.8 Параметрические усилители

Параметрическое усиление основано на использовании явления, называемого частично вырожденным четырехволновым смешением ЧВЧВС. Стоксова и антистоксова компоненты при этом называются сигнальной и холостой волнами. При точном фазовом синхронизме и $gL \gg 1$, где g - коэффициент параметрического усиления, в области, далекой от насыщения, а также в случае вырождения по накачке, когда существует только одна частота накачки, формула для коэффициента усиления параметрического усилителя, полученного за один проход, имеет вид [3]

$$G_0 = [\exp(\gamma P_{\text{нак}} L_{\text{св}})]/4, \quad (2.14)$$

где γ - среднее значение коэффициента нелинейности, $L_{\text{св}}$ - длина световода.

Грубая оценка ширины полосы усиления дает величину порядка 100 ГГц. Эта величина является промежуточной между аналогичными величинами ВКР-усилителей и ВРМБ-усилителей. Параметрический усилитель имеет ряд специфических недостатков и требует: точного соблюдения фазового синхронизма, жесткого контроля длины световода, учета положения и уровня усиления холостой волны, учета истощения накачки и уширения ее спектра, приводящих к уменьшению параметрического усиления и др. Эксперименты с такими усилителями показывают возможность достижения больших коэффициентов усиления 38-46 дБм, однако требуют большой мощности накачки (30-70 Вт) и спецсредств для поддержания синхронизма. Все это не позволяет (по крайней мере, сегодня) использовать такие усилители в синхронных системах связи. Ориентировочные значения параметров ВРМБ-усилителей приведены ниже

3.ВОПРОСЫ ПРИМЕНЕНИЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ

УСИЛИТЕЛЕЙ

3.1 Анализ рекомендаций ITU-T по применению волоконно – оптических усилителей.

Действующая нормативная база

Разработка нормативных документов (НД) – стандартов, рекомендаций, норм – в области волоконно-оптической техники началась в середине 70-х годов. Уже в 1980 году Международный консультативный комитет по телефонии и телеграфии (МККТТ), ныне ITU-T, издал первую Рекомендацию по оптическому волокну (ОВ). Сегодня разработкой стандартов по оптоволокну и оптическим кабелям (ОК) занимаются такие международные институты и организации, как IEC (International

Electrotechnical Commission – Международная электротехническая комиссия), ISO (International Standards Organization – Международная организация по стандартизации), ITU-T (International Telecommunication Union – Telecommunication – Международный союз электросвязи – сектор стандартизации электросвязи), ETSI (European Telecommunications Standards Institute – Европейский институт стандартов в области связи), Bellcore (Bell Communications Research – Исследовательский центр в области связи лаборатории Белла) и др. Все необходимые стандарты, характеристики, нормы и положения относящиеся к области волоконно-оптической техники изложены в соответствующих рекомендациях ITU-T и ETSI.

В рекомендациях МСЭ-Т серии G изложены и определены типовые характеристики являющиеся характерными для использования приборов оптического усиления (таких, как усилители мощности, предусилители или линейные усилители) и подсистем оптического усиления (таких, как передатчики с оптическим усилением или приемники с оптическим усилением), предназначенных, в первую очередь, для применения в цифровой передаче, при условии обеспечения максимальной совместимости с рекомендациями МСЭ-Т серии G по линейным системам и оборудованию, например с такими рекомендациями МСЭ-Т как G.957, G.959.1, G.661., G.662., G.663., G.664., G.665., G.667. и др.

В рекомендациях МСЭ-Т G.664 содержатся руководящие указания и требования к методам обеспечения оптически безопасных рабочих условий (для глаз и кожи человека) на оптических интерфейсах оптической транспортной сети для оборудования, расположенного в местах ограниченного доступа и местах проведения контроля, в частности, для систем, в которых применяются рамановские методы усиления большой мощности. В частности рассмотрены вопросы безопасности для обслуживающего персонала (безопасность глаз и кожи), вопросы

предупреждения повреждения оптических волокон. Приведены примеры архитектур APR (автоматического снижения мощности) для систем ОАС-вспомогательный оптический канал (включая те, которые основаны на Рамановском усилении).

