

Редакционно-издательский отдел
Санкт-Петербургского государственного
университета информационных
технологий, механики и оптики
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

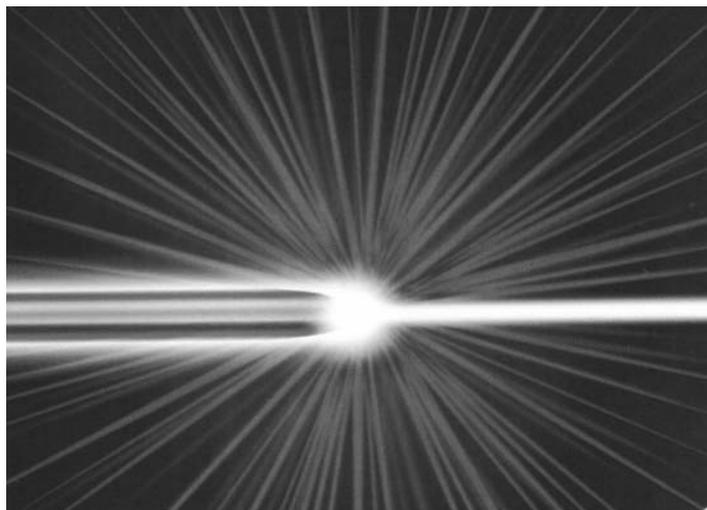


ПОБЕДИТЕЛЬ КОНКУРСА ИННОВАЦИОННЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ ВУЗОВ

Никоноров Н.В., Сидоров А. И.

**МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ
ВОЛОКОННОЙ ОПТИКИ:
специальные оптические волокна**

Учебное пособие



Санкт-Петербург

2009

Николай Валентинович Никоноров
Александр Иванович Сидоров

**МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ОПТИКИ:
специальные оптические волокна**

Учебно-методическое пособие

В авторской редакции

Компьютерная верстка
Заведующая РИО

А.В. Клементьева
Н.Ф. Гусарова

Редакционно-издательский отдел СПб ГУИТМО
Лицензия ИД №00408 от 05.11.99. Отпечатано на ризографе. Тираж 100
экз. Заказ №.

Подписано в печать

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ**



ПОБЕДИТЕЛЬ КОНКУРСА ИННОВАЦИОННЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ ВУЗОВ

Никоноров Н.В., Сидоров А. И.

**МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ
ВОЛОКОННОЙ ОПТИКИ:
специальные оптические волокна**

Учебное пособие

Санкт-Петербург

2009

Н.В. Никоноров, А.И. Сидоров, «Материалы и технологии волоконной оптики: специальные оптические волокна». Учебное пособие, курс лекций. СПб: СПбГУ ИТМО, 2009 г. - 130 стр.

Учебное пособие является продолжением курса лекций «Материалы и технологии волоконной оптики: оптическое волокно для систем передачи информации». В пособии описаны оптические волокна для специальных приложений, их характеристики, области применений, а также материалы и технологии их изготовления. Рассмотрены активированные волокна для оптических усилителей и лазеров, фоточувствительные оптические волокна и фотоиндуцированные брэгговские решетки на них для фильтров, спектральных мультиплексоров и компенсаторов дисперсии, анизотропные оптические волокна для датчиков, фотоннокристаллические волокна для широкого круга приложений. Учебное пособие предназначено для магистров, обучающихся по направлению 200600 «Фотоника и оптоинформатика» по магистерской программе «Оптические материалы фотоники и оптоинформатики» при изучении дисциплин «Волноводная фотоника», «Материалы и технологии волоконной и интегральной оптики», а также обучающихся по направлению 200200 «Оптехника» при изучении дисциплины «Материалы лазерной оптоэлектроники».

Рекомендовано УМО по образованию в области приборостроения, и оптотехники в качестве учебного пособия для студентов и магистров высших учебных заведений, обучающихся по направлениям подготовки 200600 - «Фотоника и оптоинформатика» и 200200 – «Оптехника».



В 2007 году СПбГУ ИТМО стал победителем конкурса инновационных образовательных программ вузов России на 2007–2008 годы. Реализация инновационной образовательной программы «Инновационная система подготовки специалистов нового поколения в области информационных и оптических технологий» позволит выйти на качественно новый уровень подготовки выпускников и удовлетворить возрастающий спрос на специалистов в информационной, оптической и других высокотехнологичных отраслях экономики.

© Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, 2009.

© Н.В. Никоноров, А. И. Сидоров, 2009.

- 2005 г.** Кафедра ОМиО переименована в кафедру оптоинформационных технологий и материалов (ОТиМ).
- 2006 г.** Кафедра ОТиМ – лидер в России по подготовке специалистов по оптическому материаловедению в области фотоники и оптоинформатики. Кафедра ведет совместные научные исследования с зарубежными компаниями Corning, Samsung, PPG.
- 2007 г.** Первый выпуск бакалавров по направлению «Фотоника и оптоинформатика». Кафедра ОТиМ - участник выполнения инновационной образовательной программы в СПбГУ ИТМО «Инновационная система подготовки специалистов нового поколения в области информационных и оптических технологий», реализуемой в рамках Приоритетных Национальных Проектов «Образование».

В 2007 году СПбГУ ИТМО стал победителем конкурса инновационных образовательных программ вузов России на 2007–2008 годы. Реализация инновационной образовательной программы «Инновационная система подготовки специалистов нового поколения в области информационных и оптических технологий» позволит выйти на качественно новый уровень подготовки выпускников и удовлетворить возрастающий спрос на специалистов в информационной, оптической и других высокотехнологичных отраслях экономики.

КАФЕДРА ОПТОИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И МАТЕРИАЛОВ

- 1994 г.** Организована базовая кафедра СПбГУ ИТМО при Государственном оптическом институте (ГОИ) им. С.И.Вавилова – кафедра оптического материаловедения. Образование кафедры явилось логичным развитием тесных связей, которые в течение многих лет существовали между ГОИ и ИТМО. В частности, для преподавания в ИТМО широко привлекались ведущие сотрудники ГОИ, а ИТМО был постоянным источником, из которого ГОИ черпал новые молодые кадры. Кафедра начала подготовку специалистов по образовательному направлению «Оптотехника», специальность «Оптические технологии и материалы».
- 1999 г.** Реорганизация кафедры. На кафедре созданы три направления: оптическое материаловедение, информационная оптотехника, физическая оптика и спектроскопия. Кафедра переименована в кафедру оптического материаловедения и оптики (ОМиО).
- 2002 г.** Кафедра ОМиО вошла в состав нового факультета СПбГУ ИТМО - фотоники и оптоинформатики.
- 2003 г.** При кафедре создана учебно-исследовательская лаборатория материалов и технологий фотоники.
- 2004 г.** Кафедра явилась одним из инициаторов и организаторов создания нового образовательного направления подготовки бакалавров и магистров – «Фотоника и оптоинформатика». Кафедра начала подготовку бакалавров и магистров по направлению - 200600 «Фотоника и оптоинформатика»..

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. Волоконная оптика - основа информационных технологий XXI века...	7
2. Особенности оптических систем связи	8
2.1 Физические особенности.....	8
2.2 Технические особенности	9
2.3. Недостатки волоконных линий связи	10
3. История развития оптического волокна.....	10
3.1. Основные даты в истории развития волоконно-оптических систем передачи:	11
3.2. Эволюция оптического волокна	15
3.3. Волоконно-оптические системы передачи на пороге третьего тысячелетия.....	19
ГЛАВА 1. ОСНОВЫ ОПТИКИ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛНОВОДА	22
1.1. Оптическое волокно. Общие положения	22
1.1.1. Лучи в оптических волокнах.....	22
1.1.2. Моды оптических волноводов	26
1.1.3. Константа распространения и фазовая скорость	29
1.2. Характеристики оптического волокна.....	33
1.2.1. Оптические характеристики волокна.....	33
1.2.2. Геометрические характеристики	47
1.2.3. Механические характеристики	50
1.2.4. Прочие характеристики	54
1.3. Сравнительный анализ характеристик оптического волокна	54
1.3.1. Сравнение оптических волокон по величине широкополосности	55
1.3.2. Сравнение оптических волокон по величине дисперсии.....	56
1.3.3. Сравнение оптических волокон по затуханию	60
ГЛАВА 2. ТИПЫ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН.....	61
2.1. Общая классификация оптических волокон	61
2.2. Классификация регулярных оптических волокон.....	67
2.3. Сравнение многомодовых и одномодовых волокон	69
2.4. Многомодовое градиентное волокно.....	72
2.5. Основные типы одномодовых волокон	74
2.5.1. Ступенчатое одномодовое волокно.....	74
2.5.2. Одномодовое волокно со смещенной дисперсией	74
2.5.3. Одномодовое волокно с ненулевой смещенной дисперсией.....	75
2.5.4. Работа одномодового оптического волокна с эрбиевым оптическим усилителем.....	75
2.5.5. Эволюция одномодовых волокон.....	75
2.5.6. Требования к волокну в высокоскоростных магистралях	80
ГЛАВА 3. МАТЕРИАЛЫ ВОЛОКОННОЙ ОПТИКИ.....	85
3.1. Общая классификация материалов для волоконной оптики.....	85

3.2. Неорганические стекла для изготовления оптических волокон	86
3.2.1. Кварцевое стекло и его свойства	86
3.2.2. Оксидные стекла для оптических волокон видимого и ближнего ИК диапазона	88
3.2.3. Бескислородные стекла для оптических волокон среднего и дальнего ИК диапазона	92
3.3. Полимеры для волоконной оптики	95
3.3.1. История полимерных оптических волокон	96
3.3.2. Общая характеристика полимерных оптических волокон	98
3.3.3. Оптические свойства полимеров	99
3.3.4. Влияние температуры на характеристики полимеров для оптических волокон	102
3.3.5. Материалы, применяемые для изготовления полимерных оптических волокон	103
3.3.6. Перспективы практического применения ПОВ	108
ГЛАВА 4. ТЕХНОЛОГИИ ВЫТЯЖКИ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА	111
4.1. Общие представления о технологиях производства оптического волокна	111
4.1.1. Производство заготовок для оптических волокон	111
4.1.2. Вытяжка оптического волокна и изготовление кабеля	112
4.2. Технологии производства заготовок-преформ для оптического волокна	113
4.2.1. Метод стержня и трубки	113
4.2.2. Метод модифицированного химического парофазного осаждения - MCVD	114
4.2.3. Метод внешнего парофазного осаждения – OVD	120
4.2.4. Метод осевого парофазного осаждения – VAD	121
4.2.5. Технологии наращивания заготовок	123
4.3. Технологии вытяжки волокна	125
4.3.1. Вытяжка оптического волокна из заготовок-преформ	125
4.3.2. Метод двойного тигля	126
ЛИТЕРАТУРА	128

22. Ларин Ю.Т, Нестерко В.А. Полимерные оптические волокна // портал Радиоэлектроника и Телекоммуникации. www.informost.ru.
23. Ночивелли А. Полимерные волокна – универсальный оптический доступ // Lightwave Russian Edition, 2006, № 3, с.4.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дианов Е.М. На пороге Тераэры // Квантовая электроника, 2000, т.30, с.659
2. ГОСТ Р МЭК 793-1-93. Волокна оптические. Общие технические требования // М., Издательство стандартов, 1994.
3. ITU-T Recommendation G.655. Characteristics of a non zero dispersion-shifted single-mode optical fibre cable // Geneva, 1996.
4. ITU-T Recommendation G.650. Definition and test methods for the relevant parameters of single-mode fibres // Geneva, 1993.
5. ITU-T Recommendation G.652. Characteristics of a single-mode optical fibre cable // Geneva, 1993.
6. ITU-T Recommendation G.653. Characteristics of a dispersion-shifted single-mode optical fibre cable // Geneva, 1996.
7. ITU-T Recommendation G.654. Characteristics of a cut-off shifted single-mode optical fibre cable // Geneva, 1997.
8. G.P.Agrawal. Fiber-optic communication systems. 2nd ed. // John Wiley&Sons, Inc., 1997.
9. Л.С.Корниенко, О.Е.Наний. Физика лазеров. Ч.1 // М., Издательство МГУ, 1996.
10. Р.Р.Убайдуллаев. Волоконно-оптические сети // М., Экотрендз, 1998.
11. J. Crisp. Introduction to Fiber Optics // MPG Books Ltd, Bodmin, Cornwall, 1999.
12. G.Mahlke, P.Gossing. Fiber Optic cables: fundamentals, cable engineering, systems planning, 3 ed. // MCD Verlag, 1997.
13. С.Г.Акопов, Д.Шарле. Главный компонент преодолевает барьеры. Мир связи // Connetct, 1998, №5, с.98-101.
14. Патент Японии 2964702 18.10.1999. Пластиковое оптическое волокно.
15. Патент Японии 2940645 25.08.1999. Термостойкое пластиковое оптическое волокно.
16. Патент Японии 2945108 06.09.1999. Способ изготовления пластикового оптического волокна.
17. Патент Японии 2893046 17.05.1999. Способ изготовления полимерного материала с распределенным показателем преломления.
18. Патент РФ 2018890 30.08.1994. Полимерное оптическое волокно.
19. Sato Masataka, Ishigure Takaaki, Koike Yasuhiro. Thermally stable high-bandwidth graded-index polymer optical fiber // J. Lightwave Technol., 2000, vol.18, № 7, p.952-958.
20. Matsuoka T., Ito T., Kaino T. First plastic optical fibre transmission experiment using 520 nm LEDs with intensity modulation/direct detection // Electron. Lett., 2000, vol.36, № 22, p.1836-1837.
21. Айноу Тед. Вездесущий пластик // Сети и системы связи, 2001, № 1, с.42-45.

ВВЕДЕНИЕ

Учебное пособие является продолжением курса лекций «Материалы и технологии волоконной оптики: оптическое волокно для систем передачи информации». В пособии описаны оптические волокна для специальных приложений, их характеристики, области применений, а также материалы и технологии их изготовления. Рассмотрены активированные волокна для оптических усилителей и лазеров, фоточувствительные оптические волокна и фотоиндуцированные брэгговские решетки на них для фильтров, спектральных мультиплексоров и компенсаторов дисперсии, анизотропные оптические волокна для датчиков, фотоннокристаллические (микроструктурированные) волокна для широкого круга приложений. Учебное пособие предназначено для магистров, обучающихся по направлению 200600 «Фотоника и оптоинформатика» по магистерской программе «Оптические материалы фотоники и оптоинформатики» при изучении дисциплин «Волноводная фотоника», «Материалы и технологии волоконной и интегральной оптики», а также обучающихся по направлению 200200 «Оптехника» при изучении дисциплины «Материалы лазерной оптоэлектроники».

Целью учебного пособия является:

Сформировать у студентов знания, умения и навыки в области материалов и технологий оптических волокон, предназначенных для специальных приложений включая: активированные волокна для оптических усилителей и лазеров, фоточувствительные оптические волокна и брэгговские решетки на них для спектральных фильтров и мультиплексоров, а также анизотропные и фотоннокристаллические оптические волокна с особыми характеристиками, с целью последующего использования полученных компетенций при разработке, производстве и использовании материалов и технологий для приборов и устройств современной фотоники и оптоинформатики.

вытяжки оптических волокон из фторидных стекол (рис.4.3.2,б).

Таким образом, можно по главе 4 можно заключить следующее. Производство оптических волокон достаточно сложная операция. Различные технологии производства заготовок вносят в характеристики волокон те или иные значения. В ближайшие годы истекает срок патентов на производство оптического волокна различными методами и битва между производителями будет более открытой. Вероятно, тогда мы увидим реально, какой же метод предпочтительнее для отрасли? Смогут ли выжить старейший метод MCVD? Как будет видоизменен OVD? Будут ли рентабельны небольшие национальные заводы или агрессивная политика глобализации вычеркнет мелкие производства из списка поставщиков оптических волокон для кабельной промышленности?

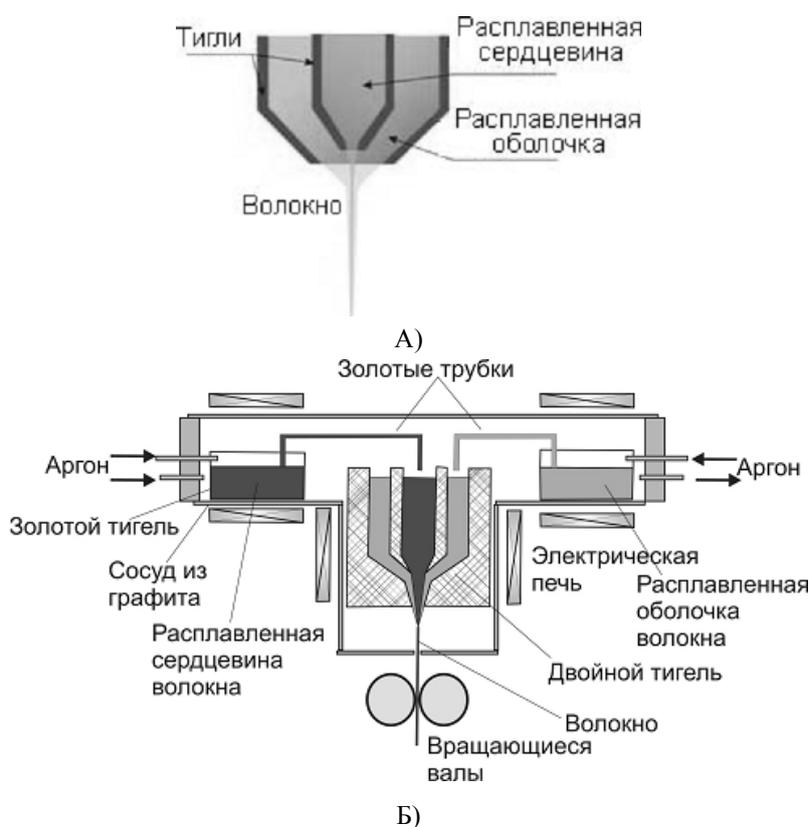


Рис.4.3.2. Метод двойного тигля:

а – общая схема;

б – получение фторидных волокон методом двойного тигля

наоборот. Обычно диаметр волокна составляет 125 ± 2 мкм, а скорость вытягивания 3-10 м/с. Волокно охлаждается окружающим его воздухом. У полученного вытягиванием волокна соотношение между геометрическими параметрами оболочки и сердцевины такое же, как у заготовки.

Затем волокно покрывается защитным слоем акрилата. Таким образом, волокно получает первичное покрытие. Это происходит в то время, когда волокно все еще находится в башне. Первичное покрытие состоит из двух слоев акрилата – более мягкого внутреннего слоя и более жесткого наружного. Некоторые производители (в основном из Японии) используют для тех же целей силикон.

Первичная оболочка из акрилата обеспечивает следующие преимущества:

- увеличивает прочность волокна
- защищает волокно от влаги (ОН-групп)
- предотвращает микроизгибы волокна
- облегчает работу с волокном

Сразу же после нанесения первичного покрытия оно отверждается под воздействием УФ-излучения. При второй проверке диаметра волокна проверяется диаметр первичного покрытия, а также его соосность с волокном. Волокно теперь получает свой окончательный диаметр. Обычно это 245 ± 10 мкм.

Далее волокно подвергается контрольным испытаниям. На этом этапе проверяется прочность на растяжение всего волокна, проверяется, нет ли в волокне каких-либо трещин или каких-либо других повреждений. Такая проверка называется контрольным испытанием, которое заключается в том, что волокно в течение примерно одной секунды подвергается воздействию определенного растягивающего усилия. Если в волокне имеются какие-либо трещины, то оно оборвется. После контрольного испытания прошедшее его волокно отправляется в лабораторию, где оно подвергается другим, очень серьезным испытаниям. Из одной заготовки обычно получают 50-150 км волокна.

4.3.2. Метод двойного тигля

Два тигля помещаются на печь. Внутренний тигель содержит стекло с более высоким показателем преломления, чем внешний тигель. После вытекания стекла из сопла тиглей его быстро остужают, получая волокно (рис.4.3.2,а). Т.е. в традиционном понимании это **беззаготовочный способ** изготовления волокон.

К достоинствам данного метода можно отнести тот факт, что волокна могут быть сколь угодно большой длины. Также могут быть использованы многокомпонентные стекла для сердцевины и оболочки. Однако методом двойного тигля невозможно получить оптические волокна с низкими потерями по сравнению с другими методами, описанными выше. Сегодня метод двойного тигля используется для

ВВЕДЕНИЕ

1. Волоконная оптика - основа информационных технологий XXI века

Уровень современной цивилизации определяется объемом передаваемой и перерабатываемой информации. XXI век станет веком всеобъемлющей информатизации общества. Это уже сейчас подтверждается бурным развитием информационных технологий, созданием глобальных сетей связи и телекоммуникаций, становлением и развитием всемирной компьютерной сети Internet, обусловившей взрывной рост спроса на объемы передаваемой информации. По имеющимся в литературе данным только за четыре последних года, включая 1999, трафик сети Internet увеличился в 30 раз, а потребности в полосе частот (или скорости передаваемой информации) возрастают еще быстрее. Аналогичные прогнозы в этом направлении существуют и на ближайшие годы.

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

Вот почему волоконно-оптические технологии, приборы и системы связи являются ключевым направлением развития информационных систем, определяющим в современных условиях (и в ближайшем будущем) уровень развития страны и степень ее безопасности.

Прогресс, достигнутый в производстве оптических волокон с малыми потерями, уже сейчас позволяет передавать информацию со скоростями в сотни Гбит/с на расстояния в сотни километров без регенерации сигнала. Относительная дешевизна массового производства волоконно-оптического кабеля приводит к возрастающему вытеснению спутниковой связи волоконно-оптической даже на рынке межконтинентальных телекоммуникаций. Серьезными аргументами в пользу волоконно-оптических систем являются также высокая помехозащищенность и электромагнитная совместимость каналов связи, скрытность передаваемой по ним информации.

Помимо систем связи волоконная оптика находит широкое применение в измерительных приборах и системах. Очень перспективны в настоящее время волоконно-оптические датчики, которые, не уступая традиционным датчикам в чувствительности, имеют ряд существенных преимуществ, таких как высокая устойчивость к воздействию внешних факторов, помехозащищенность, малый вес и габариты, экономичность. Только в

США разработкой и выпуском волоконно-оптических датчиков занимается более 100 компаний.

В последние годы созданы и продолжают активно разрабатываться волоконно-оптические лазеры и усилители света, которые открывают возможности создания уникальных, полностью оптических информационных систем, включающих в себя оптический компьютер с огромным быстродействием, волоконно-оптические сенсоры. Компьютер подключается к внешним волоконным линиям связи также с помощью оптических волокон. Фактически речь идет о переходе от электронной обработки информации к световой. По масштабам эта технологическая революция будет сравнима с переходом от письма к радио и телевидению

2. Особенности оптических систем связи

Волоконно-оптические линии связи - это вид связи, при котором информация передается по оптическим диэлектрическим волноводам, известным под названием "оптическое волокно". Оптическое волокно в настоящее время считается самой совершенной физической средой для передачи информации, а также самой перспективной средой для передачи больших потоков информации на значительные расстояния. Основания так считать вытекают из ряда особенностей, присущих оптическим волноводам.

2.1 Физические особенности

1. Широкополосность оптических сигналов, обусловленная чрезвычайно высокой частотой несущей ($F_0=10^{14}$ Гц). Это означает, что по оптической линии связи можно передавать информацию со скоростью порядка 10^{12} бит/с или Терабит/с. Говоря другими словами, по одному волокну можно передать одновременно 10 миллионов телефонных разговоров и миллион видеосигналов. Скорость передачи данных может быть увеличена за счет передачи информации сразу в двух направлениях, так как световые волны могут распространяться в одном волокне независимо друг от друга. Кроме того, в оптическом волокне могут распространяться световые сигналы двух разных поляризаций, что позволяет удвоить пропускную способность оптического канала связи. На сегодняшний день предел по плотности передаваемой информации по оптическому волокну не достигнут.
2. Очень малое (по сравнению с другими средами) затухание светового сигнала в волокне. Лучшие образцы российского волокна имеют затухание 0.22 дБ/км на длине волны 1.55 мкм, что позволяет строить линии связи длиной до 100 км без регенерации сигналов. Для сравнения, лучшее волокно Sumitomo на длине волны 1.55 мкм

позволит производить крупные заготовки в большом объеме. Большинство из них, вероятно, выберет способ с использованием кварцевого порошка, для которого уже имеется оборудование и разработана технология.

4.3. Технологии вытяжки волокна

4.3.1. Вытяжка оптического волокна из заготовок-преформ

Готовая стержневая заготовка-преформа (независимо от способа ее изготовления, см. раздел 4.2) вытягивается в волокно. Это происходит в специальной вытяжной башне высотой 12 м и более (рис.4.3.1). Процесс вытягивания начинается наверху башни, где стержневая заготовка-преформа зажимается в центрирующем патроне. Нижний конец заготовки подается в электрическую печь, где он нагревается до температуры чуть больше 2000°C. Графитовый нагревательный элемент защищен средой из инертного газа аргона. Заготовка медленно опускается в печь, а в это же самое время из нее вниз выходит вытягиваемое из заготовки волокно. Скорость вытягивания и скорость подачи автоматически контролируются с помощью компьютера.



Рис.4.3.1. Установка вытяжки оптического волокна из преформы

Диаметр волокна проверяется находящимся сразу же под печью измерительным прибором с лазерным управлением. Полученные значения передаются в систему контроля, которая и регулирует скорость вытяжной шпильевой лебедки, находящейся в нижней части башни. Увеличение диаметра волокна приводит к увеличению скорости вытягивания и

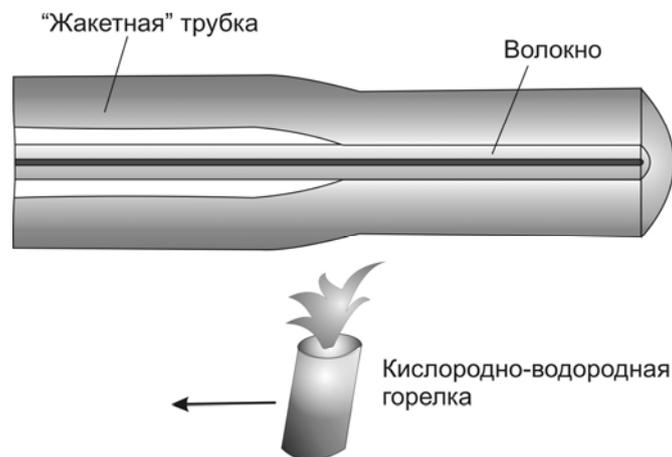


Рис.4.2.7. Технология жакетирования

Однако надеваемые наружные жакетные трубки весьма дороги. Две компании – Alcatel и Lucent – изготавливающие заготовки сердечников в основном способом MCVD, недавно организовали – в качестве альтернативы жакетированию – серийное производство получения наложенной оболочки волокна путем плазменного распыления кварцевого порошка и с помощью процесса золь-геля. Практически все производители сердечников волокна, пользующиеся процессами OVD и VAD, получают оболочку волокна с помощью кварцевого порошка. Сегодня процесс изготовления заготовок-преформ начал становиться двухэтапным (с жакетированием заготовки) после того, как в серийном производстве стал использоваться VAD. Но в начале 80-х годов компания Corning стала использовать в серийном производстве альтернативу жакетированию заготовки – получение оболочки с помощью кварцевого порошка. Поскольку все изготовители, прибегавшие к процессу VAD, перешли на кварцевый порошок, в течение 80-х годов происходило уменьшение доли волокна, произведенного с помощью жакетирования. В 90-х годах, вследствие введения компанией Alcatel плазменного распыления и компанией Lucent - золь-гелевого способа, использование технологии жакетирования сердечника еще более сократилось. Одной из причин этого является стоимость наружной жакетной трубки. Экономические анализы показывают, что для того чтобы способ жакетирования стал конкурентоспособным по отношению к другим способам получения оболочки, цена трубки должна упасть до уровня около 100 долларов за килограмм. Другой серьезной причиной являются трудности с изготовлением трубок для больших заготовок. Несколько изготовителей, использующих способ жакетирования, заявили, что они готовы выпускать заготовки большего размера, если только будут доступны соответствующие им по размеру трубки. По мере снижения цен на волокно вопрос о заготовках большого размера будет становиться все более важным и существенным для решения проблемы выживания. Это означает, что, подобно компаниям Alcatel и Lucent в начале 2000-х годов и другие изготовители одномодового волокна откажутся от способа жакетирования и выберут какую-нибудь экономную технологию, которая

3. имеет затухание 0.154 дБ/км. В оптических лабораториях США разрабатываются еще более "прозрачные", так называемые фторцирконатные волокна с теоретическим пределом порядка 0,02 дБ/км на длине волны 2.5 мкм. Лабораторные исследования показали, что на основе таких волокон могут быть созданы линии связи с регенерационными участками через 4600 км при скорости передачи порядка 1 Гбит/с.

2.2 Технические особенности

1. Волокно изготовлено из кварца, основу которого составляет двуокись кремния, широко распространенного, а потому недорогого материала, в отличие от меди.
2. Оптические волокна имеют диаметр около 100 мкм, то есть очень компактны и легки, что делает их перспективными для использования в авиации, приборостроении, в кабельной технике.
3. Стекланные волокна - не металл, при строительстве систем связи автоматически достигается гальваническая развязка сегментов. Применяя особо прочный пластик, на кабельных заводах изготавливают самонесущие подвесные кабели, не содержащие металла и тем самым безопасные в электрическом отношении. Такие кабели можно монтировать на мачтах существующих линий электропередач, как отдельно, так и встроенные в фазовый провод, экономя значительные средства на прокладку кабеля через реки и другие преграды.
4. Системы связи на основе оптических волокон устойчивы к электромагнитным помехам, а передаваемая по световодам информация защищена от несанкционированного доступа. Волоконно-оптические линии связи нельзя подслушать неразрушающим способом. Всякие воздействия на волокно могут быть зарегистрированы методом мониторинга (непрерывного контроля) целостности линии. Теоретически существуют способы обойти защиту путем мониторинга, но затраты на реализацию этих способов будут столь велики, что превзойдут стоимость перехваченной информации.

Существует способ скрытой передачи информации по оптическим линиям связи. При скрытой передаче сигнал от источника излучения модулируется не по амплитуде, как в обычных системах, а по фазе. Затем сигнал смешивается с самим собой, задержанным на некоторое время, большее, чем время когерентности источника излучения.

При таком способе передачи информация не может быть перехвачена амплитудным приемником излучения, так как он регистрирует лишь сигнал постоянной интенсивности.

Для обнаружения перехватываемого сигнала понадобится перестраиваемый интерферометр Майкельсона специальной конструкции. Причем, видность интерференционной картины может быть ослаблена как $1:2N$, где N - количество сигналов, одновременно передаваемых по оптической системе связи. Можно распределить передаваемую информацию по множеству сигналов или передавать несколько шумовых сигналов, ухудшая этим условия перехвата информации. Потребуется значительный отбор мощности из волокна, чтобы несанкционированно принять оптический сигнал, а это вмешательство легко зарегистрировать системами мониторинга.

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

2.3. Недостатки волоконных линий связи

1. При создании линии связи требуются высоконадежные активные элементы, преобразующие электрические сигналы в свет и свет в электрические сигналы. Необходимы также оптические коннекторы (соединители) с малыми оптическими потерями и большим ресурсом на подключение-отключение. Точность изготовления таких элементов линии связи должна соответствовать длине волны излучения, то есть погрешности должны быть порядка доли микрона. Поэтому производство таких компонентов оптических линий связи очень дорогостоящее.
2. Другой недостаток заключается в том, что для монтажа оптических волокон требуется прецизионное, а потому дорогое, технологическое оборудование.
3. Как следствие, при аварии (обрыве) оптического кабеля затраты на восстановление выше, чем при работе с медными кабелями.

Преимущества от применения волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) настолько значительны, что, несмотря на перечисленные недостатки оптического волокна, эти линии связи все шире используются для передачи информации.

3. История развития оптического волокна

Волоконно-оптические системы передачи (ВОСП) за последние тридцать лет своего стремительного развития заняли ведущие позиции в телекоммуникационном мире. За эти годы ВОСП смогли приблизиться

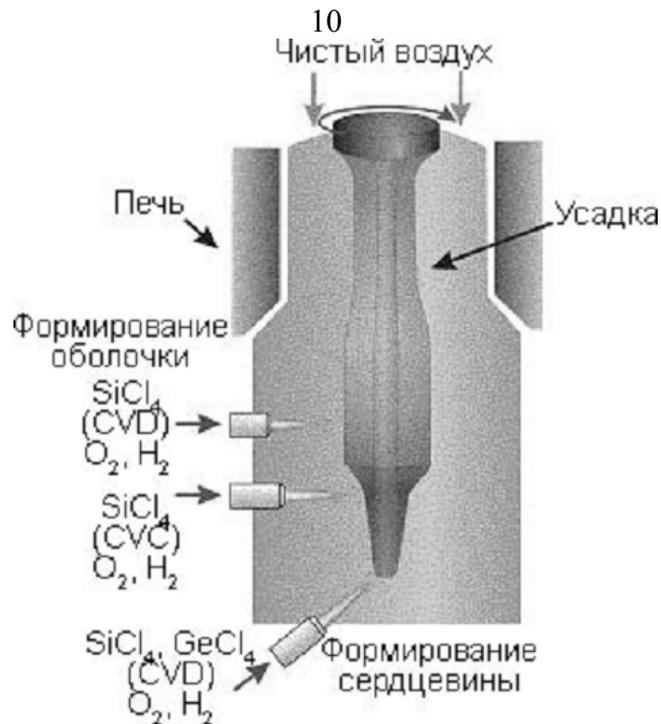


Рис.4.2.6. Изготовление заготовки для волокна (преформы) методом VAD

4.2.5. Технологии наращивания заготовок

Просто сказать, что волокно было изготовлено с помощью процесса MCVD или PCVD было бы недостаточно. При производстве волокон методом MCVD или PCVD, особенно одномодовых, крайне нерациональным является использование полноразмерной трубки – т.е. трубки, из которой производится полная заготовка для оптического волокна. Все процессы получения заготовок-преформ путем осаждения из газовой фазы являются сегодня двухэтапными.

На *первом этапе* производятся **сердечник** и **часть оболочки**,[□] необходимая для обеспечения оптических свойств изготавливаемого волокна. Назовем ее для простоты **заготовка сердечника**. Из заготовки сердечника[□] в зависимости от ее размера[□] может быть получено несколько стержней, на которые потом на *втором этапе* наращивается оболочка (**наложенная оболочка**). Затем полученная **заготовка-преформа** (т.е. **сердечник с частью оболочки + наложенная оболочка**) вытягивается в волокно. Различают несколько различных способов изготовления такой **наложенной оболочки**: жакетирование, золь-гель, плазма, кварцевый порошок.

Способ жакетирования (jacketing) представляет собой обжимание кремнеземной трубки вокруг заготовки сердечника (сердечника с частью оболочки); это самый популярный процесс для изготовления наложенной оболочки сердечников, полученных способами MCVD и PCVD (рис.4.2.7) Сегодня мировым лидером производства жакетных труб из синтетического кварца марки Suprasil F300 является немецкая компания Heraeus Quarzglas.

4.2.4.1. Описание процесса

Метод VAD аналогичен методу OVD в той степени, в которой осаждение является не внутренним, а наружным процессом, при котором образуется пористая заготовка, которая затем обезвоживается и спекается. Однако при использовании метода VAD кварцевый порошок осаждается в осевом направлении, а не в радиальном (как это имеет место в процессе OVD) (рис.4.2.6). Это обстоятельство затрудняет модификацию профиля показателя преломления, но облегчает получение более длинных заготовок. При изготовлении используются механизм осевого перемещения заготовки, реакционная камера, горелка, испаритель для сырья и блок управления. Заготовка медленно протягивается вверх, проходя при этом через используемое в данном процессе оборудование. Сырье $SiCl_4$, $GeCl_4$, $POCl_3$ вводится также, как и при использовании метода OVD: применяется кислородно-водородная газовая горелка, а очень мелкие частицы стекломассы, образовавшиеся в результате реакции гидролиза в пламени, осаждаются на торцевой поверхности уже осажденной заготовки, которая используется в качестве подложки для дальнейшего наращивания заготовки. Пористая заготовка движется в осевом направлении, наращивая свою массу в ходе этого движения. В кольцевой электрической печи сопротивления с графитовым нагревательным стержнем заготовка обезвоживается и превращается в прозрачный твердый стержень.

Важными отличительными чертами процесса является следующее:

- постоянное наращивание заготовки;
- точное регулирование расхода сырья;
- поддержание постоянной температуры пламени;
- поддержание постоянной температуры в зоне нагревания заготовки;
- поддержание постоянной скорости поворота заготовки;
- сохранение зоны наращивания заготовки в определенном месте.

Перемещение зоны наращивания заготовки в другое место приводит к изменениям профиля показателя преломления готовой заготовки. Скорость перемещения в осевом направлении (т.е. скорость наращивания заготовки) составляет примерно 40 - 60 мм/час.

Для того чтобы обеспечить осаждение, используются от одной до трех горелок. Изменяя число горелок и состав и пропорции сырья, можно обеспечить получение различных профилей показателя преломления. В ходе отверждения заготовка обезвоживается в среде газообразного хлора. Более толстую оболочку волокна можно получить путем дополнительного осаждения на поверхности спеченной стержневой заготовки. Это означает, что можно получать очень большие заготовки.

к терабитным скоростям передачи, впервые решив проблему дефицита пропускной способности каналов передачи информации, и способствовали вступлению человечества в информационную эру. Академик Дианов Е.М., основоположник волоконной оптики в СССР и России, директор центра волоконной оптики в институте общей физики РАН (рис.1), назвал XXI век – «тераэрой», т.е. эрой в которой будут достигнуты терабитные скорости передачи информации [1].

В настоящее время актуальной становится задача повышения эффективности систем передачи информации, в первую очередь за счет повышения загрузки магистральных ВОСП.



Рис.1. Академик Е.М. Дианов, основоположник волоконной оптики в СССР и России, директор Научного центра волоконной оптики в институте общей физики РАН

3.1. Основные даты в истории развития волоконно-оптических систем передачи:

- **XVII век:** Клауд Чапп построил первый оптический телеграф во Франции. Сигнальщики располагались на вышках, расположенных от Парижа до Лилля по цепочке длиной 230 км. Сообщения передавались из одного конца в другой за 15 минут;

- **1870 г.:** Английский физик Джон Тиндалл продемонстрировал возможность управления светом на основе внутренних отражений. На собрании Королевского общества было показано, что свет, распространяющийся в струе очищенной воды, может огибать любой угол. Струю воды Тиндалл пропускал по желобу, изогнутому по параболической траектории. Когда свет направлялся по касательной к струе воды, аудитория могла наблюдать зигзагообразное распространение света внутри изогнутой части струи. Аналогичное зигзагообразное распространение света происходит и в оптическом волокне;

- **1880 г.:** Александр Белл запатентовал фотофон (рис.2), в котором направленный свет использовался для передачи голоса. В этом устройстве с помощью системы линз и зеркал свет направлялся на плоское зеркало,

закрепленное на рупоре. Под воздействием звука зеркало колебалось, что приводило к модуляции отраженного света. В приемном устройстве использовался детектор на основе селена, электрическое сопротивление которого меняется от интенсивности света. Модулированный голосом солнечный свет, падающий на образец селена, изменял силу тока, протекающего через контур приемного устройства, и воспроизводил голос. Данное устройство позволяло передавать речевой сигнал на расстояние более 200 м;

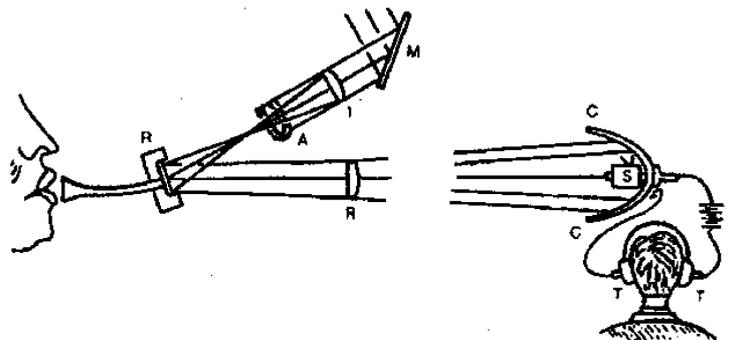


Рис.2. Фотофон Александра Белла

- **Начало XX века:** первые теоретические и экспериментальные исследования диэлектрических волноводов, в том числе гибких стеклянных стержней;

- **50-е годы XX века:** Брайен О'Бриен (Американская оптическая компания) и Нариндер Капани (Императорский научно-технический колледж в Лондоне) разработали оптические волокна для передачи изображения. Эти волокна нашли применение в световодах, используемых в медицине для визуального наблюдения внутренних органов человека. Доктор Капани был первым, кто разработал стеклянные волокна в стеклянной оболочке и ввел термин «волоконная оптика» (1956 г). В 1973 г. Капани основал компанию Captron, специализирующуюся в области волоконно-оптических разветвителей и коммутаторов.

