

Листвин А.В.
Листвин В.Н.
Швырков Д.В.

Оптические волокна для линий связи

Москва 2003

Аннотация

В книге рассмотрены вопросы ослабления и дисперсии света в оптических волокнах, применяемых при строительстве линий связи. Наибольшее внимание уделено физическим принципам и практическим применениям. Дано описание современных моделей одномодовых и многомодовых волокон и обсуждены проблемы их производства. Некоторые рассматриваемые в книге вопросы до сих пор освещались лишь в специальных журналах. Книга написана четким и понятным языком, содержит много иллюстраций и численных примеров. Предназначена для инженерно-технических работников, специализирующихся в волоконно-оптической связи. Может служить учебным пособием для студентов вузов.

Оглавление

Предисловие

Глава I. Оптические характеристики одномодовых волокон

§ 1. Введение

Раздел I. Типы оптических волокон

§ 2. Геометрические параметры оптических волокон

§ 3. Волокна со смещенной и несмещенной дисперсией

Раздел II. Оптические потери в одномодовых волокнах

§ 4. Спектр потерь в прямом волокне

§ 5. Окна прозрачности

§ 6. Механизмы возникновения потерь при изгибе волокна

§ 7. Спектр потерь в изогнутом волокне

§ 8. Эффективная длина волны отсечки

§ 9. Потери из-за разности диаметров модовых пятен

§ 10. Потери из-за смещения сердцевин волокон

Раздел III. Измерение потерь в волоконно оптических линиях связи

§ 11. Распределение потерь в линии связи

§ 12. Потери в сварных соединениях волокон

§ 13. Потери в оптических разъемах

§ 14. Погрешности при измерении потерь с помощью рефлектометра

§ 15. Погрешности при измерении потерь с помощью мультиметров

Раздел IV. Хроматическая дисперсия

§ 16. Понятие дисперсии в оптической связи

§ 17. Коэффициент наклона и длина волны нулевой дисперсии

§ 18. Материальная и волноводная дисперсии

Раздел V. Механизмы уширения и сжатия импульсов

§ 19. Чирпинг эффект из-за хроматической дисперсии

§ 20. Ширина спектра импульса с чирпингом

§ 21. Чирпинг эффект при прямой модуляции лазера

§ 22. Чирпинг эффект из-за фазовой самомодуляции волн

Раздел VI Компенсация полной дисперсии в линии передачи

§ 23. Максимально допустимая величина уширения импульсов

§ 24. Связь между начальной и конечной шириной импульсов

§ 25. Максимальное расстояние между ретрансляторами

§ 26. Компенсация дисперсии в широкой полосе частот

§ 27. Фотонные кристаллы для компенсации дисперсии

Раздел VII. Поляризационная модовая дисперсия (ПМД)

§ 28. Поляризационные моды

§ 29. Уширение импульсов из-за ПМД

Глава II. Стандартные одномодовые волокна (SM)

§ 1. Введение

Раздел I. Оптические характеристики SM волокон

§ 2. Спектр потерь в SM волокнах

§ 3. Дисперсия в SM волокнах

§ 4. SM волокно с большой площадью модового пятна

§ 5. Параметры SM волокон представленных на российском рынке

Раздел II. Применение SM волокон в системах со спектральным уплотнением каналов

§ 6. Системы WDM

- § 7. Системы DWDM
- § 8. Системы CWDM

Раздел III. Стандарты на оптические волокна

- § 9. Основные положения Rec. G.652 ITU-T
- § 10. Организации устанавливающие стандарты на оптические волокна

Глава III. Волокна с ненулевой смещенной дисперсией (NZDS)

- § 1. Введение

Раздел I. Нелинейные эффекты в оптических волокнах

- § 2. Эффективность нелинейных процессов в оптических волокнах
- § 3. Вынужденное рассеяние Бриллюэна (SBS)
- § 4. Вынужденное рассеяние Рамана (SRS)
- § 5. Фазовая самомодуляция волн (SPM).
- § 6. Модуляционная неустойчивость (MI)
- § 7. Перекрестная фазовая модуляция (XPM)
- § 8. Четырехволновое смешение (FWM)

Раздел II. Дисперсионные характеристики NZDS волокон

- § 7. Волокна с положительной дисперсией
- § 8. Волокна с отрицательной дисперсией
- § 9. Волокна с плоской дисперсионной характеристикой
- § 10. Области применения одномодовых волокон

Глава IV. Многомодовые волокна (MM)

- § 1. Введение

Раздел I. Межмодовая дисперсия

- § 2. Связь между понятиями луча и моды
- § 3. Градиентные волокна
- § 4. Дифференциальная модовая задержка
- § 5. Спектры коэффициентов широкополосности

Раздел II. Технология изготовления оптических волокон

- § 6. Методы изготовления волокон с малыми потерями
- § 7. Способ, разработанный впервые в компании Corning
- § 8. Внешнее осаждение (OVD метод)
- § 9. Осевое осаждение (VAD метод)
- § 10. Внутреннее осаждение (MCVD метод)
- § 11. Плазменное внутреннее осаждение (PCVD метод)
- § 12. Внутреннее осаждение и плазменное жакетирование (APVD метод)
- § 13. Механическая прочность волокон

Литература

Приложение. Спецификации на оптические волокна

- § 1. Типы волокон представленных на российском рынке

Раздел I. Оптические волокна компании Alcatel

- § 2. Стандартное одномодовое волокно
- § 3. Улучшенное одномодовое волокно
- § 4. Одномодовое волокно TeraLight™ Metro
- § 5. Одномодовое волокно TeraLight™ Ultra
- § 6. Одномодовое волокно Ribbon
- § 7. Многомодовое волокно GLight™ 50/125
- § 8. Многомодовое волокно 50/125
- § 7. Многомодовое волокно GLight™ 62.5/125
- § 8. Многомодовое волокно 62.5/125

- Раздел II. Оптические волокна компании Corning
- § 9. Стандартное одномодовое волокно SMF-28™
 - § 10. Стандартное одномодовое волокно SMF-28e™
 - § 11. Одномодовое волокно MetroCor™
 - § 12. Одномодовое волокно LEAF
 - § 13. Многомодовое волокно 50/125
 - § 14. Многомодовое волокно 62.5/125

- Раздел III. Оптические волокна компании OFS
- § 15. Стандартное одномодовое волокно Matched Cladding
 - § 16. Одномодовое волокно AllWave™
 - § 17. Одномодовое волокно с ненулевой дисперсией TrueWave® RS
 - § 18. Многомодовое волокно 50/125
 - § 19. Многомодовое волокно 62.5/125 § 15.

- Раздел IV. Оптические волокна компании YOFS
- § 15. Стандартное одномодовое волокно Matched Cladding
 - § 17. Одномодовое волокно с ненулевой дисперсией LAPOSH
 - § 18. Многомодовое волокно 50/125
 - § 19. Многомодовое волокно 62.5/125 § 15.

Предисловие

С технологией передачи данных по оптическому волокну связано множество разнообразных и часто малоизвестных физических явлений, практических и экономических ограничений и на эту тему написано много хороших книг. Для того чтобы новая книга оказалась интересной достаточно широкому кругу читателей, она должна иметь свою четко обозначенную специфику. Замысел авторов выражен в название книги - "Оптические волокна для линий связи". Её цель: дать читателю минимальный набор сведений по волоконной оптике необходимых при строительстве волоконно-оптических линий связи.

В настоящее время в линиях связи по всему миру уложено несколько сот миллионов километров оптических волокон. Причем около 90 % из них приходится на долю стандартных одномодовых волокон. В России в настоящее время почти исключительно используются только стандартные одномодовые оптические волокна. В тоже время за рубежом в связи с интенсивным развитием WDM систем большое внимание уделяется волокнам нового типа - с ненулевой смещенной дисперсией (NZDS - Non Zero Dispersion Shifted). Все эти типы волокон рассмотрены нашей книге.

Книга явилась результатом курса лекций по волоконной оптике, читавшихся в течение нескольких лет строителям оптических линий связи. Она может служить настольным справочным пособием для специалистов, которые хотели бы пополнить и систематизировать свои знания в этой области. Материал изложен, как мы надеемся, достаточно просто, и может быть хорошим введением для тех, кто только начинает знакомиться с волоконной оптикой. Авторы книги - сотрудники компании "ВЭЛКОМ", представляющей на российском рынке телекоммуникационное оборудование, волокна и кабели ведущих зарубежных и отечественных производителей.

Глава I Оптические характеристики одномодовых волокон

§ 1. Введение

Одномодовые оптические волокна применяются в межконтинентальных линиях связи и других магистральных линиях, где требуется чрезвычайно высокое качество передаваемой информации (например, передача банковских данных). В цифровых линиях связи (наиболее распространенном типе линий) качество передаваемой информации характеризуется коэффициентом битовых ошибок. Его величина тем больше, чем больше вероятность принять бит 0 за бит 1. Вероятность такой ошибки возрастает с уменьшением амплитуды импульсов и увеличением их ширины.

Уширение импульсов обусловлено дисперсией волокон. Дисперсия является так же и причиной уменьшения амплитуды импульсов, так как уширение импульсов неизбежно сопровождается уменьшением их амплитуды. Но в большей степени уменьшение амплитуды импульсов обусловлено потерями в волокнах. Таким образом, потери и дисперсия являются основными оптическими характеристиками волокон, применяемых в линиях связи.

В отличие от электрических линий связи, где потери зависят от частоты передаваемых сигналов, в оптических волокнах потери не зависят от скорости передачи данных. Поэтому при низкой скорости передачи предельно допустимое расстояние между ретрансляторами ограничивается потерями в волокнах, а при высоких скоростях дисперсией.

В волоконных линиях дальней связи, построенных в России, скорость передачи, как правило, не превышает 2.5 Гбит/с (STM-16) и в большинстве из них не используются оптические усилители. Поэтому в них расстояние между ретрансляторами (~ 100 км) ограничивается потерями в волокне. В этих линиях используются стандартные одномодовые волокна или, как их ещё называют, волокна с несмещенной дисперсией (SM – Single Mode). Потери в лучших промышленных образцах таких волокон на длине волны 1550 нм составляют 0.18...0.19 дБ/км.

В большинстве зарубежных линий дальней связи используются оптические усилители, и в этих линиях расстояние между ретрансляторами уже не лимитируется потерями в волокнах. Так в наземных линиях связи это расстояние может достигать 1000 км, в подводных линиях и 10 000 км. Скорость передачи данных в большинстве таких линий составляет 10 Гбит/с (STM-64), а в ближайшей перспективе и 40 Гбит/с (STM-256). Поэтому в них уже существенны ограничения, возникающие из-за дисперсии оптических волокон.

Уширение импульсов в одномодовых волокнах возникает как из-за зависимости скорости распространения света от длины волны (хроматическая дисперсия), так и из-за зависимости этой скорости от состояния поляризации света (поляризационная дисперсия). Полная хроматическая дисперсия в линии может быть сделана достаточно малой за счет использования волокон со смещенной дисперсией (DS – Dispersion Shifted) или за счет её компенсации путем включения в линию связи волокон с противоположными знаками хроматической дисперсии.

Поляризационная дисперсия становится существенной только при большом расстоянии между ретрансляторами и высокой скорости передачи 10 Гбит/с (STM-64) и выше. Поэтому ранее на нее не обращали внимания и в «старые» линии укладывались волокна с недопустимо большой по сегодняшним меркам поляризационной дисперсией. Компенсировать же поляризационную дисперсию из-за её случайной природы значительно сложнее. В настоящее время такую компенсацию удастся осуществлять только при передаче сигналов на одной длине волны (в узкой полосе частот). В новых моделях одномодовых волокон требования к поляризационной дисперсии существенно выше, и она, как правило, меньше почти на порядок, чем в старых моделях SM волокон.

С внедрением оптических усилителей в волоконные линии связи стало экономически целесообразным осуществлять передачу сигналов по одному волокну одновременно на многих длинах волн, так как все они могут быть усилены одним оптическим усилителем. Соответственно стало возможно увеличивать пропускную способность системы «просто» умножая число длин волн, передаваемых по одному волокну, на скорость передачи на одной длине волны.

Последний рекорд: передача по одному волокну 10.92 Тбит/с ($1T = 10^{12}$). Общее число длин волн, переданных по одному волокну, равно 273, при скорости передачи на каждой длине волны в 40 Гбит/с. Предельная же пропускная способность оптического волокна при использовании технологии уплотнения по длинам волн (DWDM – Dense Wavelength Division Multiplexing) составляет около 100 Тбит/с и ограничивается нелинейными эффектами.

Нелинейные эффекты в волокнах наиболее сильно проявляются в DWDM системах, так как с увеличением числа длин волн, передаваемых по волокну, увеличивается и передаваемая по нему суммарная оптическая мощность. При этом не только усиливается вклад нелинейных эффектов наблюдающихся при передаче сигналов на одной длине волны, но начинают проявляться нелинейные эффекты, свойственные только многоволновым линиям передачи.

Наиболее вредным из них является эффект четырехволнового смешения. Оказалось, что для его подавления необходимо, чтобы волокно обладало ненулевой дисперсией. Поэтому пришлось отказаться от использования волокон со смещенной дисперсией (DS) длина волны нулевой дисперсии (1550 нм) которых попадает в рабочий диапазон DWDM системы. Специально для применения в DWDM системах были созданы волокна с ненулевой смещенной дисперсией (NZDS – Non Zero Dispersion Shifted). В них длина волны нулевой дисперсии смещена так, что она выходит за пределы рабочего диапазона DWDM системы, а в пределах этого диапазона оно обладает малой (ненулевой) дисперсией.

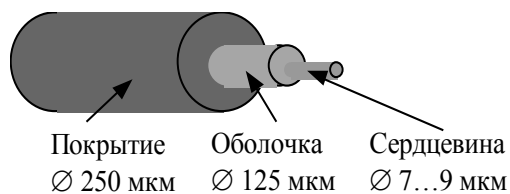
В I-й главе рассмотрены основные типы одномодовых волокон (раздел I) и их оптические характеристики: спектр потерь в прямых и изогнутых волокнах (раздел II), хроматическая дисперсия (раздел IV) и поляризационная дисперсия (раздел VII). Анализируются погрешности, возникающие при измерении потерь в линии передачи (раздел III), механизмы уширения и сжатия импульсов (раздел V) и вопросы компенсации полной хроматической дисперсии в линии (раздел VI).

§ 2. Геометрические параметры оптических волокон

Оптическое волокно представляет собой двухслойную цилиндрическую кварцевую нить, состоящую из сердцевины и оболочки. Оболочка покрыта защитным слоем из акрилатного лака. Сердцевина легирована германием и поэтому её показатель преломления больше, чем у оболочки. Свет распространяется в сердцевине волокна, испытывая полное внутреннее отражение на границе с оболочкой. Он проникает в оболочку на глубину порядка длины волны, т.е. на глубину много меньше её толщины и, следовательно, не взаимодействует с покрытием из акрилатного лака. Это покрытие необходимо для защиты кварцевой оболочки от механических повреждений и воздействия воды.

Волокна делятся на два основных типа: многомодовые и одномодовые. Для всех типов волокон, применяемых в линиях связи, диаметр кварцевой оболочки имеет стандартный размер 125 ± 1 мкм. Номинальный диаметр сердцевины у многомодовых волокон 50 или 62.5 мкм. Диаметр сердцевины у одномодовых волокон может меняться в зависимости от типа волокна в пределах 7..9 мкм (рис. 1.1). Нормируемым параметром у одномодовых волокон является диаметр модового пятна, величина которого зависит от типа волокна и рабочей длины волны и лежит в пределах 8..10 мкм. Отклонение диаметра модового пятна от его средней величины в соответствии с международным стандартом ITU-T Rec. G. 652 не должно превышать 10 %.

Одномодовые волокна



Многомодовые волокна

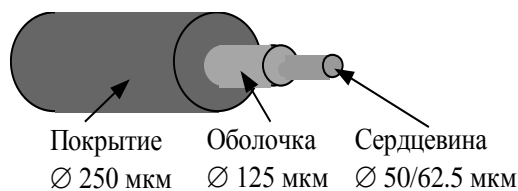


Рис.1.1. Геометрические параметры одномодовых и многомодовых волокон.

Все типы волокон, применяемых в линиях связи, по своим геометрическим параметрам настолько близки друг к другу, что при внешнем осмотре, если нет специальной маркировки, определить какой это тип волокна, практически невозможно. Многомодовые волокна применяются в локальных вычислительных сетях и частично в транспортных сетях на уровне доступа.

Одномодовые волокна применяются в транспортных сетях всех трех уровней: магистральном, уровне распределения и уровне доступа. Типы одномодовых волокон отличаются друг от друга только формой профиля показателя преломления и, соответственно, дисперсионными характеристиками. Существует три основных типа одномодовых волокон: стандартные одномодовые волокна (SM), волокна со смещенной дисперсией (DS) и волокна с ненулевой смещенной дисперсией (NZDS). В России DS волокна не используются, а NZDS волокна только начинают применяться.

§ 3. Волокна со смещенной и с несмещенной дисперсией

Волокна с несмещенной дисперсией (стандартные одномодовые волокна). Основным типом волокон, применяемых в линиях связи, являются стандартные одномодовые волокна (ITU-T Rec.G. 652). Для их обозначения используют несколько различных сокращений: NDSF – No Dispersion Shifted Fiber (волокно с несмещенной дисперсией), SF – Standard Fiber (стандартное волокно), SSMF - Standard Single Mode Fiber (стандартное одномодовое волокно). Наиболее распространенное обозначение: SM – Single Mode (одномодовое).

Среди всех типов волокон, уложенных в наземных линиях связи, на долю SM волокон приходится почти 90 %, а их общая протяженность достигает сотни миллионов километров. Это наиболее зрелый (производится с 1983 г.) и наиболее дешевый (~ 60 \$/км) тип волокна. В большинстве линий России (а до недавнего времени и в США) используется именно этот тип волокон. За рубежом кроме SM волокон применяются так же волокна со смещенной дисперсией (DS - Dispersion Shifted) и волокна с ненулевой смещенной дисперсией (NZDS – Non Zero Dispersion Shifted).

SM волокна имеют наиболее простую (ступенчатую) форму профиля показателя преломления, а длина волны нулевой дисперсии ($\lambda = 1310$ нм) в них попадает в один из локальных минимумов потерь. Поэтому при работе на $\lambda = 1310$ нм они обеспечивают не только высокую скорость передачи данных, но и малые потери. Кроме того, среди всех типов одномодовых волокон SM волокна обла-

дают наиболее совершенными геометрическими параметрами и стабильным диаметром модового пятна, что позволяет достигать минимальных потерь в сростках таких волокон (типичное значение 0.02 дБ).

Потери для лучших образцов промышленных волокон в локальном минимуме на длине волны $\lambda = 1310$ нм составляют 0.31...32 дБ/км. В абсолютном минимуме потерь ($\lambda = 1550$ нм) потери меньше: 0.18...0.19 дБ/км, а коэффициент дисперсии достигает величины: 17...20 пс/нм·км.

На российском рынке представлены SM волокна большинства ведущих зарубежных компаний, таких как Corning и Lucent (США), Sumitomo, Hitachi, Fujikura и Furukawa (Япония), Pirelli (Италия), Alcatel (Франция). Недавно на рынке появились также SM волокна с улучшенной очисткой от примесей воды (OH): AllWave (Lucent), SMF-28e (Corning) и SMR (Pirelli).

Волокна со смещенной дисперсией (DS – Dispersion Shifted). В 1985 г. был создан новый тип волокон, в которых длина волны нулевой дисперсии была смещена на $\lambda = 1550$ нм – в абсолютный минимум потерь в кварцевых волокнах. Длина волны 1550 нм интересна еще и тем, что она лежит примерно в середине полосы усиления эрбиевых оптических усилителей (EDFA – Erbium Doped Fiber Amplifiers). DS волокна используются в основном в магистральных линиях связи Японии, Мексики и частично США. В последние годы производство DS волокон резко уменьшилось, так как из-за большой величины перекрестных помех их применение в системах с уплотнением по длинам волн (DWDM – Dense Wavelength Division Multiplexing) ограничено.

Волокна с ненулевой смещенной дисперсией (NZDS – Non Zero Dispersion Shifted) появились на рынке в 1993 г. К тому времени промышленностью были освоены эрбиевые оптические усилители, что сделало экономически целесообразным применение DWDM систем (рис. 1.2). В этих системах по одному волокну пропускается излучение на многих длинах волн (до 300 длин волн). Оптический усилитель усиливает излучение одновременно на всех этих длинах волн. Пропорционально числу длин волн увеличивается и пропускная способность линии связи.

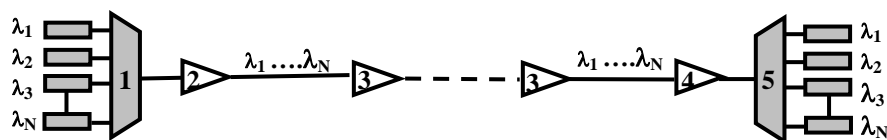


Рис. 1.2. Принцип работы системы со спектральным уплотнением по длинам волн (DWDM). 1 – мультиплексор, 2 – оптический усилитель мощности, 3 – линейные оптические усилители, 4 – оптический предусилитель, 5 – демультиплексор.

С увеличением числа спектральных каналов (длин волн) в DWDM системе возрастает суммарная мощность излучения передаваемого по волокну, и сильнее начинают проявляться нелинейные эффекты. Наиболее вредным является эффект четырехволнового смешения, так как при смешении сигналов, передаваемых на нескольких длинах волн, в волокне возникают паразитные сигналы на новых длинах волн. Некоторые из этих паразитных сигналов попадают в спектральные каналы DWDM системы, что приводит к возникновению перекрестных помех.

Появление сигналов на новых длинах волн можно объяснить тем, что световые волны большой интенсивности создают в волокне бегущие фазовые решетки (бегущие волны показателя преломления). При взаимодействии других световых волн с этими бегущими фазовыми решетками и возникают паразитные сигналы на новых длинах волн. Эффективность этого взаимодействия быстро уменьшается с увеличением дисперсии волокна.

Так, если длина волны нулевой дисперсии волокна попадает между спектральными каналами DWDM системы, то соответствующие этим каналам световые волны распространяются в волокне с одинаковой скоростью и имеют возможность взаимодействовать достаточно длительное время. В NZDS волокнах длина волны нулевой дисперсии лежит вне полосы оптического усилителя, а в полосе оптического усилителя NZDS волокна обладают небольшой (ненулевой) дисперсией, необходимой для подавления перекрестных помех.

Основные типы одномодовых волокон применяемых в линиях связи нормируются международными стандартами ITU-T Rec. G. 652...G. 655:

- G.652: волокна с несмещенной дисперсией (SM волокна) с длиной волны нулевой дисперсии и длиной волны отсечки в районе 1310 нм.
- G.653: волокна со смещенной дисперсией (DS волокна) с длиной волны нулевой дисперсии в районе 1550 нм и длиной волны отсечки в районе 1310 нм.
- G.654: волокна с несмещенной дисперсией (SM волокна) с длиной волны нулевой дисперсии в районе 1310 нм и длиной волны отсечки в районе 1550 нм.

- G.655: волокна со смещенной ненулевой дисперсией (NZDS волокна), обладающие малой дисперсией (0.1...6 пс/нм·км) в диапазоне длин волн 1530...1565 нм.

Специальные типы одномодовых волокон. Кроме этих трех основных типов одномодовых волокон, существует еще несколько специальных типов одномодовых волокон применяемых в волоконно-оптических устройствах:

- Волокна для компенсации дисперсии (DC – Dispersion Compensating), применяемые в модулях компенсации дисперсии.
- Волокна с примесью редкоземельных элементов, применяемые в оптических усилителях, например, в EDFA – Erbium Doped Fiber Amplifier.
- Волокна, сохраняющие состояние поляризации излучения (PM – Polarization Maintaining), применяемые в поляризационных делителях и смесителях.

Раздел II. Оптические потери в одномодовых волокнах

§ 4. Спектр потерь в прямом волокне

Зависимость потерь в кварцевых оптических волокнах от длины волны света представлена на рис. 1.3.. Как видно из этого рисунка, потери ограничиваются: релеевским рассеянием, инфракрасным поглощением и резонансным поглощением ионов OH («водяные» пики). Кривая носит иллюстративный характер, так как для разных типов волокон и разных производителей величина потерь может различаться. Наиболее сильно могут различаться потери в «водяных» пиках на $\lambda = 1290$ нм и 1383 нм. Так в новых моделях SM волокон: AllWave (Lucent Technologies), SMF-28e (Corning), SMR (Pirelli) – отсутствует пик на $\lambda = 1383$ нм и снижена чувствительность к воздействию водорода.

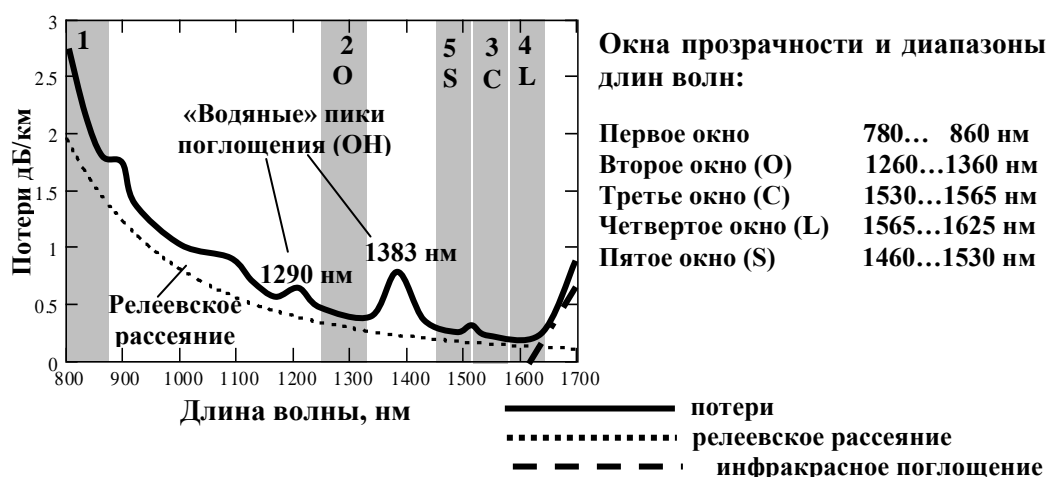


Рис. 1.3. Спектр потерь и положение окон прозрачности в кварцевых оптических волокнах.

Релеевское рассеяние уменьшается с увеличением длины волны ($\sim 1/\lambda^4$), а инфракрасное поглощение, наоборот, увеличивается. Абсолютный минимум потерь приходится на $\lambda = 1550$ нм. Для лучших образцов промышленных SM волокон потери на этой длине волны составляют 0.18... 0.19 дБ/км.

Однако, как показывают исследования, и эти потери могут быть уменьшены. В окнах прозрачности основной вклад в потери обусловлен релеевским рассеянием, а коэффициент релеевского рассеяния зависит от режима тепловой обработки заготовки и уменьшается при снижении температуры вытяжки волокна. При снижении температуры вытяжки до 1800° С и скорости вытяжки до 1м/с потери в волокне с легированной GeO₂ сердцевиной удалось уменьшить до 0.16 дБ/км на длине волны 1550 нм и до 0.29 дБ/км на длине волны 1310 нм.

Дальнейшее уменьшение потерь может быть получено в волокнах с депрессированной оболочкой. В них потери из-за релеевского рассеяния уменьшаются, так как снижается степень легирования сердцевины. Кроме того, уменьшаются и потери, возникающие из-за дефектов, появляющихся при вытяжке волокна, так как сердцевина и оболочка в таком волокне лучше согласованы по вязкости.

В последних разработках SM волокон за счет улучшения технологии очистки от водяных паров удалось снизить потери в «водяном» пике (OH) на $\lambda = 1383 \pm 3$ нм. Волокна типа LWPF (low water peak fiber) производятся несколькими компаниями: AllWave Lucent Technologies (теперь это OFS),

SMF-28e (Corning), SMR (Pirelli). Потери в водяном пике уменьшены до величины 0.31 дБ/км, что меньше чем потери во втором окне прозрачности на $\lambda = 1310$ нм (0.35 дБ/км).

Согласно сообщению на международной конференции FOC 2002, компании Sumitomo удалось установить новый рекорд в достижении минимальных потерь в одномодовом волокне: 0.151 дБ/км на $\lambda = 1568$ нм. Предыдущий рекорд 0.154 дБ/км был установлен ещё в 1986 г. и рассматривался как практический предел. Сердцевина волокна была из чистого кварца, а оболочка была легирована фтором. Потери складывались следующим образом: релеевское рассеяние 0.128 дБ/км, инфракрасное поглощение 0.014 дБ/км, примеси ОН 0.004 дБ/км и несовершенства волокна 0.004 дБ/км. Потери в диапазоне 1520...1606 нм не превышали 0.160 дБ/км. Такое волокно позволяет увеличить расстояние между ретрансляторами на 30 % по сравнению с волокном, сердцевина которого легирована германием.

§ 5. Окна прозрачности

Как видно из рис. 1.3, для передачи оптических сигналов может быть использован широкий участок спектра, где потери в волокнах достаточно малы. Его принято разбивать на более узкие участки - рабочие диапазоны, или окна прозрачности. Первоначально под окнами прозрачности понимались участки длин волн вблизи узких локальных минимумов в зависимости потерь от длины волны: 850 нм (1-ое), 1310 нм (2-ое), 1550 нм (3-е). Постепенно с развитием технологии очистки кварцевого стекла стала доступна вся область малых потерь от 1260 нм до 1675 нм. Кривая потерь теперь выглядит достаточно гладкой, и локальные минимумы на ней слабо выражены.

Первое окно прозрачности использовалось в 70-х годах в первых линиях связи на многомодовых волокнах. Тогда полупроводниковые источники излучения выпускались промышленностью только на длину волны 850 нм (GaAs). В настоящее время, из-за большой величины потерь в волокнах, этот диапазон используется в основном в локальных вычислительных сетях.

Второе окно прозрачности (О) стало использоваться в 80-х годах в линиях дальней связи, после того как на базе тройных и четверных гетероструктур были разработаны источники излучения на длину волны 1310 нм. В это окно попадает и длина волны нулевой дисперсии SM волокон. В настоящее время второе окно прозрачности используется преимущественно в городских и зонавых линиях.

Третье окно прозрачности (С) было освоено в начале 90-х годов. В него попадают одновременно полоса усиления EDFA – Erbium Doped Fiber Amplifier (волоконный усилитель легированный эрбием) и абсолютный минимум поглощения в кварцевом волокне. Так как SM волокна обладают в третьем окне прозрачности большой дисперсией, то было разработано DS волокно с длиной волны нулевой дисперсии, смещенной в это окно. Третье окно наиболее широко используется в магистральных линиях (Ростелекомом и другими крупными операторами связи).

В последнее время с развитием систем с мультиплексированием каналов по длинам волн (DWDM – Dense Wavelength Division Multiplexing) третье и прилегающие к нему четвертое и пятое окна прозрачности вызывают повышенный интерес. Так специально для применения в системах DWDM были созданы несколько типов NZDS волокон, обладающих в этих окнах ненулевой дисперсией. В зарубежной литературе диапазоны длин волн соответствующие этим трем окнам получили специальные наименования: третье окно – (C) стандартный диапазон (conventional band), четвертое окно – (L) длинноволновый диапазон (Long band), а пятое окно - (S) коротковолновый диапазон (short band).

Четвертое окно прозрачности (L) позволяет передвинуть длинноволновую границу DWDM систем на 1620 нм. Для работы одновременно в 3 и 4 окнах прозрачности используются оптические усилители с увеличенной шириной полосы частот и NZDS волокна с малым углом наклона дисперсионных кривых.

Пятое окно прозрачности (S) появилось после создания волокна AllWave. В этом волокне в результате тщательной очистки его от посторонних включений потери в “водяном” пике на длине волны 1390 нм были снижены до 0.31 дБ/км, что меньше чем во втором окне прозрачности на длине волны 1310 нм (0.35 дБ/км). Пятое окно прозрачности завершило освоение спектральной области малых потерь в волокне простирающейся от 1280 нм до 1650 нм.

Согласно информации, полученной из EXFO (Канада), международный союз телекоммуникаций (ITU) утвердил новые спектральные диапазоны в интервале длин волн 1260...1675 нм (таблица № 1.1). Официальная публикация ожидается после согласования с рекомендациями на оптические компоненты (G. 671) и технологию DWDM (G. 692).

Таблица № 1.1. Спектральные диапазоны для одномодовых волокон

О – диапазон	1260...1360 нм	Основной (Original)
Е – диапазон	1360...1460 нм	Расширенный (Extended)
С – диапазон	1460...1530 нм	Коротковолновый (Short wavelength)
С – диапазон	1530...1565 нм	Стандартный (Conventional)
Л – диапазон	1565...1625 нм	Длинноволновый (Long wavelength)
U – диапазон	1625...1675 нм	Сверхдлинный (Ultra-long wavelength)

§ 6. Механизмы возникновения потерь при изгибе волокна

Зависимость потерь от диаметра петельки (одиночной) в SM волокне, измеренная на $\lambda = 1300$ нм, приведена на рис. 1.4. При больших значениях диаметров петельки, потери не зависят от её диаметра. Однако когда диаметр петельки уменьшается до критического значения (10...20 мм), потери начинают быстро увеличиваться (по экспоненциальному закону). Так при намотке нескольких витков SM волокна на карандаш или шариковую ручку потери могут увеличиться на 20...40 дБ.

Потери при изгибании волокна возникают по двум причинам. Во-первых, потери возникают в месте соединения прямого и изогнутого волокна. Обусловлены они тем, что в изогнутом волокне центр модового пятна смещен относительно оси волокна на некую величину d , зависящую от радиуса изгиба волокна (рис. 1.5). В результате модовые пятна прямого и изогнутого волокна в месте их соединения оказываются смещенными друг относительно друга также на величину d . Поэтому только часть мощности моды “прямого” волокна (диаметром w) передается моде изогнутого волокна, а оставшая же мощность преобразуется в оболочечные моды и, в конечном счете, теряется.

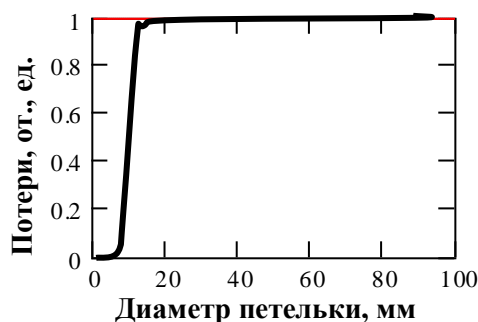


Рис. 1.4. Зависимость потерь от диаметра петельки (одиночной) в SM волокне, измеренная на $\lambda = 1300$ нм.

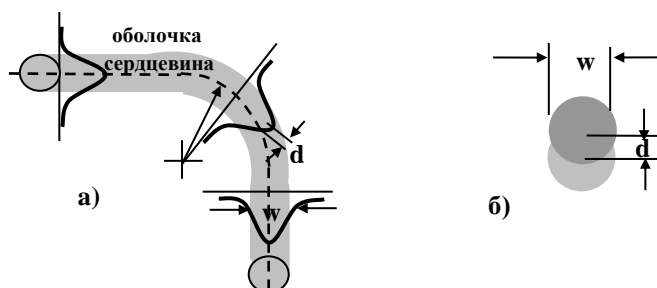


Рис. 1.5. Схема, поясняющая причину возникновения потерь в месте соединения прямого и изогнутого волокна.

- В изогнутом волокне центр модового пятна смещен относительно оси волокна на некую величину d
- В месте соединения “прямого” и изогнутого волокна их модовые пятна смещены друг относительно друга на величину d .

Во-вторых, мощность теряется и непосредственно в изогнутом волокне. Происходит это из-за того, что в изогнутом волокне периферийная часть моды распространяется со скоростью больше скорости света в среде (в оболочке). Эта часть моды излучается в оболочку волокна и, в конечном счете, теряется (рис. 1.6). Величина этих потерь тем больше, чем больше число витков волокна, и чем меньше радиус изгиба волокна.

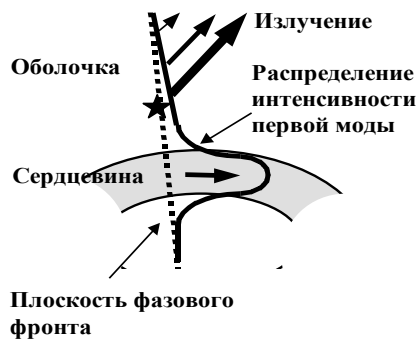


Рис. 1.6. Схема, поясняющая возникновение потерь в изогнутом волокне.

★ Точка, где скорость распространения фазового фронта превысила скорость света в среде

Таким образом, потери в изогнутом волокне возникают из-за двух различных механизмов. В первом случае потери зависят только от радиуса изгиба волокна и не зависят от числа витков. А во втором случае они зависят и от радиуса изгиба и от числа витков.

§ 7. Спектр потерь в изогнутом волокне

Спектры потерь в изогнутых и “прямых” волокнах могут существенно различаться. В “прямых” волокнах потери ограничиваются в основном релеевским рассеянием и уменьшаются с увеличением длины волны $\sim 1/\lambda^4$, например, на $\lambda = 1550$ нм потери всегда меньше чем на $\lambda = 1310$ нм. В то же время в изогнутых волокнах потери могут, наоборот, увеличиваться с увеличением длины волны.

Пример зависимости потерь от длины волны в SM волокне, два витка которого намотаны на цилиндрическую оправку диаметром 23 мм, приведен на рис. 1.7. Из рисунка видно, что в изогнутом волокне потери увеличиваются с увеличением длины волны. Объясняется это тем, что при этом увеличивается диаметр моды и все большая часть мощности моды излучается в оболочку волокна. Этот факт используется в рефлектометрии для поиска мест изгиба волокон.

Диаметр моды и, соответственно, относительные мощности распространяющиеся в сердцевине и оболочке волокна зависят не только от длины волны излучения (λ), но и от радиуса сердцевины (a) и разности показателей преломления между сердцевиной и кварцевой оболочкой ($n_1 - n_2$). Из этих параметров можно образовать безразмерную комбинацию, часто используемую при расчетах и называемую параметром волокна V :

$$V = k a NA = (2\pi/\lambda) a (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}, \quad (1.1)$$

где $k = (2\pi/\lambda)$ – волновое число (в вакууме), a – радиус сердцевины, $NA = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$ – числовая апертура.

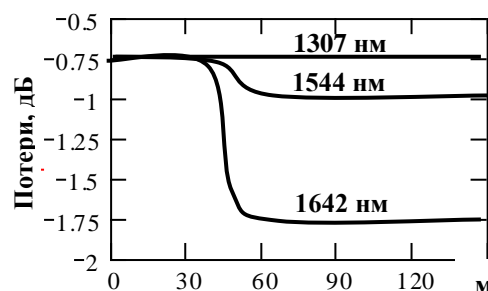


Рис. 1.7. Рефлектограммы потерь в SM волокне, намотанном на оправку диаметром 23 мм, измеренные на трех длинах волн.

Параметр волокна V однозначно характеризует относительные мощности, распространяющиеся в сердцевине и в оболочке волокна (рис. 1.8). Как видно из этого рисунка, при $V < 1$ практически вся мощность первой моды сосредоточена в оболочке и, соответственно, при изгибе волокон с таким малым параметром V потери излучения будут большими.

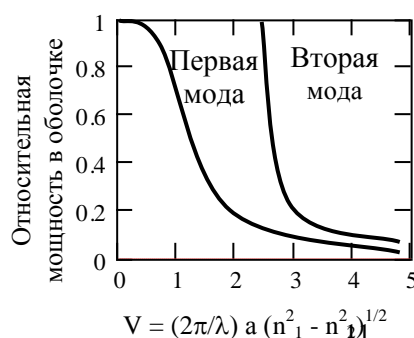


Рис. 1.8. Доли мощностей первой и второй мод, распространяющихся в оболочке волокна

Характерно также, что кривая относительной мощности для первой моды не обрывается при $V \rightarrow 0$. Это означает, что теоретически в волокне может распространяться излучение со сколь угодно большой длиной волны (т.е. основная мода волокна не имеет отсечки). Однако, так как при $V \rightarrow 0$ основная часть мощности распространяется вне сердцевины, то потери на изгибах в таких волокнах велики.

При $V > 1$ доля мощности основной моды, распространяющейся в оболочке, быстро уменьшается с ростом V , и при $V = 2.4$ она составляет величину порядка 0.1. Соответственно с увеличением параметра V уменьшаются и потери при изгибе волокна. Дальнейшее увеличение параметра V нецелесообразно, так как при $V > 2.4$ в волокне уже может распространяться вторая мода.

§ 8. Эффективная длина волны отсечки

Минимальная длина волны, при которой в волокне распространяется только одна мода, называется длиной волны отсечки. При заданных значениях числовой апертуры и радиуса сердцевины её можно рассчитать, исходя из условия $V = 2.4$. Однако на практике используется не расчетное значение длины волны отсечки, а её эффективное значение, которое находится экспериментально по методике, определяемой стандартом ITU - T, G. 650.

Эта методика основана на том, что вторую моду можно отсечь, изогнув волокно. В середине прямого отрезка волокна длиной 2 м делается петля диаметром 28 см и измеряется зависимость интенсивности прошедшего через волокно излучения от длины волны. Вблизи длины волны отсечки интенсивность прошедшего излучения уменьшается (примерно в три раза) по сравнению с её значением в отсутствие петли из волокна.

Таким образом, получается, что если волокно “прямое” (петля отсутствует), то в нем распространяются две моды. Соответственно, при этом параметр волокна $V > 2.4$, а эффективная длина волны отсечки меньше её теоретического значения, получаемого из условия $V = 2.4$.

В отличие от “теоретической” эффективная длина волны отсечки зависит от длины волокна и наличия в нем изгибных деформаций. После укладки волокна в оптический кабель изгибных деформаций в волокне становится больше. Поэтому максимально возможная длина волны отсечки в кабеле всегда меньше максимально возможной длины волны отсечки в волокне.

Оценим длину волны отсечки в SM волокне исходя из условия $V = 2.4$. Полагая (согласно спецификации) в выражении для параметра волокна ($V = (2\pi/\lambda) \cdot a \cdot NA$) диаметр сердцевины $2a$ равным 8.3 мкм, а числовую апертуру NA равной 0.12, получаем: $V \cong \pi/\lambda_{от}$. Далее используя условие $V = 2.4$ находим “теоретическое” значение длины волны отсечки $\lambda_{от} = 1310$ нм.

Чем ближе рабочая длина волны к длине волны отсечки, тем лучше волокно “ведет” свет и тем меньше величина дополнительных потерь, возникающих при изгибах такого волокна. Гистограммы распределения эффективной длины волны отсечки в волокнах компании Hitachi и длины волны излучения лазерного диода приведены рис. 1.9.

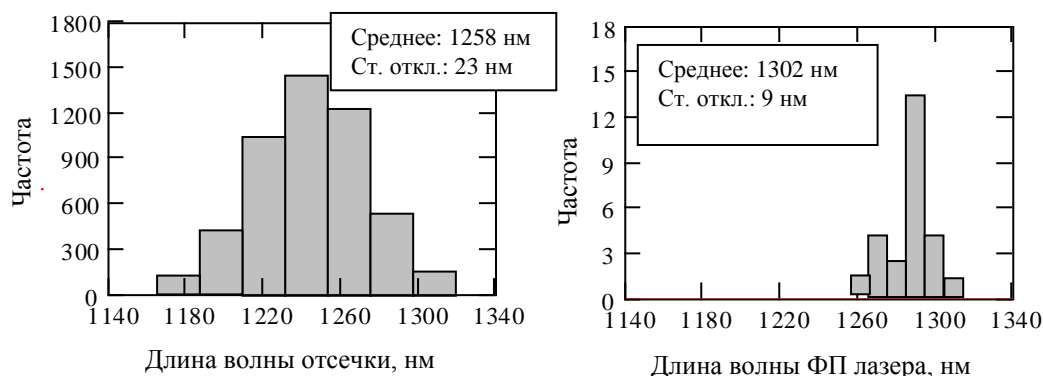


Рис. 1.9. Гистограммы длины волны отсечки для волокна Hitachi и длины волны излучения ФП лазера (Фабри-Перо).

Из гистограмм видно, что почти в половине случаев длина волны излучения оказывается меньше эффективной длины волны отсечки в волокне, т.е. волокно в этом случае уже не будет одномодовым. Однако волокно, уложенное в кабель, испытывает достаточно много изгибов (в частности из-за повива), и в нем эффективная длина волны отсечки уменьшается так, что вторая мода практически полностью отсекается. Проблемы возникают только при работе с короткими отрезками волокон (например, с пачкордами). В них при прецизионных измерениях потерь приходится создавать петельки для отсечки второй моды.

§ 9. Потери из-за разности диаметров модовых пятен

Распределение интенсивности первой моды волокна в поперечном сечении хорошо описывается функцией Гаусса: $I(r) = I_0 \exp(-8r^2/w^2)$, где w - диаметр модового пятна. Таким образом, расчет потерь в месте соединения волокон сводится к хорошо известной задаче об эффективности согласования двух гауссовых пучков (в месте их перетяжки, где фазовый фронт у них плоский). Эти потери возникают из-за не параллельности этих пучков и смещения их друг относительно друга в поперечном направлении, а так же и из-за неравенства диаметров этих пучков и их эллиптичности.

Отраженной мощностью мы пренебрегаем, так как предполагаем, что в месте соединения создается хороший оптический контакт. Непараллельность и эллиптичность пучков, как правило, мала и остаются две основные причины возникновения потерь при соединении волокон: неравенство диаметров пучков (диаметров модовых пятен) и их поперечное смещение друг относительно друга.

Диаметр модового пятна w однозначно определяется величиной параметра волокна V (рис. 1.10).

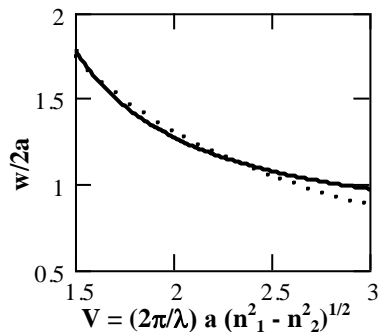


Рис. 1.10. Зависимость нормированного диаметра первой моды от параметра волокна V .

— Расчет по формуле:

$$w/2a = 0.65 + 1.619 V^{-3/2} + 2.879 V^{-6}$$

(точность 1 % при $1.2 < V < 2.4$)

..... Расчет по приближенной формуле:

$$w/2a = 2.6/V = 0.83 \lambda / (2a NA)$$

Как следует из сравнения зависимостей, приведенных на рис. 1.10, при $V < 2.5$ для оценки радиуса модового пятна удобно использовать приближенные формулы:

$$w = 0.83 \lambda / NA, \quad (1.2)$$

$$w = 7 \lambda \quad (\text{при } NA = 0.118). \quad (1.3)$$

Отсюда видно, что в первом приближении радиус модового пятна не зависит от радиуса сердцевинки и определяется отношением длины волны излучения к числовой апертуре волокна. Учитывая, что в SM волокнах числовая апертура $NA \cong 0.12$, получаем оценку для диаметров модовых пятен: $w = 9.2$ мкм ($\lambda = 1.31$ мкм) и $w = 10.8$ мкм ($\lambda = 1.55$ мкм), что совпадает (в пределах допуска) со значениями, приведенными в спецификациях на SM волокна.

Зависимость потерь в месте соединения волокон от относительной разности диаметров модовых пятен изображена на рис. 1.11.

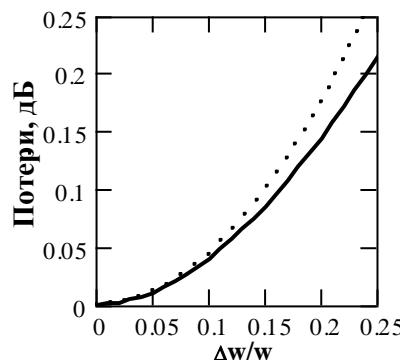


Рис. 1.11. Зависимость потерь в месте соединения волокон от относительной разности диаметров модовых пятен.

— Расчет по формуле:

$$\alpha_d (\text{дБ}) = -10 \log(4 / [(w + \Delta w)/w + w / (w + \Delta w)]^2)$$

..... Расчет по приближенной формуле:

$$\alpha_d (\text{дБ}) = 4/34 (\Delta w/w)^2$$

По международному стандарту ITU-T G. 652 относительное отклонение диаметров модовых пятен SM волокон не должно превышать 10 %. Как видно из сравнения зависимостей, приведенных на рис. 1.22, при $\Delta w/w < 0.1$ потери в месте соединения волокон хорошо описываются приближенной формулой:

$$\alpha (\text{дБ}) = 4.34 (\Delta w/w)^2. \quad (1.4)$$

При $\Delta w/w < 10 \%$ получаем, что $\alpha (\text{дБ}) < 0.05$ дБ.

Характерно, потери в месте соединения волокон пропорциональны квадрату разности диаметров модовых пятен и, следовательно, не зависят знака этой разности, как и должно, быть, так как величина этих потерь не зависит от направления распространения света. Учитывая, что среднее значение диаметра модового пятна в SM волокна на $\lambda = 1550$ нм равно 10.4 мкм, (1.4) можно привести к ещё более удобному для оценок виду:

$$\alpha_{\Delta w} \text{ (дБ)} = 0.04 \Delta w^2, \quad (1.5)$$

где Δw – разность диаметров модовых пятен, измеряемая в микронах.

§ 10. Потери из-за смещения сердцевин волокон

При юстировке волокон по кварцевой оболочке основной вклад в общие потери дает компонента, возникающая из-за смещения d сердцевин волокон друг относительно друга:

$$\alpha_d \text{ (дБ)} = 4.34 (d/w)^2. \quad (1.6)$$

Смещение сердцевин соединяемых волокон при их юстировке по оболочке возникает в основном из-за эксцентриситета сердцевин соединяемых волокон. В волокнах, производимых компаниями Corning и Hitachi, эксцентриситет сердцевин составляет ± 0.5 мкм. Соответственно, из-за эксцентриситета сердцевин диаметры модовых пятен свариваемых волокон в самом худшем случае могут быть смещены друг относительно друга на 1 мкм. Потери при этом составят величину 0.05 дБ.

Допуск на диаметр волокон определяет величину смещения сердцевин волокон друг относительно друга при соединении их с помощью адаптеров и механических соединителей, и влияет на точность, с которой удастся скорректировать эксцентриситет свариваемых волокон.

Собственный изгиб волокна влияет на величину потерь при одновременной сварке нескольких пар волокон. Если радиус этого изгиба мал, то не удастся одинаково хорошо съюстировать все пары соединяемых волокон. У большинства фирм-изготовителей радиус кривизны собственного изгиба волокна не превышает 4 м.

Раздел III. Измерение потерь в волоконно оптических линиях связи

§ 11. Распределение потерь в линии связи

Измерения потерь проводятся для оценки качества ВОЛС. В большинстве случаев потери излучения (а не дисперсия) являются основным фактором, ограничивающим длину ретрансляционного участка линии связи.

В настоящее время разработана и широко используется измерительная аппаратура, позволяющая не только определять с высокой точностью величину полных потерь в линии (мультиметры), но и распределение потерь вдоль линии (оптические рефлектометры). Однако эти измерения, а также их интерпретация, обладают определенной спецификой, свойственной волоконно-оптической технике, и требуют специального рассмотрения.

Полные потери α , вносимые линией связи длиной L , складываются из потерь в строительных длинах оптического кабеля $N q_v L_{ст}$, потерь в сварных соединениях волокон $\alpha_{св}$ и потерь в разъёмных соединениях пигтейлов на концах линии α_p .

$$\alpha \text{ (дБ)} = q_v L + (N + 1) \alpha_{св} + 2 \alpha_p, \quad (1.7)$$

где q_v – погонные потери в волокне (дБ/км), $N = L/L_{ст}$ – число строительных длин оптических кабелей уложенных в линию, $N + 1$ – число сварных соединений волокон в линии, $L_{ст}$ – строительная длина оптического кабеля (рис. 1.12).