В рекомендациях МСЭ-Т G.665 устанавливаются определения и методы тестирования функциональных параметров следующих типов Рамановских (Raman) волоконно-оптических усилителей и Рамановских усилительных подсистем:

- распределенный Рамановский усилитель с обратной накачкой;
- распределенный Рамановский усилитель с прямой накачкой;
- распределенный Рамановский усилитель с двусторонней накачкой;
- распределенный композитный Рамановский усилитель с обратной накачкой;
- распределенный композитный Рамановский усилитель с двусторонней накачкой;
- дискретный Рамановский усилитель.

В этих рекомендациях описаны классификация, код типа и эталонные модели различных Рамановских усилителей. В рекомендациях также даны в общих чертах основные характеристики Рамановских усилителей такие как:

- эквивалентная входная мощность;
- стабильность выхода при большом сигнале ;
- выходная мощность насыщения ;
- номинальная мощность выходного сигнала;

-максимальная общая выходная мощность;

-диапазон входной мощности ;

-диапазон выходной мощности;

и описаны параметры функционирования и тестирования Рамановских усилителей.

В рекомендациях МСЭ-Т G.662 определены типовые характеристики (для одноканальных и многоканальных приложений, характеристики усилителей мощностей, предусилителей, линейных усилителей, передатчиков с оптическим усилением и приёмников с оптическим усилением) которые необходимы для спецификации оптических усилителей как приборов и подсистем, в первую очередь предназначенных для применения при цифровой передаче, а также в обеспечении максимальной совместимости с рекомендациями МСЭ-Т серии G по линейным системам и оборудованию.

В рекомендациях МСЭ-Т G.661 определены важные параметры, общие для всех типов оптических усилителей (такие как оптический входной и выходной порт, даны определения для оптического усилителя как элемента оптической сети, указаны параметры подсистем оптического усиления, даны основные различия между оптоволоконными усилителями и полупроводниковыми оптическими усилителями, в приложениях указаны механические и физические параметры устройств и подсистем оптического усиления) и методы тестирования вышеуказанных параметров, которые нужно контролировать, для соответствия оптических устройств усилителя и подсистем рекомендациям МСЭ-Т.

Рекомендации МСЭ-Т G.663 охватывают приложение связывающее аспекты устройств оптического усиления и подсистем, первоначально

использованных в цифровых системах. Приложения включают как одноканальные так и многоканальные системы использующиеся в дальних сетях и оптических сетях доступа. Цель этой рекомендации в том, чтобы установить аспекты необходимые для каждого приложения и определение подходящих величин параметров и областей для каждого типа устройства оптического усиления.

В рекомендациях МСЭ-Т G.667 содержатся параметры и определения для устройств, обеспечивающих адаптивную хроматическую компенсацию распределения. Эти устройства необходимы для передачи и обнаружения оптических сигналов в системе, показывающей высокие уровни динамического изменения хроматического распределения, которое могло бы испортить работу системы.

В рекомендациях ETSI Tc-TM изложены важные общие характеристики устройств оптического усиления и подсистем. Рекомендации охватывают как оптические волоконные усилители так и полупроводниковые оптические усилители .

Цель этих рекомендаций в том, чтобы определить общие характеристики важные для использования устройств оптического усиления (усилители мощности, предусилители или линейные усилители) и подсистемы оптического усиления (передатчики с оптическим усилением или приёмники с оптическим усилением).

В рекомендациях ITU-T и ETSI указывается , что соблюдение положений данных рекомендаций носит добровольный характер, однако в рекомендациях содержатся определенные обязательные положения (например, для обеспечения возможности взаимодействия или применимости), и в этих случаях соответствие данной Рекомендации достигается в случае выполнения всех этих обязательных положений.

3.2 Сравнительная характеристика волоконно-оптических усилителей.