- **начало 60 х годов:** разработка принципов и создание лазеров (Чарльз Таунс, Николай Басов, Александр Прохоров, Гордон Голд, Артур Шавлов). В 1960 г. Теодор Мэйман (Hughes Laboratories) создал первый в мире рубиновый лазер. В этом же году Таунс продемонстрировал работу гелий-неонового лазера. В 1962 г. лазерная генерация была получена на полупроводниковом кристалле. Именно такой тип лазера используется в волоконной оптике. Использование излучения лазера как носителя информации не было оставлено без внимания специалистами по коммуникации. Возможности лазерного излучения для передачи информации в 10000 превышают возможности радиочастотного излучения. Несмотря на это, лазерное излучение не вполне пригодно для передачи сигнала на открытом воздухе. На работу такого рода линии влияют туман, смог и дождь, равно как и состояние атмосферы. Таким

достаточно для образования и сердцевины□ и оболочки□, процесс останавливается□, и исходный стержень извлекается из заготовки. В качестве подложки – тонкого стержня используются графитовые стержни или трубки из оксида алюминия. Удаление с них пористой заготовки представляет определенные трудности. В связи с этим подложки получают также карбонизацией бумажных тонкостенных цилиндров (нагревом в инертной среде с их превращением в углеродистый материал), которые после осаждения пористого слоя выжигаются в токе кислорода.

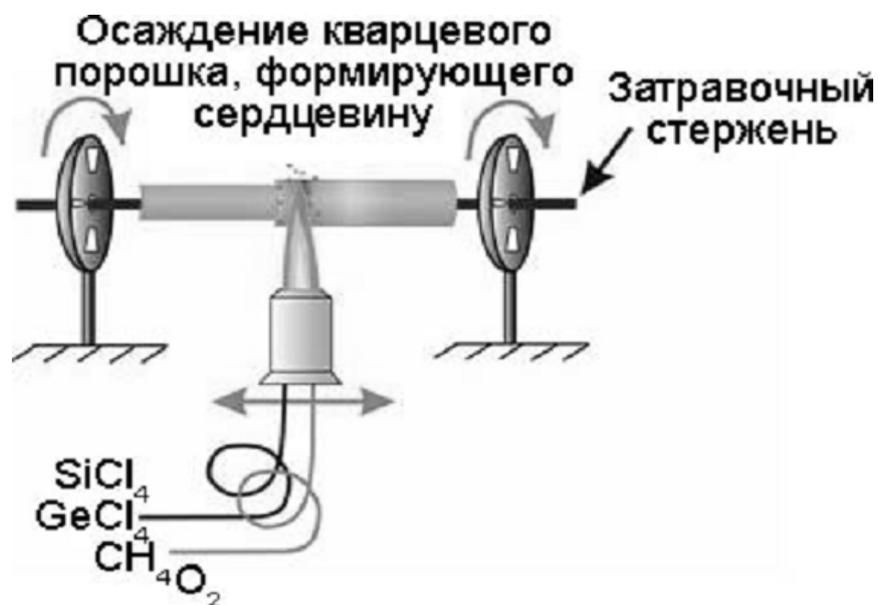


Рис.4.2.5. Изготовление заготовки для волокна (преформы) методом OVD

4.2.3.2. Процесс спекания

Прежде всего,□ пористая заготовка нагревается в среде газообразного хлора (при этом удаляется вода)□, а затем нагревается при высоких температурах 1400–1600°C,□ при которых частицы SiO_2 примесей спекаются в сплошной стеклянный стержень–заготовку (преформу) без пузырьков воздуха. Все это происходит в печи□ в контролируемых условиях. На этом этапе пористый исходный стержень обычно усаживается и плавится.

4.2.4. Метод осевого парофазного осаждения – VAD

Метод осевого парофазного осаждения (VAD) был разработан в Японии□ для того чтобы не нарушать патент компании Corning на метод OVD и наладить непрерывное получение заготовок для изготовления оптического волокна. Изобретателем метода считается группа японских ученых корпорации NTT во главе с Татсуо Изавой (Tatsuo Izawa), который в 2001 году за это открытие был удостоен знаменитой премии имени Тиндалля.

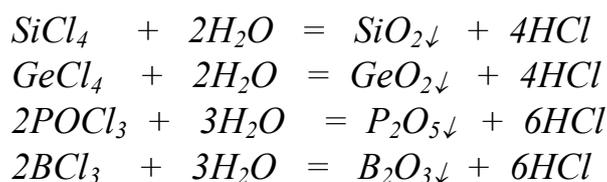
4.2.3. Метод внешнего парофазного осаждения – OVD

Вторым методом производства оптического волокна традиционно считают метод внешнего парофазного осаждения (Outside Vapour Deposition - OVD). Изобретателями данного метода являются группа ученых компании Corning - Роберт Маурер, Дональд Кек и Петер Шульц (Robert Maurer, Donald Keck and Peter Schultz), которые первые получили оптическое волокно с низкими потерями (16 дБ/км, 1970 г.). Поскольку химические аспекты этого метода в основном те же самые что и у предыдущего, описание будет более кратким. Метод OVD намного сложнее метода MCVD. Эта сложность, а также имеющаяся всесторонняя патентная защита практически означают, что применяется этот метод исключительно компанией Corning, которая его разработала и владеет патентами. Однако, общее количество волокна изготовленного этим методом на сегодняшний день вероятно не меньше а, может быть, и больше чем волокна изготовленного методом MCVD. Это объясняется тем, что при массовом производстве, метод OVD намного эффективнее, чем MCVD.

Процесс изготовления преформ для оптического волокна методом OVD также делится на два этапа: осаждение и спекание

4.2.3.1. Описание процесса

Методы OVD и AVD изготовления заготовок световодов основаны на **высокотемпературном гидролизе** сырьевых галогенидов в пламени горелки. Частицы оксидов образуются по следующим химическим реакциям:



На этапе 1 происходит осаждение порошкообразной двуокиси кремния – или с примесями или без них (см. описание процесса MCVD) – на тонком стержне (рис.4.2.5). Горячий поток частиц порошкообразной двуокиси кремния движется над поверхностью стержня, при этом часть частиц осаждается на стержне. А сам стержень в это время вращается и одновременно движется в осевом направлении, проходя через горелку. Так получается насыщенная влагой пористая цилиндрическая заготовка с сформированными слоями сердцевины и оболочки. Влага из неё удаляется обработкой в хлорсодержащей атмосфере при 1000°C. С увеличением температуры до 1500°C поры исчезают, заготовка становится прозрачной. Осажденные частицы оказываются в спекшемся состоянии. Когда произойдет осаждение такого количества стекла, которого будет

образом, первоначально лазер представлял собой коммуникационный источник, не имеющий подходящей среды передачи;

- **1966 г.:** К. Ч. Као и Дж.А. Хокхем (Standart Telecommunication Laboratories) сформулировали требования на систему передачи информации по стеклянным волокнам и показали возможность создания оптического стеклянного волокна с затуханием менее 20 дБ/км. Они пришли к выводу, что высокий уровень затухания, присущий первым волокнам (около 1000 дБ/км), связан с присутствующими в стекле примесями;

- **1970 г.:** Роберт Маурер и Дональд Кек (Corning Glass Work) получили оптическое волокно с потерями 16 дБ/км;

- **1972 г.** в лабораторных условиях получено оптическое волокно с потерями 4 дБ/км (Corning Glass Work);

- **середина 70-х годов:** Военные были первыми в деле внедрения волоконно-оптических линий связи. В 1973 г. военно-морские силы США впервые внедрили волоконно-оптическую линию на борту корабля Little Rock. В 1976 г.: военно-воздушные силы США заменили кабельную оснастку самолета А-7 на волоконно-оптическую. При этом кабельная система из 302 медных кабелей, имевшая суммарную протяженность 1260 м и весившая 40 кг, была заменена 12 волокнами общей длиной 76 м и весом 1.7 кг. В 1977 г. была запущена 2 км система со скоростью передачи информации 20 Мб/сек, связавшая наземную спутниковую станцию с центром управления;

- **1974 г.:** разработано градиентное многомодовое волокно;

- **1974 г.:** описан метод изготовления заготовок волокна – метод внутреннего осаждения из газовой фазы (MCVD);

- **1976 г.:** создана первая промышленная установка по производству волокна;

- **1976 г.:** открыто третье окно (1,55 мкм) в спектральном диапазоне работы ВОСП (компания NTT);

- **1976 г.:** стандартизованы размеры многомодового волокна;

- **1977 г.:** внедрена первая коммерческая телефонная система на волоконно-оптическом кабеле (США). Информация передавалась со скоростью 44.7 Мб/сек одновременно по 672 каналам;

- **1977 г.:** разработан метод наружного осаждения (OVD) для производства заготовок волокна (Corning);

- **1978 г.:** построен первый завод по производству волокна;

- **1978 г.:** тестирование ВОСП со скоростью передачи информации 32 Мбит/с, длина участка 53 км и рабочая длина волны 1,3 мкм;

- **1978 г.:** получено затухание в оптическом волокне 0,2 дБ/км (на рабочей длине волны 1,55 мкм);

- **1980 г.:** первая коммерческая ВОСП (между Бостоном и Ричмондом, США), три рабочих длины волны, градиентное многомодовое волокно, скорость передачи информации 45 Мбит/с;

- **1980 г.:** передача по волоконной линии видеосигнала с Зимней Олимпиады в Лейк-Плэсиде (градиентное многомодовое волокно, рабочая длина волны 0,85 мкм);
- **1981 г.:** получена скорость передачи сигнала 140 Мбит/с в одномодовом волокне длиной 49 км, рабочая длина волны 1,3 мкм. Начало работ с одномодовыми волокнами со смещенной дисперсией;
- **1982 г.:** скорость передачи в одномодовом волокне достигла 400 Мбит/с (1,3 мкм);
- **1982 г.:** первый заказ на 100 тыс. км одномодового волокна;
- **1982 г.:** построен завод на производство 1,5 млн. км волокна в год;
- **1983 г.:** стандартизовано одномодовое волокно с нулевой дисперсией на длине волны 1,3 мкм (G652);
- **1987 г.:** разработан эрбиевый оптический усилитель. Начало работ по ВОСП со спектральным уплотнением;
- **1988 г.:** первая трансокеанская ВОСП - ТАТ-8 (одномодовые волокна, 1,3 мкм);
- **начало 90-х:** создание одномодового волокна с нулевой дисперсией на длине 1,55 мкм - волокна со смещенной нулевой дисперсией (G653);
- **1993 г.:** начало использования оптических усилителей;
- **1994 г.:** создание одномодового волокна с ненулевой дисперсией на длине 1,55 мкм - волокна со смещенной ненулевой дисперсией (G655);
- **1995 г.:** начало практического использования ВОСП со спектральным уплотнением;
- **1998 - 2000 гг.:** создание систем с плотным (DWDM) и сверхплотным (HDWDM) спектральным уплотнением;
- **1990 г.:** компания Bellcore продемонстрировала возможность передачи сигнала на основе солитонного режима без регенерации со скоростью 2.5 Гб/сек на расстояние 7500 км. Ценность солитонной технологии заключается в принципиальной возможности прокладки по дну Тихого или Атлантического океана волоконно-оптической линии связи, не требующей установки промежуточных усилителей;
- **1990 г.:** компания NTT достигла скорости передачи информации 20 Гб/сек;
- **2000 г.:** создание волокна с низким поглощением в области водяного пика;
- **2000 -2002 гг.:** DWDM-системы с пропускной способностью до 1,6 Тбит/сек;

Таким образом, историю развития ВОСП можно разбить в общем виде на два этапа. На **первом этапе** успешно решались задачи эффективного увеличения скорости передачи информации на все увеличивающиеся расстояния. Этот этап можно охарактеризовать как **«быстрее-дальше»**.

Оптические волокна являлись ключевой составляющей волоконных систем, успешное развитие технологии которых и позволило реализовать

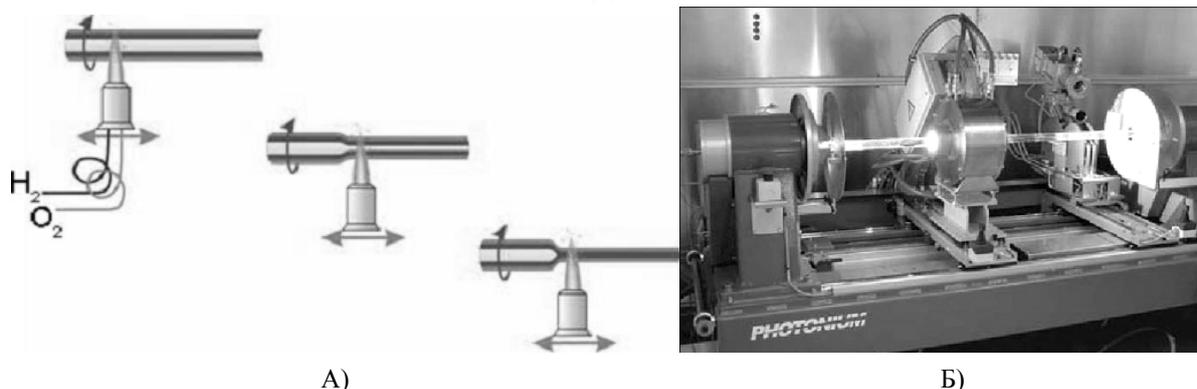


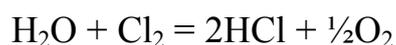
Рис.4.2.4. Получение преформы: усаживание заготовки – процесс сжатия трубы в стержень при помощи газовой горелки (а), при помощи электропечи (б)

Третья проблема процесса коллапсирования, приводящая к «провалу» показателя преломления по оси сердцевины, решается двумя основными подходами. Первый заключается в подавлении испарения легколетучего оксида посредством введения внутрь трубки кислорода с малым содержанием паров галогенида легирующего элемента ($GeCl_4$). Второй способ более эффективный: он заключается в газофазном травлении (удалении) внутреннего слоя сердцевины, обедненного легирующей добавкой.

Особую сложность в MCVD технологии представляет устранение *ОН*- групп, наличие которых приводит к повышенным оптическим потерям. Имеется два основных источника этой водородсодержащей примеси: опорные кварцевые трубы и кислород, используемый в качестве газа-носителя.

Снижение содержания этой примеси в сердцевине световода обеспечивается следующими приемами:

- кварцевые трубы предварительно отжигаются при 900-1000°C, что приводит к уменьшению концентрации в стекле свободного водорода,
- на их внутреннюю поверхность наносится довольно толстый слой изолирующей оболочки, подавляющий диффузию водорода в сердцевину,
- водородсодержащие примеси в кислороде дожигаются на катализаторе при температуре более 400°C, после чего влага поглощается молекулярным ситом,
- высокотемпературное сжатие трубки осуществляется с продувкой внутреннего канала сухим кислородом, содержащим более 1% хлора, который переводит пары воды в HCl , снижая тем самым внедрение молекул воды в стекло:



В заключение можно упомянуть о том, что в 1974 г. когда были получены первые заготовки, скорость осаждения составляла всего лишь несколько десятых грамма в минуту. Десять лет спустя скорость выросла до нескольких граммов в минуту. В лабораториях при использовании технологии сверхвысоких токов и плазмы была достигнута скорость осаждения до 15 г/мин.

Основным преимуществом процесса MCVD является то, что и структуру и свойства световода можно обеспечить еще в заготовке, а потом сохранить в готовом волокне. Относительные размеры и профиль показателя преломления заготовки передаются готовому волокну в процессе вытягивания.

4.2.2.2. Усаживание заготовки

После того как осаждение завершается, начинается следующий важный этап процесса изготовления – усаживание трубки, т.е. получение из трубки стержня. В русскоязычной литературе его часто называют штабиком, а англоязычной – **преформой** (preform). Этот этап состоит из нескольких шагов. Чтобы обеспечить усаживание, температуру поднимают (с помощью кислородно-водородной горелки или токами сверхвысокой частоты) до 1500 – 2000°C и более. При такой температуре трубка постепенно размягчается и усаживается, образуя сплошной стержень – заготовку. Этот шаг является решающим для обеспечения окончательных геометрических параметров заготовки. Усаживание происходит тогда, когда кислородно-водородная горелка (рис.4.2.4, а) или токи сверхвысокой частоты (4.2.4,б) воздействуют на трубку по всей ее длине. Усаживание обеспечивается вязким внутренним течением вызываемым поверхностным натяжением, которое возрастает по мере того, как стекло становится более горячим и менее вязким.

Процесс высокотемпературного сжатия трубки с нанесенными слоями осуществляется при высокой температуре 2000-2150°C, в связи с чем, возникает необходимость решения трех основных проблем. Первая заключается в деформации трубки из-за низкой вязкости кварцевого стекла и сложности сохранения круглой формы заготовки. Вторая связана с массоуносом стекла, обусловленным его испарением. Третья проблема – это изменение состава внутреннего легированного слоя кварцевого стекла из-за повышенной летучести GeO_2 .

Нарушение круговой симметрии формы стекржня-заготовки связано с эллиптичностью и окружной разнотолщинностью опорных кварцевых труб. Для стабилизации круглой формы заготовки и её внутренних слоев необходимо оптимизировать в зависимости от её состава и структуры температуру и ширину зоны нагрева при коллапсировании трубки. Эллиптичность сердцевины можно предотвратить, если на окончательном этапе сжатия трубки в стержень внутри неё поддерживать избыточное давление в несколько миллиметров водного столба.

В процессе высокотемпературного коллапсирования заготовки может испариться до 15% стекла. Степень массоуноса существенно зависит от окислительного потенциала пламени: с увеличением содержания кислорода его величина может быть уменьшена в несколько раз. Варьированием соотношения расходов кислорода и водорода в горелке можно направленно изменять диаметр заготовки.

преимущества оптических систем передачи, позволило занять ВОСП ведущие позиции в телекоммуникационном мире. При этом было обеспечено снижение потерь оптического волокна (с 1000 до 0,15 дБ/км) и минимизация влияния различного рода дисперсий оптического волокна (межмодовой, хроматической и поляризационной) на максимальную скорость передачи. На этом этапе решались как фундаментальные физические задачи по изучению причин, сдерживающих развитие ВОСП, так и разрабатывались новые конструкции и технологии изготовления оптических волокон.

Развитие оптических волокон определялось, шло в тесном взаимодействии с совершенствованием других элементов систем передачи, в первую очередь с лазерами для ВОСП. Например, отсутствие в начале пути приемлемых одномодовых лазеров и эффективной технологии их стыковки с волокнами привело к развитию на первом этапе многомодовых волокон, совершенствование лазеров ставило задачи развития оптического волокна от одномодовых на длинах волн 1,3 и 1,55 мкм до волокон для DWDM в спектральном диапазоне 1,55 мкм.

Решаемые задачи

Задачи, стоящие перед оптическими волокнами как средой передачи информации, в сущности, очень просты. Это комплекс следующих требований:

- обеспечить уровень затухания не больше заданного;
- обеспечить прохождение сигнала с искажениями не больше заданных;
- обеспечить эффективное сопряжение волокна с активным оборудованием;
- поддерживать современные методы монтажа тракта;
- обеспечить минимальную стоимость тракта;
- обеспечить высокую стабильность параметров, надежность и долговечность тракта.

Наиболее сложные, фундаментальные проблемы, потребовавшие проведения серьезных исследований, возникали при решении первых двух задач: **уменьшения затухания и снижения искажений сигнала при прохождении по волокну**. Эти вопросы были решены созданием теории прохождения оптического сигнала в оптическом волокне, разработкой технологии изготовления оптических заготовок на основе сверхчистых материалов и технологии вытяжки оптического волокна, разработкой новых методов измерения параметров волокна.

Задача 1: Снижение потерь сигнала в оптическом волокне

В 1966 г. К. Ч. Као и Дж.А. Хокхем показали, что очистка стекла позволяет снизить потери до уровня 20 дБ/км, и это позволило использовать оптическое волокно для ВОСП. В 1967 г. в лаборатории

компании Corning начались исследования по созданию таких оптических волноводов. В начале пути затухание в оптических волокнах составляло более 1000 дБ/км. Теоретические исследования процессов затухания оптического сигнала в волоконных световодах позволили уже на первом этапе исследований наметить пути создания оптических волокон с минимальными потерями. Было показано, что потери сигнала в оптическом волокне имеют следующие составляющие:

- поглощение (собственное в стекле и на примесях),
- рэлеевское рассеяние,
- потери на изгибах и других микро- и макронеоднородностях.

В первую очередь, необходимо было разработать рецептуры стекла с минимальным затуханием и снизить содержание примесей в стекле. Уже к 1970 г. технология очистки стекла для волокна обеспечила уровень загрязнения не хуже 1 частицы металла и 10 ионов ОН- на 10⁶ частиц стекла. В августе 1970 г. группа Маурера получила затухание в заготовке не хуже 16 дБ/км. Эту дату можно смело называть **началом использования волоконной оптики**.

Потери в волокне и, соответственно окна-области работы ВОСП, определяются рэлеевским рассеянием и инфракрасным поглощением стекла. Рэлеевское рассеяние значительно увеличивает потери в волокне в области коротких длин волн: первое окно — 850 нм, инфракрасное поглощение ограничивает рабочие области длин волн величиной 1625 нм. Развитие технологии производства волокна позволили в этой рабочей области получить потери от 3 дБ/км на длине волны 850 нм до 0,18 дБ/км на длине волны 1,55 мкм.

Задача 2: снижение искажений сигнала в оптическом волокне

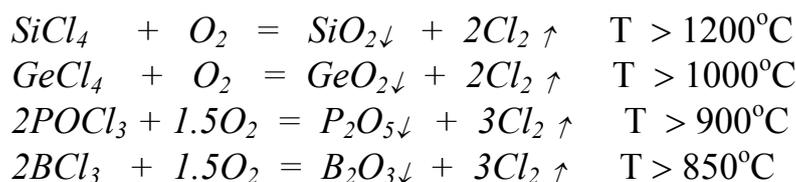
Решение проблемы искажения сигнала потребовало гораздо больших усилий и не было столь однозначным. В целом искажения сигнала и соответственно ограничения скорости передачи информации определяются дисперсией волокна, которая приводит к разбросу времени прохождения сигнала по тракту. В процессе развития ВОСП пришлось компенсировать или снижать влияние различных видов дисперсии:

- межмодовой;
- хроматической;
- поляризационной.

Для снижения дисперсии на каждом этапе развития волоконных систем разрабатывалась своя теория распространения сигнала в оптическом волокне, предлагались новые варианты решения стоящих задач. Основным методом создания новых типов волокон, снижения дисперсии является подбор и формирование в оптическом волокне нужного профиля показателя преломления.

3.2. Эволюция оптического волокна

16



В условия MCVD процесса все галогениды за исключением GeCl_4 полностью превращаются в оксиды. Степень превращения хлорида германия в GeO_2 растет с понижением температуры и разбавлением парогазовой смеси кислородом. Температурный уровень начала этих превращений растет в ряду образования оксидов $\text{P}_2\text{O}_5 - \text{B}_2\text{O}_3 - \text{GeO}_2 - \text{SiO}_2$ от 850 до 1200°C.

Радиальный температурный градиент в прореагировавшей парогазовой смеси за зоной реакции в условиях горячий газ – холодная стенка способствует эффективному осаждению оксидных частиц. Такое явление называется **термофорезом**. Математическая модель этого процесса дает возможность оценить эффективность (E) осаждения частиц в следующем виде:

$$E = 0.8 (1 - T_e/T_{\text{rxn}})$$

где: E – доля осевших частиц, T_e – температура поверхности осаждения, T_{rxn} – температура образования частиц.

На эффективность осаждения тонкодисперсных оксидов существенно влияет T_e , которая определяется толщиной стенки трубы, скоростью перемещения горелки, длиной пути ее сканирования, условиями охлаждения трубки и мало зависит от скорости парогазового потока и диаметра трубки. Толщина осаждаемых слоев и условия их спекания оптимизируются во избежание образования пузырей в синтезированной стекломассе при коллапсировании трубки в заготовку-преформу.

Оксиды кремния, германия, фосфора, бора, образующаяся в виде мелкого порошка, □ уносятся потоком газа вдоль трубки, где происходит их осаждение, а пары хлора улетучиваются. Когда тепло от горелки достигает осажденного порошка, то он плавится и превращается в сплошной □ без включения пузырьков □ прозрачный слой двуокиси кремния (с примесями или без них). Когда горелка доходит до конца трубки, то она меняет направление и быстро движется вдоль трубки в обратную сторону к начальной точке □ чтобы обеспечить осаждение нового слоя порошка. Во время осаждения (и сердцевины □ и оболочки) осуществляется введение неодинакового количества различных примесей. Путем последовательного осаждения одного слоя двуокиси кремния за другим и тщательного дозирования примесей можно получить оптическое волокно с различными профилями показателя преломления. При этом □ насколько это технически возможно □ предотвращается попадание в систему загрязняющих веществ. Особенно это касается загрязняющих

веществ, содержащих водород, который образует в волокне соединения OH -групп, приводящие к увеличению затухания.

117

трубки удаляется избыточный материал.

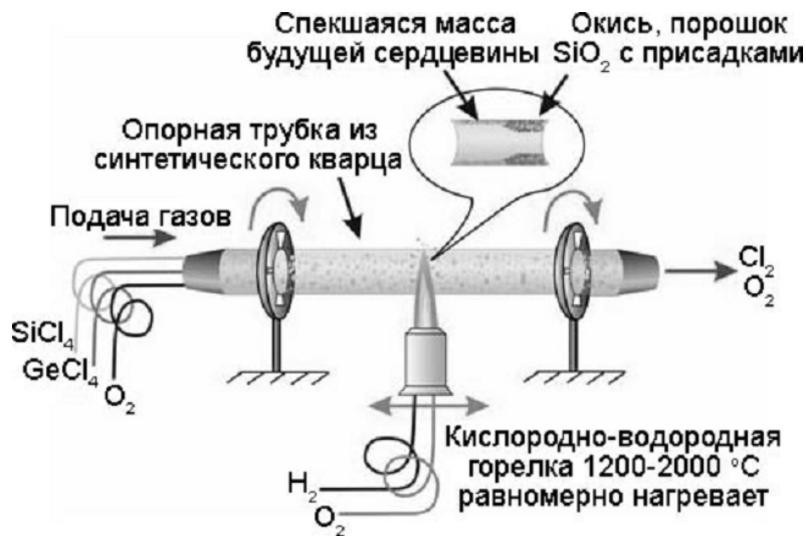


Рис.4.2.2. Изготовление заготовки для волокна (преформы) методом MCVD

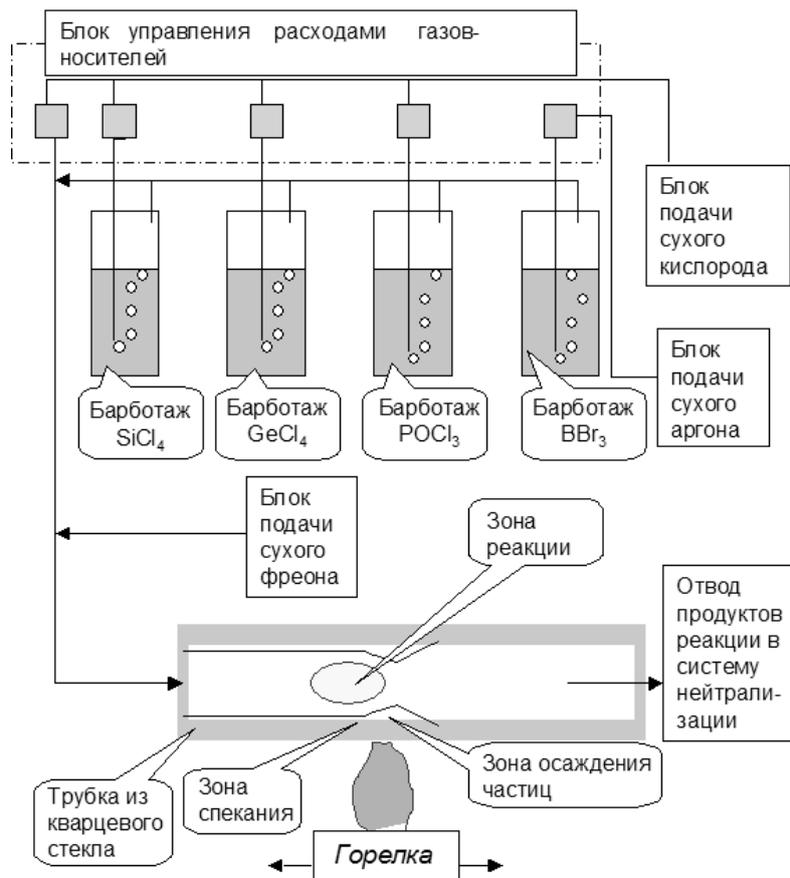


Рис. 4.2.3. Схема MCVD процесса

В ходе процесса точно контролируется количество химических веществ, подаваемых в трубку либо с помощью газов-носителей (Ar , He и O_2) либо в виде отдельного потока. Окисление $SiCl_4$ и примесей происходит в зоне нагревания, непосредственно над горелкой при температуре $850-1400^\circ C$. Взаимодействие парообразных галогенидов с

кислородом в зоне реакции определяется константами следующих равновесных процессов:

116

В своем развитии оптические волокна прошли путь от многомодовых со ступенчатым профилем показателя преломления до градиентных и от стандартных одномодовых с нулевой дисперсией на 1,31 мкм до одномодовых со смещенной на 1,55 мкм нулевой дисперсией. На «многомодовом этапе» (70-е годы) была значительно снижена межмодовая дисперсия за счет разработки волокон со специальным профилем показателя преломления (градиентных волокон). Одномодовые волокна со своими профилями показателя преломления обеспечили минимальное значение дисперсии в заданных спектральных областях (1,31 мкм — начало 80-х и 1,55 мкм — середина 80-х).

Первые оптические волокна были многомодовыми, со световедущей жилой, по которой и распространяется оптический сигнал, диаметром 50 либо 62,5 мкм. Профиль показателя преломления волокна имел вид ступеньки. В многомодовом волоконном световоде различные моды (лучи) оптического сигнала распространяются по разным траекториям. В результате различные моды имеют разное время прохождения волокна - возникает межмодовая дисперсия, которая существенно ограничивает полосу пропускания волокна и, соответственно, скорость передачи ВОСП. Для многомодовых волоконных световодов со ступенчатым профилем показателя преломления полоса пропускания не превышала 100 МГц/км.

Исследование и анализ этой проблемы позволили предложить конструкцию градиентных многомодовых волоконных световодов, у которых профиль показателя преломления имеет вид параболы. При этом межмодовая дисперсия существенно снизилась, а полоса пропускания увеличилась до 800 МГц/км.

В одномодовых волоконных световодах, со световедущей жилой порядка 8-10 мкм, отсутствует межмодовая дисперсия. В одномодовых волоконных световодах удалось скомпенсировать материальную и волноводную дисперсии: стандартное оптическое волокно (SF - standard fiber: G652) имеет нулевую хроматическую дисперсию на длине волны 1,31 мкм. ВОСП на основе SF обеспечивают передачу информации со скоростью 2,4 Гбит/с на расстояния до 90 км.

Дальнейшее совершенствование ВОСП шло в сторону увеличения расстояний передачи информации. Это обеспечивалось переходом на рабочую длину волны 1,55 мкм, на которой затухание оптических волокон имеет минимум потерь. Стандартное одномодовое волокно на этой длине волны имеет отличную от нуля хроматическую дисперсию, что ограничивало скорость передачи информации, поэтому встала задача разработать одномодовый волоконный световод со смещенной в область 1,55 мкм нулевой дисперсией (DSF - dispersion-shifted fiber: G653).

В этих волокнах профиль показателя преломления имеет не ступенчатую,

как в SF, а более сложную W-форму. Воздействуя на волноводную дисперсию удалось скомпенсировать материальную дисперсию на длине волны 1,55 мкм и получить нулевую хроматическую

17

дисперсию. В DSF реализованы наилучшие характеристики как по затуханию, так и по минимуму дисперсии. Волокна со смещенной дисперсией используются для ВОСП с одной рабочей длиной волны (1,55 мкм) при скорости передачи до 10 Гбит/с и расстояниями между ретрансляторами до 150 км.

Использование оптических усилителей, обеспечивающих усиление сигнала в широком спектральном диапазоне, открыло дорогу ВОСП со спектральным уплотнением. Появилась возможность по одному волокну эффективно пропускать много независимых каналов. Однако при этом суммарная мощность оптических сигналов в волокне значительно выросла, начали сказываться нелинейные эффекты в волокне, фотоны в каждом канале стали взаимодействовать, «чувствовать» друг друга. В результате так называемого 4-х волнового смещения в спектре прошедшего через волокно сигнала появляются перекрестные помехи. В DWDM-системах это стало серьезной проблемой. С 4-волновым смещением можно бороться либо уменьшая плотность оптического сигнала в волокне, либо снижая время взаимодействия фотонов соседних каналов при их движении в волокне. В первом случае необходимо либо уменьшать суммарную вводимую в волокно мощность (что нежелательно), либо увеличивать размер световедущей жилы волокна. Во втором случае необходимо сделать несколько разной скорость распространения фотонов в разных каналах, т.е. сделать отличную от нуля хроматическую дисперсию.

В настоящее время эти механизмы реализованы в волокнах со смещенной ненулевой дисперсией — NZDSF (non-zero dispersion-shifted fiber: G655). Это самые перспективные волокна, которые обеспечивают максимально возможные характеристики волокна как системы передачи информации. DWDM-системы на этих волокнах имеют терабитные скорости передачи при длинах тракта более 300 км.

Сегодня современные оптические волокна - идеальная среда для передачи информации. Они обеспечивают передачу оптического сигнала с терабитными скоростями на расстояние в сотни километров.

В результате практически неограниченные возможности построенных магистральных DWDM-систем оказались существенно недогруженными. Это стало одной из причин кризиса в телекоммуникационной отрасли в 1999-2002 гг. Очень много средних и мелких компаний, специализирующихся в области оптических телекоммуникаций обанкротились. Крупные компании по производству волокна и телекоммуникационной продукции (Corning, NTT, Fujikura, Lucent Technologies, Alcatel) заметно снизили свои мощности. На этом закончился первый этап развития ВОСП «быстрее-дальше».

Второй этап развития ВОСП начался в 2000 г. и связан с преодолением кризиса. Условие выхода из кризиса - повышение эффективности ВОСП, повышение загрузки всех сегментов сети, для этого

18

посредством регулирования (с помощью компьютера) расхода паров двуокиси кремния и различных примесей. Благодаря этому можно изготавливать оптическое волокно □ соответствующее определенным техническим условиям.

4.2.2.1. Описание процесса

При использовании метода MCVD происходит осаждение сверхчистой двуокиси кремния (при изготовлении сердцевины всегда добавляются определенные примеси) на внутренней стороне стеклянной трубки □ а затем – усаживание трубки □ вызываемое повышением температуры (с помощью пламени газа или токов сверхвысокой частоты). В результате этого трубка сжимается и превращается в сплошной стеклянный стержень диаметром 30 - 40 мм и длиной около 1000 мм. Таким образом, этот стеклянный стержень получает окончательный профиль, который будет иметь и готовое волокно.

Процесс осаждения основан на высокотемпературном окислении $SiCl_4$ и веществ □ используемых в качестве примеси. Он занимает, в зависимости от размера заготовки, от четырех до восьми часов, в течение которых происходит осаждение и того стекла, которое станет оболочкой волокна, и того, которое превратится в светопроводящую сердцевину. Процесс осаждения одинаковый и для одномодовых □ и для многомодовых волокон.

В качестве примесей к сердцевине волокна чаще всего используется германий, □ способствующий увеличению показателя преломления. Окись фосфора применяется для снижения требуемой температуры процесса, а окись бора и фтор – прежде всего для уменьшения показателя преломления оболочки волокна. Как правило, □ волокно образуется из наружной кремнеземной трубки.

Процесс начинается с того □ что трубка из сверхчистого высококачественного кремнезема (двуокиси кремния, синтетический кварц SiO_2) промывается в кислотной ванне □ а затем зажимается в устройстве □ напоминающем токарный станок (рис.4.2.2). В нем трубка может вращаться вокруг своей центральной оси. Кислородно-водородная газовая горелка движется вдоль трубки взад и вперед, сильно и равномерно нагревая трубку. Входной конец трубки через вращающуюся газонепроницаемую соединительную муфту присоединен к комплексному устройству подачи газов. В это устройство входят смеситель газов и автоматизированные регуляторы массового расхода. Крайне важно □ чтобы это устройство было абсолютно герметичным. Это требуется и для того □ чтобы предотвратить попадание внутрь загрязняющих веществ □ и для того □ чтобы обеспечить точное дозирование газов. Из резервуаров

поступают химические реактивы $SiCl_4$, $GeCl_4$, $POCl_3$, и BCl_3 , которые путем нагрева переводятся из жидкой фазы в газообразную и подаются в трубку (рис.4.2.3). Туда же подается кислород O_2 . Из другого (выходного) конца

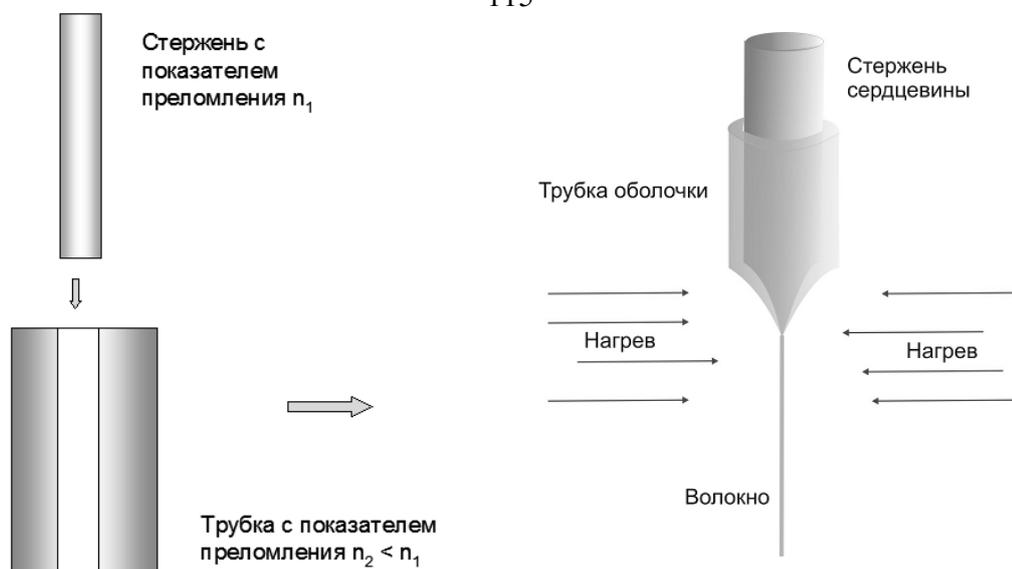


Рис. 4.2.1. Метод стержня и трубки

Метод стержня и трубки относительно прост в реализации. В нем можно использовать многокомпонентные передающие стекла, а также активные стекла, например, лазерные, магнитооптические и т.д. Волокна, произведенные из многокомпонентного стекла, имеют ограниченное применение из-за того, что при производстве таких волокон не удается обеспечить низкое затухание, как в других методах, не достигается чистота исходных материалов. Область применения таких волокон – передача информации на короткие расстояния (до нескольких сотен метров) в первом окне прозрачности на длинах 800-900 нм. В основном метод используется для получения волокон небольшой протяженности со специальными свойствами, например активные, анизотропные или фотонно-кристаллические волокна. Для магистральных ВОЛС используются другие методы, описанные ниже.