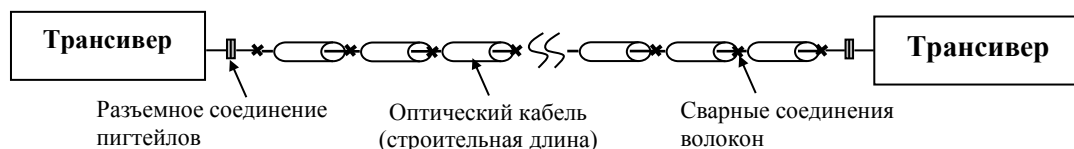


Рис. 1. 12. Схема распределения потерь в ретрансляционном участке линии.

Наиболее высокие требования предъявляются к величине потерь в оптическом кабеле и сварных соединений волокон (на одну строительную длину кабеля приходится примерно одно сварное соединение). Требования к величине потерь в разъёмных соединениях в пигтейлов менее жесткие (их надо сравнивать с полными потерями в линии). Потери, которые иногда возникают в местах изгибов волокон в пигтейлах, учитывать не будем.

Оценим величину полных потерь в ретрансляционном участке линии длиной $L = 80$ км (типичное значение для магистральной линии без оптических усилителей). Будем исходить из того, что строительная длина оптического кабеля равна $L_{\text{ст}} = 5$ км, а величина потерь не в сварных соединениях не превышает $\alpha_{\text{св}} = 0.05$ дБ (требования Ростелекома). Основные потери в линии возникают из-за потерь в волокне, их мы положим равными $q = 0.2$ дБ/км на $\lambda = 1550$ нм и $q = 0.33$ дБ/км на $\lambda = 1310$ нм (типичные значения). Потери в разъёмных соединениях положим равными среднему значению потерь в некалиброванных разъёмах ($\alpha_p = 0.3$ дБ). Результаты оценок приведены в таблице № 1.2.

При использовании высококачественного оборудования и соблюдения технологии монтажа полные потери в линии получаются близкими к их номинальному значению. Если есть уверенность, что эти условия соблюдены, то можно ограничиться только измерением полных потерь в линии с помощью мультиметра. Мультиметр значительно более простой прибор, чем рефлектометр, и измерения полных потерь в линии с его помощью требуют значительно меньше времени, чем измерения распределения потерь в линии с помощью рефлектометра. Такой подход используется для того, чтобы уменьшить время монтажа линии. Однако в тех случаях, когда нет уверенности в том, что все технологические условия соблюдены, необходимо измерять распределение потерь вдоль линии связи.

Таблица № 1.2. Распределение потерь (номинальных) в линии связи.

Рабочая длина волны	Потери в оптическом кабеле	Потери в сварных соединениях	Потери в разъёмных соединениях	Полные потери, вносимые линией
1550 нм	$0.2 \times 80 = 16$ дБ	$0.05 \times 17 = 0.85$ дБ	$0.3 \times 2 = 0.6$ дБ	17.45 дБ
1310 нм	$0.33 \times 80 = 26.4$ дБ	$0.05 \times 17 = 0.85$ дБ	$0.3 \times 2 = 0.6$ дБ	27.85 дБ

§ 12. Потери в сварных соединениях волокон

Сварка SM волокон производится с помощью автоматизированных сварочных аппаратов, осуществляющих не только сварку волокон, но и оценку величины потерь в месте соединения волокон. Юстировка и оценка величины потерь в месте соединения волокон производится по смещению сердцевин волокон, что позволяет создавать сварные соединения со средними потерями порядка 0.02 дБ. Эта величина сравнима с точностью измерения потерь в сварных соединениях (~ 0.01 дБ) как с помощью рефлектометров, так и с помощью мультиметров. Т.е. можно полагать, что в лабораторных условиях SM волокна свариваются практически без потерь.

Столь малые потери в сварных соединениях SM волокон достигаются при условии выполнения целого ряда технологических требований: прецизионной настройки режимов сварочного аппарата, использования высококачественного скалывателя (среднее значение угла скалывания торца волокна 0.5°) и тщательной очистки поверхности свариваемых волокон. Однако при работе в поле не всегда удается соблюсти все эти технологические требования, что приводит к возникновению различного рода нарушений качества сварного соединения. На рис. 1.13 приведены типичные искажения сварных соединений примерно так, как они видны на экране сварочного аппарата.

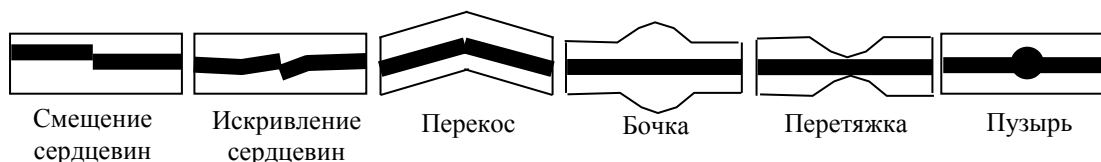


Рис. 1.13. Примерный вид дефектов сварных соединений волокон на экране автоматизированного сварочного аппарата.

Как уже говорилось, на экран автоматизированных сварочных аппаратов выводится не только изображение волокон, но и оценка величины потерь в сварном соединении. В большинстве аппаратов она рассчитывается по величине смещения сердцевин свариваемых волокон. Однако такая оценка не учитывает (как видно из рис. 1.13) несовершенства сварного соединения приводящих к появлению избыточных потерь. Кроме того, так как в общем случае диаметры модовых пятен свариваемых воло-

кон не равны друг другу, то избыточные потери возникают и при высоком качестве соединения волокон.

Эти потери ($\alpha_w(\text{дБ}) = 4.34 (\Delta w/w)^2 (1.4)$) пропорциональны квадрату относительной разности диаметров модовых пятен свариваемых волокон. По международному стандарту G.652 относительные вариации диаметра модовых пятен не превышают 10 %. Полагая $\Delta w/w = 0.1$, получаем $\alpha_w(\text{дБ}) = 0.043$ дБ. Хотя эта величина и меньше 0.05 дБ (требования Ростелекома), однако нет гарантии что вариация диаметра волокна на практике не превысит 10 %. Поэтому окончательный вывод о качестве сварного соединения волокон может быть сделан только после того, как будут проведены прямые измерения потерь в этом соединении.

Наименьших потерь в сварных соединениях волокон удастся добиться при юстировке по сердцевине волокон с коррекцией эксцентриситета. В этом случае потери возникают в основном из-за неравенства диаметров модовых пятен свариваемых волокон. Допуск на диаметр модовых пятен у большинства ведущих компаний производителей на $\lambda = 1310$ нм составляет ± 0.5 мкм. Соответственно, в самом худшем случае диаметры модовых пятен свариваемых волокон могут различаться на 1 мкм. Потери при этом составят величину 0.04 дБ. Компании Corning и Hitachi уменьшили этот допуск до ± 0.4 мкм и, соответственно, снизили эти потери до 0.025 дБ.

Допуск на диаметр модовых пятен ± 0.5 мкм соответствует международному стандарту ITU-T G. 652, согласно которому он не должен превышать 10 %. Это означает, что максимальная разница диаметров модовых пятен у волокон разных производителей не превышает 10 %, и, соответственно, возникающие из-за этого потери не превышают 0.04 дБ.

Однако в оптический кабель, как правило, укладываются волокна какой-то одной производящей компании. При соединении строительных длин таких кабелей максимальная разница диаметров модовых пятен получается значительно меньше. Так, например, для волокон компании Hitachi относительная флуктуация диаметра модовых пятен составляет величину всего лишь порядка 1 % (рис. 1.14), а возникающие из-за этого потери не превышают 0.004 дБ.

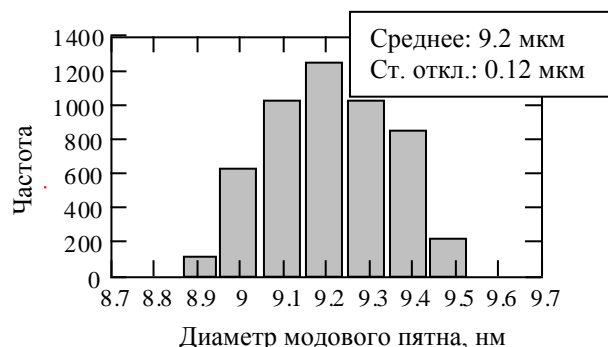


Рис. 1. 14. Гистограмма распределения диаметра модовых пятен в SM волокнах компании Hitachi на длине волны 1310 нм.

На практике средняя величина потерь при сварке волокон одной производящей компании составляет < 0.05 дБ и определяется совокупностью факторов: таких как плохой скол, грязь на торцевой или боковой поверхности волокон, эллиптичность и флуктуации диаметра оболочки, погрешности в настройке режима сварочного аппарата и т.д.

§ 13. Потери в разъёмных соединениях волокон

Торцевые поверхности одномодовых волокон в оптических разъёмах имеют сферическую форму с радиусом закругления 10...25 мм для PC разъёмов (PC – Physical Contact) и 5...12 мм для APC- разъёмов (APC – Angled Physical Contact). В соединённом состоянии торцы стыкуемых наконечников прижимаются друг к другу с определенным усилием (обычно 8...12 Н). Возникающая при этом эластичная деформация наконечников приводит к появлению оптического контакта (рис. 1.15).

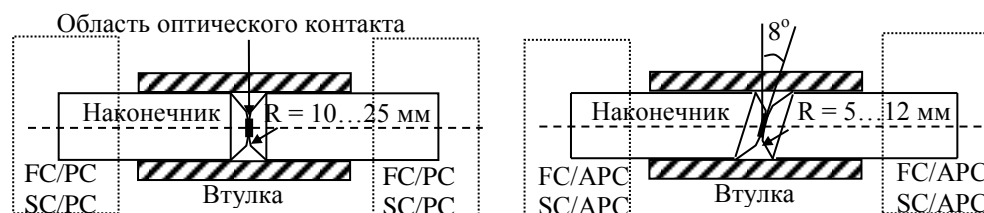


Рис. 1.15. Схема образования оптического контакта в месте соединения наконечников разъёмов PC и APC.

Две поверхности считаются находящимися в оптическом контакте, если расстояние между ними много меньше длины волны света. При этом, чем меньше расстояние между этими поверхностями, тем меньше будет и величина отраженного от них света. Качество оптического контакта определяется качеством шлифовки и последующей полировки торцевой поверхности волокон. Для РС разъемов ETSI рекомендует величину коэффициента френелевского отражения от места оптического контакта менее – 35 дБ. Стандартная шлифовка, как правило, обеспечивает – 40 дБ.

Многие поставщики оптических коммутационных шнуров предлагают разъемы со специальной шлифовкой, обеспечивающие коэффициент отражения менее – 55 дБ. Это так называемые разъемы Супер- и Ультра-РС. На практике такая шлифовка оказывается бесполезной, так как буквально после нескольких подключений коэффициент отражения увеличивается до величины свойственной обычному РС разъему. Происходит это из-за неизбежного появления пыли и микроцарапин на торцевых поверхностях разъемов.

Поэтому, когда требуется коэффициент отражения не хуже – 55 дБ, разумнее использовать APC разъемы. В APC разъемах нормаль к контактной поверхности наклонена к оси наконечника под углом 8° (рис. 1.15). В такой конструкции коэффициент отражения не превышает – 60 дБ как в соединенном, так и в разъединенном состоянии. В соединенном состоянии типичным является значение от – 70 до – 80 дБ.

Таким образом, в РС и APC разъемах только ничтожно малая часть излучения отражается от места соединения торцов волокон. Поэтому потери, вызванные отражением света, пренебрежимо малы. Если пренебречь так же потерями, возникающими из-за дефектов на торцах волокон, то основной причиной вызывающей потери в месте соединения разъемов является смещение сердцевин соединяемых волокон относительно друг друга вследствие эксцентриситета (неконцентричности) как самих волокон, так и деталей крепления разъема (рис. 1.16).

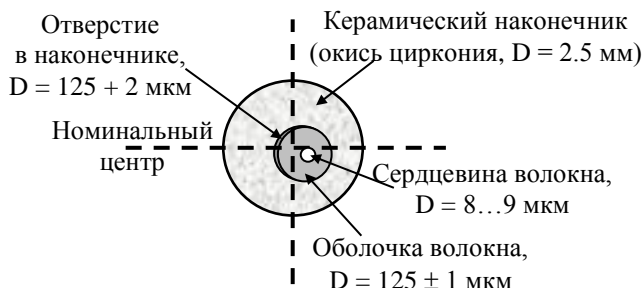


Рис. 1.16. Сложение разных видов неконцентричности в наконечнике.

Оценим допустимую величину смещения сердцевин волокон исходя из того, что потери в разъемах, в соответствии рекомендациями ETSI, не должны превышать 0.5 дБ. Зависимость этих потерь от величины смещения сердцевин d описывается формулой (1.6): α_d (дБ) = $4.34 (d/w)^2$. Учитывая, что диаметр модового поля $w \approx 10$ мкм, получаем, что величина смещения сердцевин друг относительно друга должна быть меньше 3.4 мкм.

Потери принято относить к одному определенному разъему (несмотря на то, измеряемой величиной являются потери в месте соединения двух разъемов). Так можно делать, когда потери в месте соединения разъемов обусловлены только смещением сердцевин волокон, и один разъем при этом образцовый (его также называют материнским или мастер-разъемом). Образцовый разъем А выделен среди других разъемов тем, что в нем ось сердцевины волокна совпадает с номинальным центром разъема (рис. 1.17).

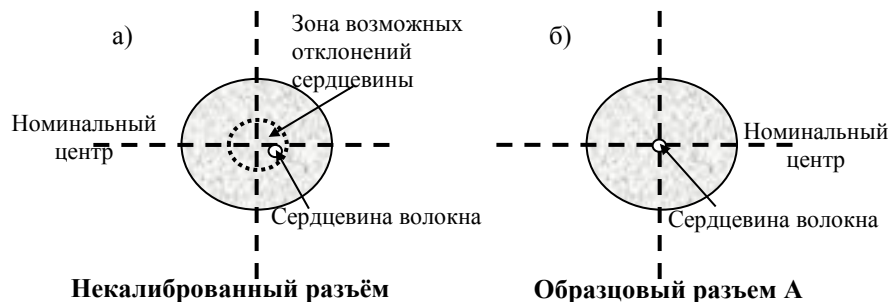


Рис. 1.17. Местоположение сердцевин волокна в наконечниках: (а) - в типовом (некалиброванном) разъеме и (б) - в образцовом разъеме А.

Все измерения при изготовлении оптических шнуров выполняются только относительно образцового разъёма. Данные именно этих измерений и указываются в каталогах всех производителей, а также на упаковке готовых изделий. Но при использовании оптических шнуров типовой разъем стыкуется не с образцовым разъемом, а с таким же типовым разъемом (любой с любым). В таких соединениях смещения сердцевин получаются больше почти в 1.5 раза, а потери (в дБ) увеличиваются при этом примерно в 2 раза (рис. 1.18).

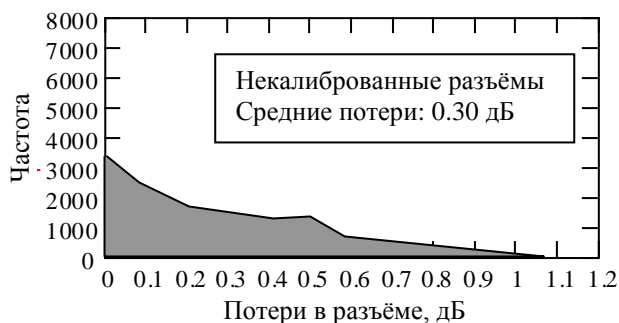


Рис. 1.18. Гистограмма распределения потерь вносимых при соединении типовых (некалиброванных) разъемов (любого с любым).

Для компенсации негативного влияния эксцентриситета применяются различные способы регулировки (настройки) разъемов. Наибольшее распространение получила технология, в которой используется образцовый разъем Б (со смещенной сердцевиной волокна). В образцовом разьеме Б сердцевина волокна смещена относительно номинального центра (параметры оговорены в спецификации ИЕС) примерно на половину радиуса зоны возможных отклонений сердцевин (рис. 1.19).

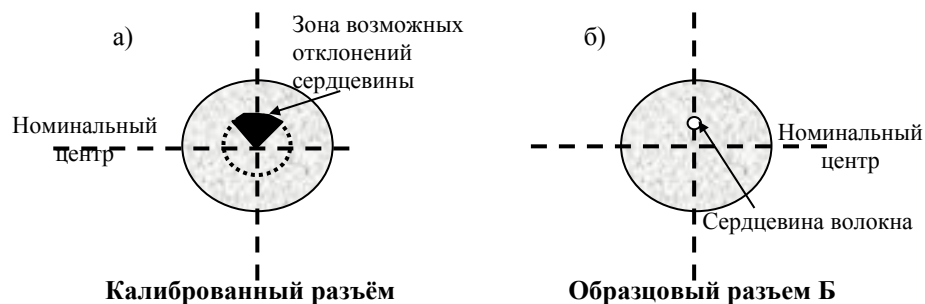


Рис. 1.19. Местоположение сердцевин волокна в наконечниках: (а) - в некалиброванном разьеме и (б) - в образцовом разьеме Б.

Потери в месте соединения наконечников стандартного разьема и образцового разьема Б, как легко видеть из рис. 1.19, будут изменяться при вращении одного из наконечников вокруг продольной оси. Своих экстремальных значений эти потери достигают в положениях, где совпадают азимуты их сердцевин. Таким образом, имеется возможность при изготовлении разьема настраивать его на минимум потерь.

Настройка разьема осуществляется следующим образом. Вращая изготовленный наконечник вокруг продольной оси, определяют его положение относительно образцового, при котором достигается наименьший уровень вносимых потерь, после чего наконечник фиксируется в корпусе разьема. Наконечник может быть вставлен в корпус разьема в одном из четырех положений (со смещением вокруг оси на 90°). В результате сердцевина волокна попадает в строго определенный (относительно корпуса разьема) квадрант торцевой поверхности (рис. 1.19). При соединении откалиброванных таким способом разьемов (любого с любым) потери получаются в среднем примерно в два раза меньше (рис. 1.20).

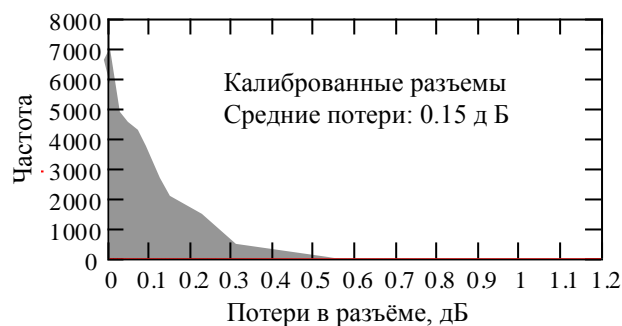


Рис. 1.20. Гистограмма распределения потерь вносимых при соединении калиброванных разъемов (любого с любым).

Достоинство этого способа настройки разъемов, кроме эффективного уменьшения потерь (таблица № 1.3), заключается также и в том, что используются стандартные наконечники, и что стоимость таких калиброванных разъемов увеличивается незначительно. Этот способ настройки специфицирован ИЕС и поддержан большинством крупных производителей, что обеспечивает совместимость и взаимозаменяемость изготавливаемых ими разъемов.

Таблица № 1.3. Потери, вносимые при соединении разъемов.

Параметр	Некалиброванные разъемы		Калиброванные разъемы	
Потери при соединении с образцовым разъемом, дБ.	Среднее	0.20	Среднее	0.14
	94 %	< 0.30	95 %	< 0.30
	97 %	< 0.40	99 %	< 0.40
Потери при соединении “любой с любым”, дБ.	Среднее	0.30	Среднее	0.15
	60 %	< 0.30	94 %	< 0.30
	85 %	< 0.50	98 %	< 0.40
	Макс	1.2	Макс	0.71

В настоящее время на телекоммуникационных сетях в Европе наиболее часто применяются некалиброванные разъемы со специфицированным значением вносимых потерь (относительно образцового разъема) не более 0.5 дБ. Однако поскольку с ростом числа телекоммуникационных сетей возрастает и количество точек соединений, то для снижения величины полных потерь все чаще применяются калиброванные разъемы.

§ 14. Погрешности при измерении потерь с помощью рефлектометра

Показания рефлектометра пропорциональны десятичному логарифму отношения мощности импульса P_z , рассеянного назад на расстоянии z от начала линии, к мощности импульса P_0 , рассеянного назад в начале линии. Это отношение зависит не только от коэффициента пропускания линии $T(z)$, но и от величин коэффициентов рассеяния S_0 - в начале линии и S_z - на расстоянии z от начала линии:

$$P_z/P_0 = T^2(z) (S_z/S_0). \quad (1.8)$$

Двойка в показателе степени коэффициента пропускания возникает из-за того, что свет проходит через участок линии длиной z дважды: в качестве прямой волны и в качестве обратной (рассеянной назад) волны. Поэтому для того, чтобы рефлектометр показывал величину потерь непосредственно в децибелах

$$\alpha(z) = -10 \log(T(z)), \quad (1.9)$$

в его логарифмической шкале используется в два раза меньший коэффициент. С помощью (1.8) и (1.9) получаем

$$5 \log(P_0/P_z) = \alpha(z) + 5 \log(S_0/S_z). \quad (1.10)$$

Таким образом, показания рефлектометра оказываются пропорциональными величине потерь в линии (измеряемых в дБ) и логарифму отношения коэффициентов рассеяния в точке $z = \text{const}$ и в точке $z = 0$. Следовательно, показания рефлектометра будут изменяться не только из-за изменения величины потерь в линии, но и из-за изменения коэффициента рассеяния. Появление этой систематической ошибки обусловлено тем, что с помощью рефлектометра потери измеряются не прямо по отношению прошедшей через линию мощности к мощности на входе в линию, а косвенно по отношению мощностей, рассеянных назад в начале и в конце линии.

Так, если коэффициент рассеяния постоянен вдоль линии ($S_z = S_0$), то $\log(S_z/S_0) = 0$, и показания рефлектометра будут прямо пропорциональны величине потерь в линии (в дБ). Однако в общем случае коэффициент рассеяния не постоянен вдоль линии ($S_z \neq S_0$), и $\log(S_z/S_0) \neq 0$, и, следовательно, вариации коэффициента рассеяния приводят к появлению систематической ошибки.

Вариации коэффициента рассеяния возникают в основном из-за вариаций диаметра модового пятна, так как коэффициент рассеяния обратно пропорционален диаметру модового пятна. Такая зависимость коэффициента рассеяния обусловлена тем, что числовая апертура волокна NA обратно пропорциональна диаметру модового пятна (выражение 1.2). При этом, чем меньше диаметр модового пятна, тем больше апертура волокна, и тем большая доля мощности претерпевшей релеевское рассеяние в волокне (в полный телесный угол 4π) попадет назад в моду волокна.

Полагая в (1.10), что отношение коэффициентов рассеяния обратно пропорционально квадратам отношения диаметров модовых пятен ($S_z/S_0 = (w_0/w_z)^2$), и учитывая, что $\Delta w = w_z - w_0 \ll w = (w_0 + w_z)/2$, находим:

$$5 \log(P_0/P_z) = \alpha(z) + 4.34 \Delta w/w. \quad (1.11)$$

Таким образом, вариации диаметра модового пятна приводят к появлению систематической погрешности пропорциональной относительной величине изменения диаметра модового пятна ($\Delta w/w$). Как видно из (1.4) потери в волокне также зависят $\Delta w/w$. Выделим эту компоненту из полных потерь в линии в явном виде

$$\alpha(z) = \alpha_0(z) + 4.34 (\Delta w/w)^2. \quad (1.12)$$

Подставив (1.12) в (1.11), получим выражение, описывающее зависимость отклика рефлектометра от относительной величины вариаций диаметра модового пятна.

$$5 \log(P_0/P_z) = \alpha(z) + 4.34 (\Delta w/w)^2 + 4.34 \Delta w/w. \quad (1.13)$$

Характерно, что в погрешность отношение $\Delta w/w$ входит в первой степени, а в потери во второй степени. Поэтому знак потерь всегда положительный, а знак погрешности может быть как положительным, так и отрицательным, и приводить к появлению как отрицательных, так и положительных всплесков в рефлектограмме. Кроме того, так как $\Delta w/w \ll 1$, то третий линейный член в (1.13) больше второго квадратичного. Поэтому вариации потерь в рефлектограмме, вызванные вариациями диаметра модового пятна, будут маскироваться более сильными вариациями коэффициента рассеяния.

В ряде практически важных случаев погрешность, обусловленная вариациями диаметра модового пятна, не является определяющей. Например, при измерении коэффициентов затухания в строительных длинах оптических кабелей, где вариации диаметра модового пятна, как правило, малы. Или при измерении потерь в длинной линии ($\alpha > 10$ дБ), когда погрешность измерений будет обусловлена нелинейностью шкалы рефлектометра (0.02 дБ на каждый децибел измеренных потерь).

В то же время, так как диаметры модовых пятен волокон в месте их сварки могут различаться до 10 %, то линейный член в (1.13) может достигать значительной величины (~ 0.4 дБ). Поэтому одной рефлектограммы оказывается недостаточно, чтобы измерить величину потерь в местах соединения волокон. С её помощью можно только проконтролировать наиболее плохие соединения волокон.

Систематическую погрешность, возникающую в рефлектограмме из-за вариаций диаметра модового пятна в линии можно исключить, если воспользоваться тем фактом, что знак этой погрешности меняется при изменении направления распространения света, а знак потерь не зависит от направления распространения света. Для этого необходимо измерить рефлектограммы с обеих сторон линии и обработать их специальным образом. Схема, поясняющая алгоритм обработки рефлектограмм, измеренных с обеих сторон линии, изображена на рис. 1. 21.

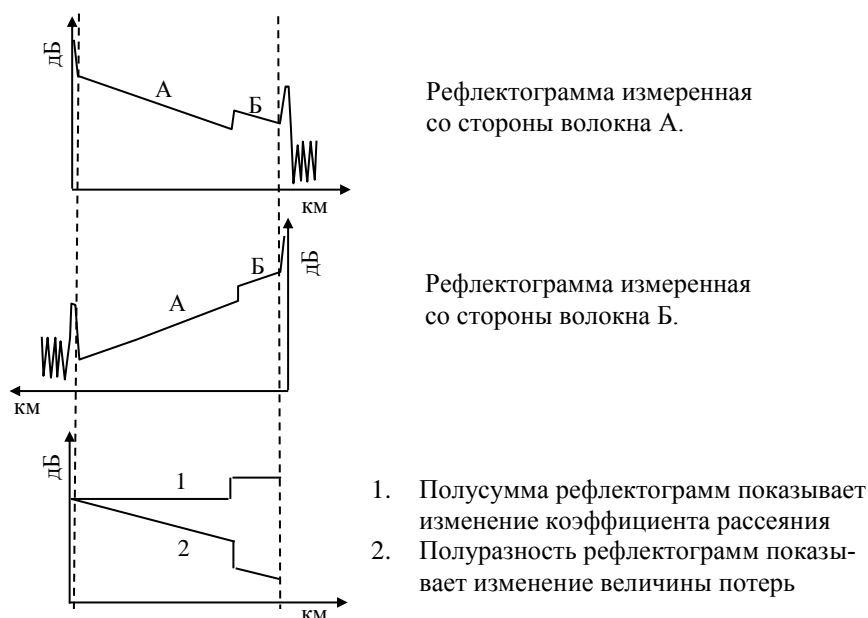


Рис. 1.21. Схема, поясняющая алгоритм обработки рефлектограмм, измеренных с обеих сторон линии.

С помощью рефлектометра можно измерить не только величину потерь в строительных длинах оптических кабелей и в местах сварки волокон, но и величину полных потерь в линии. Однако схема измерений при этом усложняется, так как для устранения влияния отраженного излучения на входе и выходе линии необходимо установить дополнительные катушки с волокном. Поэтому измерения величины полных потерь в линии обычно осуществляют с помощью мультиметров.

§ 15. Погрешности при измерении потерь с помощью мультиметров

Схема измерения полных потерь в линии связи с помощью мультиметров, изображена на рис. 1.22. Фотоприемный блок мультиметра, расположенного в пункте А, используется для измерения опорного значения мощности излучения лазерного блока, а фотоприемный модуль мультиметра, расположенного в пункте Б – для измерения мощности излучения прошедшего через линию связи.

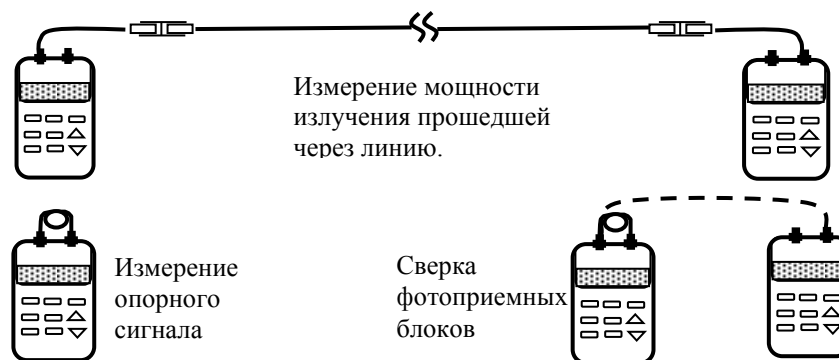


Рис. 1.22. Измерение потерь в ВОЛС с помощью мультиметров.

Вначале оператор, находящийся в пункте А, соединив вход и выход мультиметра оптическим шнуром, измеряет величину опорного сигнала. Затем он отсоединяет разъем шнура от розетки фотоприемного блока и подсоединяет его через розетку к разъему на входе в линию. Оператор, находящийся в пункте Б, подключает с помощью оптического шнура свой мультиметр к выходу линии и измеряет величину сигнала. Затем с помощью оптического телефона (или каким-либо другим способом) он сообщает результат измерений оператору, находящемуся в пункте А. Величина потерь (с учетом разности показаний фотоприемных блоков полученных в процессе их сверки) рассчитывается по формуле

$$\alpha(\text{дБ}) = \text{опорный сигнал в дБм} - \text{сигнал в дБм}. \quad (1.14)$$

При такой схеме измерений погрешность возникает в основном последующим причинам:

- нестабильность источника излучения
- нелинейность шкалы мультиметра
- разная чувствительность фотоприемных блоков на разных концах линии
- отклонения величины потерь в разъёмах от их номинального значения

Кратковременная нестабильность лазерного блока (например, по паспортным данным AQ 2150) равна 0.02 дБ, реально же она не превышает цену деления его шкалы (0.01 дБ). Стабильность светодиодного блока выше, чем у лазерного, однако при его использовании величина потерь в волокне оказывается завышенной примерно на 5 % из-за относительно широкой полосы излучения светодиода (50...100 нм).

Нелинейность мультиметра в диапазоне от 0 до 30 дБ также не превышает его цены деления. Погрешность, возникающая из-за разной чувствительности фотоприемных блоков мультиметров, устраняется путем сверки их показаний до начала измерений потерь в линии и после их окончания. Наибольшая же погрешность возникает из-за того, что не известна точно величина потерь в разъёмах.

Как уже говорилось, значение потерь в разъёмах, указанное его изготовителем, получено при измерении потерь в месте соединения этого разъёма с образцовым разъёмом. В нашем случае ни один из разъёмов не является образцовым. При соединении некалиброванных разъёмов “любого с любым” величина потерь в месте соединения разъёмов не определяется однозначно номинальной величиной потерь в этих разъёмах, и может изменяться на величину стандартного отклонения.

Величина стандартного отклонения для распределений, представленных на рис. 1.18 и 1.20, порядка их среднего значения. Соответственно для некалиброванных разъёмов стандартное отклонение будет равно 0.3 дБ, а для калиброванных разъёмов 0.15 дБ (см. таблицу № 1.3). Таким образом, погрешность измерений полных потерь в линии ограничивается неопределённостью величины потерь в разъёмах. С учетом того, что в линии всего два таких разъёма, эта погрешность будет равна 0.4 дБ при использовании некалиброванных разъёмов и 0.2 дБ при использовании калиброванных разъёмов.

Хотя в одномодовом волокне потери не зависят от направления распространения света, принято проводить измерения потерь в линии в обоих направлениях. Таким образом, удастся исключить некоторые систематические погрешности. Например, если по ошибке к одномодовому волокну (в оптическом кабеле) был приварен пигтейл из многомодового волокна. Тогда потери в линии будут зависеть от направления распространения света (т.е. различаться больше чем погрешность измерений), так как коэффициент передачи со стороны одномодового волокна больше, чем со стороны многомодового волокна. Или, например, усреднив результаты измерений потерь во встречных направлениях, можно исключить систематическую ошибку, возникающую из-за разной чувствительности фотоприемных блоков мультиметров, размещенных на разных концах линии.

Раздел IV. Хроматическая дисперсия

§ 16. Понятие дисперсии в оптической связи

В оптике слово «дисперсия» обычно связывают с зависимостью показателя преломления от длины волны, а в оптической связи с явлением уширения световых импульсов после их прохождения через дисперсионную среду. В одномодовых волокнах уширение импульсов вызывается двумя эффектами – хроматической дисперсией (D) и поляризационной модовой дисперсией (PMD).

Как правило, превалирует хроматическая дисперсия, а поляризационная модовая дисперсия начинает проявляться при скоростях передачи выше 10 Гбит/с и расстоянии между ретрансляторами в несколько сот километров. Поэтому рассмотрим вначале хроматическую дисперсию. Хроматическая дисперсия возникает из-за того, что спектр оптического сигнала имеет конечную ширину, и разные спектральные компоненты сигнала движутся в волокне с разной скоростью (рис. 1.23).

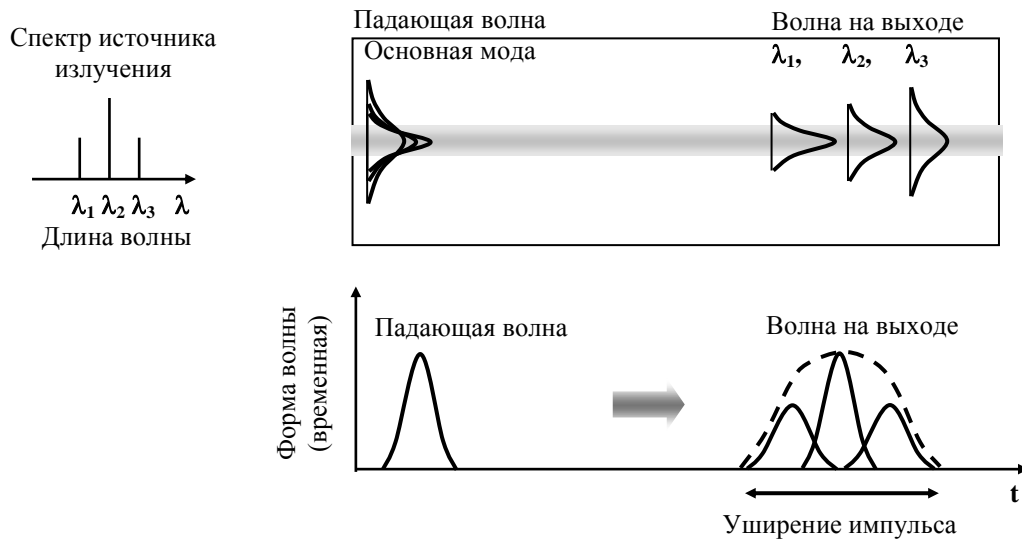


Рис. 1.23. Материальная и волноводная дисперсии в одномодовом волокне

Примерный ход запаздывания импульсов $\tau(\lambda)$ и коэффициента дисперсии $D(\lambda)$ от длины волны излучения показан на рис. 1.24. Коэффициент дисперсии ($D(\lambda) = (1/L) \Delta\tau/\Delta\lambda$) рассчитывается по зависимости удельного запаздывания $\tau(\lambda)/L$ от длины волны излучения, где L – длина волокна.

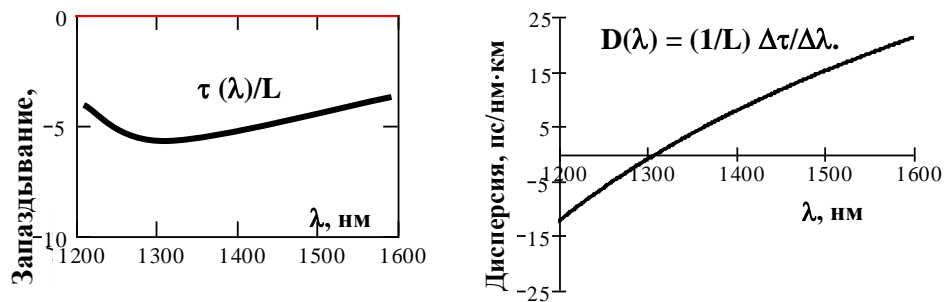


Рис. 1.24. Зависимость запаздывания $\tau(\lambda)$ и коэффициента дисперсии $D(\lambda)$ в SM волокне от длины волны λ .

Изменение ширины импульсов (в отсутствие потерь или усиления) неизбежно сопровождается изменением их пиковой амплитуды (рис. 1.25). При этом в первом приближении сохраняется произведение амплитуды импульса на его ширину: $P_1\Delta t_1 = P_2\Delta t_2$ (площадь импульса не меняется). Изменение пиковой амплитуды импульсов принято характеризовать величиной штрафа по мощности: $q = 10 \log(P_1/P_2)$. Это же понятие удобно использовать и для характеристики относительной величины уширения импульсов $q = 10 \log(P_1/P_2) = 10 \log(\Delta t_2/\Delta t_1)$. При этом за пороговое значение штрафа по мощности часто принимают уровень $q = 2$ дБ, что соответствует увеличению ширины импульса примерно в 1.6 раза.



Рис. 1.25. Изменение ширины импульсов сопровождается изменением их пиковой мощности и характеризуется штрафом по мощности: $q = 10 \log(P_1/P_2) = 10 \log(\Delta t_2/\Delta t_1)$.

§ 17. Коэффициент наклона и длина волны нулевой дисперсии

На длине волны нулевой дисперсии λ_0 запаздывание минимально (рис. 1.24), и в окрестности этой точки зависимость запаздывания от времени можно приближенно описать положительной параболой

$$\tau(\lambda)/L = (S/2)(\lambda - \lambda_0)^2. \quad (1.15)$$

В этом приближении коэффициент дисперсии $D(\lambda)$ линейно зависит от длины волны

$$D(\lambda) = (1/L) \Delta\tau(\lambda) / \Delta\lambda = S(\lambda - \lambda_0). \quad (1.16)$$

Знак наклона коэффициента дисперсии (S) положительный. Знак коэффициента дисперсии при $\lambda > \lambda_0$ положительный, а при $\lambda < \lambda_0$ отрицательный.

Размерность коэффициента дисперсии определяется исходя из размерности элементов в формуле: $D(\lambda) = (1/L) \Delta\tau/\Delta\lambda$. Приращение запаздывания $\Delta\tau$ обычно измеряется в пикосекундах ($1\text{ пс} = 10^{-12}\text{ с}$), длина волокна L в километрах, ширина спектрального интервала $\Delta\lambda$ в нанометрах ($1\text{ нм} = 10^{-9}\text{ м}$). Отсюда получаем, что коэффициент дисперсии измеряется в единицах $[\text{пс}/\text{нм}\cdot\text{км}]$. Соответственно, наклон коэффициента дисперсии $S = D(\lambda) / (\lambda - \lambda_0)$ измеряется в единицах $[\text{пс}/\text{нм}^2\cdot\text{км}]$.

Терминология: Параметр $D(\lambda)$ следует понимать не как дисперсию, а как коэффициент дисперсии или удельную дисперсию (в соответствии с его размерностью). Однако в литературе параметр $D(\lambda)$ для краткости принято называть дисперсией. Прилагательное в термине хроматическая дисперсия также часто опускается. Когда же говорят о дисперсии в линии, то употребляют термин полная дисперсия.

§ 18. Материальная и волноводная дисперсии

Хроматическая дисперсия представляет собой сумму материальной и волноводной дисперсий: $D = D_m + D_w$. Пояснить это можно следующим образом. Как уже говорилось, хроматическая дисперсия возникает из-за того, что скорость распространения волны меняется при изменении длины волны. В однородной среде скорость распространения волны может изменяться только из-за зависимости показателя преломления среды от длины волны, что и приводит к появлению **материальной дисперсии**. В волокне волна распространяется в двух средах – частично в сердцевине, а частично кварцевой оболочке, и для неё показатель преломления принимает некое среднее значение между значением показателя преломления сердцевины и кварцевой оболочки (рис. 1.26).

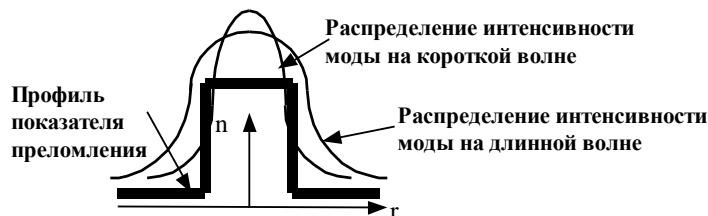


Рис. 1.26. Волноводная дисперсия возникает из-за того, что усредненный по диаметру моды показатель преломления изменяется при изменении длины волны.

Этот средний показатель преломления может изменяться по двум причинам. Во-первых, из-за того, что показатели преломления сердцевины и кварцевой оболочки зависят от длины волны (примерно одинаково). Эта зависимость приводит к появлению **материальной дисперсии**. Во-вторых, потому, что при изменении длины волны, меняется глубина проникновения поля в кварцевую оболочку и, соответственно, меняется среднее значение показателя преломления (даже если значения показателей преломления сердцевины и кварцевой оболочки не меняются). Это чисто волноводный эффект и поэтому возникающую из-за него дисперсию называют **волноводной**.

Волноводная дисперсия зависит от формы профиля показателя преломления. В SM волокнах форма профиля показателя преломления ступенчатая с относительно большим диаметром сердцевины ($\sim 8.3\text{ мкм}$) и малым скачком показателя преломления ($\sim 0.34\%$). В DS и NZDS волокнах длина волны нулевой дисперсии смещена по сравнению с SM волокнами в длинноволновую сторону.

Для того чтобы сместить длину волны нулевой дисперсии, необходимо уменьшить либо материальную, либо волноводную составляющую хроматической дисперсии. Сделать это можно, изменяя состав примесей, вводимых в сердцевину. Материальная дисперсия слабо зависит от состава легирующих примесей. В больших пределах меняется волноводная дисперсия (за счет изменения формы профиля показателя преломления) (рис. 1.27).

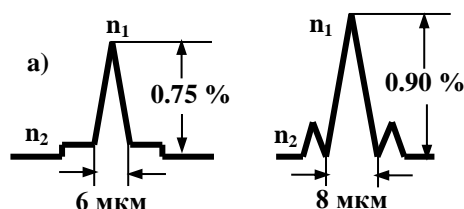


Рис. 1.27. Профили показателя преломления DS и NZDS волокон
а) Треугольник на пьедестале
б) Трезубец (или W).

Зависимости от длины волны хроматической $D(\lambda)$, материальной $D_M(\lambda)$ и волноводной $D_B(\lambda)$ дисперсий в DS волокне изображены на рис. 1.28. Хроматическая дисперсия рассчитывалась через длину волны нулевой дисперсии $\lambda_0 = 1550$ нм и наклон дисперсионной кривой $S_0 = 0.080$ пс/нм²·км (при $\lambda = \lambda_0$) по интерполяционной формуле: $D(\lambda) = \lambda_0 S_0 \ln(\lambda/\lambda_0)$ (G. 653).

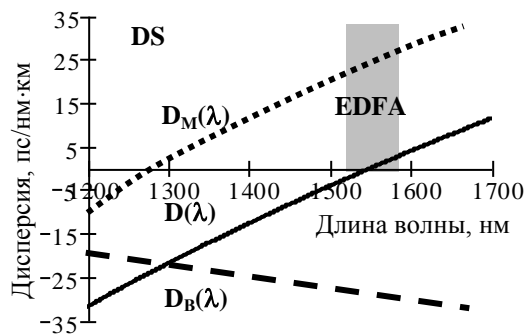


Рис. 1.28. Хроматическая дисперсия $D(\lambda)$ как сумма материальной $D_M(\lambda)$ и волноводной дисперсий $D_B(\lambda)$ в волокне со смещенной дисперсией (DS).

Как видно из рис. 1.28, длина волны нулевой дисперсии в DS волокнах лежит в третьем окне прозрачности (примерно посередине полосы усиления эрбиевого оптического усилителя). В NZDS волокнах она смещена так, что не попадает в полосу усиления EDFA. Так в NZDS волокнах с положительной дисперсией длина волны нулевой дисперсии лежит ниже 1500 нм, а в NZDS волокнах с отрицательной дисперсией выше 1600 нм.

Раздел V. Механизмы уширения и сжатия импульсов

§ 19. Чирпинг эффект из-за хроматической дисперсии

Как уже говорилось, в оптической связи термин дисперсия связывается с уширением импульсов. Однако хроматическая дисперсия может приводить не только к уширению импульсов, но и к их сжатию. Рассмотрим, например, линию, состоящую из двух участков волокон одинаковой длины и одинаковой по модулю, но противоположной по знаку хроматической дисперсией. Так как полная дисперсия такой линии равна нулю, то импульс, уширившийся на первом участке линии, на втором участке неизбежно должен сжаться до начальной величины (рис. 1.29).

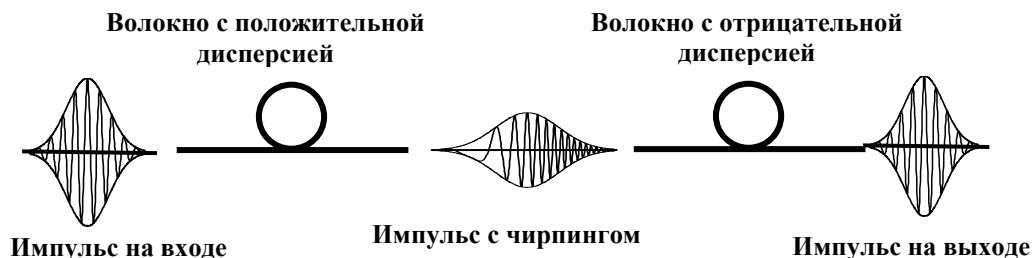


Рис. 1.29. Прохождение импульса света через два участка волокна одинаковой длины и с одинаковой по модулю, но противоположной по знаку хроматической дисперсией.

Чтобы понять, почему в дисперсионной среде может происходить сжатие импульсов, вспомним, что импульс характеризуется (во времени) не только длительностью и формой, но зависимостью частоты несущей от времени (чирпингом). Импульс на входе в линию (рис. 1.29) промодулирован только по амплитуде, и частота его несущей не зависит от времени (чирпинга нет).

Импульс без чирпинга, пройдя через первый отрезок волокна с положительной дисперсией, приобретет дополнительную частотную модуляцию (положительный чирпинг) и при этом уширится. Уширится импульс потому, что в волокне с дисперсией разные спектральные компоненты импульса движутся с разной скоростью. Положительный чирпинг импульс приобретает потому, что при положительной дисперсии длинноволновые компоненты запаздывают сильнее, чем коротковолновые. Если бы первый отрезок волокна обладал отрицательной дисперсией, то импульс бы все равно уширился, но приобрел бы при этом отрицательный чирпинг. Т. е. импульс без чирпинга уширяется независимо от знака дисперсии волокна.

Однако, как видно из второй половины рис. 1.29, если импульс обладает чирпингом, и знак дисперсии в волокне противоположен знаку чирпинга в импульсе, то импульс сжимается. Так на выходе из первого волокна импульс уширился и приобрел положительный чирпинг, а во втором во-

локне (с отрицательной дисперсией) он начал сжиматься. Сжатие импульса происходит до тех пор, пока не исчезнет чирпинг и импульс не сожмется до начальной величины. Если же увеличить длину второго волокна, то импульс в дальнейшем начнет расширяться, приобретая при этом отрицательный чирпинг.

§ 20. Ширина спектра импульсов с чирпингом

Сжатие импульса можно объяснить и на спектральном языке. Как показано на рис. 1.30 при той же ширине спектра длительность импульса без чирпинга меньше длительности импульса с чирпингом. Поэтому про импульс с чирпингом говорят, что он не фурье-уширен - произведение ширины спектра на длительность импульса больше, чем это следует из преобразования фурье.

Понять это можно, сравнив импульсы на входе и выходе первого отрезка волокна с дисперсией (рис.1.29). Уширение импульса и появление у него чирпинга, как уже говорилось, обусловлено разной скоростью распространения его спектральных компонент. Это приводит только к появлению зависящего от частоты фазового сдвига между амплитудами его спектральных составляющих. Сам же спектр, т.е. модули этих амплитуд, при этом не меняется (рис. 1.30).

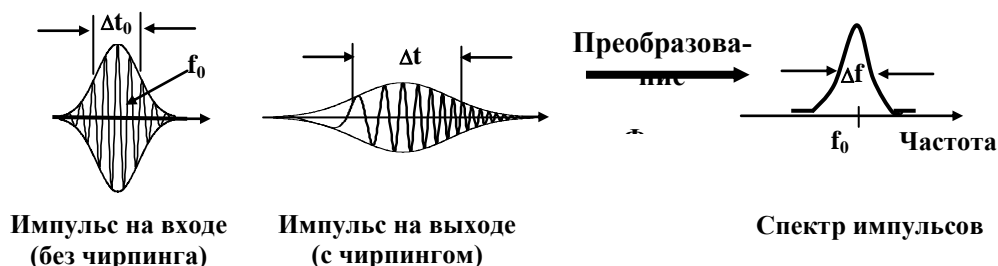


Рис. 1.30. Импульсы и их спектр на входе и на выходе волокна с положительной дисперсией. Импульс на выходе волокна уширился и приобрел чирпинг. Ширина его спектра при этом не изменилась

Теперь становится понятным, почему происходит сжатие импульса во втором волокне (рис. 1.29). На вход второго волокна (с отрицательной дисперсией) поступает импульс с чирпингом (положительным). Этот импульс уширен не по фурье – у него длительность больше, чем у импульса с такой же шириной спектра, но без чирпинга. После того как импульс пройдет через волокно, спектр его не изменится, а чирпинг исчезнет. Импульс без чирпинга должен быть уширен по фурье, и, следовательно, его длительность должна уменьшиться.

§ 21. Чирпинг эффект при прямой модуляции лазера

DFB лазеры (Distributed Feedback Laser) с прямой модуляцией излучения обладают тем преимуществом, что стоят в несколько раз дешевле лазеров с внешним электроабсорбционным модулятором (рис. 1.31) и обладают в несколько раз большей мощностью излучения. Однако при изменении тока через полупроводниковый диод (прямая модуляция) меняется не только коэффициент усиления диода, но и показатель преломления p/n перехода. Следовательно, меняется частота излучения лазера, т.е. импульсы приобретают чирпинг.

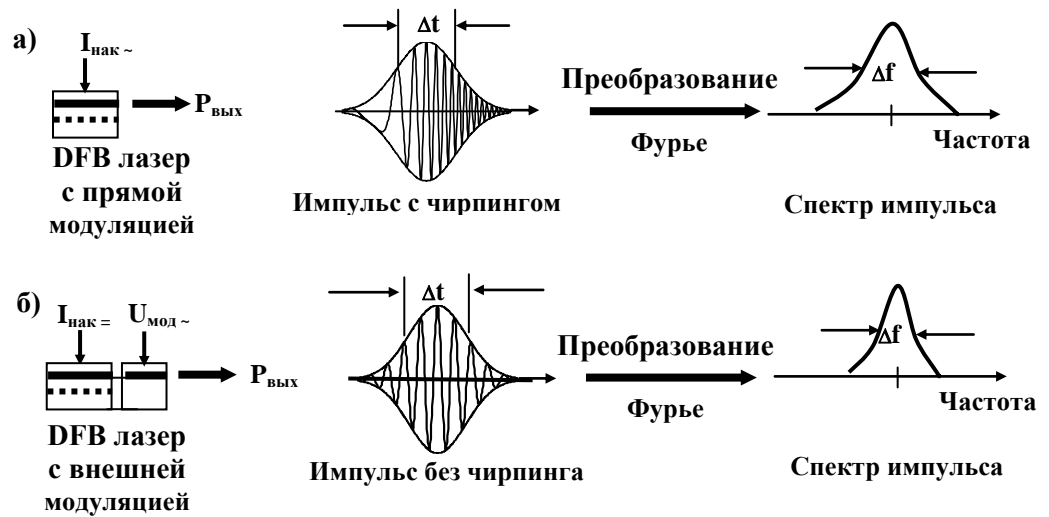


Рис. 1.31. Импульсы и их спектры на выходе DFB лазеров с прямой модуляцией (а) и с внешним модулятором (б). Ширина импульсов одинаковая, но импульс, полученный при прямой модуляции лазера, обладает чирпингом и у него спектр шире.