Таблица

3.1

Параметры	EDFA	ВКР (RA)	Fabri-Perot	ВРМБ
Максимальная выходная мощность, дБм	10-33	10-30	< 10 мВт	10-25
Коэффициент усиления, дБ	19-33 30-45	4-8 ($P_{\text{вх}} = 100\text{-}200$ мВт) 17-30 ($P_{\text{вх}}=1$ Вт)	< 25	15-22
Неравномерность коэф. усиления.	± 03	± 08	± 05	± 05
Уровень шума, дБ	3 - 5	2 - 3	5-7	< 5
Диапазон рабочих длин волн, нм	1535-1565	1300-1330 1548-1561	1310-1550	1550
Диапазон рабочих температур	-10 ... +50 °С	+5 ... +45 °С	+5 ...+50° С	+5... +50° С

Сравнивая характеристики оптоволоконных усилителей можно отметить ,что максимальную выходную мощность в 33 дБм обеспечивают

усилители EDFA и соответственно у них наибольшее значение коэффициента усиления 33 дБ . Но необходимо отметить что по шумовым характеристикам наиболее приемлемым является усилитель ВКР (Рамана). Большой уровень шума образуют усилители Фабри-Перо, но в тоже время на длине волны 1310 нм усилитель Фабри – Перо даёт хорошие выходные характеристики, в то время как эта длина волны для других типов усилителей неприемлема. Усилитель EDFA более подходит для применения в регионах с низкой температурой, хотя в обслуживаемых усилительных пунктах усилители помещают в специальные помещения. Изучение практики применения оптоволоконных усилителей показывает, что хороший практический и экономический эффект даёт комбинированное применение разнотипных усилителей (гибридные усилители) , например EDFA – RA – EDFA.

3.3 Особенности применения различных типов волоконно-оптических усилителей в ВОСП.

Самыми распространенными в настоящее время являются **эрбиевые волоконные усилители**. Главным образом это определяется спектром люминесценции ионов эрбия, лежащим в области длин волн $\lambda = 1,54$ мкм -- области минимальных потерь современных кварцевых световодов. Эрбиевый волоконный усилитель характеризуется следующими основными параметрами:

-коэффициентом линейного усиления (усиления при малом входном сигнале);

- мощностью насыщения;
- спектральной полосой усиления;
- рабочей длиной волны;
- эффективностью оптического преобразования и мощностью накачки.

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

Ниже приводятся основные параметры коммерчески доступных эрбиевых волоконных усилителей:

- коэффициент линейного усиления (малосигнального) -- 30-40 дБ;
- мощность насыщения -- до 0,5 Вт;
- спектральная полоса усиления – 30-40 нм;
- диапазон рабочих (усиливаемых) длин волн -- (1530-1570) нм;
- коэффициент шума -- (4-6) дБ.

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 (100 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 требования 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 $DI = 35$ 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 $DI = (1530-1650)$ нм, перекрывая тем самым С и L полосы DWDM-систем. Фирмой Алкатель разработан эрбиевый волоконный усилитель для DWDM-систем, работающий в L спектральной полосе ($DI = 1570-1603$ 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 +26 дБм.

Последним достижением можно считать разработку эрбиевых усилителей на основе теллуридного волокна (легированного примесью теллура), имеющих спектральную полосу $DI = 80$ нм, которая перекрывает С и L рабочие полосы DWDM систем. 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).

В диапазоне длин волн 1310 нм, где усилители типа EDFA имеют неудовлетворительные характеристики предпочтительно применение усилителей на лазерных диодах (Fabri-Perot).

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.

Кроме того, Рамановские усилители (Raman amplifiers) позволяют увеличивать число каналов в существующих линиях связи без замены уже установленных EDFA. Они могут успешно применяться в подводных линиях средней протяженности без регенераторов (длиной около 300 км), где установка усилителей EDFA требует больших затрат. Однако в рамановских усилителях при усилении возникает значительная перекрестная модуляция между усиливаемыми каналами, что ограничивает применение таких усилителей либо одноканальными системами, либо системами WDM с большим числом каналов, где влияние такой модуляции устраняется за счет усреднения.

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.

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. По сравнению с широко применяемыми в настоящее время усилителями EDFA Рамановские усилители значительно лучше по шумовым характеристикам и менее чувствительны к температурным колебаниям.

Перспективным направлением является также разработка и создание **гибридных волоконных усилителей**, состоящих из различных комбинаций, включающих распределенный рамановский усилитель и эрбиевый волоконный усилитель. Варианты схем гибридных усилителей приведены на рисунке.

На рисунке показаны четыре типа оптических систем гибридных усилителей.

В схемах типа 1 и 2 используются распределенные рамановские усилители (секции обычного связного волокна) и дискретные эрбиевые волоконные усилители.