4.2.2. Метод модифицированного химического парофазного осаждения - MCVD

Наиболее распространенным методом производства заготовок является описанный в 1974 году американским физиком Джоном Мак Чесни (John MacChesney), работавшим в лабораториях AT&T и Bell Labs, метод модифицированного химического парофазного осаждения (MCVD–Modified Chemical Vapour Deposition). Этот метод стал одним из наиболее испытанных и проверенных способов получения заготовок. Сам процесс довольно прост, гибок и поэтому нетруден для освоения. Именно этот метод используется для проведения различных экспериментов и исследований, а также промышленном производстве (в США, Японии и европейских странах). При использовании этого метода возможно

изменение целого ряда параметров, например, вида волокна (одномодовое или многомодовое) □ окончательного диаметра волокна □ числовой апертуры и профиля показателя преломления. Эти параметры изменяются

114

необходимо быстрое развитие локальных систем и поиск более эффективных решений для городских ВОСП.

Для технологий оптических волокон это означало возвращение к проблемам многомодовых волоконных световодов. Традиционно преимущества многомодовых волоконных световодов определялись малой стоимостью активного оборудования, однако развитие ВОСП на основе многомодовых волокон сдерживалось малой пропускной способностью таких систем. Разработка нового типа лазеров на «вертикальных структурах» (VCSEL), технологичных и, следовательно, дешевых, узкополосных и быстродействующих, открыла новые возможности перед многомодовыми системами.

Но тут возникла проблема многомодовых волоконных световодов при использовании таких лазеров: технология изготовления заготовок для этих волокон не позволяла обеспечить нужный профиль показателя преломления в центре волокна - возникла аномально большая величина «дифференциальной» дисперсии. Современные технологии сделали очередной шаг и обеспечили решение и этой проблемы, убрав «провал» показателя преломления в центре волокна (начало 2000-х).

Другое направление в развитии современной технологии производства оптических волокон - одномодовые волокна с расширенным спектральным диапазоном, в которых значительно уменьшены потери в области длин волн 1400 нм («водяной пик поглощения»).

3.3. Волоконно-оптические системы передачи на пороге третьего тысячелетия

С началом третьего тысячелетия мир вступает в информационную эру, которая, с одной стороны, характеризуется непрерывно растущими потребностями человеческого общества в обмене информацией и, с другой стороны, появлением впервые в истории человечества технических возможностей практически полностью удовлетворить эти потребности.

История становления и развития человеческого общества неразрывно связана с совершенствованием средств связи и передачи информации. Поэтому в эту область деятельности всегда вкладываются большие средства, в ней используются новейшие достижения науки и техники. Несмотря на это до сих пор потребности в обмене информацией превышают технические возможности общества. И только с освоением оптических методов передачи и обработки информации у человечества возникли реальные возможности создания технических условий для практически полного удовлетворения своих потребностей в обмене информацией.

В связи с этим интересно обратить внимание на динамику развития

систем связи за последние сто с небольшим лет, т.е. со времени появления телефона в 90-х годах прошлого столетия. Анализ показывает, что примерно за 90 лет со дня появления первых телефонных линий информационная ёмкость каналов связи выросла на 5 порядков с 1 бит/с до

19

10^5 бит/с. За 20 лет, прошедшие с начала активного использования волоконно-оптических линий связи, ёмкость систем связи выросла на 7 порядков, достигнув скорости передачи порядка 1 Тбит/с. Этот скачок стал возможен только благодаря качественному изменению систем связи - становлению и внедрению волоконно-оптических технологий.

На рис.3 приведена диаграмма роста скорости передачи в коммерческих системах на основе одномодового волокна за период с 1980 г по 2000 г. Как видно из этой диаграммы рост скорости передачи постоянно опережает делаемые прогнозы. Такое несовпадение прогнозов с реальностью объясняется тем, что при прогнозировании учитывается текущее состояние дел в отрасли, но появление новых технологий приводит к резкому, скачкообразному росту скорости передачи. Рост скорости передачи ведет к постоянному уменьшению стоимости передачи. В связи с чем возникает новая коммерческая ситуация, растет спрос, что позволяет найти средства на разработку нового "технологического скачка" и так далее. Такое "спиралевидное" развитие бизнеса и технологических разработок приводит к тому, что сделать прогноз на 10 лет вперед становится фактически невозможно.

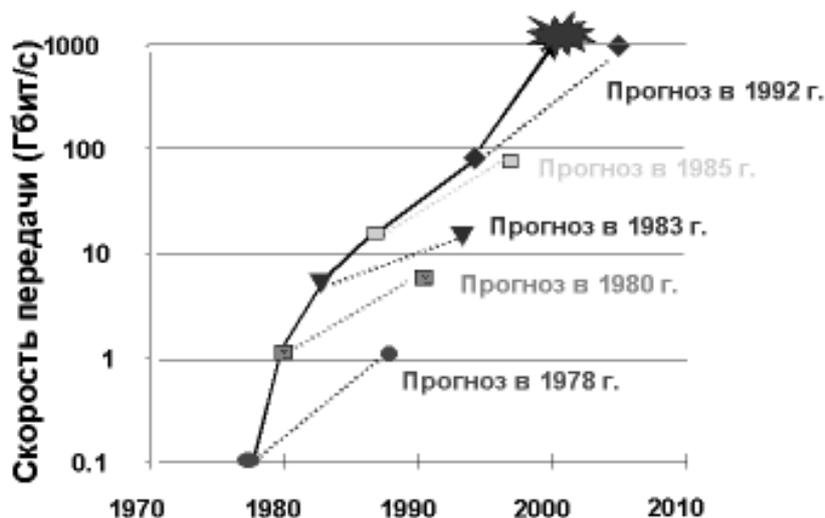


Рис.3. Скорость передачи информации в оптических линиях увеличивается быстрее любых прогнозов. 10-летние планы реализуются в срок от 4 до 7 лет!

Темпы развития волоконно-оптической связи в мире действительно поразительны. В настоящее время производство волоконных световодов достигло 70 млн. км в год, каждую минуту в мировых телекоммуникациях прокладывается свыше 100 км оптического волокна. Уже все материки связаны между собой подводными волоконно-оптическими линиями связи, продолжается интенсивное строительство наземных междугородных и внутригородских волоконно-оптических систем и сетей связи.

На основе развития современных технологий оптической обработки информации, таких как спектральное уплотнение каналов (DWDM-технологии), а также разработки методов и устройств усиления оптических сигналов, новых типов оптических волокон, в конце 90-х годов были созданы экспериментальные волоконно-оптические системы связи,

20

12 м. Заготовка устанавливается наверху башни, нижний конец заготовки разогревается, и волоконный световод вытягивается из заготовки. В процессе вытягивания волокно покрывается необходимыми защитными оболочками. Важнейшая задача, решаемая при вытяжке волокна, - обеспечить заданные геометрические параметры волокна, что в основном регулируется скоростью вытяжки волокна. При вытяжке непрерывно и с высокой точностью контролируются геометрические параметры волокна. Метод VAD позволяет вытягивать более 50 км волокна из одной заготовки, возможен процесс непрерывного изготовления заготовки-волокна, когда при продольном движении заготовки на один торец заготовки осаждается необходимый газовый состав, а из другого вытягивается волокно.

Существующие сегодня технологии позволяют изготавливать оптические волокна с минимальным затуханием вплоть до 0,18 дБ/км в диапазоне 1550 нм, что близко к теоретическим показателям для кварца. Поэтому современные исследования по снижению потерь в волокне сместились в область разработок в среднюю (2-5 мкм) и дальнюю (8-12 мкм) инфракрасную область (волокно, оптические приемники и излучатели). Так, например, были получены результаты в 0,01 дБ/км на длине волны 2,55 мкм в фосфорных стеклах.

Полученное волокно поступает на кабельные заводы, где и выпускаются оптические кабели. Основная задача «каблирования» — оградить оптические волокна от нежелательных воздействий при строительстве, монтаже и эксплуатации ВОСП, и эта задача успешно решается. Волокно в кабеле защищается от механических воздействий (растягивание и сжатие кабеля), от изменения температуры, обеспечивается защита волокна от влаги.

4.2. Технологии производства заготовок-преформ для оптического волокна

4.2.1. Метод стержня и трубки

Стекланный стержень с более высоким показателем преломления - n_1 помещается внутри стеклянной трубки с более низким показателем преломления - n_2 . Далее система нагревается, стекла размягчаются, и начинается вытяжка оптического волокна (рис.4.2.1). Типичные размеры для стержня – около 1 м в длину и 30 мм в диаметре. Обязательным условием для получения волокна данным способом является близость

температуры плавления материалов стержня и трубки, а также их примерно одинаковый температурный ход вязкости.

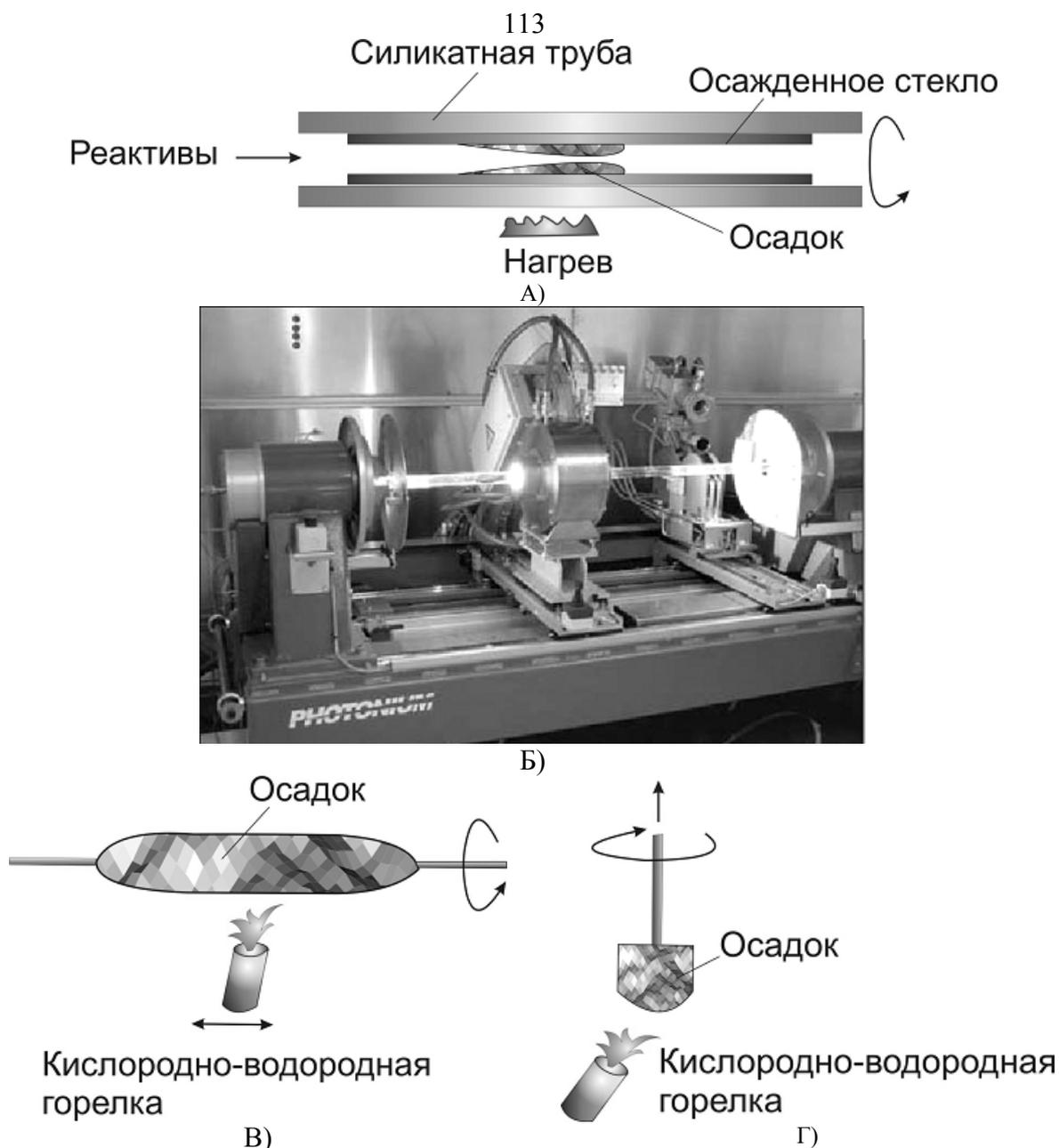


Рис.4.1.1. Основные современные методы изготовления заготовок (преформ) для вытяжки оптических волокон MCVD (а), PCVD (б), OVD (в) и VAD (г)

Первые две технологии реализовать достаточно просто: управлять процессом осаждения нужной газовой смеси внутри опорной трубки несложно. При внешнем осаждении этот процесс сложнее и наибольшие трудности возникают при торцевом осаждении, когда необходимо задавать нужное распределение газовой смеси по торцу заготовки. При этом возможности методов соответствуют их сложности. Самый сложный метод торцевого осаждения обеспечивает максимальную производительность

(скорость осаждения 15 -20 г/мин), методы внутреннего осаждения имеют скорость осаждения 0,5 — 2 г/мин.

4.1.2. Вытяжка оптического волокна и изготовление кабеля

На втором этапе производства из заготовки вытягиваются в волокно. Это производится на специальных установках с башней высотой примерно

112

обладающие скоростями передачи информации свыше 1 Тбит/с. Несомненно, что в ближайшие годы такие системы будут доведены до практической реализации и найдут коммерческое применение в мировых телекоммуникационных сетях связи. Однако уже сейчас ясно, что даже такие скорости передачи не могут удовлетворить растущие потребности человечества в обмене информацией, особенно в связи с развитием в последние годы интернета.

Какие же существуют пути для увеличения информационной ёмкости волоконно-оптических систем связи? По-видимому, первым и наиболее очевидным путём является расширение спектральной области для передачи информации. Практически все современные системы связи работают во втором и третьем окнах прозрачности волокна, т.е. в диапазонах длин волн $\lambda = 1,3$ мкм и $\lambda = 1,55$ мкм, соответственно. Область в диапазоне $\lambda = 1,4$ мкм до последнего времени была закрыта из-за наличия сильного поглощения в волокне, обусловленного наличием гидроксильных групп в кварцевом стекле. Успехи в технологии изготовления волоконных световодов позволили убрать эту полосу поглощения, в результате чего спектральная область оптического волокна с малыми потерями ($< 0,3$ дБ/км) расширилась до 500 нм и лежит в диапазоне длин волн 1200-1700 нм. Использование всего спектрального диапазона волокна позволяет резко увеличить информационную ёмкость волоконно-оптических систем со спектральным уплотнением каналов. Действительно, при достижимых в настоящее время значениях спектральных интервалов (разность между длинами волн соседних каналов), равных 0,2 нм, и скорости передачи информации в отдельном канале 160 Гбит/с получается, что по одному волокну можно передать 2500 спектральных каналов и реализовать суммарную скорость передачи, равную 400 Тбит/с. С учетом дальнейшего прогресса волоконно-оптических технологий можно предположить, что, используя только спектральный интервал 1,2 - 1,7 мкм, в будущем можно будет передавать по одному волокну информацию со скоростью в 1000 Тбит/с. Очевидно, что для практической реализации таких систем связи потребуются новые исследования и разработка новых оптических материалов и их технологий, новой элементной базы, в частности создание широкополосных оптических усилителей, мультиплексоров и демультиплексоров, оптических переключателей света и т.д. Однако, учитывая бурный прогресс в части развития волоконно-оптических технологий, можно с

достаточно большой долей уверенности утверждать, что такие системы также будут реализованы практически в третьем тысячелетии.

ГЛАВА 1. ОСНОВЫ ОПТИКИ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛНОВОДА

1.1. Оптическое волокно. Общие положения

В волоконно-оптических системах передачи (ВОСП) информация переносится электромагнитными волнами очень высокой частоты (≈ 100 ТГц). Эта спектральная область соответствует ближнему инфракрасному диапазону оптического спектра (от 800 до 1700 нм). Столь высокая частота несущей волны потенциально может обеспечить скорости передачи информации в десятки и даже сотни Тбит/с. (1 Тбит/с = 10^{12} бит/с. Поток информации со скоростью 10 Тбит/с обеспечивает передачу около 100 000 цифровых телевизионных каналов).

Оптическое волокно (ОВ) в ВОСП является **волноводом**, переносящим информационные световые сигналы. Оптические волноводы на основе волокна компактны, гибки, имеют относительно малые потери и не чувствительны к электромагнитным наводкам.

Наиболее важным свойством ОВ является их способность переносить световое излучение на большие расстояния с малыми потерями. Количественно потери в ОВ определяются **затуханием**. Однако, при выборе ОВ величина затухания является не единственным критерием. Необходимо также учитывать степень искажений сигнала при передаче по ВОСП с требуемой скоростью на максимально возможное расстояние. В современных системах и скорость и дальность передачи информации, с учетом возможности использования оптических усилителей, определяются искажением оптического сигнала из-за дисперсии. Кроме того, на выбор ОВ влияют и другие факторы: эффективность ввода излучения света в волокно, возможность сопряжения с передающими, активными и пассивными модулями, удобство в работе с ОВ. Последний фактор определяют такие свойства ОВ, как простота разделки, сварки и оконцовки, механическая прочность, отражающая способность ОВ не разрушаться под действием длительных растягивающих усилий, совместимость оболочки ОВ с современными красителями и гидрофобами для сохранения характеристик ОВ при производстве кабелей и прочее.

1.1.1. Лучи в оптических волокнах

Волоконно-оптический волновод состоит из стеклянной сердцевины, окруженной оболочкой с меньшим значением показателя преломления. Сердцевина волокна, показанного на рис.1.1.1, имеет постоянный

показатель преломления – n_1 . Показатель преломления скачком изменяется до значения n_2 на границе между сердцевиной и оболочкой, имеющей показатель преломления - n_2 . Зависимость показателя преломления от координаты вдоль диаметра волокна, которая называется профилем показателя преломления, в рассматриваемом волокне имеет вид прямоугольной ступеньки. Поэтому волокно такого типа называется

ГЛАВА 4. ТЕХНОЛОГИИ ВЫТЯЖКИ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА

4.1. Общие представления о технологиях производства оптического волокна

Современное производство кабелей на основе оптических волокон состоит из следующих этапов:

- изготовление заготовки волокна (преформы) с заданным профилем показателя преломления;
- вытяжка волокна из заготовки;
- изготовление кабеля.

4.1.1. Производство заготовок для оптических волокон

При производстве заготовки в настоящее время используются четыре основных варианта технологий: MCVD, PCVD, OVD, VAD (рис.4.1.1).

Оптическое волокно обеспечивает заданный режим распространения введенного в него света лишь в случае формирования в нем определенного профиля показателя преломления. Для этого в сердцевину заготовки для волокна вводят химические добавки, несколько увеличивающие показатель преломления синтетического кварца, из которого изготавливается волокно.

В методе модифицированного химического парофазного осаждения — MCVD (Modified Chemical Vapor Deposition) происходит осаждение двуокиси кремния с необходимыми добавками на внутренней стороне стеклянной трубки. Это метод внутреннего осаждения. После окончания процесса формирования сердцевины с заданным профилем показателя преломления трубка нагревается, размягчается и под действием сил поверхностного натяжения усаживается (схлопывается), превращаясь в стержень.

Развитием этого метода является метод PCVD (Plasma-activated Chemical Vapor Deposition), в котором разогрев трубки производится токами высокой частоты.

В методе внешнего парофазного осаждения (Outside Vapor Deposition - OVD) осаждение двуокиси кремния с примесями происходит

на внешней поверхности стержня. По окончании процесса исходный стержень извлекается, а заготовка схлопывается.

В методе осевого парофазного осаждения (Vapor-phase Axial Deposition - VAD) осаждение заданного состава происходит на торец заготовки, и она наращивается вдоль оси. Если в предыдущих технологиях длина полученной заготовки ограничивается размерами опорных трубок (стержня), то в методе торцевого осаждения длина заготовки может быть очень большой. Как и в предыдущих методах, заготовка на последнем этапе обезвоживается и спекается.

111

компании, как Honeywell, Delphi Electronics, Boeing и Lucent Technologies. Сегодня технология продвинулись вперед и готова к использованию в военной промышленности и самолетостроении. Так, компания Boeing уже проектирует аудиовизуальные системы на основе ПОВ (в частности для снижения веса самолетов). Индустрия ПОВ разрабатывает волокно, стойкое к высоким температурам (до 125⁰С) и волокно со сниженной горючестью для других военных и аэрокосмических приложений. ПОВ перспективны для использования в крупных центрах обработки и передачи данных и для соединения групп серверов и суперкомпьютеров. Преимущество ПОВ перед медными соединениями состоит в меньшем энергопотреблении – основной причины высокой стоимости содержания суперкомпьютеров.

И наконец, компания Intel и другие фирмы исследуют возможности использования оптической шины на основе ПОВ для обмена данными с материнской платой компьютера. Серьезное преимущество данного подхода состоит в том, что оптическое соединение поддерживает гораздо более высокие скорости передачи информации, чем его электрический аналог. Потенциально достижимы скорости в десятки или даже сотни Гбит/с, причем, соединение на основе ПОВ легко интегрируется в печатную плату и стыкуется с активной электроникой благодаря гибкости и большому диаметру сердцевины. Поэтому конструкторы вычислительных систем и подсистем активно исследуют возможность применения оптических соединений в системных платах компьютеров, маршрутизаторов, переключателей, устройств памяти и в других типах электронных модулей, а также для соединения модулей, стоек и узлов в центрах обработки и передачи данных.

волокном со ступенчатым профилем показателя преломления.

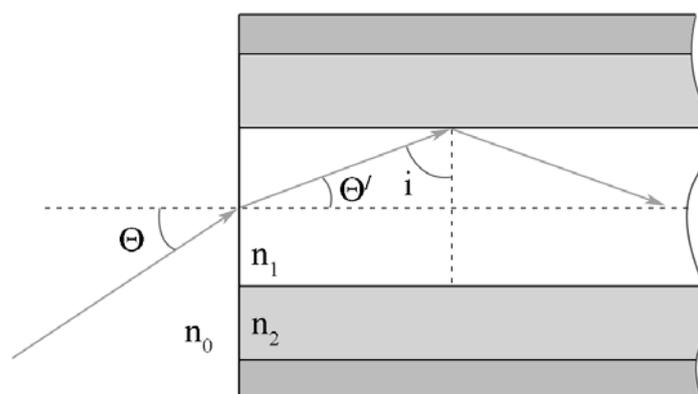


Рис.1.1.1. Ход лучей в оптическом волокне со ступенчатым профилем показателя преломления

Если $n_1 > n_2$, волокно способно локализовать световой пучок в сердцевине за счет **полного внутреннего отражения**. Явление полного внутреннего отражения (ПВО) поясняет рис 1.1.2. При отражении от границы раздела двух сред световых лучей, падающих под углом i больше критического, часть световой мощности проникает во вторую среду и распространяется в ней в виде преломленного луча (преломленной волны). При отражении от границы раздела двух сред световых лучей, падающих под углом i , меньше критического, преломленного луча не существует и световой луч отражается без затухания.

Поэтому, без потерь распространяться внутри сердцевины ОВ будут только лучи, падающие под углом i , превышающим критический угол i_c . Если θ_m - наибольший угол падения лучей, испытывающих полное внутреннее отражение, то, как следует из рисунка:

$$n_0 \sin \theta_m = n_1 \sin \theta' = n_1 \cos i_c \quad (1.1.1)$$

где n_0 - показатель преломления окружающей среды, n_1 - показатель преломления сердцевины.

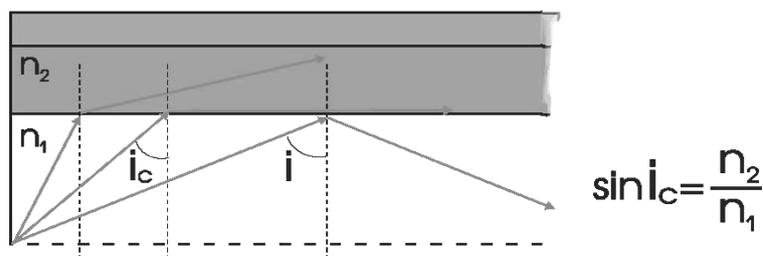


Рис.1.1.2. Полное внутреннее отражение света

Критический угол определяется выражением:

$$\sin i_c = n_2 / n_1 \tag{1.1.2}$$

где n_2 - показатель преломления оболочки. Используя два последних

23

уравнения и равенство $n_2 \cos^2 i_c = 1 - \sin^2 i_c$, получим:

$$n_0 \sin \theta_m = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \approx [2n_1(n_1 - n_2)]^{1/2} \tag{1.1.3}$$

Величина $n_0 \sin \theta_m$ называется числовой апертурой (NA) волновода и определяется в точности так же как числовая апертура микроскопа. Для достижения высокой эффективности ввода волновод необходимо освещать источником с числовой апертурой не превышающей числовой апертуры волновода. Значение n_0 может быть равно 1, но, возможно, волновод приклеен к светодиоду или другому устройству клеем с показателем преломления близким к показателю преломления сердцевины. Например, у волновода с $n_1 = 1.5$ и $n_1 - n_2 = 0.01$ числовая апертура приблизительно равна 0.17. Когда $n_0 = 1$ это соответствует конусу входа световых лучей с половинным углом, равным 10° .

Из-за ограниченности диапазона углов распространения лучей вдоль волокна ввод излучения источника света в волновод не простая задача. Например, в оптической связи светодиоды являются самыми распространенными источниками, излучение таких источников полностью заполняет полусферу, поэтому в волновод можно ввести только малую часть мощности излучения светодиода. Мощность, излучаемая в конус с половинным углом θ_m , пропорциональна $\sin^2 \theta_m$. Поэтому, если сердцевина по крайней мере не меньше светодиода, эффективность ввода излучения светодиода в волновод равна $\sin^2 \theta_m$. (Она меньше, если светодиод больше сердцевины). Для волновода из предыдущего примера эффективность ввода составляет примерно 3%.

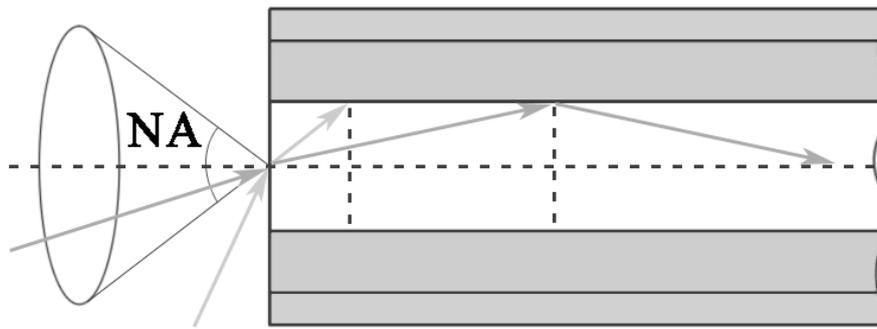


Рис.1.1.3. Ввод излучения в ОВ

Анализ рис.1.1.1 показывает, что лучи, падающие под углом, равным критическому углу i_c , проходят в $1 / \sin i_c$ раз большее расстояние, чем аксиальные лучи. Из-за большей длины пути, который проходят эти лучи, они отстают от аксиальных лучей на интервал времени ΔT , определяемый отношением:

$$\Delta T / T = 1 / \sin i_c - 1 \quad (1.1.4)$$

где T - время распространения импульса вдоль волновода по кратчайшему пути, ΔT - время задержки луча, распространяющегося под углом, близким к критическому.

24

автомобилей с сетью на основе ПОВ, 19 европейских моделей были оснащены шинами обмена данными на основе ПОВ. Количество проданных автомобильных терминалов, или узлов, достигло 9,5 миллионов, и с 2005 г. ожидается установка до 15 миллионов узлов в год. К концу 2005 г. 40 марок европейских автомобилей от дешевых до дорогих были оборудованы ПОВ-шинами обмена данными, на что потребовалось 25 миллионов оптических узлов. Сочетание приемлемого стандарта и согласие группы автопроизводителей перейти к нему привело к экономии за счет масштабов производства. Сейчас передатчик для системы MOST, работающий на скорости 25 Мбит/с, обходится компаниям в 4,5 доллара, и ожидается, что к 2008 г. цена упадет до трех долларов, а скорость вырастет до 150 Мбит/с. Изначально система MOST была рассчитана на полосу пропускания 25 Мбит/с, но к 2008 г. планируется увеличить скорость до 150 Мбит/с. Поскольку стандарт MOST был разработан не для критически важных систем в автомобилях, BMW разработал также ПОВ-сеть на 10 Мбит/с типа «звезда», под названием ByteFlight для управления такими важными элементами, как, например, подушка безопасности. BMW уже установила 7 миллионов передатчиков ByteFlight в своих автомобилях. Сейчас конструируется третья автомобильная сеть на основе ПОВ – Flexray. В США и Японии автопроизводители планируют ввести более мощные системы, работающие на скорости 400 Мбит/с, и принять стандарт IBD-1394. Ожидается, что эта система будет совместима со стандартом MOST.

Еще одна область применения ПОВ – локальные и домашние сети. Локальные сети распространяются уже повсеместно. Они есть у мелких и

средних предпринимателей, в отделениях крупных компаний, а также в жилых домах. Для мелкого бизнеса и домашних сетей скорости 10–100 Мбит/с – обычное дело, и вскоре ожидаются 1 Гбит/с. Несколько компаний, занимающихся источниками излучения для ПОВ, недавно представили передатчики на 10–100 Мбит/с для приложений на основе технологии автомобильного стандарта MOST. Названа цена этих передатчиков – 12 долларов за пару. Можно ожидать, что при новых возможностях полимерного оптического волокна, при наличии компактных коннекторов и недорогих передатчиков компании, которые занимаются проектированием сетей и прокладкой кабеля, скоро перейдут на использование ПОВ.

В связи с малыми размерами, весом, устойчивостью к ударам и вибрации, высокой скоростью передачи данных на малые расстояния всерьез рассматривается вопрос об использовании ПОВ в самолетах, танках, кораблях, вертолетах, ракетах и космических кораблях. В середине 1990-х гг. Агенство по передовым оборонным исследовательским проектам (DARPA) вложило крупные средства в разработку ПОВ и высокоскоростных соединений на его основе для военных нужд. К сожалению, технология в то время не была доведена до коммерческого использования. В эту программу были вовлечены такие крупные

109

лаки. По способу полимеризации они делятся на материалы теплового и ультрафиолетового (УФ) отверждения. К первым из них можно отнести силиконовые компаунды, превращающиеся в мягкую, прозрачную, каучукоподобную композицию.

Материалы ПЗП УФ-отверждения включают в себя кремнийорганические компаунды эпоксиакрилаты, уретанокрилаты. Они обладают существенным преимуществом по сравнению с материалами теплового отверждения, заключающимся в высокой скорости полимеризации, а также лучшую однородность покрытия, так как отверждение происходит практически мгновенно и при низкой температуре.

В качестве ПЗП могут выступать металлы и неорганические соединения. Металлы наносят на поверхность ОВ в процессе его вытяжки. Используются следующие металлы: олово, индий, свинец и алюминий. Неорганические ПЗП выполняются из SiN_4 , SiC , TiC , TiO_2 . На сегодняшний день также разработана технология покрытия световодов оболочкой из углерода.

При изготовлении ОВ с многослойным защитным полимерным покрытием в некоторых случаях между основными слоями наносят дополнительный промежуточный, получивший название буферного. Материал буферного слоя должен иметь высокое значение модуля Юнга и играть роль демпфера, уменьшающего воздействие защитных оболочек на ОВ. Буферный слой выполняется из мягкого полимерного материала, например из кремнийорганических или уретанакрилатных композиций.

3.3.6. Перспективы практического применения ПОВ

Исследователи рынка предсказывают рост продаж ПОВ на 15% к 2010 г. В настоящее время ПОВ в основном применяется в управлении производственными процессами и в автомобилестроении. В области управления производственными процессами спрос на ПОВ диктуется в основном потребностью в каналах передачи данных, не подверженных радиопомехам от устройств, находящихся под высоким напряжением, – таких как электросварочные аппараты, рентгеновские установки и оборудование для ионного легирования. Но особый интерес в сфере ПОВ сейчас представляет его инновационное использование в автомобилестроении. В 2000 г. в Германии специалисты компании Deimler–Benz убедили шесть других европейских производителей включая BMW и Volkswagen объединиться для разработки стандарта, названного «Информационно-ориентированные системы транспорта» (MOST, media-oriented system transport), и перейти на этот стандарт. Для координации усилий семь компаний сформировали организацию, названную MOST Cooperation. Сегодня в MOST Cooperation входят уже 16 автопроизводителей включая General Motors и более 60 производителей ПОВ. В конце 2003 г., спустя всего два года после выпуска первых

108

Обратная ΔT величина называется шириной спектра пропускания ($1/\Delta T$) и определяет ширину спектра модулирующего сигнала, который может быть передан по волокну с малыми потерями. Ширина спектра пропускания уменьшается с увеличением длины волновода. Максимальная скорость передачи информации в ОВ с малыми искажениями определяется шириной спектра пропускания модулирующего сигнала (в зарубежной технической литературе модулирующий сигнал называют электрическим сигналом).

Уширение светового импульса при распространении в волокне, связанное с различием времени распространения его компонент, называется дисперсией. Дисперсия, связанная с различием времени распространения световых лучей в волокне, называется межмодовой дисперсией (описание понятия моды оптического волокна и происхождение термина межмодовая дисперсия даны в разделе 1.1.2). Кроме межмодовой дисперсии уширение светового импульса и уменьшение ширины спектра пропускания вызывает хроматическая дисперсия и поляризационная модовая дисперсия, описанные соответственно в разделах 1.2.1 и 1.2.3.

В реальных ОВ аксиальные лучи переносят большую мощность, чем лучи, падающие под углом близким к критическому, поскольку последние обладают большими потерями. Кроме того, рассеяние в очень длинных волокнах приводит к обмену энергией между азимутальными и наклонными лучами. Оба этих фактора уменьшают разницу во времени

распространения и несколько увеличивают ширину спектра по сравнению с приведенной оценкой (1.1.4).

Для уменьшения разброса времени задержки различных световых лучей используются градиентные световоды. Показатель преломления таких световодов постепенно уменьшается с удалением от оси волокна (рис.1.1.4). Из-за такого изменения показателя преломления лучи, распространяющиеся под углом к оси, в среднем, распространяются в среде с меньшим показателем преломления, чем показатель преломления на оси волокна. Волноводы с параболическим профилем показателя преломления обладают очень малым разбросом времени задержки и обеспечивают широкую полосу пропускания.

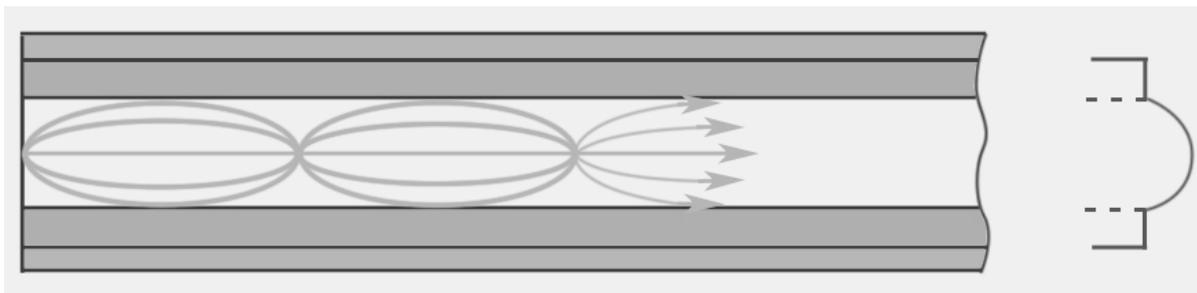


Рис.1.1.4. Ход лучей в градиентном оптическом волокне с параболическим профилем показателя преломления

В случае, когда диаметр сердцевины световода меньше 10—20 мкм,

25

приближение геометрической оптики не обладает достаточной точностью для описания распространения света в волноводе, и необходимо воспользоваться приближением волновой оптики. В частности, в световоде диаметром несколько микрометров, называемый одномодовым световодом, пропускает только очень простой световой пучок, называемый модой распространения. У одномодовых световодов принципиально отсутствует разброс временных задержек, описанный выше, и у них в принципе ширина полосы пропускания может достигать нескольких десятков ГГц на км.

1.1.2. Моды оптических волноводов

Прежде чем познакомиться с понятием моды оптического волокна (т.е. волновода с круглым сечением) рассмотрим сначала более простые моды *плоского волновода*, поскольку они представляют собой результат наложения (интерференции) двух плоских волн.

Плоскую волну можно описать как совокупность параллельных лучей. Волновой фронт (т.е. поверхность постоянной фазы) такой волны представляет собой плоскость. Предположим, что на торец световода падает плоская волна. Если угол падения на торец меньше угла входа волокна, то попавшие на торец световода лучи проходят внутрь и распространяются вдоль волновода. Лучи будут распространяться вдоль

ломанных линий, как показано на рис.1.5, отражаясь поочередно от каждой из поверхностей волновода.

В общем случае разность фаз между парами отраженных лучей не постоянна, поэтому в некоторых точках вдоль оси наблюдается интерференционное сложение амплитуд (конструктивная интерференция), в других - интерференционное гашение (деструктивная интерференция) вследствие чего интенсивность света меняется вдоль оси. Только некоторые выделенные совокупности лучей формируют интерференционную структуру, характеризующуюся постоянством распределения интенсивности вдоль волновода. Такие совокупности лучей и формируемая ими интерференционная структура называются модой распространения волновода или волноводной модой.

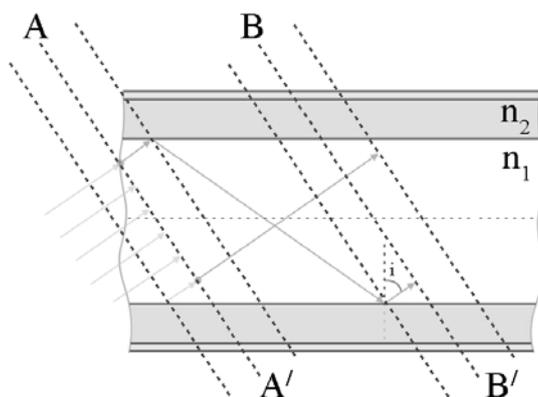


Рис.1.1.5. Длина оптического пути световых лучей в ОВ

размеров;

- высокая прозрачность для уменьшения потерь, обусловленных рассеянием света на границе раздела сердцевина - оптическая оболочка;

- достаточно высокая термостойкость; совместимость с материалом сердцевины.

В наибольшей степени этим требованиям удовлетворяет кристаллический полимер поли-4-метилпентен-1. Однако на границе раздела между аморфной сердцевиной и кристаллической оболочкой вследствие различия модулей упругости материалов могут возникать зазоры, что вызывает увеличение потерь. С этой целью поли-4-метилпентен-1 дополнительно обрабатывают.

Коэффициент затухания ПОВ с оболочкой из данного материала и сердцевиной из ПММА в смеси с метакрилатным сложным эфиром при 25°C составляет 210 дБ/км.

