Курсова работа

по оптике

**на тему:**

**Волоконные световоды для связи**

**Содержание**

Вступление

1. Общие сведения

2. Волоконно-оптические системы связи со спектральным уплотнением каналов

2.1 Источники света

2.2 Оптические усилители

2.3 Волоконные световоды

3. Подводные волоконно-оптические системы связи

4. Новые типы одномодовых волоконних световодов для перспективних линий связи

5. Требования к волоконным световодам для линий связи

5.1 Принципы передачи информации в волоконных световодах

5.2 Основные виды волоконных световодов

5.2.1 Многомодовые волоконные световоды

Многомодовые ступенчатые волоконные световоды

Многомодовые градиентные волоконные световоды

5.2.2 Одномодовые волоконные световоды

6. Значение волоконных световодов для связи

Вывод

Используемая литература

**Вступление**

**волоконный световод хроматический дисперсия**

Мысль, что в будущем основной средой передачи данных станет волоконная оптика, давно уже стала привычной.

Рынок волоконной оптики находится на подъеме. Подъем этот связан как с бурным развитием телекоммуникаций, где волоконно-оптические кабели повсюду уверенно теснят медные кабели, так и с очередным повышением интереса к волоконной оптике в области решений для локальных сетей. Отрасль стоит на пороге очередного технологического скачка, в результате которого эти решения должны стать еще более доступными для заказчиков.

Волоконные световоды благодаря их специфическим свойствам приобрели широкого распространения в современных системах автоматического контроля и управления разнообразными объектами, процессами и производством.

**1. Общие сведения**

Волоконный световод представляет собой тонкую кварцевую нить (диаметром около 0,1 мм), по которой за счет полного внутреннего отражения может распространяться свет. Затухания света в волокне очень малы (0,1-1,0 дБ/км) и, поэтому, волоконные световоды активно используются для передачи оптических сигналов на большие расстояния и в широкой полосе частот. Оптический сигнал, распространяясь по кварцевому волоконному световоду, не подвержен электромагнитным наводкам. Это свойство было использовано для создания пассивных волоконно-оптических датчиков, когда интенсивность света, распространяющегося по волоконному световоду, изменяется пропорционально измеряемой величине (температуре, давлению, и т.д.). Однако такой аналоговый оптический сигнал подвержен сильным искажениям из-за дрейфов мощности излучения лазера и случайным затуханиям интенсивности света при изгибах волокна. По этой причине возникла идея использовать частоту в качестве информационного параметра. В этом случае измеряемый параметр изменяет частоту модуляции света, а не его амплитуду и, поэтому, такой сигнал не чувствителен к долговременным дрейфам и кратковременным флуктуациям интенсивности света в волокне.

В качестве преобразователя давления, ускорения, силы и т.д в частоту модуляции света используют механические микрорезонаторы. Чаще всего в качестве микрорезонатора используют микромостик, вытравленный в пластине из кремния и закрепленный с двух сторон. Измеряемое воздействие изменяет механическое напряжение внутри микрорезонатора и, следовательно, резонансную частоту его изгибных колебаний.

Колебания микрорезонатора регистрируются при помощи волоконно-оптического интерферометра, образованного частично отражающей поверхностью микрорезонатора и торцом волоконного световода. При колебаниях микрорезонатора меняется отражающая способность интерферометра и, поэтому, свет, отражённый обратно в волоконный световод, будет промодулирован на частоте колебаний микрорезонатора. По изменению частоты модуляции света, мы можем судить о значении измеряемой величины.

Возбуждение механических колебаний микрорезонатора осуществляется пульсирующим светом из волоконного световода. Микромостик покрыт слоем металла и, поэтому, когда его центральная часть нагревается оптическим излучением из волокна, микромостик изгибается. Колебания микрорезонатора могут возникнуть, если промодулировать свет с частотой, равной примерно частоте собственных колебаний микрорезонатора. Чтобы сигнал интерферометра не накладывался на возбуждающий оптический сигнал, их разносят по длинам волн излучения.

**2. Волоконно-оптические системы святи со спектральным уплотнением каналов**

Принцип работы таких систем виден на рис. 1. Излучение различных длин волн (в настоящее время, как правило, от независимых источников света), несущее для каждой из них свою информацию, вводится в один волоконный световод с помощью специального устройства - мультиплексора, усиливается оптическим усилителем и распространяется по волоконной линии связи. На выходе линии связи после оптического усилителя излучение разделяется по длинам волн с помощью демультиплексора.

Рис. 1. Принципиальная схема волоконно-оптической системы связи со спектральным уплотнением каналов

Остановимся коротко на некоторых параметрах этих систем. Полная скорость передачи информации:

В = Nb,

где **N** - число спектральных каналов; **b** - скорость передачи информации по одному каналу. В настоящее время величины **b** = 2.5; 5; 10; 20; 40 Гбит/с. Ведутся успешные работы по увеличению скорости передачи информации одного спектрального канала до 160 Гбит/с, при этом используется оптическое временное уплотнение информации. Число спектральных каналов достигает 100 и более. Полоса усиления современных оптических усилителей - 30-80 нм, она является одним из главных ограничений числа передаваемых каналов и полной скорости передачи информации. Что касается разности длин волн (частот) соседних каналов (нм), то в настоящее время эта величина находится, как правило, в диапазоне 0.2 (25 Ггц) - 0.75 (100 Ггц).