Характерно, что при скоростях модуляции выше 1 ГГц этот чирпинг имеет положительный знак. Поэтому, при использовании лазеров с прямой модуляцией, и скорости передачи в 2.5 Гбит/с (STM-16) длина ретрансляционного участка в линии с SM волокнами ограничивается дисперсией (рис. 1.32).

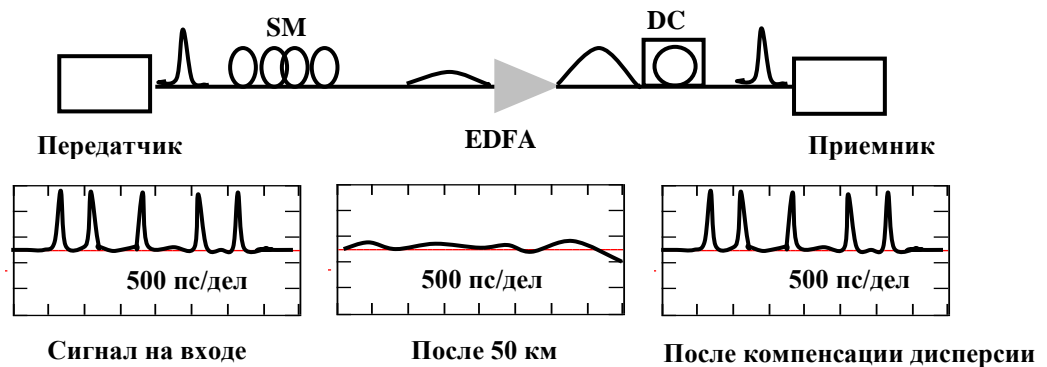


Рис. 1.32. Прохождение импульсов (2.5 Гбит/с (STM-16)) полученных при прямой модуляцией DFB лазера ($\lambda = 1550$ нм) в линии с SM волокном.

Как показано на рис. 1.32, картина восстанавливается (импульсы сжимаются) после того, как они проходят через компенсатор дисперсии (DC волокно с отрицательной дисперсией). Однако каждый компенсатор дисперсии вносит большие потери (3...9 дБ), и в линию приходится включать оптический усилитель, что сводит на нет весь экономический эффект, получаемый за счет использования DFB лазеров с прямой модуляцией. Кроме того, использование компенсатора дисперсии представляет и определенную техническую проблему, так как в кольцевых линиях направление маршрута данных и, соответственно, длина компенсируемого участка волокна может изменяться.

Для того, чтобы удовлетворить растущую потребность в недорогих средствах передачи больших объемов информации в городских сетях и сетях средней дальности, были разработаны новые модели волокон с отрицательной дисперсией (MetroCore компании Corning и WideLight компании Pirelli и др.). Применение волокон с отрицательной дисперсией позволяет не только обеспечить высокую скорость передачи данных в этих сетях, но и снизить стоимость комплекта “оборудование + кабель”.

Результаты экспериментальных исследований изменения ширины импульсов (при скорости передачи 2.5 Гбит/с (STM-16)) в SM волокне (положительная дисперсия) и в волокне MetroCore (отрицательная дисперсия) представлены на рис 1.33. Изменение ширины импульсов характеризуется штрафом по мощности: $q = 10 \log(\Delta t_2/\Delta t_1)$, где $\Delta t_2/\Delta t_1$ – отношение ширины импульса в линии к ширине импульса на входе в линию. Видно, что в SM волокне импульсы уширяются и достигают уровня $q = 2$ дБ ($\Delta t_2/\Delta t_1 = 1.6$) на расстоянии порядка 150 км. В то же время в волокне MetroCore по крайней мере до 400 км эти же импульсы не уширяются.

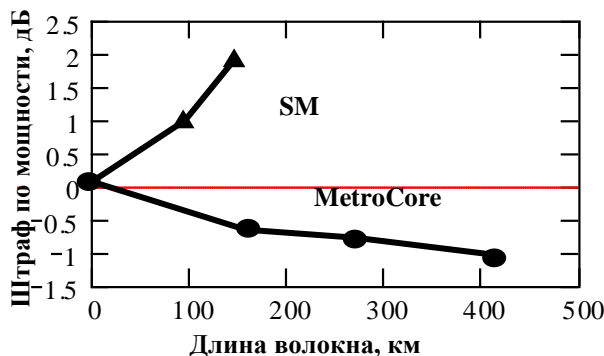


Рис.1.33. Зависимость штрафа по мощности от длины линии с прямой модуляцией DFB лазера ($\lambda = 1557$ нм) со скоростью 2.5 Гбит/с. Линия с волокном MetroCore длиной 418 км содержит 4 эрбиевых оптических усилителя с выходной мощностью 3 дБм.

§ 22. Чирпинг эффект при фазовой самомодуляции волн.

Фазовая самомодуляция волн (SPM - Self-Phase Modulation) обусловлена зависимостью показателя преломления волокна от интенсивности распространяющегося в нем света. При изменении интенсивности волны изменяется показатель преломления волокна, что и приводит к модуляции фазы волны.

Для нашего анализа существенно то, что мощность в импульсе является функцией времени - на заднем фронте импульса мощность увеличивается во времени, а на переднем фронте уменьшается. Поэтому возникающий из-за SPM эффекта дополнительный набег фазы также является функцией времени - на заднем фронте импульса фазовый сдвиг увеличивается во времени, а на переднем уменьшается. А так как частота является производной фазы по времени, то импульс оказывается промодулированным не только по амплитуде, но и по частоте. В результате длина волны несущей на заднем фронте импульса, оказывается короче длины волны несущей на переднем фронте импульса.

Таким образом, SPM эффект приводит к появлению чирпинга и в отсутствие дисперсии в волокне. Характерно, что в отсутствие дисперсии SPM эффект приводит к уширению спектра импульса, но не меняет ширину импульса (рис. 1.34).

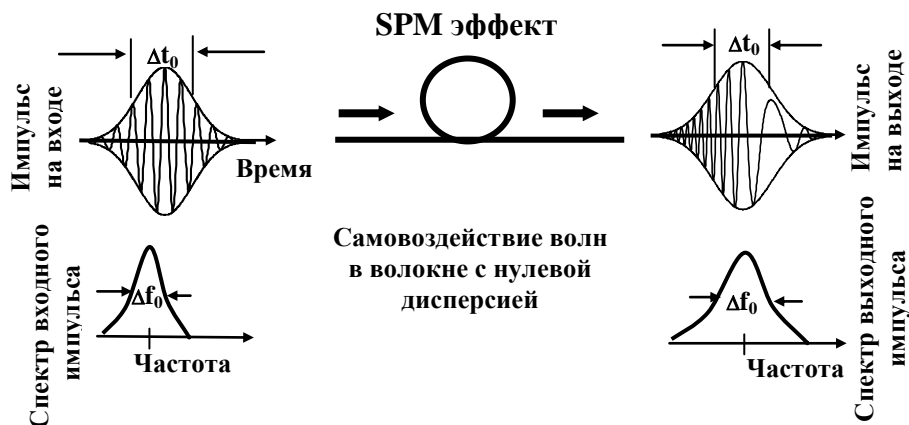


Рис. 1.34. Фазовая самомодуляция волн (SPM эффект) в волокне с нулевой дисперсией. Ширина импульса не меняется, но он приобретает чирпинг (частотную модуляцию). Спектр импульса становится шире.

В волокне с дисперсией SPM эффект приводит одновременно к изменению как ширины спектра, так и ширины импульса. Напомним, что в линейном приближении дисперсия приводит только к изменению ширины импульса, но не меняет ширину его спектра (см. рис. 1.30).

С увеличением мощности излучения в волокне с отрицательной дисперсией ширина импульса увеличивается. Происходит это потому, что благодаря SPM эффекту длина волны несущей вблизи заднего фронта импульса, оказывается короче длины волны вблизи переднего фронта. А так как в волокне с отрицательной дисперсией скорость распространения волн уменьшается с уменьшением длины волны, то задний фронт импульса начинает отставать от переднего фронта, и ширина импульса увеличивается.

В волокне с положительной хроматической дисперсией при увеличении мощности импульс вначале сжимается. Волокно с положительной дисперсией ускоряет задний фронт импульса (с более короткими волнами) и замедляет передний фронт (с более длинными волнами), что и приводит к сжатию импульса.

Сжатие импульса наблюдается при не слишком большой мощности, когда уширение спектра импульса из-за SPM эффекта ещё мало. При большой мощности уширение спектра импульса становится уже основным фактором, определяющим ширину импульса при его распространении в волокне с дисперсией. Такой импульс будет уширяться независимо от знака дисперсии волокна.

При промежуточном значении мощности эффект сжатия импульса (наблюдаемый при малой мощности) может в принципе компенсировать эффект уширения импульса (наблюдаемый при большой мощности), т.е. возможна такая ситуация, когда импульс будет распространяться в волокне, не меняя своей ширины. Действительно, как показывает более точный анализ, можно подобрать такую мощность и форму импульса, что в волокне с положительной дисперсией он будет распространяться, не меняя своей формы. Такие импульсы называются солитонами. Их применение в оптической связи весьма перспективно и в настоящее время сдерживается только стремительным развитием DWDM систем.

Раздел VI. Компенсация полной дисперсии в линии передачи

§ 23. Максимально допустимая величина уширения импульсов

Максимально допустимая величина уширения импульсов определяется из условия, что импульсы перекрываются настолько, что ошибки, возникающие при идентификации битов, превышают допустимую величину (рис. 1.35).

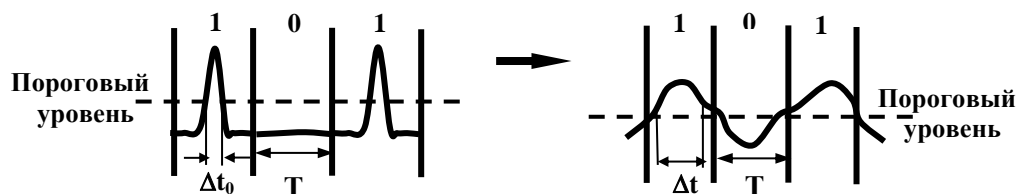


Рис. 1.35. Битовый код 101 на входе и на выходе волокна с большой хроматической дисперсией. На входе в волокно биты 1 и 0 представлены, соответственно, наличием и отсутствием оптической мощности. На выходе из волокна бит 0 представлен уже не нулевой оптической мощностью, и, соответственно, вероятность принять его за бит 1 отлична от нуля.

Для оценки этого расстояния воспользуемся критерием, что ширина импульса $\Delta t = T/4 = 1/(4B)$, где $T = 1/B$ – битовый интервал, B – битовая скорость. При его выполнении 95 % мощности импульса (гауссовой формы) лежит внутри битового интервала. Например, при скорости передачи $B = 2.5$ Гбит/с (STM-16) битовый интервал $T = 1/B = 400$ пс, а допустимая ширина импульса $\Delta t = T/4 = 100$ пс. Начальная же ширина импульсов Δt_0 с учетом того, что, пройдя через волокно, импульсы уширятся должна быть, соответственно, меньше 100 пс.

§ 24. Связь между начальной и конечной шириной импульсов

Конечная ширина импульса выражается через его начальную ширину Δt_0 соотношением:

$$\Delta t = (\Delta t_0^2 + \Delta t_D^2)^{1/2}, \quad (1.17)$$

где Δt_D - уширение импульса. Оно равно произведению коэффициента дисперсии D на длину волокна L и на ширину спектра сигнала $\Delta \lambda$.

$$\Delta t_D = D \text{ (пс/нм·км)} \times L \text{ (км)} \times \Delta \lambda \text{ (нм)}. \quad (1.18)$$

Спектр оптического сигнала имеет ненулевую ширину как из-за того, что излучение промодулировано по амплитуде, так и из-за не нулевой ширины спектра источника излучения. Ширина полосы частот для лазеров с распределенной обратной связью (DFB – Distributed Feedback Laser) составляет величину порядка 10...100 МГц, что много меньше ширины полосы частот электрического сигнала для STM-16 ($\Delta f = 1/\Delta t_0 = 10$ ГГц). В этом случае DFB лазер можно рассматривать как монохроматический источник излучения и полагать, что ширина спектра оптического сигнала $\Delta \lambda$ равна ширине спектра электрического сигнала, величина которого в свою очередь обратно пропорциональна начальной ширине импульсов Δt_0 .

При большой начальной ширине импульсов Δt_0 конечная ширина импульсов $\Delta t = (\Delta t_0^2 + \Delta t_D^2)^{1/2}$ примерно равна Δt_0 и увеличивается при увеличении Δt_0 . При малой начальной ширине импульсов Δt_0 конечная ширина импульсов Δt примерно равна уширению импульсов Δt_D и увеличивается при уменьшении Δt_0 . (так как $\Delta t_D \sim 1/\Delta t_0$). Таким образом, должно существовать оптимальное значение Δt_0 , при котором конечная ширина импульсов Δt минимальна, и, соответственно, предельно достижимое расстояние между ретрансляторами максимально.

§ 25. Максимальное расстояние между ретрансляторами

Оценка максимального расстояния между ретрансляторами обычно проводится в предположении, что потери в волокне скомпенсированы с помощью оптических усилителей. Кроме того, предполагается, что у волокон, уложенных в линию передачи, знак дисперсии один и тот же, а импульс без чирпинга (т.е. промодулирован только по амплитуде). Используя предыдущие выражения можно показать, что максимальное расстояние между ретрансляторами выражается через скорость передачи данных (измеряемую в единицах Гбит/с) и полную дисперсию линии соотношением

$$D L = 10^5 / B^2. \quad (1.19)$$

Тот факт, что полная допустимая дисперсия в линии обратно пропорциональна квадрату скорости передачи данных качественно, можно объяснить следующим образом. Во-первых, при удвоении скорости передачи удваивается ширина спектра сигнала и, следовательно, удваивается и величина уширения импульса Δt_D из-за дисперсии волокна. Во-вторых, при удвоении скорости передачи начальная длительность импульса уменьшается в два раза и, соответственно, дисперсионная добавка к полной ширине сказывается в два раза сильнее. Совместное действие уширения спектра импульса и уменьшение его длительности и приводят к появлению квадратичной зависимости полной дисперсии в линии от скорости передачи данных.

Результаты оценок полной дисперсии в линии связи и максимальное расстояние между ретрансляторами (без компенсации дисперсии) для SM и волокон ($D = 16$ пс/нм·км на $\lambda = 1550$ нм) приведены в таблице № 2.2.

Таблица № 1.4. Допустимая величина полной дисперсии в линии связи и максимальное расстояние между ретрансляторами для SM волокна.

Скорость передачи данных	Допустимая величина полной дисперсии в линии связи, пс/нм.	Максимальное расстояние между ретрансляторами, км
2.5 Гбит/с (STM-16)	16 000	1000
10 Гбит/с (STM-64)	1000	60
40 Гбит/с (STM-256)	60	4

Допустимая величина полной дисперсии в линии $D L$ при скорости передачи в 2.5 Гбит/с составляет 16 000 пс/нм и ей соответствует ретрансляционный участок длиной около 1000 км. Таким образом, сигналы со скоростью 2.5 Гбит/с можно передавать без компенсации дисперсии практически на неограниченное расстояние. Но уже при скорости передачи в 10 Гбит/с допустимая величина полной дисперсии в линии $D L$ уменьшается до 1000 пс/нм и ей соответствует всего лишь 60 километровый ретрансляционный участок. Увеличить длину ретрансляционного участка можно путем компенсации полной дисперсии в линии связи.

§ 26. Компенсация дисперсии в широкой полосе частот

Модули для компенсации дисперсии должны удовлетворять ряду требований: малые потери, широкий диапазон, малая величина нелинейных эффектов, малые габариты и вес, малая потребляемая мощность и малая стоимость. Кроме того, желательно также, чтобы величина дисперсии в модуле могла регулироваться. В первых конструкциях модулей компенсации дисперсии использовалось специальное DC волокно (DCF - Dispersion Compensating Fiber). Модули с DC волокнами удовлетворяют только двум из приведенных выше требований: они обладают широкой полосой частот и не потребляют мощность (таблица № 1.5). В настоящее время они являются ключевыми элементами в системах со скоростью передачи 10 Гбит/с (STM-64).

Таблица № 1.5. Параметры модулей с DC волокнами для компенсации дисперсии.

Компания	Corning				Lucent Technologies		
Тип модуля	DCM-20	DCM-40	DCM-60	DCM-80	DK-40	DK-60	DK-80
Компенсируемая длина линии, км	20	40	60	80	40	60	80
Полная дисперсия, пс/нм	- 329	- 658	- 988	-1317	- 680	-1020	- 1360
Коэффициент наклона полной дисперсии, пс/нм ²	н/д	н/д	н/д	н/д	< -1.2	< -1.9	< - 2.5
Вносимое затухание, дБ	3.2	5.0	6.8	8.6	5.2	7.0	8.9
Эффективность, пс/нм·дБ	103	132	145	153	131	146	153
Среднее значение PMD, пс	0.8	1.1	1.4	1.5	0.6	0.75	0.9

Хотя отрицательная дисперсия DC волокон позволяет компенсировать положительную дисперсию SM волокон в достаточно широком диапазоне длин волн (рис. 1.36), однако наклон дисперсионной характеристики DC волокон не согласован с наклоном дисперсионной характеристики SM волокон. Компенсировать полную дисперсию в линии до нужного уровня удастся только на одной длине волны (обычно в середине полосы усиления EDFA). При этом в длинноволновой части диапазона С линия будет обладать избыточной отрицательной дисперсией, а в коротковолновой его части избыточной положительной дисперсией. Т.е. возникает так называемая проблема «рассогласования наклонов дисперсионных характеристик».

Кроме того, величина дисперсии в DC волокне фиксирована и всего лишь примерно в пять раз больше дисперсии SM волокна. Поэтому для компенсации дисперсии в линии с SM волокнами необходимо использовать длинные отрезки DC волокон и вносить тем самым дополнительные потери в линию. Потери в DC волокнах складываются из трех основных компонентов:

- потери в прямом волокне порядка 0.5 дБ/км (рис. 1.36), что почти 2.5 раза больше чем в SM волокне.
- потери на изгибе волокна. Из-за сложной структуры профиля показателя преломления в DC волокнах (рис. X) допустимый радиус изгиба (из-за изгибных потерь) большой (~ 15...20 см). Для сравнения: у SM волокон этот радиус порядка 5 см.
- потери в месте соединения DC волокон с SM волокнами, возникающие из-за рассогласования диаметров модовых пятен. У DC волокон площадь модового пятна 19 мкм², а у SM волокон 85 мкм². Малая площадь модового пятна увеличивает также плотность мощности и, соответственно, нелинейность волокна.

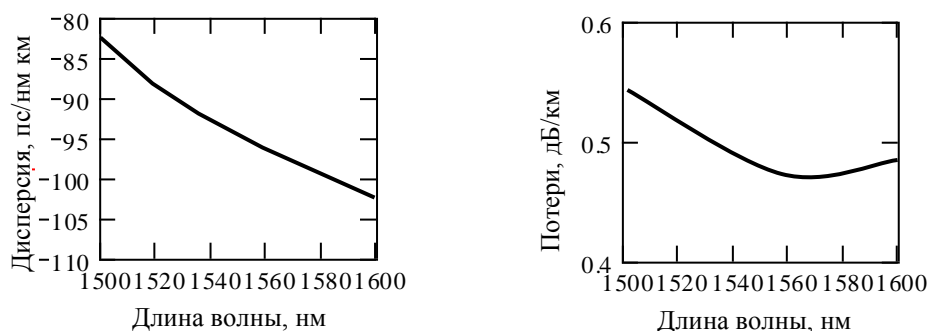


Рис. 1.36. Зависимость дисперсии и потерь в стандартных DC волокнах от длины волны

Обычно модуль для компенсации дисперсии размещают в стойке рядом с оптическим усилителем. Однако из-за больших потерь, вносимым модулем, его нежелательно устанавливать на выходе оптического кабеля, так как это приведет к уменьшению сигнала на входе в оптический усилитель и, следовательно, увеличению отношения сигнал/шум. Устанавливать модуль на выходе оптического усилителя также нежелательно - из-за большого уровня мощности в DC волокне возникнут сильные нелинейные искажения сигнала.

Оптимальным является размещение модуля между двумя оптическими усилителями. При этом потери, вносимые модулем, компенсируются с помощью первого усилителя, но мощность на его выходе ещё не слишком велика, так что она не приводит к заметным нелинейным искажениям сигнала. Второй же оптический усилитель разгоняет мощность до нужного уровня.

Профиль показателя преломления в DC волокнах выполнен в виде узкого центрального пика, окруженного кольцом с меньшим скачком показателя преломления (рис. 1.37). На коротких длинах

волн мода ведется в основном центральным пиком. С увеличением длины волны диаметр моды увеличивается, а модовый показатель преломления, соответственно, уменьшается. При этом изменяется коэффициент дисперсии волокна, величина которого пропорциональна (со знаком минус) второй производной по длине волны от эффективного показателя преломления волокна. Эта производная проходит через максимум, когда поле моды достигает кольца окружающего центральный пик.

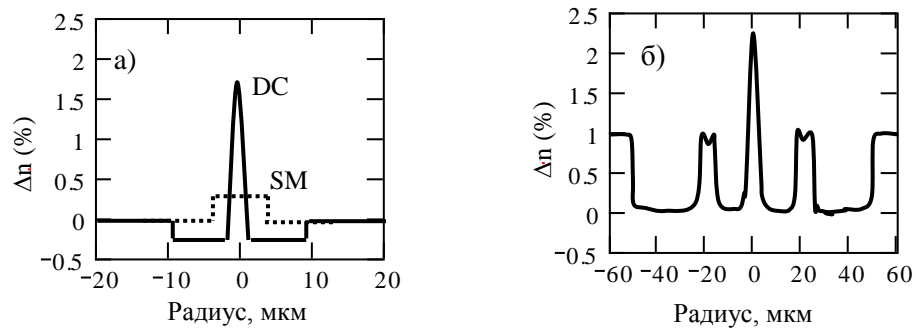


Рис. 1.37. Профили показателя преломления (а) стандартного DC волокна с коэффициентом дисперсии порядка - 100 пс/нм·км и (б) с коэффициента дисперсии - 1800 пс/нм·км и шириной рабочего диапазона 24 нм.

Таким способом, удается создавать волокна, обладающие большим (по модулю) отрицательным коэффициентом дисперсии. Однако чем больше величина коэффициента дисперсии, тем уже полоса частот, в которой можно скомпенсировать полную дисперсию в SM волокнах. Промышленные DC волокна (типичные значения $D = -100$ пс/нм·км, $S = -0.15$ пс/нм²·км на $\lambda = 1550$ нм) позволяют компенсировать дисперсию во всей полосе эрбиевого усилителя (рис. 1.38)

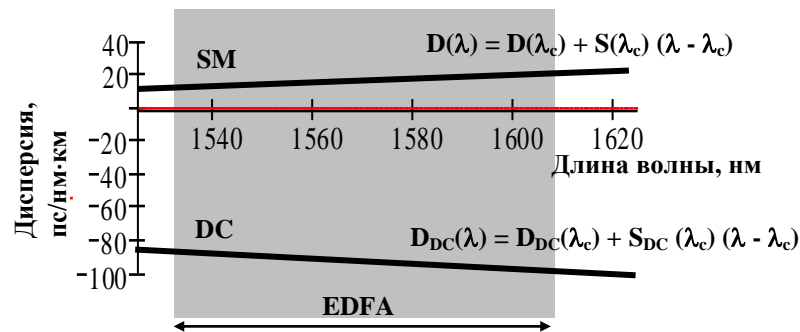


Рис. 1.38. DC волокно обеспечивает компенсацию дисперсии SM волокон в широком диапазоне длин волн, так как у него не только знак коэффициента дисперсии отрицательный ($D < 0$), но и знак наклона дисперсионной характеристики отрицательный ($S < 0$).

Применение DC волокон наиболее эффективно в “старых” линиях с SM волокнами, однако в них для компенсации потерь вносимых DC модулями требуется устанавливать дополнительные оптические усилители. В новых линиях с NZDS волокнами, как показано на рис. 1.39, при той же длине ретрансляционного участка требуется меньше оптических усилителей.

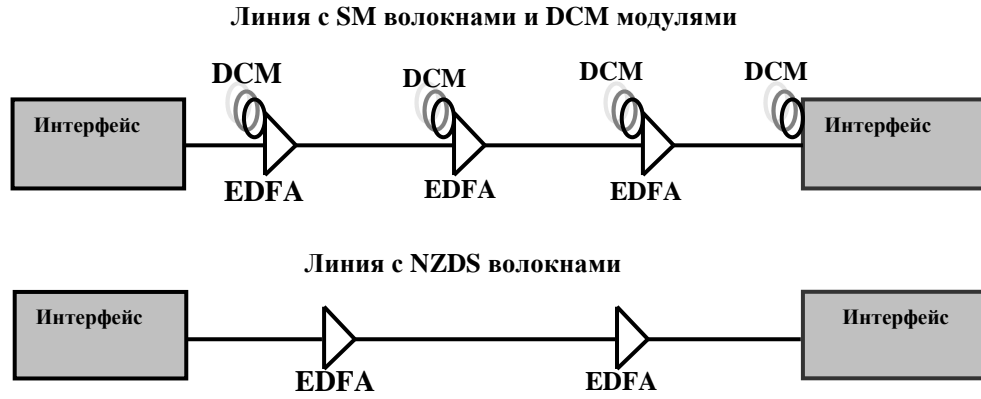


Рис. 1.39. Две линии STM-64 (10 Гбит/с) с длиной регенерационных участка в 240 км. В линии с NZDS волокнами используются два оптических усилителя, а в линии с SM волокнами три усилителя, так как DC модули вносят дополнительные потери ~ 20 дБ.

В качестве примера найдем зависимость от длины волны степени компенсации полной дисперсии (CR- compensation ratio) в линии с SM волокнами и модулями DK-80. Коэффициент CR определяется как скомпенсированная доля полной дисперсии в линии. Будем полагать, как это часто делается, что в рабочем диапазоне длин волн коэффициенты дисперсии для SM волокон $D(\lambda)$ и для DC волокон $D_{DC}(\lambda)$ зависят линейно от длины волны (рис. 1.38). Тогда для их описания достаточно трех независимых параметров: длины волны λ_c , на которой осуществляется компенсация полной дисперсии, коэффициента дисперсии и наклона коэффициента дисперсии. Для удобства расчетов все необходимые параметры SM волокна и модулями DK-80 приведены в таблице № 1.6.

Таблица № 1.6. Дисперсионные параметры SM волокна и модуля DK-80 на $\lambda = 1550$ нм.

Дисперсионные параметры	SM волокно	Модуль DK-80
Коэффициент дисперсии, пс/нм км	17	н/д
Коэффициент наклона дисперсии, пс/нм ² км	0.058	н/д
Длина волокна, км	80	н/д
Полная дисперсия, пс/нм	1360	- 1360 ± 40
Коэффициент наклона полной дисперсии, пс/нм ²	4.64	< - 2.5

Полная дисперсия в линии в предвидении, что по ней возможно в будущем будут передаваться солитоны, обычно компенсируется не до нуля, а до небольшого отрицательного значения. Для упрощения расчетов положим, что она скомпенсирована до нуля:

$$D(\lambda_c) L = D_{DC}(\lambda_c) L_{DC}. \quad (1.20)$$

Тогда не скомпенсированная часть полной дисперсии в линии будет описываться выражением (1.21)

$$S(\lambda_c) (\lambda - \lambda_c) L + S_{DC}(\lambda_c) (\lambda - \lambda_c) L_{DC}, \quad (1.21)$$

а степень компенсации дисперсии выражением (1.22)

$$CR(\lambda) = [D(\lambda_c) L + S(\lambda_c) (\lambda - \lambda_c) L + S_{DC}(\lambda_c) (\lambda - \lambda_c) L_{DC}] / D(\lambda_c) L. \quad (1.22)$$

Подставив в (1.22) численные значения из таблицы № 2.4, получаем

$$CR(\lambda) = 1 + 16 (\lambda - 1550)/1000. \quad (1.23)$$

Зависимость $CR(\lambda)$ изображена на рис. 1.40.

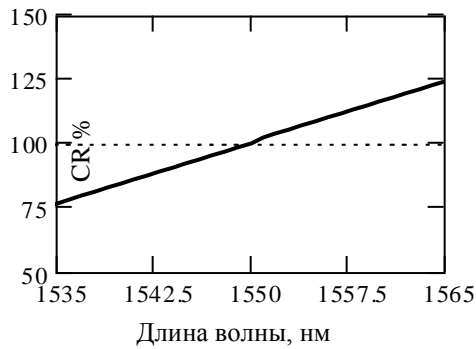


Рис. 1.40. Зависимость степени компенсации от длины волны в линии с SM волокном длиной 80 км и модулем DK-80

Как видно из рис. 1.40, на краю диапазона полная дисперсия не скомпенсирована примерно на 25 %, что при полной дисперсии линии 1360 пс/нм составляет величину около 340 пс/нм. Отсюда можно оценить максимальную длину ретрансляционного участка в линии с компенсирующими модулями DK-80. Например, так как при скорости передачи 10 Гбит/с (STM-64) полная дисперсия в линии должна быть меньше 1000 пс/нм (таблица № 2.2), то получаем, что длина этого участка может достигать $3 \times 80 \text{ км} = 240 \text{ км}$. В то же время для скорости передачи 40 Гбит/с (STM-256) компенсация дисперсии в линии оказывается недостаточной, так как в этом случае допустимая величина полной дисперсии (60 пс/нм) меньше не скомпенсированной доли полной дисперсии 340 пс/нм).

§ 27. Компенсация дисперсии с помощью фотонных кристаллов

Компенсацию дисперсии во всей полосе, занимаемой DWDM системой, можно осуществить с помощью интенсивно исследуемых в последнее время специальных волокон нового типа (PC - photonic cristal). Эти волокна ещё не вышли за стадию лабораторных исследований. PC волокна (фотонные кристаллы, их ещё называют пористые волокна) представляют собой пористую кварцевую нить с регулярно расположенными отверстиями, окружающими сердцевину из кварцевого стекла (рис. 1.41). Так как эффективный показатель преломления сердцевины больше эффективного показателя преломления окружающей её пористой оболочки, то свет распространяется в сердцевине, испытывая полное внутреннее отражение на границе сердцевины с оболочкой.

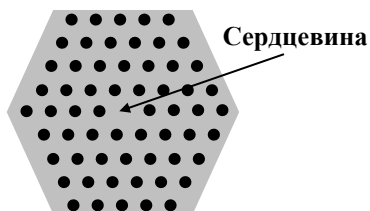


Рис. 1.41. Схематическое изображение PC волокна. Серцевина из кварца отделена от оболочки шестью отверстиями, обозначенными на схеме черными кружками.

Зависимость коэффициента дисперсии PC волокна от диаметра сердцевины изображена на рис. 1.42. Максимальное значение дисперсии в таком волокне составляет примерно $-2000 \text{ пс/нм}\cdot\text{км}$, что позволяет компенсировать полную дисперсию в линии SM волокнами в 100 раз большей длины.

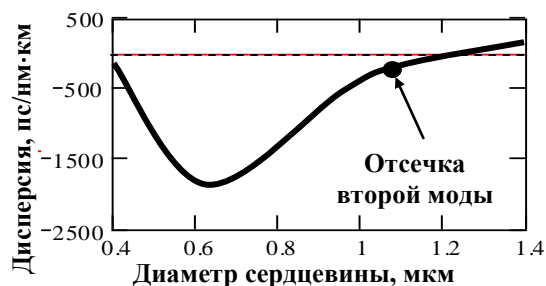


Рис. 1.42. Зависимость коэффициента дисперсии PC волокна на длине волны 1550 нм от диаметра сердцевины.

Зависимость коэффициента компенсации (CR) от длины волны изображена на рис. 1.43. Когда диаметр сердцевины выбран так, чтобы добиться максимального значения дисперсии в PC во-

локне (кривая (а)), то в диапазоне 1500...1600 нм коэффициент CR меняется более чем на 50 %. Эту зависимость можно существенно уменьшить подбором диаметра сердцевины РС волокна. Так при диаметре сердцевины 0.98 мкм коэффициент CR в полосе 100 нм изменяется в пределах $\pm 0.2\%$ (кривая (б)). При этом диаметре наклон дисперсионной кривой на длине волны 1550 нм равен -2.3 пс/нм²·км, а коэффициент дисперсии – 680 пс/нм·км, что позволяет полную дисперсию в линии с SM волокнами в 35 раз большей длины.

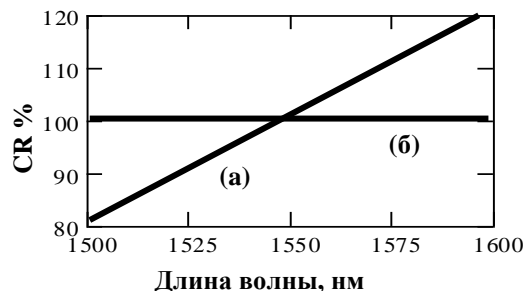


Рис. 1.43. Зависимость коэффициента компенсации от длины волны для РС волокна (а) с максимальной дисперсией на $\lambda = 1550$ нм (-2000 пс/нм·км) и (б) с дисперсией (-680 пс/нм·км), при которой обеспечивается компенсация дисперсии в максимально широком диапазоне длин волн.

Малый диаметр сердцевины РС волокон приводит к большим потерям при сварке их с SM волокнами (~ 1.5 дБ). Ожидается, что в ближайшем будущем эти потери удастся существенно уменьшить, модифицируя оболочку волокна.

Раздел VII. Поляризационная модовая дисперсия (ПМД)

§ 28. Поляризационные моды

Свет, распространяющийся в номинально одномодовом волокне, можно представить в виде суммы двух поляризационных мод. Каждая поляризационная мода распространяется параллельно оси волокна со своим значением фазовой и групповой скорости. Фазовый фронт у мод плоский, а нормаль к плоскости фазового фронта параллельна оси волокна. Пространственное распределение полей у поляризационных мод волокна одинаковое (гауссово), и отличаются они только тем, что поляризованы ортогонально.

Все происходит точно так же, как и в случае распространения плоской волны в свободном пространстве. Хорошо известно, что плоскую волну всегда можно представить в виде двух ортогонально поляризованных плоских волн. Как и у плоских волн, у поляризационных мод состояние поляризации может быть также любым, однако обычно используют линейно поляризованные моды LP₀₁ (LP – linear polarized). Делается это исключительно из удобства, так как в волокнах, как правило, преобладает линейное двулучепреломление (рис. 1.44).

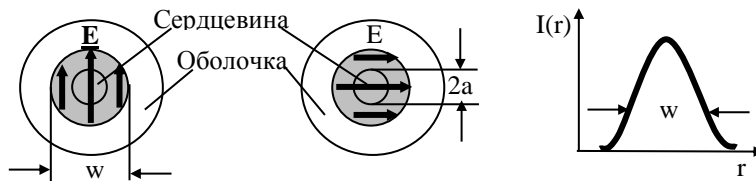


Рис. 1.44. Распределение интенсивности ($I(r) \sim \exp[-2r^2/(w/2)^2]$) и направление электрического поля E в поляризационных модах волокна. w – диаметр моды, $2a$ – диаметр сердцевины

Показатель преломления у телекоммуникационных волокон хоть и слабо, но зависит от состояния поляризации света, т.е. эти волокна обладают двулучепреломлением, причем в основном линейным. Оно наводится в номинально круглом волокне при его изготовлении из-за неизбежного появления небольшой эллиптичности сердцевины и внутренних напряжений, не обладающих аксиальной симметрией (рис. 1.45). Так как наведенные в волокне натяжения не имеют выделенного направления, величина и азимут линейного двулучепреломления изменяется случайным образом вдоль оси волокна.



Рис. 1.45. Причины возникновения двулучепреломления в оптических волокнах.

Хотя поляризационная анизотропия распределена по длине волокна нерегулярно, однако участок волокна менее длины корреляции нерегулярностей двулучепреломления можно рассматривать как однородный. На этом участке волокно обладает примерно постоянным по величине линейным двулучепреломлением. В нем можно возбудить быструю и медленную поляризационные моды, которые будут распространяться вдоль волокна, не обмениваясь при этом мощностью. Фазовые скорости этих поляризационных мод обратно пропорциональны величине показателей преломления:

$$v_б = c/n_б \text{ и } v_м = c/n_м. \quad (1.24)$$

А разность их фазовых набегов прямо пропорциональна разности показателей преломления ($\Delta n = n_м - n_б$) и длине участка волокна L :

$$\Delta\varphi = (2\pi/\lambda) (L/v_м - L/v_б) = (2\pi/\lambda) \Delta n L. \quad (1.25)$$

Если возбудить одновременно обе поляризационные моды, то состояние света будет периодически изменяться вдоль волокна с периодом равным длине биений $L_б$ (рис. 1.46). Длина биений находится из условия, что разность фазовых набегов поляризационных мод равна 2π и выражается через разность показателей преломления:

$$L_б = \lambda/\Delta n \quad (1.26)$$

У телекоммуникационных волокон на $\lambda = 1550$ нм длин биений составляет примерно 5 м, что соответствует разности показателей преломления $\Delta n = 3 \cdot 10^{-7}$.

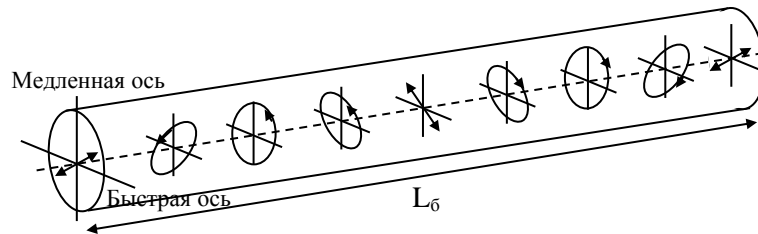


Рис. 1.46. Двулучепреломление волокна приводит к периодическому изменению состояния поляризации света от линейного к эллиптическому, круговому, эллиптическому, линейному и т.д.

Двулучепреломление приводит не только к появлению разности фазовых запаздываний поляризационных мод, но и к появлению у них разности групповых запаздываний (DGD – differential group delay) и, соответственно, к уширению импульсов (рис. 1.47):

$$\Delta\tau(\text{пс}) = \delta\tau(\text{пс/км}) \times L(\text{км}), \quad (1.27)$$

где $\delta\tau$ - разности групповых запаздываний поляризационных мод на единице длины волокна. Так как в первом приближении фазовые и групповые скорости поляризационных мод примерно равны друг другу, то с помощью (1.24) находим:

$$\delta\tau \approx (1/v_м - 1/v_б) = \Delta n/c. \quad (1.30)$$

Полагая в (1.30) $\Delta n = 3 \cdot 10^{-7}$ и $c = 3 \cdot 10^5$ км/с, получаем оценку $\delta\tau = 1$ пс/км.

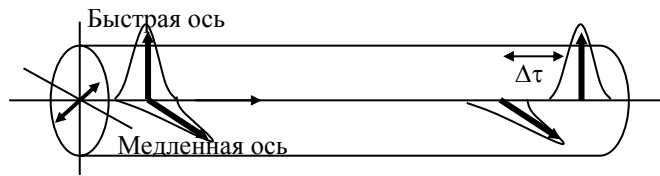


Рис. 1.47. Уширение импульсов в волокне с двулучепреломлением.

В волокнах с регулярным (постоянным по длине волокна) двулучепреломлением, можно избежать уширения импульса из-за DGD. Для этого достаточно, чтобы направление поляризации на входе в такое волокно, совпало с направлением оси двулучепреломления волокна. Тогда в волокне возбудится только одна поляризационная мода, и импульс расширяться из-за двулучепреломления волокна не будет. Однако длина волокна обычно значительно превышает длину корреляции его неоднородностей. В таком волокне неизбежно возбуждается и вторая поляризационная мода, что и приводит к уширению импульсов.

§ 29. Уширение импульсов из-за ПМД

На начальном участке волокна длиной менее длины корреляции нерегулярностей двулучепреломления ещё можно, в принципе, возбудить только одну поляризационную моду. Как уже говорилось, для этого достаточно, чтобы на входе в этот участок свет был поляризован параллельно оси двулучепреломления волокна. Однако на следующем участке волокна оси двулучепреломления будут повернуты под другим углом, поэтому в нем возбудится также и вторая поляризационная мода, а импульс расщепится.

Импульсы будут расщепляться на каждом участке волокна, где достаточно сильно меняется направление оси двулучепреломления. В реальном телекоммуникационном волокне связь распределена случайным образом вдоль волокна, так что импульс при прохождении через волокно будет постепенно расширяться. Выглядеть он будет примерно так же, как и импульс, уширенный из-за хроматической дисперсии.

Схема, поясняющая механизм расщепления импульсов в длинном волокне изображена на рис. 1.48. На вход волокна поступает короткий импульс (1) и возбуждает обе поляризационные моды. На первом участке волокна он расщепляется на два импульса (2). Расстояние между этими импульсами увеличивается прямо пропорционально длине первого участка волокна (3). Во втором участке волокна каждый из этих двух импульсов расщепляется ещё на два импульса (4). После прохождения второго участка волокна исходный импульс оказывается расщепленным на четыре импульса (5).

В этой модели телекоммуникационное волокно представлено в виде двух, соединенных последовательно, участков волокон с линейным двулучепреломлением. Оси двулучепреломления этих участков волокон развернуты друг относительно друга. Угол разворота осей характеризует величину коэффициента связи, а длина этих участков - период коэффициента связи между поляризационными модами волокна.

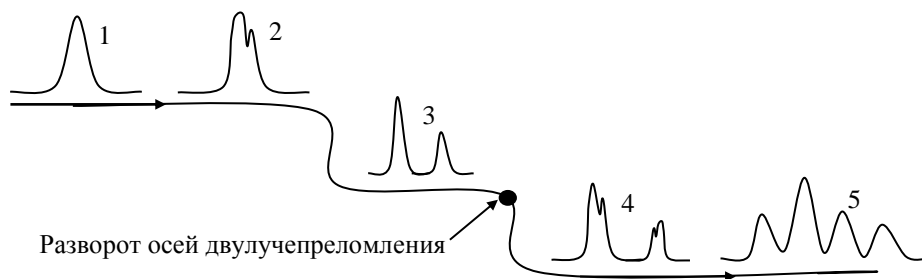


Рис. 1.48. Уширение импульсов из-за ПМД в телекоммуникационных волокнах.

Случайная связь между поляризационными модами волокна может приводить как к увеличению, так и к уменьшению DGD (разности групповых запаздываний поляризационных мод). Поэтому в длинном волокне среднее значение DGD ($\langle \Delta\tau \rangle$) увеличивается не прямо пропорционально длине волокна, как в (1.27), а прямо пропорционально квадратному корню из длины волокна.

$$\langle \Delta\tau \rangle (\text{пс}) = \text{PMD} (\text{пс/км}^{1/2}) \times L^{1/2} (\text{км}^{1/2}). \quad (1.31)$$

Для объяснения появления корневой зависимости DGD от L можно воспользоваться аналогией с классической задачей о случайных блужданиях. Как известно, при случайных блужданиях расстояние между конечной и начальной точками увеличивается пропорционально квадратному корню из времени.

Коэффициент поляризационной модовой дисперсии - PMD выражается (с точностью до коэффициента порядка единицы) через $\delta\tau$ и длину корреляции нерегулярностей двулучепреломления L_c соотношением

$$\text{PMD}(\text{пс/км}^{1/2}) = \delta\tau(\text{пс/км}) \times L_c^{1/2}(\text{км}^{1/2}). \quad (1.32)$$

В «старых» телекоммуникационных волокнах длина корреляции L_c достигала 0.3 км, и они обладали большим PMD. При $\delta\tau = 1$ пс/км и $L_c = 0.3$ км с помощью (1.32) получаем оценку: $\text{PMD} = 0.55$ пс/км^{1/2}. Как будет показано ниже, это слишком большая величина для современных магистральных линий связи.

Уменьшить величину PMD, как видно из (1.32) можно, уменьшая $\delta\tau$, т.е. увеличивая длину биений в волокне, или уменьшая длину корреляции L_c . Стремиться изготавливать волокна с длиной биений более 10..30 м не имеет смысла, так как в волокне при укладке в кабель наводится достаточно большое двулучепреломление. Поэтому изготовители пошли по пути уменьшения величины L_c . Делается это путем периодического скручивания волокна в процессе его вытяжки.

Таким образом, удастся уменьшить величину L_c до 1...10 м. При $\delta\tau = 1$ пс/км и $L_c = 0.01$ км с помощью (1.32), получаем оценку: $\text{PMD} = 0.1$ пс/км^{1/2}. Примерно такой величиной PMD обладают новые модели волокон.

Зная величину PMD, можно найти только среднее значение DGD ($\langle\Delta\tau\rangle$). Реально же величина DGD ($\Delta\tau$) изменяется случайно во времени и может отличаться от своего среднего значения. Её плотность вероятности распределена по Максвеллу (рис. 1.49).

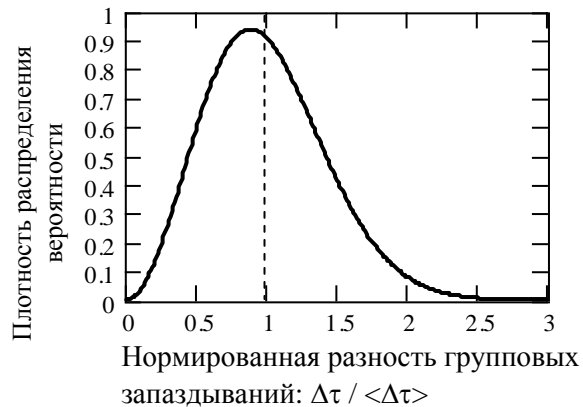


Рис. 1.49. Плотность распределения вероятности (Максвелла) для нормализованной величины DGD – разности групповых запаздываний поляризационных мод.

Как видно из (1.49), среднее значение DGD ($\langle\Delta\tau\rangle$) близко к его наиболее вероятному значению. Нетрудно показать, что вероятность превысить $2\langle\Delta\tau\rangle$ равна 1.7 %, а вероятность превысить $3\langle\Delta\tau\rangle$ составляет всего лишь 4.2×10^{-5} . Т.е. за год величина DGD может превышать $3\langle\Delta\tau\rangle$ только в течение 22 минут.

В заключение раздела оценим допустимую величину уширения импульсов из-за ПМД. Конечная ширина импульса Δt представляет собой сумму квадратов начальной ширины импульса Δt_0 и среднего значения DGD $\langle\Delta\tau\rangle$:

$$\Delta t = (\Delta t_0^2 + \langle\Delta\tau\rangle^2)^{1/2}. \quad (1.33)$$

Учитывая случайную природу поляризационной дисперсии обычно накладывают условие, чтобы вклад от среднего значения DGD был настолько мал, чтобы им можно было пренебречь. Так как Δt_0 и $\langle\Delta\tau\rangle$ входят в (1.33) как сумма квадратов, то для этого достаточно того, чтобы $\langle\Delta\tau\rangle$ было примерно в три раза меньше Δt_0 . А так как $\Delta t_0 \leq 1/(4B)$, то это значит, что Δt_{PMD} должно быть примерно в 12 раз, т.е. на порядок меньше ширины битового интервала $1/B$.

Оценки максимального допустимого расстояния между ретрансляторами без компенсации PMD приведены в таблице № 1.7.

Таблица № 1.7. Максимальные расстояния передачи без компенсации PMD.

Скорость передачи данных	Битовый интервал	Допустимая величина DGD	Максимальное расстояние при $\text{PMD} = 1 \text{ пс/км}^{1/2}$	Максимальное расстояние при $\text{PMD} = 0.1 \text{ пс/км}^{1/2}$
2.5 Гбит/с STM-16	400 пс	40 пс	1600 км	160 000 км
10 Гбит/с STM-64	100 пс	10 пс	100 км	10 000 км
40 Гбит/с STM-256	25 пс	2.5 пс	6 км	625 км

Поляризационная дисперсия, как и хроматическая дисперсия, является линейным эффектом и в принципе может быть скомпенсирована. Однако, так как флуктуации двулучепреломления в волокне, возникающие под действием факторов окружающей среды приводят к флуктуациям ПМД, то её трудно измерить и скомпенсировать. Хотя устройства для компенсации ПМД в настоящее время интенсивно разрабатываются, но результаты этих разработок ещё далеки от завершения.

ГЛАВА II. Стандартные одномодовые волокна

§ 1. Введение

В настоящее время в линиях связи по всему миру уложено несколько сот миллионов километров оптических волокон. Причем около 90 % из них приходится на долю стандартных одномодовых волокон (Rec.G. 652). Для обозначения стандартных одномодовых волокон используют несколько различных сокращений: SF – Standard Fiber, SSMF - Standard Single Mode Fiber, NDSF – No Dispersion Shifted Fiber. Наиболее распространенное обозначение: SM – Single Mode.

Как уже обсуждалось ранее, потери и дисперсия являются основными оптическими характеристиками волокна. Так как в российских линиях связи оптические усилители практически не используются и скорость передачи данных, как правило, не превышает 2.5 Гбит/с, то потери в SM волокнах являются основным фактором, ограничивающим длину ретрансляционного участка линии. В то же время, учитывая большой (25 лет) планируемый срок жизни этих линий, необходимо принимать во внимание и вторую важнейшую характеристику SM волокон - дисперсию. Спектр потерь в SM волокнах и их дисперсионные характеристики приведены в I-м разделе.

Хотя SM волокна в соответствии с рекомендациями G.652 оптимизированы для работы на $\lambda = 1310 \text{ нм}$, но они могут применяться и на более длинных волнах в системах уплотнения каналов по длинам волн (WDM). На магистральных линиях связи и в сетях регионального и городского масштаба применяются системы плотного спектрального уплотнения (Dense WDM), а в сетях доступа системы с большим (20...25 нм) разнесом частот (Coarse WDM). Во II-м разделе рассмотрены особенности применения SM волокон в таких системах, как DWDM, так и CDWM.

Основные параметры оптических кабелей с SM волокнами определены в рекомендациях G.652 ITU-T. Ссылки на этот стандарт часто встречаются в литературе, сам практически недоступен широкому кругу читателей. Для того чтобы восполнить этот пробел, в III-м разделе приведены и снабжены комментариями основные положения Rec.G.652 ITU-T.

§ 2. Спектр потерь в SM волокнах

Потери в волокне. Потери в центрах окон прозрачности приведены в первой строке таблицы № 2.1. Обычно в спецификациях приводится типовое значение потерь; по специальному заказу могут быть поставлены SM волокна с меньшими потерями порядка 0.18...0.19 дБ/км на $\lambda = 1550 \text{ нм}$ и 0.31...0.32 дБ/км на $\lambda = 1310 \text{ нм}$.

Таблица № 2.1. Потери в SMF - 28™ (Corning).

1. Спектр потерь	Потери на $\lambda = 1310$ нм на $\lambda = 1550$ нм на $\lambda = 1383 \pm 3$ нм Прирост потерь в диапазонах: 1285...1330 нм и 1525...1575 нм	0.34 дБ/км 0.20 дБ/км ≤ 2.1 дБ/км 0.05 дБ/км
2. Потери на изгибе	Приращение потерь при намотке 100 витков на оправку $\varnothing 75$ мм на $\lambda = 1310$ нм на $\lambda = 1550$ нм при намотке 1 витка на оправку $\varnothing 32$ мм на $\lambda = 1550$ нм	≤ 0.05 дБ ≤ 0.05 дБ ≤ 0.5 дБ
3. Длина волны отсечки	В волокне В кабеле	1150...1350 нм < 1260 нм

В первой строке таблицы № 2.1 приведены значения потерь в прямом волокне на нескольких длинах волн. При $\lambda < 1600$ нм потери ограничиваются в основном релеевским рассеянием и уменьшаются с увеличением длины волны $\sim 1/\lambda^4$. Поэтому на $\lambda = 1550$ нм потери меньше чем на $\lambda = 1310$ нм.