В качестве оболочки ПОВ могут также применяться: фторалкилметакрилаты совместно с винилиденфторидом со статическими связями; фторсодержащие полиолефины с привитым силановым полимером, сшитым молекулами воды.

3.3.5.3. Материалы буферного и защитных покрытий полимерных оптических волокон

Первичное защитное покрытие (ПЗП) наносится на поверхность ПОВ при его непосредственном изготовлении в едином технологическом процессе. Оно предназначено защищать ОВ от механических повреждений, влаги и других внешних факторов.

Существует несколько важных требований к полимеру, используемому для первичного покрытия. Он должен быть стоек при воздействии рабочих температур; реагенты должны быть жидкими при комнатной температуре и иметь достаточно низкую вязкость для наложения на световод в виде пленки толщиной 10-50 мкм концентричным слоем, постоянным по толщине. Реагирующие компоненты материала должны полностью превращаться в твердый полимер (свободный от растворителя или продуктов реакции) с гладкой поверхностью. Время полимеризации должно быть соотнесено со скоростью вытяжки ОВ. Показатель преломления полимера должен быть не менее 1,43. ПЗП должен иметь хорошую адгезию к материалу оптической оболочки световода и быть эластичным.

Первое защитное покрытие, как и другие виды покрытий, при его наложении на световод не должно вызывать остаточных напряжений по всей его длине или в локальных точках. Полимерное покрытие должно легко сниматься с поверхности волокна. При выборе материала необходимо учитывать ТКЛР, который должен приближаться к ТКЛР материала световода.

Большей частью в качестве материала световода ПЗП используются

107

его термоокисления. Ярко выраженное окрашивание наблюдается после выдержки ПС при 180-190°C в течение нескольких часов. Длительный нагрев (примерно 1000 ч) при умеренных температурах (около 60°C) почти не влияет на свойства ПС. Полистирол обладает высокой водостойкостью и морозостойкостью. Его свойства не изменяются при длительной выдержке в воде при температуре 50°C. Один из недостатков ПС - его малая атмосферостойкость. При совместном действии прямого солнечного света, влаги и тепла механические свойства значительно ухудшаются уже через несколько суток. С течением времени наблюдается сильное пожелтение полимера, уменьшается его прозрачность. Это практически исключает использование ПС на открытом воздухе. Минимальное значение коэффициента затухания 140 дБ/км получено на длине волны 0,67 мкм.

Преимущество ПС перед ПММА в том, что он намного легче поддается очистке. Для получения ПС достаточно нагреть его мономер. Коэффициент преломления у ПС - наибольший среди полимерных материалов, применяющихся для изготовления ПОВ.

ПС легко получить методом термоинициирования (ПММА - сложнее), его гигроскопичность на порядок меньше аналогичного показателя ПММА, а показатель преломления выше. Но ПС уступает ПММА по светопропусканию, термостойкости и механическим свойствам.

Недостатком ПММА и ПС их сополимеров являются сравнительно низкие теплостойкость и ударопрочность. Существенно выше эти показатели у поликарбонатов (ПК).

ПК относится к аморфным полимерам с незначительными оптическими потерями на рассеяние, обусловленными флуктуацией плотности, а также высокой когезионной энергией молекул. Поэтому он может рассматриваться в качестве материала для изготовления высокопрозрачного и термостойкого ПОВ.

Интервал рабочих температур ПК - от минус 120 до плюс 140°C. Для изделий из ПК характерны стабильность размеров, малая ползучесть. Физико-механические свойства стабилизированного ПК практически не изменяются после двухлетней экспозиции в условиях атмосферного старения. По прозрачности ПК несколько уступает ПММА и ПС.

Окно прозрачности с минимальными потерями для ПОВ на основе ПК находится на длине волны 0,765 мкм, а потери составляют 0,8 дБ/м.

3.3.5.2. Материалы для оболочки полимерных оптических волокон

Основные требования к материалам оптической оболочки ПОВ:

- показатель преломления материала оболочки должен быть меньше, чем показатель преломления сердцевины;
- высокая стойкость к загрязнению;
- технологичность, обеспечивающая стабильность геометрических

106

На рис.1.1.5 показано поперечное сечение плоского волновода не ограниченного в направлении, перпендикулярном плоскости страницы. Два изображенных луча пересекают поверхность раздела двух сред под углом i . Пунктирные линии AA' и BB', перпендикулярные лучам, представляют волновые фронты. **Оптическая разность хода** между двумя лучами *OPD* (*optical propagation difference*) и **разность фаз** φ определяются выражениями:

$$OPD = 2n_1 d \cos i ; \quad \varphi = 2n_1 k d \cos i \quad (1.1.5)$$

где d – диаметр сердцевины волновода, i – угол падения на границу раздела сердцевины и оболочки, $k = 1/\lambda$ - волновое число световой волны, λ - длина волны света в вакууме.

Кроме того, в соответствии с формулами Френеля, при отражении возникает дополнительный сдвиг $\Phi = 0$, когда i - близок к значению критического угла, и $\Phi = \pi/2$ для скользящего падения. Рассмотрим такое положение опорных волновых фронтов, при которых один из лучей проходит расстояние между ними без отражений, в то время как другой дважды отражается. Когда i меньше критического угла, лучи преломляются и мода не удерживается в пределах сердцевины волокна. Полная разность фаз ϕ_t между двумя лучами равна сумме набегов фаз,

связанных с разностью оптического пути и отражением. Когда полная разность фаз ϕ_t кратна 2π , лучи интерференционно складываются (происходит конструктивная интерференция). Это условие выполняется только для определённых углов падения.

$$\phi_t = 2n_1kd \cos i - 2\Phi = m(2\pi) \quad (1.1.6)$$

Пары лучей, наклоненные к оси одинаково, как это показано на рис.1.1.5 соответствуют волноводным модам только если выполнено условие интерференционного сложения (1.1.6). На языке волновой оптики каждая волноводная мода характеризуется определенной интерференционной структурой в направлении, перпендикулярном оси (т.к. компонента, перпендикулярная оси волновода, формирует интерференционную картину между двумя поверхностями) и бегущей волне вдоль оси. Таким образом, распределение электрического поля в поперечном сечении является результатом интерференции между двумя плоскими волнами. Распределение интенсивности в поперечном сечении оказывается пропорционально квадрату косинуса угла наклона плоских волн и не зависит от продольной координаты - z .

На рис.1.1.6 схематически изображено распределение электрического поля внутри волновода для нескольких значений параметра m .

Значения электрического поля на поверхностях раздела сердцевины и оболочки не равно нулю, что связано с наличием сдвига фазы при отражении. Это приводит к тому, что не все излучение сосредоточено в

27

сердцевине и часть мощности распространяется в оболочке.

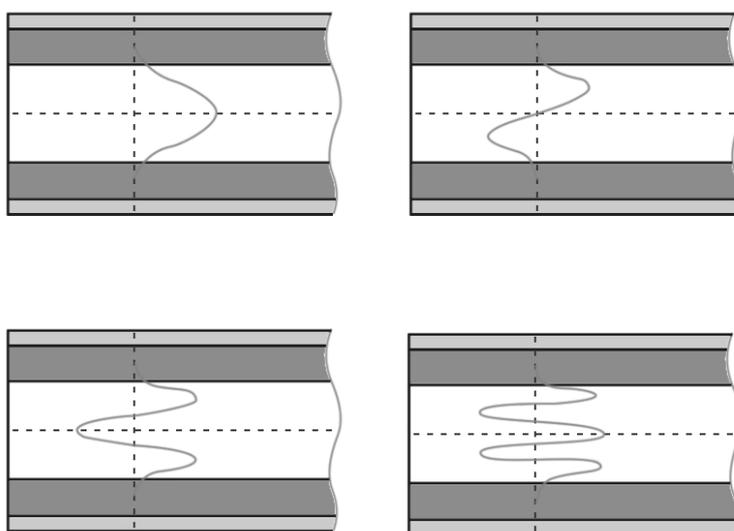


Рис.1.1.6. Моды плоского волновода, распределение электрического поля

Моды низкого порядка с малым значением m в соответствии с (1.1.5) падают на поверхность раздела под большими углами. Это означает, что они соответствуют лучам, которые распространяются вдоль волновода, падая на отражающие поверхности почти под скользящими углами.

Распределение моды низшего порядка $m = 0$ соответствует одному периоду косинуса, как показано на рис.1.1.6, и характеризуется монотонным распределением поля. Моды более высокого порядка характеризуются осциллирующим распределением поля. Направляемая мода наивысшего порядка пересекает поверхность под углом, значение которого почти равно величине критического угла. Лучи, которые преломляются на поверхности волновода, соответствуют ненаправляемым модам. Отражение от границ сердцевины не накладывает на них специальных условий, и существует непрерывное множество таких волн в отличие от дискретного ряда направляемых мод. Некоторые преломленные на границе сердцевины и оболочки лучи испытывают полное внутреннее отражение от внешней границы оболочки, если показатель преломления защитного слоя меньше показателя преломления сердцевины (или если защитный слой отсутствует). Формируемые такими лучами моды называются модами оболочки.

Номер конкретной моды плоского волновода может быть найден из (1.1.6) при $\phi_i = 2m\pi$. Фазовый сдвиг Φ при отражении всегда меньше, чем π и им можно пренебречь для больших значений m . Номер моды увеличивается от нуля у моды с волновым вектором, почти параллельным оси, до максимального значения M у моды с углом падения i , почти равным критическому углу. Поскольку каждой моде соответствует положительное целое число или ноль, то полное число мод плоского волновода равно $M + 1$. Когда $m = M$, угол i очень близок к критическому углу i_c , поэтому $\Phi = 0$ и (1.1.6) принимает вид:

28

мономера и поглощением влаги. С целью повышения теплостойкости ПММА модифицирует используя: сополимеризацию метилметакрилата с α -метилстиролом; растворение поли- α -метилстирола в мономерном метилметакрилате с дальнейшей полимеризацией метилметакрилата; сополимеризацию метилметакрилата с амидом N-аллималеиновой кислоты; сополимеризацию метилметакрилата с α -метилстиролом и имидом малеиновой кислоты. Перечисленные способы позволяют улучшить теплостойкость получаемых полимеров, однако они являются недостаточными по нескольким причинам. Например, скорость полимеризации и эффективность исключительно малы, так что их практическое применение незначительно. Полученные полимеры обладают плохими механическими и оптическими свойствами, подвержены заметному изменению цвета при переработке. Для предотвращения ухудшения характеристик полимера при тепловой обработке в его состав вводят антиокислители типа сложного эфира фосфорной кислоты (трикрезилфосфит, крезилфосфит и др.), фенола, серы и амина. Полимер может быть получен реакцией полимеризации эмульсии, суспензии, объемной полимеризации и пр. Показатель преломления полимера - 1,53.

Полимерные материалы на основе алкилметакрилатов, относящихся к классу предельных углеводородов, характеризуются высокими значениями T_g . Эти материалы разработаны фирмой Sumitomo Chemical Co (Япония). В структуру материала входят: А - алициклическая углеводородная группа, R - алкильная группа (алифатический одноатомный радикал). Фирма предложила вводить в метилметакрилат сополимеры и трехзвенные полимеры (полимеры из трех мономеров) борнил-, ментол-, фенхол-, адамантилметакрилаты. Применение этих материалов в качестве сердцевины ПОВ позволяет эксплуатировать волокна при температуре 150°C (в качестве материала оптической оболочки используют различные сополимеры винилиденфторида). Коэффициент затухания ПОВ с сердцевиной из этого материала остается постоянным даже при воздействии температуры 125°C в течение 6-и часов. Недостаток этих материалов в достаточно высоком коэффициенте затухания - 350-500 дБ/км при комнатной температуре.

Для использования ПОВ на основе полиметилметакрилата в ближней ИК-области с минимальными потерями на абсорбцию его подвергают специальной обработке с целью замены водорода дейтерием (дейтерированный ПММА). Потери в ПОВ с сердцевиной из дейтерированного ПММА (ПММА-Д8) имеют минимум на длине волны 0,68 мкм, равный 20 дБ/км. Однако этот материал очень чувствителен к влиянию воды, и его потери в видимой и ближней ИК-области могут резко возрасти. Полистирол (ПС), второй по прозрачности и распространенности среди органических стекол, незначительно отличается от ПММА по механическим свойствам. В видимой области спектра ПС имеет практически ту же прозрачность, что и ПММА. Желтизна ПС растет при

аморфности, обеспечивающей отсутствие способности к кристаллизации как в условиях эксплуатации, так и при воздействии низких и высоких температур, механических деформаций (растяжение, изгиб, сжатие), которым подвергаются оптические волокна при изготовлении. Высокая степень аморфности способствует достижению полимерами идеального стеклообразного состояния с высоким светопропусканием и минимальным рассеянием, что особенно важно при использовании ПОВ в видимой и УФ-области спектра.

Атомный состав и молекулярная структура обуславливают реологические свойства полимеров. Влияние молекулярно-массового распределения на свойства ПОВ пока еще детально не изучено. Материалы для ПОВ, кроме рассмотренных выше требований, должны быть взаимно совместимы, так как ПОВ являются двух- или многокомпонентными изделиями. Материалы сердцевины и оптической оболочки должны совмещаться по реологическим характеристикам. Соответствие этих материалов по реологии особенно важно при изготовлении ПОВ методом экструзии.

Для того чтобы в процессе получения ПОВ была сформирована бездефектная граница раздела, полимеры должны иметь высокие адгезионные свойства. В то же время материалы должны обладать взаимной химической индифферентностью и малой растворимостью. В противном случае произойдет размывание отражающей границы раздела сред, что приведет к высоким потерям на излучение. Материалы сердцевины и оптической оболочки должны совмещаться между собой по ТКЛР. Если ТКЛР оболочки меньше, чем у сердцевины, оболочка находится в сжатом состоянии, что повышает механическую прочность ПОВ.

Количество материалов, применяемых при изготовлении ПОВ, достаточно велико. ПОВ изготавливают путем комбинирования этих материалов, один из которых используют для получения сердцевины, а другой для получения оптической оболочки.

3.3.5.1. Материалы для сердцевины полимерных оптических волокон

Одно из первых мест среди прозрачных полимерных полимеров занимает полиметилметакрилат (ПММА). Отличительной его характеристикой является высокая прозрачность и атмосферостойкость (по сравнению с другими прозрачными полимерами). Термостабильность ПММА определяется реакцией деполимеризации. Интенсивная деструкция ПММА происходит при 250°C. Гораздо раньше наблюдается выделение летучих компонентов и образование пузырей. При температуре выше 230°C появляется желтое окрашивание.

Недостатком ПММА является значительная краевая неоднородность (градиент показателя преломления), объясняемая испарением остаточного

104

$$2M\pi \approx 2n_1kd \cos i_c \quad (1.1.7)$$

Если воспользоваться выражениями (1.1.2) и (1.1.3) можно переписать приближенное равенство (1.1.7) в виде:

$$M \approx (2d / \lambda) \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (1.1.8)$$

В плоском волноводе направляемые моды соответствуют парам лучей, одинаково наклоненным к оси, в круглых волноводах такие пары лучей необходимо заменить сложным конусом лучей. В случае круговой симметрии физическая интерпретация мод как стационарных в поперечном сечении интерференционных структур или стоячих волн аналогична, хотя и не столь наглядна. Кроме того, стоячие волны формируются и в азимутальном направлении, следовательно, для полного описания моды круглого волновода требуются два индекса. Для идентификации мод оптического волокна круглого сечения применяется следующее обозначение *HERA*, где аббревиатура *HE* обозначает

электромагнитную волну, R – продольный индекс, A – азимутальный индекс. Мода самого низкого порядка или *фундаментальная мода* обозначается HE_{10} . Для характеристики условий распространения световых волн ОВ, в частности числа мод распространения, вводят нормированную частоту - V , (структурный параметр), определяемую следующим выражением:

$$V = (2\pi a / \lambda)(NA) \quad (1.1.9)$$

где λ - длина волны в вакууме, a – радиус сердцевинки волокна. Как видно из (1.1.9), введенный параметр по порядку величины равен правой части выражения (1.1.8) определяющего число периодов интерференционной картины в поперечном сечении волокна при максимально возможном угле падения света на границу раздела сердцевинки и оболочки. Приближенное число мод круглого волокна пропорционально квадрату нормированной частоты и зависит от структуры волокна (см. 1.2.1).

1.1.3. Константа распространения и фазовая скорость

Волновое число k можно рассматривать как вектор, направление которого совпадает с направлением распространения света в объемных средах. Этот вектор называется **волновым вектором**. В среде с показателем преломления n_1 величина волнового вектора равна kn_1 . В случае распространения света внутри волновода направление распространения света совпадает с направлением проекции β волнового вектора k , на ось волновода

$$\beta = n_1 k \sin i = n_1 k \cos \theta \quad (1.1.10)$$

29

где θ - угол, дополняющий угол i до 90° (или угол между лучом и осью, как показано на рис.1.1.7), β - называется **константой распространения** и играет такую же роль в волноводе как волновое число k в свободном пространстве. В соответствии с (1.1.6) и (1.1.10) θ и i зависят от длины волны.

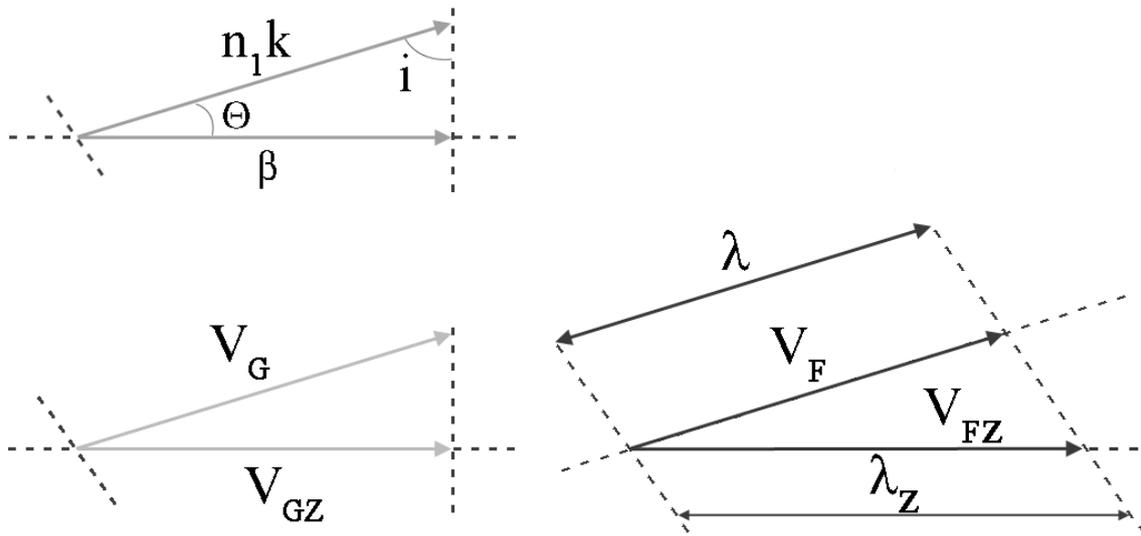


Рис.1.1.7. Волновой вектор и константа распространения

Угол падения i изменяется между i_c и $\pi/2$. При $i = i_c$, $\beta = n_1 k \sin i_c$ или kn_2 . При $i = \pi/2$, $\beta = k n_1$. Следовательно:

$$kn_2 < \beta < kn_1 \quad (1.1.11)$$

Таким образом, величина константы распространения внутри волновода всегда лежит между значениями волновых чисел плоской световой волны в материале сердцевины и оболочки. Если учесть, что $c = \omega/k$, то можно переписать это соотношение на языке фазовых скоростей

$$c/n_1 < V_F < c/n_2 \quad (1.1.12)$$

Фазовые скорости мод распространения $V_F = \omega/\beta$ заключены между фазовыми скоростями волн в двух объемных материалах. По аналогии с показателем преломления объемных сред можно ввести **эффективный показатель преломления** волновода

$$n_e = n_1 \cos \theta \quad (1.1.13)$$

Из приведенного анализа следует, что n_e зависит от индекса моды m в случае плоского волновода или от индексов R и A в случае оптического волокна. Согласно (1.1.9) значение n_e для направляемой моды заключено между n_2 и n_1 . Если n_e меньше n_1 , пучок не удерживается волноводом.

Различие фазовых скоростей мод приводит к искажению входного пучка света по мере его распространения в волокне.

140°C. Возможность работы полимера при повышенной температуре определяется температурой стеклования T_g . Для полистирола и полиметилметакрилата T_g равна 100-105°C. Однако наличие в этих материалах даже 1% свободного мономера оказывает на них пластифицирующее действие, которое уменьшает T_g до 90°C и даже ниже.

Рэлеевские потери увеличиваются с повышением температуры, однако этот процесс до T_g незначителен. Увеличение потерь на рассеяние является процессом обратимым, однако, воздействие повышенной температуры в течение длительного периода времени может привести к окислению материала и уменьшению прозрачности, особенно в УФ-области спектра.

Повышенная температура отрицательно влияет на механическую прочность ПОВ и ускоряет процессы релаксации. Последний процесс - установление термодинамического равновесия (полного или частичного) - необратимый.

При создании теплостойких полимеров для ПОВ необходимо уделять внимание связи между T_g и эластичностью материала. Эта связь очень сложна и определяется не только молекулярным весом и его распределением, но и образованием сетки волосных трещин, механизмом повышения прочности за счет ориентации молекул. Полимеры с малым значением T_g имеют при комнатной температуре более высокую эластичность, чем полимеры с высоким значением T_g .

3.3.5. Материалы, применяемые для изготовления полимерных оптических волокон

Химические формулы мономеров, из которых получены оптические полимерные материалы и световоды, приведены в таблице.

Таблица 3.3.1. Мономеры, применяющиеся для изготовления полимерных световодов	
Химическая формула	Название мономера (условное сокращение)
$CH_2-C(CH_3)COOCH_3$	метилметакрилат(ММА)
$CH_2=C(CH_3)COOCH_2CF_2CF_2H$	тетрафторпропилметакрилат(МН-1)
$CH_2-C(CH_3)COOCH_2CF_2CF_3$	пентафторпропилметакрилат(МФ)
$CH_2=CHCOOCH_3$	метилакрилат(МА)
$CH_2=CHCOOCH_2(CF_2CF_2)_2H$	октафторамилакрилат(АН-2)
$CH_2=CF_2COOCH_2CF_2CF_2H$	тетрафторпропилфторакрилат(ФН-1)
$CH_2-CHC_6H_5$	стирол

Одной из основных проблем при разработке технологии изготовления ПОВ является выбор исходных материалов. До настоящего времени единой схемы выбора не существует. Можно считать, что решающее значение имеют атомный состав, молекулярная структура и степень чистоты материалов. Эти факторы определяют весь комплекс термодинамических, физико-механических и оптических свойств полимеров для ПОВ. Материалы должны обладать высокой степенью

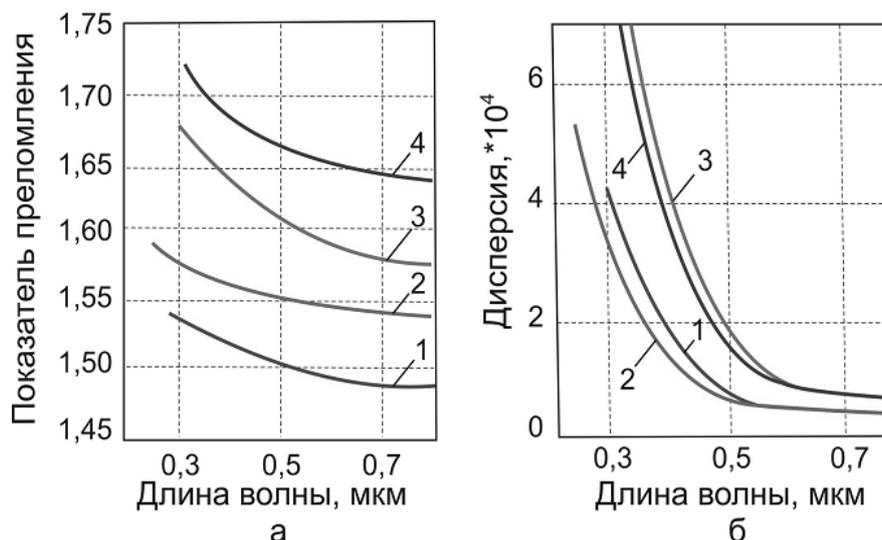


Рис. 3.3.3. Зависимость показателя преломления (а) и дисперсии (б) различных веществ от длины волны.

1 - полиметилметакрилат; 2 - кварц; 3 - полистирол; 4 - флинт

Изменение показателя преломления от температуры для прозрачных полимерных материалов составляет обычно $(1-2) \cdot 10^{-4}$ на 1°C , то есть на порядок выше соответствующего температурного коэффициента лучших неорганических стекол.

Резкое увеличение дисперсии в сторону коротких волн (рис.3.3.3,б) связано с влиянием края сильного поглощения в УФ-области. Для полистирола этот край ближе к видимой области, чем для акриловых полимеров, поскольку последние обладают большей прозрачностью в УФ-области.

Актуальной технической задачей является создание материалов с заданными значениями показателей преломления. Для этого можно использовать сополимеры, показатели преломления которых занимают промежуточное положение между значениями для гомополимера.

С целью повышения показателя преломления в полимерные материалы вводят ароматические кольца, галогены (кроме фтора). Уменьшение показателя преломления до минимальной величины достигается введением фтора.

Показатель преломления зависит от метода полимеризации, влияющего на структуру полимера, от содержания незаполимеризовавшегося мономера и других факторов. Диффузия остаточного мономера к поверхности образца и его испарение с поверхности могут приводить к неоднородности материала по показателю преломления. Как правило, колебания показателя преломления проявляются в четвертом десятичном знаке.

3.3.4. Влияние температуры на характеристики полимеров для оптических волокон

Применение ПОВ в автомобилестроении и аэрокосмической технике требует обеспечения их длительной эксплуатации при температурах 80-

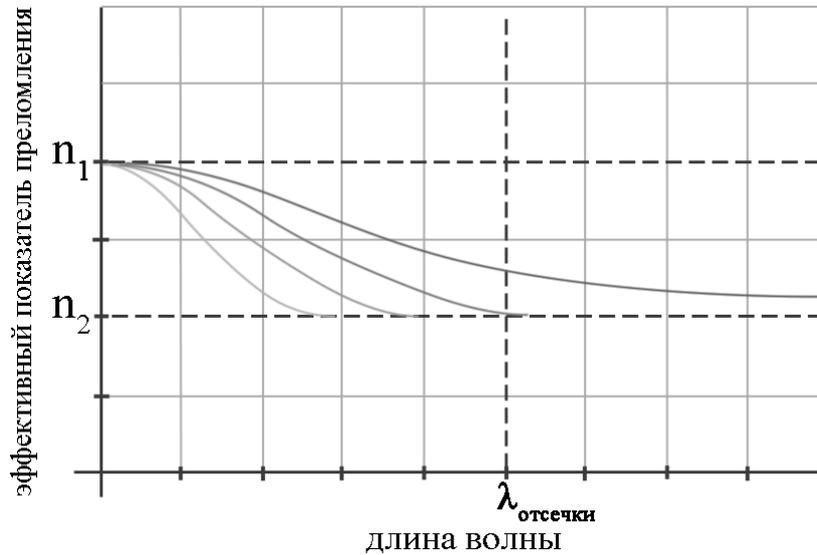


Рис.1.1.8. Зависимости эффективного показателя преломления n_e от длины волны для нескольких мод низшего порядка оптического волокна

Скорость распространения светового сигнала или групповая скорость - это скорость распространения огибающей светового импульса. В общем случае групповая скорость V_G не равна фазовой. (Именно групповой скорости соответствует средняя скорость распространения луча по криволинейной траектории в волокне в трактовке геометрической оптики.) По аналогии с эффективным фазовым показателем преломления можно ввести эффективный групповой показатель преломления $n_{Ge} = c/V_{Ge}$.

Эффективный групповой показатель преломления, а следовательно и групповая скорость, для длины волны λ может быть рассчитан по эффективному фазовому показателю преломления

$$n_{Ge} = n_e - \lambda \frac{dn_e}{d\lambda} \quad (1.1.14)$$

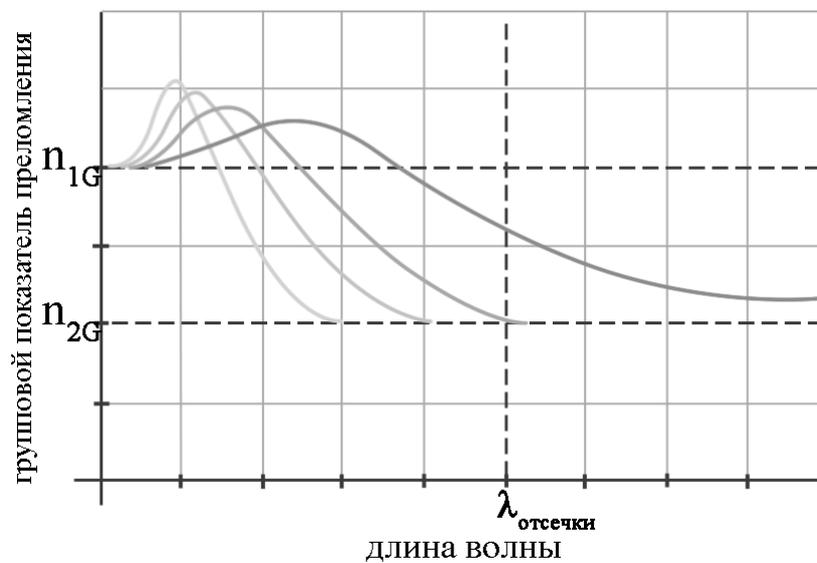


Рис.1.1.9. Зависимости эффективного группового показателя преломления n_G от длины волны для нескольких мод низшего порядка оптического волокна

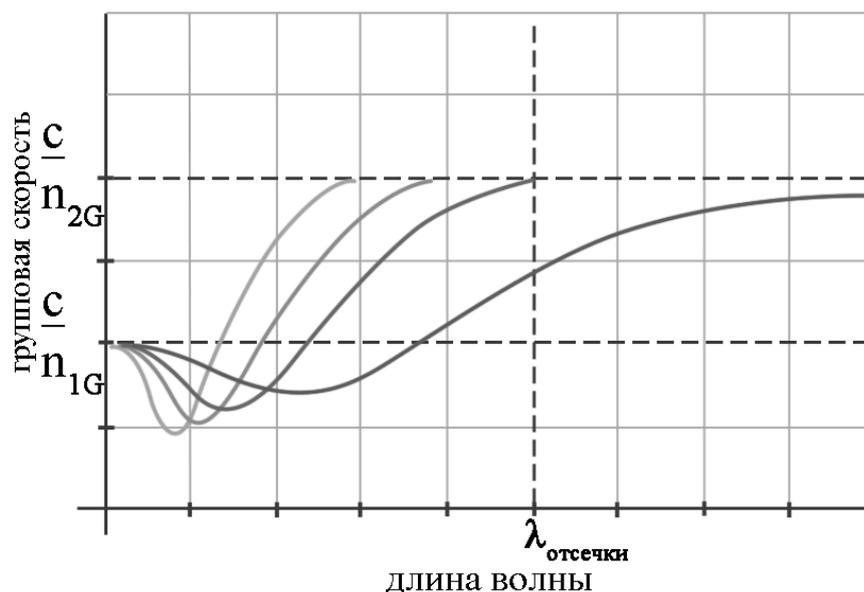


Рис.1.1.10. Зависимости групповой скорости света от длины волны для нескольких мод низшего порядка оптического волокна

В волокне с параболическим градиентным показателем преломления наклонные лучи распространяются по криволинейной траектории, которая, естественно длиннее, чем путь распространения аксиального луча. Однако из-за уменьшения показателя преломления по мере удаления от оси волокна скорость света при приближении к оболочке волокна возрастает, так, что в результате всего этого время распространения по волокну оказывается примерно одинаковым. Таким образом, "дисперсия", или изменение времени распространения различных мод, сводится к минимуму, а ширина полосы пропускания волокна увеличивается.

Точный расчет показывает, что разброс групповых скоростей мод различного индекса в таком волокне существенно меньше, чем в волокне со ступенчатым профилем показателя преломления.

В плоском волноводе при достаточно малом d условие (1.1.6) выполняется только для $m=0$. В таком волноводе может распространяться только мода самого низкого порядка. Из (1.1.8) положив $m=1$ найдем границу появления второй моды. Тогда условие

$$(2d / \lambda) NA \leq 1 \quad (1.1.15)$$

обеспечивает одномодовый режим работы. Волновод или волокно, которые могут поддерживать распространение только моды самого низкого порядка, называются **одномодовыми волноводами**. Одномодовый волновод можно получить, сделав либо d , либо NA достаточно малыми.

В круглых волноводах (волокнах) аналогичным образом можно обеспечить распространение только моды низшего порядка выбором радиуса сердцевины a или числовой апертуры. Соответствующее условие имеет вид:

определяющие окраску соединения (если поглощение оказывается в видимой области), называются хромофорами. Как правило, этот термин относится к группам, обуславливающим поглощение в интервале длин волн от 0,2 до 1,0 мкм. Присутствие в молекуле вблизи хромофорных групп других групп - таких, как OH , NH_2 , OCH_3 , увеличивает длину волны поглощения (батохромный эффект). Такие группы, которые сами не поглощают, но повышают интенсивность поглощения и смещают его в длинноволновую область спектра, называют ауксохромами. Смещение полос поглощения и изменение их интенсивности наблюдается и при взаимодействии хромофорных групп между собой.

Если исходить из предпосылки, что состояние молекулярных связей у полимеров при температуре выше температуры стеклования сохраняется, то можно считать, что потери на собственное рассеяние у полимерных материалов обусловлены рэлеевским рассеянием, возникающим вследствие флуктуации плотности полимеров. У аморфных полимеров отмечаются лишь обычные флуктуации плотности, которые можно наблюдать в жидком состоянии, и не зафиксировано анизотропии, не свойственной жидкости. Существенные структурные изменения у жидкого и твердого аморфного полимера отсутствуют.

Рассеяние (мутность), обусловленное флуктуациями плотности изотропной жидкости, можно описать уравнением:

$$\alpha_p = 434 \frac{8\pi^3}{3\lambda_0^4} kT \left[\frac{(n^2 - 1)(n^2 + 2)}{3} \right]^2$$

где k - постоянная Больцмана; T - абсолютная температура; λ_0 - длина волны в вакууме; n - показатель преломления.

В ультрафиолетовой и видимой областях спектра так же, как и в инфракрасной, возможно появление постороннего примесного поглощения, которое ухудшает оптические свойства полимеров и может вызвать окраску. Примесные группы могут возникнуть не только в процессе полимеризации, но и в результате структурных превращений в полимере и при переработке или старении, что часто приводит к окрашиванию полимеров.

Значительные потери возникают при загрязнении материалов примесями, электронные переходы которых поглощают энергию в диапазоне 0,5-1,0 мкм. Из примесей следует отметить, прежде всего, гидроксильную группу и ионы переходных металлов - железа, хрома, меди, марганца, титана, ванадия, кобальта, никеля и пр. Влияние некоторых перечисленных примесей на затухание ПОВ довольно значительно. Причем наиболее критическими примесями являются ионы железа и хрома. Зависимость показателя преломления от длины волны для наиболее распространенных оптических полимерных материалов и неорганических стекол приведена на рис.3.3.3.

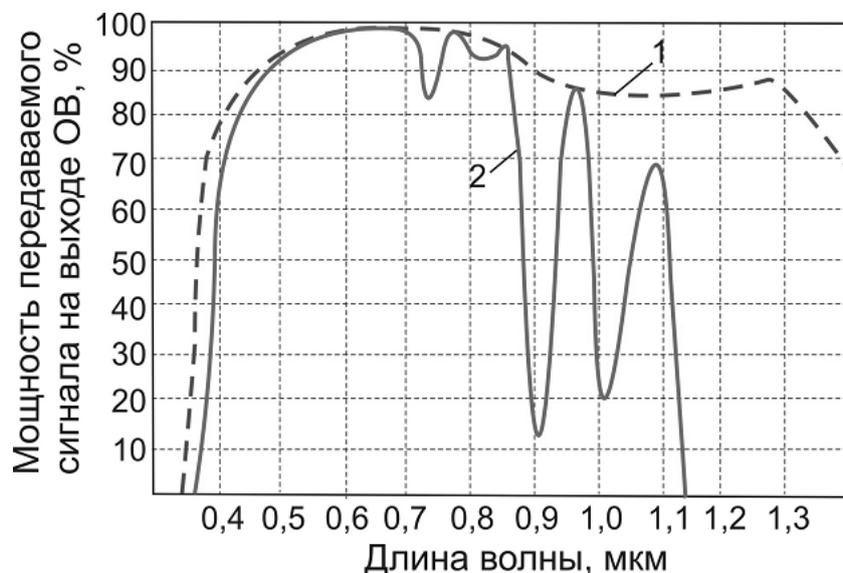


Рис. 3.3.2. Зависимость мощности передаваемого сигнала на выходе ОВ от длины волны. 1 - кварцевое ОВ; 2 - ПОВ

Такие колебания сопровождаются изменением длин связей, соединяющих атомы (валентные колебания), и валентных углов между связями (деформационные колебания).

В каждом молекулярном колебании принимают участие в той или иной степени все атомы молекулы. Тем не менее, можно выделить такие колебания, в которых участвуют главным образом определенные атомы или группы атомов, роль остальных атомов молекулы оказывается незначительной. Частоты этих колебаний сохраняются в спектрах различных соединений и называются характеристическими.

В спектрах поглощения тем больше полос и меньше окон прозрачности, чем сложнее химическое строение полимера (наличие в его макромолекуле ароматических колец, гетероатомов, кратных связей и пр.).

Макромолекулы с одной и той же химической структурой, но различной конфигурацией или конформацией (молекулы одной и той же химической структуры, отличающиеся геометрической формой благодаря возможности поворотов отдельных звеньев вокруг простых связей, соединяющих эти звенья) имеют разные колебания, а, следовательно, и различия в спектрах поглощения. Полимерные цепи могут содержать также примесные группы разного происхождения. Эти группы в молекулах полимера могут появиться в процессе полимеризации или образоваться в результате деструктивных и окислительных процессов при его переработке.

Кроме того, полимеры могут содержать остатки инициаторов, растворителей, катализаторов, а также специальные добавки. Добавки вводят для сохранения свойств полимеров при их переработке и эксплуатации (стабилизаторы) или для модификации свойств полимерного материала (пластификаторы, наполнители, красители, антистатика и пр.). Все соединения, которые образуются или вводятся в полимеры, в той или иной мере влияют на их оптические свойства.

Группы, избирательно поглощающие в этих областях спектра и

$$V = (2\pi a / \lambda) NA \leq 2.4 \quad (1.1.16)$$

Таким образом, можно заключить следующее. В волокне с относительно большим диаметром сердцевины (50 мкм и больше) при освещении его светом с произвольной длиной волны λ возбуждается большое число мод распространения. Каждая мода распространения волокна характеризуется не изменяющимся вдоль волокна распределением интенсивности в поперечном сечении, постоянной распространения β , а также фазовой V_F и групповой V_G скоростями распространения вдоль оптической оси волновода. Постоянные распространения β , фазовые V_F и групповые V_G скорости зависят от индекса моды и различны для разных мод распространения. Из-за различия фазовых скоростей мод волновой фронт и распределение поля в поперечном сечении изменяются вдоль оси волокна.

Из-за различия групповых скоростей мод (им можно поставить в соответствие скорость распространения проекций световых лучей в приближении геометрической оптики) световые импульсы расширяются, и это явление называется **межмодовой дисперсией**.

В одномодовом волокне существует только одна мода распространения, поэтому такое волокно характеризуется постоянным распределением поля в поперечном сечении, в нем отсутствует межмодовая дисперсия и оно может передавать излучение с очень широкой полосой модуляции, ограниченной только другими видами дисперсии (см. раздел 1.2.3).