Терабитные скорости в системах со спектральным уплотнением каналов предъявляют вполне определенные требования к элементам таких систем, в первую очередь к источникам света, оптическим усилителям и волоконным световодам, используемым в настоящее время.

**2.1 Источники света**

Широкое распространение получили полупроводниковые лазеры с распределенной обратной связью, однако у них есть существенный недостаток - чувствительность длины волны излучения к изменению температуры. Разность длин волн соседних спектральных каналов составляет долю нанометра, поэтому в случае использования полупроводниковых лазеров необходимо осуществлять их термостабилизацию, что удорожает стоимость всей системы. Точность фиксации длины волны источников света должна быть не хуже 0.05 нм. От подобного недостатка свободны волоконные лазеры, в частности эрбиевые, генерирующие излучение в спектральной области 1.53-1.62 мкм. Они накачиваются лазерными диодами и представляют собой эффективный и стабильный источник света для систем со спектральным уплотнением каналов. Еще одним перспективным источником является суперконтинуум, генерируемый в волоконных световодах посредством ряда нелинейных эффектов при возбуждении достаточно мощными фемтосекундными импульсами. Использование оптических фильтров позволяет получить необходимое количество источников света, отличающихся длинами волн на заданную величину.

**2.2 Оптические усилители**

В настоящее время применяются три их типа: полупроводниковые, эрбиевые волоконные и рамановские волоконные усилители. Первые из упомянутых пока не используются в системах со спектральным уплотнением каналов в силу их быстрой динамики усиления, приводящей к перекрестным помехам между различными спектральными каналами. Широко распространены эрбиевые волоконные усилители, полная спектральная полоса усиления которых составляет около 80 нм (**С** и **L** полосы усиления).

Кроме ширины полосы усиления важна плоскостность его спектральной характеристики. Это связано с тем, что во всех спектральных каналах должно быть одинаковое усиление. Как правило, ни один из усилителей не имеет плоской спектральной характеристики усиления, поэтому выравнивание спектра усиления осуществляется оптическими фильтрами различных типов.

Рамановские усилители перспективны в силу следующих принципиальных преимуществ:

- они могут усиливать на любой длине волны;

- в качестве их активной среды может использоваться сам волоконный световод;

- спектр их усиления зависит от спектра накачки, поэтому подбором источников накачки можно формировать очень широкую (более 100 нм) полосу усиления;

- низкий уровень шумов.

Основной же их недостаток - не очень высокая эффективность, приводящая к необходимости использовать довольно мощную непрерывную накачку (~1 Вт), чтобы получать усиление около 30 дБ (типичная величина для систем оптической связи). Только в последнее время разработаны высокоэффективные рамановские волоконные лазеры, работающие практически на любой длине волны в диапазоне 1.2-1.5 мкм, а также усилитель этого типа, использующий специальные волоконные световоды с большим содержанием германия и низкими оптическими потерями. Появилась возможность использовать гибридный усилитель, состоящий из распределенного рамановского и эрбиевого волоконного. С его помощью X.Масуда с соавторами получил полосу усиления свыше 80 нм (их результаты были представлены на конференции в Сан-Хосе в 1998 г.) Кроме того, этот гибридный усилитель обеспечивает лучшие шумовые характеристики.

**2.3 Волоконные световоды**

Использование спектрального уплотнения каналов делает неизбежными жесткие требования к свойствам волоконных световодов, прежде всего к дисперсии и эффективной площади моды. Это связано с тем, что в данном случае значительно увеличивается суммарная мощность всех сигналов и в световоде происходят нелинейные явления, прежде всего 4-волновое смешение, вызывающее перекрестные помехи. Если в волоконный световод вводятся **N** длин волн, то за счет 4-волнового смешения появляются **N2(N - 1)/2** новых длин волн. Если же в области вводимых длин волн дисперсия световода близка к нулю, то выполняется условие фазового синхронизма и процесс идет очень эффективно.

На рис. 2 показана роль дисперсии в этом процессе. В волоконные световоды с дисперсией **D** = 0 и **D** = 2.5 пс/нм • км вводится излучение четырех спектральных каналов мощностью 2 мВт в каждом. На выходе световода длиной 50 км (чем длиннее световод, тем выше эффективность нелинейных процессов) с ненулевой дисперсией дополнительные длины волн не наблюдаются (вследствие 4-волнового смешения). В световоде же с нулевой дисперсией длиной 25 км эффективно идет 4-волновое смешение и ясно видны более 20 дополнительных длин волн.