Во второй строке таблицы № 2.1 приведены значения потерь, возникающих при намотке волокна на оправку. Видно, что потери быстро увеличиваются с уменьшением радиуса намотки. Так, если при намотке 100 витков на оправку диаметром 75 мм, они не должны превышать 0.05 дБ (на $\lambda = 1550$ нм), то при намотке только одного витка на оправку примерно вдвое меньшего диаметра (32 мм) допустимая величина потерь уже на порядок больше (0.5 дБ).

Диаметры оправок и число витков выбраны не случайно. Диаметр намотки (75 мм) соответствует общепринятому минимальному радиусу изгиба, при котором ещё не возникает повреждений из-за статической усталости волокон, а число витков (100) примерно равно числу изгибов оптического кабеля на длине ретрансляционного участка. При проведении рутинных (многократно повторяющихся) измерений удобно использовать только один виток, но меньшего диаметра (32 мм).

Спектры потерь в изогнутых и “прямых” волокнах могут существенно различаться. Если в прямом волокне потери на $\lambda = 1550$ нм меньше чем на $\lambda = 1310$ нм, то для потерь, вносимых при изгибе волокна, ситуации обратная. Происходит это потому, что чем больше длина волны, тем большая её часть выходит в оболочку и тем сильнее эта волна высвечивается при изгибе волокна. Поэтому обеспечить условие того, чтобы приращение потерь при намотке на оправку не превышало 0.05 дБ, труднее всего на более длинной волне 1550 нм.

В третьей строке таблицы № 2.1 приведены значения длины волны отсечки в первичном покрытии и в волокне после его укладки в оптический кабель. Длина волны отсечки волокна в кабеле (< 1260 нм) выбрана в соответствии с рекомендациями G.652 (она была меньше самой короткой длины волны рабочего диапазона). При таком выборе длины волны отсечки в кабеле одномодовый режим должен выполняться для всех рабочих длин волн.

Длина волны отсечки волокна в первичном покрытии может быть и больше самой короткой длины волны рабочего диапазона. Предполагается, что после укладки в кабель она станет меньше 1260 нм. Естественно, это требует проверки.

Как видно из первой строки таблицы № 2.1, потери в пике поглощения примесей ОН ($\lambda = 1383 \pm 3$ нм) намного превышают потери на $\lambda = 1310$ нм и $\lambda = 1550$ нм. В результате значительная часть диапазона длин волн между 1310 нм и 1550 нм оказывается недоступной для связи. В последних разработках SM волокон за счет улучшения технологии очистки от водяных паров удалось снизить потери в “водяном” пике на $\lambda = 1383 \pm 3$ нм.

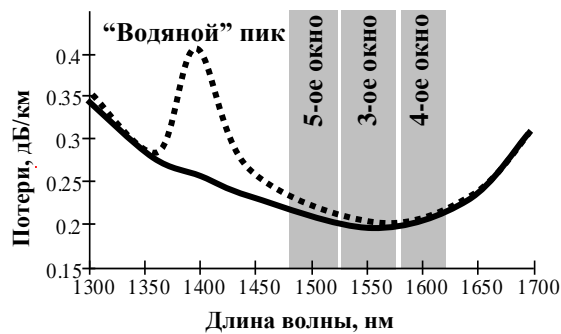


Рис. 2.1. Спектр потерь в стандартных одномодовых волокнах
 Типовое SM волокно
 — SM волокно улучшенной очистки от примеси водяных паров (OH).

Волокна без «водяного пика» (LWPF – low water peak fiber) производятся несколькими компаниями: AllWave (Lucent Technologies, теперь OFS), SMF-28e (Corning), SMR (Pirelli). Потери в водяном пике уменьшены до величины 0.31 дБ/км, что меньше, чем потери во втором окне прозрачности на $\lambda = 1310$ нм (0.35 дБ/км) (рис. 2.1). В результате появилась возможность создавать системы, работающие в пятом окне (S) прозрачности (1480...1520 нм), и в широком диапазоне длин волн (E) находящимся между вторым и пятым окном прозрачности (1360...1460 нм). Этот новый диапазон длин волн назвали расширенным (Extended) и обозначают буквой E.

SM волокна без водяного пика поглощения на $\lambda = 1383 \pm 3$ нм обладают следующими основными преимуществами:

- Становится доступным целиком весь диапазон длин волн от 1280 нм до 1625 нм, что примерно на 50 % больше, чем с обычным SM волокном.
- Позволяет использовать рабочую длину волны вблизи 1400 нм, где коэффициент дисперсии у SM волокна ещё не слишком велик и не ограничивает возможность передачи данных со скоростью 10 Гбит/с (STM-64).
- Число каналов в системе CWDM (система спектрального уплотнения с большим интервалом (20...25 нм) между каналами) может быть увеличено на 33 % (до 16 каналов).

Интересно, что с LWPF волокнами связывают возможность изменения концепции наращивания пропускной способности линии - вместо резервирования «темного волокна» можно будет использовать длину волны излучения в DWDM или CWDM системе.

Геометрические параметры. Величина полных потерь в линии связи определяется не только потерями в волокне, но и потерями в сростках волокон. Потери в сростках волокон тем меньше, чем меньше допуски на геометрические параметры волокон и на диаметр модового пятна. Геометрические параметры и значения диаметров модовых пятен для волокна SMF - 28TM приведены в таблице № 2.2.

Таблица № 2.2. Геометрические параметры SMF - 28TM.

Диаметр модового пятна: на $\lambda = 1310$ нм	9.2 ± 0.4 мкм
на $\lambda = 1550$ нм	10.4 ± 0.8 мкм
Эксцентриситет сердцевины и оболочки	≤ 0.5 мкм
Допуск на диаметр оболочки	125 ± 1.0 мкм
Эллиптичность оболочки	≤ 1.0 %
Собственный изгиб волокна	≥ 4.0 м

Как было показано в главе I, диаметр модового пятна w для SM волокон можно рассчитать с помощью простой формулы (1.3): $w = 7 \lambda$. С её помощью находим значения диаметров модовых пятен на $\lambda = 1310$ нм и $\lambda = 1550$ нм: $w = 9.1$ мкм и $w = 10.85$. Сравнивая их со значениями, приведенными в первой строке таблицы № 2.2, видим, что они совпадают в пределах допуска.

Чем больше допуск на диаметр модовых пятен, тем больше величина рассогласования диаметров модовых пятен соединяемых волокон и тем больше величина потерь в сварных соединениях. Допуск на диаметр модовых пятен в SMF - 28TM удовлетворяет требованиям Rec. G.652, так как укладывается в 10-% коридор. Используя значения, приведенные в первой строке таблицы № 2.2 и формулу (1.4) для величины потерь $(\alpha(\text{дБ}) = 4.34 (\Delta w/w)^2)$, находим, что эти потери не превышают 0.025. Напомним, что по требованиям Ростелекома, потери в сварных соединениях волокон не должны превышать 0.05 дБ.

Кроме того, как уже упоминалось в первой главе, для волокон, вытянутых из одной заготовки (см. рис. 1.14), относительная флуктуация диаметра модового пятна волокна составляет всего лишь

1..2 % и в этом случае потери из-за рассогласования диаметров модовых пятен свариваемых волокон будут пренебрежимо малы.

Во второй, третьей и четвертой строках таблицы № 2.2 приведены значения эксцентриситета сердцевин и оболочки, эллиптичности оболочки и допуска на её диаметр оболочки. Их величины примерно в два раза меньше соответствующих значений, приведенных в Рес. G.652). Эти параметры несовершенств волокон важны потому, что они определяют величину смещения сердцевин волокон друг относительно друга при соединении их с помощью адаптеров и механических соединителей, а также влияют на степень коррекции эксцентриситета свариваемых волокон.

В последней строке таблицы № 2.2 приведено значение радиуса собственного изгиба волокна. Собственный изгиб волокна влияет на величину потерь при одновременной сварке нескольких пар волокон. Если радиус этого изгиба мал, то не удастся одинаково хорошо съюстировать все пары соединяемых волокон. У большинства фирм изготовителей радиус кривизны собственного изгиба волокна не превышает 4 м.

§ 3. Дисперсионные характеристики SM волокон

Параметры хроматической дисперсии волокон зависят от формы профиля показателя преломления. В SM волокнах форма профиля показателя преломления ступенчатая с относительно большим диаметром сердцевин и малым скачком показателя преломления. Различают два типа таких ступенчатых профилей: с согласованной и с депрессированной оболочкой (рис. 2.2). Сердцевина в обоих типах SM волокон легирована германием (GeO_2), однако в волокнах с депрессированной оболочкой степень легирования ниже, так как в них показатель преломления световедущей оболочки уменьшен за счет легирования фтором (F).

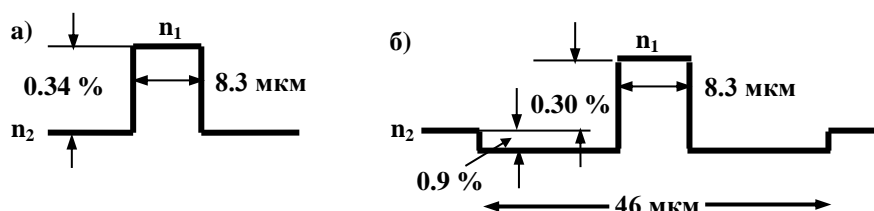


Рис. 2.2. Профили показателей преломления SM волокон

- а) С согласованной (по показателю преломления) световедущей оболочкой
- б) С депрессированной световедущей оболочкой

Так как разность показателей преломления между сердцевиной и оболочкой в SM волокнах относительно невелика, то хроматическая дисперсия в них определяется в основном материальной дисперсией. При этом длина волны нулевой дисперсии λ_0 в попадает во второе окно прозрачности. Хроматическая дисперсия выражается через длину волны нулевой дисперсии и коэффициент наклона дисперсии S_0 на длине волны нулевой дисперсии интерполяционной формулой:

$$D(\lambda) = S_0 (\lambda - \lambda_0^4 / \lambda^3) / 4. \quad (2.1)$$

Интерполяционная формула (2.1) специфицирована в Рес. G.652 для диапазона длин волн 1260...1360 нм. В диапазоне длин волн 1550 нм её можно применять только для оценок. Рассчитанная с помощью (2.1) зависимость $D(\lambda)$ при $S_0 = 0.092$ пс/нм²·км и $\lambda_0 = 1310$ нм, изображена на рис.2.3.

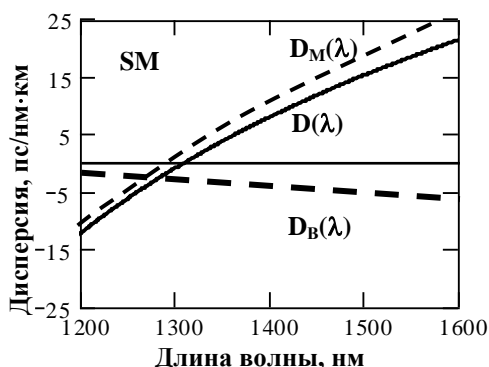


Рис.2.3. Хроматическая дисперсия $D(\lambda)$ как сумма материальной $D_M(\lambda)$ и волноводной дисперсий $D_B(\lambda)$ в стандартном одномодовом волокне (SM).

Величина дисперсии SM волокон может изменяться в относительно небольших пределах (рис. 2.4). Эти вариации (как и у λ_0) вызваны флуктуациями диаметра сердцевины волокна и разностью показателей преломления между сердцевиной и оболочкой. Особого практического значения эти вариации не имеют, так как их относительная величина мала, а при компенсации полной дисперсии в линии её все равно приходится измерять.

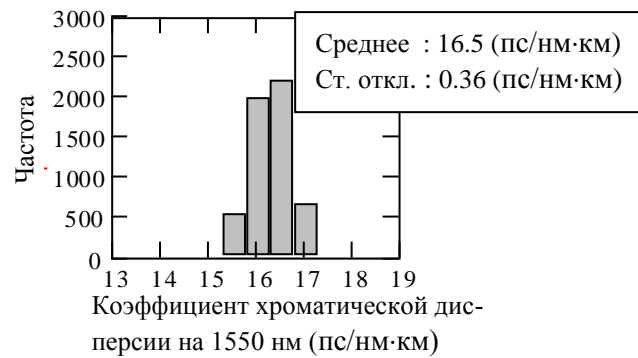


Рис. 2.4. Гистограмма распределения коэффициента дисперсии на длине волны 1550 нм для SM волокна производства Hitachi

Коэффициент наклона дисперсии ($S(\lambda) = dD(\lambda)/d\lambda$), как видно из рис. 2.3, уменьшается с увеличением длины волны. Продифференцировав по λ выражение (2.1), получаем

$$S(\lambda) = S_0 (1 + 3 \lambda_0^4 / \lambda^4) / 4. \quad (2.2)$$

Зависимость $S(\lambda)$ при $S_0 = 0.092$ пс/нм²·км и $\lambda_0 = 1310$ нм изображена на рис.2.5.

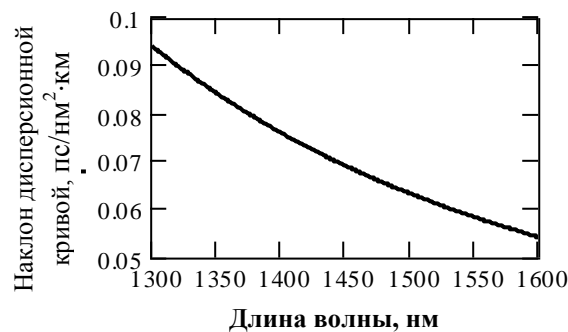


Рис. 2.5. Зависимость наклона дисперсионной кривой от длины волны для SM волокна (при $\lambda_0 = 1310$ нм и $S_0 = 0.092$ пс/нм²·км)

Дисперсионные параметры SMF - 28™ приведены в таблице № 2.3. Как видно из первых двух строк этой таблицы, диапазон возможных изменений длины волны нулевой дисперсии и величина наклона коэффициента дисперсии удовлетворяют требованиям Rec. G.652 (1300...1324 нм).

Таблица № 2.3. Дисперсионные параметры SMF - 28™.

Длина волны нулевой дисперсии	1301 нм < λ < 1321 нм
Наклон коэффициента дисперсии	0.092 пс/нм ² ·км
PMD	0.1..0.2 пс/км ^{1/2}

Поляризационная дисперсия (PMD) в «старых» SM волокнах, как правило, велика (1...0.5 пс/км^{1/2}), так как при скоростях передачи до $B = 2.5$ Гбит/с (STM-16) и относительно коротких расстояниях между ретрансляторами ($L \sim 100$ км) её вклад в уширение импульсов мал. Действительно, даже если коэффициент PMD равен 1 пс/км^{1/2}, то на расстоянии в 100 км он приведет к уширению импульса $\Delta t_{PMD} = PMD \times L^{1/2} = 10$ пс, что на порядок меньше допустимой ширины импульса $\Delta t = 1/(4B) = 100$ пс для STM-16.

Однако в последние годы скорость передачи возросла до $B = 10$ Гбит/с (STM-64), а расстояние между ретрансляторами увеличилось до $L \sim 1000$ км. В этом случае уширение импульса Δt_{PMD} при коэффициенте PMD, равном 1 пс/км^{1/2}, будет равно 30 пс, что уже больше допустимой ширины импульса $\Delta t = 1/(4B) = 25$ пс для STM-64. Поэтому в «новых» SM волокнах PMD уменьшена в среднем в 5 раз до уровня 0.2...0.1 пс/км^{1/2}.

§ 4. SM волокно с большой площадью модового пятна

Возможность создания DWDM систем с большим числом спектральных каналов (100...300) и пропускной способностью порядка нескольких Тбит/с ограничивается нелинейными эффектами в волокне. Для уменьшения влияния нелинейных эффектов необходимы волокна с большой площадью модового пятна. Кроме того, необходимо, чтобы величина дисперсии и наклоны дисперсионной характеристики у основного и компенсирующего волокна были согласованы.

Для этих целей компания Hitachi создала SM волокно с большой площадью модового пятна (LESMF – large effective area single mode fiber) и DC волокно с специально подобранной величиной дисперсии и наклона коэффициента дисперсии (DSCF – dispersion and its slope compensation fiber) (см. таблица № 2.4).

Таблица № 2.4. Характеристики LESMF и DSCF волокон.

Тип волокна		LESMF	DSCF
Потери на $\lambda = 1550$ нм	дБ/км	0.183	0.266
Длина волны отсечки в кабеле	нм	1370	1266
Потери при намотке на катушку $\varnothing 20$ мм	дБ/м	4.0	н/д
Коэффициент дисперсии на $\lambda = 1550$ нм	пс/нм км	20.0	-41.1
Наклон коэффициента дисперсии	пс/нм ² км	0.064	-0.13
RDS (наклон/дисперсия)	1/нм	0.0032	0.0032
Диаметр модового пятна	мкм	12	6.2
Площадь модового пятна	мкм ²	112	30
PMD	пс/км ^{1/2}	0.022	0.043

Участок линии с LESMF и DSCF волокнами изображен на рис. 2.6. На выходе усилителя для уменьшения влияния нелинейных эффектов устанавливается 40 км SM волокна с большой эффективной площадью модового пятна. Его дисперсия компенсируется с помощью 20 км специально изготовленного DC волокна.

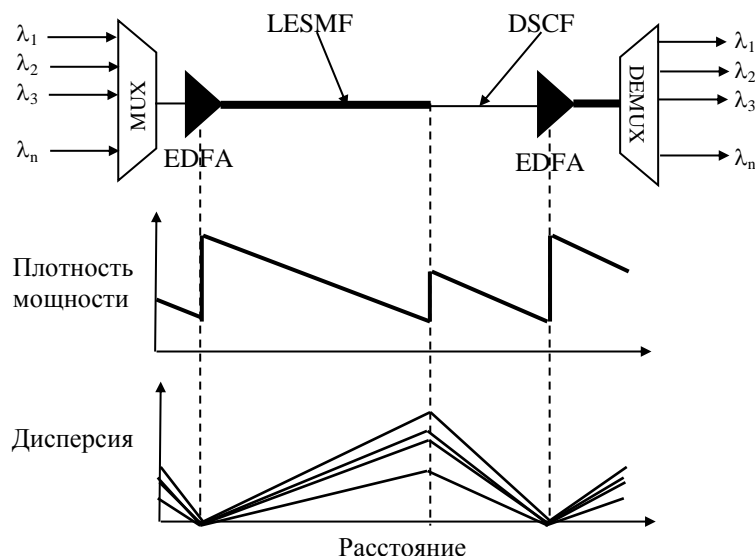


Рис. 2.6. DWDM система с большой пропускной способностью. Нелинейные эффекты ослаблены за счет большой эффективной площади модового пятна волокна LESMF.

Так как площади модовых пятен соединяемых волокон сильно различаются, то в месте их соединения возникают большие потери (~ 0.9 дБ). Эти потери удалось уменьшить до 0.26 дБ, применив мостовую схему сварного соединения волокон (рис. 2.7). При этом качестве промежуточного волокна использовалось NZDS волокно с диаметром модового пятна 8ю3 мкм.

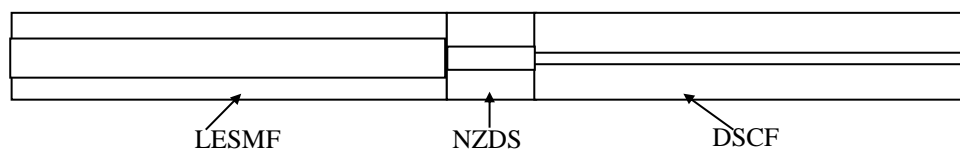


Рис. 2.7. Мостовая схема сварного соединения волокон LESMF с большой (112 мкм²) и DSCF с малой (30 мкм²) площадью модовых пятен.

§ 5. Потери и геометрические параметры SM волокон представленных на российском рынке

В большинстве российских линий связи длина ретрансляционного участка ограничивается потерями (оптические усилители не используются). Потери в линии зависят не только от потерь в волокнах укладываемых в линию, но и от потерь в сращениях этих волокон. Сращивание или сварка волокон, вероятно, является самой важной и самой дорогостоящей из всех операций, которые приходится выполнять с волокном в полевых условиях. Она требует дорогого оборудования, квалифицированных операторов и периодических переделок.

Геометрические параметры волокон в значительной степени определяет возможность получения высококачественного сварного соединения. Поэтому не только потери в волокнах и но и допуски на их геометрические параметры являются основными критериями, по которым проводится сравнение SM волокон. Как видно из таблицы № 2.4 все компании стремятся уменьшить потери во 2 и 3 окне прозрачности и потери на изгибе волокон, а также снизить допуски на диаметр модового пятна и на геометрические параметры волокон.

Таблица № 2.5. Потери и геометрические параметры SM волокон представленных на российском рынке.

<u>Параметры</u>	Corning	Lucent (OFS)*	Sumitomo	Hitachi	Fujikura	Furukawa (OFS)	Pirelli	Alcatel
Потери дБ/км, $\lambda = 1310$ нм	0.34	0.35	0.35	0.35	0.34	0.35	0.34	0.34
$\lambda = 1550$ нм	0.20	0.22	0.22	0.21	0.23	0.22	0.20	0.21
Диаметр намотки**, мм	50	75		75	75	75	60	60
Допуск на диаметр моды, мкм	± 0.4	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 0.5
Эксцентриситет сердцевины, мкм	0.5	0.8	1.0	0.5	0.6	1.0	1.0	0.6
Радиус собственного изгиба, м	4	2	4	4		4		4
Допуск на диаметр покрытия, мкм	± 5	± 10	± 10	5	± 7.5	± 10	10	± 10
Перемотка с удлинением %	1	1	1.2	1	1	1	1	1

* Компания Lucent Technologies (США) продала в 2001 г. весь свой оптико-волоконный бизнес компаниям Furukawa Electric (Япония) и CommScope (США). Новая компания теперь имеет название OFS – Optical Fiber Solution – в переводе на русский это звучит как Оптико-волоконные Решения.

** При намотке 100 витков волокна на этот диаметр потери на $\lambda = 1550$ нм увеличиваются на 0.05 дБ.

В своих спецификациях большинство компаний обычно приводит максимальное значение потерь. Так, например, компания Hitachi в своей спецификации на SM волокно в графе потери на $\lambda = 1310$ нм указывает: max. 0.35...0.40 дБ/км, а на $\lambda = 1550$ нм: max. 0.21...0.25 дБ/км. В то же время, как видно из гистограмм, приведенных на рис. 1.13, среднее значение потерь в этих волокнах меньше: 0.33 дБ/км на $\lambda = 1310$ нм и 0.2 дБ/км на $\lambda = 1550$ нм. Поэтому компании, производящие волокно по специальному заказу, могут поставлять волокна с потерями меньше, чем указывается в спецификациях (порядка 0.18..0.19 дБ/км на $\lambda = 1550$ нм и 0.31.. 0.32 дБ/км на $\lambda = 1310$ нм).

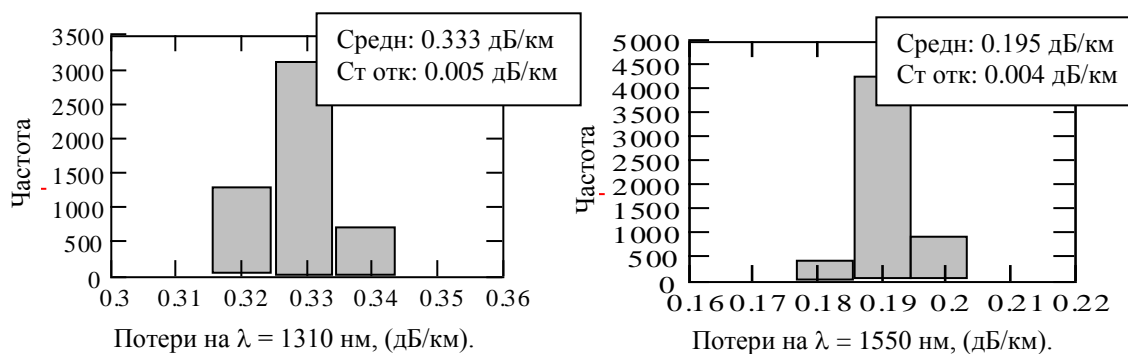


Рис. 2.8. Гистограммы распределения потерь на длинах волн 1310 нм и 1550 нм в SM волокнах производства компании Hitachi.

В заключение раздела приведем наиболее показательные графики, иллюстрирующие прогнозы по инсталляции одномодовых волокон. Как уже говорилось, основной объем приходится на долю SM волокон. В России это почти исключительно SM волокна, а в США и Японии заметную долю составляют NZDC волокна.

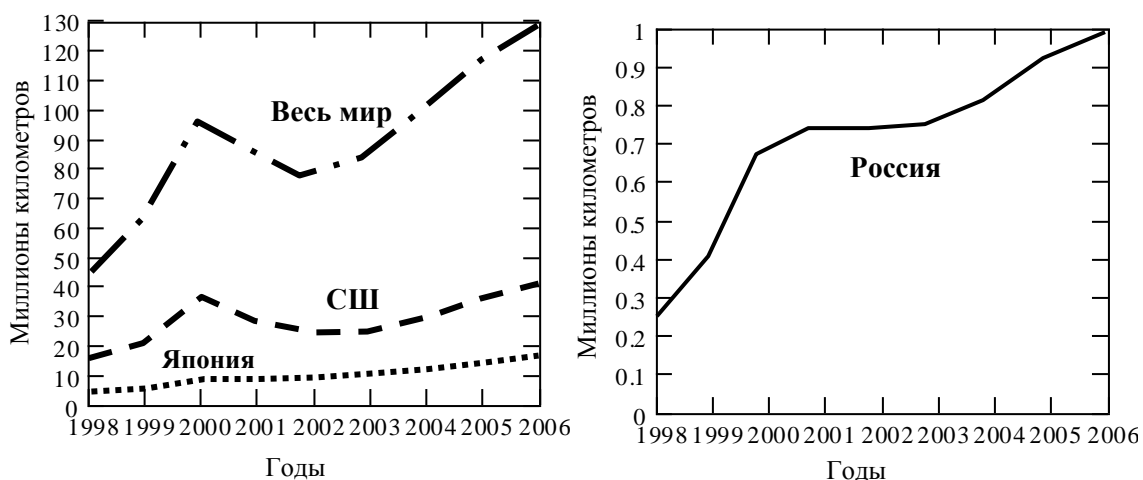


Рис. 2.9. Количество одномодовых волокон (миллионов километров), устанавливаемых в линии связи (в России и по всему миру).

Раздел II. Применение SM волокон в системах со спектральным уплотнением каналов

§ 6. Системы WDM

В настоящее время телекоммуникационная индустрия претерпевает беспрецедентные изменения, связанные с переходом от голосо-ориентированных систем к системам передачи данных, что является следствием бурного развития Internet технологий и разнообразных сетевых приложений. Поэтому одним из основных требований, предъявляемых к транспортным сетям для передачи данных, является возможность быстрого увеличения их пропускной способности в соответствии с ростом объемов трафика.

В транспортных сетях обычно выделяют три уровня: магистральный, распределения и доступа. Магистральный уровень характеризуется большой пропускной способностью и используется для передачи трафика в пределах региона или города. Для уровня распределения характерна меньшая пропускная способность, меньшие расстояния и более сложная сетевая топология. Уровень доступа используется для подключения корпоративных сетей и характеризуется небольшой пропускной способностью.

К транспортным сетям нового поколения предъявляются различные требования. На уровне доступа - главное гибкость и экономичность. На уровне распределения важна возможность объединения различных видов трафика и его диспетчеризации. На магистральном уровне решающим становится возможность быстрого увеличения пропускной способности сетей в соответствии со стремительным ростом трафика. Технологические решения, которые могут быть использованы для наращивания пропускной способности транспортной сети, приведены в таблице № 2.6.

Таблица № 2.6 Технологические решения, позволяющие наращивать пропускную способность транспортной сети:

<ul style="list-style-type: none"> • Укладывать в линии связи новые оптические кабели. Этот процесс в настоящее время ведется достаточно интенсивно, однако он сопряжен с необходимостью долгосрочного планирования, больших капиталовложений и не всегда возможен. • Использовать электронику с большим быстродействием (10 Гбит/с, 40 Гбит/с, > 100 Гбит/с). Такой подход подразумевает, что при выборе аппаратуры придется исходить не из её цены и качества, а стремиться использовать самые последние технологические достижения. • Перейти от электронных компонент к оптическим компонентам (усилителям, фильтрам и т.д.). Основное достоинство такого подхода состоит в том, что в отличие от электронных компонент, параметры большинства оптических компонент не зависят от скорости передачи данных и для них прирост цены с увеличением битовой скорости будет небольшим. Однако возможность его реализации зависит от наличия необходимого набора оптических компонент и их совместимости. • Применить технологию уплотнения каналов по длинам волн (WDM - wavelength division multiplexing). Во многих случаях для этого достаточно только заменить терминалы в линии с оптическими усилителями.

Все эти технологические решения в определенной мере использовались в процессе совершенствования магистральных линий связи (рис. 2.10). Оптические кабели начали применяться в магистральных линиях связи в конце 90-х годов, и пропускная способность первых таких линий составляла несколько сотен Мбит/с в одном волокне. В 1995 г. она возросла до 2.5(5.0) Гбит/с на одно волокно и для регенерации сигналов стали применяться эрбиевые усилители. Примерно к 1998 г. пропускная способность линий увеличилась до 10(20) Гбит/с уже в пересчете не на одно волокно, а на одну длину волны в системе WDM. В современных WDM системах емкость в одном волокне превысила 100 Гбит/с

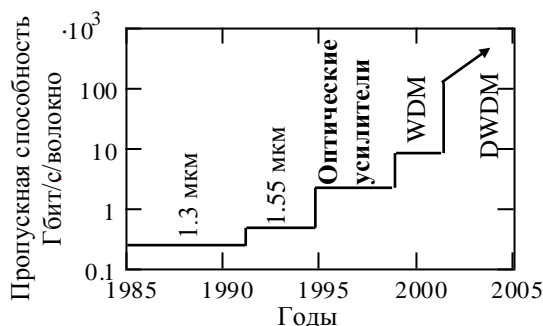


Рис. 2.10. Рост пропускной способности магистральных линий связи.

Технология уплотнения каналов по длинам волн достаточно старая. В ней используется тот факт, что по одному волокну можно передавать одновременно сигналы на многих длинах волн, т.е. во многих спектральных каналах. Эта технология применялась ещё в ранних линиях связи для осуществления дуплексной передачи на двух длинах волн 1310 нм и 1550 нм (таблица № 2.7).

Таблица № 2.7. Эволюция WDM систем.

<ul style="list-style-type: none"> • Ранние системы WDM, STM 4 (625 МГц). Две длины волны с широкой зоной разделения. • Второе поколение WDM, STM-16 (2.5 Гбит/с) Две / четыре длины волны в окне 1555 нм, интервал 400 ГГц • Системы Dense WDM, STM-64 (10 Гбит/с) 8/96 длин волн в окне 1550 нм интервал 50/100 ГГц • Следующие поколение систем DWDM, STM-256 (40 Гбит/с) 100/200 длин волн в окне 1550 нм, интервал 25/50 ГГц

Выделяют три основных достоинства технологии WDM:

1. Пропускную способность транспортной сети с WDM можно наращивать «просто», умножая число длин волн N , передаваемых по одному волокну, на скорость передачи линии B на одной длине волны.

$$C = N \times B. \quad (2.3)$$

2. Транспортные сети, основанные на технологии WDM, обладают большой гибкостью, так как, во-первых, каждый канал спектральный канал можно использовать независимо для передачи различных видов трафика. Например, на одной длине волны можно передавать Internet, на другой SONET или ATM. Во-вторых, можно не ограничиваться использованием только физической топологии сети, а строить также различного рода виртуальные сети (рис. 2.11).

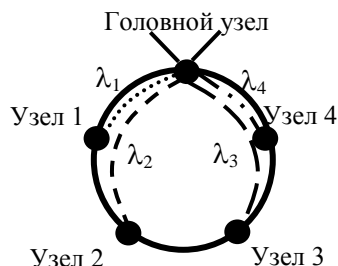


Рис. 2.11. Система WDM с топологией звезда при физически кольцевой топологии.

Топология звезда

3. Сигналы, передаваемые по одному волокну, во всех спектральных каналах можно усиливать с помощью одного оптического усилителя (рис. 2.12). Этим оптические усилители выгодно отличаются от ретрансляторов, где для каждого спектрального канала необходимо использовать отдельный электрический усилитель.

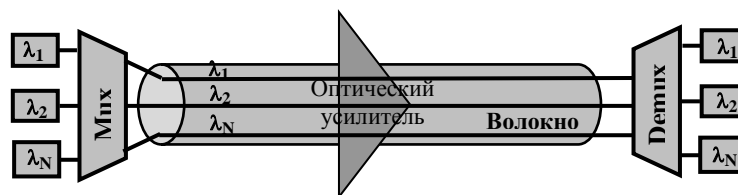


Рис. 2.12. В WDM системе оптический усилитель усиливает одновременно сигналы на всех длинах волн, передаваемых по волокну.

При включении в линию передачи оптических усилителей расстояние между ретрансляторами уже не лимитируется потерями в волокнах и практически не ограничено (до 1000 км в наземных линиях и 10 000 км в подводных линиях). Расстояние же оптическими усилителями ограничено длиной порядка 50...150 км и определяется величиной потерь в волокне, но и допустимой величиной мощности света, которую можно ввести в волокно. Величина этой мощности ограничивается искажениями сигналов, возникающих из-за нелинейных эффектов в волокне, накапливающихся на всей длине ретрансляционного участка линии передачи.

Оптические усилители появились во втором поколении WDM систем. В них использовались волокна, легированные эрбием (EDFA – Erbium Doped Fiber Amplifier) и обеспечивающие усиление сигналов в диапазоне длин волн 1525...1565 нм. В этих системах для передачи данных использовалось третье окно прозрачности с интервалом частот между каналами 400 ГГц. Дальнейшее развитие технологии уплотнения каналов по длинам волн связано с расширением полосы усиления оптических усилителей и уменьшением интервала частот между спектральными каналами.

В зависимости от интервала частот между спектральными каналами WDM системы делятся на два основных класса: системы плотного спектрального уплотнения (dense-WDM (DWDM)) с числом каналов в системе более 80 и системы редкого спектрального уплотнения (coarse-WDM (CWDM)) или, как их ещё иногда называют, (wide WDM (WWDM)) с числом каналов менее 40. Однако со временем прогресс в технологии неизбежно сместит эту границу. Число каналов в системах DWDM будет более 200 (а возможно и 1000), а в системах CWDM более 40.

§ 7. Системы DWDM

Число каналов является важнейшим параметром DWDM систем, обеспечивающим совместимость оборудования различных производителей. Сектор стандартизации Международного Союза

Электросвязи (ITU – International Telecommunication Union) выпустил стандарт ITU Rec. G. 692, в котором рекомендован интервал частот 100 ГГц. В третьем окне прозрачности (1530...1560 нм), в соответствии с рекомендациями G. 692, помещается примерно 40 каналов (интервал частот в 100 ГГц соответствует интервалу длин волн в 0.8 нм).

В последнее время наметилась тенденция уменьшения частотного интервала между спектральными каналами до 50 ГГц и даже до 25 ГГц и, соответственно, увеличения числа каналов в третьем окне прозрачности до 80 и 160. А “плотные” WDM системы с интервалом между каналами в 100 ГГц и менее стали называть DWDM системами (Dense Wavelength Division Multiplexing).

В DWDM системах число каналов (N) и скорость передачи данных в канале (B) уже нельзя полагать независимыми величинами. В качестве примера рассмотрим два соседних канала с интервалом частот между ними в 50 ГГц. Допустим, что в обоих каналах передаются цифровые потоки уровня STM-64, т.е. потоки со скоростями 10 Гбит/с. Предположим также, что спектр цифрового потока ограничен 1-й гармоникой тактовой частоты $f_c = 10$ ГГц для STM-64 (хорошее приближение для реальной линии передачи). Тогда оптический спектр каждого канала будет состоять из трех составляющих – центральной частоты f_0 и двух боковых $f_0 + f_c$ и $f_0 - f_c$ (рис. 2.13).

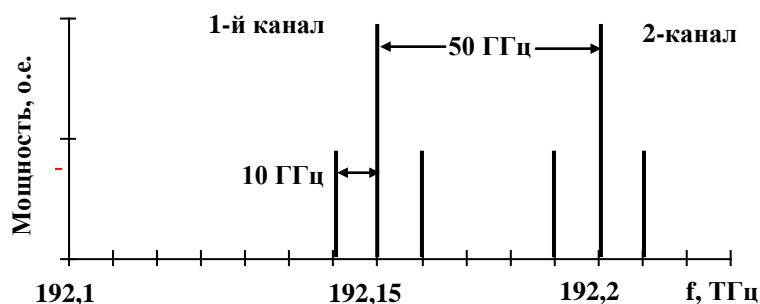


Рис. 2.13. Спектр сигналов в первом и втором каналах DWDM системы.

Скорость передачи данных 10 ГГц (STM-64), а интервал частот между каналами 50 ГГц = 0.05 ТГц.

Как видно из рис. 2.13, при передаче цифровых потоков STM-64 (10 ГГц) частотный интервал между каналами (50 ГГц) превышает удвоенную частоту модуляции оптического сигнала, т.е. в принципе каналы разнесены достаточно далеко. В то же время для цифровых потоков следующей иерархии STM-256 (40 ГГц) это условие выполняется уже только для интервалов частот 100 ГГц и выше. Однако допустимую величину интервала частот между каналами DWDM системы удастся уменьшить в два раза, сделав так, чтобы оптические несущие в соседних каналах были поляризованы ортогонально. Тогда для передачи цифровых потоков STM-256 (40 ГГц) становится возможным использование интервалов между каналами в 50 ГГц.

Нелинейные эффекты в волокнах наиболее сильно проявляются в DWDM системах, так как с увеличением числа длин волн, передаваемых по волокну, увеличивается и передаваемая по нему суммарная оптическая мощность. При этом, кроме явления фазовой самомодуляции волн (SPM – Self Phase Modulation), наблюдающимся и при передаче сигналов на одной длине волны начинают проявляться и нелинейные эффекты, свойственные только многоволновым линиям передачи: четырехволновое смешение (FWM – Four Wave Mixing) и перекрестная фазовая модуляция (XPM – Cross Phase Modulation).

SPM эффект наблюдается, когда мощность в одном спектральном канале линии передачи достигает 10 дБм (10 мВт). А эффекты FWM и XPM, когда суммарная оптическая мощность в спектральных каналах достигает примерно той же величины. Наиболее вредным нелинейным эффектом является эффект четырехволнового смешения, так как при смешении сигналов передаваемых на нескольких длинах волн в волокне возникают паразитные сигналы на новых длинах волн. Некоторые из этих паразитных сигналов попадают в спектральные каналы DWDM системы, что приведет к возникновению перекрестных помех.

Появление сигналов на новых длинах волн можно объяснить тем, что световые волны большой интенсивности создают в волокне бегущие фазовые решетки (бегущие волны показателя преломления). При взаимодействии световых волн с этими бегущими фазовыми решетками и возникают паразитные сигналы на новых длинах волн (рис. 2.14).

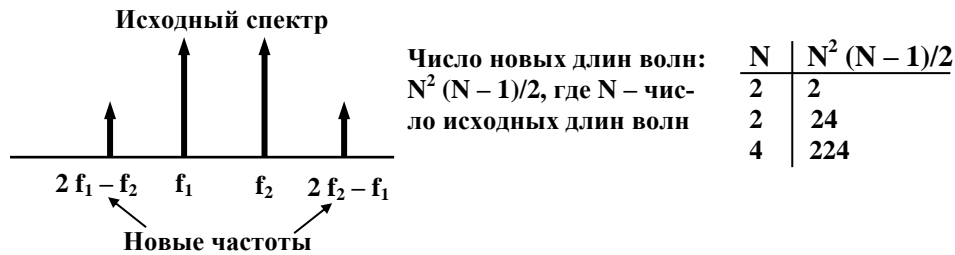


Рис. 2.14. Схема образования новых длин волн при смешении двух волн (с частотой f_1 и f_2).

Допустимая величина суммарной оптической мощности, вводимой в волокно в системе DWDM, определяется стандартом G. 692 на уровне + 17 дБм (50 мВт). В последующих дополнениях к этому стандарту допустимая мощность была увеличена до + 23 дБм. Ограничения на величину допустимой мощности связаны в основном с двумя факторами: допустимой величиной нелинейных эффектов в волокне и требованиями безопасности для обслуживающего персонала.

Эффективность четырехволнового смешения быстро уменьшается с увеличением разности групповых скоростей волн, распространяющихся в каналах DWDM системы. Так, если длина волны нулевой дисперсии волокна попадает между спектральными каналами DWDM системы (как это происходит с DS волокнами), то соответствующие этим каналам световые волны распространяются в волокне с одинаковой скоростью и имеют возможность взаимодействовать достаточно длительное время. Уменьшить эффективность четырехволнового смешения можно, увеличив дисперсию волокна или расстояние между каналами DWDM системы, а также разместив эти каналы не эквидистантно.

Положительная и отрицательная роли дисперсии. Большая дисперсия SM волокон (16...18 пс/нм·км) играет свою положительную роль, так как обеспечивает эффективное подавление перекрестных помех, возникающих как из-за FWM, так и из-за XPM эффекта. В частности, поэтому в DWDM системах с SM волокнами спектральные каналы могут быть размещены на одинаковом расстоянии друг от друга, что позволяет максимальным образом использовать всю полосу оптического усилителя.

Отрицательная роль дисперсии волокна DWDM системах проявляется так же, как в системах, работающих на одной длине волны, лимитируя максимально достижимую длину регенерационного участка (без компенсации дисперсии). Наименьшие искажения сигналов в линии из-за дисперсии волокна возникают при использовании узкополосного источника излучения и чисто амплитудной модуляции сигнала (лазера с распределенной обратной связью (DFB – Distributed Feedback Laser) с внешним модулятором). Тогда длина регенерационного участка L_m ограничивается только коэффициентом дисперсии волокна и скоростью передачи сигнала B :

$$L_m \cong 10^5 / (B^2 D). \quad (2.4)$$

где коэффициент дисперсии D измеряется в единицах [пс/нм·км], а скорость передачи B в единицах [Гбит/с].

Полагая $D = 18$ пс/нм·км при скорости передачи данных в 2.5 Гбит/с (STM-16), получаем: $L_m \sim 1000$ км. Т.е. при этой скорости передачи дисперсия SM волокон практически не ограничивает длину ретрансляционного участка линии. Однако при скорости передачи данных в 10 Гбит/с (STM-64) получаем: $L_m \sim 60$ км, что даже меньше типичной длины (~ 100 км) регенерационного участка линии, ограниченного потерями в волокне (в линии без оптических усилителей).

Таким образом, при не слишком больших скоростях передачи данных (до 2.5 Гбит/с) дисперсия SM волокон является положительным фактором, так как ещё нет необходимости её компенсировать, и в то же время она обеспечивает эффективное подавление перекрестных помех, возникающих из-за FWM и XPM эффектов. При этом пропускная способность DWDM системы может быть увеличена без существенной модернизации системы путем уменьшения интервала частот между её спектральными каналами.

Системы DWDM, выпускаемые промышленностью. В настоящее время промышленностью выпускаются DWDM системы со скоростью передачи данных в отдельном канале в 2.5 Гбит/с (STM-16). В них применяются стандартные эрбиевые оптические усилители с шириной полосы ~ 30 нм. Соответственно при расстоянии между спектральными каналами системы 0.8 нм (100 ГГц) число спектральных каналов $N = 40$, а при расстоянии между спектральными каналами системы 0.4 нм (50 ГГц), соответственно, в два раза больше: $N = 80$. При $N = 40$ пропускная способность такой системы составляет 100 Гбит/с (40×2.5 Гбит/с), а при $N = 80$ в два раза больше – 200 Гбит/с (80×2.5 Гбит/с).

Дальнейшее увеличение пропускной способности DWDM систем возможно как за счет увеличения числа каналов N , так и за счет увеличения скорости передачи B в отдельном канале. Для увеличения числа каналов N в DWDM системе необходимо заменить стандартные оптические усилители, полоса усиления которых занимает диапазон C (1525...1565 нм), на более широкополосные оптические усилители, с полосой усиления охватывающей диапазоны C и L (1570...1620 нм). Для увеличения скорости передачи B до следующего уровня STM-64 (10 Гбит/с) необходимо компенсировать полную дисперсию в линии с SM волокнами. Последний путь экономически более целесообразный, так как не требует замены оптических усилителей.

Компенсация положительной дисперсии в линии с SM волокнами осуществляется с помощью модулей для компенсации дисперсии, которые размещаются обычно в стойке рядом с оптическим усилителем. Эти модули содержат бухты со специальными DC волокнами (DCF – Dispersion Compensating Fiber) большим отрицательным коэффициентом дисперсии. Модули компенсации дисперсии с такими волокнами в настоящее время производятся несколькими компаниями, и эта технология является достаточно зрелой. В то же время стоимость DCF волокон достаточно высока, так как рынок их невелик.

Промышленностью освоены DWDM системы с 32 каналами и скоростью передачи данных в канале в 10 Гбит/с (STM-64) и, соответственно, с пропускной способностью $C = N \times B = 320$ Гбит/с. Одна из таких DWDM систем используется в России в магистральной линии между Москвой и С.-Петербургом (совместный проект “Гигабит-Интернет” компаний “Раском” и “Метроком”). Первые подключения клиентов были проведены в октябре 2001 г., и на первом этапе работ была обеспечена пропускная способность в 1,2 Гбит/с (два канала STM-4 (620 Мбит/с)). Также в октябре 2001 г. компания “Сонера –Рус” объявила о запуске DWDM системы от С.-Петербурга до границы с Финляндией с пропускной способностью в 20 Гбит/с.

Возможности увеличения пропускной способности линий передачи при совместном использовании технологий DWDM и TDM (т.е. увеличении и числа каналов и скорости передачи в отдельном канале) далеко не исчерпаны. Особенно быстро увеличивается число каналов в DWDM системах. Это происходит как за счет расширения полосы усиления оптических усилителей в длинноволновую (L – диапазон), и в коротковолновую сторону (S – диапазон), так и за счет использования нового типа волокон – волокон с ненулевой смещенной дисперсией.

Недостатки DWDM систем. В настоящее время технология плотного спектрального уплотнения (DWDM) эффективно применяется в магистральных транспортных сетях, где основным требованием является большая пропускная способность сети и возможность её быстрого увеличения. Однако стоимость DWDM систем высока.

Обусловлена она тем, что спектральные каналы в DWDM системе расположены очень близко друг к другу (50/100 ГГц) и поэтому к устройствам мультиплексирования и демуплексирования предъявляются очень высокие требования. Кроме того, для каждого канала требуется свой лазер, настроенный на длину волны, соответствующую этому каналу, и каждый такой лазер должен быть стабилизирован по температуре.

С высокой стоимостью DWDM систем можно ещё мириться в магистральных транспортных сетях, где требуется передавать большие объемы трафика на большие расстояния, но не в относительно коротких распределительных транспортных сетях, где стоимость трансмиттеров может превысить стоимость уложенного в линию оптического кабеля. Кроме того, требования к пропускной способности распределительных транспортных сетей ниже, чем в магистральных сетях, и для них более важна возможность диспетчеризации различных видов трафика.

§ 8. Системы CWDM

Для распределительных транспортных сетей небольшой протяженности протяженностью (несколько десятков километров) более подходящей является технология неплотного спектрального уплотнения CWDM (Coarse WDM). В отличие от DWDM систем в CWDM системах стремятся добиться не максимальной плотности спектральных каналов, а максимального отношения пропускной способности к стоимости линии. В CWDM системах спектральные каналы располагаются друг от друга на большом расстоянии (20 нм и более) так, что становится возможным использовать недорогие трансмиттеры и недорогую WDM оптику. Для сравнения: в DWDM системах это расстояние более чем на порядок меньше (рис. 2.15).

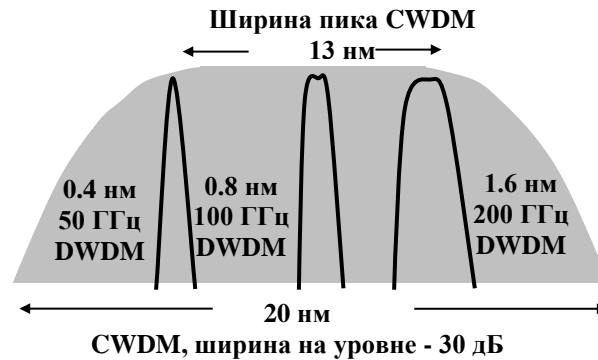


Рис. 2.15. В одном спектральном канале CWDM системы помещается около 20 каналов DWDM системы шириной 100 ГГц.

Достоинства CWDM систем. В WDM оптике основная стоимость приходится на мультиплексоры и демultipлексоры. Причем, чем ближе расположены спектральные каналы в системе, тем труднее избежать появления в ней перекрестных помех. Известно несколько технологических решений, позволяющих создавать мультиплексоры и демultipлексоры, пригодные для применения в DWDM системах, но стоимость их высока.

Естественно, что при большом расстоянии между каналами избежать перекрестных помех значительно проще. С помощью недорогой технологии нанесения интерференционных покрытий достаточно просто изготовить фильтр с единичным пропусканием в полосе 13 нм (вносимые потери 1 дБ) и уровнем подавления перекрестных помех в 30 дБ на расстоянии в 20 нм (рис. 2.15).

В CWDM системах существенно снижаются и требования к рабочей длине волны лазеров и их температурной стабилизации лазера. Разброс рабочих длин волн при производстве DFB лазеров составляет ± 2 нм, а температурный дрейф 0.09 нм на градус Цельсия. Для CWDM систем это вполне допустимо, учитывая, что ширина полосы фильтра порядка 13 нм.

В DWDM системах приходится использовать более дорогую технологию для изготовления лазеров с рабочей длиной волны, заданной с высокой точностью. Кроме того, эти лазеры приходится устанавливать на термоэлектрические холодильники для того, чтобы поддерживать их температуру с точностью порядка 2°C .

Число каналов в CWDM системах. Системы CWDM рассчитаны на применение в относительно коротких линиях и без оптических усилителей. Поэтому число каналов в них зависит только от спектра потерь в волокне и интервала между каналами. Наибольшее число каналов можно получить с новыми “обезвоженными” SM волокнами, в которых устранен пик поглощения на длине волны 1385 нм (рис. 2.16). Тогда при расстоянии между каналами в 20 нм в интервале длин волн от 1280 нм до 1620 нм помещается 16 каналов. В стандартных SM волокнах из-за “водяного пика” поглощения исключается диапазон E, и поэтому в этом же интервале помещается только 12 каналов.

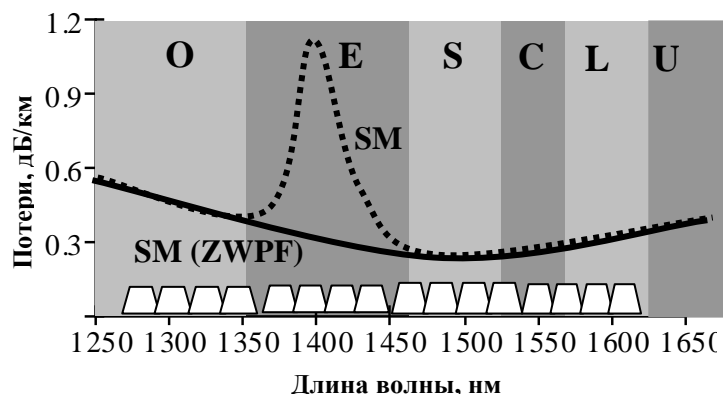


Рис. 2.16. Спектры потерь в SM волокнах (стандартных) и в (обезвоженных) SM волокнах (ZWPF), окна прозрачности и спектральные каналы CWDM систем.