Дискретный эрбиевый усилитель в схеме 1 представляет собой двухступенчатый эрбиевый усилитель с промежуточным устройством выравнивания коэффициента усиления по спектру (эквалайзером), а в схеме 2 применен одноступенчатый эрбиевый усилитель и общий внешний эквалайзер.

В схеме 3 используется двухступенчатый эрбиевый усилитель с промежуточным эквалайзером и рамановским усилителем, представляющий собой отрезок высокоапертурного волокна с легированной германием световедущей жилой.

Четвертый вариант схемы содержит дискретные эрбиевый и рамановский усилители и внешний эквалайзер.

Схема 1 **Распределённый усилитель**

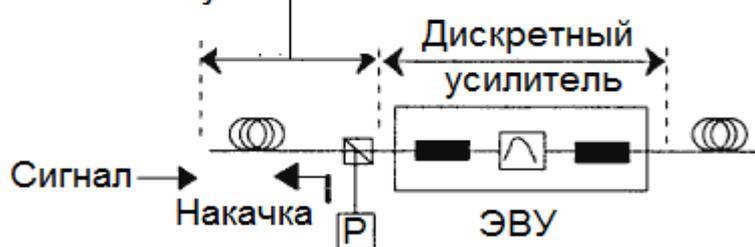


Схема 2

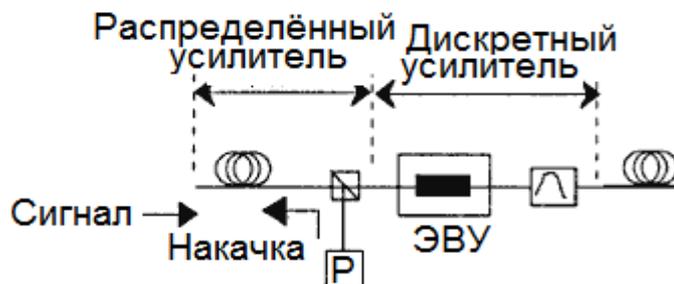


Схема 3

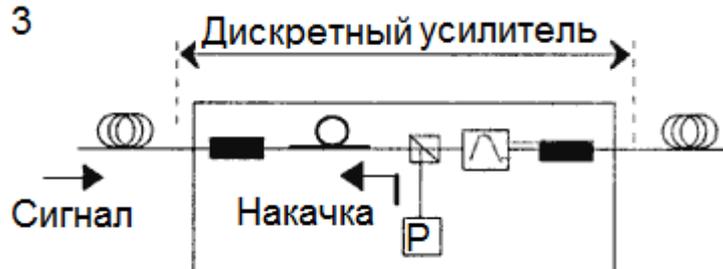
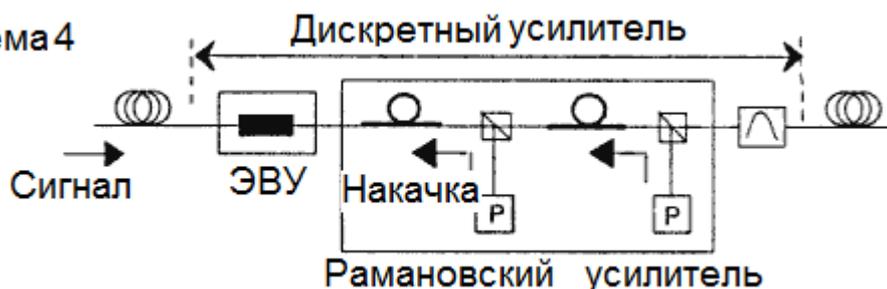