Рис. 2. Спектр излучения на выходе волоконных световодов с различной величиной дисперсии при возбуждении световодов излучением четырех спектральных каналов вблизи длины волны 1546 нм.

Отсюда вытекает требование к волоконным световодам для систем со спектральным уплотнением каналов - отличная от нуля (но не очень большая) дисперсия на длинах волн несущего излучения, при этом изменение величины дисперсии в зависимости от длины волны должно быть минимально (для систем связи с одним спектральным каналом требовались световоды с нулевой дисперсией для увеличения скорости передачи информации, и такие световоды были разработаны: за счет структуры световода нуль дисперсии смещался от длины волны -1.3 мкм к длине волны 1.55 мкм). В результате для систем со спектральным уплотнением каналов разработаны специальные световоды - с ненулевой смещенной дисперсией. Другой путь снижения роли нелинейности - это увеличение диаметра сердцевины одномодового световода, точнее говоря, увеличение эффективной площади моды **Аэф**. В этом случае плотность мощности излучения сигналов уменьшается, приводя к существенному ослаблению нелинейных явлений. Такие одномодовые волоконные световоды с **Аэф** > 80 мкм2 разработаны и используются в экспериментальных системах со спектральным уплотнением каналов.

Однако в силу специфической структуры таких световодов распределение поля моды в них отличается от гауссова (большие градиенты в распределении интенсивности света), что приводит к более сильному акустическому отклику, вызванному электрострикцией. Известно, что большие радиальные градиенты интенсивности света оптических импульсов в одномодовых волоконных световодах приводят к электрострикционному возбуждению поперечных акустических волн в волоконном световоде. Это, в свою очередь, становится причиной временного возмущения эффективного показателя преломления, взаимодействия оптических импульсов и в конце концов ведет к ограничению скорости передаваемой информации.

Подводя итоги, можно сказать, что при создании систем связи со скоростью передачи информации >1 Тбит/с применяются всевозможные подходы, характеризующиеся использованием различного числа спектральных каналов и выбором информационной емкости индивидуальных каналов типа оптического усилителя и источника света. Это свидетельствует о надежности элементной базы и огромных потенциальных возможностях волоконно-оптических систем связи со спектральным уплотнением каналов.

**3. Подводные волоконно-оптические системы связи**

В настоящее время обмен информацией между континентами осуществляется главным образом через подводные волоконно-оптические кабели, а не через спутниковую связь. Интернет - главная движущая сила развития подводных волоконно-оптических линий связи, при этом его потребности в подобных системах со все большими скоростями передачи информации пока не удовлетворены.

Подводные кабели связи существуют уже без малого 150 лет. В 1851 г. инженер по фамилии Брет проложил первый подводный кабель через Ла-Манш, соединив таким образом телеграфной связью Англию с континентальной Европой. Это стало возможным благодаря изобретению гуттаперчи - вещества, способного изолировать в воде провода, несущие ток. В 1857-1858 гг. американский бизнесмен Сайрус Филд разработал фантастический проект сообщения Европы с Северной Америкой с помощью телеграфного кабеля и осуществил его прокладку по дну Атлантического океана. Несмотря на огромные технические и финансовые трудности, после ряда неудач телеграфная линия с 1866 г. начала устойчиво работать. Интересно отметить, что скорость передачи информации составляла всего 17 слов в минуту. Но значение этого достижения заключалось в другом: была продемонстрирована техническая возможность прокладки кабеля по дну океана, что было совсем не очевидным в то время. И это в большой степени предопределило последующие успешные работы в данном направлении. В 1956 г. был проложен первый телефонный коаксиальный кабель, а в последующие годы - еще несколько, с большей пропускной емкостью, чтобы удовлетворить потребности в передаче информации между Старым и Новым светом.

Наконец, в 1988 и 1989 гг. были установлены первые трансатлантическая и транстихоокеанская волоконно-оптические системы со скоростью передачи информации по паре световодов 280 Мбит/с, при этом в качестве ретрансляторов использовались электронные усилители. Постепенно скорость увеличилась до 2.5 Гбит/с, а вместо электронных ретрансляторов стали применяться эрбиевые волоконные усилители. В 90-е годы проложено более 350 тыс. км волоконно-оптического кабеля, он связывает более 70 стран мира.