Способы применения. Можно выделить два основных способа применения CWDM систем. В первом способе каждый канал используется самостоятельно. Максимальное расстояние передачи ограничено потерями в волокне (так как оптические усилители не применяются) и, как правило, не превышает 70 км. Передача же данных в каждом спектральном канале осуществляется со скоростью 2.5 Гбит/с, что позволяет использовать относительно недорогие DFB лазеры с прямой модуляцией.

Совместное использование DWDM и CWDM технологий позволяет за счет постепенного наращивания пропускной способности транспортной сети частично амортизировать стоимость установки дорогостоящей DWDM системы. При этом часто используется следующая стратегия: сначала заполняются каналы CWDM системы, примыкающие к диапазону С (1470, 1490, 1590 и 1610 нм), а затем 16 каналов DWDM системы в С диапазоне.

Во втором способе высокочастотный цифровой сигнал разбивается на несколько низкочастотных составляющих, каждая из которых передается отдельным спектральным каналом. Так поступают при передаче данных в стандарте 10 Gigabit Ethernet. В этом формате входной сигнал поступает в виде четырех потоков со скоростью 3.125 Гбит/с. Обычно эти четыре потока сначала объединяют в один поток со скоростью 12.5 Гбит/с. Затем, применив новую схему кодирования, скорость суммарного потока уменьшают до 10 Гбит/с и передают по волокну (по одному спектральному каналу). В системе CWDM каждый из этих четырех низкочастотных потоков передается отдельным спектральным каналом. Сюда же относится достаточно старая идея об использовании CWDM системы для передачи потока в 40 Гбит/с в виде четырех потоков по 10 Гбит/с.

Раздел III Стандарты на оптические волокна

§ 9. Основные положения Rec. G.652 ITU-T

Характеристики оптических кабелей с одномодовыми волокнами

Рекомендуется:

Одномодовое волокно для применений в линиях связи с длиной волны нулевой дисперсии вблизи 1310 нм. Оно оптимизировано для работы на длинах волн в районе 1310 нм, а также может быть использовано для работы на длинах волн в районе 1550 нм (для которых оно не оптимизировано).

Комментарий:

Волокно оптимизируется не только по длине волны нулевой дисперсии, но и по потерям. Волокно с длиной волны нулевой дисперсии вблизи 1310 нм будет оптимизировано по потерям для работы на длинах волн в районе 1550 нм, если длину волны отсечки сместить в район 1550 нм. Такое волокно соответствует Rec. G.654.

1. Характеристики волокон

1.1. Диаметр модового пятна.

Номинальный диаметр модового пятна должен находиться в районе 9...10 мкм. Вариации диаметра модового пятна не должны превышать 10 % от его номинального значения.

Примечания:

1. Величина 10 мкм обычно используется для волокон с согласованной оболочкой, а величина 9 мкм для волокон с депрессированной оболочкой. Однако при выборе специфицированной величины диаметра модового пятна нет необходимости руководствоваться конструкцией волокна.

2. Средняя величина диаметра модового пятна может отличаться от его номинальной величины, но не должна выходить за 10 % интервал.

Комментарий:

Относительные флуктуации диаметра модового пятна волокна вытянутого из одной заготовки, как правило, не превышает 1..2 %.

1.2. Диаметр оболочки

Рекомендуемая величина номинального диаметра оболочки 125 мкм. Вариации диаметра оболочки не должны превышать ± 2 мкм.

Комментарий:

Практически у всех SM волокон эта величина не превышает ± 1 мкм.

1.3. Не концентричность модового пятна

Рекомендуемая величина не концентричности (эксцентриситета) модового пятна не должна превышать 1 мкм.

1.4. Эллиптичность

1.4.1. Эллиптичность модового пятна

Эллиптичность модового пятна (номинально круглого), как правило, невелика, так что она практически не влияет на потери в волокнах и в местах их стыковки. Поэтому нет необходимости

рекомендовать допустимую величину эллиптичности. Обычно нет и необходимости контролировать величину этой эллиптичности.

Комментарий:

В «некачественных» волокнах эллиптичность модового пятна приводит к появлению потерь в сварных соединениях волокон. Эти потери можно уменьшить, выставив волокна так, чтобы оси эллиптических модовых пятен были параллельны между собой.

1.4.2. Эллиптичность оболочки

Эллиптичность оболочки должна быть меньше 2 %.

1.5. Длина волны отсечки

Различают два типа длины волны отсечки:

а) Длина волны отсечки в волокне λ_c , измеренная в соответствии с рекомендациями RTM метода (для важнейших параметров одномодовых волокон).

б) Длина волны отсечки в кабеле λ_{cc} (волокна в кабеле) в развернутом состоянии измеренная в соответствии с рекомендациями RTM метода (для важнейших параметров оптических кабелей).

Комментарий:

RTM (reference test method Rec. G.650) - метод тестирования, в котором характеристики определенного класса оптических волокон или оптических кабелей измеряются в строгом соответствии с определением этих характеристик. Измерения выполняются точным и воспроизводимым методом, имеющим непосредственное отношение к применению волокон или оптических кабелей.

Связь между значениями λ_c и λ_{cc} зависит от параметров волокна, конструкции кабеля и условий измерений. Точное соотношение между λ_c и λ_{cc} рассчитать трудно, хотя можно утверждать, что обычно выполняется условие $\lambda_{cc} < \lambda_c$. Правильный выбор значения λ_c или λ_{cc} должен гарантировать, что одномодовый режим выполнялся для минимальной рабочей длины волны и минимального расстояния между соединениями оптического кабеля. Добиться выполнения этого условия можно двумя альтернативными способами:

- 1) Потребовать, чтобы выполнялось условие: $1100 \text{ нм} < \lambda_c < 1280 \text{ нм}$
- 2) Потребовать, чтобы максимальная величина λ_{cc} была порядка 1260-1270 нм

Примечания:

1. Между минимальной рабочей длиной волны и максимально возможной λ_{cc} должен быть достаточно большой пробел.

2. Чтобы избежать появления модовых шумов и быть уверенным, что одномодовый режим в волокне выполняется для всех расстояний между соединениями волокон, необходимо отобрать волокна с достаточно малой длиной волны отсечки. Для выполнения этих условия в самом худшем случае необходимо, чтобы измеренная RTM методом (G.650) максимальная длина волны отсечки λ_c не превышала 1240 нм.

3. Необходимости, чтобы выполнялись одновременно оба эти условия, нет. Более предпочтительно специфицирование по λ_{cc} , так как в этом случае уверенность, что для оптического кабеля выполняется условие одномодовости больше. Если нет возможности измерить λ_{cc} , например, из-за того, что укладка оптического кабеля не удовлетворяет требованиям, предъявляемым при измерении λ_{cc} в RTM методе, то длина волны отсечки в оптическом кабеле определяется по λ_c .

Примечания:

1. Если длина волны отсечки определяется по λ_{cc} (как в пункте 2)), то λ_c может быть и больше 1240 нм.

2. Если длина волны отсечки определяется по λ_c (как в пункте 1)), то не требуется определять величину λ_{cc} .

3. Если длина волны отсечки определяется по λ_{cc} , то λ_c может быть и больше минимальной рабочей длины волны. Так происходит потому, что при укладке волокон в кабель и инсталлировании его в линию связи длина отсечки уменьшается. Причем для самого короткого участка между соединениями волокон λ_{cc} уменьшается на столько, что оказывается меньше минимальной рабочей длины волны.

4. Если пользователь выбирает спецификацию по λ_{cc} , то ему необходимо убедиться, что требования для λ_{cc} выполнены.

Комментарии:

Проблемы с определением одномодового режима, возникают потому, что в качестве критерия используется не теоретическая, а эффективная длина волны отсечки. Теоретическая длина волны отсечки λ_m находится из условия, что параметр волокна $V = (2\pi/\lambda)$ а $NA = 2.4$. При $\lambda > \lambda_m$ выполняется условие $V < 2.4$: волокно любой длины поддерживает только одну моду. Величина λ_m зависит

только от радиуса сердцевины a и числовой апертуры волокна NA и не зависит от длины волокна и не меняется при укладке волокна в кабель.

Эффективная длина волны отсечки зависит от длины волокна и от технологии укладки его в кабель. Это более сложный критерий применяют для того, чтобы уменьшить потери в основной моде. Эти потери тем меньше, чем больше параметр V . Казалось бы, увеличивать параметр V больше 2.4 нельзя, так как появится вторая мода. Однако у второй моды (при $V \sim 2.4$) диаметр модового пятна намного больше, чем у основной, вторая мода высвечивается на изгибах волокна и в достаточно длинном волокне остается только одна мода.

1.6. Потери на длине волны 1550 нм

Для того чтобы быть уверенными в том, что волокно, оптимизированное для работы на длине волны 1310 нм, может применяться при работе на длинах волн в районе 1550 нм, надо убедиться, что приращение потерь на длине волны 1550 нм, при намотке 100 витков волокна на оправку радиусом 37.5 мм, не превышает 1.0 дБ.

Примечания:

1. 100 витков примерно соответствует числу изгибов оптического кабеля на длине ретрансляционного участка. Радиус намотки в 37.5 мм соответствует общепринятому минимальному радиусу изгиба, при котором ещё не возникает повреждений из-за статической усталости волокон.

2. Если по каким либо причинам число витков, намотанных при тестировании, немного меньше 100 (но не меньше 40), то величина потерь, используемая в качестве критерия, должна быть пропорционально меньше.

3. Если радиус изгиба волокон в линии, например, в местах соединений волокон меньше 37.5 мм (например, 30 мм), то критерий, что при намотке 100 витков волокна на оправку потери не превышают 1.0 дБ, должен применяться, соответственно, к меньшему радиусу.

4. Рекомендации на величину приращения потерь при изгибе волокна относятся к процессу инсталляции волокон. Приращение потерь в волокне из-за скрутки при их укладке в кабель учитывается при соответствующей спецификации.

5. Для удобства проведения рутинных измерений вместо намотки 100 витков можно ограничиться несколькими витками меньшего радиуса. В этом случае при выборе диаметра петли и числа витков надо стремиться к приращению потерь около 1 дБ, как и при намотке 100 витков на оправку радиусом 37.5 мм.

Комментарий:

При укладке оптического кабеля в грунт с вечной мерзлотой он может претерпеть столь сильные деформации, что сигнал на длине волны 1550 нм практически полностью затухнет. В таком случае следует использовать волокно, оптимизированное для работы на длине волны 1550 нм (Rec. G.654).

1.7. Требования к материалом для волокна

1.7.1. Материал волокна

Необходимо указать вещество, из которого сделано волокно.

Примечание: Необходимо быть осторожным при сварке волокон из разных материалов. Как показывает опыт, высокая прочность и малые потери в сварном соединении достигаются при сварке высококачественных кварцевых волокон.

1.7.2. Материалы покрытий

Необходимо указать физические и химические свойства материалов первичных покрытий и (если необходимо) наилучшие способы их удаления.

1.7.3. Тест на прочность

Напряжение растяжения σ_p при тестировании волокна на прочность должно достигать 0.35 ГПа (1 ГПа = 10^9 Па), что примерно соответствует удлинению волокна на 0.5 %. Длительность испытания t_p равно 1 с. Если длительность испытания другая, то и напряжение растяжения σ должно быть другим в соответствии с формулой:

$$\sigma = \sigma_p (t_p/t)^{1/q}. \quad (2.6)$$

Величина динамического параметра прочности q определяется экспериментально. Если параметр q неизвестен (его часто обозначают n_d), то в Rec. G. 650 использовать значение $q = 20$.

Для ряда применений таких как локальные сети или подводные линии связи желательно использовать большие значения напряжения растяжения. Возможности использования таких значений напряжений, как 0.7 ГПа и 1.4 ГПа (или удлинения в 1 % и 2 %), находится в стадии исследований.

Комментарии:

Удлинение волокна $\Delta L/L$ связано с напряжением растяжения σ формулой Юнга

$$(\Delta L/L) E = \sigma, \quad (2.7)$$

где $E = 70$ ГПа - модуль Юнга для кварцевого стекла. Для относительного удлинения $\Delta L/L = 10^{-2}$ (1 %) получаем $\sigma = 0.7$ ГПа.

В настоящее время у большинства производителей в тесте на прочность напряжения растяжения составляет 0.7 ГПа.

Вероятность разрыва волокна дается распределением Вейбулла

$$F(L, \sigma, t) = 1 - \exp[-(L/L_0) (\sigma/\sigma_p)^m (t/t_p)^n], \quad (2.8)$$

где L - длина волокна, L_0 - длина испытываемого участка волокна. Ориентировочно: $m = 3 \pm 1$, $n = 0.2 \pm 0.05$. Отсюда получаем, что $q = m/n = 15$. Однако надо учитывать, что значения коэффициентов m , n и q сильно зависят от качества волокна, и их надо определять экспериментально (IEC 60793-1-3, метод B2).

1.8 Профиль показателя преломления

В общем случае нет необходимости знать конкретную форму профиля показателя преломления. Если нужно, то его можно измерить методом, описанным в Рес. G.651.

1.9 Однородность волокна в продольном направлении

Находится в стадии исследований

2. Спецификации на строительную длину оптического кабеля

Поскольку геометрические и оптические характеристики волокна сильно зависят от технологии укладки волокна в кабель, будут приведены только характеристики пропускания.

Параметры окружающей среды и условия испытаний указаны в соответствующих руководствах по измерению.

2.1 Коэффициент затухания

Данная рекомендация применима к оптическим кабелям с потерями менее 1 дБ на длинах волн 1310 нм и менее 0.5 дБ на длинах волн 1500 нм.

Примечание:

Величина минимальных потерь зависит от волокна и конструкции кабеля. На длине волны 1310 нм они могут составлять 0.3...0.4 дБ/км, а на длине волны 1550 нм 0.15...0.25 дБ/км.

2.2. Коэффициент хроматической дисперсии

Коэффициент хроматической дисперсии специфицируется следующими условиями:

- длина волны нулевой дисперсии должна находиться между $\lambda_{\text{omin}} = 1300$ нм и $\lambda_{\text{omax}} = 1324$ нм
- максимальная величина наклона коэффициента дисперсии на длине волны нулевой дисперсии $S_{\text{omax}} = 0.093$ пс/нм² км

Коэффициент дисперсии в диапазоне длин волн 1260...1360 нм лежит в пределах

$$D_1(\lambda) = (S_{\text{omax}}/4) (\lambda - \lambda_{\text{omin}}^4/\lambda^3), \quad (2.9)$$

$$D_1(\lambda) = (S_{\text{omax}}/4) (\lambda - \lambda_{\text{omax}}^4/\lambda^3). \quad (2.10)$$

Примечания:

1. Примеры результатов расчетов максимального значения коэффициента дисперсии даны в таблице.

Диапазон длин волн, мкм	Максимальное значение коэффициента дисперсии, пс/нм км
1288-1339	3.5
1271-1360	5.3
1550	~ 20

2. Использовать эти уравнения в диапазоне 1550 нм можно только для оценок.

3. Для систем с большой емкостью или большой длиной необходимо специфицировать более узкий диапазон значений $\lambda_{\text{отмх}}$ и $\lambda_{\text{отмн}}$ или, если возможно, меньшее значение $S_{\text{отмх}}$.

4. Нет необходимости в периодическом контроле коэффициента дисперсии.

3. Элементарные кабельные участки

Элементарный кабельный участок обычно состоит из нескольких сваренных между собой строительных длин оптического кабеля. Полные потери в нем определяются не только потерями в строительных длинах оптического кабеля, но и в сварных соединениях волокон и в разъёмах. Причем эти потери имеют статистическую природу, что необходимо учитывать при экономических расчетах.

$$A = \sum \alpha_n L_n + \alpha_s x + \alpha_c y \quad (n = 1 \dots m). \quad (2.11)$$

3.1 Потери

Величина полных потерь в элементарном кабельном участке определяется с помощью следующих параметров:

α_n – коэффициент затухания n-го волокна

L_n – длина n-го волокна

m – число строительных длин

α_s – средняя величина потерь в сварных соединениях

x – число сварных соединений

α_c – средняя величина потерь в разъёмах

y – число разъёмов

Необходимо иметь запас по потерям, учитывающий возможные изменения (дополнительные сварные соединения, увеличение длины участка, старение, температурные вариации и т.д.).

Потери в разъёмах подсоединяемого оборудования не учитываются.

При расчете бюджета потерь в системе необходимо учитывать не только средние значения потерь, но и их стандартные отклонения.

3.2 Хроматическая дисперсия

Величина полной хроматической дисперсии (в пс/нм) определяется через значения коэффициентов дисперсии строительных длин кабелей (см. 2.2) выражением: $\sum D_n L_n$, где $n = 1 \dots m$.

§ 10. Организации, устанавливающие стандарты на оптические волокна

Зачем нужны стандарты. Хорошо разработанные и регулярно обновляемые стандарты обеспечивают защиту пользователя при проектировании сетей связи от применения устройств, которые могут устареть в ближайшем будущем. Соответствие стандартам обеспечивает также возможность взаимодействия систем связи с оборудованием различных компаний. При этом, несмотря на то, что стандарты постоянно обновляются, каждое новое поколение стандартов является стабильной средой для создания оборудования и систем с оптимальным на данный момент сочетанием эксплуатационных качеств и характеристик.

Хороший пример – успех стандарта синхронных оптических сетей SONET (Synchronous Optical Network) в Северной Америке и стандарта синхронной цифровой иерархии SDH (Synchronous Digital Hierarchy) в Европе и Азии. Широкое распространение этих стандартов позволяет сегодня непосредственно соединять сети связи, в которых используется оборудование различных производителей. К стандартам SONET и SDH постепенно перешли практически все создатели волоконно-оптических сетей.

Организации по стандартизации. Практически все ведущие государства мира и крупнейшие корпорации имеют комитеты или институты по стандартизации. Часть из них (они перечислены ниже) признаны на международном уровне.

Таблица № 2.8. Сокращенные наименования организаций по стандартизации, признанных на международном уровне.

1. ANSI	Американский национальный институт стандартов
2. Bellcore	Исследовательский центр в области связи компании Bell Tele phone (США). Теперь это Telcordia Technologie.
3. CECC	Комитет электронных деталей европейского комитета по стандартизации в области электротехники
4. ENELEC	Европейский комитет по стандартизации в области электротехники
5. CEPT	Европейская конференция управлений почтовой и дальней связи
6. DIN	Немецкий институт стандартизации
7. EIA	Ассоциация электронных отраслей промышленности
8. ETSI	Европейский институт стандартизации в области дальней связи
9. FTZ	Центральное ведомство связи (Германия)
10. IEC	Международная электротехническая комиссия (МЭК)
11. IEEE	Институт инженеров по электротехнике и радиоэлектронике
12. ISO	Международная организация по стандартизации (МОС)
13. ITU-T	Международный союз электросвязи: сектор телекоммуникаций (МСЭ-Е)
14. NIST	Национальный институт стандартов и технологий (США)
15. TIA	Ассоциация телекоммуникационной промышленности
16. WTO	Организация по международной торговле

Основные организации, устанавливающие международные стандарты. Международные стандарты в телекоммуникациях устанавливаются в основном двумя организациями: Международным телекоммуникационным союзом ITU (International Telecommunication Union) и Международной электротехнической комиссией IEC (International Electrotechnical Commission). Причем IEC определяет стандарты на оборудование, а ITU стандарты на применение оборудования и технологий. Обе эти организации работают в тесном сотрудничестве с общенациональными и региональными агентствами по стандартизации.

Таблица № 2.9. Организации, занимающиеся разработкой международных стандартов.

Применение технологии и оборудования	<u>Оборудование</u>	Уровень
ITU	IEC	Международный
ETSI	CENELEC	Европа

В США стандартизацией для ряда областей промышленности, в том числе и для волоконно-оптических телекоммуникаций занимается Ассоциация телекоммуникационной промышленности TIA (Telecommunications Industry Association) и Telcordia Technologies (ранее Bellcore). В Европе аналогичные функции выполняет Европейский институт по телекоммуникационным стандартам ETSI (European Telecommunication Standard Institute).

Международный телекоммуникационный союз ITU занимается в основном стандартами на применение технологий и оборудования. Стандарты ITU не являются обязательными, но широко поддерживаются, так как облегчают взаимодействие между сетями и позволяют провайдерам предоставлять услуги по всему миру. В ITU имеются отделы радиосвязи ITU-R, стандартизации телекоммуникаций ITU-T и развития телекоммуникаций ITU-D. С волоконно-оптическими сетями в наибольшей степени связан отдел стандартизации телекоммуникаций ITU-T. В нем работают 14 исследовательских групп SG (Study Group), в каждой из которых есть представители всех стран-членов ITU.

Для работы над конкретными задачами в отделе ITU-T формируются специальные группы, которые распускаются после завершения работ. Сейчас работают пятнадцать таких исследовательских групп, включая группу SG 15 (Транспортные сети, системы и оборудование), которая наиболее тесно связана с системами DWDM.

Группа SG 15 самая большая - в нее входит более 345 членов из 26 стран и 78 научных и промышленных организаций. Она состоит из четырех рабочих команд WP (Working Party): сети доступа (Network Access), обработка сетевых сигналов (Network Signal Processing), мультиплексирования

(Multiplexing) и коммутации и передачи данных (Switching and Transmission). Последняя из этих рабочих команд WP 4/15 отвечает за все аспекты, связанные со стандартизацией сред и систем передачи данных, в том числе и оптических волокон.

В частности рабочая команда WP 4/15 пересмотрела недавно рекомендации по тестированию оптических волокон и оптических кабелей, внесла в них изменения, связанные с появлением новых типов волокон, и добавила новые метода тестирования нелинейностей и неоднородностей волокон. Большое внимание WP 4/15 уделяет также способам измерения хроматической и поляризационной дисперсии.

Важный участок деятельности WP 4/15 – разработка стандартов для систем WDM. Рабочая команда WP 4/15 предложила сетку частот с шагом 50 ГГц, совместимую с принятой сеткой с шагом 100 ГГц, и соответствующие стандарты для систем с высокой (до 128 каналов) и низкой плотность каналов и систем с неравномерным расстоянием между каналами. Исследуется возможность использования спектральной области 1620...1660 нм для мониторинга сетей связи.

Эта рабочая команда ведет разработку стандартов для TDM со скоростью передачи данных более 10 Гбит/с, с учетом их вероятного использования в сетях WDM. В частности в настоящее время изучаются основные технологии TDM со скоростью передачи данных 40 ГГц/с.

Таблица № 2.10 Стандарты ITU-T и IEC на оптические волокна.

ITU-T Rec. G. 650	Методы тестирования основных параметров одномодовых оптических волокон (03.93).
ITU-T Rec. G. 651	Характеристики оптических кабелей с многомодовыми градиентными волокнами 50/125 мкм (03.93).
ITU-T Rec. G. 652 IEC B 1.1	Характеристики оптических кабелей с одномодовыми волокнами (03.93).
ITU-T Rec. G. 653 IEC B 2	Характеристики оптических кабелей с одномодовыми волокнами со смещенной дисперсией (03.93).
ITU-T Rec. G. 654 IEC B 1.2	Характеристики оптических кабелей с одномодовыми волокнами, оптимизированными на длину волны 1550 нм (03.93).
IEC B 3	Характеристики оптических кабелей с одномодовыми волокнами с нулевым наклоном дисперсионной характеристики.
ITU-T Rec. G. 655 IEC B 4	Характеристики оптических кабелей с одномодовыми волокнами с ненулевой смещенной дисперсией (10.96).

Международная электротехническая комиссия IEC разрабатывает стандарты для оборудования. Следование стандартам IEC является добровольным, даже для стран-членов IEC (более 50 стран). IEC имеет официальные связи с ITU и другими международными организациями в области стандартизации, такими как Международная организация по стандартизации ISO (International Organization for Standardization), Организация по международной торговле WTO (World Trade Organization), Европейский комитет по стандартизации в области электротехники CENELEC (European Committee for Electrotechnical Standardization). Наиболее активные в области телекоммуникаций члены ТИА являются также и членами IEC.

Организационная структура IEC кроме управляющего комитета включает в себя около 200 технических комитетов и подкомитетов и более 700 рабочих групп. Всего же в разработке стандартов принимают участие более 10 000 экспертов. Работы в области систем и компонентов волоконно-оптической связи ведутся в техническом комитете TC 86 (волоконная оптика).

Интересы тех, кто разрабатывает стандарты для оборудования, в целом совпадают с интересами тех, кто разрабатывает стандарты на применение технологий и оборудования. Поэтому неудивительно, что области деятельности технического комитета TC 86 IEC и ITU во многом пересекаются. В частности и TC 86 IEC и ITU работают одновременно по таким направлениям как поляризационная модовая дисперсия PMD, WDM, оптические усилители, технические требования к волокну.

Так работы, проведенные в ITU по выбору эталонного метода измерения PMD, позволили TC 86 IEC разработать стандарты на измерение PMD. Например, TC 86 IEC подготовил технический доклад IEC 61282-3 по вычислению PMD в волоконно-оптических системах. Среди опубликованных стандартов – “Методы измерения PMD в одномодовых оптических волокнах” (IEC 61941). В этом стандарте рассмотрены все практически доступные на сегодняшний день способы измерения PMD в одномодовых волокнах. В настоящее время ведутся работы по компенсации PMD в аналоговых и цифровых системах и расчету влияния PMD на характеристики цифрового сигнала.

§ 1. Введение

NZDS волокна (Non-Zero Dispersion Shifted) сконструированы специально для применения в DWDM системах и обладают дисперсией достаточной для того, чтобы подавить эффект четырехволнового смешения. В тоже время дисперсия их достаточно мала - так, что она не ограничивает возможность передачи на большие расстояния сигналов со скоростью 10 Гбит/с (STM-64). Иначе говоря, NZDS волокна совместимы как с плотными DWDM системами, так и с высокоскоростными TDM (Time Domain Multiplication) системами, и позволяют увеличивать пропускную способность волокна не только за счет увеличения числа передаваемых каналов, но и за счет увеличения скорости передачи в каждом канале.



Рис. 3.1. Пропускная способность магистральных линий передачи возрастает как за счет роста числа спектральных каналов, так и за счет увеличения скорости передачи в спектральных каналах.

NZDS волокна являются ещё достаточно «молодым» типом волокон и продолжают эволюционировать вместе с технологией DWDM. В настоящее время на рынке представлено несколько типов NZDS волокон как с положительной, так и с отрицательной дисперсией. В Европе рынок NZDS волокон пока ещё небольшой, а цена их достаточно высока (в два три раза больше, чем у SM волокон). В то же время США на долю NZDS волокон приходится около 50 % волокон, установленных в дальних линиях связи. В Европе также все больше операторов связи начинают использовать этот тип волокон. Так что рынок NZDS волокон расширяется, и цена на них должна постепенно снизиться.

Параметры NZDS волокон регламентируются Rec. G.655 ITU-T. Ранние модели NZDS волокон отличались от DS волокон (G.653) всего лишь тем, длины волны нулевой дисперсии у них не попадали в полосу усиления эрбиевого оптического усилителя (рис. 3.2). Последние модели NZDS волокон обладают большей площадью модового пятна и меньшим наклоном коэффициента дисперсии, что позволяет увеличить число каналов в DWDM системе и передавать больше мощности в каждом из каналов. Появление на рынке этих новых моделей NZDS волокон требует внесения изменений в Rec. G.655, которые должны быть в скором времени проведены отделом стандартизации телекоммуникаций ITU-T.

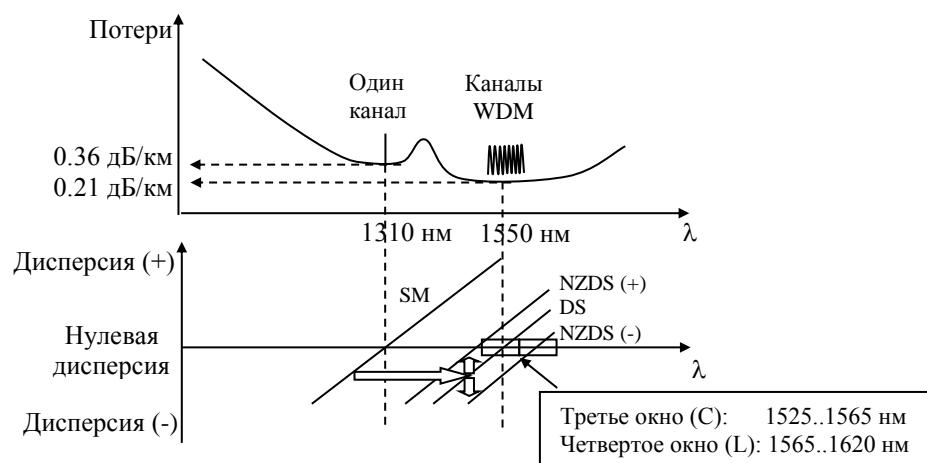


Рис. 3.2. Зависимость величины потерь и коэффициента дисперсии от длины волны для SM, DS и NZDS волокон.

В идеале NZDS волокна должны обладать большой площадью модового пятна и нулевым наклоном дисперсионной характеристики. Однако для используемых обычно форм профилей показателя преломления (рис. 3.3) удовлетворить этим требованиям одновременно не удастся.



Рис. 3.3. Профили показателя преломления NZDS волокон

Зависимость наклона коэффициента дисперсии от диаметра модового пятна для NZDS волокна с четырехслойным профилем показателя преломления производства компании Hitachi приведена на рис. 3.4.

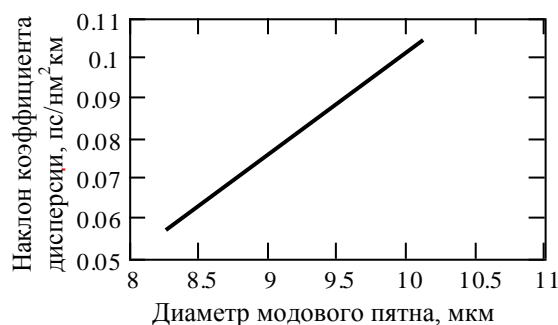


Рис. 3.4. Зависимость наклона коэффициента дисперсии от диаметра модового пятна для волокон компании Hitachi с четырехслойным профилем показателя.

Поэтому поиск оптимальной формы профиля показателя преломления для NZDS волокон продолжается и в настоящее время. Одно направление этих поисков связано с исследованием популярных в середине 80-х годов волокон с плоской дисперсионной характеристикой. Другое направление - с попыткой создания волокон с отрицательным знаком наклона коэффициента дисперсии. Устанавливая последовательно NZDS волокна с противоположными знаками коэффициента дисперсии, можно будет строить линии с постоянной в широкой полосе частот полной дисперсией. Интерес к таким волокнам возникает в первую очередь при создании сверхдлинных подводных магистральных линий передачи.

Ещё одной причиной, которая может привести к обновлению парка NZDS волокон, является прогресс в технологии оптических усилителей. В настоящее время стали доступны оптические усилители, работающие в диапазонах соседних с диапазоном эрбиевого оптического усилителя (1525

...1565 нм), например: 1570...1610 нм, 1290..1310 нм, 1420..1500 нм и 1650..1700 нм. Таким образом, открывается возможность освоения новых оптических диапазонов, для чего потребуются и новые NZDS волокна.

Применение NZDS волокон. Наибольший интерес для применений в наземных линиях связи представляют новые модели NZDS волокон с положительной дисперсией (+D NZDS) и большой площадью модового пятна. Они обладают малыми потерями, малой величиной PMD и хорошими геометрическими параметрами и идеально подходят для DWDM систем, работающих в полосе эрбиевого усилителя (диапазон C). Более того, ряд моделей +D NZDS обладает достаточно малым наклоном коэффициента дисперсии так, что они могут применяться и в соседнем длинноволновом диапазоне L (1570...1620 нм).

Волокна с отрицательной дисперсией (-D NZDS) до недавнего времени применялись в основном в линиях дальней подводной связи. Это связано в первую очередь с тем, что для компенсации полной дисперсии в линии с -D NZDS волокнами можно использовать SM волокна, обладающие в диапазоне C достаточно большой (~ 17 пс/нм км) положительной дисперсией. Так как длина волны нулевой дисперсии у -D NZDS волокон лежит в диапазоне L, то в этом диапазоне эти волокна не применяются.

В последнее время -D NZDS волокна стали достаточно широко применяться и в наземных линиях связи. Были разработаны волокна с отрицательной дисперсией специально для городских сетей (MAN –metropolitan area network). Их применение позволяет не только обеспечить высокую скорость передачи данных в таких сетях, но снизить стоимость комплекта «оборудование + кабель».

Как показала практика, первые модели NZDS волокон не удовлетворяют в полной мере требованиям, предъявляемым к ним в DWDM системах при скоростях передачи сигналов 10 Гбит/с (STM-64). Площадь модового пятна у них слишком мала, а наклон коэффициента дисперсии слишком велик. Это приводит к усилению эффекта перекрестной фазовой модуляции (XPM) и четырехволнового смешения (FWM) и, соответственно, появлению перекрестных помех.

Применение NZDS волокон с большой (почти в два раза) площадью модового пятна и малым наклоном коэффициента дисперсии позволяет значительно уменьшить перекрестные помехи вызванные XPM и FWM эффектами. В частности, малый наклон коэффициента дисперсии облегчает компенсацию дисперсии, необходимую для передачи сигналов со скоростью 10 Гбит/с (STM-64) на расстояние 300..400 км. При наличии небольшой дисперсии перекрестные помехи из-за XPM эффекта проявляются сильнее, чем из-за FWM эффекта. Поэтому XPM эффект является основным нелинейным эффектом для NZDS волокон.

В настоящее время промышленностью выпускаются DWDM с пропускной способностью 1.6 Тбит/с (160×10 Гбит/с). На международной выставке FOC 2001 сообщалось о DWDM системе с пропускной способностью 10.92 Тбит/с (273×40 Гбит/с). Предельная же пропускная способность линии передачи на одном волокне при использовании технологии DWDM составляет около 100 Тбит/с и ограничивается нелинейными эффектами.

Первый раздел этой главы посвящен рассмотрению нелинейных эффектов, проявление которых зависит от величины и знака дисперсии волокна. Эти эффекты обусловлены нелинейной зависимостью показателя преломления от интенсивности волн, распространяющихся в волокне (эффект Керра). К ним относятся самовоздействие (SPM), взаимодействие (XPM), четырехволновое смешение (FWM) и модуляционная нестабильность (MI).

Во втором разделе рассмотрены волокна с положительной дисперсией. В наземных линиях связи (где длина регенерационных участков, как правило, меньше 1000 км) применяются волокна с положительной дисперсией (+ D NZDS). Связано это в основном с тем, что в + D NZDS волокнах импульс из-за SPM эффекта расширяется меньше чем в - D NZDS волокнах.

Третий раздел посвящен - D NZDS волокнам. Новые модели - D NZDS волокон предназначенные для применения в городских сетях (MAN) достаточно широко представлены на российском рынке.

Раздел I. Нелинейные эффекты в оптических волокнах

§ 2. Эффективность нелинейных процессов в оптических волокнах

С появлением оптических усилителей нелинейные эффекты в оптических волокнах стали одним из основных факторов, ограничивающих длину ретрансляционного участка волоконных линий передачи и их пропускную способность. Многие из возникших при этом вопросов специфичны для волоконно-оптической связи и ранее в литературе по нелинейной оптике не рассматривались или рассматривались под другим углом зрения.

Нелинейные эффекты проявляются, как известно, только при достаточно больших мощностях света. Первоначально согласно Rec. ITU-T G.662 величина мощности вводимой в волокно ограничивалась 17 дБм (на $\lambda = 1550$ нм), а затем она была увеличена до 19 дБм. В настоящее время ряд компаний (Siemens, Тусо) представили DWDM системы, в которых уровень мощности увеличен до 30 дБм.

При малых мощностях взаимодействие света со средой пропорционально первой степени от мощности света, т.е. представляет собой линейный эффект. Хорошим примером линейного эффекта является поглощение света в волокне: количество поглощенной мощности прямо пропорционально мощности распространяющегося в волокне. Нелинейные же эффекты пропорциональны более высоким степеням от мощности света, и их вклад быстро увеличивается с ростом мощности (рис. 3.5).

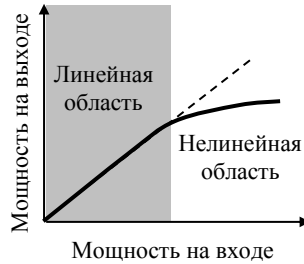


Рис. 3.5. Нелинейность проявляется при высоком уровне мощности

По своим нелинейным свойствам кварцевое стекло существенно (несколько порядков) уступает традиционным нелинейным оптическим материалам. Однако эффективность нелинейных эффектов определяется не только нелинейными коэффициентами, но и произведением плотности мощности $P/A_{\text{эфф}}$ (интенсивности) на длину взаимодействия $L_{\text{вз}}$:

$$M = P L_{\text{вз}} / A_{\text{э}}. \quad (3.1)$$

В объемной среде длина взаимодействия $L_{\text{вз}}$ ограничена (рис. 3.5а) из-за дифракционной расходимости света величиной порядка $A_{\text{эфф}}/\lambda$ (релеевское расстояние).

$$L_{\text{вз}} = A_{\text{э}}/\lambda. \quad (3.2)$$

Поэтому в объемной среде коэффициент M не зависит от степени концентрации света и примерно равен:

$$M_{0\text{б}} = P/\pi \lambda. \quad (3.3)$$

Оптические волокна обладают двумя специфическими свойствами, которые обуславливают высокую эффективность протекания в них нелинейных процессов. Во-первых, свет сконцентрирован на малой площади вблизи сердцевины волокна. Во-вторых, такая высокая концентрация света сохраняется на всей многокилометровой длине волокна (рис. 3.6б).

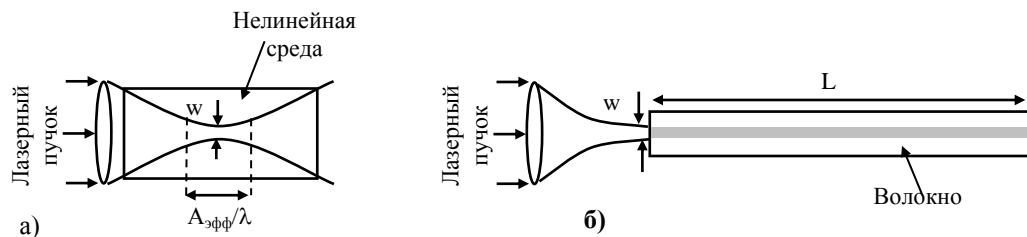


Рис. 3.6. Геометрия экспериментов для объемной не волноводной среды (а) и для оптических волокон (б).

В волокне длина взаимодействия ограничена тем, что интенсивность света уменьшается из-за потерь в волокне, и её вклад в суммарный нелинейный эффект существенен только на начальном участке. Эффективная длина этого участка волокна определяется выражением:

$$L_{\text{э}} = [1 - \exp(-\alpha L)]/\alpha. \quad (3.4)$$

где L – длина волокна, α - потери в волокне. Для типичной величины поглощения в волокне 0.22 дБ/км эффективная длина волокна составляет 20 км, что заметно меньше не только полной длины линии, но и расстояния между оптическими усилителями.

В SM волокнах диаметр модового пятна w равен примерно 7λ (глава I), и, соответственно, $A_{\text{эфф}} = \pi w^2 / 4 = 12.5 \pi \lambda^2$. Из (3.1), полагая $L_{\text{вз}} = L_{\text{эфф}}$, находим величину коэффициента M в волокне:

$$M_{\text{в}} \cong 0.1 P L_{\text{э}} / (\pi \lambda^2). \quad (3.5)$$

С помощью (3.5) и (3.3) находим величину отношения:

$$M_{\text{в}} / M_{0\text{б}} \cong 0.1 L_{\text{э}} / \lambda, \quad (3.6)$$

что при $L_{\text{эфф}} = 20$ км и $\lambda = 1.55$ мкм составляет величину порядка 10^9 .

Основные типы нелинейных эффектов в волокне наблюдаются уже при мощности в каждом из спектральных каналов DWDM системы порядка несколько милливатт. Их можно разделить на неупругие и упругие взаимодействия. К неупругим взаимодействиям относятся вынужденное (стимулированное) рассеяние Рамана (SRS – stimulated Raman scattering) и вынужденное рассеяние Бриллюэна (SBS – stimulated Brillouin scattering). Часто используют и другие обозначения: вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР) и вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна (ВРМБ).

Явления вынужденного рассеяния SBS и SRS проявляются в том, что лазерный сигнал рассеивается, соответственно, на звуковых волнах, распространяющихся в волокне (акустических фоновых) или на молекулярных колебаниях волокна (оптических фононах), и смещается в область более длинных волн (3.7).

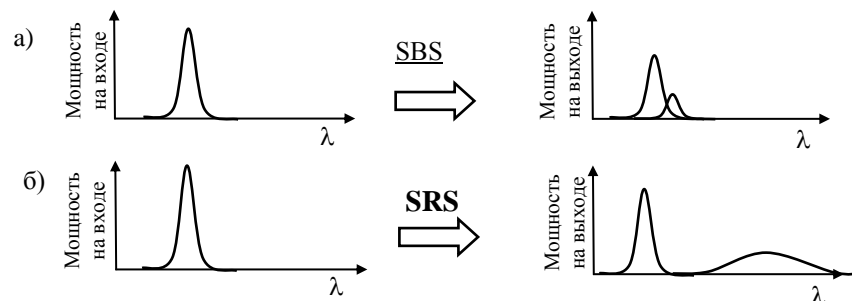


Рис. 3.7. Спектры SBS и SRS.

- а) При вынужденном рассеянии Бриллюэна (SBS) спектр спонтанного излучения узкий (30..60 МГц) и смещен в длинноволновую сторону на 11 ГГц.
- б) При вынужденном рассеянии Рамана (SRS) спектр спонтанного излучения широкий (~ 7 ТГц или 55 нм) и смещен в длинноволновую сторону на величину порядка 13 ТГц.

Хотя явления SBS и SRS во многом схожи, можно выделить несколько существенных отличий:

- SBS наблюдается только для встречной волны (рассеяние происходит только назад). SRS наблюдается не только для встречных волн, но и для сонаправленных волн.
- При SRS спектр спонтанного излучения смещен значительно сильнее и ширина его намного больше чем при SBS.
- Пороговая мощность SBS намного меньше чем SRS.

К упругим взаимодействиям относятся явления обусловленные зависимостью показателя преломления от интенсивности света (эффектом Керра): фазовая самомодуляция волн (SPM – Self-Phase Modulation), четырехволновое смешение (FWM – Four Wave Mixing), перекрестная фазовая модуляция (XPM – Cross Phase Modulation), модуляционная неустойчивость (MI – Modulation Instability). Явления, обусловленные эффектом Керра, могут приводить, в зависимости от величины и знака дисперсии волокна, к значительным изменениям ширины и формы импульсов, а также к появлению перекрестных помех, зависящих от числа каналов в DWDM системе (рис.3.8).

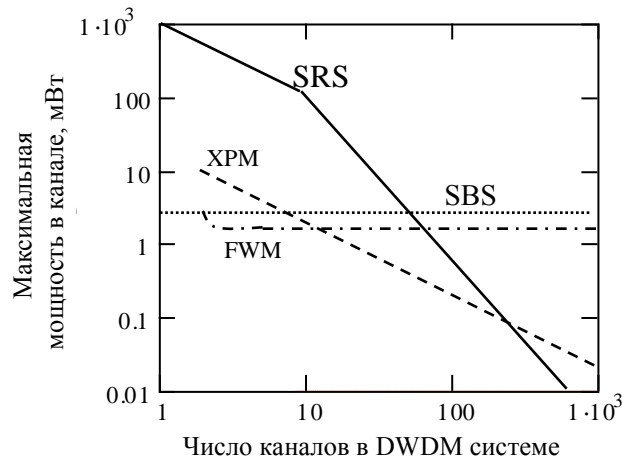


Рис. 3.8. Примерный вид зависимости максимальной мощности в спектральном канале от числа каналов.

§ 3. Вынужденное рассеяние Бриллюэна (SBS)

Физическая причина явления вынужденного рассеяния Бриллюэна состоит в том, что интенсивная волна света распространяющегося в прямом направлении и первоначально слабая волна рассеянного назад света, а также тепловая упругая волна нелинейно взаимодействуют друг с другом (за счет явления электрострикции). В результате такого взаимодействия в волокне возникают волны показателя преломления, движущиеся со скоростью звука.

Часть распространяющегося в прямом направлении света рассеивается на волнах показателя преломления назад со сдвигом частоты (рис. 3.9). Это приводит не только к ослаблению сигнала, передаваемого по волокну в прямом направлении, но и к появлению дополнительных вариаций частоты и амплитуды источника излучения при попадании в него отраженного излучения.

Величина сдвига частоты зависит от того, как легирована сердцевина волокна. В SM волокне (G.652) рассеянная назад световая волна смещена по частоте на 11 ГГц (+ 0.088 нм) при ширине полосы около $\Delta f_B = 30$ МГц. А в DS волокне (G.653) она смещена на 10.7 ГГц (+ 0.085 нм) при ширине полосы около $\Delta f_B = 60$ МГц. Однако в любом случае линия спонтанного усиления узкая, а сдвиг частот много меньше расстояния между спектральными каналами DWDM системы. Поэтому ограничение на величину мощности в канале не зависит, как показано на рис. 3.8, от числа каналов.

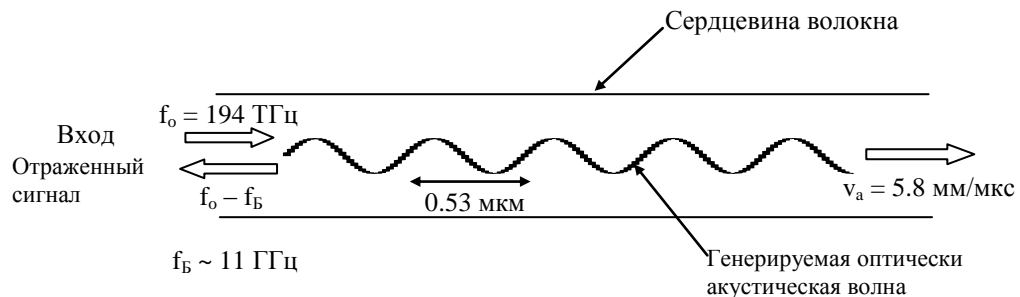


Рис. 3.9. Рассеяние Бриллюэна на одной из генерируемых оптически акустических волн как отражение от движущейся решетки Брэгга.

Для расчета пороговой величин мощности P_B (при которой примерно половина мощности рассеивается назад) обычно используют следующее приближенное выражение

$$P_B L_s \cong (21 A_s / g_B) (1 + \Delta f_L / \Delta f_B) = 0.03 (1 + \Delta f_L / \Delta f_B) \text{ Вт км}, \quad (3.7)$$

где Δf_L – ширина полосы источника излучения. Коэффициент 0.03 Вт км получен для $g_B = 5 \cdot 10^{-11}$ м/Вт- коэффициент усиления SBS (в максимуме) и $A_s = 70$ мкм² (SM волокно).

Для узкополосного источника излучения ($\Delta f_L < 1$ МГц) и типичного значения $L_s = 20$ км находим $P_B = 1.5$ мВт (это значение показано на рис. 3.7). Для сравнения в DWDM типичное значение мощности в одном спектральном канале 1...10 мВт, а при передачи сигнала по волокну на одной длине волны или, например, в оптическом рефлектометре она может уже достигать величины 100...200 мВт.

Пороговую величину мощности можно увеличить, уменьшая эффективную длину взаимодействия световой волны с акустической волной. В оптическом рефлектометре она уменьшается «автоматически», так как в нем используются импульсы с большой скважностью. Для одиночного импульса, как нетрудно видеть, эта эффективная длина равна половине длины импульса

$$L_{\text{эфф}} = L_n = c \tau / 2 n, \quad (3.8)$$

где τ - длительность импульса, $n \cong 1.5$ – групповой показатель преломления волокна. Для типичного значения $\tau = 1$ мкс получаем $L_n = L_{\text{эфф}} = 0.1$ км, что примерно на два порядка меньше значения эффективной длины взаимодействия ($L_n = 20$ км) для узкополосного источника излучения. Соответственно, в режиме таких одиночных импульсов величина пороговой мощности увеличивается в примерно 200 раз, т.е. до 300 мВт.

В оптических системах с внешним амплитудным модулятором пороговая мощность SBS уменьшается всего лишь в 2...4 раза (до 5 мВт), так как скважность передаваемых импульсов мала, и значительная часть мощности содержится в оптической несущей. Для увеличения пороговой мощности таких систем обычно используют дополнительную фазовую модуляцию излучения лазера с частотой порядка 50 Гц и девиацией частоты порядка 1 ГГц. Полагая для оценки в (3.7) величину $\Delta f_d = 1$ ГГц, получаем, что за счет расширения полосы излучения пороговая мощность увеличивается примерно в 30 раз (до 50 мВт).

В оптических системах при прямой модуляции лазера чирпинг эффект приводит к уширению спектра излучения лазера (глава I) пропорционально битовой скорости. Так при скорости передачи 2.5 Гбит/с (STM-16) в системах с прямой модуляцией лазера пороговая мощность SBS достигает величины 100...200 мВт.

Таким образом, хотя при работе монохроматическим источником излучения максимальная мощность в канале из-за SBS ограничена (как показано на рис. 3.7 величиной порядка 1.5 мВт), в практических системах допустима гораздо большая величина мощности.

§ 4. Вынужденное рассеяние Рамана (SRS)

Физическая причина явления вынужденного рассеяния Рамана состоит в поглощении фотона молекулой, использование части энергии фотона на возбуждение колебаний этой молекулы, а оставшейся части энергии на испускание фотона с более низкой частотой. Этот эффект используется для усиления сигналов в спектральных каналах DWDM систем, так как он обладает широкой полосой усиления (50...100 нм, для разных типов волокон), что даже шире полосы усиления эрбиевого усилителя (~40 нм).

Пороговая величина мощности P_R (при которой примерно половина мощности преобразуется в сигнал более низкой частоты) определяется выражением

$$P_R L_{\text{эфф}} \cong (16 A_s / g_R) \cong 17 \text{ Вт км}. \quad (3.9)$$

Коэффициент 0.03 Вт км получен для $g_R = 5 \cdot 10^{-11}$ м/Вт и $A_s = 70$ мкм² (SM волокно). При типичном значении $L_n = 20$ км ($\lambda = 1550$ нм) получаем $P_R \cong 1$ Вт, что заметно больше общей выходной мощности эрбиевого оптического усилителя (~ 23 дБм). Более того, в DWDM системе мощность в спектральном канале ещё меньше, так как общая выходная мощность оптического усилителя должна быть разделена между всеми каналами системы.

Таким образом, SRS, в отличие от SBS, не ограничивает непосредственно величину мощности вводимой волокно. Однако SRS играет важную роль в волоконной связи, так как обеспечивает возможность усиления сигналов в широкой полосе частот смещенной в длинноволновую сторону относительно длины волны накачки на величину ~13 ТГц (100 нм). Примерный вид спектров усиления в основных типах кварцевых волокон показан на рис. 3.10.

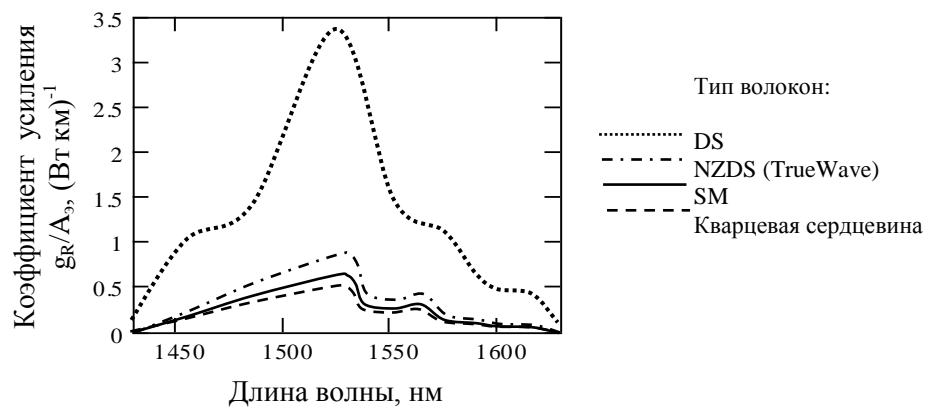


Рис. 3.10. Спектры рамановского усиления в кварцевых волокнах.