Схема 4



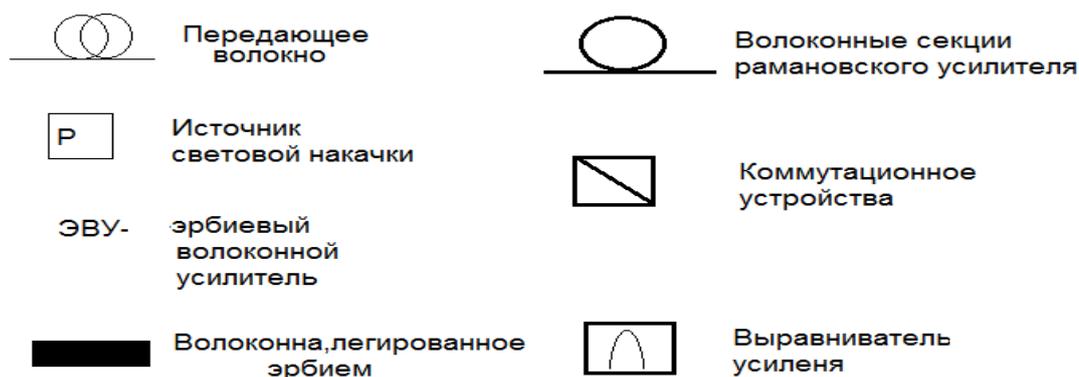


Рис 3.1 Схемы гибридных усилителей.

Поскольку любой усилитель с шириной полосы, меньшей чем разнесение каналов, можно использовать в качестве оптического фильтра и это делает его пригодным для выделения нужных каналов вещания на промежуточных станциях. Настройка достигается изменением длины волны, соответствующей пику усиления. Стимулированное рассеяние Бриллюэна (SBS) можно использовать для выборочного усиления канала, так как полоса усиления относительно мала (~100 МГц). Возможна реализация усилителя Бриллюэна в качестве оптического фильтра для многоканальной системы. Для выделения в пунктах по одному каналу в каждом достаточно установить усилитель Бриллюэна и настроить его на выделение требуемого канала. Здесь отсутствует промежуточное преобразование оптика -электроника - оптика, что позволяет уменьшать накопление ошибок. Узкий диапазон частот усилителей Бриллюэна может быть использован в когерентных системах передачи по оптическому волокну. Основная идея -усилить оптическую несущую отдельно, оставляя боковые полосы модуляции неусиленными; усиленная несущая действует как местный генератор, фаза которого автоматически соответствует фазе, передаваемой несущей. Усилители Бриллюэна идеально подходят для этой цели, поскольку имеют узкий диапазон частот.

Приведём пример реализации линии ВОСП с применением SDH-WDM платформы ONS-15464 компании Cisco, оборудования DWDM (активное и пассивное) в том числе оптические усилители EDFA марки EAU-100 и EAU-10P компании ИРЭ-ПОЛЮС . Реализация представлена в трёх вариантах (рис.1) :

а) Линия использует систему ONS-15464 компании Cisco без усилителей; максимально реализуемая длина пролёта равна 90 км.

б) К системе ONS-15464 добавляется выходной ОУ (бустер) типа EAU-100 максимальная длина пролёта при этом увеличивается до 150 км.

в) К системе ONS-15464 добавляется выходной ОУ и входной ОУ типа EAU-10P на дальнем конце звена связи. Максимальная длина пролёта при этом увеличивается до 250 км.