Увеличение длительности светового импульса в результате совместного действия нескольких видов дисперсии, как правило, может быть записано в виде:

$$\Delta T_{OUT} = \sqrt{(\Delta T_{IN})^2 + (\Delta T_{mm})^2 + (\Delta T_{hr})^2 + (\Delta T_{PMD})^2} \quad (1.1.17)$$

где ΔT_{out} и ΔT_{in} - длительности выходного и входного импульсов соответственно, ΔT_{mm} , ΔT_{hr} и ΔT_{PMD} - уширение импульсов под действием межмодовой, хроматической и поляризационной модовой дисперсий соответственно.

1.2. Характеристики оптического волокна

1.2.1. Оптические характеристики волокна

Основными оптическими характеристиками многомодового волокна являются следующие:

- затухание
- широкополосность
- межмодовая дисперсия
- дифференциальная групповая задержка

- диаметр сердцевины
- профиль показателя преломления
- числовая апертура.

Затухание света в многомодовом волокне вызывается теми же механизмами, что и в одномодовом. Они будут рассмотрены в разделе 1.2.2.

Широкополосность и межмодовая дисперсия многомодового волокна существенно зависят от профиля показателя преломления. Наибольшей широкополосностью обладают оптические волокна с параболическим градиентным профилем показателя преломления.

Профилем показателя преломления оптического волокна называется зависимость показателя преломления n волокна от расстояния r от оси волокна. Для описания профиля показателя преломления многомодового волокна используется нормализованная функция:

$$n(r) = n_1 \left[1 - \Delta \left(\frac{r}{a} \right)^g \right] \text{ при } r < a$$

(1.2.1)

$$n(r) = n_2 \text{ (постоянная величина) при } r > a ,$$

где n_1 – максимальное значение показателя преломления сердцевины, $\Delta = \frac{NA^2}{2n_2^2} = \frac{n_2^2 - n_1^2}{2n_2^2}$ – нормированная разность показателей преломления, r – расстояние от оси волокна, a – радиус сердцевины, n_2 – показатель преломления оболочки [2]. Параметр характеризует профиль показателя преломления.

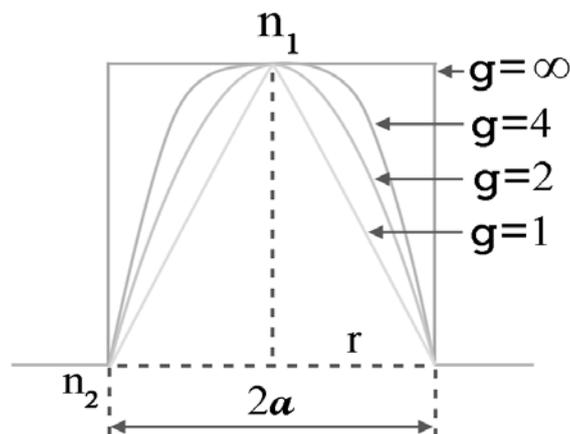


Рис.1.2.1. Профили показателя преломления многомодового волокна:

- $g = \infty$ - профиль ступенчатый
- $g = 1$ - профиль треугольный
- $g = 2$ - профиль параболический

Только при $g = \infty$ показатель преломления сердцевины n_1 является постоянной величиной для всей сердцевины. В других случаях показатель преломления зависит от r . Такое волокно называется **градиентным волокном**. В настоящее время практическое применение в ВОСП находит

основном они используются в системах связи и освещения, автомобилестроении, медицине, для изготовления датчиков, информационных табло и панелей, бытовых электроприборов и пр.

ПОВ применяются в локальных волоконно-оптических системах связи на участках длиной до 3 км, а также для внутриобъектовой связи. Стоимость кабелей на их основе на 70-90% дешевле, чем кабелей на основе кварцевых волокон.

На основе ПОВ изготавливают гибкие изолирующие вставки, которые применяются на электрических подстанциях для обеспечения безопасности персонала, обслуживающего системы управления мощными выключателями.

Высокая гибкость ПОВ позволяет выпускать волокна диаметром свыше 400 мкм, что облегчает условия ввода в них излучения и стимулирует их применение.

3.3.3. Оптические свойства полимеров

ПОВ предназначены в основном для работы в видимой области спектра. За пределами видимой области в ультрафиолетовой и ближней инфракрасной зонах светопропускание используемых полимеров падает и эффективность их применения снижается (рис.3.3.2).

Оптические потери ПОВ состоят из собственного поглощения, которое зависит от структуры и качества материала и несобственного поглощения, определяемого загрязнениями, металлами переходной группы и оптическими примесями. Кроме того, несобственные потери вызывают неровности на границе сердцевины и оболочки, а также двойное лучепреломление материала. Влияние несобственных факторов можно уменьшить за счет усовершенствования технологии изготовления ПОВ.

Таким образом, предельные характеристики потерь ПОВ могут быть установлены, если принимать во внимание потери на собственное поглощение и рассеяние материала. Поглощение света полимером в ИК-области спектра связано с возбуждением колебаний молекул. В ближней и средней ИК-областях (0,75-25 мкм) проявляются внутримолекулярные колебания, при которых меняется относительное расположение ядер атомов, составляющих молекулу.

3.3.2. Общая характеристика полимерных оптических волокон

Полимерные оптические волокна (ПОВ) обладают исключительной гибкостью при относительно больших диаметрах и способностью выдерживать без разрушения многократный изгиб. Так, радиус изгиба ПОВ диаметром 0,75 мм определяется оптическими, а не механическими свойствами. При диаметре 1,5 мм минимально допустимый радиус изгиба этих материалов равен 8 мм. Кроме того, они обладают малой плотностью, хорошей механической прочностью, радиационной стойкостью, а также технологичны. Из существующих типов оптических волокон наибольшее относительное удлинение имеют полимерные волокна (рис. 3.3.1). В частности, ПОВ из метилметакрилата могут выдерживать обратимые деформации, равные 13%. У более хрупких полимеров, таких, как полиэфир, упругая деформация составляет 6%. Путем предварительной ориентации молекул полимера можно подавить рост микротрещин и увеличить эластичность.

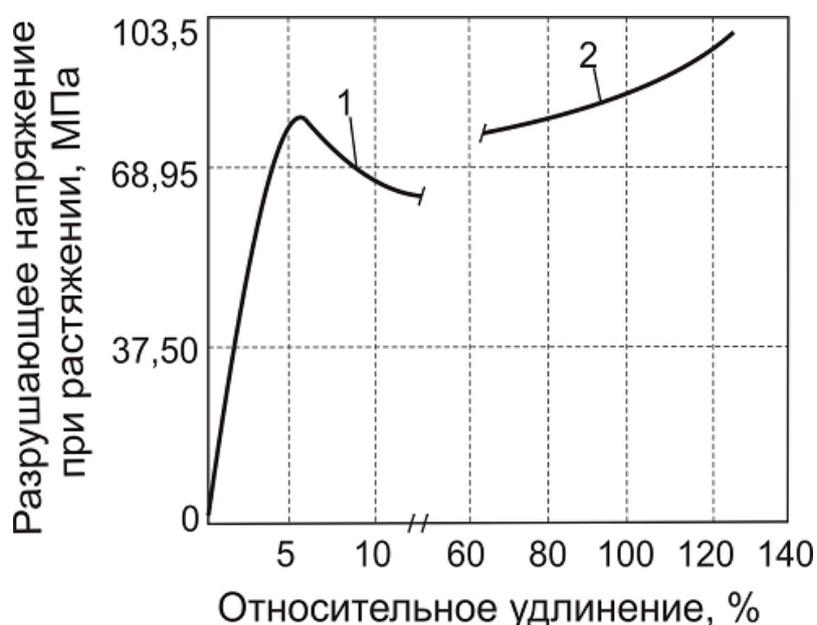


Рис. 3.3.1. Зависимость разрушающего напряжения при растяжении в оптических волокнах от относительного удлинения.

1 - кварцевое волокно, 2 - полимерное волокно с сердечником из полиметилметакрилата

Показатель преломления изменяется от 1,32 - для материалов на основе акрилатов со значительными добавками фтора; до 1,6 - для некоторых фенольных смол. Большой апертурный угол (около 60°) облегчает процесс согласования ПОВ при их соединении, что снижает требования к точности изготовления элементов соединителя. Оптические соединители для ПОВ изготавливают из термопластичных материалов методом литья под давлением, что снижает их стоимость. Высокие оптические потери и температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР), низкая абразивная прочность, склонность к быстрому старению, малый коэффициент широкополосности сужают область их применения. В

волокно, профиль показателя преломления которого является параболическим ($g = 2$), поскольку именно такое волокно обеспечивает минимальную величину межмодовой дисперсии и максимальную широкополосность.

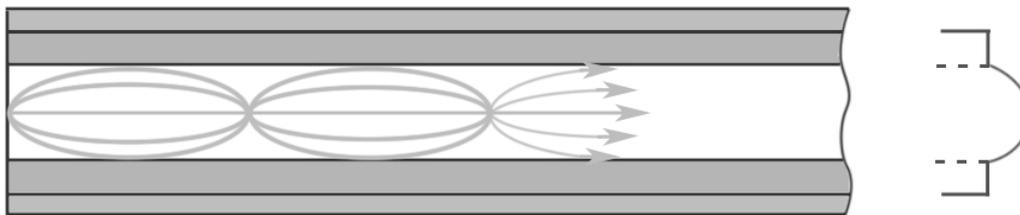


Рис.1.2.2. Ход лучей в градиентном волокне

Лучи 2 и 3 проходят больший путь чем аксиальный луч 1 ($L_3 > L_2 > L_1$), но их средние скорости также больше ($V_{3cp} > V_{2cp} > V_{cp1}$), поэтому задержки всех лучей примерно одинаковы:

$$\left(\frac{L_1}{V_{1cp}} = \frac{L_2}{V_{2cp}} \approx \frac{L_3}{V_{3cp}} \right)$$

Разность показателей преломления сердцевины и оболочки определяет числовую апертуру ОВ (см. раздел 1.1, формулу (1.1.3)). Большие диаметр сердцевины и числовая апертура волокна облегчают ввод светового сигнала в волокно и соединение волокон, но уменьшают его широкополосность. Число мод многомодового волокна определяется нормированной частотой (см. раздел 1.1)

$$N = \frac{V^2}{2} * \frac{g}{g+2} \quad (1.2.2)$$

Поскольку V пропорционально радиусу волокна и числовой апертуре (1.1.9) то число мод быстро растет с увеличением этих параметров.

Неравенство групповых скоростей распространения приводит к увеличению длительности световых импульсов из-за различного времени распространения модовых компонент импульса. Это явление называется **межмодовой дисперсией** (см. раздел 1). При распространении в волокне гармонически модулированных световых волн дисперсия приводит к уменьшению амплитуды модуляции выходного сигнала с увеличением частоты модуляции и постоянной величина амплитуды модуляции входного сигнала.

Зависимость от частоты отношения комплексной амплитуды модуляции выходного сигнала к комплексной амплитуде модуляции входного сигнала называется **передаточная функцией** - $H(f)$. Зависимость модуля передаточной функции от частоты называется **амплитудно-частотной характеристикой**, а зависимость фазы от частоты модуляции – **фазочастотной характеристикой**. **Шириной полосы пропускания** многомодового волокна Δf называется минимальная частота модуляции

при которой амплитуда выходного сигнала уменьшается вдвое (т.е. на три децибела) по сравнению с амплитудой сигнала на нулевой частоте. Для большей определенности ее называют шириной полосы пропускания по уровню -3 дБ.

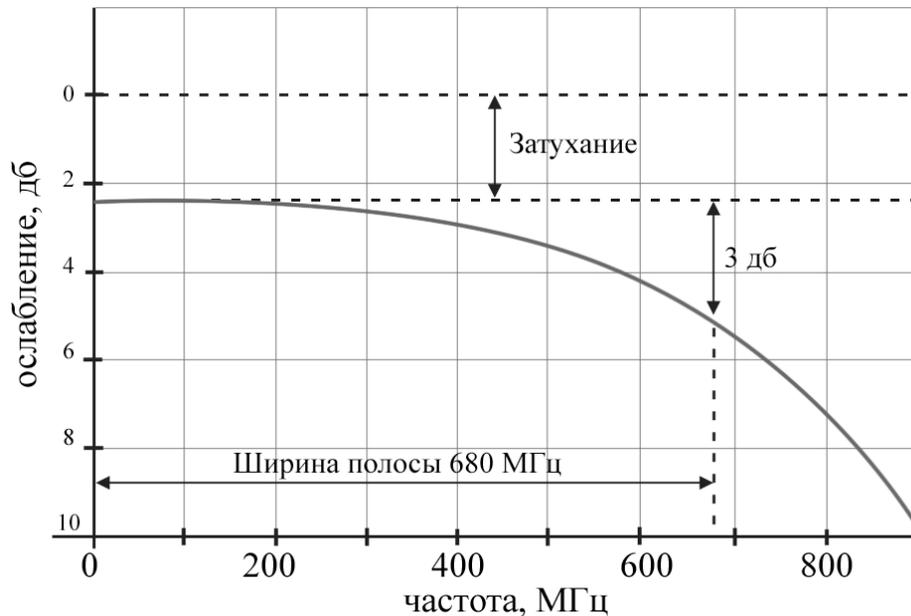


Рис.1.2.3. Амплитудно-частотная характеристика и ширина полосы пропускания волокна

Ширина полосы пропускания Δf и межмодовая дисперсия связаны приближенной формулой ΔT_{mm} :

$$\Delta f \approx \frac{0.375}{\Delta T_{mm}} \quad (1.2.3)$$

1.2.1.1. Затухание

Уменьшение средней мощности светового сигнала по мере распространения вдоль волновода называется **затуханием**. Затухание света в оптическом волокне вызывается несколькими физическими механизмами, связанными с поглощением и (или) рассеянием света.

Затухание света в волокне (при малой мощности светового сигнала), как и в любой другой линейной среде, приводит к уменьшению мощности:

$$dP/dz = -\gamma P \quad (1.2.4)$$

где γ — это коэффициент затухания, а P — оптическая мощность. Проинтегрировав (1.2.4) по z получим хорошо известный в оптике линейных сред закон экспоненциального убывания мощности (закон Бугера) [3]:

$$P_{out}(Z) = P_{in} \exp(-\gamma Z) \quad (1.2.5)$$

Поскольку величина мощности сигнала в ВОСП может меняться на

1978 г. минимальный уровень потерь удалось довести лишь до 500–1000 дБ/км, причем лучшим материалом оказался ПММА. Столь высокий уровень потерь ограничивал области применения ПОВ передачей света на очень короткие расстояния – в основном для подсветки шкал измерительных приборов. В 1978 г. компания Du Pont решила продать свои подразделения, занимавшиеся разработкой ПОВ, японской компании Mitsubishi Rayon. За последующие несколько лет Mitsubishi Rayon сумела снизить потери почти до теоретического минимума, который равен примерно 150 дБ/км на длине волны 650 нм (так называемый «красный минимум»). В результате было создано волокно со ступенчатым профилем показателя преломления и полосой пропускания 50 Мбит/с на расстоянии больше ста метров.

Следующего серьезного прорыва добилась группа профессора Койке (Y. Koike) в университете Кейо (Япония) в 1990 г. Она разработала процесс производства градиентного полимерного волокна (ГПОВ, GI-POF) на основе того же ПММА. Группа Койке объявила о получении ширины полосы 3 ГГц в волокне длиной 100 м, но минимальные потери оставались на уровне 150 дБ/км (на длине волны 650 нм).

Потери в волокне на основе ПММА связаны с собственным поглощением материала и обусловлены взаимодействием с гармониками колебаний углеродноводородных (C–H) групп. Снизить потери оказалось возможным при замене водорода более тяжелым изотопом – дейтерием. Однако использование дейтерия очень дорого и этот способ не нашел практического применения. Другая возможность – замена водорода фтором – была успешно реализована группой Койке в 1995 г. В результате было разработано перфторполимерное волокно, потери в котором удалось снизить до 50 дБ/км для диапазона длин волн 650–1300 нм. Теоретический минимум потерь в перфторполимере составляет порядка 10 дБ/км. Следующим достижением стала одновременная разработка в 2001 г. группами из Австралии и Кореи микроструктурированного полого оптического полимерного волокна. Первый коммерческий вариант ПОВ-трансиверов был изготовлен компанией HP еще в 1992 году. С его помощью была осуществлена передача со скоростью 50 Мбит/с на расстояние 15 м через ПОВ со ступенчатым профилем. В начале 2005 г. корейская компания Optimedia выпустила в свободную продажу ГПОВ на ПММА с диаметром 0,9 мм и полосой пропускания 100 Мбит/км. В 2005 г. компания Chromis Optical Fiber, дочерняя компания OFS и Bell Laboratories, получившая лицензию от Asahi, разработала процесс непрерывного прессования, позволивший изготавливать волокно более высокого качества, чем при «кусочном» производстве в компании Asahi, и объявила о серийном выпуске и свободной продаже перфторполимерного (ПФ) ГПОВ. Развитие технологии производства ПОВ, конечно же, сопровождалось усовершенствованием недорогих передатчиков, приемников и коннекторов.

вновь заговорить о ПОВ как о недорогой альтернативе кварцевому волокну на средних и малых расстояниях. Сети на основе одномодового кварцевого волокна способны обеспечить заказчика всеми мыслимыми сегодня и в будущем услугами связи. Единственный недостаток таких сетей – высокая стоимость монтажа и обслуживания, а также необходимость привлечения высококвалифицированных специалистов для проведения работ по наладке и переконфигурированию сети.

Экономичной альтернативой таким сетям служат решения на основе многомодового волокна, и особенно на основе ПОВ. Действительно, по мере приближения сети связи ближе к конечному пользователю снижение стоимости создания и поддержания ее работоспособности становится все более важным. У полимерного волокна в этом отношении имеются серьезные преимущества по сравнению с кварцевым: большой диаметр сердцевины значительно облегчает соединение; гибкость и податливость облегчают быстрое развертывание сети и не требуют привлечения специально обученного, высокооплачиваемого персонала. Поэтому достижения последних лет в области технологии производства, развитие новых типов оптических передатчиков, а также новые сетевые и промышленные приложения снова сделали ПОВ привлекательным, несмотря на большее, чем у кварцевого волокна, затухание и меньшую полосу пропускания, и теперь спрос на полимерное волокно растет во всем мире. В частности, для дальнейшего исследования стандартного полимерного волокна на основе полиметилметакрилата (ПММА, poly-methyl-metha-acrilate – PMMA) со ступенчатым профилем показателя преломления (step index, SI) Европейский Союз финансирует исследовательский проект «POF-ALL». Основные области применения ПОВ – промышленное управление, автомобильные сети, датчики, освещение (подсветка) и короткие участки линий связи (локальные сети нового поколения в зданиях, квартирах и т.д.). Нынешний подъем спроса на ПОВ вызван растущими потребностями в таком волокне для систем связи нового поколения и для распределенных сенсорных систем. Растущие потребности промышленности стимулируют исследования в области улучшения параметров ПОВ путем оптимизации состава материала и структуры волокна. Среди важнейших достижений последних лет следует назвать улучшение характеристик градиентных ПОВ и разработку различных типов микроструктурированных ПОВ. В научных лабораториях ведутся интенсивные исследования ПОВ и для других приложений.

3.3.1. История полимерных оптических волокон

О первых разработках ПОВ сообщила бостонская компания Pilot Chemical в начале 1960-х гг., а в конце десятилетия к его совершенствованию приступила компания Du Pont. Несмотря на многочисленные исследования ПОВ на основе различных материалов, к

много порядков в прикладной волоконной оптике чаще используются логарифмические единицы. Удельное затухание в логарифмических единицах измеряется в дБ/км и определяется следующим выражением:

$$\alpha(\text{дБ/км}) = \frac{10}{L} \log_{10} \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right) = -10\gamma \log_{10}(e) = -4.343\gamma \quad (1.2.6)$$

В формуле (1.2.6) коэффициент затухания должен быть выражен в (км^{-1}) . Затухание в отрезке волокна длиной L км равно:

$$Z = \alpha L \quad (1.2.7,а)$$

Отметим, что затухание Z и удельное затухание α являются отрицательными величинами, однако знак минуса часто опускают и приводят значения модуля этих величин.

Если потери в отрезке волокна длиной L км равны 10дБ, это означает, что мощность сигнала $P(L)$ в световоде на расстоянии L составляет 10% от мощности сигнала $P(0)$ в начале световода; при затухании в 3дБ $P(L)$ равна 50% от $P(0)$, а при затухании в 1дБ – около 80%. Экспоненциальный закон (1.2.5) изменения мощности светового сигнала превращается в линейный, если мощность также выражать в логарифмических единицах.

Логарифмический уровень энергетической величины P_2 (мощность или интенсивность света) относительно начального уровня P_1 одноименной величины определяется выражением:

$$A = 10 \log P_2 / P_1 \quad (\text{дБ}) \quad (1.2.7,б)$$

В качестве начального уровня обычно выбирается значение мощности 1 мВт. Логарифмической единицей мощности, в этом случае, является децибел на милливатт, которая имеет обозначение дБм. Мощность в дБм связана с мощностью в мВт следующим выражением:

$$P[\text{дБм}] = 10 \log \frac{P[\text{мВт}]}{1[\text{мВт}]} \quad (1.2.8)$$

С учетом введенных обозначений (1.2.6 – 1.2.8) формула (1.2.5) для выходной мощности примет следующий вид:

$$P_{out}[\text{дБм}] = P_{in}[\text{дБм}] + \alpha L[\text{дБ}] \quad (1.2.9)$$

Основными физическими явлениями, приводящими к затуханию являются следующие:

- Рэлеевское рассеяние α_R
- Рассеяние на дефектах волокна α_d
- Поглощение матрицей кварцевого стекла α_{SIL}
- Примесное поглощение α_{Dop}
- Поглощение на микро и макроизгибах α_B

Полные потери α_{Σ} определяются суммированием вкладов всех

источников потерь:

$$\alpha_{\Sigma} = \alpha_R + \alpha_d + \alpha_{SIL} + \alpha_{Dop} + \alpha_B \quad (1.2.10)$$

Так называемое **рэлеевское рассеяние** α_R связано с рассеянием на неоднородностях, размеры которых значительно меньше длины световой волны. Этот вид рассеяния определяет теоретическую границу, ниже которой затухание не может быть уменьшено и в современных ОВ является **основным источником потерь** в рабочих областях спектра.

Если все виды неоднородностей, связанные с технологией производства удалось устранить, то рэлеевское рассеяние вызывается рассеянием на неоднородностях показателя преломления, возникших в расплавленном кварце в связи с локальными термодинамическими флуктуациями концентрации молекул (плотности) кварца из-за их хаотического движения в расплавленном состоянии. При затвердевании волокна неоднородности, возникшие в расплавленной фазе, застывают на своих местах, как бы «вмораживаются» в структуру кварцевого стекла. Колебания плотности приводят к случайным флуктуациям показателя преломления в масштабе, меньшем, чем длина световой волны λ . Эффективное сечение рассеяния пропорционально λ^{-4} . Так что собственные потери в стеклянном волокне из-за рэлеевского рассеяния можно описать следующей функцией:

$$\alpha_R = C / \lambda^4 \quad (1.2.11)$$

где значение постоянной C находится в диапазоне 0.7-0.9 (дБ/км)мкм⁴ (в зависимости от компонентов сердцевины волокна). Такие значения соответствуют, при $\lambda = 1.55$ мкм, $\alpha_R = 0.12 - 0.16$ дБ/км.

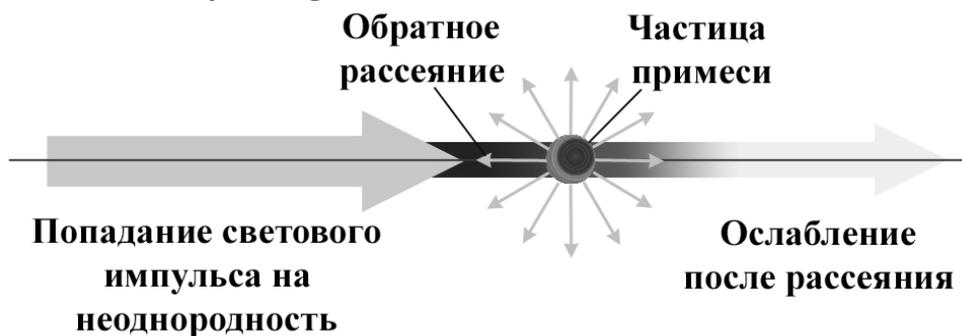


Рис.1.2.4. Рэлеевское рассеяние в волокне

Еще один источник потерь - дефекты на границе раздела сердцевины и оболочки (например, случайные изменения радиуса сердцевины). Как правило, неоднородности, возникающие вследствие таких дефектов, имеют масштаб, превышающий длину волны света. Рассеяние на таких объектах называется **рассеянием Ми**. В современных ОВ потери на такое рассеяние, как правило, не превышают 0.03дБ/км. Поэтому рассеяние на микродефектах α_d в современных одномодовых волокнах играет незначительную роль, однако оно несколько более заметно в

расстекловыванию, а в некоторых стеклах к появлению кристаллов размером от 10 до 50 мкм, а также низкую химическую устойчивость. В этой связи основной упор делается на разработку комплексных композиций, содержащих 4-6 фторидных компонентов, чтобы повысить термическую и химическую стабильность, механическую прочность и достичь вязкости, обеспечивающей вытяжку ОВ.

Наиболее стабильные фторидные стекла основаны на композиции $ZrF_4-BaF_2-LaF_3-AlF_3-NaF$ (часто в англоязычной литературе такие композиции обозначаются первыми буквами соединений, например – ZBLAN). Главные компоненты распределены следующим образом: ZrF_4 - стеклообразователь, который обеспечивает формирование цепочки, BaF_2 - модификатор, LaF_3 - стабилизатор, AlF_3 и NaF добавляют для изменения вязкости и улучшения стабильности. Чтобы улучшить технологичность при вытяжке ОВ в композицию, кроме указанных, могут быть добавлены фториды Ce , Gd , Lu , Al , Nd . Введение в стекла ZBLAN добавок Nd^{+3} или Er^{+3} обеспечивает создание нового класса оптических волокон, так называемых активных оптических волокон, в которых можно реализовывать усиление и генерацию света на длинах 1.06 мкм, 1.3 мкм и 1,55 мкм.

У фторидных стекол наблюдается тенденция к поверхностной рекристаллизации в результате воздействия атмосферной влаги и кислорода. Для их защиты необходимо применять специальную технику нанесения покрытия на волокно.

Фторидные стекла характеризуются высокой прозрачностью в широком диапазоне длин волн от ближней ультрафиолетовой (0,3 мкм) до средней и дальней ИК областей. Они имеют следующие параметры:

Температура стеклования, °С	300-450
ТКЛР, °С-1	$(17-20) \times 10^{-6}$
Вязкость, Па.с, при 490°С	4
Показатель преломления в видимой части спектра	1,47-1,53
Ударная вязкость, МПа.м 0,5	0,27-0,38

Стекла на основе фторида бария, иттрия, цинка, алюминия с добавками фторида индия, заменяющими фторид алюминия, дают хорошую стабильность и прозрачность в ИК области от 7 до 8 мкм.

3.3. Полимеры для волоконной оптики

Долгое время полимерное оптическое волокно - ПОВ, (в англоязычной литературе - polymer optical fiber, POF) находилось в тени кварцевого волокна и использовалось только для низкоскоростных соединений и на небольшие расстояния, поскольку скорость передачи информации по многомодовому волокну ограничена межмодовой дисперсией. Однако недавние технологические разработки заставили

Показатель преломления для As_2Se_3 на длине волны 5 мкм $n = 2,481$, а для As_2S_3 $n = 2,406$. При этом соотношение показателей преломления As_2Se_3 и As_2S_3 в области длин волн 2 -12 мкм остается примерно постоянным. Модуль Юнга халькогенидных стекол лежит в пределах 20 - 41 ГПа.

Близкие значения ТКЛР селенида и сульфида мышьяка и отмеченные выше свойства показателей преломления могут быть применены при изготовлении ОВ, в которых один из материалов используется в качестве сердцевины, а другой оптической оболочки.

В настоящее время в России разработаны физикохимические основы и методы получения серы, селена, теллура и мышьяка с низким содержанием газообразующих примесей в форме взвешенных частиц. Разработаны физикохимические основы и методы получения высокочистых стекол систем As-S, As-Se, Ge-As-Se. Получены образцы стекол с содержанием газообразующих примесей 1×10^{-4} - 1×10^{-6} % ат. Разработан метод получения волоконных световодов и халькогенидных стекол с оптическими потерями в среднем ИК диапазоне 25 дБ/км. Основной причиной, вызывающей высокие потери, можно назвать абсорбцию из-за наличия примесей H_2S_2 , H_2Se , оксидов различных элементов, молекул воды и рассеяния из-за наличия включений.

Халькогенидные стекла имеют следующие преимущества: сравнительно широкая область стеклования, высокая стойкость к воздействию влаги и (особенно для тяжелых халькогенидов), большая длина волны отсечки.

3.2.3.2. Галогенидные стекла

Галогенидные стекла (галиды) имеют в своей основе хлориды и фториды различных металлов. При использовании галоидной добавки $ZnCl_2$ основная частота смещается в инфракрасную область (около 38 мкм), что значительно уменьшает потери на рэлеевское рассеяние. Известны стекла на основе хлоридов калия и натрия. У хлоридных стекол минимальные внутренние потери, но они более чувствительны к загрязнению (чем стекла на основе фторидов) и растворимы в воде.

Фторидные и хлорсодержащие стекла (BeF_2 и $ZnCl_2$) в перспективе могут обеспечить коэффициент затухания 10^{-2} - 10^{-3} дБ/км, соответственно. Однако берилловые стекла весьма токсичны, а цинковые обладают высокой гигроскопичностью.

Стекла на основе фторидов циркония, гафния, бария, щелочей и редкоземельных элементов имеют рекордный коэффициент затухания $(5-8) \times 10^{-3}$ дБ/км на длине волны $\lambda = 2,4$ мкм. При этом из стекла необходимо удалить примеси железа, никеля, гидроксильные группы, имеющие высокие потери на абсорбцию в интервале длин волн 2-3 мкм. К недостаткам фторидных стекол можно отнести относительно узкую область стеклообразования, малую термостабильность, приводящую к

многомодовом волокне.

Собственное поглощение кварцевого стекла (химическая формула SiO_2) определяется поглощением фотонов, при котором энергия фотона переходит либо в энергию электронной подсистемы либо в колебательную энергию матрицы. Первый тип поглощения соответствует электронному спектру поглощения, а второй – колебательному.

Спектр собственного электронного поглощения кварцевого стекла лежит в ультрафиолетовой области ($\lambda < 0.2$ мкм). Колебательный спектр лежит в инфракрасной области ($\lambda > 7$ мкм). Поскольку структура кварцевого стекла аморфная, полосы поглощения имеют размытые границы, а их «хвосты» заходят в видимую область спектра. Во втором и третьем окнах прозрачности в диапазоне длин волн 1.3-1.6 мкм потери, вызванные собственным поглощением, имеют порядок 0.03 дБ/км.

Примесное поглощение вызывается поглощением фотонов примесями с возбуждением электронных или колебательных уровней частиц примеси. Примеси в виде ионов металлов переходной группы, таких, как Fe, Cu, Ni, Mn и Cr вызывают сильное поглощение на длинах волн в диапазоне 0.2 -2.0 мкм. Для того чтобы уровень потерь был ниже 1дБ/км, количество примесей должно быть менее одной части на миллиард. Современная технология позволяет получать кварц такой высокой чистоты.

Основной причиной примесного поглощения в современных волокнах, изготовленных по последнему слову техники, является наличие молекул воды (H_2O). При взаимодействии с матрицей кварца молекула воды диссоциирует с образованием ионов водорода - H и гидроксильной группы - OH . Центральная длина волны колебательной полосы поглощения гидроксильной группы - OH равна 2.73 мкм. Гармоники и комбинационные частоты с кварцевой матрицей вызывают сильное поглощение на длинах волн 1.39, 1.24 и 0.95 мкм.

Три пика, расположенные поблизости от этих длин волн вызваны наличием в матрице кварцевого стекла молекул воды. Даже наличие одной части на миллион может привести на длине волны 1.39 мкм к потерям 59 дБ/км. Как правило, для того чтобы получить волокно с низкими потерями, концентрацию OH -ионов нужно снижать до уровня ниже 10^{-8} . Поэтому наибольший интерес для целей передачи информации представляет световое излучение с длинами волн 850 нм, 1.31 мкм и 1.55 мкм, поскольку они расположены между зонами поглощения, и затухание на этих длинах волн минимально. Области вокруг этих длин волн называются **первым, вторым и третьим окнами прозрачности**.

Дополнительные потери могут вызываться и такими легирующими присадками, как GeO_2 , P_2O_5 и B_2O_3 (используемыми при изготовлении волокна для изменения показателя преломления кварцевого стекла). На рис. 1.2.4 приведен график зависимости затухания типичного волокна от длины волны.

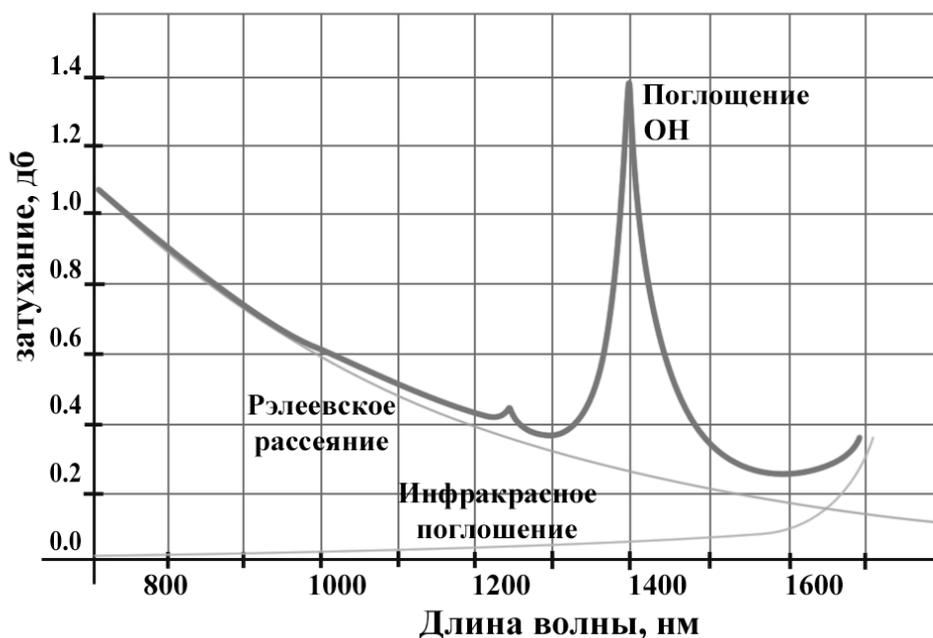


Рис.1.2.5. Зависимость затухания одномодового кварцевого волокна от длины волны

Еще одной причиной возникновения потерь в ОВ являются изгибы волокна. Потери на изгибе прямо пропорциональны $\exp(-R / R_c)$, где R — это радиус кривизны изгиба волокна, а $R_c = \alpha / (n_1^2 - n_2^2)$. У одномодовых волокон обычно $R_c = 0.2-0.4$ мм, а потери на изгиб, при радиусе изгиба $R > 5$ мм, пренебрежимо малы (< 0.01 дБ/км). Поскольку у большинства макроизгибов значение R превышает 5 мм, то **потери на макроизгибах практически пренебрежимо малы.**

Серьезной причиной потерь в волокне (особенно входящем в состав кабеля) является случайная осевая деформация, неизбежно возникающая при прокладке кабеля. Такие потери называются **потерями на микроизгибах**. Микроизгибы приводят к увеличению потерь как в одномодовом, так и в многомодовом волокне, причем эти потери — если не принять мер по их уменьшению — могут быть исключительно велики (≈ 100 дБ/км). Потери на микроизгибах в одномодовых волокнах можно свести к минимуму, если выбрать значение структурного параметра V , как можно более близкое к критическому значению 2.405, так как в этом случае большая часть мощности моды сосредоточена в сердцевине. На практике волокно конструируется таким образом, чтобы значение нормированной частоты V , при работе на рабочей длине волны находилось в диапазоне 2.0-2.4.

1.2.1.2. Хроматическая дисперсия

Межмодовая дисперсия принципиально отсутствует в одномодовых волокнах. Однако уширение импульсов в них полностью не исчезает, т.к. групповая скорость распространения фундаментальной моды зависит от длины волны (см. раздел 1.1.3). В результате этого, различные

В 1954 году Б.Т. Коломийцем и Н.А. Горюновой (Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе) был открыт новый класс полупроводниковых веществ - халькогенидные стеклообразные полупроводники (халькогенидные стекла), в состав которых входят халькогены VI группы периодической таблицы Менделеева. Типичные представители сульфид и селенид мышьяка.

Халькогенидные стекла изготавливают на основе элементов Ge, P, As, Sb, S, Se, Te. Типичные композиции: Ge-S, Ge-Se, As-S, As-Se, Ge-S-P, Ge-As-Se, Ge-Se-Te, As-Se-Te, Ge-As-Se-Te и др.

Халькогенидные стекла обладают высокой прозрачностью в ИК области спектра от 1 до 18 мкм. Для стекла As_2S_3 материальная дисперсия равна нулю на длине волны 4,85 мкм (рис. 3.2.6). Теоретически минимальные оптические потери для этих стекол в области прозрачности материала и с учетом потерь на рэлеевское рассеивание составляют $(2-3) \times 10^{-2}$ дБ/км (рис. 3.2.7). Халькогенидные стекла на основе Ge-P-S могут иметь потери порядка $10^{-1} - 10^{-2}$ дБ/км на длине волны 5,5 мкм.

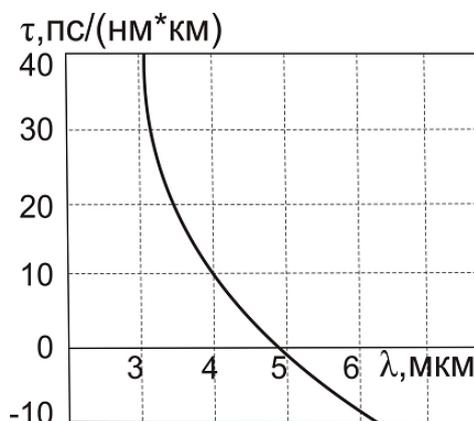


Рис. 3.2.6. Спектральная зависимость материальной дисперсии стекла на основе As_2S_3

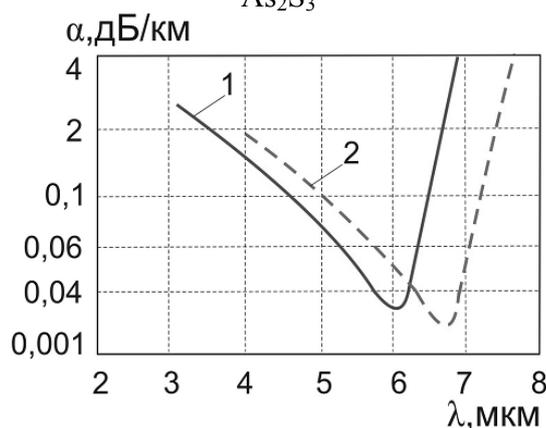


Рис. 3.2.7. Спектральная зависимость оптических потерь халькогенидных стекол на основе: 1- As_2S_3 ; 2 - As_2Se_3

Халькогенидные стекла трудно совместимы со стеклами других типов. Это объясняется резким отличием температуры их стеклования $(139-400)^\circ C$ и ТКЛР $(11-30) \times 10^{-6} \text{ }^\circ C^{-1}$ от тех же параметров у стекол из других составов. В частности, для стекол из As_2Se_3 ТКЛР = $25 \times 10^{-6} \text{ }^\circ C^{-1}$, а для As_2S_3 ТКЛР = $19 \times 10^{-6} \text{ }^\circ C^{-1}$.