Рис. 3. Спектр оптических потерь волоконного световода

Есть ли пути для дальнейшего резкого увеличения информационной емкости волоконно-оптических систем связи? Есть. Существуют два подхода к решению этой проблемы: расширение спектральной области и увеличение скорости передачи информации индивидуального канала. На рис. 3 показан спектр оптических потерь волоконного световода на основе кварцевого стекла. Цифрами 1-5 обозначены так называемые "окна прозрачности", в которых осуществлялась оптическая связь по мере ее развития (1-3), а также спектральные области, которые будут использоваться для передачи информации в недалеком будущем (4,5). Практически все современные системы связи работают на волнах около 1.3 и 1.55 мкм, во 2-м и 3-м окнах прозрачности. Экспериментальные системы со спектральным уплотнением каналов используют в настоящее время спектральную область 1530-1610 нм (шириной около 80 нм). Пунктиром показано поглощение, обусловленное гидроксильными группами в стекле. Успехи в технологии волоконных световодов позволили убрать полосу такого поглощения, в результате спектральная область с оптическими потерями < 0.3 дБ/км составляет примерно 500 нм (1200-1700 нм). Использование всей этой области для передачи информации позволит резко увеличить информационную емкость волоконно-оптических систем со спектральным уплотнением каналов. Имея уже достигнутые величины 0.2 нм и 160 Гбит/с для разности длин волн соседних каналов и скорости передачи информации индивидуального канала, получаем число уплотненных каналов 2500 и суммарную скорость передачи информации 400 Тбит/с, или 0.4 петабит/с.

Учитывая исключительно быстрый прогресс в развитии волоконно-оптической связи, когда новые результаты превосходят все ожидания, можно с большой долей уверенности предположить, что использование спектральной области 1.2-1.7 мкм (или более широкой: 1.0-1.7 мкм) позволит в будущем получать скорости передачи информации ~1 петабит/с (1015 бит/с). Ясно, что для этого потребуются обширные фундаментальные исследования и разработка новой элементной базы, в частности, необходимы оптический усилитель с полосой усиления порядка нескольких сотен нано-метров и новые типы волоконных световодов.

**4. Нове типы одномодовых волоконних световодов для перспективних линий связи**

Данная глава посвящена вопросу создания новых типов одномодовых волоконных световодов (ОВС) для перспективных линий связи. Рассмотрены две новые структуры профиля показателя преломления (ППП) ОВС. Разработанные структуры ППП могут быть использованы в новейших волоконно-оптических системах.

Рост спроса в увеличении пропускной способности информационных линий связи приводит к неизбежному поиску новых решений для построения новейших волоконно-оптических линий связи (ВОЛС). К настоящему времени многие ведущие лаборатории мира занимаются вопросом создания ВОЛС со скоростью передачи на канал 40 Гбит/с (STM-256) и выше. В данной главе рассмотрены две принципиально новые структуры ППП, которые могут быть использованы в построении перспективных ВОЛС.

Хроматическая дисперсия является одной из важнейших параметров ОВС и ее необходимо учитывать при создании ВОЛС. Хроматическая дисперсия в волоконных световодах может быть представлена в виде двух основных компонент: материальной и волноводной. Материальная компонента хроматической дисперсии зависит, главным образом, от выбора матрицы стекла, из которого изготовлен данный волоконный световод. Волноводная компонента в свою очередь определяется радиальной зависимостью ППП данного световода. Следовательно, можно подобрать ППП таким образом, что в результате получим необходимую зависимость хроматической дисперсии в интересующем интервале длин волн. В данной работе выбор новых структур проводился на основе расчетов по решению скалярного волнового уравнения по заданному модельному профилю показателя преломления.

Компьютерное моделирование показало, что существует возможность создания ОВС с высоким процентным содержанием Ge в сердцевине (более 20 мол.%), имеющем нулевое значение хроматической дисперсии в области 1550 нм. Увеличение содержания Ge в сердцевине, уменьшение эффективной площади пятна моды и смещение нулевой длины волны хроматической дисперсии в область 1550 нм позволило увеличить чувствительность нового типа ОВС к нелинейным эффектам по сравнению с существующими сегодня германосиликатными ОВС.

Другим новым типом световодов является ОВС, который обладает плоской спектральной зависимостью дисперсии, причем плоская зависимость хроматической дисперсии сохраняется при изменении диаметра световода в процессе вытяжки. Данный тип ОВС может быть использован при создании новых источников излучения на основе эффекта генерации суперконтинуума. Следует отметить, что изготовление новых типов световодов, особенно ОВС с изменяющейся плоской дисперсией, представляет трудоемкий процесс, так как любые отклонения в ППП при изготовлении заготовки будущего световода приводят к изменению оптических характеристик, и первую очередь – к изменению дисперсионных характеристик.

**5. Требования к волоконным световодам для линий связи**

Все преимущества ВОЛС вытекают из физических принципов, на которых основана волоконно-оптическая технология. Передача информации по волоконным световодам имеет особенности, не присущие другим средствам коммуникации, потому целесообразно рассмотреть основные физические принципы функционирования одномодовых и многомодовых световодов.

**5.1 Принципы передачи информации в волоконных световодах**

Известно, что в разных средах луч света распространяется с разной скоростью: в стекле - быстро, в воздухе - быстрее, в вакууме - быстрее всего. Попадая на границу двух прозрачных сред, луч света частично отражается, частично преломляется. Угол отраженного луча равен углу падающего, а угол преломленного луча зависит от соотношения показателей преломления сред (отметим, что все углы измеряются от нормали к поверхности). Согласно закону Снеллиуса, произведения синуса угла падающего и преломленного луча на соответствующие показатели преломления сред равны.