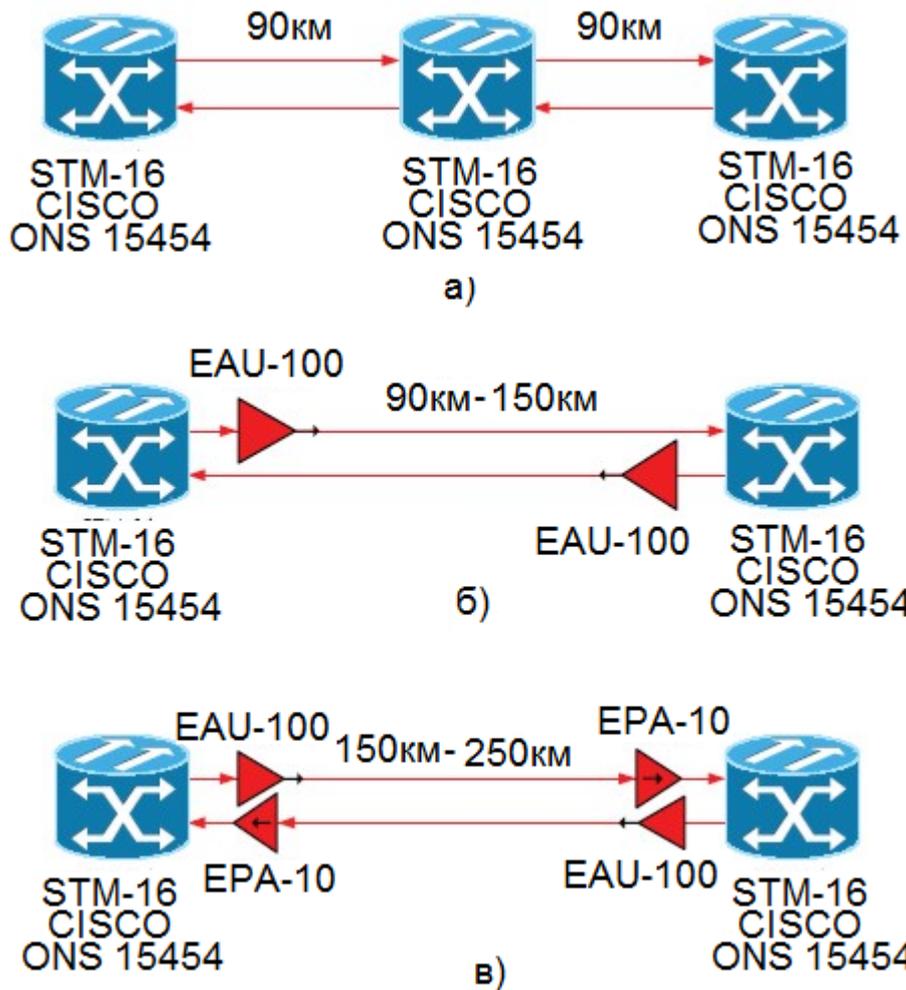


Рис. 3.2. Варианты реализации линии передачи с использованием оптических усилителей.

Дополнительное использование Рамановских усилителей со встречной (противонаправленной) накачкой (рис.3.3) позволяет расширить длину пролёта до 300 км.



Рис 3.3. Однопролётная схема передачи с усилителями накачки и предусилителями.

Наилучший эффект для усиления сигнала в ВОЛС достигается при работе усилителей EDFA и RA в паре (один на ближнем (EDFA) другой на дальнем (RA) концах).

Последовательно соединяя несколько линейных усилителей (ЛОУ) или несколько усилительных пролётов можно передать сигнал на расстояние более 1000-1500 км без регенерации. (рис.3.4)

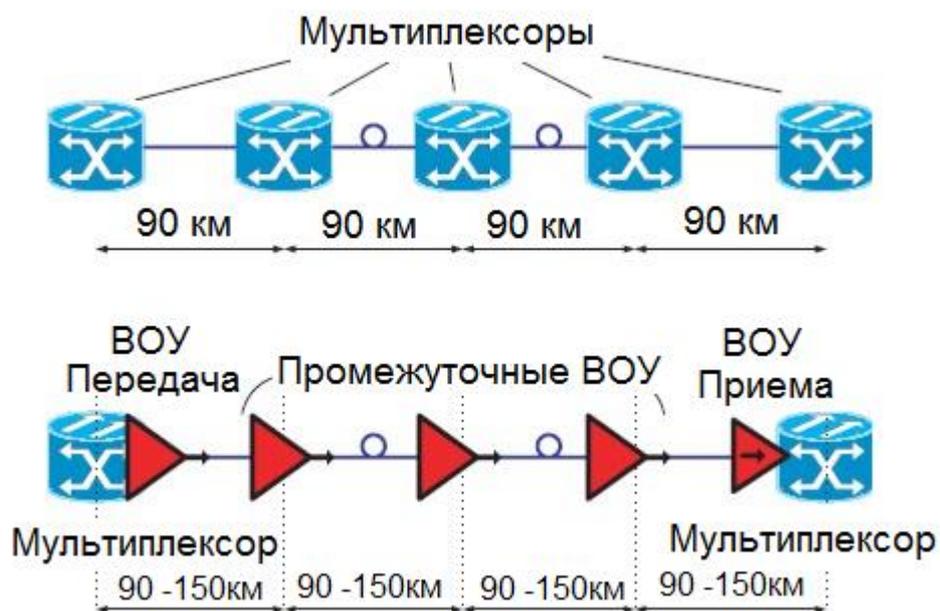


Рис. 3.4 Использование пословательного включения оптических усилителей.