температуры плавления: натрийкальцийсиликатное стекло (Na_2O , CaO , SiO_2) $T_{\text{пл}} \sim 1400^\circ\text{C}$; щелочносвинцовое стекло (Na_2O , PbO , SiO_2) $T_{\text{пл}} \sim 1400^\circ\text{C}$; натрийалюминийсиликатное стекло (Al_2O_3 , Na_2O , SiO_2) $T_{\text{пл}} \sim 1450^\circ\text{C}$; натрийборосиликатное стекло (Na_2O , B_2O_3 , SiO_2) $T_{\text{пл}} \sim 1250^\circ\text{C}$. Эти стекла обладают также более высоким показателем преломления и могут быть модифицированы для получения материала с низким показателем преломления (для оптической оболочки). Показатели преломления натрийборосиликатного стекла можно уменьшить на 3%, натрийкальцийсиликатного на 4%, щелочносвинцового силикатного почти на 10%. При этом все модификации согласуются между собой по остальным свойствам и могут использоваться как материалы для сердцевины и оптической оболочки ОВ.

Недостаток низкоплавких многокомпонентных стекол в большей вероятности загрязнения по сравнению с плавким кварцем. Это затрудняет их очистку от примесей для снижения показателя поглощения и рассеивания. Из-за низких температур при размягчении и плавлении возможно загрязнение стекла и оптического волокна на всех стадиях производства.

Для формирования многокомпонентных ОВ необходимо подобрать пару стекол для сердцевины и оптической оболочки, которые удовлетворяли бы следующим требованиям:

1. Минимальные диффузионные процессы на границе раздела пары стекол, которые достигаются путем уравнивания их состава по роду и концентрации щелочных оксидов. Это позволит максимально сохранить исходные значения показателя преломления каждого стекла из пары и ожидаемой числовой апертуры световода.
2. Максимальная совместимость пары стекол, когда на границе их раздела при вытягивании волокна и возможных последующих термообработках не возникают новообразования, газовые пузырьки и ликвация.
3. Низкотемпературное плавление при $1250\text{-}1350^\circ\text{C}$ высокочистой гомогенной шихты в тигле из чистого кварцевого стекла при минимальном его растворении расплавом, особенно стекла сердцевины.

Итак, в большинстве случаев предпочтительно применять кварцевые стекла, поскольку они обладают рядом преимуществ. При этом двуокись кремния как составная часть может быть получена с очень высокой степенью чистоты.

3.2.3. Бескислородные стекла для оптических волокон среднего и дальнего ИК диапазона

3.2.3.1. Халькогенидные стекла

составляющие спектра импульса распространяются со слегка отличными друг от друга групповыми скоростями. Это явление называется **хроматической дисперсией**.

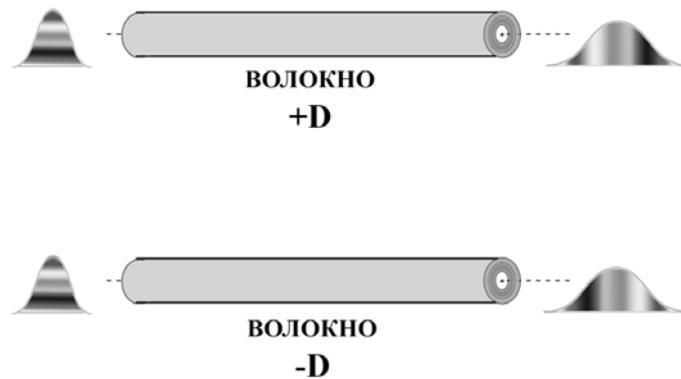


Рис.1.2.6. Хроматическая дисперсия.

Результатом того, что различные спектральные компоненты движутся с различной скоростью, как правило, является уширение светового импульса. Поскольку хроматическая дисперсия связана с различием групповых скоростей разных спектральных компонент светового сигнала, то величина уширения импульса ΔT_{hr} пропорциональна не только длине волокна L , но и ширине спектра оптического сигнала $\Delta\lambda$:

$$\Delta T_{hr} = \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{L}{V_{eG}} \right) \Delta\lambda = D_{hr} L \Delta\lambda \quad (1.2.12)$$

где введен **коэффициент хроматической дисперсии**

$$D_{hr} = \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{1}{V_{eG}} \right) \quad (1.2.13)$$

который измеряется в пикосекундах на километр и нанометр [$\text{пс} \cdot \text{км}^{-1} \cdot \text{нм}^{-1}$].

Длина волны λ_{zD} , при которой $D=0$, называется **длиной волны нулевой дисперсией**.

Вклад в хроматическую дисперсию вносят два механизма: **материальная дисперсия** - $D_M(\lambda)$ (или **дисперсия материала**) и **волноводная дисперсия** - $D_W(\lambda)$:

$$D_{hr}(\lambda) = D_M(\lambda) + D_W(\lambda) \quad (1.2.14)$$

Дисперсия материала возникает вследствие того, что показатель преломления кварцевого стекла изменяется в зависимости от длины волны оптического излучения. Для фазового показателя преломления существует эмпирическая формула Солмейера. Групповой показатель преломления связан с фазовым формулой (1.2.14)

$$n_g = n - \lambda \frac{dn}{d\lambda} \quad (1.2.15)$$

Величина материальной дисперсии $D_M(\lambda)$ зависит от крутизны зависимости группового показателя преломления кварцевого стекла от длины волны:

$$D_M = \frac{1}{c} \frac{dn_g}{d\lambda} \quad (1.2.16)$$

На рис.1.2.7 показана зависимость от длины волны параметров n и n_g кварцевого стекла в диапазоне 500 - 1600 нм.

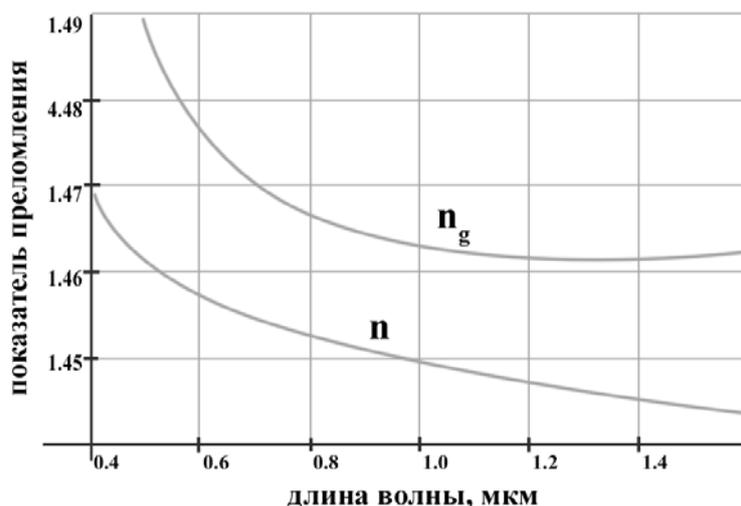


Рис.1.2.7. Зависимости фазового (n) и группового (n_g) показателей преломления кварцевого стекла от длины волны

У чистого кварцевого стекла при $\lambda = 1276$ нм $dn_g/d\lambda = 0$. Эта длина волны называется **длиной волны нулевой дисперсии материала** λ_{ZD} , т.к. $D_M = 0$. При длине волны ниже длины волны нулевой дисперсии параметр дисперсии D_M имеет отрицательное значение ($-D_M$), в обратном случае — положительное ($+D_M$). В диапазоне длин волн 1.25 - 1.66 можно пользоваться приближенным эмпирическим соотношением:

$$D_M \approx 122(1 - \lambda_{ZD} / \lambda) \text{ [пс/(нм * км)]} \quad (1.2.17)$$

При этом нужно подчеркнуть, что $\lambda_{ZD} = 1276$ нм только у чистого кварцевого стекла. У оптических волокон с сердцевинкой и оболочкой, легированными с целью изменения показателя преломления, длину волны нулевой дисперсии можно изменять в небольших пределах (диапазон изменения 1270-1290 нм).

Другой источник хроматической дисперсии — **волноводная дисперсия** $D_W(\lambda)$. Этим термином обозначается зависимость задержки светового импульса от длины волны, связанная с изменением скорости его распространения в волокне из-за волноводного характера распространения. На языке геометрической оптики изменение длины волны приводит к изменению угла наклона системы зигзагообразных лучей, которые можно поставить в соответствие фундаментальной моде (см. раздел 1.1.3) следствием чего является изменение времени

области, представляющей рабочий интервал ОВ. Добавка Ti^{3+} особо сильный поглотитель, и ее трудно окислить полностью. Необходима специальная термическая обработка титана при наличии воды и температуре ниже точки плавления стекла, которая приводит к образованию двуокиси титана и водорода.

Для повышения показателя преломления можно использовать оксид алюминия, потери на рассеивание у которого ниже, чем у двуокиси германия. К тому же оксид алюминия (Al_2O_3) очень стойкий в противоположность оксиду германия GeO_2 , который может образовывать летучие продукты GeO и $GeCl_4$. Оксид алюминия весьма стабилен, поэтому высока эффективность введения его в стекло. При изготовлении заготовки менее чувствительны к воздействию парциального давления кислорода и хлора, нежели стекло с добавками GeO_2 . Стекло, легированное Al_2O_3 , обладает более низким значением вязкости, что ускоряет процессы затвердевания.

Легирование кварцевого стекла оксидом сурьмы не только позволяет получить большее возрастание показателя преломления на 1 моль легирующей добавки по сравнению с GeO_2 . При этом также снижается возможность образования кристаллической фазы, даже если относительный показатель преломления до и после введения Sb_2O_3 отличается более чем на 1,6%. Для GeO_2 это значение не превышает 1,5%.

Чистота исходных веществ, применяемых для изготовления стекла, в значительной степени определяет его высокое качество по всем контролируемым параметрам. В случае с оксидными стеклами, к которым относится и кварцевое, основные потери связаны с поглощением ионами переходных металлов (ванадия, железа, хрома, меди, кобальта, никеля, марганца), а также гидроксильными группами.

Гидроксильные группы ОН являются основной примесью в кварцевых стеклах, которая приводит к значительным потерям. Причина - реакция групп ОН с водородом, содержащимся в атмосфере. Особенно большие потери возникают на длине волны 0,95 и 1,4 мкм. Слабые полосы поглощения появляются на длинах волн 0,725, 0,825, и 0,875 мкм, которые являются гармониками основного резонанса при $\lambda = 2,7$ мкм.

Снижения потерь в стекле можно добиться, уменьшая содержание гидроксильных групп до нескольких десятков миллиграмм на килограмм. При этом коэффициент затухания на длине волны 1,2 мкм может снизиться до 0,5 дБ/км.

Влияние гидроксильных групп особенно заметно в кварцевых стеклах, легированных двуокисью германия, содержащих примеси алюминия и натрия, достигающих в натуральном кварце 1015 частиц на миллион, а в синтетическом менее 3 частиц на миллион. В кварцевом стекле, легированном P_2O_5 и GeO_2 , присутствие группы ОН приводит к увеличению потерь пропорционально концентрации P_2O_5 .

Тройные или более сложные стеклообразующие системы такие, как натрийкальцийсиликатное и натрийборосиликатное стекло, имеют низкие

сравнению с чистым кварцем без ухудшения его оптических свойств. Молярные доли этих оксидов в кварце могут меняться в пределах от 1 до 15%. Показатель преломления увеличивается на 0,001 при увеличении молярной доли GeO_2 на 1% (рис. 3.2.5). При молярной концентрации двуоксида германия 20-процентный показатель преломления увеличивается на 1,4%.

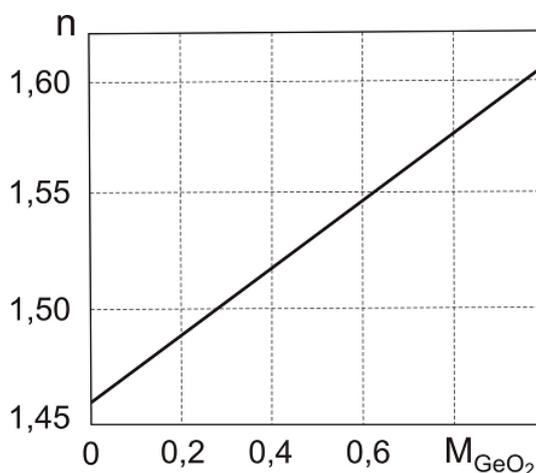


Рис. 3.2.5. Зависимость показателя преломления плавленного кварца от молярной доли оксида германия M (GeO_2).

Кварц с добавкой германия, который может быть использован в качестве материала сердцевины ОВ, имеет широкое окно прозрачности почти до 1,7 мкм.

Более предпочтительным в качестве легирующего материала (как более дешевого) является фосфорный ангидрид P_2O_5 . При добавлении к плавленому кварцу P_2O_5 для образования бинарного стекла внутреннее поглощение материала и рэлеевское рассеяние увеличиваются весьма незначительно. Фосфорный ангидрид сублимируется при температуре 300°C , гигроскопичен и имеет температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) почти в 25 раз больше, чем у плавленного кварца. Однако он образует с кварцем устойчивое бинарное стекло, тепловое расширение которого сравнимо с тепловым расширением чистого кварца при молярных концентрациях P_2O_5 вплоть до 25%. Полученное стекло не проявляет почти никакой тенденции к ликвации или кристаллизации. Оно также устойчиво к воздействию воды. Показатель преломления фосфоросиликатного стекла увеличивается линейно (во всяком случае, для небольших содержаний оксида фосфора) с увеличением концентрации P_2O_5 . Начальный прирост показателя преломления при изменении молярной концентрации P_2O_5 на 1% составляет 0,043%. Вязкость и ТКЛР P_2O_5 и SiO_2 различаются, и это ограничивает количество фосфорного ангидрида, которое может быть введено в плавленный кварц для изготовления ОВ. При добавлении в массу кварца 1% TiO_2 показатель преломления увеличивается почти на 0,026%. Двойная стеклообразующая система с добавкой в плавленном кварце хороша тем, что титан может входить в матрицу стекла с различными степенями ионизации. Причем некоторые из них обладают заметным поглощением в спектральной

распространения лучей в волокне даже при постоянстве показателей преломления сердцевинки и оболочки волокна.

Параметр D_W во всем диапазоне длин волн 800-1600 нм отрицателен, D_M отрицателен при длинах волн меньше λ_{ZD} и положителен при длинах волн, превышающих λ_{ZD} . Параметры D_W , D_M и их сумма $D=D_M + D_W$ для стандартного одномодового волокна показаны на рис.1.2.8.

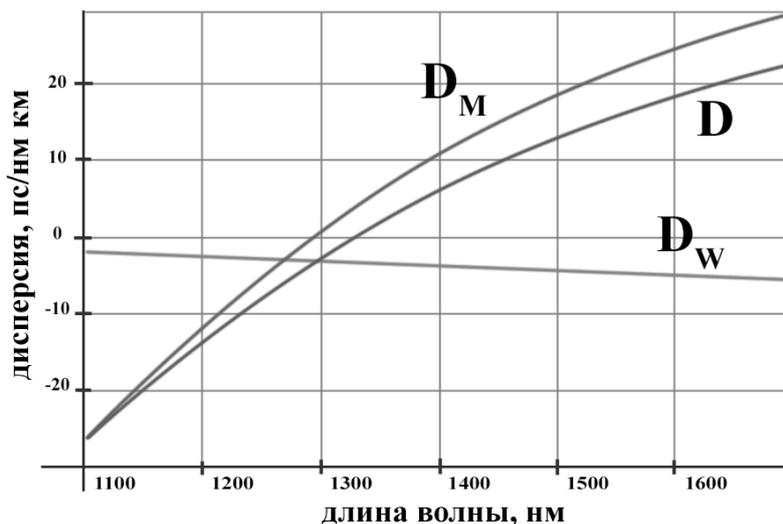


Рис.1.2.8. Зависимости коэффициентов хроматической дисперсии, материальной и волноводной дисперсии от длины волны в стандартном волокне со ступенчатым профилем

Влияние волноводной дисперсии заключается в смещении λ_{ZD} на 30-40 нм, так что полная дисперсия становится нулевой при длине волны около 1310 нм. Волноводная дисперсия также уменьшает значение параметра D (его составляющую D_M) в диапазоне длин волн 1300-1600 нм. Это представляет интерес для волоконно-оптических систем связи. При длине волны около 1550 нм типичные значения D находятся в диапазоне 15-18 пс/(км-нм). Этот диапазон длин волн представляет значительный интерес для оптических систем, а высокие значения D в стандартном волокне ограничивают эксплуатационные характеристики волоконно-оптических систем, работающих на длине волны 1550 нм.

Поскольку значение параметра D_W зависит от таких параметров волокна, как радиус сердцевинки и разность между показателями преломления, то оказывается вполне возможным сконструировать такое оптическое волокно, у которого параметр λ_{ZD} будет смещен в область 1550 нм. Такие волокна называются **волокнами со смещенной дисперсией**. Можно также изменить значение волноводной дисперсии таким образом, что полная дисперсия D станет относительно небольшой в широком диапазоне длин волн (от 1300 до 1600 нм). Такие волокна называются **волокнами со сглаженной дисперсией**.

Они особенно перспективны в системах с плотным **спектральным разделением каналов** (DWDM – системах). Характеризует степень «сглаженности» кривой зависимости коэффициента хроматической дисперсии от длины волны **наклон зависимости хроматической**

дисперсии от длины волны при длине волны нулевой дисперсии.

Очень важно отметить, что расширение световых импульсов из-за хроматической дисперсии может быть скомпенсировано. Принцип компенсации поясняет рис.1.2.9. Световой импульс после прохождения отрезка волокна с положительной дисперсией расширяется т.к. его различные спектральные компоненты распространяются с разной скоростью (см. раздел 1.1.3). В результате импульс становится частотно модулированным: на фронте сосредоточены коротковолновые спектральные компоненты, а на спаде – длинноволновые компоненты. Это связано с тем, что в волокне с положительной дисперсией коротковолновые компоненты распространяются с большей скоростью, чем длинноволновые. Импульс с линейной частотной модуляцией называется **чирп-импульсом**.

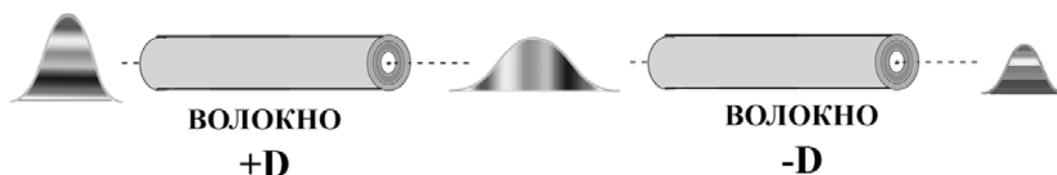


Рис.2.9. Компенсация хроматической дисперсии.

Во втором волокне с отрицательной дисперсией фронт импульса распространяется с меньшей скоростью, чем спад, и это приводит к сжатию импульса.

Широко используемые в ВОСП полупроводниковые лазеры с прямой модуляцией излучают световые импульсы с положительным чирпом. Это приводит к тому, что такие импульсы в волокне с положительной дисперсией расширяются быстрее, чем импульсы без чирпа.

В то же время при распространении в волокне с отрицательным чирпом их длительность на некотором расстоянии от входа в волокно даже сокращается.

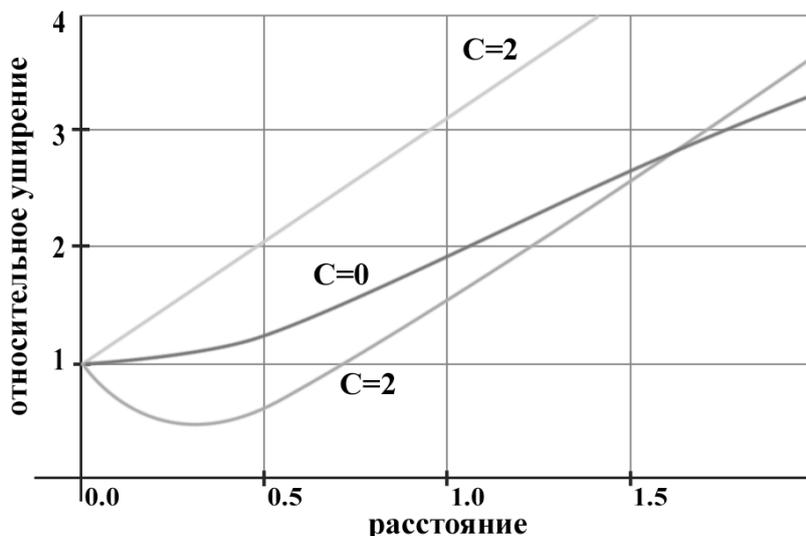


Рис.1.2.10. Распространение импульсов с положительным чирпом и без чирпа в волокнах с положительной и отрицательной дисперсией

кварц - при условии высокой степени очистки и гомогенности. Значительные преимущества кварца обусловлены малыми внутренними потерями на рассеивание. Для оптических волокон (ОВ) из плавленого кварца самое низкое значение поглощения составляет 1,9 дБ/км на длине волны 0,85 мкм, 0,291 дБ/км на длине волны 1,3 мкм и 0,154 дБ/км на длине волны 1,55 мкм. Таким образом, собственное поглощение материала еще меньше. Однако высокая температура плавления кварца, с одной стороны, требует специальной трудоемкой технологии для изготовления оптического волокна (ОВ), а с другой - помогает избавиться от различных примесей, которые испаряются при более низких температурах.

Стекла, применяемые для изготовления световодов (сердцевины и оптической оболочки), различаются показателями преломления n . В кварц (показатель преломления $n = 1,4585$ на длине волны 0,589 мкм) добавляется оксид бора ($n = 1,4581$ на длине волны 0,589 мкм), снижающий показатель преломления (рис. 3.2.4).

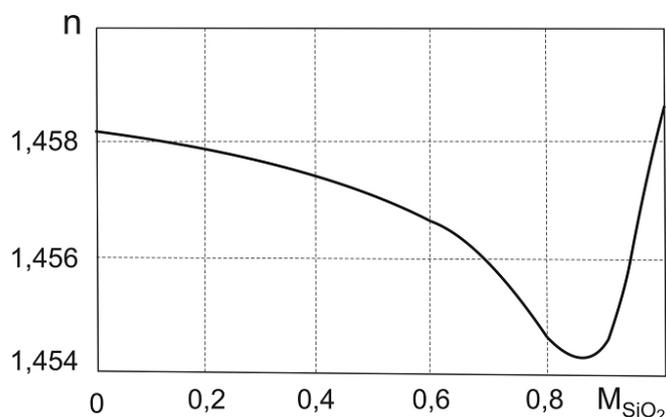


Рис. 3.2.4. Зависимость показателя преломления бинарной стеклообразующей системы $B_2O_3 - SiO_2$ от молярной доли оксида кремния $M (SiO_2)$

Длительный отжиг боросиликатного стекла приводит к увеличению n .

Другой способ понизить показатель преломления плавленого кварца - добавить в него фтор. В отличие от метастабильного характера изменения этого показателя у чистого боросиликата, снижение его у боросиликатного стекла с добавкой фтора - внутреннее свойство атомов фтора в матрице SiO_2 . Разность показателей преломления чистого SiO_2 и материала с добавкой фтора увеличивается линейно с повышением молярной концентрации фтора вплоть до нескольких процентов. Показатель преломления кварца уменьшается на 0,2% при изменении молярной концентрации фтора на 1%. При этом оптические свойства кварца не ухудшаются. Фторирование кварца позволяет уменьшить рассеивание Рэлея и минимизировать волновые потери. Однако, легирование фтором увеличивает вероятность возникновения трещин и уменьшает прочность стекла, а, кроме того, делает кварц более чувствительным к диффузии водорода.

Все другие добавки к плавленому кварцу - такие, как GeO_2 , P_2O_5 , TiO_2 , Al_2O_3 , Sb_2O_3 приводят к увеличению показателя преломления по

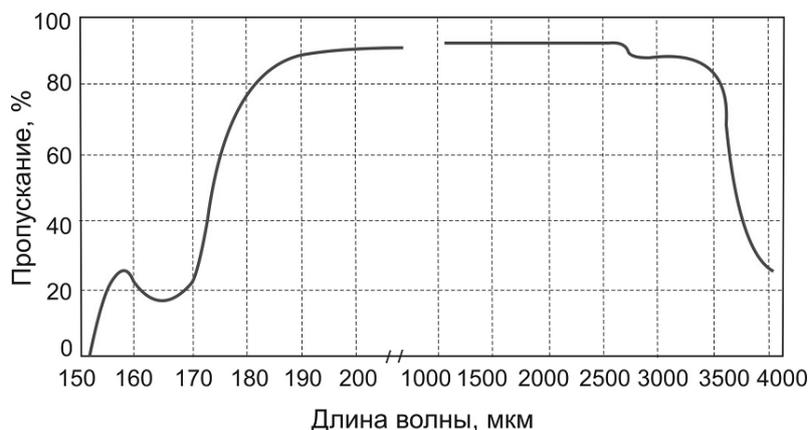


Рис. 3.2.1. Спектр пропускания кварцевого стекла КС-4В, образец толщиной 10 мм, потери на отражение включены

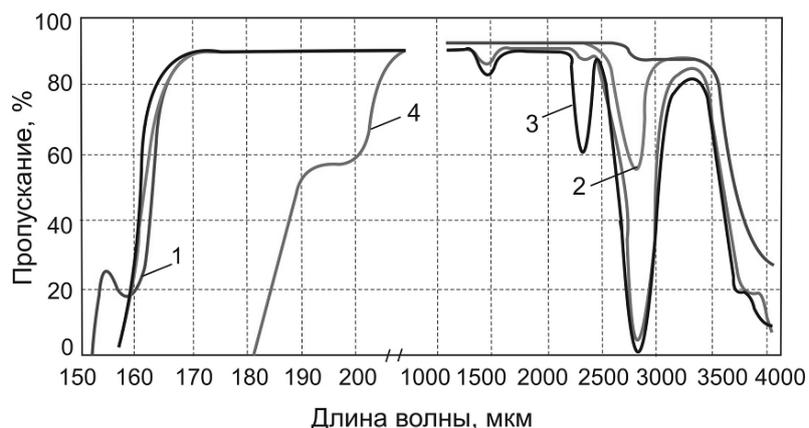


Рис.3.2.2. Сравнительный спектр оптического пропускания кварцевого стекла КВ-4В с другими российскими промышленными кварцевыми стеклами; толщина образцов 10 мм; потери на отражение включены. (1 - стекло КС - 4В, 2 - КУВИ, 3 – КУ-1, 4 - КВ)

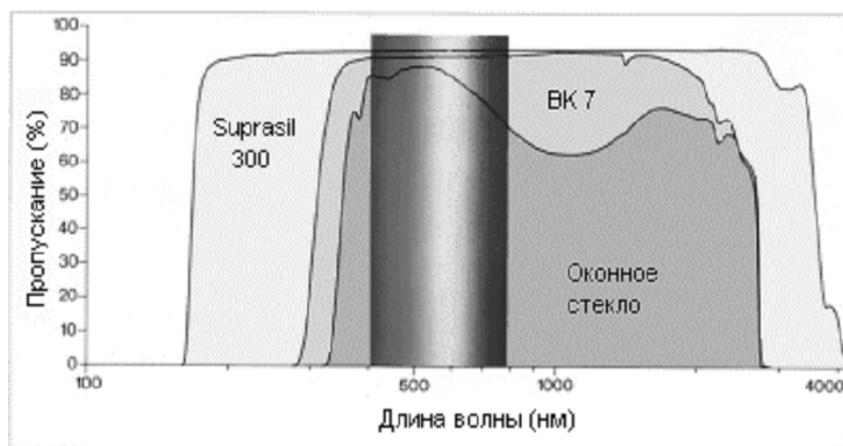


Рис.3.2.3. Спектр оптического пропускания синтетического кварцевого стекла Suprasil 300 (компания Heraeus Quarzglas), оптического стекла ВК 7 (аналог отечественного оптического стекла К8) и обычного оконного стекла

3.2.2. Оксидные стекла для оптических волокон видимого и ближнего ИК диапазона

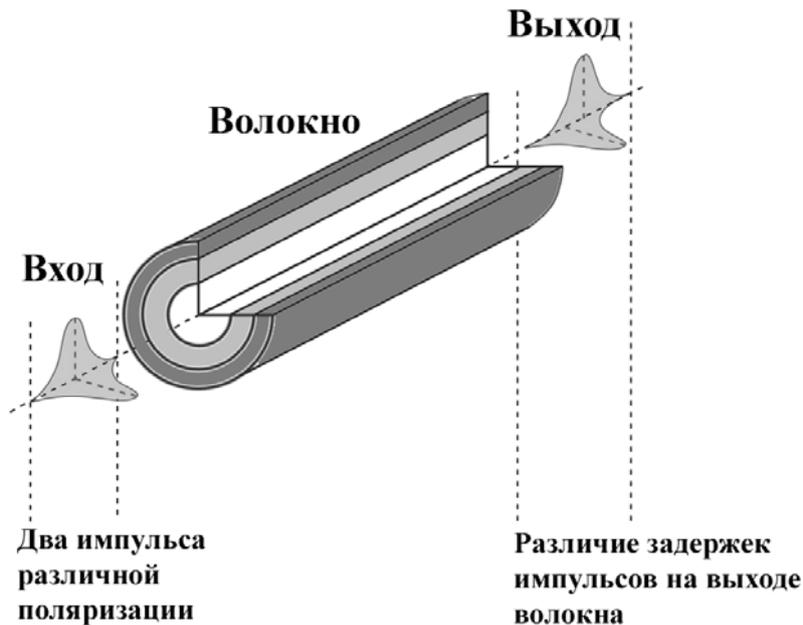
Из большинства видов стекол самым низким поглощением в видимой и ближней инфракрасной области спектра обладает плавленный

1.2.1.3. Поляризационная модовая дисперсия

Еще один потенциальный источник уширения импульсов связан с двулучепреломлением волокна. Направление колебаний вектора электрического поля световой волны в идеально круглом волокне может быть любым в плоскости, перпендикулярной оптической оси. Поэтому фундаментальная мода в одномодовом волокне содержит две ортогонально поляризованные компоненты, т.е. включает в себя две ортогонально поляризованные моды. В волокне с оптически идеальной симметричной круглой сердцевиной и оболочкой как в объемной изотропной среде моды обеих поляризаций распространялись бы с одинаковой скоростью. Небольшие отклонения сердцевины волокна или оболочки от идеальной вращательной симметрии, а также возникновение механических напряжений ведут к появлению двулучепреломления.

Такие нарушения идеальной круговой симметрии всегда присутствуют в реальных волокнах, поэтому в них ортогонально поляризованные компоненты световых импульсов (поляризационные моды) распространяются с несколько различными скоростями.

Если входной импульс возбуждает обе составляющих поляризации, то у выхода из волокна он уширится из-за того, что ортогонально поляризованные компоненты оказываются сдвинуты друг относительно друга (см. рис. 1.2.11).



А)

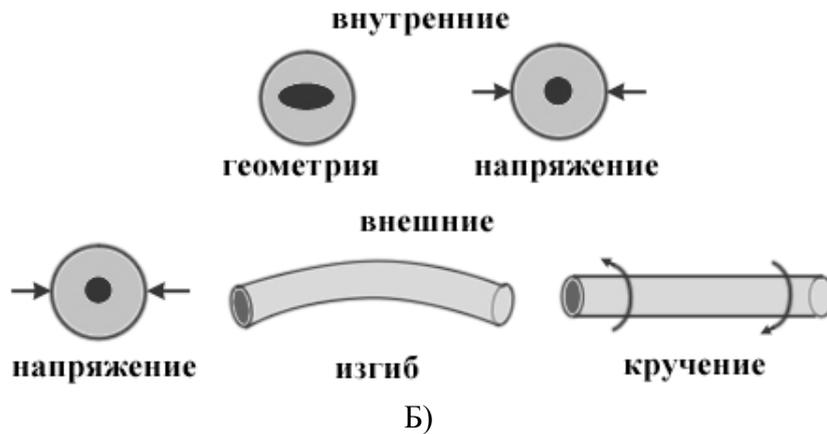


Рис.1.2.11. Поляризационная модовая дисперсия в оптическом волокне (а) и причины ее возникновения (б)

Разделение мод, а точнее их задержка друг относительно друга (в пс), на выходе из волоконного световода называется **поляризационной модовой дисперсией** (ПМД). ПМД играет важную роль в высокоскоростных ВОСП, особенно при использовании усилителей для увеличения дальности передачи информации и компенсаторов для уменьшения влияния хроматической дисперсии.

Величина двулучепреломления волокна и степень взаимодействия мод зависят как от внутренних, так и от внешних факторов. К внутренним факторам относятся асимметричность световедущей жилы волокна (отклонение геометрических размеров световедущей жилы и распределения профиля показателя преломления от кругового), возникающая после вытяжки волокна из-за несовершенства заготовок. К внешним факторам относятся сжатие, изгиб, растяжение, скручивание волокна, возникающие, например, в процессе изготовления кабеля или при его прокладке (рис. 1.2.11,б).

Некоторые специальные типы оптического волокна изготавливаются с постоянным значением двулучепреломления. Такое волокно обладает способностью сохранять поляризацию света, если поляризация света соответствует одному из двух собственных типов поляризации волокна, и, поэтому, оно называется **сохраняющим поляризацию волокном** (или **анизотропным волокном**, см. раздел 5.1). В большинстве случаев изготавливается волокно, сохраняющее линейную поляризацию, направленную вдоль двух ортогональных осей x и y , называемых главными осями ОВ.

Величину уширения импульсов в таком волокне можно оценить, используя время задержки ΔT_{xy} между двумя составляющими поляризации во время распространения импульса. При длине волокна L значение ΔT_{xy} определяется следующим образом:

$$\Delta T_{xy} = \left| \frac{L}{V_{eGx}} - \frac{L}{V_{eGy}} \right| \quad (1.2.18)$$

Высокая твердость, тугоплавкость и химическая инертность этого материала обеспечивает надежную эксплуатацию изготовленных из него изделий в агрессивных средах и при высоких температурах.

В таблице 3.2.1 приведены основные характеристики промышленного кварцевого стекла КВ-4В для вытяжки оптического волокна, выпускаемого в России на Миасском машиностроительном заводе. На рис. 3.2.1 и 3.2.2 приведены спектры пропускания кварцевого стекла КВ-4В и спектры пропускания других отечественных марок кварцевого стекла. За рубежом основной производитель кварцевого стекла для волоконной оптики **является компания Heraeus Quarzglas.**

Таблица 3.2.1. Характеристики отечественного кварцевого стекла КС-4В, используемого для вытяжки оптического волокна.	
Характеристика стекла	Значение
Коэффициент термического расширения (в интервале температур 20-1000 оС), град-1	5,5*10 ⁻⁷
Линейное удлинение изделия длиной 1 м при нагреве от 20 до 1000 оС, мм	0,54
Микротвёрдость, кг/мм	2 940
Плотность при 20 С, г/см ³	2,2
Температура размягчения, оС	1750
Температура отжига, оС	1250
Температура длительной эксплуатации, оС	1000
Модуль упругости, кг/мм ²	7060
Коэффициент Пуассона (в интервале температур 20-1200 оС)	0,16
Двулучепреломление (в изделиях), нм/см	≤ 10,0
Акустическая добротность, Е/ Ецикл	(2,1-2,7)*10 ⁷
Удельное электрическое сопротивление (350 оС), ом*см	7*10 ⁷
Диэлектрическая постоянная, средняя (в интервале температур 20-1200 оС)	3,86
Сумма примесей по 13 элементам (Al, Cu, Mo, Ti, Ca, Fe, Cr, Ni, V, Mn, Co, Mg, Pb), ppm	<0,1
Сумма примесей щелочных элементов (Li, Na, K), ppm	0,5
Содержание гидроксильных (ОН) групп, ppm	0,1
Содержание хлора (Cl), ppm	20,0
Содержание пузырей и включений на 100 см ³ стекла (пузыри и включения диаметром 0,03 мм не 1/3*0,10 по ISO 10110-3 учитываются)	класс "0" по DIN 58927
Люминесценция (при возбуждении ртутной лампой)	отсутствует
Зернистая неоднородность в изделиях и заготовках	отсутствует
Радиационно-оптическая устойчивость: при дозах g-облучения (60 Co)	до 11,0 МГр

К активным материалам можно отнести следующие типы стекол:

- лазерные;
- фоторефрактивные и фототерморефрактивные;
- фотохромные;
- электрохромные;
- электрооптические;
- магнитооптические;
- с нелинейно-оптическим откликом.

В настоящем методическом пособии рассмотрены основные классы неорганических и органических стекол, используемые для вытяжки оптических волокон.

3.2. Неорганические стекла для изготовления оптических волокон

3.2.1. Кварцевое стекло и его свойства

Широко распространенный в земной коре диоксид кремния (SiO_2), являясь одним из основных стеклообразователей, использовался человеком для различных целей с древнейших времен. Его кристаллическая модификация в виде кристаллов кварца давно используется для получения кварцевого стекла. Благодаря ряду уникальных свойств оно нашло применение во многих отраслях промышленности. Особую значимость этот материал приобрел в конце прошлого столетия, когда методами парофазного синтеза SiO_2 были получены волоконные световоды (ВС) с особо малым затуханием света.

Кварцевое стекло обладает высокой прозрачностью в УФ, видимой и ближней инфракрасной области спектра (от 0,2 до 1,7 мкм), достигая затухания менее 0,2 дБ/км на длине волны 1,55 мкм.

Прочность кварцевых световодов в герметичном покрытии на растяжение достигает 12 - 14 ГПа, что существенно выше прочности лучших сортов стали. Расчетный предел прочности составляет 15 - 25 ГПа. В полимерном покрытии световоды в два раза менее прочные, чем в герметичной металлической оболочке, что обусловлено влиянием влаги на процесс разрушения стекла.

Температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР), равный 5×10^{-7} 1/градус, на порядок ниже в сравнении с тугоплавкими материалами. Поэтому кварцевое стекло обладает высокой термостойкостью: нагретые до температуры 1000-1200°C стержни из плавленого кварца не разрушаются при погружении в воду. Расширение стекла с нагревом обусловлено ангармонизмом колебаний атомов. Однако происходящие при этом структурные превращения приводят к уменьшению объема, чем и обусловлено низкое значение ТКЛР для кварцевого стекла.

где подстрочные индексы x и y относятся к двум ортогонально поляризованным модам.

Величина $\Delta T/L$ является единицей измерения ПМД (аналогично межмодовой дисперсии в коротком многомодовом волокне). У волокон, сохраняющих поляризацию, $\Delta T/L$ имеет довольно большое значение (≈ 1 нс/км). Однако ПМД в таких волокнах можно свести к нулю, если вводить свет в волокно вдоль одной из главных осей.

Для оценки значения ПМД в обычных телекоммуникационных волокнах выражение (1.2.18) использовать непосредственно нельзя. В силу случайного характера анизотропии в волокне, используемом в системах связи, в них нет выделенных состояний поляризации. Фактически, ПМД характеризуется среднеквадратичным значением ΔT_{PMD} , получаемым после усреднения случайных возмущений вдоль всего волокна. В результате такого усреднения для величины среднеквадратичного уширения световых импульсов в ОВ получим формулу:

$$\Delta T_{PMD} \approx D_{PMD} \sqrt{L} \quad (1.2.19)$$

где D_{PMD} – это параметр ПМД с типичными значениями, находящимися в диапазоне $D_{PMD} = 0.1 - 1$ нс / $\sqrt{\text{км}}$.

ПМД может стать ограничивающим фактором для волоконно-оптических систем связи, рассчитанных на передачу сигналов на большие расстояния на длине волны, близкой к длине волны нулевой дисперсии волокна. В частности ПМД становится определяющим фактором уширения световых импульсов при использовании узкополосных источников излучения и систем компенсации хроматической дисперсии.