Поставим теперь условие, чтобы преломленный луч не проникал во вторую среду, а двигался вдоль границы раздела. Так как при этом **g = 90°**, то нетрудно вычислить так называемый критический угол (рис.4):

**Sin αкр = n2/n1**

**n1** - показатель преломления сердцевины волокна

**n2** - показатель преломления оболочки волокна

Эта формула объясняет "эффект полного отражения", на котором основана вся волоконно-оптическая технология. Эффект состоит в том, что луч, попавший на границу двух сред (первая из которых должна иметь больший показатель преломления, чем вторая), под углом, большим критического, полностью отражается.

Рис. 4. Эффект полного отражения

Если же луч не просто попадает на границу двух сред, а проходит в цилиндрическом волоконном световоде (оптоволокне) между параллельными стенками, то при угле входа больше критического, он "навсегда" останется в световоде:

**NA** = **Sin φкр**

Величина **NA** - одна из главных характеристик оптоволокна, называемая числовой апертурой (NA, numeric aperture).

Здесь **φкр = 90° - αкр** представляет критический угол, измеряемый относительно оси световода.

Приведенную формулу апертуры удобно привести к другому виду:

**NA = √2n·Δn**

где **n** - среднее арифметическое показателей преломления сердцевины **nс** и оболочки **nоб**, а **Δn** = **nc** - **nоб** их разность.

Если на входе световода имеется изотропный источник, излучающий равную мощность во всех направлениях и при этом имеющий диаметр, меньший, чем диаметр световода, то доля мощности источника **K**, вводимой в световод, будет пропорциональна квадрату апертуры:

**K = (NA)2**

Значит, чем больше апертура, тем большая доля излучения источника попадает в световод и тем мощнее сигнал. На практике апертуру можно увеличить за счёт параметра **Δn**, используя, например, стеклянную сердцевину без оболочки. Но при этом возникают две проблемы. Во-первых, при полном внутреннем отражении часть световой волны проникает сквозь отражающую поверхность. Вторая проблема связана с возникновением мод.

Кроме перечисленных, есть ещё несколько параметров, которые определяют качество волоконно-оптических линий связи, а значит, и области их применения.

Затухание. Этот параметр определяет потери интенсивности светового сигнала в волоконном световоде и измеряется в обычных для линий связи единицах - дБ/км (децибел на километр). Затухание происходит, в основном, по двум причинам: из-за поглощения и рассеивания.

Поглощение связано с возбуждением в материале световода электронных переходов и резонансов. В результате этого увеличивается тепловая энергия, накапливаемая в оптическом волокне. Поглощение зависит как от свойств материала, из которого изготавливается оптоволокно, так и от длины волны источника света.

Рассеивание меньше зависит от свойств материала и, в основном, определяется нарушением геометрической формы оптического волокна. Следствием этих нарушений является то, что часть лучей покидает оптоволокно. Интенсивность рассеивания зависит не только от качества материала, из которого изготавливается сердцевина оптоволокна, но и от качества оболочки, так как часть сигнала, вопреки теории, распространяется в ней. Бороться с этим можно за счёт нанесения на оболочку поглощающего покрытия.

Подчеркнем, что затухание (поглощение) во многом зависит от длины волны светового сигнала. Причем экспериментально установлено три "окна", в которых поглощение заметно уменьшается - это 0,85 мкм, 1,3 мкм и 1,55 мкм (чем больше длина волны, тем меньше потери от затухания). Данные длины волн, относящиеся к инфракрасному диапазону, рекомендованы МКТТТ для использования (и используются) в волоконно-оптических линиях связи. Если в первых волоконно-оптических линиях связи использовались источники с длиной волны 0,85 мкм, то сейчас на этой длине работают только небольшие волоконно-оптические сети. В магистральных ВОЛС сейчас используются лазеры с длиной волны излучения 1,55 мкм.

**5.2 Основные виды волоконных световодов**

Рассмотрим, как световой сигнал распространяется в световоде. Из-за многократного отражения луча от стенок световода, световой импульс, пройдя по оптоволокну, трансформируется в серию мод. При этом в конечную точку могут прийти лучи, которые вошли в световод в один и тот же момент времени, но под разным углом. Как следствие, эти лучи (моды) проходят разные расстояния и "появляются на приемном конце" не одновременно. Это явление получило название межмодовой дисперсии. Чем больше длина оптоволокна, тем больше будет разброс по времени прибытия, тем меньше будет полоса пропускания.