Представлены параметры применяемых оптических усилителей серии EAU-х компании ИРЭ-ПОЛЮС.

Таблица 3.2

	EAU- 10P EPA-10	EAU-100- C2-W	EAU-200- W	EAU- 200-W	EAU-500- W	EAU-1-W	EAU-2-W
Максимальная выходная мощность, дБм	10	20	23	23	27	30	33
Номинальный коэффициент усиления, дБ	-	-	19-33	18-26	24-30	27-33	30-36
Уровень шума, типовой, дБ	<5.5	<5.5	<5.5	<5.0	<5.0	<5.0	<5.5
Неравномерность АВХ, дБ	±1.0	±1.0	±0.5	±0.4	±0.4	±0.4	±0.4
Диапазон изменения входного сигнала, дБм	-38	-6	-10...+4	-	-	-	-
Диапазон рабочих длин волн: полоса С, нм	1535-1585			1529-1564			
Диапазон рабочих длин волн: полоса Ц, нм	-			1570-1605			
Поляризационная зависимость усиления, дБ	0.3			0.3			
Поляризационная модовая дисперсия, пс	0.9			0.4			
Оптическая изоляция входа/выхода, дБ	35			35			

Возвратные потери на входе/выходе, дБ	45	45
Уровень остаточного сигнала накачки, дБ	-	-35
Диапазон рабочих температур, °С	-10...+50	-10...+70

При этом параметры усилителей можно изменять: максимальную выходную мощность и номинальный коэффициент усиления – настроить, диапазон рабочих длин волн – сдвинуть влево/ вправо для обеспечения нужной полосы пропускания в соответствии со стандартной сеткой волнового плана ITU-T, а диапазон рабочих температур – расширить по желанию пользователя.

Дополнительно усилители могут снабжаться микропроцессорными печатными платами, выполняющие следующие функции: AGC (автоматическая регулировка усиления), APC (автоматический контроль поляризации), ACC (автоматическая регулировка несущей), OSC (оптического канала супервизорного управления).

Использование ОУ позволяет реализовать следующие преимущества:

- увеличение длины пролёта до 250-300 км,
- экономия при обслуживании линии ВОЛС в целом,
- более простую конфигурацию сети (ниже ценв, выше надёжность, проще эксплуатация)
- ОУ прозрачен для используемых протоколов и скоростей передачи и может усиливать входной сигнал практически любого формата.
- Возможность одновременного усиления ряда каналов / несущих DWDMлежащих внутри полосы пропускания ОУ.

Модернизация действующей сети с помощью ОУ значительно снижает затраты на закупку оборудования и на эксплуатацию сети, так как позволяет в 2-3 раза уменьшить число регенераторов SDH / WDM. Такое уменьшение затрат приводит к окупаемости средств, вложенных в модернизацию, примерно за один год. В проектируемых сетях применение ОУ также позволяет снизить затраты на оборудование, так как цена ОУ в несколько раз меньше цены регенератора.

Выводы по первой главе магистерской диссертации

1. Проведён обзор литературы по особенностям функционирования ВОСП.
2. На основе анализа физических процессов, протекающих в оптическом волокне (процессов затухания и дисперсии оптического сигнала) рассмотрены пути преодоления проблем расстояния и скорости передачи с использованием оптических усилителей.
3. Сформулированы цели и задачи магистерской диссертационной работы.

Выводы по второй главе магистерской диссертационной работы

1. Проведена классификация волоконных оптических усилителей по природе явлений, составляющих физическую основу их работы и по диапазону рабочей длины волны.
2. Исследованы особенности функционирования, характеристик и параметров различных типов волоконных оптических усилителей – примесных усилителей (EDFA усилителей, Рамановских усилителей, усилителей Бриллюэна-Мандельштамма).
3. Дана сравнительная характеристика различных типов волоконных оптических усилителей с точки зрения их применимости в ВОСП.