Рамановский усилитель. В отличие от оптических усилителей с примесями редкоземельных элементов, рамановские усилители обеспечивают усиление сигналов практически на любой длине волны, что делает их особенно привлекательными в будущих широкополосных системах DWDM. Кроме того, усиление в них распределено по длине волокна (примерно на 20 км) и сигнал из-за потерь в волокне уменьшается не так сильно, как при использовании обычных оптических усилителей (рис.3.11), что позволяет добиться лучшего отношения сигнал/шум. Конструктивно рамановский усилитель выглядит просто и для его создания необходим практически только источник накачки на соответствующей длине волны.

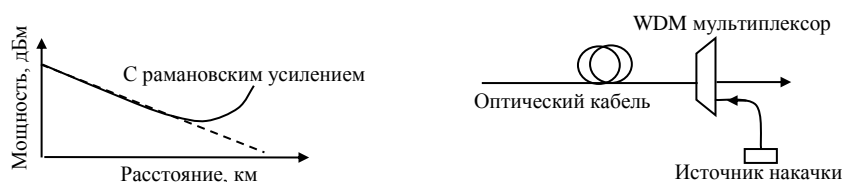


Рис.3.11. Схема рамановского усиления сигнала в линии связи.

Перекрестные помехи возникают, когда по волокну передаются сигналы на двух или больше длинах волн. При этом сигналы на длинных волнах усиливаются за счет ослабления сигналов на коротких длинах волн. В DWDM системе со многими близко расположенными спектральными каналами это приводит к появлению наклона в спектре передаваемой мощности (3.12), величина которого пропорциональна мощности в канале. Так как мощность в каналах системы не должна сильно различаться (типичное значение запаса мощности 0.5...1 дБ), то SRS приводит к ограничению максимальной мощности в канале (обратно пропорциональной квадрату числа каналов).

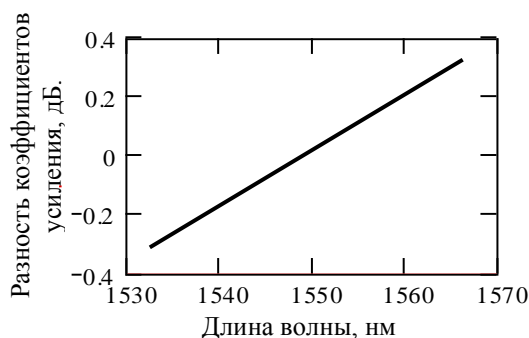


Рис. 3.12. Разность коэффициентов усиления между 20 каналами 100 км NZDS волокне длиной 100 км и мощностью в каждом канале 1.5 мВт.

§ 5. Фазовая самомодуляция волн (SPM)

Фазовая самомодуляция волн (SPM - Self-Phase Modulation) возникает из-за зависимости показателя преломления от интенсивности света (эффект Керра):

$$n = n_0 + n_2 (P/A_0), \quad (3.10)$$

где n_0 – линейная часть показателя преломления (~ 1.46 для кварцевого стекла), n_2 . Величина нелинейного коэффициента n_2 в зависимости от типа волокна может изменяться в пределах $2.2 \dots 3.4 \cdot 10^{-20} \text{ м}^2/\text{Вт}$.

Главные особенности спектра импульса, прошедшего через такую нелинейную среду, можно выяснить, анализируя его фазу

$$\varphi = \omega_0 t - \omega_0 L n / c = \omega_0 (t - L n_0 / c) - \varphi_{\text{SPM}}, \quad (3.11)$$

где

$$\varphi_{\text{SPM}} = (2\pi/\lambda) n_2 (P / A_3) L_3 = \gamma P L_3. \quad (3.12)$$

Коэффициент нелинейности $\gamma = (2\pi/\lambda) (n_2 / A_3)$ обратно пропорционален площади модового пятна A_3 , что и приводит в основном к различию коэффициентов нелинейности у разных типов волокон (рис. 3.13).

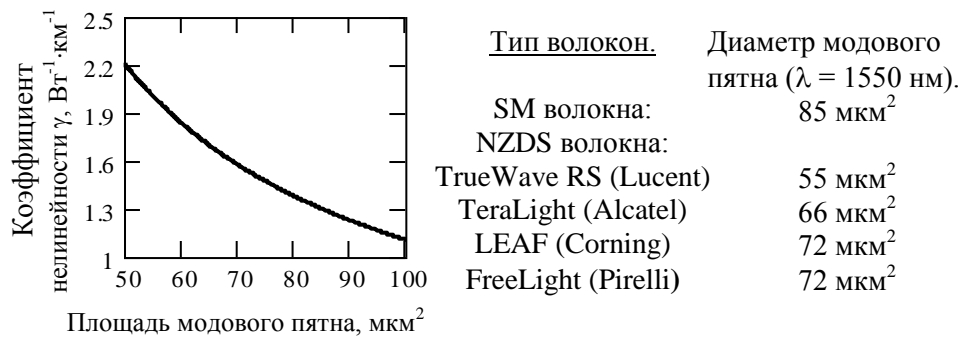


Рис. 3.13. Зависимость коэффициента нелинейности от диаметра модового пятна для волокон различных типов.

Для объяснения SPM эффекта необходимо учесть, что мощность в импульсе является функцией времени - на заднем фронте импульса мощность увеличивается во времени, а на переднем фронте уменьшается. В системе координат движущейся вместе с импульсом передний фронт импульса, так как он приходит раньше, лежит на отрицательной части оси времени (рис. 3.14).

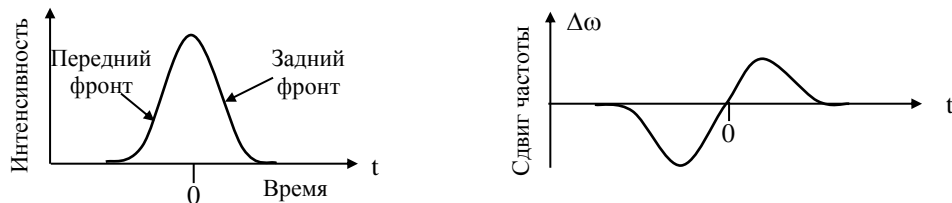


Рис. 3.14. Появление сдвига частот в следствии SPM эффекта при изменении интенсивности в импульсе.

Возникающий из-за SPM эффекта дополнительный набег фазы также является функцией времени - на переднем фронте импульса фазовый сдвиг увеличивается во времени, а на заднем уменьшается (в системе координат связанной с импульсом). А так как частота является производной фазы по времени, то импульс оказывается промодулированным не только по амплитуде, но и по частоте. При этом частота несущей на заднем фронте импульса оказывается больше частоты несущей на переднем фронте импульса (рис. 1.34, глава I):

$$\Delta\omega = - d\varphi_{\text{SPM}}/dt = - \gamma (dP/dt) L_3. \quad (3.13)$$

Таким образом, SPM эффект приводит к появлению чирпинга примерно так же, как и при распространении импульса в волокне с дисперсией. Однако между этими явлениями имеются существенные отличия. SPM эффект приводит к уширению спектра импульса, но не меняет ширину импульса (рис. 1.34). Дисперсия же наоборот приводит к изменению ширины импульса, но не меняет ширину его спектра (см. рис. 1.30).

На рис. 3.15. изображена зависимость штрафа по мощности от величины мощности вводимой в NZDS волокнах (марки TrueWave) с положительной и отрицательной дисперсиями. Штраф по мощности характеризует изменение ширины импульсов обусловленное совместным воздействием на импульсы дисперсии волокна и SPM эффекта.

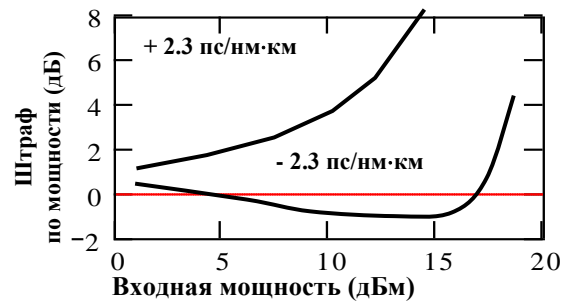


Рис. 3.15. Зависимости штрафа по мощности от мощности входного сигнала в линии с NZDS волокнами (TrueWave) с положительной и отрицательной дисперсиями. Длина линии 145 км, скорость передачи 10 Гбит/с коэффициент битовых ошибок 10^{-9} .

При малой входной мощности излучения штраф по мощности положительный и примерно одинаковый для волокон как с положительной, так и отрицательной дисперсиями. Объясняется это тем, что в линейном приближении импульсы без чирпинга (полученные от DFB лазера с внешним модулятором) всегда уширяются, независимо от знака дисперсии волокна.

При увеличении входной мощности излучения для волокна с отрицательной хроматической дисперсией штраф по мощности увеличивается. Происходит это потому, что благодаря SPM эффекту длина волны несущей вблизи заднего фронта импульса оказывается короче длины волны вблизи переднего фронта (отрицательный чирпинг). В волокне с отрицательной дисперсией скорость распространения волн увеличивается с увеличением длины волны. В результате задний фронт импульса отстает от переднего фронта, и таким образом ширина импульса увеличивается.

В волокне с положительной хроматической дисперсией при увеличении мощности штраф по мощности вначале уменьшается. Волокно с положительной дисперсией ускоряет задний фронт импульса (с более короткими волнами) и замедляет передний фронт (с более длинными волнами), что и приводит к сжатию импульса.

Сжатие импульса наблюдается при не слишком большой мощности, когда уширение спектра импульса из-за SPM эффекта ещё мало, но импульс уже приобретает отрицательный чирпинг. При большой мощности уширение спектра импульса становится уже основным фактором, определяющим ширину импульса при его распространении в волокне с дисперсией. Такой импульс будет уширяться независимо от знака дисперсии волокна, что и происходит как видно из рис. 3.14 при мощности больше 15 дБм.

Солитоны. При промежуточном значении мощности эффект сжатия импульса (наблюдаемый при малой мощности) может в принципе компенсировать эффект уширения импульса (наблюдаемый при большой мощности), т.е. возможна такая ситуация, когда импульс будет распространяться в волокне, не меняя своей ширины. Действительно, как показывает более точный анализ, можно подобрать такую мощность и форму импульса, что в волокне с положительной дисперсией он будет распространяться, не меняя своей формы. Такие импульсы называются солитонами. Их применение в оптической связи весьма перспективно и в настоящее время сдерживается только стремительным развитием DWDM систем.

§ 6. Модуляционная нестабильность (MI)

Модуляционная нестабильность (MI – Modulation Instability) наблюдается только в волокнах с положительной дисперсией. Во временном представлении оно проявляется в виде пиков на импульсах (рис. 3.16а), а в спектральном представлении как уширение спектра импульса (рис. 3.16б).

Появление пиков на импульсах связано с эффектом самовоздействия волн. Этот эффект приводит к тому, что длина волны на заднем фронте импульса оказывается короче длины волны на переднем фронте. Волокно с положительной дисперсией ускоряет волну заднего фронта сильнее, чем более длинную волну заднего фронта. Когда задний фронт входит во взаимодействие с передним фронтом, возникает интерференция, которая и служит причиной образования пиков на передаваемых импульсах. После детектирования оптического сигнала и последующей электрической фильтра-

ции амплитуда пиков уменьшается так, что они не оказывают существенного влияния на работу систем протяженностью менее 1000 км.

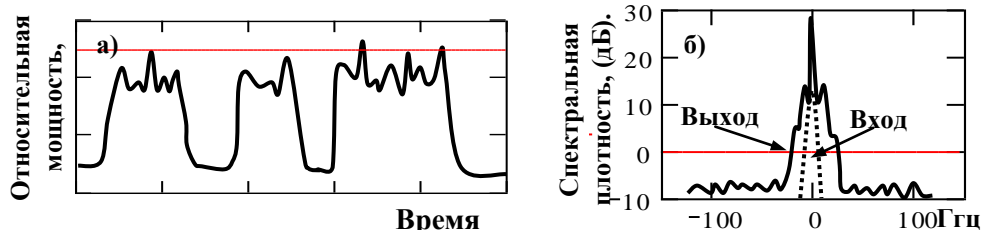


Рис. 3.16. Модуляционная нестабильность (а) и формирование боковых полос (б) в потоке импульсов следующих со скоростью 2.5 Гбит/с (мощность источника 9 дБм) после прохождения 600 км волокна с положительной дисперсией (+ 3 пс/нм·км).

§ 7. Перекрестная фазовая модуляция (XPM)

Изменение показателя преломления волокна возникает не только из-за фазовой самомодуляции волн (SPM эффект), но и из-за XPM (Cross Phase Modulation) эффекта - перекрестной фазовой модуляции волн, возникающей при взаимодействии с волнами, распространяющимися в других каналах DWDM системы. Возникающий при этом дополнительный фазовый сдвиг i -ом канале аналогично, как в SPM эффекте (3.11) пропорционален коэффициенту нелинейности γ и эффективной длине взаимодействия $L_{\text{эфф}}$:

$$\varphi_i = \gamma L_{\text{эфф}} [P_i + 2 \sum_{m \neq i} P_m]. \quad (3.14)$$

Так как мощность в каналах DWDM системы примерно одинакова, то, как видно из (3.14), XPM эффект увеличивает нелинейный фазовый сдвиг, возникающий из-за SPM эффекта, примерно в $2N$ раз, где N – число каналов в DWDM системе и приводит к таким же искажениям импульсов, только более сильным. Для того чтобы компенсировать увеличение нелинейного фазового сдвига с ростом числа каналов, необходимо уменьшить или дисперсию волокна, или мощность в канале ($\sim 1/N$), как это показано на рис. 3.8.

Перекрестная фазовая модуляция приводит также и к появлению амплитудных искажений и временного джиттера (рис. 3.17). Эти искажения проявляются тем сильнее, чем выше скорость передачи сигнала и меньше интервал частот между каналами. Исследования в этом направлении стали интенсивно проводиться только в самое последнее время.

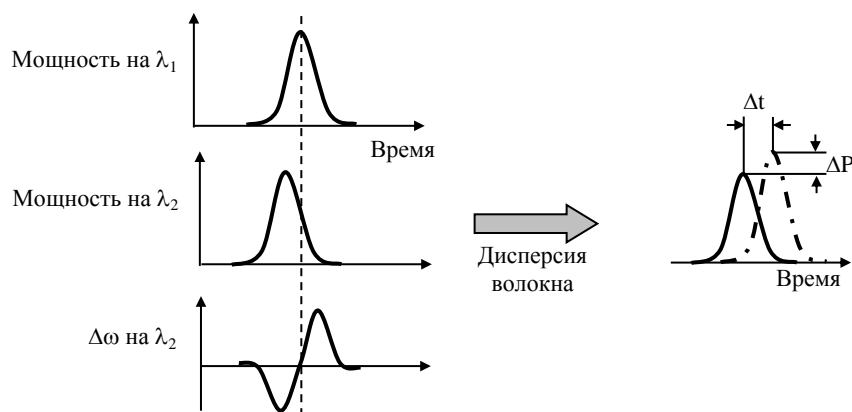


Рис. 3.17. Схема, поясняющая появление амплитудных искажений и временного джиттера при перекрестной фазовой модуляции импульсов (XPM эффект).

§ 8. Четырехволновое смешение (FWM)

Четырехволновое смешение (FWM – Four Wave Mixing) приводит к появлению новых частот, часть из них попадает в каналы DWDM системы и вызывает перекрестные помехи. Для появления новых частот достаточно, чтобы в нелинейном взаимодействии участвовали, по крайней мере, две световые волны с близкими частотами (w_1 и w_2). Тогда появившиеся при нелинейном взаимодействии частоты ($2w_1 - w_2$ и $2w_2 - w_1$) будут близки к исходным (рис. 3.18).

Если же в нелинейном взаимодействии участвуют три световые волны с близкими частотами (w_i , w_j и w_k), то некоторые из вновь возникших комбинационных частот $w_i \pm w_j \pm w_k$ так же будут близки к исходным частотам и попадут в спектральные каналы DWDM системы. Поэтому это явление принято называть четырехволновым смещением (частота появившаяся новой четвертой волны близка к частотам трех породившим её волн).

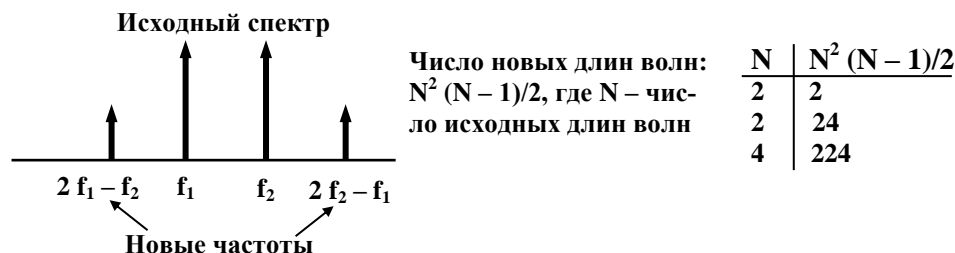


Рис. 3.18. Схема образования новых длин волн при FWM эффекте.

Для уменьшения перекрестных помех, возникающих из-за FWM эффекта, необходимо, чтобы длина волны нулевой дисперсии волокна не попадала в рабочий диапазон длин волн. Так в линии с NZDS волокнами паразитные сигналы отсутствуют даже после прохождения вдвое большего расстояния, чем в линии с DS волокнами (рис. 3.19).

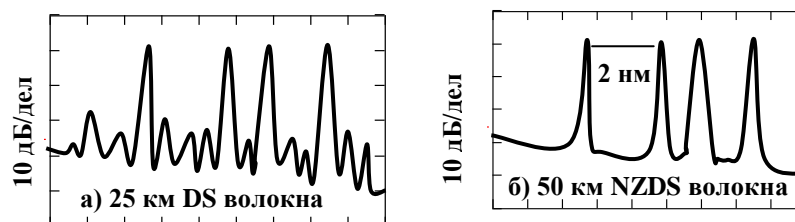


Рис. 3.19. Спектры сигналов на выходе DWDM систем при мощности в каждом канале ~ 3 дБм. а) Видны паразитные сигналы. б) Паразитных сигналов нет.

Уменьшение эффективности FWM при увеличении дисперсии волокна объясняется тем, что она приводит к нарушению фазового синхронизма смешиваемых волн и следовательно уменьшает длину их взаимодействия. Зависимость эффективности подавления возникающих из-за FWM перекрестных помех от коэффициента дисперсии волокна изображена на рис. 3.20.

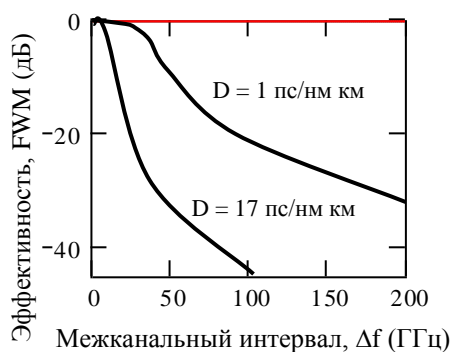


Рис. 3.20. Зависимость эффективности четырехволнового смещения от ширины межканального интервала DWDM системы для SM и NZDS волокон.

Раздел II. Дисперсионные характеристики NZDS волокон

§ 9. Волокна с положительной дисперсией

Волокна с положительной ненулевой дисперсией (+ D NZDS - Non Zero Dispersion Shifted) применяются в наземных линиях связи (где длина регенерационных участков, как правило, меньше 1000 км), так как в них за счет SPM эффекта импульс расширяется меньше, чем в волокнах с отрицательной дисперсией. По своим характеристикам + D NZDS волокна занимают промежуточное положение между SM и DS волокнами. В SM волокнах длина нулевой дисперсии порядка 1310 нм, а в DS

волокнах она смещена на $\lambda = 1550$ нм (примерно в середину полосы усиления EDFA). В + D NZDS волокнах длина волны нулевой дисперсии смещена в длинноволновую сторону (так же как и в DS волокнах), но на меньшую величину так, чтобы она не попадала в полосу усиления EDFA (1530...1565 нм) (рис. 3.21).

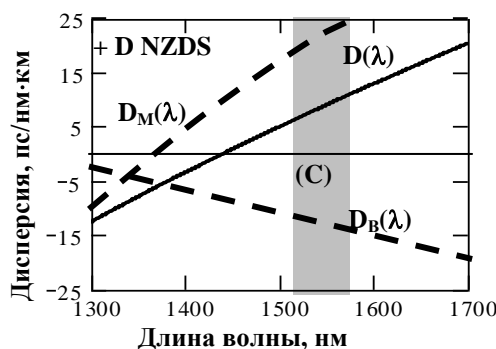


Рис. 3.21. Хроматическая дисперсия $D(\lambda)$ как сумма материальной $D_M(\lambda)$ и волноводной дисперсий $D_B(\lambda)$ в + D NZDS волокнах, т.е. волокнах, обладающих небольшой положительной дисперсией в 3-м (C) окне прозрачности.

Дисперсия с одной стороны должна быть достаточно малой, так чтобы она не вызывала уширения импульсов. С другой стороны для подавления перекрестных помех, возникающих из-за FWM и XPM эффектов, дисперсия должна быть достаточно большой (рис. 3.22). Величина дисперсии NZDS волокон определяется требованиями Res. G. 655 и должна лежать в диапазоне 0.1...6 пс/нм км. Однако эти рекомендации не являются окончательными и должны быть существенно изменены для того, чтобы привести их в соответствии с характеристиками NZDS волокон новых марок.

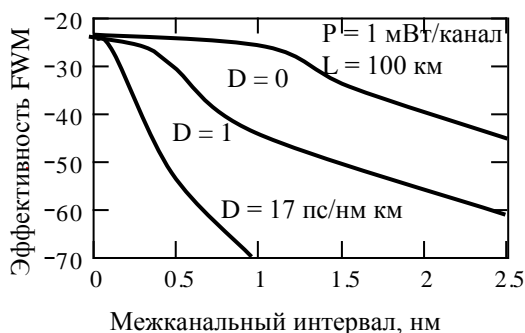


Рис. 3.22. Зависимость эффективности четырехволнового смешения от интервала длин волн между каналами DWDM системы. Типичные значения интервалов: 0.8 нм (100 ГГц), 0.4 нм (50 ГГц), 0.2 нм (25 ГГц).

NZDS волокна не только эффективно уменьшают влияние FWM и XPM эффектов в DWDM системах, но и обеспечивают возможность передачи без компенсации дисперсии сигналов со скоростью 10 Гбит/с (STM-64) на расстояние порядка 250 км (в SM волокнах оно ~60 км (рис. 3.23)).

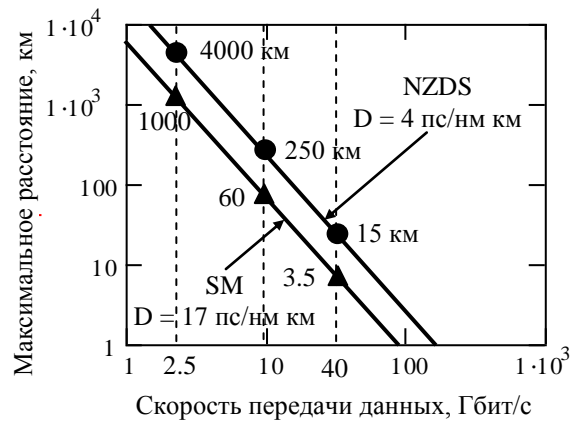


Рис. 3.23. Зависимость максимального расстояния передачи без компенсации дисперсии от скорости передачи в SM и NZDS волокнах.

NZDS волокна появились примерно в середине 90-х годов (TrueWave™ компании Lucent). В третьем окне прозрачности (диапазон C) TrueWave™ обладает дисперсией порядка 4...6 пс/нм км (у SM волокон дисперсия порядка 16...20 пс/нм км) (3.24).

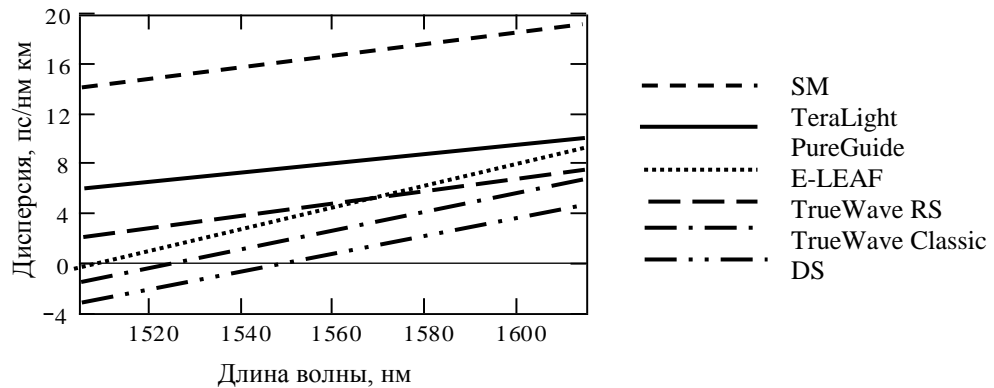


Рис. 3.24. Дисперсионные характеристики оптических волокон для линий связи.

Интересно отметить, что в Японии в конце 80-х и начале 90-х годов в линии связи в массовых количествах устанавливались DS волокна. Позднее было установлено, что наилучшей стратегией, обеспечивающей возможность передачи больших объемов информации, является использование DWDM систем. В настоящее время эти системы уже выпускаются промышленностью. При этом оказалось, что использование DWDM систем с DS волокнами в диапазоне C (в полосе усиления EDFA (1530...1570 нм)), там, где эти волокна обладают нулевой дисперсией, практически невозможно из-за больших перекрестных помех возникающих вследствие FWM эффекта.

Поэтому в дальнейшем разработчики линий связи в Японии сосредоточили свои усилия на освоение диапазона L (1570...1610 нм), где DS волокна обладают дисперсией порядка 2...4 пс/нм км, достаточной для подавления негативного влияния FWM и XPM эффектов (примерно такой же, как и NZDS волокна в диапазоне C).

С развитием DWDM систем потребовались NZDS волокна с улучшенными дисперсионными и нелинейными характеристиками:

- для работы в широкой полосе частот (включающей в себя 3 (C), 4 (L) и 5-е (S) окна прозрачности) необходимы волокна с малым наклоном дисперсионных кривых.
- для уменьшения влияния нелинейных эффектов необходимы волокна с большей площадью модового пятна.
- для систем со скоростью передачи данных 10 Гбит/с и более необходимы волокна с малой величиной поляризационной модовой дисперсии.
- для очень плотных DWDM систем с большим числом каналов и высокой скоростью передачи данных в каналах необходимы волокна с большой (~ 8 пс/нм км) дисперсией.

Новые модели NZDS волокон удовлетворяют большинству этих требований. Они разделяются на три основные типа (рис. 3.25): волокна с большой площадью модового пятна (LEAF (Corning)), волокна с малым наклоном дисперсионной кривой (TrueWave RS (Lucent)) и волокна с большой дисперсией (TeraLight, Alcatel).

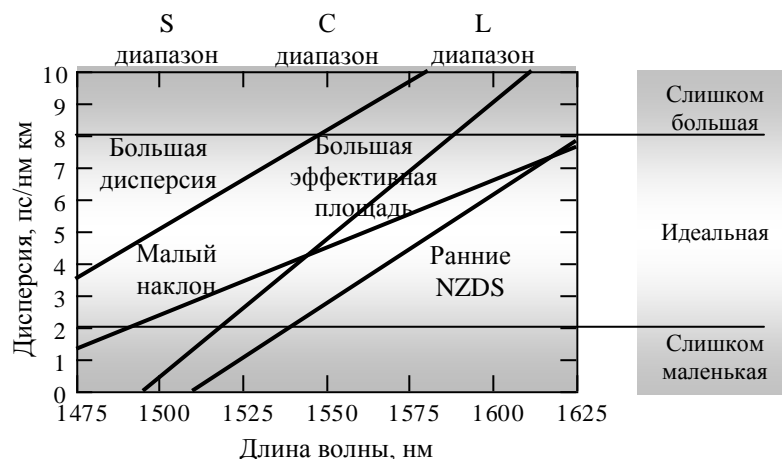


Рис. 3.25. Дисперсионные характеристики различного типа + D NZDS волокон (G. 655).

Все эти типы выпускаются основными производителями волокон. В литературе при упоминании какого-либо из этих типов волокна обычно ссылаются, как это сделано выше, на марку волокна, появившуюся на рынке первой. Оптические характеристики трех основных типов NZDS волокон представлены в таблице № 3.1.

Таблица № 3.1 Оптические параметры трех основных типов + D NZDS волокон.

Параметры волоконна $\lambda = 1550$ нм	LEAF Corning	TeraLight Alcatel	TrueWave RS Lucent
Потери	0.25 дБ/км	0.25 дБ/км	0.22 дБ/км
Площадь модового пятна	72 мкм ² .	66 мкм ² .	55 мкм ² .
Дисперсия	4.2 пс/нм·км	8 пс/нм·км	3.8 пс/нм·км
Наклон дисперсии	0.085 пс/нм ² ·км	0.058 пс/нм ² ·км	0.045 пс/нм ² ·км
Длина волны нулевой дисперсии	1500 нм	1440 нм	1450 нм
Коэффициент PMD	< 0.1 пс/км ^{1/2}	< 0.08 пс/км ^{1/2}	< 0.1 пс/км ^{1/2}

Волокна LEAF и TrueWave RS сконструированы так, что в середине диапазона С коэффициент дисперсии у них оптимален (см. таблицу 3.1). Волокно LEAF обладает максимальной площадью модового пятна (72 мкм²) и наилучшим образом подходит для работы в диапазоне С. Недостаток LEAF - большой наклон дисперсионной характеристики (0.085 пс/нм²·км), в результате чего оно не пригодно для работы в диапазоне S (пятое окно), так как там коэффициент дисперсии обращается в нуль.

Компания Corning поставляет в Россию волокна LEAF с 1999 г. Большая площадь модового пятна позволяет увеличить расстояние между оптическими усилителями (рис. 3.26) и, соответственно, снизить стоимость комплекта “оборудование + кабель” (на 30-40 %). В настоящее время волокно LEAF широко используется в ТрансТелеКом при строительстве сети протяженностью более 45 тыс. км.

Наименьшим наклоном дисперсионной характеристики (0.045 пс/нм²·км) обладают волокна TrueWave RS, что позволяет применять их во всех трех диапазонах: С, L и S. Наклон дисперсионной характеристики у TeraLight (0.058 пс/нм²·км) хотя меньше, чем у LEAF, но достаточно большой - так, что уже в соседнем диапазоне С волокно TeraLight обладает большой дисперсией порядка 8 пс/нм·км. Такая большая дисперсия необходима, как уже говорилось, в системах DWDM, обладающих большой скоростью передачи в отдельных спектральных каналах и большой плотностью каналов.

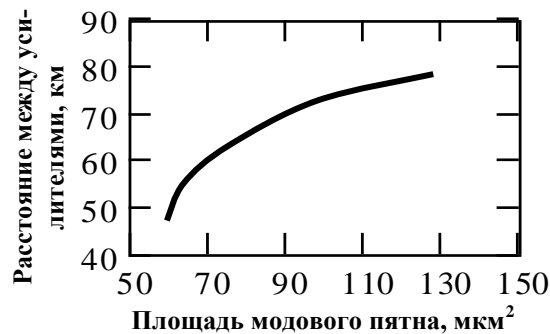


Рис. 3.26. Зависимость оптимального расстояния между оптическими усилителями от площади модового пятна в волокне.

Погонные потери в NZDS волокнах (как видно таблиц № 3.1) примерно на 10 % больше, чем в SM волокнах. В тоже время разница между средним значением потерь в сростках NZDS волокон (таблица № 3.2) и в сростках SM волокон значительно больше. Так в сростках волокон TrueWave RS (таблица № 3.2) среднее значение потерь составляет 0.04 дБ, что в два раза больше среднего значения потерь в сростках SM волокон (0.02 дБ).

Таблица № 3.2. Потери в сростках NZDS волокон.

Типы свариваемых волокон	Среднее значение потерь	Стандартное отклонение	Марка сварочного аппарата
TrueWave RS ↔ TrueWave RS	0.037 дБ		Sumitomo Type 36SE
FreeLight ↔ FreeLight	0.046 дБ	0.018 дБ	
FreeLight ↔ NZDS волокна разных производителей	0.053 дБ	0.011 дБ	
NZDS волокна ↔ SM волокна			
TrueWave RS ↔ Lucent VAD-MC	0.084 дБ	0.014 дБ	Ericsson FSU 975
TrueWave RS ↔ Corning SMF28	0.10 дБ	0.027 дБ	Ericsson FSU 975
TrueWave RS ↔ Corning SMF28	0.16 дБ	0.025 дБ	Fujikura FSM30S
FreeLight ↔ Pirelli SMF	0.097 дБ	0.011 дБ	

§ 10. Волокна с отрицательной дисперсией

В волокнах с отрицательной дисперсией ND (Negative Dispersion, - D NZDS G. 655) длина волны нулевой дисперсии смещена за длинноволновый край диапазона C (рис. 3.27). Величина дисперсии (по модулю) составляет 3-7 пс/нм·км, она достаточна для того, чтобы устранить эффект четырехволнового смешения (FWM).

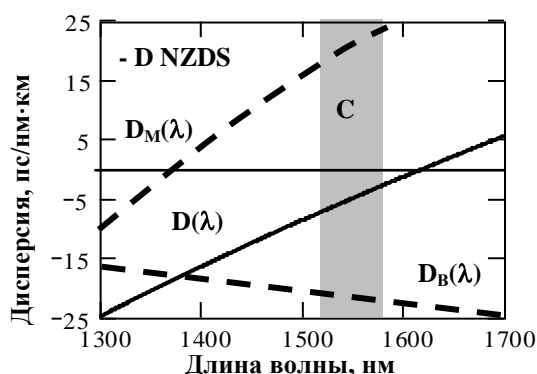


Рис. 3.27 Хроматическая дисперсия $D(\lambda)$ как сумма материальной $D_M(\lambda)$ и волноводной дисперсий $D_B(\lambda)$ в NZDS волокнах, обладающих отрицательной (- D NZDS) дисперсией в 3-м (C) окне прозрачности.

Волокна с отрицательной дисперсией применяются в подводных линиях связи с большой длиной регенерационных участков (~1000 км), так как в них отсутствует эффект модуляционной неустойчивости. Кроме того, отрицательную дисперсию можно скомпенсировать с помощью положи-

тельной дисперсии SM волокон (рис. 3.28), внося при этом в линию потерь значительно меньше, чем при компенсации положительной дисперсии с помощью модулей с DC волокнами.

При подборе расстояния между оптическими усилителями в подводных и в наземных линиях связи имеется одно существенное отличие. В наземных линиях связи стремятся разместить оптические усилители как можно дальше друг от друга (~ 80 км) - так, чтобы уменьшить стоимость системы. В подводных линиях связи стремятся добиться, как можно большего расстояния между регенераторами, при этом расстояние между оптическими усилителями с целью уменьшения влияния нелинейных эффектов приходится уменьшать (~50 км).

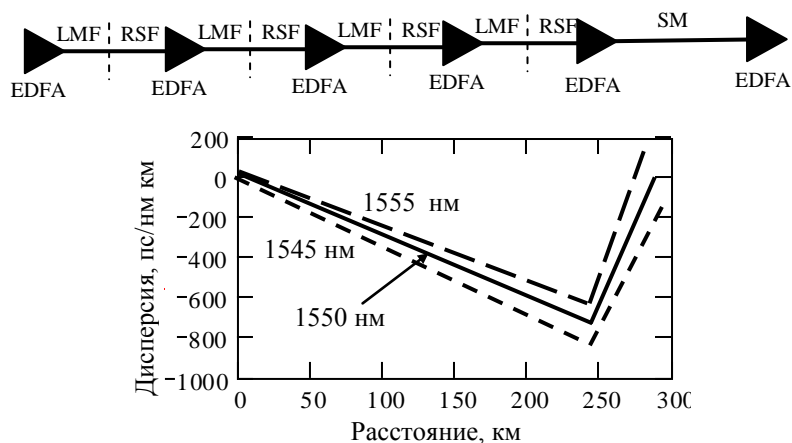


Рис. 3.28. Типичная дисперсионная схема подводной линии связи с использованием волокна с большой площадью модового пятна (LMF - large-mode field), волокна с малым наклоном дисперсионной характеристики (RSF - reduce slope fiber) и стандартного одномодового волокна (SM).

Другое важное применение волокна с отрицательной дисперсией находят в городских сетях и сетях средней дальности, где длины участков, как правило, не превышают 300 км. Для передачи данных со скоростью до 2.5 Гбит/с (STM-16) в этих сетях можно использовать SM волокна и DFB лазеры с внешним модулятором. Однако при скорости передачи 10 Гбит/с (STM-64) в сети SM волокнами уже потребуются модули для компенсации дисперсии. Это не только дорого, но и представляет определенную техническую проблему, так как в кольцевых линиях направление маршрута данных и, соответственно, длина компенсируемого участка волокна могут изменяться. Применение волокон с отрицательной дисперсией позволяет не только обеспечить высокую скорость передачи данных в городских сетях и сетях средней дальности, но и снизить стоимость комплекта “оборудование + кабель”.

Экономический эффект достигается за счет того, что с ND волокнами вместо DFB лазеров с внешним модулятором можно использовать более мощные DFB лазеры с прямой модуляцией. При этом стоимость передатчика при использовании DFB лазера с прямой модуляцией получается примерно в 10 раз ниже (с учетом стоимости оптического усилителя). Возможность же передачи данных с высокой скоростью связана с тем, что при изменении тока через полупроводниковый лазер, кроме амплитудной модуляции, возникает и ещё и частотная модуляция излучения – положительный чирпинг (chirping) эффект. В волокне с отрицательным коэффициентом дисперсии короткие волны движутся быстрее длинных волн. Поэтому импульс с положительным чирпингом в таком волокне сжимается.

Результаты экспериментальных исследований изменения ширины импульсов (при скорости передачи 2.5 Гбит/с) в SM волокне (положительная дисперсия) и в волокне MetroCore (отрицательная дисперсия) представлены на рис 3.29. Изменение ширины импульсов характеризуется штрафом по мощности: $q = 10 \log(\Delta t_2/\Delta t_1)$, где $\Delta t_2/\Delta t_1$ – отношение ширины импульса в линии к ширине импульса на входе в линию. Видно, что в SM волокне импульсы уширяются и достигают уровня $q = 2$ дБ ($\Delta t_2/\Delta t_1 = 1.6$) на расстоянии порядка 150 км. В то же время в волокне MetroCore, по крайней мере до 400 км, эти же импульсы не уширяются.

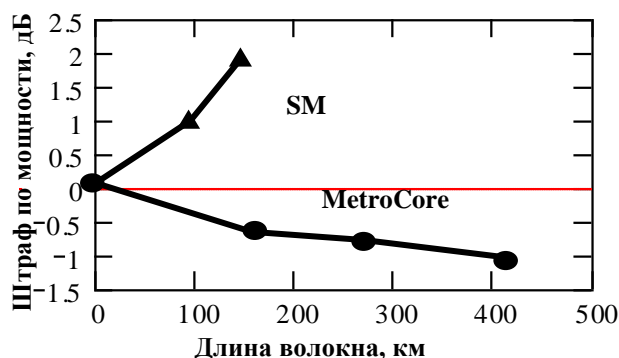


Рис. 3.29. Зависимость штрафа по мощности от длины линии с прямой модуляцией DFB лазера ($\lambda = 1557$ нм) со скоростью 2.5 Гбит/с. Линия с волокном MetroCore длиной 418 км содержит 4 эрбиевых оптических усилителя с выходной мощностью 3 дБм.

Дисперсионные характеристики волокон с отрицательной дисперсией изображены (рис. 3.30.). В подводных линиях используются волокна TrueWave XL (Lucent Technologies) и SMF-LS (Corning). В городских сетях и сетях средней дальности волокна MetroCore (Corning) и WideLight (Pirelli).

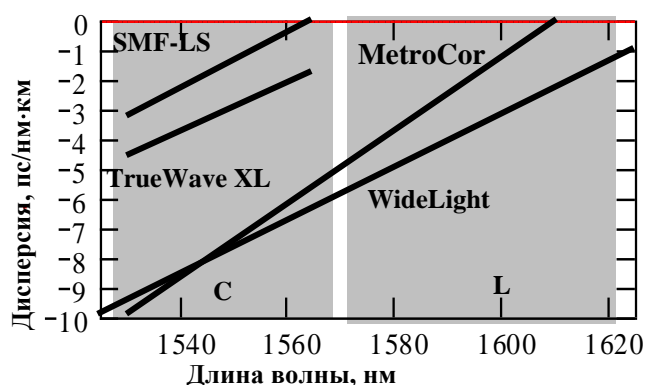


Рис.3.30. Зависимость коэффициента дисперсии от длины волны для различных марок волокон с отрицательной дисперсией в диапазонах C (третье окно) и L (четвертое окно)

§ 11. Волокна с плоской дисперсионной характеристикой

Компенсация полной дисперсии в широкой полосе частот существенно упрощается в волокнах с плоской дисперсионной характеристикой. Они обладают сложным профилем показателя преломления и изготавливать их необходимо с высокой точностью. Это хорошо видно из сравнения профилей заготовок для волокон с тремя различными значениями коэффициентов дисперсий (рис. 3.31). Видно, что небольшого увеличения показателя преломления в верхней части профиля достаточно для изменения знака коэффициента дисперсии. В настоящее время волокна с плоской дисперсионной характеристикой уже прошли стадию лабораторных исследований.

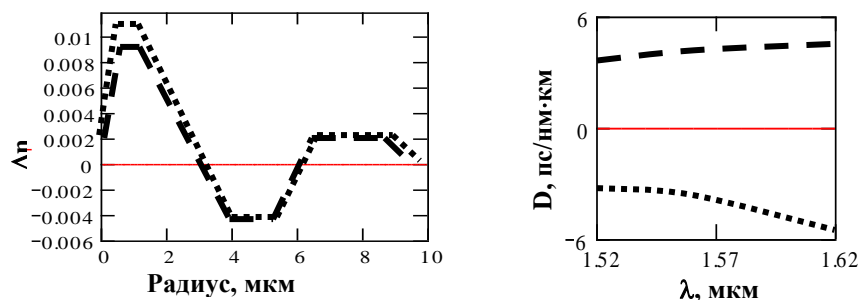


Рис. 3.31. Расчетные значения профилей показателя преломления для трех волокон с максимально плоской дисперсионной характеристикой. Пунктирные кривые относятся к волокнам с положительной дисперсией, а точечные к волокнам с отрицательной дисперсией.

Дисперсионные характеристики волокна с оптимизированным профилем показателя преломления и волокна TrueWave RS (обладающего наименьшим наклоном дисперсионной характеристики среди всех промышленных NZDS волокон) приведены на рис. 3.32. Видно, что волокно с оптимизированным профилем показателя преломления обладает существенно более плоской дисперсионной характеристикой. Основные оптические параметры NZDS волокна с максимально плоской дисперсионной характеристикой приведены в таблице № 3.3.

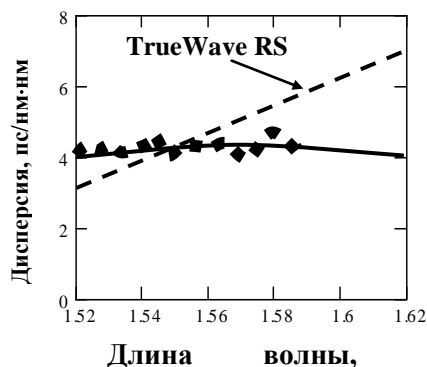


Рис. 3.32. Спектральная зависимость хроматической дисперсии NZDS волокна с оптимизированным профилем показателя преломления (сплошная кривая расчет, точки измеренные значения) и волокна TrueWave RS (пунктир).

Таблица № 3.3. Оптические параметры NZDS волокна с максимально плоской дисперсионной характеристикой.

Дисперсия на $\lambda = 1530$ нм	3.94 пс/нм·км
на $\lambda = 1550$ нм	4.18 пс/нм·км
на $\lambda = 1565$ нм	4.34 пс/нм·км
Наклон дисперсионной кривой на $\lambda = 1550$ нм	0.015 пс/нм ² ·км
Диаметр модового пятна	7.7 мкм
Длина волны отсечки	< 1100 нм
Дополнительные потери при намотке 1 витка на оправку $\varnothing 32$ мм	< 0.5 дБ

§ 12. Области применений волокон различных типов

Области применения одномодовых волокон приведены в таблице № 3.4. В первой строке таблицы рассматриваются стандартные одномодовые волокна (SM). Как уже говорилось, в настоящее время в России применяются в основном волокна только этого типа. Они охватывают все области применения (локальные вычислительные сети в меньшей степени, так как там сохранились многомодовые волокна).

На российском рынке представлены SM волокна большинства ведущих зарубежных компаний, таких как Corning и Lucent (OFS) (США), Sumitomo, Hitachi, Fujikura и Furukawa (Япония), Pirelli (Италия), Alcatel (Франция) и ряд других компаний см. спецификации в конце книги. Недавно на рынке появились также SM волокна с улучшенной очисткой от примесей воды (ОН). Им присущи все достоинства SM волокон и кроме того они обладают оптимальной дисперсией для DWDM систем работающих в пятом (S) окне прозрачности.

Таблица № 3.4. Области применения одномодовых волокон.

Типы волокон	Марки волокон и производящие компании	Области применений
Стандартные Одномодовые волокна (SM)	Стандартные волокна: SMF-28 и SMF-28 с Duraclad (Corning), VAD-MC (Lucent), а также SM волокна (Sumitomo, Hitachi, Fujikura, Furukawa, Pirelli, Alcatel).	Магистральные, зональные, городские и абонентские сети связи, кабельное телевидение
	SM волокна улучшенной очистки от примесей воды (OH): AllWave (Lucent), SMF-28e (Corning), SMR (Pirelli).	Городские и зональные сети, локальные сети, кабельное телевидение
Волокна со Смещенной ненулевой (положительной) дисперсией (+ D NZDS)	+ D NZDS волокна с большим диаметром модового пятна: LEAF (Corning), FreeLight (Pirelli), TeraLight (Alcatel)	Высокоскоростные наземные системы дальней связи с большой пропускной способностью
	+ D NZDS волокна с малым наклоном коэффициента дисперсии: TrueWaveRS (Lucent), TeraLight (Alcatel)	
Волокна со Смещенной ненулевой (отрицательной) дисперсией (-D NZDS)	- D NZDS волокна с оптимальной дисперсией в третьем окне (C): TrueWaveXL (Lucent) и SMF-LS (Corning).	Подводные системы дальней связи
	- D NZDS волокна с оптимальной дисперсией при использовании DFB лазеров с прямой модуляцией: MetroCor (Corning), WideLight (Pirelli).	Недорогие сети средней дальности с большой пропускной способностью
Волокна для Компенсации дисперсии (DC)	Модули: DCM (Corning), DK (Lucent), P-DCFM (Sumitomo), 15DC и 15DSC (Fujikura)	Высокоскоростные наземные системы дальней связи

Во второй и третьей строках таблицы № 3.4. рассматриваются NZDS волокна. Они оптимальны для систем DWDM, работающих в третьем (C) окне прозрачности. В наземных линиях передачи используются волокна с положительной дисперсией (+ D NZDS). Они обладают тем преимуществом, что в них эффект нелинейного самовоздействия волн приводит к меньшему уширению импульсов, чем в волокнах с отрицательной дисперсией.

Основной недостаток современных моделей NZDS волокон - малый диаметр модового пятна (по сравнению с SM волокнами) и относительно большой наклон коэффициента дисперсии. Малый наклон коэффициента дисперсии необходим для того, чтобы обеспечить оптимальное значение коэффициента дисперсии (~ 4 пс/нм·км) не только в третьем (C) окне прозрачности, но в соседних окнах: 4-м (L) и 5-м (S).

Наибольшей площадью модового пятна (72 мкм^2) обладают волокна марки LEAF (Corning) и FreeLight (Pirelli). Наименьшим наклоном коэффициента дисперсии ($0.045 \text{ пс/нм}^2 \text{ км}$) - волокно TrueWaveRS (Lucent). У волокна TeraLight (Alcatel) площадь модового пятна и наклон коэффициента дисперсии больше, чем у TrueWaveRS, но меньше, чем у LEAF и FreeLight, и оно обладает оптимальным значением коэффициента дисперсии в пятом (S) окне прозрачности.

В подводных линиях передачи, где расстояние между ретрансляторами может достигать нескольких тысяч километров, используются NZDS волокна с отрицательной дисперсией (TrueWaveXL (Lucent) и SMF-LS (Corning)). При таких больших расстояниях между ретрансляторами в волокнах с положительной дисперсией начинает проявляться модуляционная нестабильность, приводящая к появлению пиков на импульсах. В волокнах с отрицательной дисперсией этот паразитный эффект отсутствует.

Недавно компания Corning нашла ещё одно перспективное применение для волокон с отрицательной дисперсией, позволяющее передавать сигналы, полученные при прямой модуляцией лазера, на расстояние более 300 км без использования модулей для компенсации дисперсии. Специально для кольцевых линий (Metropolitan NetWork), длина которых, как правило, не превышает 300 км, выпущены волокна с торговой маркой MetroCore (Corning) и WideLight (Pirelli). Применение волокон с отрицательной дисперсией позволяет не только обеспечить высокую скорость передачи данных в городских сетях и сетях средней дальности, но и существенно снизить стоимость комплекта “оборудование + кабель”.

Последняя, четвертая строка таблицы № 3.4. относится к волокнам для компенсации дисперсии. DC волокна применяются при модернизации линий с SM, когда возникает необходимость в увеличении скорости передачи или при внедрении технологии уплотнения по длинам волн (DWDM). Эти волокна обладают большой отрицательной дисперсией и отрицательным наклоном дисперсионной характеристики, что позволяет компенсировать полную дисперсию линии в широком диапазоне

длин волн. Модули с DC волокнами размещаются в стойках рядом с оптическим усилителем. Длина волокон в DCM модуле подобрана так, что позволяет компенсировать до нужного уровня полную дисперсию участка волокна, расположенного между усилителями.

Выбор волокна для использования в той или иной сети определяется множеством факторов, и каждая производящая компания использует свои собственные критерии. Компания Alcatel, основываясь на собственном опыте работы с оптическими технологиями, выработала следующий ряд рекомендаций представленных в таблице № 3.5, а также в примечаниях и комментариях к этой таблице.

Таблица № 3.5. Руководство по выбору типа волокна компании Alcatel.