В приближении геометрической оптики точечный излучатель у одного из торцов оптоволокна может быть трансформирован в решетку синфазных излучателей, находящихся друг от друга на расстоянии, равном диаметру оптоволокна. Диаграмма направленности каждого из излучателей ограничена углами полного внутреннего отражения, и, в зависимости от расстояния между ними (или диаметра оптоволокна), набег разности фаз между излучателями может быть достигнут только в одном направлении (случай одномодового волокна) или сразу в нескольких (многомодовое волокно). В указанных направлениях излучения от излучателей будут складываться синфазно, образуя распространяющиеся волны или, иначе говоря, моды. Ясно, что для того, чтобы достичь другого торца волновода, разным модам придется пройти разное расстояние. В зависимости от способа борьбы с межмодовой дисперсией все оптические волокна можно разделить на несколько подвидов:

- многомодовые ступенчатые

- многомодовые градиентные

- одномодовые.

**5.2.1 Многомодовые волоконные световоды**

В случае многомодового волокна диаметр сердечника (50…1000 мкм) по сравнению с длиной световой волны (1300 нм) относительно большой. Свет может распространяться в волокне в различных направлениях или модах, что и определяет название многомодовых световодов.

**Многомодовые ступенчатые волоконные световоды**

В волокне с шаговым индексом коэффициент преломления (возможность материала отражать свет) постоянен по всему сечению сердечника. Это приводит к тому, что лучи света, распространяются в нем, так как показано на рис. 5.

Рис. 5. Распространение излучения в ступенчатом многомодовом волоконном световоде (1 – входной импульс; 2 – дисперсия; 3 – выходной области; 4 – коэффициент преломления; 5 – мода высокого порядка; 6 – мода низкого порядка).

В многомодовом волокне лучи света, соответствующие различным модам, проходят различные дистанции. Если в такое волокно ввести короткий импульс света, то его лучи прибудут на противоположный конец через различные промежутки времени, и выходной импульс будет шире, чем входной. Это явление называют модовой дисперсией. Она ограничивает число импульсов в секунду, которые могут быть переданы через волокно и все ещё распознающихся на противоположном торце, как отдельные импульсы. По этой причине пропускная способность волокна с шаговым индексом невелика и составляет 20…30 МГц для кабеля длиной 1 км. Ступенчатые волокна вследствие их дешевизны наиболее привлекательны для использования в локальных сетях и даже в домашнем быту.

**Многомодовые градиентные волоконные световоды**

За счёт сложного легирования оптоволокна можно добиться плавного уменьшения показателя преломления от центра к оболочке волокна. Тогда моды, хотя и будут по-прежнему проходить разные пути, но делать это за одинаковое время. Погонная полоса пропускания по сравнению со ступенчатым волокном заметно увеличивается, до 100…1000 МГц/км.

Показатель преломления градиентных волокон обычно имеет параболический профиль, который получают, вводя в однородную стеклянную нить специальные добавки. В результате, при прочих равных условиях, число распространяющихся мод уменьшается примерно в два раза в сравнении со ступенчатым волноводом.

Волоконно-оптические линии связи на многомодовом волокне обладают интересным свойством: полоса пропускания линейно зависит от длины кабеля, поэтому её измеряют не в абсолютных, а в удельных показателях, обычно в МГц·км. Так, волоконно-оптический кабель с характеристикой 100 МГц·км при длине 100 м будет иметь полосу пропускания 1 ГГц. Понять причину этого свойства нетрудно, рассмотрев, какое расстояние пройдет луч (мода) в зависимости от угла входа в световод (рис.6).

Рис. 6. Распространение излучения в градиентном многомодовом волоконном световоде (1 – входной импульс; 2 – дисперсия; 3 – выходной области; 4 – коэффициент преломления)

Пусть в момент **t = 0** на входе оптического волокна подается световой импульс. Его лучи будут распространяться в разных направлениях. Заданное расстояние **L** быстрее всех пройдет луч, идущий вдоль оси (**φ=0**). Последним придет луч, вошедший под критическим углом (**φ = φкр**). Величина запаздывания между ними определяется как

**ΔT = (n1/n2)(L/c)Δn**

где **с** - скорость света в оптоволокне.

Лучи, вошедшие в волновод под углом 0 < **φ φкр**, придут с запаздыванием в интервале 0... **ΔТ**. Таким образом, следующий импульс не может быть принят, пока не "утихнут" моды предыдущего. Удельная пропускная способность (от нее можно перейти к полосе пропускания) может быть вычислена так:

**ΔT/L = (n1/n2)(Δn/c)**

Эта формула не является точной, так как основана на предположении об идеальности источника света, световода и фотоприёмника. С её помощью можно давать только приблизительные оценки пропускной способности. Например, при **Δn** = 1% (реальное ступенчатое оптоволокно) пропускная способность составит **ΔT/L** = 3,3·10-8 мкс/км (или погонная полоса пропускания 300 МГц·км).

Для многомодового волокна с последовательным индексом коэффициент преломления плавно (последовательно) изменяется от максимума в самом центре до минимума по краям. Такая конструкция использует тот факт, что свет распространяется быстрее в материалах с низким коэффициентом преломления, чем в материалах с высоким коэффициентом. Поэтому световой импульс, распространяясь в таком волокне, имеет гораздо меньшую модовую дисперсию, а кабель за счёт этого - гораздо большую погонную полосу пропускания от 100 МГц·км до 1300 МГц·км. Наиболее популярный тип многомодового волокна, используемого в локальных компьютерных сетях, обычно обозначается как MM 62.5/125. Здесь ММ означает MultiMode или многомодовое волокно с диаметром сердечника 62,5 мкм и диаметром оболочки 125 мкм.