Выводы по третьей главе магистерской диссертации

1. Сравнение характеристик оптоволоконных усилителей приводит к следующим выводам:

- максимальную выходную мощность обеспечивают усилители EDFA и более подходят для применения в регионах с низкой температурой;
- по шумовым характеристикам наиболее приемлемым является усилитель ВКР (Рамана);
- усилитель Фабри – Перо на длине волны 1310 нм даёт хорошие выходные характеристики, в то время как эта длина волны для других типов усилителей неприемлема;

2. Изучение практики применения оптоволоконных усилителей показывает, что хороший практический и экономический эффект даёт комбинированное применение разнотипных усилителей (гибридные усилители), например EDFA – RA – EDFA.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведён обзор литературы по особенностям функционирования ВОСП.

2. На основе анализа физических процессов, протекающих в оптическом волокне (процессов затухания и дисперсии оптического сигнала) рассмотрены пути преодоления проблем расстояния и скорости передачи с использованием оптических усилителей.

3. Сформулированы цели и задачи магистерской диссертационной работы.

4. Проведена классификация волоконных оптических усилителей по природе явлений, составляющих физическую основу их работы и по диапазону рабочей длины волны.

5. Исследованы особенности функционирования, характеристик и параметров различных типов волоконных оптических усилителей – примесных усилителей (EDFA усилителей, Рамановских усилителей, усилителей Бриллюэна-Мандельштамма).

6. Дана сравнительная характеристика различных типов волоконных оптических усилителей с точки зрения их применимости в ВОСП.

7. Сравнение характеристик оптоволоконных усилителей приводит к следующим выводам:

- максимальную выходную мощность обеспечивают усилители EDFA и более подходят для применения в регионах с низкой температурой;

- по шумовым характеристикам наиболее приемлемым является усилитель ВКР (Рамана);

- усилитель Фабри – Перо на длине волны 1310 нм даёт хорошие выходные характеристики, в то время как эта длина волны для других типов усилителей неприемлема;

8. Изучение практики применения оптоволоконных усилителей показывает, что хороший практический и экономический эффект даёт комбинированное применение разнотипных усилителей (гибридные усилители) , например EDFA – RA – EDFA.

Список использованной литературы

1. Гауэр Дж. Оптические системы связи. – М.: Радио и связь, 1989.- 504с.
2. Волоконно-оптические системы передачи и кабели. Справочник / Гроднев И.И., Мурадян А.Г., Шарафутдинов Р.М. и др. –М.: Радио и связь, 1993.-264с.
3. Б.В. Скворцов, В.И. Иванов, В.В. Крухмалев и др.; Под ред. В.И. Иванова/ Оптические системы передачи: Учебник для ВУЗов. – М.: Радио и связь, 1994. – 224с.
4. Стерлинг Д. Дж. Техническое руководство по волоконной оптике. - М.: ЛОРИ, 1998.
5. Убайдуллаев Р.Р. Волоконно-оптические сети.-М.: ЭкоТрендз, 1998.
6. Иванов А.Б. Волоконная оптика: компоненты, системы передачи, измерения.-М.: САЙРУС СИСТЕМС, 1999.
7. Слепов Н. Н. Современные технологии цифровых оптоволоконных сетей связи. – М.: Радио и Связь, 2000. -468 с.
8. Складов О. К. Современные волоконно-оптические системы передачи, аппаратура и элементы. – М.: СОЛОН-Р, 2001. – 237 с.
9. Гринфилд Д. Оптические сети. – К.: ООО «ТИД «ДС», 2002. – 256 с.
10. Листвин А. В., Листвин В. Н., Швырков Д. В. Оптические волокна для линий связи. – М.: ЛЕСАРарт, 2003. – 288 с.
11. Н.Слепов. Современные технологии цифровых оптоволоконных систем связи. М.: Радио и связь, 2003, -468 с.
12. Слепов Н.Н. Параметры промышленных одномодовых оптических волокон // Вестник связи, 1999, №11.
13. Г.П.Агравал. Нелинейная волоконная оптика. – М., Мир, 1996.

14. В.Трещиков., Н.Слепов. Оптические усилители и системы мониторинга на магистральных сетях WDM. Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 7/ 2006.
- 15.Рекомендация G651 МСЭ-Т Оптические стыки для одноканальных систем с оптическими усилителями.
- 16.Рекомендация G652 МСЭ-Т Характеристики одномодовых волоконно-оптических кабелей.
- 17.Рекомендации ITU-TRec. G.707.
- 18.<http://optictelcom.ru>.