≤ 40		TeraLight™ Metro		TeraLight™ Ultra		
≤ 10	≤ 40					
≤ 10	≤ 10					
≤ 2.5	≤ 10	E-SMF или SMF		TeraLight™ Ultra (возможно TeraLight™ Metro)		
≤ 2.5	≤ 2.5					
Настоящее Будущее	0-20 км	0-70 км	70-200 км	200-500 км	500-1200 км	>1200 км
Скорость передачи (Гбит/с)	Сеть доступа (Acces)	Сеть масштаба города (Metro)		Сеть дальней связи (Long haul)		Сеть сверхдальней связи (Ultra long haul)

Комментарии:

- Стандартные одномодовые волокна (SMF или E-SMF), при условии компенсации дисперсии полной дисперсии в линии, можно применять и на расстояниях превышающих те, что указаны выше. Однако в этом случае увеличится общая сумма издержек и повысится сложность сети.
- Стандартное одномодовое волокно (G.652) сконструировано специально для работы во 2-ом окне прозрачности (диапазон O). Для работы в этом диапазоне подходит также и волокно TeraLight™ Metro.
- Волокно типа E-SMF (с уменьшенными потерями в области водяного пика (Water Peak Area)) обеспечивает оптимальные рабочие параметры во всех окнах прозрачности (включая диапазон E) в системах с дальностью менее 70 км.
- Многомодовые волокна 50/125 мкм и 62.5/125 мкм предназначены для использования в локальных сетях. MM волокно с торговой маркой Glight™ обеспечивает на расстоянии до 300 м пропускную способность 10 Гбит/с.
- Волокна SMF, E-SMF и TeraLight™ обеспечивают оптимальные рабочие параметры диапазонах C, L и S, однако волокна SMF и E-SMF не рекомендуется использовать на участках протяженностью более 70 км.
- Волокно TeraLight™ Ultra идеально подходит для применения в системах дальней и сверхдальней связи, обеспечивая пропускную способность до 10.2 Тбит/с на расстоянии 300 км.
-

Примечания:

- **Metro** – оптические системы с мультиплексированием каналов по длинам волн, обеспечивающие передачу сигналов со скоростью 10 Гбит/с на расстояние порядка 100 км без компенсации дисперсии. Отрицательная дисперсия волокна TeraLight™ Metro на длине волны 1310 нм позволяет использовать более дешевые и более мощные лазеры с прямой модуляцией излучения (с положительным чирпингом).
- **Long haul** – системы дальней связи (> 200 км) с высокой скоростью передачи данных (10 и 40 Гбит/с), с плотным спектральным уплотнением каналов и с рамановским усилением. Волокно TeraLight™ Ultra обладает малыми потерями и малой величиной ПМД, малым наклоном дисперсионной характеристики и большой площадью модового пятна. На сегодняшний день оно обеспечивает оптической системе дальней связи самую низкую себестоимость в расчете на один бит передаваемой информации.

ГЛАВА IV. Многомодовые волокна

§ 1. Введение

Многомодовые волокна применяются в основном в локальных вычислительных сетях и в линиях с низкой скоростью передачи данных. Стандартные многомодовые волокна были рассчитаны на применение совместно со светодиодами - наиболее надежными и дешевыми полупроводниковыми

источниками излучения. Специально для работы в стандарте Gigabit Ethernet были разработаны волокна с более высоким коэффициентом широкополосности. Они используются совместно с лазерами, так как светодиоды не обладают быстродействием, необходимым для работы в стандарте Gigabit Ethernet. На российском рынке представлены многомодовые волокна ведущих зарубежных компаний, таких как Corning и Lucent (США), Alcatel (Франция) и многих других.

Многомодовые волокна представляют собой достаточно «старый» тип волокна, подробно описанный в литературе и в соответствующих спецификациях. В большинстве случаев при его использовании не требуется особых знаний по волоконной оптике. Пожалуй, основными вопросами, которые вызывают затруднения, являются понятия моды и межмодовой дисперсии. Эти вопросы мы рассмотрим в первом разделе.

Во втором разделе описаны методы изготовления оптических волокон с малыми потерями. Многомодовые ступенчатые волокна были исторически первым типом волокна, в котором был преодолен барьер в 20 дБ/км, после чего волоконно-оптическая связь стала экономически целесообразной. Поэтому раздел по технологии волокон мы включили в главу по многомодовым волокнам. Интерес к технологии изготовления оптических волокон в последнее время вновь возрос в связи началом строительства в России заводов по производству оптических волокон.

Раздел I. Межмодовая дисперсия

§ 2. Связь между понятием луча и моды

Свет, распространяющийся в волокне, можно представить в виде суммы элементарных составляющих (мод). Каждая мода распространяется параллельно оси волокна со своим значением фазовой и групповой скорости, поляризации и распределением амплитуды в поперечном сечении. Фазовый фронт у мод плоский, а нормаль к плоскости фазового фронта параллельна оси волокна (рис. 4.1). Основное достоинство представления света в виде суммы мод состоит в том, что при распространении в волокне мода не меняет своего распределения амплитуды и фазы в поперечном сечении.

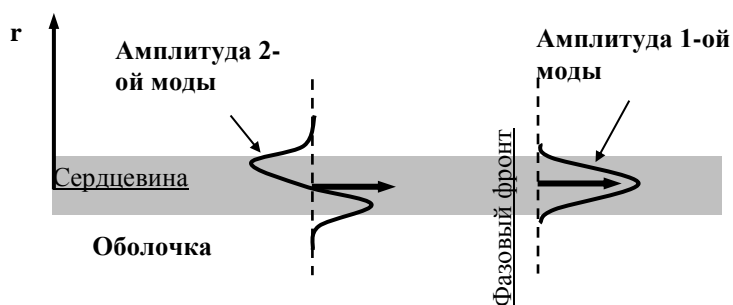


Рис. 4.1. Распределение амплитуды и фазы для первых двух мод волокна. Первая мода симметричная, вторая асимметричная. Фазовый фронт плоский и перпендикулярен оси волокна.

В тоже время каждую моду можно представить в виде суммы плоских волн, изображаемых в виде лучей, образующих конус. Причем, чем выше номер моды, тем больше угол раствора лучей, образующих этот конус (рис. 4.2). Хотя моду можно представить только полным набором таких лучей, её часто изображают одним лучом. При этом подразумевается, что чем больше угол наклона луча, тем выше номер моды.

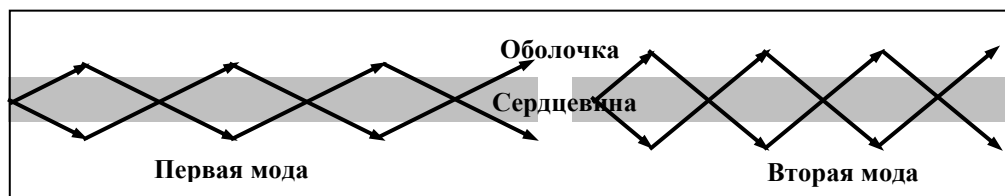


Рис. 4.2. Лучи формирующие первую и вторую моду волокна. Угол наклона лучей во второй моде больше, чем в первой моде, и они глубже проникают в кварцевую оболочку.

В цифровых линиях передачи свет распространяется в волокне в виде последовательности импульсов. Эта последовательность импульсов переносится одновременно всеми модами и, соответственно, образующих их лучами. Так как угол наклона лучей, образующих более высокую моду, больше, чем у лучей, образующих более низкую моду, то импульсы, передаваемые высшими модами,

запаздывают сильнее. Поэтому в многомодовом волокне импульсы, передаваемые разными модами, испытывают разную задержку и могут накладываться друг на друга. Этот механизм уширения импульсов называют межмодовой дисперсией (рис. 4.3).

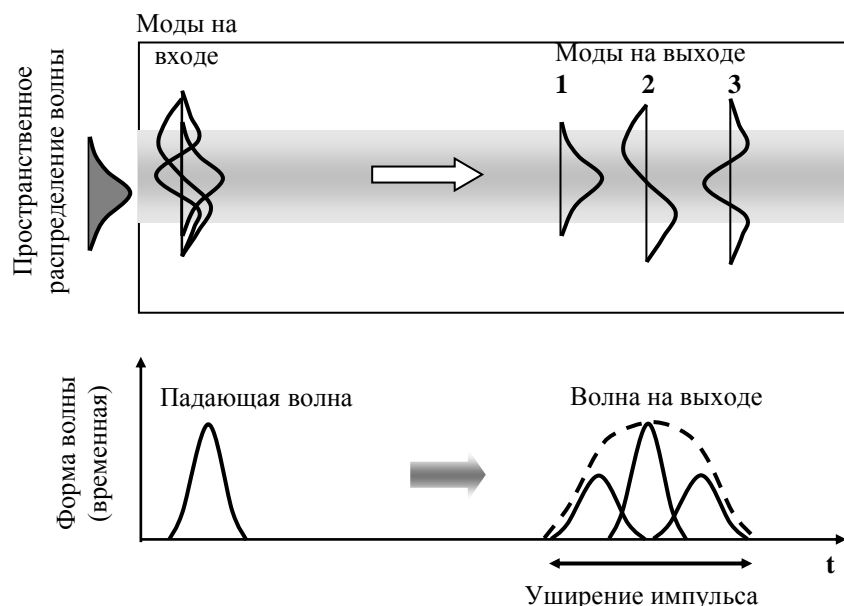


Рис. 4.3. Межмодовая дисперсия в многомодовом волокне.

§ 3. Градиентное волокно

Хотя лучи проходят в волокне разное расстояние, но можно подобрать такую форму профиля показателя преломления (близкую к параболической), что все лучи будут запаздывать почти на одно и то же время. Волокна с таким профилем показателя преломления называются градиентными.

Траектории меридиональных лучей (лучей, проходящих через ось волокна) в градиентном волокне изображены на рис. 4.4. Лучи, соответствующие основной (первой) моде волокна, проходят кратчайшим путем, но с наименьшей скоростью, так как распространяются вблизи оси волокна, где показатель преломления сердцевины максимален. Лучи, соответствующие высшим модам, проходят по более длинным траекториям, но с меньшей скоростью, так как их траектории удалены дальше от оси волокна. В результате, несмотря на разную длину траекторий, лучи проходят их за одинаковое время.

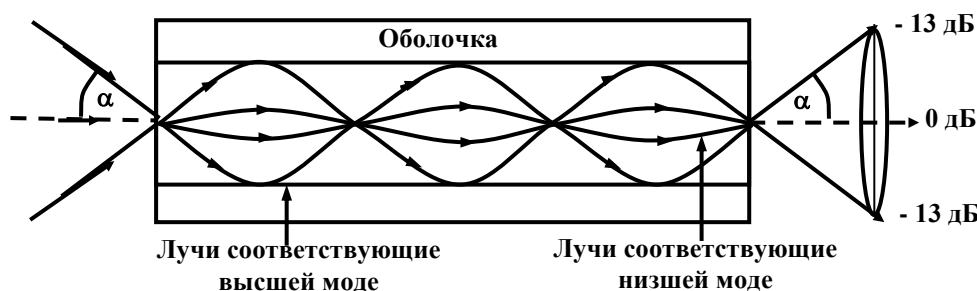


Рис. 4.4. Траектории меридиональных лучей в градиентном волокне и профиль показателя преломления с провалом по середине. Числовая апертура $NA = \sin \alpha$.

§ 4. Дифференциальная модовая задержка.

Как известно, светодиоды являются наиболее надежными и дешевыми полупроводниковыми источниками излучения. Однако светодиоды являются многомодовыми источниками излучения и для передачи их излучения необходимо использовать многомодовые волокна. В основном по этой причине, а также из-за большей надежности соединений в таких волокнах, они сохранились в локальных вычислительных сетях (несмотря на то, что стоимость многомодовых волокон больше, чем у одномодовых).

Однако светодиоды из-за их невысокого быстродействия (~ 200 МГц) не пригодны для использования в качестве передатчиков в стандарте Gigabit Ethernet. Поэтому в этом стандарте было регламентировано использование совместно с многомодовым волокном лазерных источников излу-

чения. В частности - плоскостных полупроводниковых лазеров с вертикальным резонатором VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser), работающих в диапазоне 850 нм. Лазеры с такой структурой в последнее время интенсивно производятся и по своей стоимости они приближаются к стоимости светодиодов.

Казалось бы, при согласовании лазера с многомодовым волокном не должно возникать особых проблем - свет от лазера должен, практически полностью, вводиться в многомодовое волокно, возбуждая в нем несколько низших мод. Однако типовые многомодовые волокна обладают небольшим технологическим дефектом в виде провала в середине профиля показателя преломления (рис. 4.5). Возникает этот провал из-за частичного испарения примеси GeO_2 в процессе схлопывания заготовки для волокна.

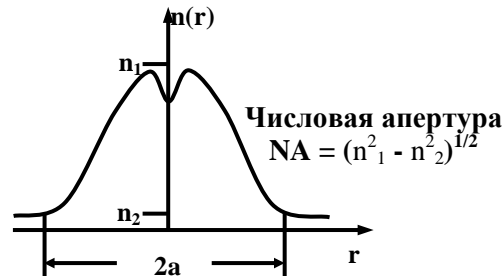


Рис. 4.5. Профиль показателя преломления градиентного волокна. Провал в середине профиля возникает из-за частичного испарения примеси GeO_2 в процессе схлопывания заготовки для волокна.

Наличие провала в середине приводит к тому, что в волокне возбуждаются одновременно моды и наиболее низкого, и наиболее высокого порядка. Так как эти группы мод распространяются с разными скоростями, то возникает так называемый эффект дифференциальной модовой задержки, приводящий к расщеплению импульсов.

Устранить это расщепление импульсов можно, сместив на 10..20 мкм место ввода излучения от оси волокна. Это смещение осуществляется с помощью специальных шнуров MCP (mode conduction patch-cord) при работе с волокнами старых типов. Волокна нового типа (без провала в середине профиля показателя преломления), такие как InfiniCor CL компании Corning, соединяются с лазером непосредственно без использования шнуров MCP.

В линиях связи с лазерными источниками излучения естественно использовать и одномодовое волокно, тем более, что стоит оно дешевле. Однако из-за меньшей стоимости оконечной аппаратуры и монтажа линии с многомодовыми волокнами ценовое преимущество одномодового волокна начинает сказываться только при длинах линии больше 1.5 км (рис. 4.6).

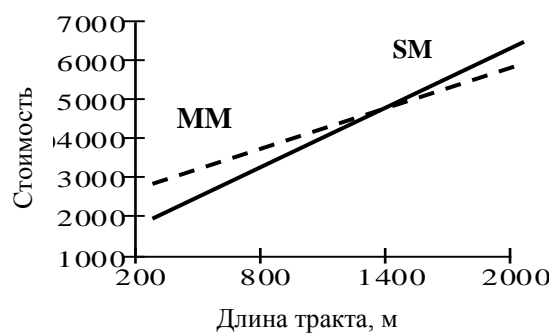


Рис. 4.6. Зависимость стоимости ВОЛС ЛВС Fast Ethernet от длины тракта с многомодовыми и одномодовыми волокнами.

§ 5. Спектры коэффициентов широкополосности

Для осуществления передачи сигналов в стандарте Gigabit Ethernet потребовались не только быстродействующие передатчики, но также и волокна, способные поддерживать скорость передачи порядка 1 Гбит/с. Частотная характеристика многомодовых волокон, как уже говорилось, сильно зависит от формы профиля показателя преломления (рис.4.7).

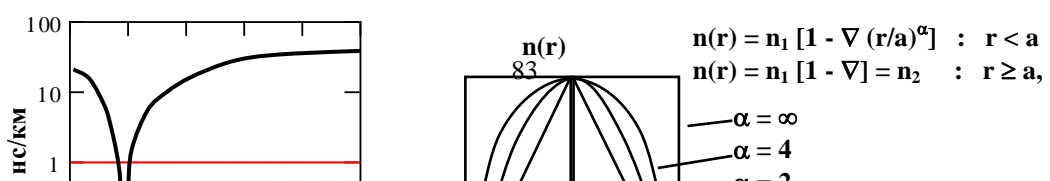


Рис. 4.7. Зависимость межмодовой дисперсии от параметра профиля показателя преломления α , где $n(r)$ – профиль показателя преломления, n_1 и n_2 – показатели преломления сердцевины ($r = 0$) и оболочки, a – радиус сердцевины, $\nabla = (n_1 - n_2) / n_1$

Как видно из этого рисунка, в градиентных волокнах с оптимальной формой ($\alpha \sim 2$) коэффициент широкополосности почти на три порядка больше, чем в ступенчатых многомодовых волокнах. В последних моделях градиентных волокон за счет тщательного контроля профиля коэффициент широкополосности увеличен в несколько раз (таблица № 4.1).

Однако, так как форма профиля сама зависит от длины волны, то максимальное значение коэффициента широкополосности может быть достигнуто только на какой то одной длине волны. В стандартных многомодовых волокнах форма профиля оптимизировалась на длине волны 1300 нм (вблизи нуля коэффициента материальной дисперсии волокна). При производстве новых типов волокон координату максимума сдвигают в сторону длинных волн (рис. 4.8), что приводит не только к увеличению коэффициента широкополосности волокон в первом окне прозрачности, но и делает тракт более универсальным, выравнивая значения этих коэффициентов в 1 и 2 окнах прозрачности.

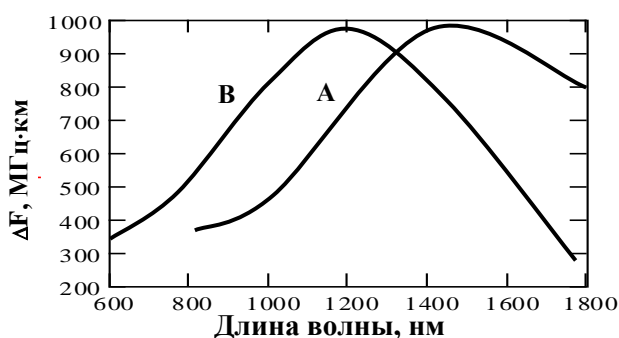


Рис. 4.8. Спектральные характеристики коэффициента широкополосности градиентных волокон. А – стандартное волокно, В – широкополосное волокно.

Наиболее совершенные модели градиентных волокон обеспечивают необходимую по протоколу Gigabit Ethernet скорость передачи 1 Гбит в секунду на расстояниях 1-2 км. Для таких волокон расстояние указывается непосредственно на марках (в метрах). Оптические параметры градиентных волокон компании Corning с улучшенными характеристиками представлены в таблице № 4.1. Максимальные расстояния, на которых обеспечивается скорость передачи Гбит в секунду в волокнах GLight компании Alcatel, приведены в диаграмме на рис. 4.9.

Таблица № 4.1. Оптические параметры градиентных волокон компании Corning

Тип волокна	Диаметр жилы Мкм	Числовая апертура NA	Потери 850/1300 нм, дБ/км	Коэффициент широкополосности, МГц·км	Гарант. дальность (м) для Gigabit Ethernet
62.5/125 CPC6	62.5	0.275	3/0.7	200/400	
50/125 CPC6	50	0.20	2.5/0.8	400/1000	
InfiniCor-300	62.5	0.275	3/0.7		300
InfiniCor-600	50	0.20	2.5/0.8		600
InfiniCor CL-1000	62.5	0.275	3/0.7		1000
InfiniCor CL-2000	50	0.20	2.5/0.8		2000

Из таблицы видно, что у волокон 50/125 не только диаметр сердцевины, но и числовая апертура меньше, чем у волокон 62.5/125, и, соответственно, волокна 50/125 направляют меньшее число мод. У волокон с меньшим числом мод легче добиться большего коэффициента широкополосности,

да и стоит оно меньше. Учитывая, что эффективность ввода излучения от лазерных источников не зависит от числа мод волокна 50/125 часто используются при строительстве ЛВС, несмотря на то, что действующая редакция стандарта TIA/EIA-568-A не рекомендует их применение.

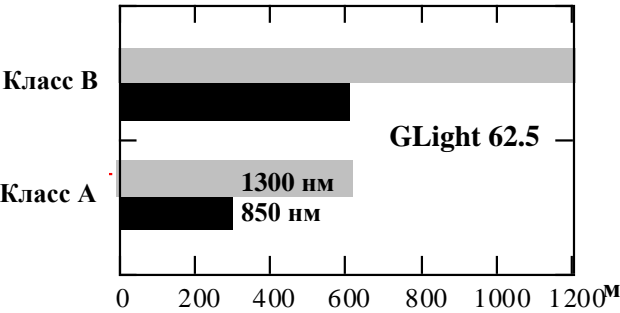


Рис. 4.9. Максимальное расстояние (в метрах) при скорости передачи 1 Гбит для волокна GLight 62.5 (Alcatel).

Стандарты на ММ волокна. Наиболее важными параметрами ММ волокон являются потери и коэффициент широкополосности. Оба эти параметра определяются в стандартах для длин волн 850 нм и 1300 нм, на которых работает большая часть сетевого оборудования.

В таблице № 4.2. представлены спецификации на ММ волокно, содержащиеся в соответствующих стандартах на структурированную кабельную систему (СКС): ISO/IEC 11801 и TIA/EIA 568. Этих характеристик вполне достаточно для обеспечения таких приложений, как Fast Ethernet, FDDI и ATM, необходимой полосой пропускания при любых стандартных длинах линий. Согласно существующим стандартам, максимальная длина кабельной линии для ММ волокна равна 2000 м. Однако пропускную способность, достаточную для передачи более широкополосных сигналов Gigabit Ethernet, стандартное ММ волокно обеспечивает только на меньших длинах линий - только до 500 м.

Таблица № 4.2. Стандартные спецификации градиентного ММ волокна.

Диаметр сердцевин, мкм	Потери, дБ/км		Коэффициент широкополосности, МГц×км	
	$\lambda = 850 \text{ нм}$	$\lambda = 1300 \text{ нм}$	$\lambda = 850 \text{ нм}$	$\lambda = 1300 \text{ нм}$
62.5	Не более 3.5	Не более 1.5	Не менее 200	Не менее 500
50	Не более 3.5	Не более 1.5	Не менее 500	Не менее 500

Учитывая требования технологии Gigabit Ethernet, Международная организация по стандартизации (ISO) подготовила новые спецификации на три класса ММ волокон: OM1, OM2 и OM3. Эти классы дифференцируются по затуханию и коэффициенту широкополосности. Согласно новому (второе издание) стандарту ISO/IEC 11801, предельно допустимое затухание в волокнах классов OM1, OM2 и OM3 на длинах волн 850 и 1300 нм составляет 3.5 и 1.5 дБ/км. Определенный тем же стандартом минимальный коэффициент широкополосности представлен в таблице № 4.3.

Таблица № 4.3. Минимальный коэффициент широкополосности ММ волокон.

Класс волокна	Диаметр сердцевин, мкм	Коэффициент широкополосности при насыщающем возбуждении, МГц×км		Коэффициент широкополосности при возбуждении с помощью VCSEL, МГц×км
		$\lambda = 850 \text{ нм}$	$\lambda = 1300 \text{ нм}$	
OM1	50 или 62.5	200	500	н/д
OM2	50	500	500	н/д
OM3	50	1500	500	2000

В заключение раздела приведем графики иллюстрирующие прогнозы по инсталляции многомодовых волокон.

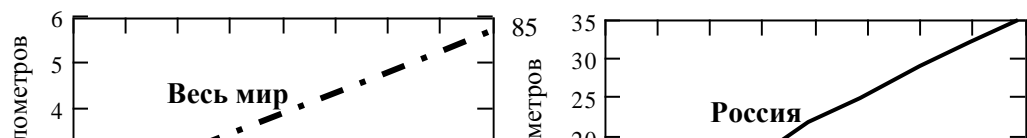


Рис. 4.10. Количество многомодовых волокон устанавливаемых в России и по всему миру.

Раздел II. Технология изготовления оптических волокон

§ 6. Методы изготовления волокон с малыми потерями

Методы изготовления оптических волокон с малыми потерями можно разделить на две большие группы: традиционные стекольные (метод двойного тигля и метод разделения фаз) и новые методы (основанные на процессе химического парафазного осаждения (CVD - Chemical Vapor Deposition)). Традиционные стекольные методы не обеспечивают необходимого уровня чистоты материалов, и изготовленные с их помощью оптические волокна обладают слишком большими потерями (1000...100 дБ/км). Новые методы позволяют создавать материалы чрезвычайно высокой чистоты (CVD процесс применяется и в полупроводниковой промышленности), и изготовленные с их помощью оптические волокна обладают предельно малыми потерями (~ 0.2 дБ/км на $\lambda = 1550$ нм).

В новых методах производство волокон разделяется на две основные стадии: изготовление заготовки и вытяжка волокон из заготовки. Для вытяжки волокон используется практически одинаковая технология и оборудование, и все различия в методах изготовления волокон проявляются только на стадии изготовления заготовки. Эти различия обусловлены в основном тем, что для массового производства волокон необходимы заготовки большого размера. Изготавливать их, учитывая относительно небольшие скорости процесса химического парафазного осаждения, достаточно сложно.

Оценим типичный размер и вес заготовки, исходя из длины отрезка волокна (до 250 км), который наматывается на раздаточную катушку (длина волокон на транспортировочных катушках 50 км и меньше). Диаметр кварцевой оболочки волокна равен 125 мкм, а плотность кварцевого стекла 2.2 г/см^3 . Отсюда получаем, что кварцевое стекло в отрезке волокна длиной 250 км занимает объем 3125 см^3 и весит 6875 г.

Заготовка естественно должна немного больше (её еще надо закрепить в установке для вытяжки). Положим для оценки, что она весит 7 кг. При длине 1 м диаметр такой заготовки будет равен примерно 6.3 см (рис. 4.11). Для справки: самая большая заготовка (изготовленная методом VAD – Vapor Axial Deposition) весит около 80 кг (длина 2 м, диаметр 15 см), а общий вес всех заготовок, учитывая, что в линии связи уложено около 100 миллионов километров волокон, составляет около трех тысяч тонн. Скорость же вытяжки достигает 1.2 км/мин и, соответственно, 250 км волокна можно вытянуть за 3.5 часа.

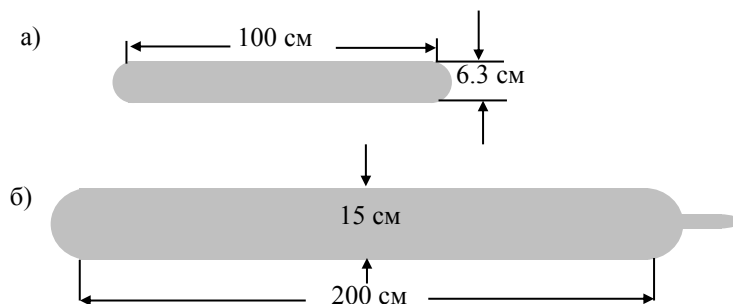


Рис. 4.11. Размеры заготовок для телекоммуникационных волокон.

а) Заготовка весом в 7 кг, из которой можно вытянуть 250 км волокна за 3.5 часа.

б) Самая большая заготовка (изготовленная методом VAD) весом в 80 кг. Из неё можно вытянуть 3 000 км волокна.

Время, затрачиваемое на изготовление заготовок, как правило, велико и ограничено в основном низкой скоростью осаждения слоев кварцевого стекла

$$t = M / v_{oc} = (\pi D_3^2 / 4) L_3 \rho / v_{oc}, \quad (4.1)$$

где $M = (\pi D_3^2 / 4) L_3 \rho$ – масса осажденного стекла (D_3 – диаметр заготовки, L_3 – длина заготовки, $\rho = 2.2 \text{ г/см}^3$ – плотность стекла), v_{oc} – скорость осаждения слоев.

В различных вариантах CVD процессов скорость осаждения слоев изменяется в достаточно широких пределах от 0.5 г/мин до 6 г/мин. Для того чтобы изготовить рассмотренную нами выше заготовку массой в 7 кг, даже при самой высокой скорости осаждения ($\sim 6 \text{ г/мин}$) потребуется весьма значительное время (~ 20 часов). Если скорость осаждения будет заметно ниже, то изготовить такую большую заготовку только путем осаждения нереально. В этом случае используют комбинированный метод. Сердцевину заготовки из сверхчистого кварцевого стекла изготавливают с помощью CVD процесса, а затем на неё надевают кварцевую трубку (жакетируют) или каким-либо другим путем осаждают слой кварцевого стекла.

В настоящее время при производстве телекоммуникационных волокон применяются в три основных варианта CVD процесса:

- Внутреннее парафазное осаждение (IVD – Inside Vapor Deposition), его часто обозначают как MCVD – Modified Chemical Vapor Deposition – модифицированное химическое парафазное осаждение.
- Внешнее парафазное осаждение (OVD – Outside Vapor Deposition).
- Осевое парафазное осаждение (VAD – Vapor Axial Deposition).

Далее мы рассмотрим кратко все эти варианты, но вначале опишем CVD процесс, с которого началась разработка кварцевых оптических волокон. В нем уже содержались все принципиальные решения, обеспечившие успех новым методам изготовления оптических волокон с малыми потерями.

§ 7. CVD процесс, разработанный впервые в компании Corning

Впервые CVD процесс для производства оптических волокон применил Дональд Кек в компании Corning. С помощью этого процесса в конце 1960-х годов ему удалось получить волокна с рекордно малыми потерями (около 20 дБ/км). Этот был прорыв, так как после преодоления барьера в 20 дБ/км волоконно-оптическая связь становилась экономически целесообразной. После этого многие компании по всему миру включились в разработку телекоммуникационных волокон.

Вариант CVD процесса, который использовала компания Corning, в дальнейшем стали называть “внутренним”. В нем в качестве кварцевой подложки использовалась опорная трубка, на внутреннюю поверхность которой осаждались слои стеклообразующего окисла SiO_2 и легирующего окисла GeO_2 , образовавшиеся в результате гидролиза в пламени. Для этого в горелку подавали смесь тетрахлорида кремния (SiCl_4) и легирующего хлорида (GeCl_4) с кислородом O_2 и горючим газом (рис.4.12).

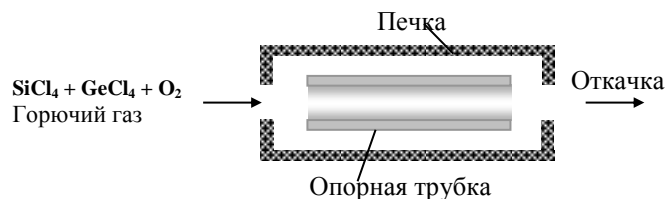


Рис. 4.12. Схема процесса внутреннего химического парафазного осаждения, примененного в компании Corning при изготовлении заготовок оптического волокна.

Продукты гидролиза в пламени прокачивались через опорную трубку, нагретую в печи до температуры, необходимой для стеклования осаждаемых на неё слоев белой сажи. Меняя концентрацию легирующих хлоридов можно было менять величину показателя преломления наносимых слоев и создавать заготовки с заданным профилем. После нанесения нужного числа слоев опорная трубка нагревалась до температуры плавления кварцевого стекла и схлопывалась под действием сил поверхностного натяжения в сплошную заготовку (рис. 4.13).

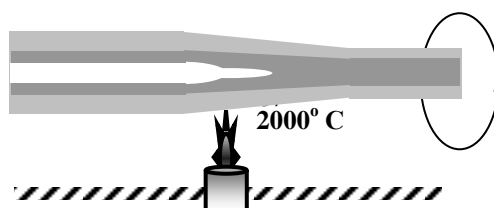


Рис. 4.13. Схлопывание опорной трубки в заготовку.

Таким образом, были решены две, казалось бы, противоречивые задачи: создание заготовки из сверхчистого кварцевого стекла и одновременно легирование этого стекла примесями для формирования в ней соответствующего профиля показателя преломления.

Возможность получения сверхчистого кварцевого стекла в CVD процессе обусловлена тем, что тетрахлорид кремния хорошо очищается и кипит при низкой температуре (58°C). Поэтому примеси, которые приводят к дополнительным потерям в рабочем диапазоне длин волн (в основном это примеси тяжелых металлов) остаются преимущественно в жидком состоянии. Напомним, что в полупроводниковой промышленности похожий процесс (реакция паров тетрахлорида кремния с водородом) используется для массового производства сверхчистого кремния. На начальной стадии разработки потери возникали так же из-за рассеяния света на пузырьках образующихся в слоях кварцевого стекла. От этих пузырей удалось избавиться за счет откачки паров из зоны реакции.

Вторую часть задачи удалось решить, подобрав легирующие примеси (германий, бор, фосфор, фтор), которые не вносят заметных потерь в рабочих диапазонах длин волн (0.6-1.6 мкм). Легирование кварцевого стекла может, как повышать, так и понижать его показатель преломления. Наиболее распространенной примесью является германий. Именно его используют для повышения показателя преломления сердцевины SM волокон. Примеси фосфора также приводят к увеличению показателя преломления, а примеси бора и фтора к его уменьшению. Так в SM волокнах с депрессированной оболочкой примесь фтора используется для понижения показателя преломления световодущей оболочки (часть оболочки, примыкающая непосредственно к сердцевине).

Хотя метод, запатентованный компанией Corning (в 1973 г.), был, безусловно, успешным, но он обладал низкой производительностью. Диаметр опорной трубки был меньше дюйма (при длине около метра), а на осаждение нужного числа слоев тратился целый рабочий день. После схлопывания опорной трубки получалась заготовка диаметром около 10 мм и длиной около метра. Из такой заготовки можно вытянуть всего лишь 5...10 км волокна. Для сравнения, строительная длина оптического кабеля в наземных линиях достигает 5 км, а в подводных ещё в несколько раз больше. Кроме того, этот метод мог быть легко скопирован конкурентами, так как слишком уж напоминал известный в электронике процесс получения чистого кремния.

Метод внутреннего парафазного осаждения (IVD) обладает тремя основными недостатками:

- Малый диаметр заготовки (~ 1 см) и низкая скорость осаждения (0.1..0.5 г/мин) ограничивают возможность применения этого метода для массового производства волокон.
- Для изготовления заготовки необходимо использовать прецизионную опорную трубку.
- Излишки паров воды, образующиеся в процессе гидролиза в пламени, приводили к увеличению потерь (наиболее сильный пик на $\lambda = 1.37$ мкм).

§ 8. Внешнее осаждение (OVD метод).

В конце 1977 г. компания Corning начала разработку метода внешнего парафазного осаждения (OVD), альтернативного методу внутреннего парафазного осаждения (IVD). В нем также используется процесс гидролиза в пламени, но вместо опорной трубки применяется затравочный керамический стержень диаметром 5...10 мм закрепленный в тепломеханическом станке на расстоянии около 15 см от горелки (рис. 4.14). На этот стержень направляется поток нагретых порошкообразных частиц стекла и легирующих окислов, образующийся в пламени многослойной горелки. Частицы стекла прилипают к стержню в виде белой сажи и формируют многослойную микропористую заготовку. Не осевшие порошкообразные частицы стекла и газообразные побочные продукты гидролиза в пламени удаляются через вытяжную трубу. Таким образом, в методе OVD отпадает необходимость в прецизионной сверхчистой кварцевой трубке, и, более того, эти трубки часто, и изготавливают с помощью OVD метода.



Рис. 4.14 Схема внешнего химического парафазного осаждения (OVD).

После осаждения частиц микропористая заготовка легко снимается с многократно используемого затравочного стержня (КТР керамики много больше, чем у кварца). Затем она помещается в печь с инертным газом (например, гелием), где остекловывается (при температуре порядка 1500°) и дегазуется через поры (рис. 4.15). Газы, вытесняемые из заготовки во время остекловывания, выходят через микропоры и не захватываются в виде пузырьков в полностью остеклованной заготовке.

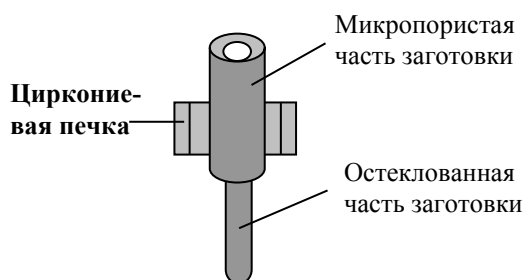


Рис. 4.15. Остекловывание и схлопывание заготовки в методе OVD

Продукты сгорания горючего газа, образующиеся во время осаждения стеклянных микрочастиц, могут внести в заготовку примеси гидроксидов OH (ответственные за пик поглощения на $\lambda = 1.37$ мкм). Практически все примеси гидроксидов удаляются за счет обработки заготовки газообразным хлором в процессе её остекловывания.

В современной модификации метода OVD - методе внешнего плазменного осаждения (метод PVD – Plasma Outside Deposition) вместо кислородно-водородной горелки применяют плазменную горелку. Это позволяет не только избавиться от появления продуктов сгорания горючего газа, но и существенно повысить рабочую температуру. При этом, если выходящий из кислородно-водородной горелки факел состоит из частиц двуокиси кремния осаждаемых на поверхности в виде белой сажи, то факел, выходящий из плазменной горелки, состоит в основном из частиц монооксида кремния и атомарного кислорода. Эти частицы соединяются, образуя двуокись кремния, и осаждаются на поверхности заготовки уже непосредственно в остеклованном виде.

На последней стадии изготовления заготовки она нагревается до температуры размягчения ($\sim 2000^{\circ}\text{C}$), центральное отверстие в заготовке затягивается (схлопывается) и образуется сплошная заготовка. В процессе схлопывания опорной заготовки могут возникнуть два основных типа дефектов. Первый дефект заключается в том, что при схлопывании заготовка стремится деформироваться в стержень эллиптического сечения. Второй дефект проявляется в виде провала в профиле показателя преломления. Этот провал появляется из-за того, что высокая температура, необходимая для размягчения опорной трубки, способствует усилению диффузии легирующей примеси к поверхности слоев и их испарению во внутренне пространство трубки.

Оба эти дефекта - эллиптичность и провал в профиле показателя преломления - передаются волокну в процессе его вытяжки. Провал в профиле показателя преломления одномодового волокна практически не влияет на его дисперсионные характеристики, так как занимает малую часть модового пятна и действие эффективно усредняется.

В то же время провал в профиле показателя преломления многомодового (градиентного) волокна (за счет эффекта дифференциальной модовой задержки (глава 2)) существенно ограничивает широкополосность волокна при работе с лазерным источником излучения. Эллиптичность волокна наоборот ухудшает в основном характеристики одномодовых волокон (например, увеличивает PMD и потери в сварных соединениях) и практически не влияет на характеристики многомодовых волокон.

В методе OVD устранены все основные недостатки, которыми обладал метод IVD впервые примененный Corning:

- Высокая скорость осаждения (3...4 г/мин) в сочетании с возможностью значительного увеличения размеров заготовки делает перспективным его применение для массового производства телекоммуникационных волокон.
- Заготовки производятся без использования опорных трубок и, кроме того, метод OVD позволяет изготавливать прецизионные кварцевые трубки.
- Примеси гидроксильных ионов (ОН) удаляются в процессе остекловывания заготовки путем обработки её хлором.

§ 9. Осевое осаждение (VAD метод)

Японские компании (Sumitomo, Hitachi, Fujikura, Furukawa) сосредоточили свои усилия на разработке метода осевого (аксиального) парафазного осаждения (VAD) как наиболее подходящего для массового производства телекоммуникационных волокон. Этот метод, называемый также методом Вернейля, позволяет в принципе изготавливать заготовки неограниченной длины. Заготовка растет в осевом направлении, а профиль показателя преломления задается путем изменения концентрации примесей по радиусу (рис. 4.16).

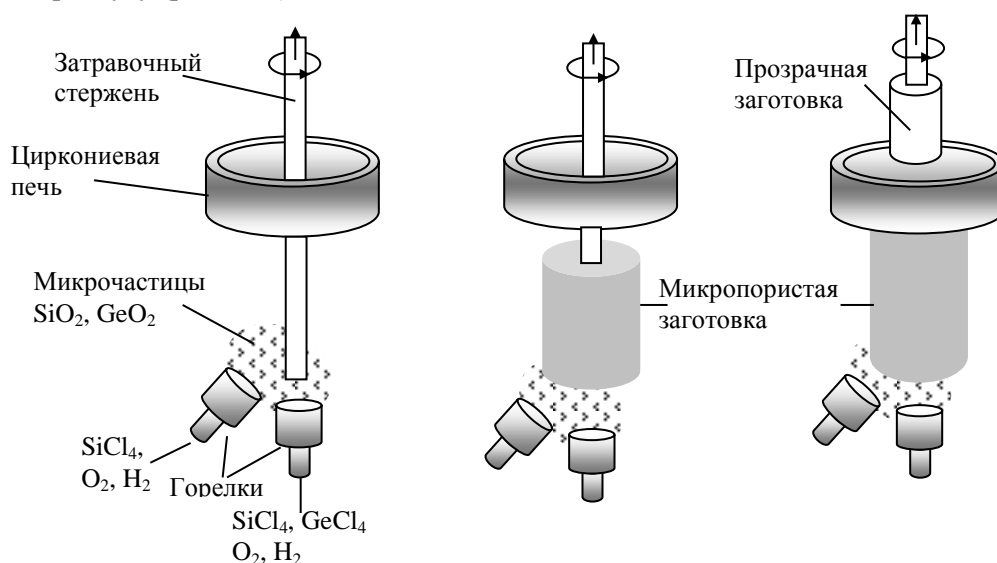


Рис. 4.16. Схема изготовления заготовки методом VAD.

Для формирования заготовки используется несколько кислородно-водородных горелок - таких же, как и в методе OVD. Соответственно повышается и производительность метода (до 4...6 г/мин). Одна горелка осаждает продукты гидролиза в пламени на торцевую поверхность затравочного стержня, формируя сердцевину заготовки. Тут же, непосредственно после образования микропористой сердцевины заготовки с помощью дополнительных горелок, формируется и оболочка заготовки (рис. 4.17). Далее микропористая заготовка нагревается в печи примерно до 1600° С, и в результате стеклования получается прозрачная заготовка.

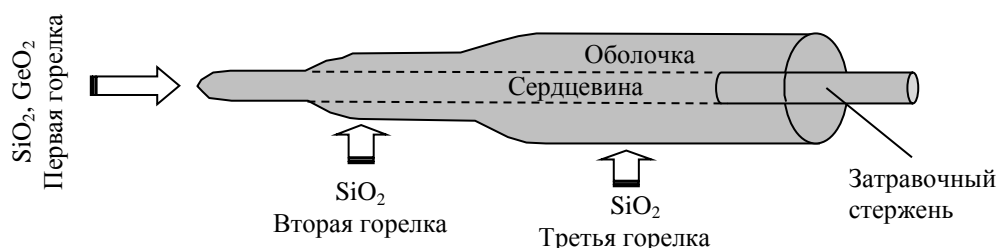


Рис. 4.17. Схема нанесения слоев на заготовку в VAD методе.

Так как в методе VAD отсутствует операция схлопывания заготовки, то отсутствует и провал в профиле показателя преломления. Основное же достоинство этого метода в его высокой производительности – более 25 % волокон, уложенных в линии связи по всему миру, изготовлены с помощью метода VAD. В то же время его широкому промышленному внедрению препятствует сложность ав-

томатизированной системы управления, обусловленная многочисленностью параметров подлежащих контролю и регулированию.

§ 10. Внутреннее осаждение (MCVD метод)

В Bell Laboratory кварцевые оптические волокна создавались (с 1972 г.) специалистами, хорошо знакомыми с технологией парафазного осаждения кремниевых пленок в полупроводниках. В Bell Laboratory, так же как и в Corning, начали с разработки внутреннего метода CVD, но в этом методе им удалось продвинуться немного дальше и создать более совершенный вариант, который принято называть модифицированное химическое парафазное осаждение MCVD. Причем детали технологии MCVD были опубликованы в открытой печати (в 1974 г.).

В MCVD методе газовая горелка находится снаружи (рис. 4.18), и пары воды, образующиеся в её пламени, не попадают в слои стекла осаждающиеся за счет теплового окисления внутри опорной трубки. Напомним, что в варианте внутреннего метода, применявшегося в Corning, использовался процесс гидролиза в пламени, и не была решена проблема удаления излишков паров воды, попадавших в слои осажденного стекла из пламени горелки.

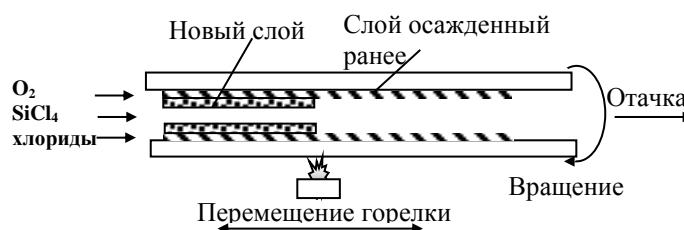


Рис. 4.18. Схема модифицированного химического парафазного осаждения (MCVD).

Однородность геометрических параметров заготовки в значительной степени определяется однородностью геометрических параметров опорной трубки. Поэтому изготовление заготовки начинается с отбора опорных трубок (допускаются: вариации диаметра $< 2\%$, эллиптичность $< 1\%$, изгиб < 1 мм/м). Отобранная опорная трубка промывается плавиковой кислотой и дистиллированной водой, высушивается и закрепляется горизонтально в патронах тепломеханического станка. Вдоль вращающейся опорной трубки (60 об/мин) со скоростью 20 см/мин перемещается кислородно-водородная горелка, обеспечивающая температуру нагревания трубки в горячей зоне $1500^{\circ} - 1700^{\circ} \text{C}$, достаточной для осаждения на неё слоев SiO_2 и GeO_2 . Вращение трубки обеспечивает её равномерный прогрев по сечению и осесимметричное осаждение окислов на её внутренней поверхности.

Процесс начинается с полировка опорной трубки в пламени горелки. Затем в трубку подается парогазовая смесь, образующаяся при прокачке кислорода через смесители, заполненные жидкими галоидами кремния, германия и т.д. Закон изменения смеси во времени зависит от типа изготавливаемого волокна. В горячей зоне происходит осаждение окислов SiO_2 и GeO_2 и д.р. в виде ультрадисперсного порошка (белой сажи). При повторном движении горелки вдоль трубки порошок проплавляется, превращаясь в слой стекла толщиной 1...10 мкм.

После осаждения заданного программой числа слоев температура горячей зоны увеличивается до $1900...2100^{\circ} \text{C}$ (за счет замедления скорости движения горелки), опорная трубка размягчается и схлопывается под действием поверхностных сил в сплошной стеклянный цилиндр – заготовку. В сечении заготовка представляет собой увеличенную в сотни раз структуру оптического волокна с соответствующим профилем показателя преломления. Чем больше диаметр заготовки, тем труднее поддерживать аксиальную симметрию заготовки в процессе её схлопывания и тем больше требуется на это времени. На схлопывание опорной трубки диаметром 2 см и длиной 1 м затрачивается примерно 30 мин.

Размер заготовок и время, затрачиваемое на их изготовление. Максимальная скорость осаждения слоев стекла в MCVD почти на порядок меньше чем в методах VAD и OVD и составляет всего лишь 0,5...1 г/мин. Это слишком маленькая скорость для того, чтобы можно было волокно изготавливать целиком с помощью CVD процесса. Для оценки: один километр волокна (без покрытия) весит около 27 граммов и для того, чтобы осадить такое количество стекла при скорости осаждения 0,5 г/мин, потребуется почти час времени. Такие временные затраты может быть ещё и допустимы при изготовлении многомодовых волокон, но неприемлемы при изготовлении одномодовых волокон, где счет идет на многие десятки километров.

Однако, так как свет распространяется в основном в сердцевине волокна, то на самом деле нет необходимости изготавливать волокно целиком из сверхчистого кварцевого стекла. Достаточно с помощью CVD процесса изготовить только сердцевину и световедущую оболочку волокна (часть

оболочки, куда частично проникает свет, распространяющийся в сердцевине). А остальную часть волокна, которая определяет только геометрические и механические характеристики волокна, образовать из опорной трубки.

У SM волокон и диаметр сердцевины ($D_{\text{сер}} = 8..9$ мкм), и диаметр световедущей оболочки ($D_{\text{с.о}} \sim 30$ мкм) существенно меньше диаметра кварцевой оболочки ($D_0 = 125$ мкм). У градиентных волокон диаметр сердцевины ($D_{\text{сер}} = 50/62.5$ мкм) сравним с диаметром световедущей оболочки и всего лишь в два раза меньше диаметра кварцевой оболочки волокна D_0 (рис. 4.19).

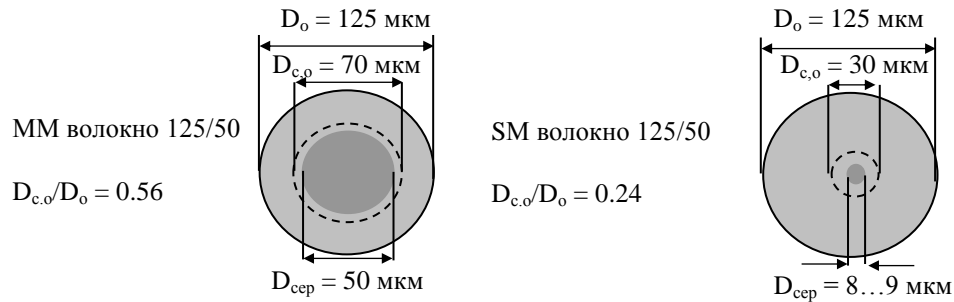


Рис. 4.19. Поперечные сечения MM и SM волокон.

Так как основное время, при изготовлении заготовки MCVD методом, тратится на осаждение слоев стекла, то, соответственно, на изготовление заготовок для SM волокон требуется намного меньше времени, чем на изготовление заготовок (с тем же диаметром) для MM волокон. Диаметр же заготовки (для одного и того же типа волокон) получается тем больше, чем больше опорная трубка, из которой изготавливают эту заготовку. Типичные размеры опорных трубок: внешний диаметр 20...25 мм, внутренний 16...20 мм, длина около 1 м.

Рассчитаем параметры заготовки для градиентного волокна (125/50), полученной из опорной трубки с внешним диаметром $B_1 = 25$ мм и внутренним диаметром $B_2 = 20$ мм. (рис. 4.20). Для этого запишем условие сохранения объема стекла в опорной трубке

$$(\pi/4) (d_o^2 - d_{\text{с.о}}^2) = (\pi/4) (B_1^2 - B_2^2) \quad (4.2)$$

и условие того, что профиль показателя преломления заготовки отличается от профиля показателя преломления вытягиваемого из неё волокна только масштабом.

$$d_{\text{с.о}} / d_o = D_{\text{с.о}} / D_0 = 0.56. \quad (4.3)$$

Диаметр заготовки d_o определяет длину волокна L , которое можно вытянуть из этой заготовки, а диаметр световедущей оболочки заготовки $d_{\text{с.о}}$ – время, затрачиваемое на осаждение кварцевого стекла:

$$L = (d_o/D_0)^2 L_3 \quad (4.4)$$

$$t = (\pi/4) d_{\text{с.о}}^2 L_3 \rho / v_{\text{ос}}. \quad (4.5)$$

Из первых двух уравнений находим величину диаметра заготовки: $d_o = 18$ мм и диаметра световедущей оболочки заготовки $d_{\text{с.о}} = 10$ мм. Подставив эти значения в третье и четвертое уравнения, находим (при $L_3 = 1$ м) длину вытянутого волокна $L = 21$ км и время, затрачиваемое на изготовления заготовки $t = 6$ часов (при $v_{\text{ос}} = 0.5$ г/мин). Таким образом, возможность увеличения диаметра заготовки для MM волокон ограничивается в первую очередь временем, затрачиваемым на осаждение световедущей оболочки и сердцевины волокна.

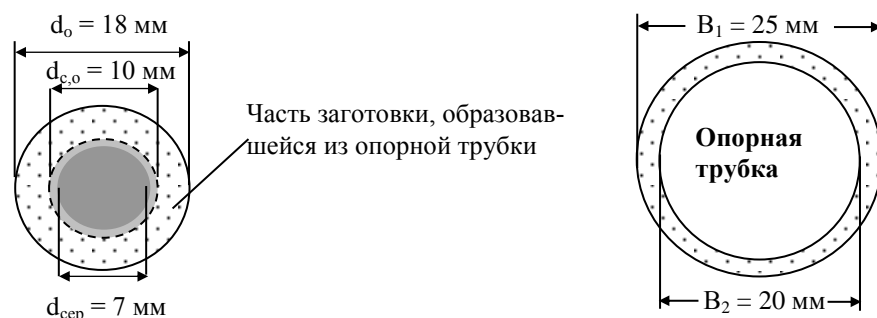


Рис. 4.20. Опорная трубка и образованная с её помощью заготовка для ММ волокна (50/125).

Аналогично рассчитываются параметры заготовки для SM волокна. Отличие только в том, что во втором уравнении отношение диаметров оболочек будет примерно в два раза меньше: $d_{c,o} / d_o = D_{c,o} / D_o = 0.24$. При такой же опорной трубке, как и в предыдущем примере ($B_1 = 25$ мм и $B_2 = 20$ мм), диаметр заготовки для SM волокон (d_o) получается равным 16.4 мм, и из неё можно вытянуть примерно 17 км SM волокна (при $L_3 = 1$ м). Диаметр же световедущей оболочки ($d_{c,o} = 0.24 d_o = 3.9$ мм) при этом будет существенно меньше диаметра световедущей оболочки заготовки для ММ волокна (рис. 4.21). Соответственно на осаждение слоев стекла для создания световедущей оболочки в заготовке для SM потребуется значительно меньше времени (1 час при $v_{o,c} = 0.5$ г/мин).