Из-за сложного процесса изготовления, градиентное оптическое волокно относительно дорого (даже дороже, чем одномодовое волокно), но зато пассивные элементы для него - не такие дорогие, как для одномодового волокна. Многомодовые градиентные волокна используются в небольших и средних телекоммуникационных системах, например, в локальных сетях.

**5.2.2 Одномодовые волоконные световоды**

Количество мод в существенной степени зависит от диаметра волокна. Так что если диаметр волокна окажется сравнимым с используемой длиной волны, то по волокну будет распространяться только одна мода (рис.7).

Рис. 7. Одномодовый волоконный световод

Для точного вычисления максимального диаметра одномодового волокна можно воспользоваться формулой, которая определяет условие одномодовости:

где **nс**, **nоб** - показатели преломления сердцевины и оболочки;

**λ** - длина волны светового сигнала;

**D** - диаметр волокна.

В частности, для **λ** = 0,85 мкм, **n** = 1,46 и **Δn** = 0,002 одномодовое волокно должно иметь диаметр 8,5 мкм.

Из условия одномодовости вытекает важное следствие: оптоволокно некоторого малого диаметра при одной длине волны источника света будет одномодовым, а при другой - многомодовым.

Для волоконно-оптических линий с одномодовым волокном, где межмодовая дисперсия отсутствует, строгой линейной зависимости полосы пропускания от длины линии нет. Поэтому полоса пропускания этих линий измеряется в абсолютных, а не в удельных величинах.

Свою лепту в уменьшение пропускной способности вносит не только межмодовая дисперсия, но и так называемая хроматическая дисперсия (или дисперсия материала). Дело в том, что показатель преломления (скорость распространения света) зависит и от длины волны. Так как источники света (особенно светодиоды) испускают излучение в некотором диапазоне длин волн, то разность скоростей распространения создает дополнительное размывание светового импульса на приёмном торце.

Полоса пропускания одномодового волокна составляет около 30 ТГц, что на несколько порядков больше, чем у первых двух видов, и мало зависит от длины. В магистральных линиях, вследствие ограничений по частоте, вносимых оптическими усилителями, она ограничена 3 ТГц. Для одномодового волокна диаметр сердечника составляет 8 мкм, что гораздо ближе к обычно используемой длине волны 1300 нм. Это позволяет передавать свет одной нулевой модой и полностью устранить эффект модовой дисперсии, о котором шла речь выше. Однако дисперсия присутствует и называется частотной, она связана с тем, что свет с разной длиной волн (разного цвета) распространяется в волокне с различной скоростью. Таким образом, пропускная способность такого кабеля хотя и увеличивается, но остается ограниченной ~ 100 ГГц и в достаточно сильной степени зависит от спектральной чистоты источника света. Хотя такое волокно и позволяет передавать данные на гораздо большие расстояния - десятки километров, одномодовые системы достаточно дороги, потому что в качестве источника света в них используют сравнительно дорогие лазеры с очень узким спектральным составом излучаемого света. Наиболее популярный тип одномодового волокна обычно обозначается как SM 8/125. Здесь SM означает SingleMode или одномодовое волокно с диаметром сердечника 8 мкм и диаметром оболочки 125 мкм.

Сегодня одномодовые волокна, используемые в российских линиях, имеют затухание всего 0,22 дБ/км (оптическое волокно Sumitomo имеет затухание 0,154 дБ/км), а в лабораториях США получено так называемое фтороцирконатное волокно с ещё меньшим затуханием - всего 0,02 дБ/км.

Одномодовые волокна, благодаря широкой полосе пропускания, находят применение в крупных информационных магистралях. Характеристики одномодовых волокон таковы, что можно смело утверждать, что в будущем они будет играть доминирующую роль. Вдобавок, как показывает опыт, высокотехнологический продукт быстро падает в цене, как только его начинают производить в больших масштабах.

**6. Значение волоконных световодов для связи**

Мир вступает в третье тысячелетие и одновременно в информационную эпоху, или тера-эру. Последнее название отражает достигнутый недавно уровень скоростей передачи и обработки информации - 1012 (тера) бит/с и 1012 операций в секунду соответственно. Информационная эра характеризуется, с одной стороны, непрерывно растущими потребностями мирового сообщества в обмене информацией, а с другой - технической возможностью практически полностью удовлетворить их.

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

В этом же ряду - развитие радио- и волоконно-оптической связи. Последние конференции по волоконно-оптической связи - в 1999 г. в Сан-Диего (США) и в Ницце (Франция), а в марте этого года в Балтиморе (США) - продемонстрировали небывало бурное её развитие и выдающиеся результаты в увеличении скорости передачи информации по волоконному световоду.