1.2.2. Геометрические характеристики

Основными геометрическими характеристиками ОВ являются следующие:

- Диаметр сердцевинны и диаметр поля моды
- Диаметр оболочки
- Величина отклонения диаметра сердцевинны от номинальной
- Величина отклонения диаметра оболочки от номинальной
- Отклонение сердцевинны и оболочки волокна от формы круга
- Ошибка концентричности сердцевинны и оболочки
- Ошибка концентричности оболочки и защитного покрытия
- Разность показателей преломления и числовая апертура
- Профиль показателя преломления

Геометрические параметры являются основным фактором, определяющим уровень потерь при сварке волокон и количество успешных сварок. Преимущества более строгой геометрии волокна могут быть весьма ощутимыми, поскольку любое сокращение потерь при сварке волокон и увеличение количества успешных сварок означает существенное

снижение затрат. Устанавливая оптическое волокно, важно понимать, как его характеристики влияют на качество сращивания и на работу системы в целом.

Волокно с жесткими допусками на геометрические характеристики не только упрощает и ускоряет сварку, но и снижает потребность в испытаниях, обеспечивая надежное, высококачественное выполнение соединения. Сегодня порядка 9% общей стоимости трудозатрат на установку системы приходится на сварку волокна.

Доказано, что наиболее заметное влияние на качество соединения оказывают три параметра:

- неконцентричность сердцевины и оболочки волокна,
- диаметр оболочки,
- собственный изгиб волокна.

• **Неконцентричность сердцевины/оболочки** определяет, насколько точно сердцевина волокна центрирована по отношению к его оболочке. Улучшение этой характеристики уменьшает шансы на смещение сердцевин свариваемых волокон, обеспечивая, в результате, более качественные соединения с меньшими потерями.

• **Собственный изгиб волокна** определяет радиус изгиба вдоль волокна. Если изгиб значителен, это может привести к слишком большим отклонениям при одновременной сварке нескольких волокон, или неточной стыковке при совмещении V – образных канавок сварочного аппарата, что может вызвать значительные приросты затухания в месте сварки и снижение числа успешных сварок.

• **Диаметр оболочки** определяет наружный размер волокна. Это диаметр стеклянной оболочки. Чем жестче спецификации на диаметр, тем больше однородность внешнего размера волокна. Диаметр оболочки особенно важен при использовании размерных наконечников или коннекторов, устанавливаемых в полевых условиях. Эффективность этих устройств при совмещении и соединении волокон зависит от совпадения диаметров оболочек. Диаметр оболочки также имеет значение при совмещении V – образных канавок.

Указанные параметры контролируются в процессе изготовления волокна и должны закладываться в каждый метр волокна, а не выбираться из общего распределения после производства. Это важно, поскольку измерения, выполняемые по окончании производства, не гарантируют постоянства параметров волокна по всей его длине.

На практике доказано, что волокна с улучшенной концентричностью сердцевины и оболочки, незначительным собственным изгибом и строго постоянным диаметром наружной оболочки облегчают одновременное сращивание нескольких волокон. При массовом сращивании волокон, индивидуального совмещения волокна с волокном не происходит, поэтому соблюдение всех геометрических параметров позволяет добиться качественного соединения волокон.

На рис.1.2.12 показано, как диаметр наружной оболочки,

ГЛАВА 3. МАТЕРИАЛЫ ВОЛОКОННОЙ ОПТИКИ

3.1. Общая классификация материалов для волоконной оптики

В систему классификации материалов для волоконной оптики могут быть заложены несколько принципов. Например, классификация по функциональному назначению. Тогда, все материалы для оптических волокон по своему функциональному назначению можно условно разделить на два класса: пассивные и активные.

Пассивные или передающие (transmitting) оптические материалы.

Из этих материалов изготавливают оптические волокна, которые используются для передачи информации в виде оптических сигналов или изображения на большие, средние и короткие расстояния. В роли таких материалов выступают высокочистые, высокопрозрачные и высокооднородные **неорганические стекла, стеклокерамики и органические полимеры**. Пассивные оптические материалы для оптического волокна можно также разделить по спектральному диапазону. Поэтому передающие оптические материалы можно разделить на **УФ материалы** (рабочая область 200-400 нм), **материалы видимого и ближнего ИК диапазона** (рабочая область 400-3000 нм), **материалы среднего (3-8 мкм) и дальнего (8-20 мкм) ИК диапазона**. К УФ материалам прежде всего относятся кварцевое стекло и бескислородные фторидные стекла. К материалам видимого и ближнего ИК диапазона относится кварцевое стекло, а также многокомпонентные оксидные силикатные и фосфатные стекла. К материалам среднего ИК диапазона относятся бескислородные фторидные и халькогенидные стекла.

Активные материалы

Эти материалы позволяют проводить разнообразные функциональные операции со световыми сигналами и потоками – усиливать, модулировать, вращать плоскость поляризации, отклонять в пространстве и т.д. Такие материалы легированы специальными активаторами и добавками. Например:

- ионами редкоземельных элементов - эрбием, иттербием, неодимом, празеодимом и т.д.;
- ионами переходных металлов - хромом, никелем, ванадием, кобальтом и т.д.;
- фоточувствительными ионами - церием, серебром, железом;
- наноразмерными и диэлектрическими кристаллами - NaNbO_3 , Mg_2SiO_4 , CuCl , AgCl , AgBr , NaF и т.д.;
- квантоворазмерными полупроводниковыми кристаллами - CdS , CdSe , PbS , PbSe и т.д.;
- наноразмерными металлическими частицами серебра, золота, меди и т.д.

Линейное усиления многоканального сигнала (нескольких длин волн)						
SF	Внешняя модуляция + КД*	ЛУ, УМ, ПУ	1, 2, 4	10, 20, 40 Гбит/с	>300 км	ASE, отсутствует плато
DSF	Внешняя модуляция	ЛУ, ПУ	1-(нелин. эффекты)	10 Гбит/с	>300 км	ASE, отсутствует плато, четырехволновое смешивание
NZDSF	Внешняя модуляция, 10 выводится из зоны EDFA	ЛУ, ПУ	1, 2, 4	10, 20, 40 Гбит/с	>300 км	ASE, SPM, отсутствует плато

* - Компенсация дисперсии может требовать дополнительного усиления, чтобы преодолеть затухание.

Обозначения:

- УМ - усиление мощности
- ЛУ - линейное усиление
- КД - компенсация дисперсии
- ПУ - приемное усиление

неконцентричность сердцевины/оболочки и собственный изгиб волокна способны повлиять на качество совмещения волокон во время сращивания. Для компаний, устанавливающих волоконно-оптические линии, жесткие производственные допуски означают значительно более высокий процент выполнения сварок с низким уровнем потерь.

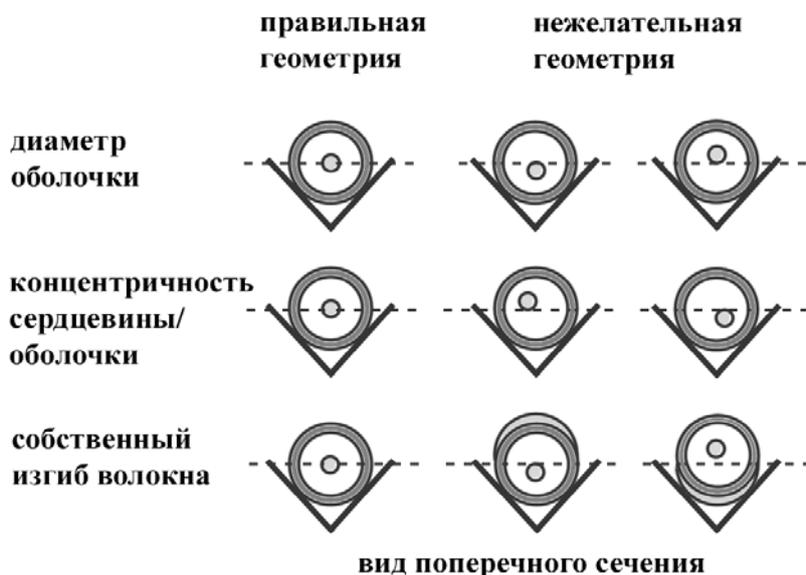


Рис.1.2.12. Влияние геометрических параметров оптического волокна на качество соединения

Для обеспечения высокого качества соединения многомодовых волокон кроме размеров сердцевины должны совпадать профили показателей преломления. При соединении одномодовых волокон необходимо обеспечивать максимальное совпадение распределения полей (интенсивностей) их фундаментальных мод. Распределения интенсивностей в реальных ОВ описываются часто слишком громоздкими формулами для того, чтобы их можно было использовать на практике. Поэтому часто производится аппроксимация функций распределения стандартным гауссовым распределением:

$$I(r) = I_0 e^{(-2r^2/w_0^2)} \quad (1.2.20)$$

Где $I(r)$ - приближенное распределение интенсивности в поперечном сечении, I_0 - интенсивность на оси волокна, w_0 - **радиус поля моды**, который также называют **размером пятна**, r - расстояние от оси волокна. Иногда используется термин "**диаметр поля моды**", равный удвоенному радиусу поля $2w_0$. Размер пятна определяется подбором гауссовой функции, наилучшим образом аппроксимирующей точное распределение света.

При значениях параметра V , близких к 2, для стандартного волокна со ступенчатым профилем показателя преломления качество подбора обычно является вполне хорошим.

1.2.3. Механические характеристики

Основными механическими характеристиками ОВ являются следующие:

- Прочность на разрыв
- Прочность по отношению к давлению
- Прочность после механической зачистки
- Уменьшение прочности при старении
- Стойкость по отношению к истиранию
- Сила снятия покрытия (эта характеристика определяет удобство эксплуатации оптического кабеля, изготовленного с использованием того или иного волокна).

Прочностные испытания оптического волокна являются разрушающими, поэтому невозможно обеспечение их постоянного контроля в процессе производства. Поэтому для постоянного текущего контроля ведущими производителями применяется процедура перемотки с натяжением. Отсутствие разрыва при такой процедуре гарантирует определенный уровень прочности тестируемого волокна на разрыв. Рассмотрим прочностные свойства ОВ более подробно.

Более 30 лет назад было установлено, что волокно из кварцевого стекла обладает очень высокой прочностью (~15 ГПа). Однако статистический характер распределения дефектов, приводящих к разрушению стекла, затрудняет реализовать высокопрочное состояние волокна на больших длинах. Изоляция поверхности стекловолокна от воздействия окружающей среды нанесением полимерных оболочек не увеличивает прочность стекла, а только исключает травмирование поверхности и обеспечивает сохранность прочностных свойств стекла.

На практике прочность кварцевых световодов в зависимости от метода испытаний характеризуется динамической и статической прочностью (долговечностью).

Первая определяется величиной разрушающего напряжения, вторая – длительностью процесса разрушения волокна под действием постоянного напряжения. Экспериментальные данные по измерению динамической прочности описываются следующим аналитическим выражением:

$$\log \sigma_d = (1 + p)^{-1} \log v_\sigma + (1 + p)^{-1} \log k_d \quad (1.2.21)$$

где: σ - приложенное к световоду напряжение, v_σ - скорость нагружения, k_d - коэффициент, характеризующий кварцевое стекло, p - параметр влияния окружающей среды.

Величина разрушающего напряжения σ зависит от размера дефекта r , расположенного на поверхности стекловолокна:

$$\sigma = 0.474 \times 10^{-3} r^{-0.5} \text{ (ГПа)} \quad (1.2.22)$$

На основании этого уравнения можно оценить величину трещины,

Таблица 2.5.2. Передача 2,5 Гбит/с сигнала (сигналов) по различным типам одномодовых волокон						
Усиление мощности сигнала на одной длине волны						
Волокно	Коррекция дисперсии	Усилители EDFA	Число каналов	Емкость волокна	Длина пролета	Ограничения системы
SF	Нет	УМ	1	2,4 Гбит/с	70-90 км	Мощность, дисперсия
SF	Внешняя модуляция	УМ	1	2,4 Гбит/с	140 км	Мощность
SF	Компенсация дисперсии	УМ	1	2,4 Гбит/с	120-140 км	Мощность
DSF	Нет	УМ	1	2,4 Гбит/с	120-140 км	Мощность
NZDSF	λ ₀ выводится из зоны EDFA	УМ	1	2,4 Гбит/с	120-140 км	Мощность
Линейное усиления многоканального сигнала (нескольких длин волн)						
SF	Внешняя модуляция	УМ, ЛУ	1, 2, 4, 8	2,4-20 Гбит/с	>500 км	ASE, отсутствует плато
SF	Компенсация дисперсии	УМ, ЛУ	1, 2, 4, 8	2,4-20 Гбит/с	>500 км	ASE, отсутствует плато
DSF	Нет	УМ, ЛУ	1- (нелин. эффекты)	2,4 Гбит/с	>500 км	ASE, отсутствует плато, четырехволновое смешивание
NZDSF	λ ₀ выводится из зоны EDFA	УМ, ЛУ	1, 2, 4, 8	2,4-20 Гбит/с	>500 км	ASE, отсутствует плато

Таблица 2.5.3. Передача 10 Гбит/с сигнала (сигналов) по различным типам одномодовых волокон						
Усиление мощности сигнала на одной длине волны						
Волокно	Коррекция дисперсии	Усилители EDFA	Число каналов	Емкость волокна	Длина пролета	Ограничения системы
SF	Внешняя модуляция	ПУ	1	10 Гбит/с	50-70 км	Дисперсия
SF	Внешняя модуляция + КД*	УМ, ПУ	1	10 Гбит/с	120-140 км	Мощность
DSF	Внешняя модуляция	УМ, ПУ	1	10 Гбит/с	120-149 км	Мощность
NZDSF	Внешняя модуляция, λ ₀ выводится из зоны EDFA	УМ, ПУ	1	10 Гбит/с	120-149 км	Мощность

Таблица 2.5.1. Сравнительные характеристики трех NZDSF волокон: TrueWave, SMF-LS и LEAF			
Характеристики	TrueWave™	SMF-LS™	LEAF™
Главное рабочее окно (нм)	1550	1550	1550
Затухание			
Максимальное затухание на длине волны 1550 нм (дБ/км)	0,22-0,25	≤ 0,25	≤ 0,25
Максимальное затухание на длине волны 1310 нм (дБ/км)	н/д	≤ 0,5	н/д
Максимальное затухание в диапазоне 1525-1575 (дБ/км)	≤ 0,30	≤ 0,30	≤ 0,30
Затухание на пике ОН- 1383±3 нм (дБ/км)	≤ 1,0	≤ 2,0	≤ 2,0
Затухание при искривлении на длине волны 1550 нм (дБ)	≤ 0,50 (1 виток 32 мм) ≤ 0,05 (100 витков 75 мм)	≤ 0,50 (1 виток 32 мм) ≤ 0,05 (100 витков 75 мм)	н/д
Затухание на сухом стыке при длине волны 1550 нм (дБ)	≤ 0,10	≤ 0,10	н/д
Хроматическая дисперсия в зоне ненулевой дисперсии			
min (пс/нм·км)	0,8 (зона 1540-60 нм)	н/д	1,0 (1540-60 нм)
max (пс/нм·км)	4,6 (зона 1540-60 нм)	-3,5 (зона 1530-1560 нм)	6,0 (1540-60 нм)
Наклон нулевой дисперсии S ₀ (пс/(нм ² · км))	н/д	≤ 0,092	н/д
Длина волны нулевой дисперсии l ₀ (нм)	≤ 1540	≥ 1560	н/д
Диаметр модового поля при длине волны 1550 нм (нм)	8,4 ± 0,6	8,4 ± 0,5	9,5 ± 0,5 9,6 (типовое)
Кабельная длина волны отсечки ICCF (нм)	≤ 1260	≤ 1260	н/д
Поляризационная модовая дисперсия (пс/км ^{1/2})	≤ 0,5 при 1550 нм (max) ≤ 0,1 при 1550 нм (типовое)	≤ 0,5 при 1550 нм (max)	≤ 0,08 при 1550 нм (типовое)

н/д - нет данных

которая обуславливает верхний уровень прочности (6 ГПа) метровых отрезков световодов в полимерной оболочке. Оказывается, что размер дефекта составляет $\sim 6 \times 10^{-9}$ м (6 нм). Эта величина в несколько десятков раз больше длины структурного звена *Si-O* в стекле, равного 0.16 нм. Прочность даже очень малых отрезков ОВ (6-7 ГПа), измеренная методом изгиба, свидетельствуют о гарантированном наличии трещин глубиной не менее 6 нм на поверхности стекловолокна диаметром 125 мкм и длиной около 1 мм.

Модельные представления о процессах разрушения хрупких тел на основе термофлуктуационного разрыва *Si-O* связи во влажной среде дают следующую зависимость долговечности τ от величины приложенного к волокну напряжения σ .

$$\ln \tau = \ln \tau_0 - a \ln P + U_0/(RT) - \eta \sigma / (RT) \quad (1.2.23)$$

где τ - длительность процесса разрушения, τ_0 - период атомных колебаний (10^{-13} с), a - порядок реакции гидролиза, η - константа, характеризующая дефектность образца, P - давление паров воды, U_0 - энергия гидролитического разрыва связи *Si-O*, R - газовая постоянная, T - температура (К), σ - растягивающее напряжение.

Сведения по величине a для кварцевого стекла противоречивы: рекомендованные значения порядка реакции гидролиза изменяются от 0.569 до 2.2. При постоянной температуре и влажности уравнение существенно упрощается:

$$\ln \tau = A - B\sigma \quad (1.2.24)$$

где A и B константы.

Статистический характер распределения дефектов по длине ОВ создает определенные трудности теоретического анализа механической надежности длинномерных оптических волокон. Для вероятностной оценки разрушения напряженного волокна широко используется модель «слабого звена». Согласно этой модели с увеличением длины волокна повышается частота появления более крупных дефектов. Вероятность F того, что прочность ОВ длиной L окажется менее определенной величины напряжения σ с учётом статистики Вейбулла определяется уравнением:

$$\ln \ln \left[(1 - F)^{-1} \right] = \ln L + m \ln \sigma = \ln L + \nu^{-1} \ln \sigma \quad (1.2.25)$$

где $m \approx 1/\nu$; ν - коэффициент вариации.

Параметр m характеризует прочность световодов: чем больше его значение, тем в меньшей степени отличается нижний уровень прочности от верхнего для разрывного напряжения отрезков волокна. Экспериментальные данные для серии образцов, как правило, ложатся на прямую линию в координатах Вейбулла: $\ln \sigma - \ln \ln (1 - F)^{-1}$. Если статистика образования дефектов имеет разную природу, то экспериментальные данные низкопрочного состояния ложатся на искривленную линию.

Срок службы ОВ (τ), находящегося под постоянной эксплуатационной нагрузкой $\sigma_{раб}$, можно оценить на основании его перемотки при повышенном напряжении $\sigma_{пер}$:

$$\tau = C(\sigma_{пер})^{n-2} / (\sigma_{раб})^n \quad (1.2.26)$$

где n – параметр, характеризующий влияние влаги равен 21.5 ± 1.5 , а C – является характеристикой дефектности волокна. Минимальное значение C равно 10^{-3} ГПа²·с.

Сущность такого подхода заключается в том, что разрушающее напряжение зависит от глубины трещины: чем меньше глубина трещины, тем больше величина критического разрушающего напряжения. Поэтому ОВ, перемотанный при высокой нагрузке ($\sigma_{пер}$) без разрушения, будет иметь трещины глубиной (l_1) меньшей, чем глубина критических трещин (l_2) для более низкой эксплуатационной нагрузки ($\sigma_{раб}$). Увеличение размера трещины от l_1 до l_2 (рис. 1.2.13) и определяет длительность срока эксплуатации ОВ, подверженного эксплуатационной нагрузке.

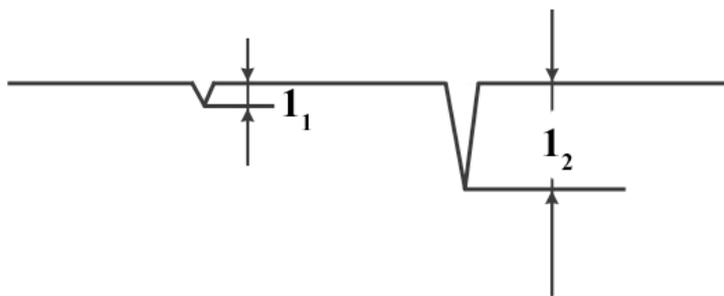


Рис. 1.2.13. Критическая глубина трещины l_1 и l_2 для напряжения перемотки ($\sigma_{пер}$) и эксплуатации ($\sigma_{раб}$), соответственно

Рассмотренные аналитические модели дают возможность достаточно надежно оценить долговечность ОВ, но не вскрывают природу образования и распределения микродефектов в волокне. Очевидно, что специфика состояния этих дефектов связана в первую очередь с гетерогенным состоянием микропримесей в кварцевом стекле. Поэтому прочностные свойства ОВ определяются условиями получения опорных труб и технологией изготовления заготовок. Прочность световодов также существенно зависит от технологических параметров вытягивания волокна: температуры, натяжения и концентрации взвешенных частиц в высокотемпературной зоне.

Разрушение ОВ начинается, как правило, с дефекта, расположенного на поверхности волокна. В связи с этим качество стекломассы наружной кварцевой оболочки существенно влияет на прочностные свойства ОВ. Практика показывает, что используемые в MCVD методе трубы процессов непрерывного формования из природного сырья отличаются низкой стоимостью, но не могут обеспечить высокой прочности световодов, особенно если наплавление стекла происходит в среде водорода. Трубы из синтетического кварцевого стекла более дорогие, однако содержат

- хроматическая дисперсия может быть приближена к нулю. Компенсация хроматической дисперсии допустима в силу систематического характера накопления дисперсии с ростом длины;
- Использование оптических лазерных передатчиков с очень узкой спектральной шириной (0,1 нм и менее), способных модулировать излучение на частотах в несколько ГГц;
- Использование волокон типа NZDSF, в которых "сдвигается" длина волны нулевой дисперсии за пределы окна 1550 нм, в результате чего дисперсия становится достаточно большой, чтобы подавить эффект четырехволнового смешивания, в то же время достаточно малой, чтобы поддерживать распространение сигнала высокой емкости (высокой частоты модуляции) на большие расстояния.

Сегменты на основе волокна SF без использования коррекции дисперсии допускают протяженность до 90 км (при скорости передачи 2,4 Гбит/с). Первые две методики коррекции дисперсии, применяясь отдельно друг от друга или в комбинации, позволяют увеличить протяженность сегментов до 140 км при сохранении прежней скорости передачи (таблица 4).

Чтобы удовлетворить рабочим требованиям при планировании сети следует тщательно выработать стратегию наращивания сети. Нужно оценивать соответствующие топологии сетей с учетом возможности их работы на скоростях 2,4 и 10 Гбит/с. Ближайшая цель - построить протяженные участки (до 120-140 км) при передаче на скорости 2,4 Гбит/с с использованием любых из трех главных типов волокон - должна рассматриваться совместно с планами более далекой перспективы - инсталляция линий на скорость передачи 10 Гбит/с с использованием последовательно установленных линейных усилителей. Высокая скорость передачи в последнем случае может быть достигнута путем оптимизации длины сегментов между линейными усилителями (приблизительно 70 км).

Хотя волокна SF и DSF вполне приемлемы для осуществления наращивания сегментов сетей, волокно NZDSF более перспективно при использовании в новых инсталляциях. При сравнении волокон SF и DSF, отметим, что SF лучше подходят для сетей, использующих волновое мультиплексирование. Недостаток SF - большое значение дисперсии в окне 1550 нм - может компенсироваться либо дополнительным участком на основе волокна с компенсирующей дисперсией, либо путем уменьшения спектральной ширины излучаемого сигнала (например, используя передатчики на основе DFB лазеров).

Общие возможности по развертыванию кабельных систем на основе SF, DSF и NZDSF приведены в таблицах 2.5.1 и 2.5.2.

По дисперсионным характеристикам волокно LEAF близко к волокну TrueWave. Главной отличительной чертой этого волокна по сравнению с двумя предыдущими является большая эффективная площадь для светового потока - диаметр модового пятна возрос на 1 мкм. Величина этого параметра становится весьма важной для оптимизации систем диапазона 1550 нм. Большой диаметр модового пятна позволяет увеличить уровень мощности излучения, вводимого в волокно, на 2 дБ, сохраняя при этом влияние ряда нелинейных эффектов, в особенности четырехволнового смешивания, на прежнем уровне.

2.5.6. Требования к волокну в высокоскоростных магистральных

Современные тенденции развития средств телекоммуникационной связи свидетельствуют в перспективность систем передачи по волокну, в которых совмещаются временное мультиплексирование - TDM (time division multiplexing) мультиплексирование (STM-16 на 2,4 Гбит/с и STM-64 на 10 Гбит/с) в пределах одной длины волны и волновое мультиплексирование WDM (wavelength division multiplexing).

Хотя и последователи технологии волнового мультиплексирования (Lucent, MIT, Fujitsu и др.) уже широко тестируют в рамках испытательных сетей мультиплексирование 32 и более каналов в расчете на одно волокно, добившись уже скорости передачи 40 Гбит/с на расстояния в несколько сотен км, в ближайшей перспективе видится меньшее количество мультиплексных каналов (до 16 при скорости передачи до 2, 4 и 10 Гбит/с) в крупномасштабном индустриальном применении в телекоммуникационных сетях.

Инсталляция новых кабельных сегментов, или наращивание существующих с учетом перехода на скорости передачи 2,4 и 10 Гбит/с, может осуществляться с использованием трех перечисленных видов волокон. При выборе волокна следует учитывать такие факторы, как общая стоимость проекта, требуемые емкости каналов, надежность, сложность системы и др.

В контексте эволюции волоконно-оптических линий связи ключевыми параметрами становятся методики, используемые для коррекции дисперсии в волоконно-оптических системах. Коррекция дисперсии позволяет увеличивать длину волоконно-оптических TDM систем, ранее ограниченных из-за большой дисперсии, и одновременно избежать влияния такого эффекта, как четырехволновое смешивание. Три методики коррекции дисперсии следующие:

Использование волокон с компенсирующей дисперсией DCF (dispersion-compensating fibers). Положительная дисперсия, накопленная на одном участке с использованием стандартного волокна SF может компенсироваться последующим примыкающим сегментом на основе волокна DCF с заранее подобранным значением отрицательной дисперсии, в результате чего итоговая

существенно меньше микродефектов, благодаря чему обеспечивают высокопрочное состояние ОВ. По той же причине высокая чистота наружной кварцевой оболочки заготовок OVD и AVD процессов не создает особых проблем с получением ОВ, обладающих необходимым уровнем прочности.

Гетерогенное состояние примесей, являющееся основным фактором, лимитирующим прочностные свойства оптического волокна, обусловлено двумя основными причинами:

- Первая заключается в восстановлении примесных оксидов плавленным кварцем, состав которого отличается от стехиометрии дефицитом кислорода.

- Вторая причина заключается в ликвационном фазовом распаде содержащих примесь микрообластей в температурном интервале (2100-1500°С) пластической деформации заготовки при её вытягивании. Это приводит к появлению микросфер с повышенным содержанием примесей, которые, обладая более высоким коэффициентом термического напряжения по сравнению с кварцевым стеклом, создают растягивающие напряжения при охлаждении волокна.

Суммарное количество примесей металлов в кварцевом стекле марки КВ, используемом для изготовления опорных кварцевых труб, равно 7.5×10^{-3} мас. %, существенно меньше величины дефицита кислорода (0.1%) плавленного кварца. Поэтому с увеличением температуры нестехиометричный диоксид кремния может восстанавливать оксиды примесных металлов вплоть до элементарного состояния. Такие окислительно-восстановительные процессы могут стабилизировать дисперсное состояние примесей, что исключает возможность их растворения на атомном уровне. Более того, повышенная излучательная способность примесей (FeO , Fe_2O_3 , Cr_2O_3 , TiO_2 , NiO и др.) в спектральной области прозрачности кварцевого стекла приводит к локальному охлаждению и стабилизации формы дисперсной фазы в стекле при формировании труб или волокон методом вытягивания.

В таблице 1.2.1. представлены данные по температуре начала ликвационного распада кварцевого стекла, содержащего примесь.

Снижению степени ликвационного фазового разделения способствуют снижение содержания примесей в наружном слое заготовок, а также повышение температуры и скорости вытягивания волокна.

Таблица 1.2.1. Температура начала фазового распада кварцевого стекла, содержащего примесь					
Примесь	ZrO ₂	CaO	Cr ₂ O ₃	TiO ₂	FeO
Температур критического расслоения, Т°С	2430	2100	2200	1780	1700

Влияние дефектов поверхностного слоя заготовки на прочность стекловолокна можно снизить двумя основными приемами. Первый заключается в нанесении на заготовку методом газофазного осаждения слоя особо чистого кварцевого стекла. Второй прием предусматривает создание сжимающих напряжений в поверхностном слое световода. Для этих целей на заготовку наносят тонкую оболочку легированного кварцевого стекла, обладающего более низкой вязкостью или коэффициентом термического расширения.

Кристаллизация кварцевого стекла (его превращения в кристоболит) на поверхности заготовок в процессе вытягивания волокна также может привести к снижению прочности световодов. Результаты опубликованных исследований показали, что при температурах близких к температуре плавления кристобалита ($\approx 1700^\circ\text{C}$) кристаллизация стекла происходит только при давлении кислорода более 2×10^{-6} атм. Снижение давления кислорода ниже этого уровня (т. е. создание восстановительной газовой атмосферы) исключает кристаллизацию стекла.

Полностью исключить дефекты в световодах, защищенных полимерным покрытием, невозможно, однако минимальный уровень их прочности можно поднять за счет тепловой (в инертной среде при $300\text{--}350^\circ\text{C}$) или химической (в парах SiCl_4) обработки, обеспечивающей увеличение долговечности низкопрочного состояния в $10\text{--}100$ раз.

Удаление влаги из полимерного покрытия ОВ проводит почти к двукратному увеличению их динамической прочности: с 6 до 12 ГПа. Нанесение на кварцевое волокно герметичного металлического покрытия исключает влияние влаги на процесс разрушения стекла, чем достигаются прочность в 14 ГПа.

1.2.4. Прочие характеристики

Оптическое волокно может также характеризоваться стойкостью к внешним воздействиям: стойкостью к воздействию температурных циклов, стойкостью к химическим воздействиям, стойкостью к воздействию гамма излучения. Дополнительными свойствами могут характеризоваться специальные типы волокна (см. главу 5). К характеристикам специальных типов волокна относятся чувствительность к воздействию ультрафиолетового излучения, способность поддерживать определенный тип поляризации, малые потери на закруглениях большой кривизны и т.д.

Отдельный класс представляют собой волокна, легированные ионами редкоземельных элементов (например, эрбия, иттербия, неодима, празеодима, тулия), предназначенные для работы в качестве усилителей или активных элементов лазеров (см. главу 5).

1.3. Сравнительный анализ характеристик оптического волокна

Одномодовое волокно существенно превосходит многомодовое по

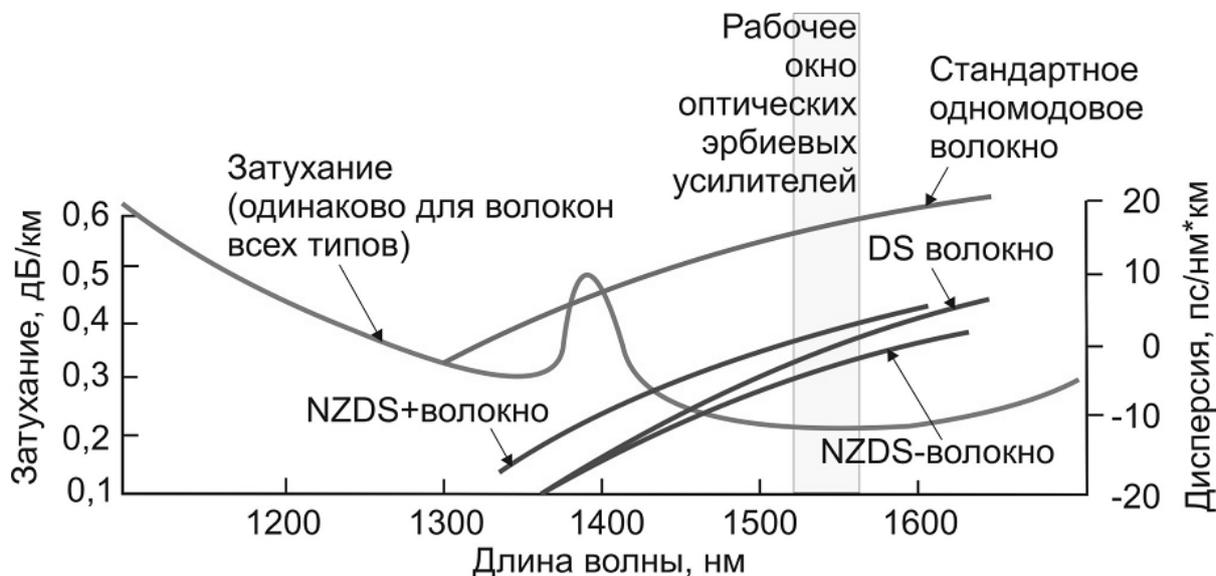


Рис. 2.5.2. Спектральные зависимости затухания и дисперсии NZDS волокон

Две марки λ -смещенного волокна, появившиеся в конце 90-х годов, широко используется сегодня: волокно TrueWave фирмы Lucent Technologies и волокно SMF-LS фирмы Corning. Оба они имеют ненулевую дисперсию во всем диапазоне полосы пропускания эрбия. Волокно TrueWave обеспечивает положительную дисперсию при точке нулевой дисперсии в районе 1523 нм, в то время как SMF-LS обеспечивает отрицательную дисперсию с точкой нулевой дисперсией чуть выше 1560 нм, рис.2.5.3. В начале 1998 года фирма Corning выпустила еще одну марку λ -смещенного волокна - LEAF. Сравнительный анализ основных характеристик волокон TrueWave, SMF-LS и LEAF приведен в таблице 3.

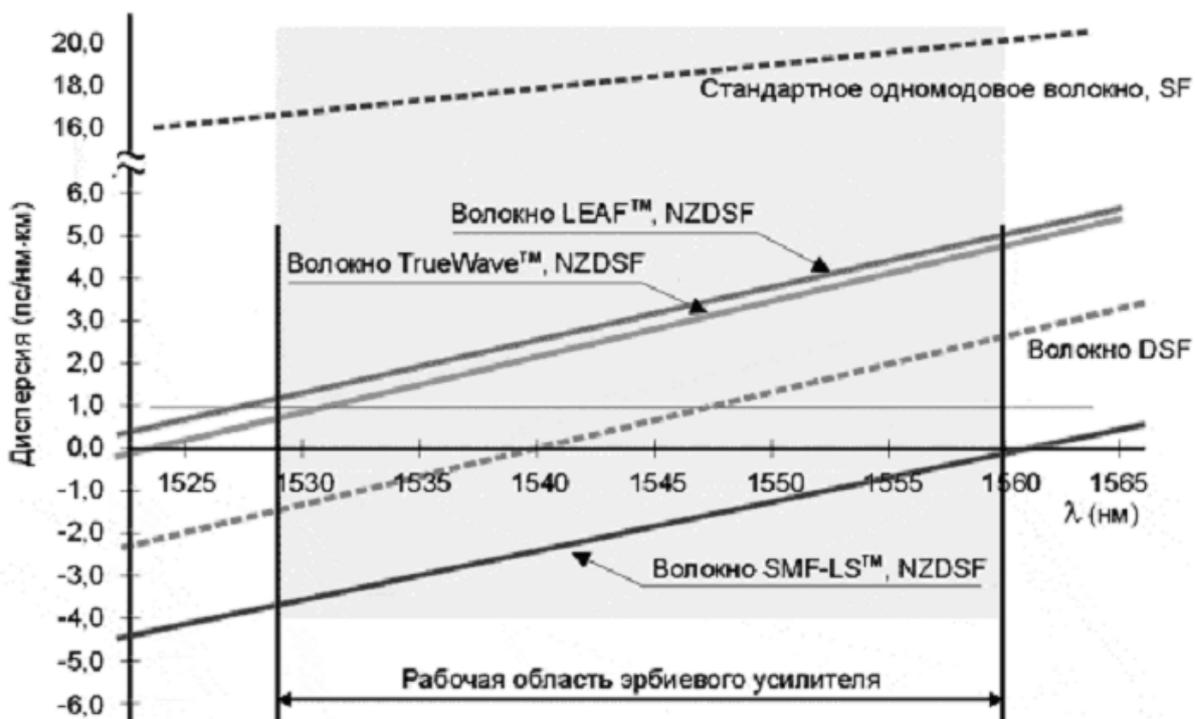


Рис. 2.5.3. Хроматическая дисперсия одномодовых волокон в окне 1550 нм

Однако в случае отсутствия хроматической дисперсии возникает **проблема нелинейных эффектов**, обусловленная высокой мощностью оптических сигналов в волокне, что связано с необходимостью передачи на большие расстояния и применением оптических усилителей при высокой плотности спектральных компонент.

Наиболее важным для систем, использующих DWDM-технологии, является **эффект четырехволнового смещения**, приводящий через взаимодействие отдельных спектральных компонент со средой (сердцевинной ОВ) к взаимодействию спектральных компонент друг с другом. Эффект четырехволнового смещения приводит к тому, что после прохождения DWDM-сигналом определенной длины волокна возникают компоненты на кратных частотах, т. е. становится невозможным *демультиплексирование сигнала*. Как выяснилось, наличие в оптическом волокне некоторого уровня хроматической дисперсии эффективно подавляет влияние нелинейных эффектов. NZDS-волокно как раз отвечает вышеперечисленным требованиям.

NZDS-волокно предназначено для использования в линиях с большой протяженностью регенерационного участка с DWDM уплотнением сигнала. Рабочий диапазон для этих оптических волокон 1,530-1,565 мкм, уровень хроматической дисперсии в рабочем диапазоне 0,1-6 пс/нм*км. Такой уровень дисперсии достаточно низок для того, чтобы обеспечить скорость передачи до 10 Гбит/с в каждом спектральном канале, и в то же время достаточно высок для эффективного подавления нелинейных эффектов при использовании DWDM-технологий. Даже без использования DWDM-технологии этот тип волокон обеспечивает большую пропускную способность и протяженность **регенерационного участка**, чем стандартное одномодовое волокно. Интересной особенностью данного типа волокна является возможность получения волокон с одинаковой по величине, но разной по знаку дисперсией (NZDS+волокно и NZDS-волокна), что дает возможность построения линий со скомпенсированной, близкой к нулю дисперсией, без применения дополнительных устройств. Спектральные зависимости затухания и дисперсии NZDS-волокон показаны на рис.2.5.2.

Волокно NZDSF создано в начале 90-х годов с целью, преодолеть недостатки DSF, проявляющиеся при работе с мультиплексным оптическим сигналом. Известное также как λ -смещенное волокно, оно имеет особенность в том, что длина волны нулевой дисперсии вынесена за пределы полосы эрбиевого усилителя. Это уменьшает нелинейные эффекты и увеличивает характеристики волокна при передаче DWDM сигнала.

многим параметрам. Главное преимущество – меньшая дисперсия и, следовательно, большая пропускная способность (скорость передачи информации). Главный недостаток одномодовых волокон – малый размер сердцевины и, следовательно, более высокие требования к источникам излучения, системам ввода света в волокно, к соединениям волокон и к другим пассивным элементам систем связи. Для достижения высокой эффективности ввода излучения волновод необходимо освещать источником с числовой апертурой и размерами, не превышающими числовой апертуры и диаметра сердцевины (диаметра поля моды) волокна.

В качестве источников света в передатчиках для ВОСП используются полупроводниковые светодиоды, суперлюминесцентные светодиоды и полупроводниковые лазеры. Светодиоды используются совместно с многомодовым волокном, а полупроводниковые лазеры с одномодовым.