Диаметр заготовки и, соответственно, длина вытянутого волокна быстро уменьшаются с уменьшением диаметра опорной трубки и толщины её стенок. Так при использовании опорной трубки с внешним диаметром $B_1 = 20$ мм и внутренним $B_2 = 16$ мм диаметр заготовки для SM волокна получится равным 10 мм, и из неё можно будет вытянуть только около 6 км волокна (при $L_3 = 1$ м).

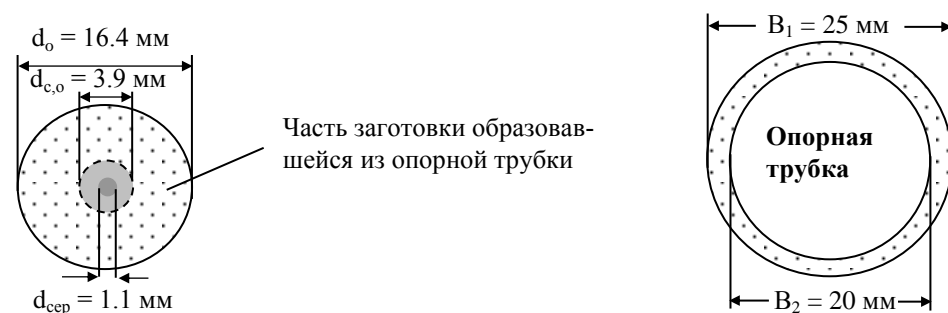


Рис. 4.21. Опорная трубка и образованная с её помощью заготовка для SM волокна.

Жакетирование заготовок. Как видно из рис. 4.21, большая часть заготовки для SM волокна образуется из опорной трубки. При этом время, затрачиваемое на осаждение стекла (~ 1 часа), не слишком велико и, следовательно, имеется возможность увеличить диаметр заготовки. Например, так как диаметр заготовки получился меньше внутреннего диаметра опорной трубки, то можно вставить заготовку в такую же опорную трубку и затем схлопнуть (жакетировать) опорную трубку на эту заготовку. При этом, конечно, необходимо увеличить толщину осажденных в заготовке слоев стекла так, чтобы получить необходимое соотношение между диаметром конечной заготовки и диаметром её световедущей оболочки.

Увеличение диаметра заготовки за счет нанесения дополнительного кварцевого покрытия (жакетирования) позволяет значительно сократить время изготовления больших заготовок. Диаметр заготовки обычно увеличивают схлопывая на неё кварцевую трубку или осаждая снаружи слои кварцевого стекла, аналогично тому как это делается при изготовлении заготовок методом OVD (рис. 4.22).

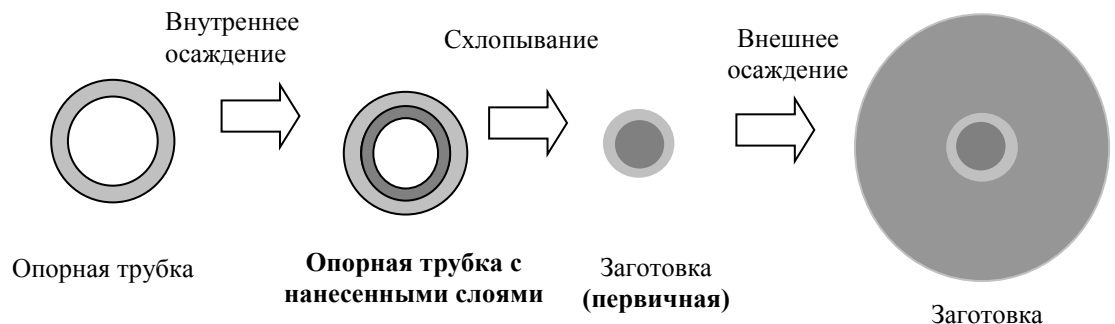


Рис. 4.22. Схема увеличения диаметра первичной заготовки им путем её жакетирования.

Метод MCVD позволяет изготавливать заготовки высшего качества для волокон всех типов. Поэтому, а так же потому, что информация с самого начала была общедоступной, MCVD был доведен до промышленного уровня и используется во всем мире для массового производства оптических волокон.

§ 11. Плазменное внутреннее осаждение (PCVD метод).

Введение. Наиболее перспективным методом изготовления заготовок, по всей видимости, является плазменный метод внутреннего осаждения (PCVD - Plasma Chemical Vapor Deposition). Он позволяет формировать профиль показателя преломления волокон с точностью недостижимой другими методами, мало подвержен влиянию окружающей среды, и хорошо подходит для промышленного производства оптических волокон всех типов.

Особый интерес PCVD метод представляет при производстве волокон, обладающих сложной формой профиля показателя преломления, например, NZDS волокон. В настоящее время PCVD метод применяется в компании YOFC (Yangtze Optical Fiber and Cable Company Ltd, Китай) для производства практически всех известных типов волокон. Схематически процесс изготовления волокна изображен на рис. 4.23.

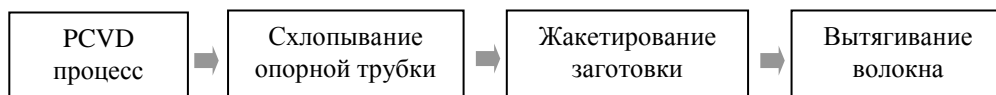


Рис. 4.23. Основные стадии изготовления волокна с использованием метода PCVD.

PCVD метод. В PCVD методе для активации процесса внутреннего химического осаждения используется неизотермическая плазма низкого давления (~ 10 мбар $\approx 10^{-3}$ атм.). Плазма образуется с помощью СВЧ резонатора в смеси паров SiCl_4 , GeCl_4 , C_2F_6 (фреон) и O_2 , прокачиваемых через опорную трубку (рис. 4.24). На возбуждение плазмы затрачивается мощность порядка нескольких киловатт излучаемая магнетроном на частоте около 2.5 ГГц.

Тетрахлорид кремния (SiCl_4), взаимодействуя при высокой температуре с кислородом, образует сверхчистое кварцевое стекло (SiO_2). В реакции галоидов германия (GeCl_4) с кислородом образуется примесь двуокиси германия (GeO_2), увеличивающая показатель преломления сердцевины волокна. Для понижения показателя световедущей оболочки используется фтор, образующийся при окислении фреона.

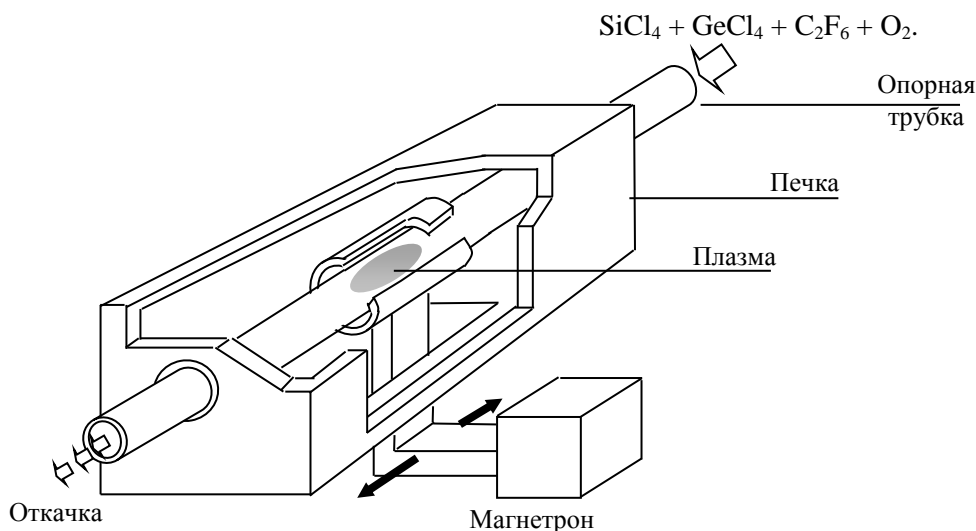


Рис. 4.24. Парафазное осаждение, активированное микроволновой плазмой.

В неизотермической плазме температура электронов (~ 10000 С) значительно превышает температуру ионов (~ 1200 С), которая близка к температуре опорной трубки нагреваемой с помощью печи. Образующиеся в плазме частицы монооксида кремния, атомарного кислорода и примесей галоидов диффундируют к стенке опорной трубки и осаждаются на её поверхности. Скорость осаждения порядка 1...2 г/мин, т.е. примерно в 3 раза выше, чем в MCVD методе.

При воссоединении частиц на стенке опорной трубки выделяется дополнительное тепло, поэтому реакция окисления идет сразу с образованием стеклянных слоев минуя порошковую стадию. При этом скорость движения горячей зоны можно увеличить до 10 м/мин (в MCVD методе она порядка 20 см/мин) и, соответственно, увеличить число осажденных слоев.

Число осажденных слоев во многих случаях является важнейшим параметром, характеризующим качество заготовки. Для волокон со ступенчатым профилем показателя преломления оно не так существенно. Однако для того, чтобы изготовить волокна с более сложной формой профиля пока-

зателя преломления (градиентные многомодовые волокна или NZDS волокна с треугольным профилем), число осажденных слоев должно быть достаточно велико.

Число осажденных слоев прямо пропорционально скорости движения горячей зоны v_3 и времени осаждения слоев t :

$$N = t v_3 / L_3. \quad (4.6)$$

В MCVD методе при изготовлении одномодового волокна (без жакетирования) на осаждение слоев затрачивается примерно 1 час. За это время, при скорости движения горячей зоны $v_3 = 20$ см/мин и длине заготовки $L_3 = 1$ м, можно осадить 12 слоев кварцевого стекла. При больших объемах производства заготовка обычно жакетируется. В этом случае объем осажденных слоев, время осаждения и число слоев увеличиваются в несколько раз.

Однако радикально увеличить число осажденных слоев можно, только снизив существенно скорость перемещения горячей зоны. В PCVD методе энергия передается непосредственно реагирующим газам, минуя стадию передачи тепла через стенки опорной трубки. В результате, как уже говорилось, скорость движения горячей зоны увеличивается до 10 м/мин. При такой скорости за 5 часов можно осадить около 3000 слоев, что позволяет создавать профили показателя преломления с точностью недостижимой другими методами.

Схлопывание опорной трубки. Следующая стадия состоит в преобразовании опорной трубки вместе с осажденными в ней слоями в сплошной стеклянный стержень рис.4.25.

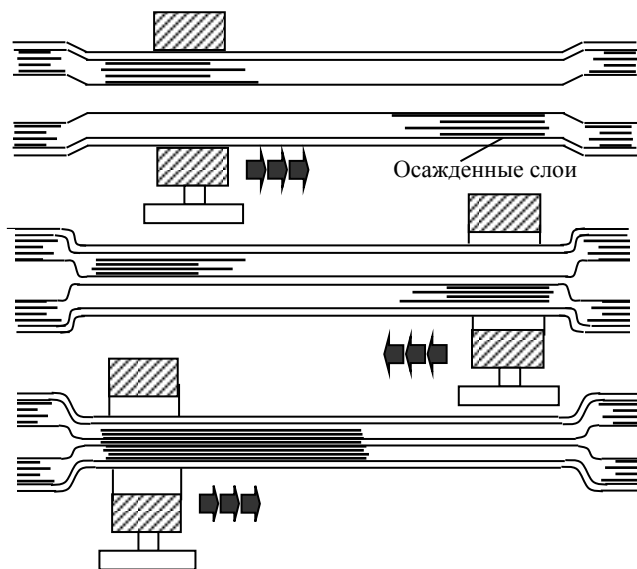


Рис. 4.25. Схлопывание опорной трубки в сплошной стеклянный стержень.

Схлопывание опорной трубки происходит под действием сил поверхностного натяжения. Для этого она нагревается, с помощью графитовой печи, до температуры размягчения кварцевого стекла (~ 2200 C). При перемещении печи вдоль оси опорной трубки силы поверхностного натяжения постепенно сжимают размягченную трубку в сплошной стеклянный стержень.

Основное преимущество графитовой печи (по сравнению с кислородно-водородной горелкой) состоит в том, что она создает в зоне нагрева аксиально-симметричное распределение температуры. Для получения симметричного распределения температуры не только снаружи, но и внутри опорной трубки, она вращается вокруг своей оси. Кроме того, давление в внутри трубки в процессе схлопывания регулируется с помощью компьютера. Таким образом, удастся получать заготовки с достаточно малой величиной эллиптичности оболочки и эксцентриситета сердцевины.

Нагревание опорной трубки до температуры плавления кварцевого стекла в процессе её схлопывания приводит к появлению ещё одного негативного эффекта- провалу в центре профиля показателя преломления. Происходит это из-за того, что последние слои, образующие сердцевину заготовки, частично испаряются. А так как скорость испарения GeO_2 выше чем у SiO_2 , то показатель преломления вблизи оси заготовки понижается. Для того чтобы ослабить влияние этого негативного эффекта внутренняя часть опорной трубки в процессе схлопывания заполняется смесью фреона с кислородом. В результате провал в профиле показателя преломления становится менее глубоким и более плавным.

Жакетирование заготовок. В одномодовых волокнах сердцевина и окружающая её часть световедущей оболочки занимают всего лишь несколько процентов от всего объема волокна. Основ-

ная же часть оболочки определяет только механические свойства волокна. Поэтому увеличение объема преформ путем их жакетирования позволяет значительно увеличить производительность процесса изготовления одномодовых волокон. При этом только основному только световедущая часть заготовки, где предъявляются наиболее высокие требования к чистоте материала, изготавливается с помощью CVD процесса (рис. 4.26).

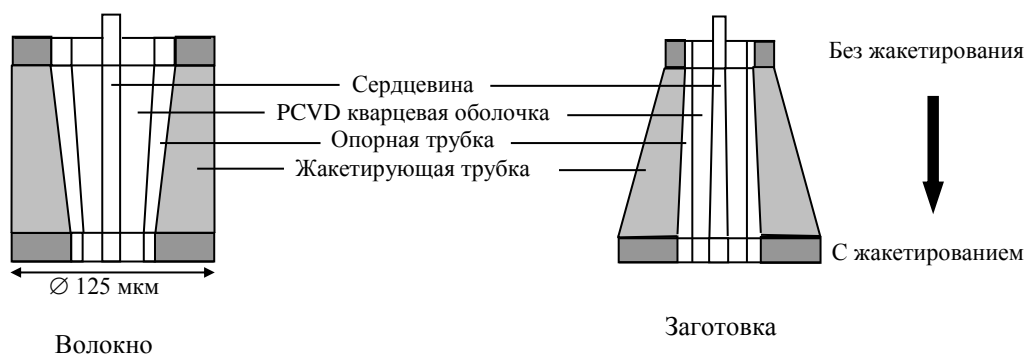


Рис. 4.26. Поперечные сечения волокна и заготовок изготовленных с применением операции жакетирования и без этой операции.

Схема изготовления преформы RIT (rod in tube) – стержень в трубке изображена на рис. 4.27. Преформа, полученная после схлопывания опорной трубки, помещается в высококачественную кварцевую трубку изготовленную OVD (Outer Vapor Deposition) методом. Такой способ изготовления заготовок принято называть синтетической кварцевой технологией. Она сочетает в себе достоинства как внутреннего PCVD, так и внешнего OVD метода осаждения слоев сверхчистого кварцевого стекла.



Рис. 4.27. Изготовление преформы RIT – стержень в трубке.

Для того чтобы избежать появления эксцентриситета сердцевины относительно оболочки в процессе вытяжки волокна производится юстировка внутреннего стержня RIT преформы относительно его жакетирующей оболочки. В печь вытяжной колонки устанавливается ещё не схлопнутая RIT преформа внутри которой поддерживается вакуум. При вытяжке волокна внутренний стержень юстируется так, чтобы обеспечить постоянство зазора между ним и жакетирующей оболочкой. Таким образом, удастся добиться высоких геометрических характеристик волокна, т.е. малой эллиптичности оболочки и малого эксцентриситета сердцевины относительно оболочки.

Вытяжка волокон. Принцип вытяжки волокон достаточно прост - конец заготовки нагревают до температуры плавления кварцевого стекла, а затем из него вытягивают тонкую нить. Охлаждаясь на воздухе, тонкая кварцевая нить быстро стеклется и перестает удлиняться, что и обеспечивает возможность получения волокон с постоянным по длине диаметром. Температура подбирается так, чтобы можно было производить принудительную вытяжку. В этом случае форма профиля показателя преломления волокна получается близкой к форме профиля показателя преломления исходной заготовки.

Для нагревания конца заготовки в настоящее время применяются в основном циркониевые печи с индукционным нагревателем. Нагреть конец кварцевой заготовки до нужной температуры можно также с помощью более доступных источников тепла: кислородно-водородного пламени или графитовой печи. Однако при нагреве с помощью кислородно-водородного пламени нестабильность пламени увеличивает флуктуации диаметра оболочки волокна, а образующаяся как побочный продукт вода ухудшает состояние поверхности волокна.

Нагрев кварцевых заготовок с помощью графитовой печи так же может приводить к их загрязнению, так как температура, необходимая для размягчения кварца, настолько высока, что способна вызвать взаимодействие SiO_2 с углеродом. Циркониевые же печи с индукционным нагревателем

лем, как и графитовые печи, обладают теплотворной способностью достаточной для вытягивания волокон из больших заготовок, но приводят к меньшему загрязнению волокон.

Преформа устанавливается на вершине колонки для вытяжки волокон и медленно вдвигается в печь, разогретую до температуры порядка 2100 °С. Нижний конец преформы размягчается так, что из него можно вытягивать нити нужного диаметра (125 мкм). При этом форма профиля показателя преломления сохраняется, несмотря на огромное изменение масштаба в поперечном направлении.

На выходе из печи установлено лазерное устройство, с помощью которого измеряется диаметр кварцевой оболочки волокна (рис. 4.28). Сигнал с выхода этого устройства используется для коррекции скорости вытяжки волокна.

Сразу после измерения диаметра кварцевой оболочки на волокно наносится двухслойное покрытие отверждаемое УФ излучением. Первый слой покрытия мягкий, а второй более твердый. Такое двухслойное покрытие препятствует появлению в волокне микроизгибов в широком диапазоне температур. Концентричность наносимых на волокно покрытий контролируется по картине дифракции излучения He-Ne лазера.

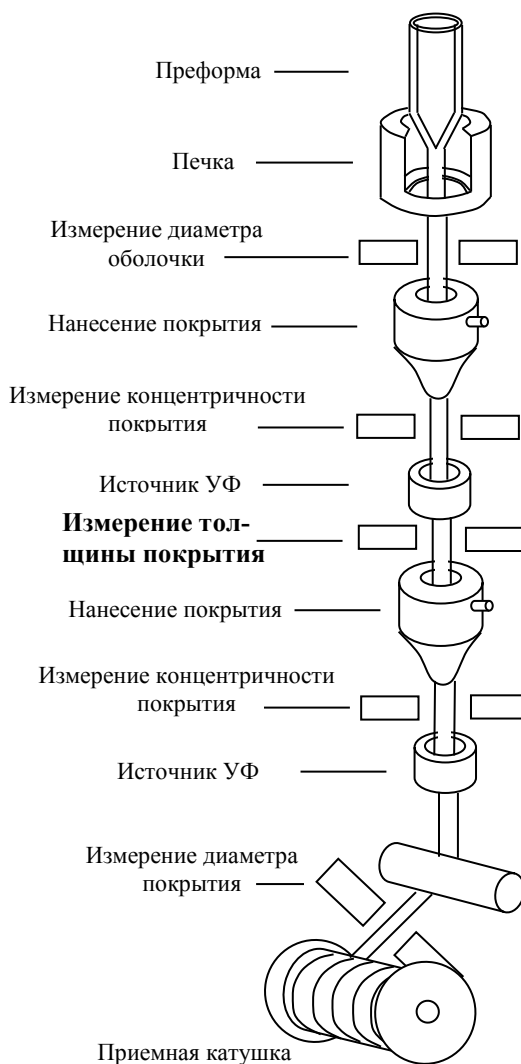


Рис. 4.28. Схема установки для вытяжки волокон компании YOFC.

Таблица № 4.4. Типы волокон изготавливаемых PCVD методом.

Тип волокна	Стандарт на волокно
Стандартное одномодовое волокно (SM) с согласованной оболочкой (matched cladding)	ITU-T Rec. G.652 IEC 793-2, B. 1.1
Многомодовое градиентное волокно 50/125 мкм (MM)	IEC 793-2, A1a
Многомодовое градиентное волокно 62.5/125 мкм (MM)	IEC 793-2, A1b
Волокно со смещенной дисперсией (DS)	ITU-T Rec. G.653
Волокно с ненулевой смещенной дисперсией (NZDS)	ITU-T Rec. G.655
Волокно для компенсации дисперсии (DC)	

§ 12. Внутреннее осаждение и плазменное жакетирование (APVD метод).

Компания Alcatel разработала вариант метода внутреннего осаждения, предназначенного специально для создания больших заготовок. Его принято называть методом APVD (Advanced Plasma and Vapor Deposition). В APVD методе небольшая первичная заготовка изготавливается MCVD методом, а затем внешним плазменным осаждением кварцевого стекла она преобразуется в большую заготовку. Компания Alcatel имеет заводы по производству волокна не только во Франции, но так же в США, Германии, Бразилии и Швейцарии. Начато строительство такого завода и в России.

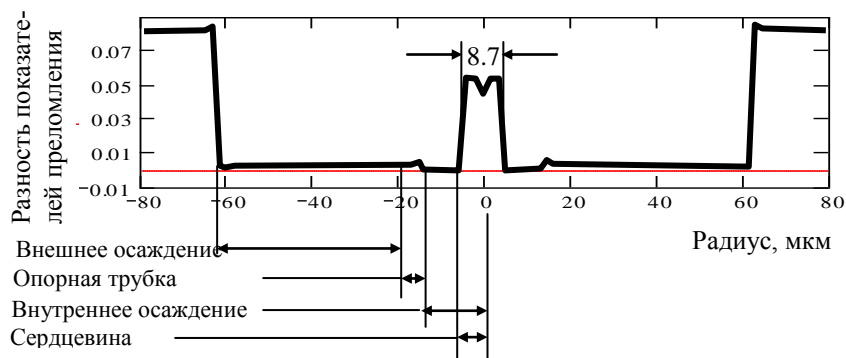


Рис. 4.29. Профиль показателя преломления SM волокна, изготовленного методом APVD.

На рис. 4.29 изображен профиль показателя преломления SM волокна, изготовленного APVD методом. Из рисунка видно, что большая часть волокна (~ 90 %) получена плазменным осаждением, а из опорной трубки образована лишь малая часть волокна порядка нескольких процентов. При этом, хотя диаметр первичной заготовки (полученной MCVD методом) примерно в три раза меньше диаметра конечной заготовки, но все равно основное время тратится её изготовление. Поэтому для того, чтобы разгрузить установку для внутреннего осаждения стекла, схлопывание первичной заготовки осуществляется на отдельной установке (рис. 4.30).

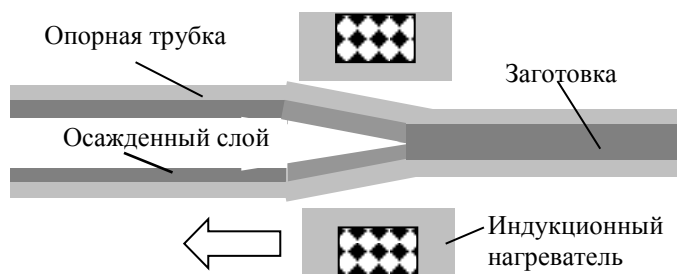


Рис. 4.30. Схлопывание опорной трубки в заготовку с помощью индукционного нагревателя.

Нагревание опорной трубки в этой установке осуществляется с помощью индукционного нагревателя. Такой нагреватель обеспечивает более осесимметричное распределение температуры в зоне нагрева, чем кислородно-водородная горелка, что наряду с прецизионной регулировкой давления инертного газа внутри опорной трубки обеспечивает получение заготовок с малой эллиптичностью.

Для нанесения дополнительного кварцевого покрытия на первичную заготовку используется кварцевый порошок – недорогой и простой в обращении материал. Он осаждается с помощью плазменной горелки с температурой в плазменном сгустке порядка $10\,000^{\circ}\text{C}$, что обеспечивает высокую скорость осаждения (рис. 4.31). Таким способом удастся создавать заготовки с внешним диаметром до 70 мм. Из заготовки длиной 1 м и диаметром 70 мм можно вытянуть около 300 км волокна.

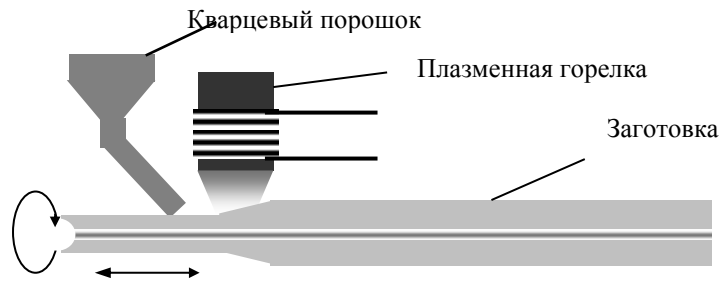


Рис. 4.31. Осаждение кварцевого стекла на заготовку с помощью плазменной горелки.

Преимущество метода APVD наиболее отчетливо проявляются при производстве заготовок для SM волокон. Как уже отмечалось выше, в заготовках для SM волокон на световедущую оболочку приходится менее 10 % от всего объема заготовки, и, следовательно, только эту часть заготовки необходимо изготавливать с помощью CVD процесса. Остальные же 90 % объема заготовки определяют только геометрические и механические характеристики волокна, и при изготовлении этой части заготовки можно использовать более производительные методы, например, плазменное оплавление кварцевого порошка как это делает Alcatel.

Установка для вытяжки волокна схематически изображена на рис. 4.32. Масштаб на рисунке сильно искажен, реально высота установки значительно превышает ширину её основания. Такие установки обычно размещают на нескольких этажах здания.

Волокно вытягивается из разогретого до 1900...2100° С нижнего конца заготовки в виде расплавленной стеклянной луковицы. Температура стабилизируется микроконтроллером, управляющим печью. Механизм ввода заготовки в печь обеспечивает юстировку заготовки по поперечным координатам и её подачу сверху вниз по мере вытяжки волокна.

При вытяжке волокна необходимо решить две основные задачи: добиться высокой однородности диаметра волокна (допуск на диаметр ± 1 мкм) и защитить поверхность кварцевой оболочки от появления на ней дефектов (царапин, пылинок и т.д.). В процессе вытяжки диаметр волокна измеряется с высокой точностью с помощью датчика диаметра (по картине дифракции лазерного излучения). По сигналам от датчика диаметра микроконтроллеры управляют приводом подачи заготовки, скоростью вытяжки и скоростью намотки волокна в приемно-намоточном устройстве.

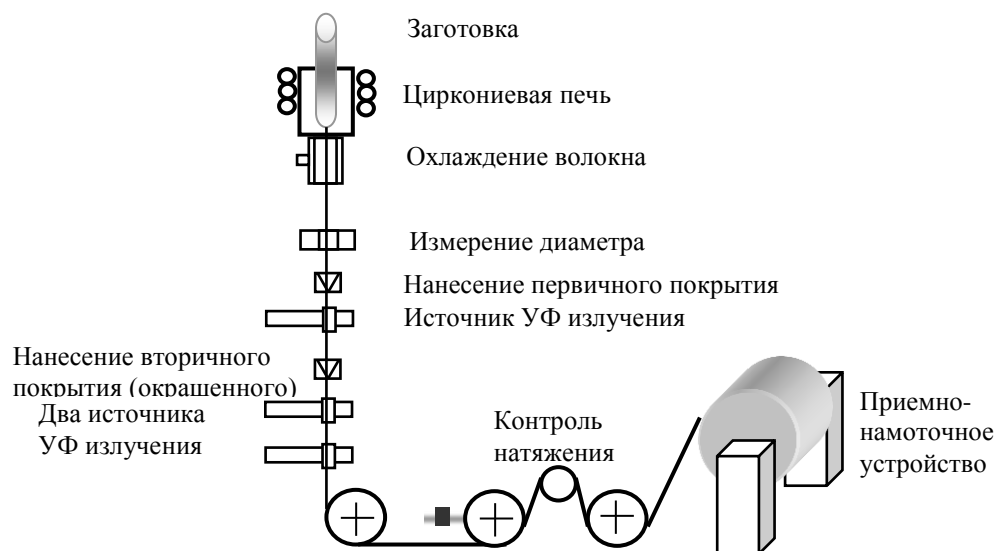


Рис. 4.32. Схема установки для вытяжки волокна.

Прочность кварцевой нити сильно зависит от состояния её поверхности. В отсутствие дефектов на поверхности кварцевой нити её прочность выше, чем у стальной проволоки такого же диаметра. Однако если на поверхности кварцевой нити имеется царапина, то при попадании на неё воды и наличия небольшого натяжения, такая нить может самопроизвольно разрушиться. Поэтому на кварцевую поверхность волокна нужно нанести защитное покрытие ещё до того, как она преysдет в соприкосновение с роликaми в приемно-намоточном устройстве.

Обычно на поверхность волокна наносится акрилатный лак, отверждаемый УФ излучением. Причем, чтобы уменьшить деформации волокна при его изгибах покрытие делают двухслойным: первый слой мягкий, а второй более жесткий. Скорость отверждения покрытия играет весьма существенную роль, так как именно ей ограничивается скорость вытяжки волокна (~ 1.2 км/мин).

Одной из отличительных особенностей технологии применяемой в компании Alcatel является то, что на волокно наносится уже окрашенное вторичное покрытие (технология ColorLock). Таким образом, отпадает необходимость окрашивать уже готовое волокно и, кроме того, такая окраска значительно более прочная и долговечная. Немаловажно также, что тест на прочность проходит уже окрашенное волокно, т.е. испытание проходит уже конечный продукт.

§ 13. Механическая прочность оптических волокон.

Теоретическая прочность волокна. Кварцевое стекло подчиняется закону Гука в широком интервале напряжений (почти до разрушения)

$$\sigma = E \varepsilon. \quad (4.7)$$

где σ - напряжение вызывающее относительное удлинение образца ε , а E - модуль Юнга (для кварцевого стекла $E = 72\,000 \text{ Н/мм}^2$).

Модуль Юнга определяет также и величину теоретической прочности кварцевого стекла σ_t , полученной на основании расчетов прочности разрыва атомных связей (Si – O)

$$\sigma_t \approx 18\,000 \text{ Н/мм}^2 \approx (1/4) E. \quad (4.8)$$

При $\sigma = \sigma_t = (1/4) E$, как видно из (1), относительное удлинение образца $\varepsilon_t = 25 \%$. Сила, которая вызывает 25 % удлинение волокна диаметром $D = 125 \text{ мкм}$, равна:

$$P_0 = (\pi/4) D^2 \sigma_t = (0.012 \text{ мм}^2) \sigma_t \approx 200 \text{ Н} \approx 20 \text{ кгс}. \quad (4.9)$$

Прочность коротких волокон. На практике короткие отрезки волокон (~ 1 м) разрушаются при величине растягивающего усилия примерно в 5...6 кгс ($\varepsilon \sim 7 \%$). Такое заметное уменьшение прочности волокна объясняется наличием различных поверхностных и объемных дефектов (например, микротрещин, пузырей, свилей, посторонних включений и т.д.).

Дефекты на поверхности волокна могут возникнуть уже в процессе его вытяжки при соприкосновении волокна с роликами или катушкой или частицами пыли в воздухе. Их появления удается в значительной степени избежать, нанося на волокно защитные полимерные покрытия и производя работы в обеспыленном помещении. Другой причиной появления дефектов являются инородные частицы и микротрещины в опорных трубках используемых для изготовления заготовок.

Сильное уменьшение прочности волокна из-за дефектов обусловлено низкой текучестью кварцевого стекла. В хрупком, не проявляющем пластичности при деформации материале, воздействие растягивающей нагрузки приводит к возникновению локальных напряжений в области дефекта, которые не могут релаксировать за счет пластической деформации. При чем эти напряжения могут оказаться в десятки или даже сотни раз выше, чем средние по объему.

Само по себе снижение прочности в коротких кусках волокон ещё не является проблемой. Как уже говорилось короткие куски волокон (~ 1 м) могут удлиняться, не разрушаясь, на значительную величину порядка 7 % и обладают прочностью около 5000 Н/мм^2 . По прочности волокно превосходит стальную нить такого же диаметра.

Прочность длинных волокон. На многокилометровых длинах волокон возможно появление отдельных дефектов, снижающих прочность до 500 Н/мм^2 и ниже. Для их обнаружения осуществляется перемотка волокна под нагрузкой. При этом волокно проходит через специальное приспособление (рис. 4.33), где в течение примерно 1 сек. создается требуемая нагрузка (~ 1000 Н/мм^2). Перемотка под нагрузкой позволяет получать волокна длиной несколько десятков километров, с прочностью порядка 1000 Н/мм^2 ($\varepsilon = 1.4 \%$), что вполне достаточно для практических применений.

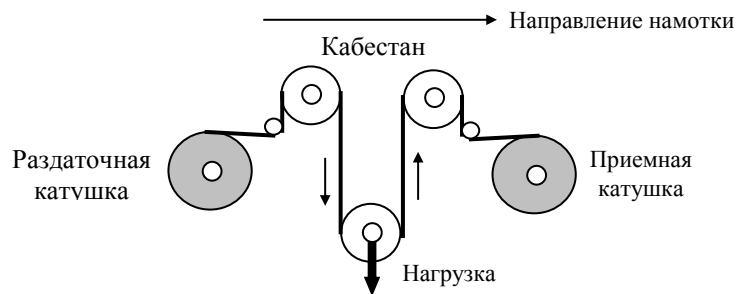


Рис. 4.33. Схема установки для контроля прочности (proof-test) волокна.

Статическая усталость. Согласно теории Гриффита образец стекла может находиться под нагрузкой бесконечно долго, если он не разрушился в момент нагружения. Однако многочисленные экспериментальные данные показывают, что при приложении к образцу нагрузки меньше критической, он через некоторое время разрушится. Время до разрушения зависит от величины приложенной нагрузки, размера дефектов и окружающих условий.

Это явление называемое статической усталостью стекла или замедленным разрушением, объясняется совместным действием напряжения и молекул веществ, попадающих в трещину из окружающей среды (в первую очередь молекулами воды) и активирующий разрыв химических связей в вершине трещины.

Инертная прочность. Для описания изменения прочности волокна под действием статической нагрузки вводится понятие инертной прочности образца S . Т.е. прочности того же образца при условии отсутствия роста в нем трещин. Качественный характер изменения инертной прочности волокна в процессе перемотки волокна под нагрузкой и при его эксплуатации изображен на рис. 4.34.

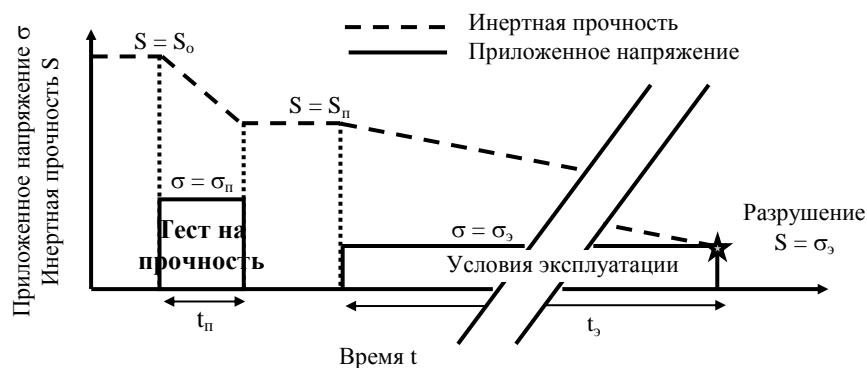


Рис. 4.34. Схема изменения инертной прочности волокна S под действием напряжения σ_n в процессе перемотки под нагрузкой и напряжения при эксплуатации волокна σ_3 .

Как видно из рис. 2. до перемотки инертная прочность S не зависит от времени. В процессе перемотки она снижается до S_n но остается выше напряжения σ_p , при котором производится перемотка волокна. В процессе эксплуатации при статическом напряжении σ_3 (меньшем, чем значение инертной прочности S_n в начале эксплуатации) инертная прочность постепенно уменьшается. Когда она сравнивается с значением статического напряжения σ_3 волокно разрушается.

Долговечность волокон. Как уже говорилось напряженное волокно при наличии паров воды обязательно рано или поздно разрушится (не зависимо от величины приложенного напряжения). От величины натяжения в волокне и характера в нем дефектов зависит только, разрушится ли волокно почти мгновенно или через многие десятки лет. Номинальный срок службы волокон порядка 25 лет и дать достоверный прогноз на такой большой срок достаточно сложно.

Дефектов в волокне много и они изменяются вдоль волокна случайным образом. Поэтому их влияние может быть учтено только статистически, и о сроке службы волокна можно что-либо утверждать только с определенной долей вероятности. Для практических расчетов срока службы волокна обычно используется выражение (Муцинага и др)

$$T(\varepsilon) = A (\varepsilon_n / \varepsilon)^n \quad (4.10)$$

$$A = \{ [1 - (1/L N_n) \ln(1 - F)]^{(n+1)/m} \} t_n$$

где F – вероятность разрушения волокна в процессе эксплуатации, L – длина волокна, N_n – число обрывов волокна на единицу длины при его перемотке, ε – относительное удлинение волокна в процессе эксплуатации, ε_n – относительное удлинение волокна в процессе перемотки, m – статистический параметр Вейбулла, n – параметр характеризующий скорость роста трещины (физический смысл параметров m и n мы обсудим позже), t_n – время действия нагрузки при перемотке.

Зависимость срока службы от его относительного удлинения волокна ε или приведена на рис. 4.35. При расчете использовались значения: $L = 100$ км, $N_n = 1/20$ км⁻¹, $F = 0.001$, $m = 40$, $n = 20$, $t_n = 1$ сек, $\varepsilon_n = 1$ %. Видно, что при уменьшении ε кривая идет вверх очень круто. Поэтому нет смысла говорить о конкретной величине срока службы волокна, а можно лишь определить величину удлинения волокна, при котором (в рамках рассматриваемой модели) волокно ещё не разрушается.

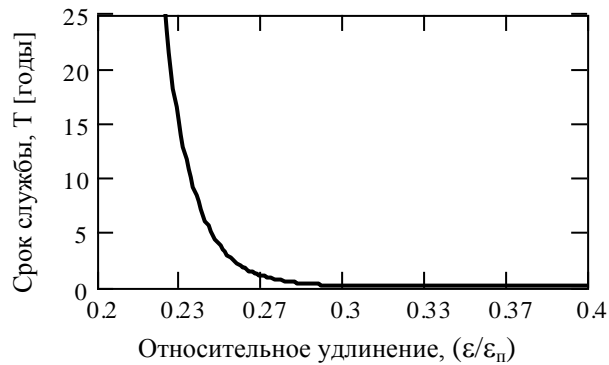


Рис. 4.35. Зависимость срока службы волокна от величины его относительного удлинения

Сильная зависимость срока службы от ε обусловлена большой величиной показателя степени n при ε в выражении (4). В Res. G 652. рекомендуется значение $n \approx 20$ и при этом отмечается, что значения параметров m и n для каждой конкретной партии волокна должны определяться экспериментально. Схема экспериментальной установки для нахождения параметров m и n изображена на рис. 4.36.

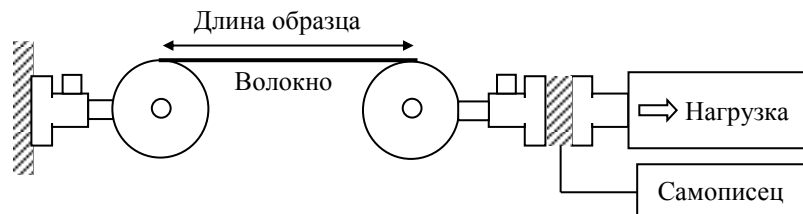


Рис. 4.36. Схема установки для измерения прочности волокна.

Параметр Вейбулла m . Величина параметра Вейбулла m находится по зависимости вероятности разрушения коротких отрезков волокна от величины приложенной нагрузки (или удлинения волокна). Результаты измерений вероятности разрушения для образцов волокна (из спецификации на SM волокно компании Hitachi) приведены на рис. 6а. Длина образцов 0.5 м, количество образцов 20, скорость удлинения 20 мм/мин. Как видно из рис 4.37 волокно имеет прочность около 5.8 кгс с очень узким разбросом значений. Сила в 5.8 кгс, как следует из (3), приводит к удлинению порядка 7.5 %. При скорости 20 мм/мин образец волокна длиной 0.5 м удлинится на 7.5 % (37.5 мм) примерно за 2 мин.



Рис. 4.37. Зависимость вероятности разрушения SM волокна компании Hitachi. от величины приложенной нагрузки

При расчетах интегральной вероятности разрушения волокна под действием нагрузки обычно используется эмпирическая формула Вейбулла

$$F = 1 - \exp[-(\varepsilon/\varepsilon_0)^m] = 1 - \exp[-(P/P_0)^m] \quad (4.11)$$

где P_0 и ε_0 – наиболее вероятные значения силы и величины относительного удлинения волокна при его разрушении.

Значения вероятности разрушения волокна рассчитанные с помощью формулы Вейбулла при $m = 40$ $P_0 = 5.8$ кгс приведены на рис 4.38.

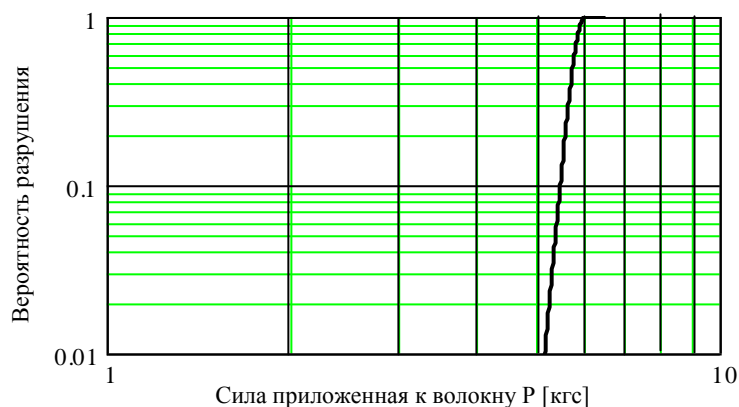


Рис. 4.38. Зависимость вероятности разрушения волокна. от величины приложенной нагрузки при $m = 40$ $P_0 = 5.8$ кгс.

Параметр Вейбулла m характеризует величину разброс значений силы P при которой происходит разрушение волокна относительно наиболее вероятного значения этой силы P_0 . Это лучше видно по распределению плотности вероятности, т.е. производной от интегральной вероятности: $f(\varepsilon/\varepsilon_0) = dF/d(P/P_0)$

$$f(P/P_0) = m (P/P_0)^{m-1} \exp[-(P/P_0)^m] \quad (4.12)$$

Графики плотность распределения вероятности Вейбулла для нескольких значений параметра m зависимости от величины приложенной силы приведены на рис. 4.39. Видно, что разброс значений разрывной прочности тем меньше чем больше величина параметра m .

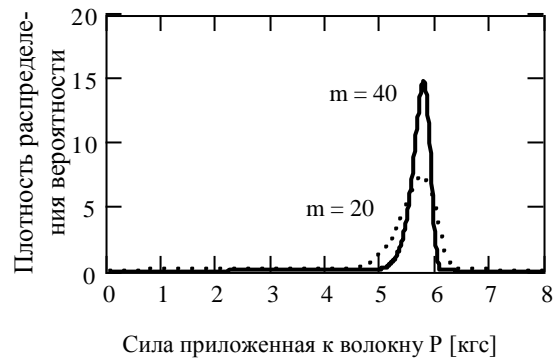


Рис. 4.39. Плотность распределения вероятности Вейбулла при $P_0 = 5.8$ кгс и $m = 40$ и 20 .

Для более точного определения величины параметра m напряжение разрыва (или удлинение волокна) откладывают в логарифмическом масштабе по оси абсцисс, а вероятность разрыва F по оси ординат в масштабе: $\text{Log} \ln[1/(1 - F)]$. Однако основная погрешность в определении срока службы волокна обусловлена ошибкой в определении величины параметра n . Погрешность возникает как из-за того, что напряжение разрыва слабо зависит от времени, так и из-за большой величины этого параметра (~ 20) входящего в показатель степени при ε в выражении (4).

Параметр n находится обычно по результатам динамических испытаний прочности волокна на растяжение с помощью промышленных установок для измерения прочности материалов на разрыв. Схема такой установки изображена на рис. 4 Экспериментальная зависимость напряжения разрыва волокна от скорости вытяжки (из спецификации на SM волокно компании Hitachi) приведена на рис. 4.40. Длина образцов 0.5 м, количество образцов 20, измеренное значение параметра $n = 20.3$.

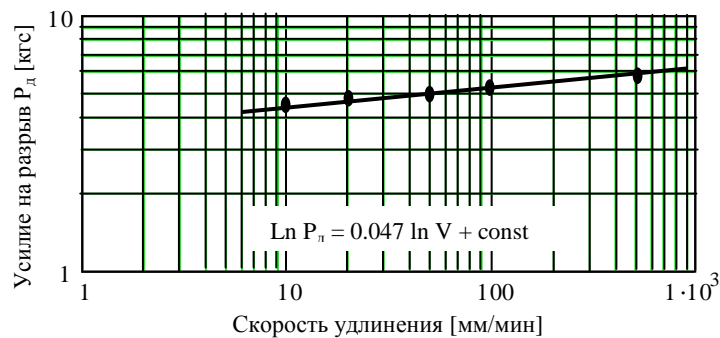


Рис. 4.40. Результаты динамических испытаний прочности SM волокна компании Hitachi.

При расчете используется выражение, связывающее динамическую прочность волокна P_d со скоростью вытяжки v :

$$V/V_0 = (P_d/P_{d,0})^{n+1} \quad (4.13)$$

Как видно из (7) разрывная прочность P_d зависит от скорости нагружения образца. Это явление, называемое динамической усталостью (по аналогии со статической усталостью), имеет простое объяснение. При постепенном увеличении нагрузки начинается рост исходных дефектов в образце, активированный молекулами воды или других веществ из окружающей среды. Причем, чем медленнее скорость нагружения, тем до большей величины вырастут дефекты, и тем меньше будет величина разрывной прочности. Прологарифмировав (7) получаем

$$\text{Ln} P_d = [1/(n+1)] \ln v + \text{const} \quad (4.14)$$

Таким образом, на графике $\text{Ln} P_d$ от $\ln v$ результаты динамических испытаний прочности волокна должны лежать на прямой с наклоном $1/(n+1)$.

Старение оптических волокон в реальных условиях. Оптические волокна разрабатываются и изготавливаются так, чтобы они могли прослужить срок порядка 40 лет – при условии, что прокладка и монтаж оптического кабеля произведена в строгом соответствии с рекомендуемыми процедурами. Однако для измерения долговечности волокон используются методы ускоренного старения, т.е. методы которые не могут с достаточно полной достоверностью воспроизвести условия долговременной эксплуатации волокон.

Чтобы получить более достоверную информацию о прочности оптических волокон, подвергшихся старению при их долговременной эксплуатации, сотрудники компании Corning провели исследование волокон извлеченных из оптического кабеля. Кабель был изготовлен за девять лет до этих испытаний и находился в эксплуатации на протяжении 5 лет. Подвергнутый испытаниям отрезок кабеля представлял собой излишек, образовавшийся вследствие реконфигурации сети. Подземный кабельный канал находился в 150 м от реки и кабель нередко затапливался водой.

Параллельно с волокнами, подвергшимися старению внутри кабеля («волокна из кабеля»), исследовались и образцы других волокон. Три образца волокна, были изготовлены примерно тогда же, когда волокна в исследуемом кабеле («волокна из архива»). Эти волокна были намотаны на транспортировочные катушки и хранились на складе где температура и влажность не регулировались. Результаты испытаний обоих типов волокон сравнивались с результатами испытаний вновь изготовленного волокна с таким же типом покрытия («новые волокна»).

Исследования старения волокон можно разделить на две типа: измерение прочности собственно стекловолокна и проверка наличия изменений в его покрытии. Первый тип измерений позволяет не только получить результаты прямых измерений прочности волокон подвергшихся старению в реальных условиях, но проверить также положение о том, что в отсутствие натяжений прочность волокна не уменьшается. Второй тип измерений важен потому, что деградация покрытия может привести к тому, что оно будет отслаиваться от оболочки волокна и техникам придется зачищать участки большей длины на концах кабеля.

Основные результаты:

- Средняя шероховатость поверхности кварцевой оболочки волокон (измерения с помощью атомного силового микроскопа): у «волокон из кабеля» - 0.26 нм, у «волокон из архива» - 0.29 нм, у «новых волокон» - 0.1...2 нм.
- Прочность на разрыв у всех типов волокон около 5.5 кгс
- Среднее значение силы снятия покрытия у всех типов волокон удовлетворяет требованиям Bellcore (0.5...3 кгс/м)
- Температура стеклования покрытия (~ 5 °C) после старения не изменилась

Основные выводы:

- Долговременная эксплуатация волокон в реальных условиях не привела к ухудшению их прочностных характеристик
- Старение волокон при отсутствии натяжения не уменьшает их прочности.

Литература

1. Маркузе Д. Оптические волноводы. М.: Мир. 1974. 576 с.
2. Унгер Х.-Г. Планарные и волоконные оптические волноводы. М.: Мир. 1977. 656 с.
3. Волоконно-оптическая связь. Приборы, схемы и системы: Под ред. М. Дж. Хауэса и Д. В. Моргана. М.: «Радио и связь», 1982. 270 с.
4. Козане А., Флере Ж., Мэтр Г., Руссо М. Оптика и связь. Оптическая передача и обработка информации. М.: Мир. 1984. 502 с.
5. Agrawal G.P. Fiber-Optic Communication Systems. John Wiley, New York, 1992. 541 с.
6. Волоконно-оптические системы передачи. Под ред. В.И. Гомзина. М.: «Радио и связь». 1992. 416 с.
7. Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика: Пер. с англ. / Под ред. П.В.Мамышева. М.: Мир, 1996. 324 с.
8. Семенов С.Л. Физические процессы, определяющие прочность и долговечность волоконных световодов. Канд. Дисс. ИОФАН, 1997.
9. Иванов А.Б. Волоконная оптика. Компоненты, системы передачи, измерения. Изд. Syrus. Systems, М.: 1999, 672 с.
10. Briks T.A., Mogilevtsev D., Knight J.C., Russel P., "Dispersion Compensation Using Single-Material Fibers," IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 11, № 6, pp. 674-676, 1999.
11. Убайдуллаев Р.Р. Волоконно-оптические сети. Эко-Трендз, М.: 2000. 267 с.
12. Волоконно-оптическая техника: история, достижения, перспективы. / Сб. статей под ред. Дмитриева С.А., Слепова Н.Н. М.: Изд. "Connect", 2000. 367 с.
13. Tsujikawa K., Tajima K., Ohashi M., "Rayleigh Scattering Reduction Method for Silica-Based Optical Fiber," J. Lightwave. Technol., Vol. 18, № 11, pp. 1528-1531, 2000.
14. Мальке Г., Гёссинг П. Волоконно-оптические кабели. Основы. Проектирования кабелей. Планирование систем. Corning Cable Systems. 2001. 351 с.
15. Жирар А. Руководство по технологии и тестированию систем WDM. / Пер. с англ. Под ред. А.М. Бортникова., У.У. Убайдуллаева, А.В. Шмалько./ М.: EXFO. 2001. 194 с.

16. Lee J., Song H., Paek U., Seo Y., "Design and Fabrication of a Nonzero-Dispersion Fiber with a Maximally Flat Dispersion spectrum," IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 13, № 4, pp. 317-319, 2001.
17. Mitra P.P., Stark J. B., "Nonlinear Limits to the Information Capacity of Optical Fiber Communications," Nature, Vol., 411, 28 June, pp. 1027-1030, 2001.
18. Optical Fiber Telecommunications, Vol. IVA,B, ed. By I.P. Kaminow and Li Tingye, Academic Press, 2002. 876 p., 1022 p.