Достижения в области источников света, оптических усилителей, волоконных световодов и других элементов систем со спектральным уплотнением каналов позволили всем крупным телекоммуникационным фирмам разработать системы связи со скоростью передачи информации более 1 Тбит/с. Вот несколько результатов, которые дают представление об уровне работ в этой области:

- для фирмы Lucent Technology Т.Н.Нильсен с соавторами разработал систему из 40 каналов с общей скоростью передачи информации 1.6 Тбит/с. Источниками излучения служили 40 полупроводниковых лазеров с распределенной обратной связью, а оптическим усилителем - гибридный (рамановский + эрбиевый).

- французские исследователи С. Биго и другие (Alcatel Corporate Research Center) объединили в одном волоконном световоде 150 каналов, скорость передачи информации каждого из них -10 Гбит/с, а суммарная - 1.5 Тбит/с. Источники излучения - 150 полупроводниковых лазеров, оптическим усилителем служит специальный эрбиевый с полосой усиления 80 нм.

Рис. 8. Изменение относительной информационной емкости систем связи за последние 100 лет

Из рис. 1 видно, что за 90 лет информационная ёмкость линий связи возросла на пять порядков, начиная с первых телефонных линий, скорость передачи информации которых составляла 1 бит/с. Примерно такой же рост отмечен и за последние 20 лет - достигнута скорость порядка 1 Тбит/с. Масштабы развития волоконно-оптической связи действительно поразительны. Мировое производство волоконных световодов в настоящее время составляет 60 млн. км/год, то есть каждую минуту в системах связи прокладываются более 100 км волоконных световодов. Все материки связаны между собой подводными волоконно-оптическими кабелями связи, общая длина которых достаточна, чтобы обмотать земной шар шесть раз. Разработка широкополосных оптических усилителей привела к созданию в конце 90-х годов экспериментальных волоконно-оптических систем связи со спектральным уплотнением 100 и более каналов, что позволило достичь суммарной скорости передачи информации более 1 Тбит/с. Это было отмечено на европейской конференции по данной теме в сентябре 1999 г. в Ницце.

Нет никаких сомнений, что в ближайшие годы волоконно-оитические системы со скоростями передачи информации >1 Тбит/с найдут широкое коммерческое применение. Однако уже сейчас ясно, что и эти скорости не смогут удовлетворить наши растущие потребности. Ведь известно, что число пользователей Интернета постоянно растет: в 1998 г. их было около 25 млн. человек, в 1999 г. - 144 млн.; видимо, уже скоро эта цифра возрастет на порядок. В России число зарегистрированных пользователей Интернета в 1999 г. составило 2.5 млн. человек. Портативный персональный компьютер с выходом в сеть Интернет станет таким же необходимым и доступным инструментом для получения информации, развлечений и общения, как телевизор и телефон.

Мир вступил в информационную эру. Это означает, что уровень развития любой страны будет определяться прежде всего уровнем информатизации.

**Вывод**

Таким образом, волоконные световоды активно используются для передачи оптических сигналов на большие расстояния и в широкой полосе частот. Наибольшее применение волоконные световоды нашли в локальных компьютерных сетях (как в домашних, так и на производствах), кабельном телевидении, волоконно-оптических линиях связи.

Использование волоконных световодов позволит удовлетворить потребность в высокоскоростных линиях передачи данных, а также в обеспечении долговременного запаса прочности на будущее; стремление достигнуть максимальной защищенности от помех и от несанкционированного доступа извне.

Масштабы развития волоконно-оптической связи действительно поразительны. И новые результаты в скорости передачи информации с помощью волоконных световодов не заставят себя долго ждать.

**Используемая литература**

1.Волоконная оптика в измерительной и вычислительной технике/ А.Н.Казангапов, А.Л.Патлах, Р.Вильш, г.Швотцерг и др. – Алма-Ата: Наука, 1989.

2.Волоконно-оптические датчики/ [Т.Окоси, К.Окамото, М.Оцу и др.]; перевод с яп. Г.Н.Горбунова. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд.-ние, 1991.

3.Д.Дж.Стерлинг, младший. Техническое руководство по волоконной оптике. - М.: ЛОРИ, 1998.

4.Квєтний Р.Н. Математичні моделі розповсюдження хвиль у волоконних світловодах: Монографія/ Р.Н.Квєтний, Коцюбинський. – Вінниця: універсам, 2003.

5.Матвеев А.Н. Оптика [Учебн. Пособие для физ.спец. вузов]. – М.: Высшая школа, 1985.

6.Одномодовые волоконные световоды с модифицированной дисперсией / А.В. Белов, А.С. Курков, С.И. Мирошниченко, В.А. Семенов // Волоконная оптика. М.: Наука, 1993.

7.daily.sec.ru

8.library.mepti.ru

9.phys.onu.edu.ua

10.www.fasi.gov.ru

11.www.usu.ru