По мере развития технологии производства пассивных и активных компонент ВОСП одномодовое волокно вытесняет многомодовое благодаря главному преимуществу: отсутствию межмодовой дисперсии и сохранению пространственной когерентности. Это позволяет обеспечивать очень высокую информационную пропускную способность одномодового волокна. Поэтому, при выборе волокна для обеспечения передачи информации на относительно большие расстояния выбор должен быть за одномодовым волокном.

Для целей связи на короткие расстояния, такой, как связь между компьютерами внутри зданий, может использоваться многомодовое волокно. Иногда для увеличения широкополосности такое волокно возбуждается излучением с апертурой значительно меньшей апертуры самого волокна, что значительно снижает межмодовую дисперсию.

1.3.1. Сравнение оптических волокон по величине широкополосности

Из многомодовых волокон для коммуникационных целей в настоящее время применяются только градиентные параболические волокна.

Хотя межмодовая дисперсия в многомодовом волокне является определяющим фактором, при использовании широкополосных (но более дешевых) источников излучения (светоизлучающих диодов) хроматическая дисперсия также становится заметным фактором, ограничивающим пропускную способность волокна. В этом случае пропускная способность волокна не является характеристикой только самого волокна, т.к. она зависит и от параметров других элементов ВОСП. Для оценки пропускной способности волокна можно считать, что ее величина, измеряемая в $[(\text{Мбит/с}) \cdot \text{км}]$, равна удвоенной широкополосности волокна, измеряемой в $[(\text{МГц}) \cdot \text{км}]$.

В соответствии со стандартом FDDI широкополосность ОВ на

длинах волн 850/1300 нм составляет 160/500 МГц·км. Такие значения соответствуют полному заполнению апертуры волокна излучением источника. Использование лазера с узким спектром и малой угловой апертурой позволяет увеличить ширину полосы модуляции передаваемого сигнала еще в несколько раз.

Таблица 1.3.1. Характеристики многомодового волокна					
Вид волокна	Потери (дБ/км) 850нм	Потери (дБ/км) 1300нм	Потери (дБ/км) 1550нм	Степеньки затухания (дБ/км)	Широкополосность МГц*км
Corning Inficor600	2.7	0.8	0.29	-	500
50/125CPC6	2.5	0.8		≤0.2	400-1000
62.5/125CPC6	3.0	0.7		≤0.2	200-800
Fujikura G50/125 1005	-	1.0	-	-	500
G50/125 1002	-	1.0	-	-	200
G50/125 3005	3.0	-	-	-	500
G50/125 3002	3.0	-	-	-	200

1.3.2. Сравнение оптических волокон по величине дисперсии

По величине хроматической дисперсии одномодовые волокна можно разделить на следующие типы (более подробно типы оптических волокон рассмотрены в главе 2):

- Стандартное одномодовое волокно (SF)
- Волокно со смещенной дисперсией (DSF)
- Волокно с ненулевой смещенной дисперсией (NZ DSF)
- Волокно со сглаженной дисперсией
- Специальное волокно

На рис.1.3.1 показаны типичные примеры зависимости параметра D_{hr} от длины волны параметра дисперсии стандартного волокна, волокна со смещенной нулевой и ненулевой смещенной дисперсией.

Одномодовое волокно со ступенчатым профилем показателя преломления, удовлетворяющее рекомендации ITU G.652 называется стандартным волокном (SF). Длина волны нулевой дисперсии такого волокна равна 1310 нм, что делает его оптимальным для работы во втором окне прозрачности. Хроматическая дисперсия на длине волны 1550 достаточно высока – около 18пс/нм*км. Столь высокое значение дисперсии затрудняет работу в режиме высоких скоростей передачи информации (более 10Гбит/с), т.к. требует использования устройств компенсации дисперсии.

По мере совершенствования систем передачи на длине волны 1550 нм встает задача разработки волокна с длиной волны нулевой дисперсии, попадающей внутри этого окна и полностью оптимизированного для работы в окне 1550 нм, как по затуханию, так и по дисперсии. На протяжении многих лет волокно DSF считается самым перспективным волокном. С приходом более новых технологий передачи мультиплексного оптического сигнала, большую роль начинают играть эрбиевые оптические усилители типа EDFA, способные усиливать многоканальный сигнал. К сожалению, более поздние исследования (в начале 90-х годов) показывают, что именно длина волны нулевой дисперсии (1550 нм), попадающая внутрь рабочего диапазона эрбиевого усилителя, является главным потенциальным источником нелинейных эффектов (прежде всего четырехволнового смешивания), которые проявляются в резком возрастании шума при распространении многоканального сигнала.

Дальнейшее исследования подтверждают ограниченные возможности DSF при использовании в системах WDM. Чтобы избежать нелинейных эффектов при использовании DSF в WDM системах, следует вводить сигнал меньшей мощности в волокно, увеличивать расстояние между каналами, и избегать передачи парных каналов (симметричных относительно λ_0).

Четырехволновое смешивание - это эффект, приводящий к рассеянию двух волн с образованием новых нежелательных длин волн. Новые волны могут приводить к деградации распространяемого оптического сигнала, интерферируя с ним, или перекачивать мощность из полезного волнового канала. Именно из-за эффекта четырехволнового смешивания стало ясно, что необходимо разработать новый тип волокна, в котором λ_0 располагалась бы вдали, то есть, по одну сторону (левее или правее) от всех возможных каналов.

Волокно NZDSF

Внедрение технологий «плотного» частотного уплотнения (DWDM) вкуче с использованием эрбиевых оптических усилителей привело к разработке нового типа оптических волокон. При использовании технологии DWDM в оптическом волокне одновременно вводится большое количество (до 100) оптических сигналов на близких длинах волн, каждый из которых несет свой, независимый от других информационный поток. Применение этой технологии позволяет радикально повысить пропускную способность оптических линий, но при этом накладывает определенные требования на само оптическое волокно как на среду передачи оптического излучения.

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

волокна со ступенчатым профилем, рис.2.5.1,а), волокна со смещенной дисперсией DSF (рис.2.5.1,б) и волокна с ненулевой смещенной дисперсией NZDSF.

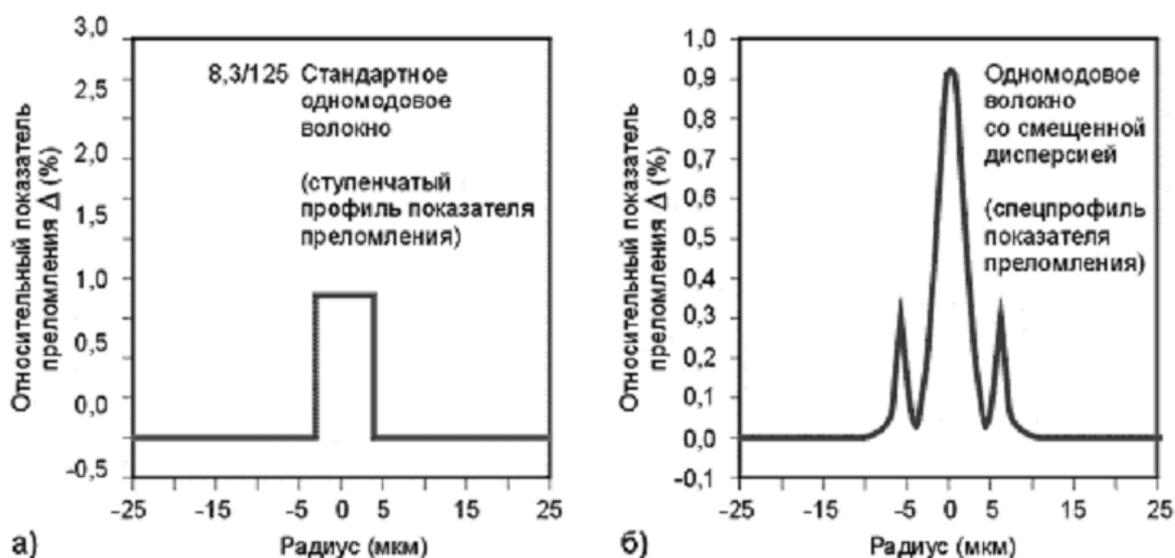


Рис. 2.5.1. Профили показателей преломления наиболее распространенных одномодовых волокон: а) ступенчатое одномодовое волокно (стандартное волокно); б) одномодовое волокно со смещенной дисперсией (волокно со специальным профилем)

Все три типа волокон очень близки по затуханию в окнах одномодовой передачи 1310 и 1550 нм, но отличаются характеристиками хроматической дисперсии. Поскольку дисперсия влияет на максимальную допустимую длину безретрансляционных участков, то на первый взгляд естественно возникает желание выбрать волокно с наименьшим возможным значением дисперсии применительно к конкретной задаче, к конкретной длине волны. Это справедливо для случая передачи одной длины волны - одноканальной передачи. Многоканальное волновое мультиплексирование (WDM) в окне 1550 нм диктует иной рационализм. Исследования показывают, что когда длина волны нулевой дисперсии попадает в зону мультиплексного сигнала, начинают проявляться нежелательные интерференционные эффекты, приводящие к более быстрой деградации сигнала. Поэтому, поставщики средств связи должны отчетливо представлять себе преимущества и недостатки каждого волокна в аспекте эволюции традиционных сетей к полностью оптическим сетям.

Волокно SF

В начале 80-х годов передатчики на длину волны 1550 нм имели очень высокую цену и низкую надежность и не могли конкурировать на рынке с передатчиками на длине волны 1300 нм. Поэтому стандартное ступенчатое волокно SF (рис.14, а), стало первым коммерческим волокном и сейчас наиболее широко распространено в телекоммуникационных сетях. Оно оптимизировано по дисперсии для работы в окне 1310 нм, хотя и дает меньшее затухание в окне 1550 нм.

Волокно DSF

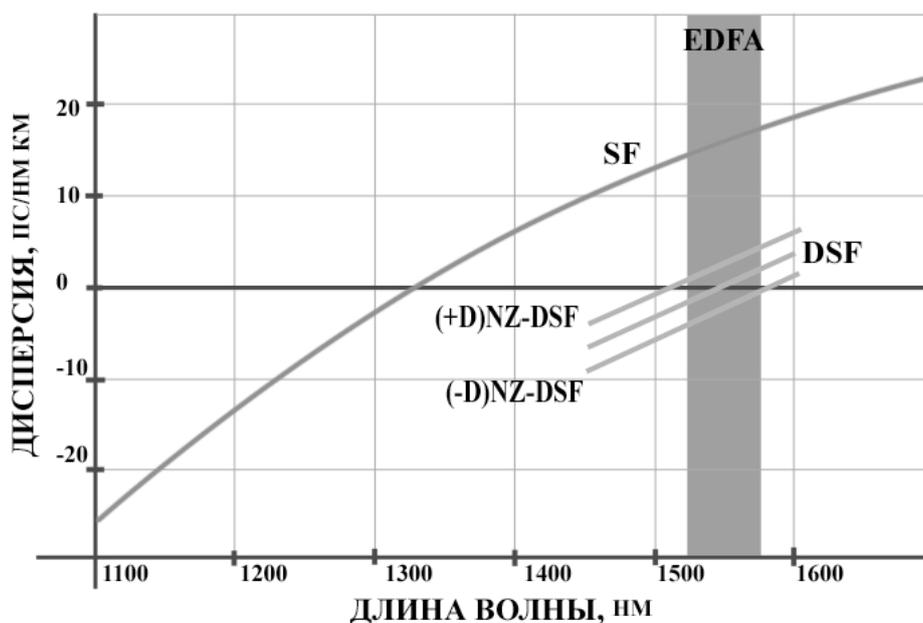


Рис.1.3.1. Хроматическая дисперсия в ОВ разных типов

Для повышения скорости передачи информации по одному каналу в третьем окне прозрачности (1550 нм) было разработано волокно со смещенной нулевой дисперсией (DSF), в котором за счет специально подобранного профиля показателя преломления сердцевины длина волны нулевой дисперсии равна 1550 нм. Характеристики такого волокна регламентируются рекомендациями ITU G.653. Однако именно это волокно оказалось неудачным для систем со спектральным разделением каналов (DWDM) из-за влияния эффекта четырехволнового смешения. Этот эффект заключается в возникновении комбинационных частот, приводящих к взаимным помехам каналов. На рис.1.3.2 показано влияние дисперсии на величину паразитных световых сигналов на комбинационных частотах в результате четырехволнового смешения.

В волокна с дисперсией в одном случае 0 пс/нм*км и 2,5 пс/нм*км во втором случае вводится излучение четырех спектральных каналов с мощностью 2 мВт в каждом. На выходе волокна длиной 50 км с ненулевой дисперсией излучение на дополнительных длинах волн не наблюдается. В волокне той же длины с нулевой дисперсией эффективно идет четырехволновое смешение и ясно видны более 20 дополнительных пиков. Из необходимости ослабления нелинейных эффектов ясно вытекает специфическое для систем со спектральным уплотнением каналов требование к оптическому волокну – отличная от нуля, но не очень большая дисперсия на длинах волн несущего излучения; при этом изменение дисперсии с длиной волны должно быть минимальным.

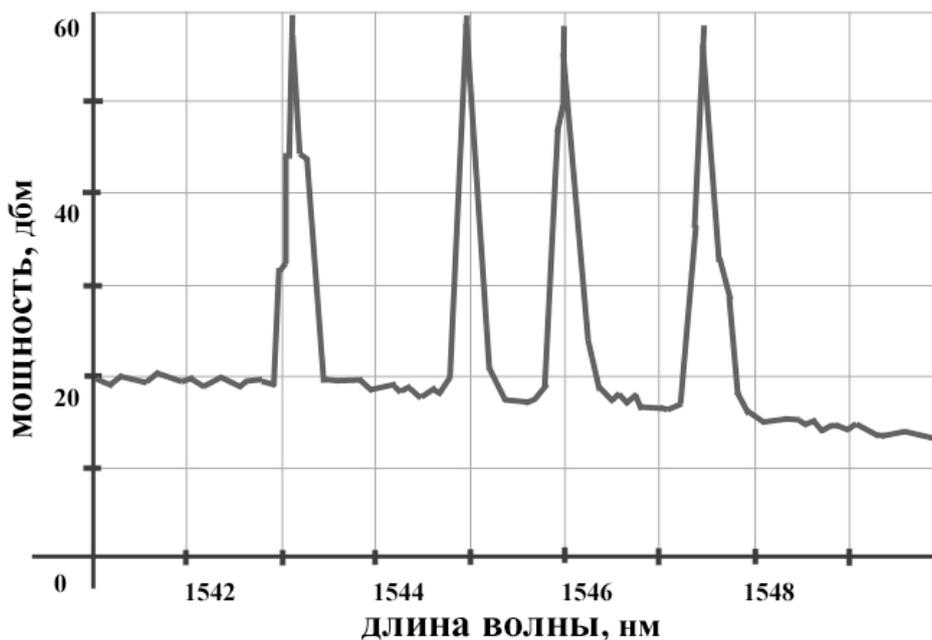
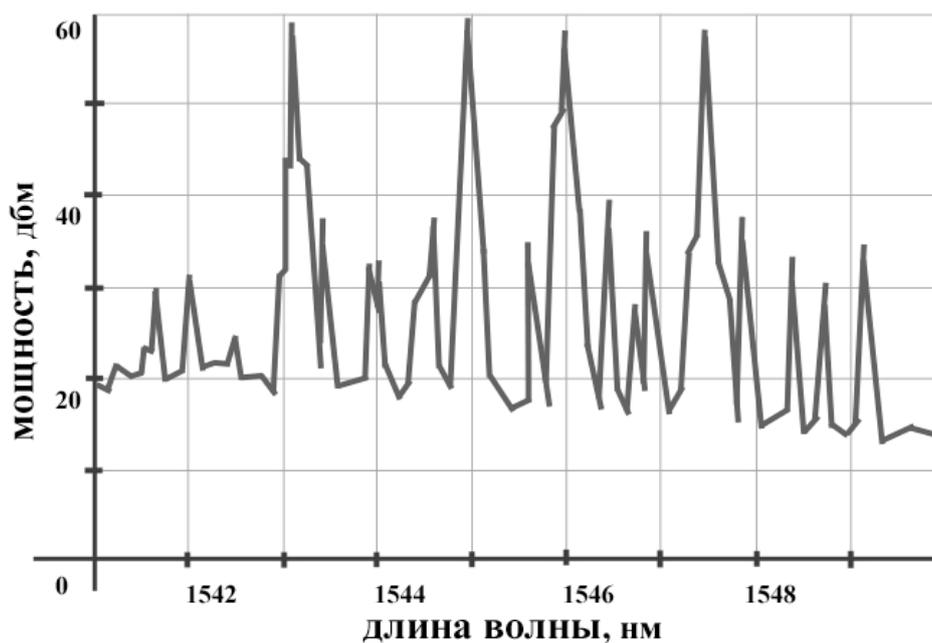


Рис.1.3.2. Четырехволновое смешение в волокне с нулевой и ненулевой дисперсией

Для подавления нелинейных эффектов, в первую очередь эффекта четырехволнового смешения, были разработаны волокна, в которых длины волн нулевой дисперсии выведены за пределы рабочего диапазона.

Такое волокно называется волокном с ненулевой смещенной дисперсией (NZDSF) и оно описывается рекомендациями ITU G.655.

Таблица 1.3.2. Характеристики стандартных ступенчатых волокон

Вид волокна	Числовая апертура	Δ , %	Диаметр пятна 2ω , мкм	Λ_{ZD} , мкм	Наклон кривой ДГС, пс/(км-нм ²)
-------------	-------------------	--------------	-------------------------------	----------------------	---

2.5.3. Одномодовое волокно с ненулевой смещенной дисперсией

Одномодовое волокно с ненулевой смещенной дисперсией NZDSF в отличие от DSF оптимизировано для передачи не одной длины волны, а сразу нескольких длин волн (мультиплексного волнового сигнала) и наиболее эффективно может использоваться при построении магистралей "полностью оптических сетей" - сетей, на узлах которых не происходит оптоэлектронного преобразования при распространении оптического сигнала.

2.5.4. Работа одномодового оптического волокна с эрбиевым оптическим усилителем

Передача мультиплексного сигнала на большие расстояния требует использования линейных широкополосных оптических усилителей, из которых наибольшее распространение получили так называемые эрбиевые усилители на основе легированного эрбием волокна (erbium doped fiber amplifier - EDFA). Линейные усилители типа EDFA эффективно могут усиливать сигнал в своем рабочем диапазоне от 1530-1560 нм. Длина волны нулевой дисперсии у волокна NZDSF в отличии от волокна DSF выведена за пределы этого диапазона, что значительно ослабляет влияние нелинейных эффектов в окрестности точки нулевой дисперсии при распространении нескольких длин волн.

Оптимизация трех перечисленных типов одномодовых волокон совершенно не означает, что они всегда должны использоваться исключительно под определенные задачи: SF - передача сигнала на длине волны 1310 нм, DSF - передача сигнала на длине волны 1550 нм, NZDSF - передача мультиплексного сигнала в окне 1530-1560 нм. Так, например, мультиплексный сигнал в окне 1530-1560 нм можно передавать и по стандартному ступенчатому одномодовому волокну SF. Однако, длина безретрансляционного участка при использовании волокна SF будет меньше, чем при использовании NZDSF, или иначе потребуется очень узкая полоса спектрального излучения лазерных передатчиков для уменьшения результирующей хроматической дисперсии. Максимальное допустимое расстояние определяется техническими характеристиками как самого волокна (затуханием, дисперсией), так и приемо-передающего оборудования (мощностью, частотой, спектральным уширением излучения передатчика, чувствительностью приемника).

2.5.5. Эволюция одномодовых волокон

С точки зрения дисперсии существующие одномодовые волокна, которые широко используются в сетях сегодня, разбиваются на три основных типа: волокна с несмещенной дисперсией SF (стандартные

что обычно в качестве передатчиков используются светоизлучающие диоды, имеющие уширения спектральной линии излучения благодаря некогерентности источника примерно $\Delta\lambda \sim 50$ нм, в отличие от лазерных диодов с уширением $\Delta\lambda \sim 2$ нм и меньше. Это приводит к тому, что хроматическая дисперсия на длине волны 850 нм начинает играть существенную роль наряду с межмодовой дисперсией. Значительно уменьшить хроматическую дисперсию можно при использовании лазерных передатчиков, имеющих значительно меньшее спектральное уширение. Воспользоваться этим преимуществом лазерных передатчиков можно только при использовании одномодового волокна в окнах прозрачности 1310 нм и 1550 нм, когда полностью отсутствует межмодовая дисперсия и остается только хроматическая дисперсия.

2.5. Основные типы одномодовых волокон

2.5.1. Ступенчатое одномодовое волокно

В ступенчатом одномодовом волокне (SF) диаметр светонесущей жилы составляет 8-10 мкм и сравним с длиной световой волны. В таком волокне при достаточно большой длине волны света $\lambda > \lambda_{CF}$ (λ_{CF} - длина волны отсечки) распространяется только один луч (одна мода). Одномодовый режим в одномодовом волокне реализуется в окнах прозрачности 1310 и 1550 нм. Распространение только одной моды устраняет межмодовую дисперсию и обеспечивает очень высокую пропускную способность одномодового волокна в этих окнах прозрачности. Наилучший режим распространения с точки зрения дисперсии достигается в окрестности длины волны 1310 нм, когда хроматическая дисперсия обращается в ноль. С точки зрения потерь это не самое лучшее окно прозрачности. В этом окне потери составляют 0,3-0,4 дБ/км, в то время как наименьшее затухание 0,2-0,25 дБ/км достигается в окне 1550 нм.

2.5.2. Одномодовое волокно со смещенной дисперсией

В одномодовом волокне со смещенной дисперсией (DSF) длина волны, на которой результирующая дисперсия обращается в ноль, - длина волны нулевой дисперсии λ_0 - смещена в окно 1550 нм. Такое смещение достигается благодаря специальному профилю показателя преломления волокна, рис.2.2.4. Таким образом, в волокне со смещенной дисперсией реализуются наилучшие характеристики как по минимуму дисперсии, так и по минимуму потерь. Поэтому такое волокно лучше подходит для строительства протяженных сегментов с расстоянием между ретрансляторами до 100 и более км. Разумеется, единственная рабочая длина волны берется близкой к 1550 нм.

Corning SMF-28	0.13	0.36	9.3	1.312	0.090
Fujikura SM	-	-	9.5	1.31	0.09
AT&T Matched-clad LITESPEC	0.12	0.33	9.3	1.312	0.088
GSM-13	0.12	0.33	9.3	1.312	0.087
Alcatel AFC 3	0.12	-	9.1±0.5	1.31±0.01	0.092

Таблица 1.3.3. Характеристики волокон со смещенной дисперсией				
Вид волокна	Диаметр поля моды 2 ω , мкм	Λ_{ZD} , нм	Макс. Дисп. 1535-1575нм (пс/км*нм)	Наклон кривой ДГС, пс/(км-нм ²)
Corning SMF-DS	8.1±0.65	1.550	±1.5	0.075
Corning SMF-LS	8.40±0.5	1.530-1.560	2.0-5.0	0.07
Corning SMF-LS Submarine	8.4±0.5	1.585	-6.0	0.07
Corning LEAF	9.6±0.4	-	2.0-6.0	0.11
Corning LEAF Submarine	9.3±0.3	1575	-3.0	0.11
LITESPEC GSM-13	8.0	1.555	-1.8	0.072
Fujikura DSM G 8/125 03	8.0	-	3.5	0.09
AT&T True Wave	8.4	1.530	4.2	0.095
Alcatel AFC 3 TeraLight	9.2	1.440	7.9	0.058
Lucent TrueWave RS	8.5±0.6	-	6.0	0.05

Нулевая дисперсия может быть смещена либо в сторону коротких волн относительно длины волны 1550 нм, либо в сторону длинных волн. У волокон первого типа в третьем окне прозрачности положительная дисперсия, у волокон второго типа – отрицательная. В соответствии с этим они обозначаются (+D) NZDSF и (-D) NZDSF. У волокон с ненулевой смещенной дисперсией величина дисперсии достаточна для подавления четырехволнового смешения и при этом сохраняется возможность высокой скорости передачи информации без применения компенсации хроматической дисперсии (до 10 Гбит/с на канал на расстояния до 500 км). Поэтому волокна такого типа наилучшим образом подходят для

использования в системах со спектральным разделением каналов.

В высокоскоростных системах связи при использовании узкополосных источников излучения становится заметным влияние поляризационной модовой дисперсии.

1.3.3. Сравнение оптических волокон по затуханию

Наибольший интерес для целей передачи информации представляет световое излучение с длинами волн 850 нм, 1.31 мкм и 1.55 мкм, поскольку они расположены между зонами поглощения и затухание на этих длинах волн минимально. Области вблизи этих длин волн известны как первое, второе и третье окна прозрачности. Многомодовое волокно вплоть до настоящего времени работает с использованием первого и второго окон прозрачности. В дальнейшем оно, возможно, будет использоваться и в третьем окне прозрачности. Поэтому желательно выбирать волокно с минимальными потерями во всех трех окнах прозрачности.

Стандартное одномодовое волокно используется во втором и третьем окнах прозрачности. Одномодовые волокна со смещенной и сглаженной дисперсией оптимизируются для работы в расширенных спектральных диапазонах в области третьего окна прозрачности. Эти диапазоны оптимизированы для работы с эрбиевыми и рамановскими усилителями. Диапазон длин волн 1530–1565 нм называется С–полосой (conventional), а диапазон длин волн 1565 – 1625 нм называется L–полосой (long).

Вид волокна	Затухание 1383нм (дБ/км)	Затухание 1300нм (дБ/км)	Затухание 1550нм (дБ/км)	Ступеньки затухания (дБ)	Затухание 1625нм (дБ/км)
Corning Leaf	1.0	0.5	0.25	0.1	0.25
Corning LEAF Submarine	2.0	-	0.23	0.1	-
Corning SMF- LS Submarine	-	-	0.22	0.1	-
Corning SMF- 28	2.1	0.4	0.3	0.1	-
Corning SMF- LS	2.0	0.5	0.25	0.1	-
Alcatel AFC 3	-	0.34	0.21	-	-
Alcatel AFC 3 TeraLight	-	-	0.21	-	0.25
Lucent TrueWave RS	1.0	0.4	0.22	0.1	0.27
Fujikura DSM G 8/125 03	-	0.5	0.3	-	-

Таблица 2.4.1. Значения параметров градиентных многомодовых волокон, поставляемых фирмой Corning

Параметры	Градиентное многомодовое волокно	MMF 50/125
MMF 62.5/125	Номинальное затухание на длине волны 850 нм (дБ/км)	$\leq 2,4$
$\leq 2,8$	Номинальное затухание на длине волны 1300 нм (дБ/км)	$\leq 0,5$
$\leq 0,6$	Максимальное затухание на длине волны 850 нм (дБ/км)	$\leq 2,5$
$\leq 3,0$	Максимальное затухание на длине волны 1300 нм (дБ/км)	$\leq 0,8$
$\leq 0,7$	Полоса пропускания на длине волны 850 нм (МГц-км)	≥ 400
≥ 200	Полоса пропускания на длине волны 1300 нм (МГц-км)	≥ 800
≥ 400	Длина волны нулевой дисперсии, λ_0 (нм)	1297–1316
1332–1354	Наклон нулевой дисперсии, S_0 (пс/(нм ² -км))	$\leq 0,101$
$\leq 0,097$	Диаметр сердцевины, d (мкм)	$50,0 \pm 3,0$
$62,5 \pm 3,0$	Числовая апертура, NA	$0,200 \pm 0,015$
$0,275 \pm 0,015$	Рабочий диапазон температур	$-60^\circ\text{C} - +85^\circ\text{C}$
$-60^\circ\text{C} - +85^\circ\text{C}$	Вносимое затухание в температурных пределах $-60^\circ\text{C} - +85^\circ\text{C}$ на длинах волн 850 нм и 1300 нм (дБ/км)	$\leq 0,2$
$\leq 0,2$	Вносимое затухание в температурных пределах $-10^\circ\text{C} - +85^\circ\text{C}$, влажности до 98% на длинах волн 850 нм и 1300 нм (дБ/км)	$\leq 0,2$
$\leq 0,2$	Стандартная длина волокна, поставляемая на катушке (м)	1100–4400
1100–8800	Диаметр оболочки (мкм)	$125,0 \pm 2,0$
$125,0 \pm 2,0$	Радиальное отклонение сердцевины относительно оболочки (мкм)	$\leq 3,0$
$\leq 3,0$	Диаметр защитного покрытия (мкм)	245 ± 10
245 ± 10	Отклонение сердцевины от окружности	$\leq 5\%$
$\leq 5\%$	Тестовое усилие на разрыв (Гн/м ²)	$\geq 0,7$
$\geq 0,7$	Эффективный показатель преломления n_{eff} на длине волны 850 нм	1,4897
1,5014	Эффективный показатель преломления n_{eff} на длине волны 1300 нм	1,4856

Отметим, что полоса пропускания на длине волны 1300 нм превосходит соответствующее значение на длине волны 850 нм. Это объясняется следующим образом. Дисперсия, которая определяет полосу пропускания, состоит из межмодовой и хроматической составляющих. Если межмодовая дисперсия слабо зависит от длины волны - в соотношениях (1.2.15), (1.2.16) зависимостью показателя преломления от длины волны можно пренебречь, то хроматическая дисперсия пропорциональна ширине спектра излучения. Коэффициент пропорциональности $D(\lambda)$ при длинах волн в окрестности 1300 нм (λ_0) близок к нулю, в то время как на длине волны 850 нм примерно равен 100 пс/(нм²*км). Специфика использования многомодового волокна такова,

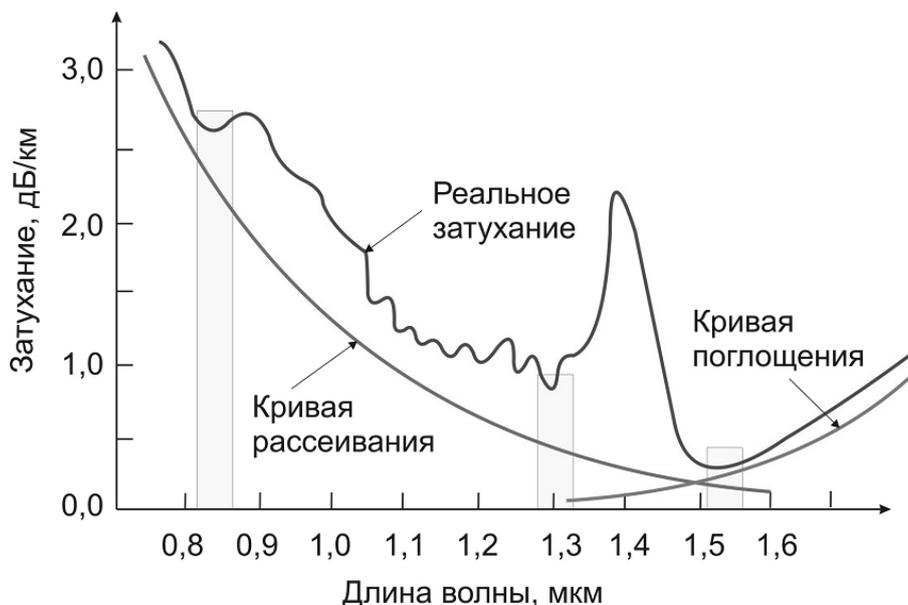


Рис.2.3.1. Затухание в кварцевом оптическом волокне и три окна прозрачности

2.4. Многомодовое градиентное волокно

Широко используются два стандарта многомодового градиентного волокна 62,5/125 и 50/125 отличающиеся профилем сердцевины, рис.2.4.1, а. Соответствующие спектральные потери для типичных волокон показаны на рис.2.4.1, б.

В стандартном многомодовом градиентном волокне (50/125 или 62,5/125) диаметр светонесущей жилы 50 и 62,5 мкм, что на порядок больше длины волны передачи. Это приводит к распространению множества различных типов световых лучей (мод) во всех трех окнах прозрачности. Два окна прозрачности 850 и 1310 нм обычно используют для передачи света по многомодовому волокну. В табл. 2.4.1 приведены основные характеристики многомодовых градиентных волокон двух основных стандартов 50/125 и 62,5/125.

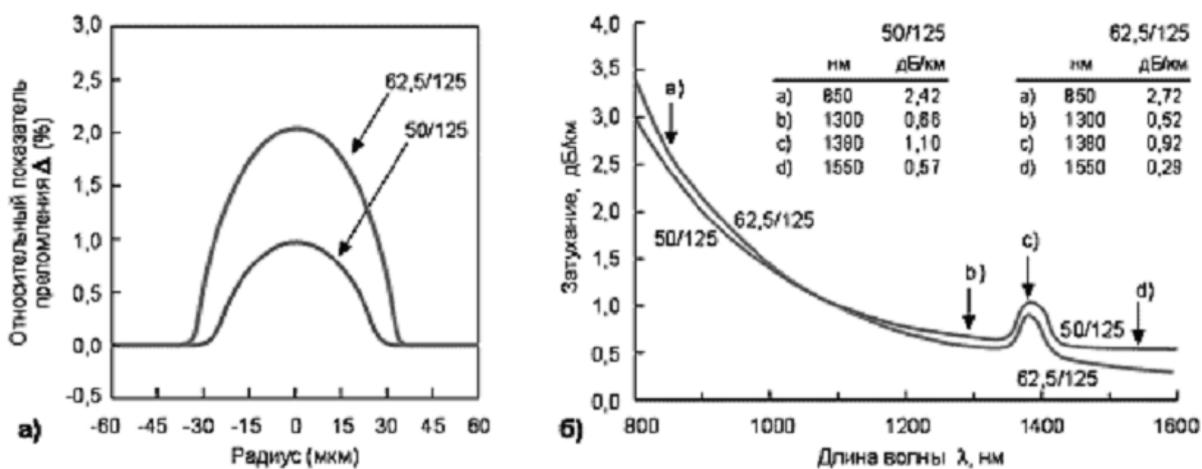


Рис. 2.4.1. Многомодовые градиентные волокна

а) профили показателей преломления волокон 50/125 и 62,5/125 б) характерные кривые спектральных потерь мощности

ГЛАВА 2. ТИПЫ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

2.1. Общая классификация оптических волокон

В систему классификации оптического волокна могут быть заложены несколько принципов. Например, классификация по функциональному назначению. Тогда, все оптические волокна можно разделить на два класса:

- **пассивные (или передающие) волокна**. Эти волокна служат для передачи информации в виде оптических сигналов или изображения на большие (сотни километров) (рис.2.1.1), средние (десятки метров) и короткие (десятки сантиметров и миллиметров) расстояния. В основном такие волокна используются в волоконно-оптических линиях связи (магистральных, бортовых и т.д.), медицине (эндоскопия), волоконно-оптических датчиках физических величин. Такие волокна изготавливаются из неактивированных органических или неорганических стекол, где главным критерием выступают оптические потери материала на рабочей длине волны.



Рис.2.1.1. Оптическое одномодовое волокно LEAF для магистральных линий связи, компания Corning Inc.

- **активные волокна**, т.е. волокна, которые позволяют проводить разные функциональные операции со световыми сигналами и потоками – усиливать, модулировать, вращать плоскость поляризации. Такие волокна обладают специальными физико-химическими свойствами и изготавливаются из специальных активированных материалов (главным образом стекол), например, лазерных, фоторефрактивных, фотохромных, электрооптических, магнитооптических, нелинейно-оптических и т.д. В основном активные волокна используются в волоконно-оптических линиях связи (например, волоконно-оптические усилители и лазеры - рис.2.1.2), в технологии обработки материалов (например, мощные 1-10 кВт волоконные лазеры), волоконно-оптических датчиках физических величин (температуры, давления, влаги, магнитных полей и т.д.), а также гироскопах.

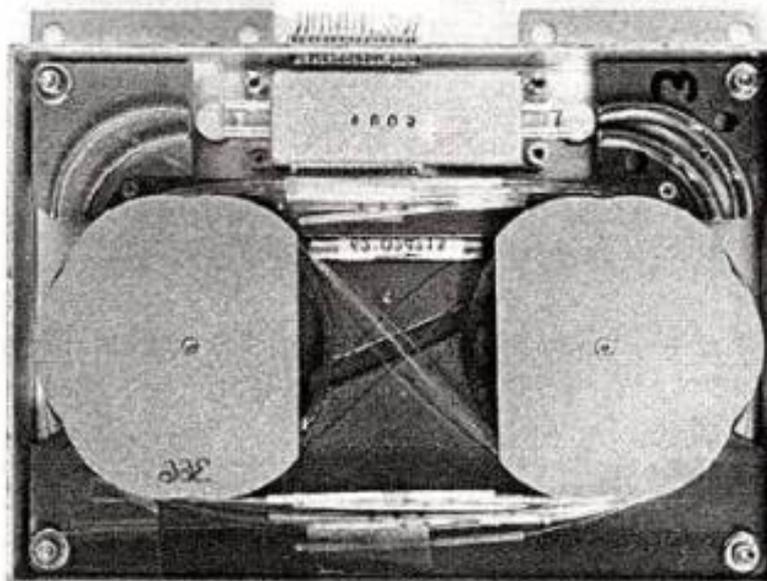
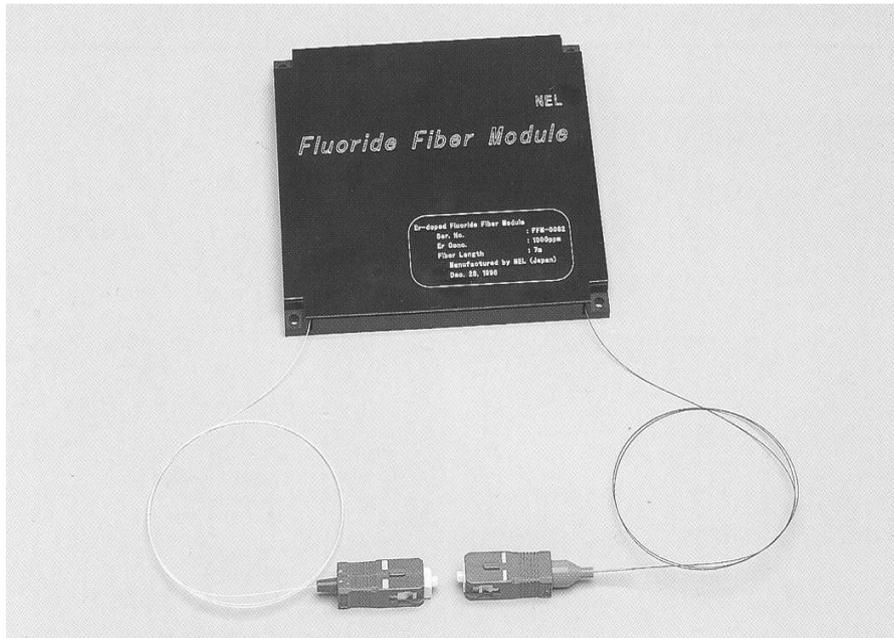


Рис.2.1.2. Эрбиевый волоконный оптический усилитель (EDFA), компания NTT Electronics, Japan. Размеры: 120 ´ 120 ´ 9 мм

В систему классификации оптического волокна может быть также заложен принцип однородности показателя преломления по сечению оптического волокна. При этом в сечении профили показателей преломления осесимметричны. Тогда все волокна можно разделить на два основных класса:

- **осесимметричные волокна со ступенчатым профилем показателя преломления.** Эти волноводы имеют резкую границу показателей преломления сердцевины и оболочки (рис.2.1.3, а).
- **осесимметричные волокна с градиентным профилем показателя преломления.** Эти волноводы имеют плавную границу изменения показателя преломления от сердцевины к оболочке (рис.2.1.3,б).

- многомодовый кабель проще оконцевать оптическими разъемами с малыми потерями (до 0.3 дБ) в стыке;

- на многомодовое волокно рассчитаны излучатели на длину волны 0.85 мкм - самые доступные и дешевые излучатели, выпускаемые в очень широком ассортименте.

Недостатки:

- затухание на длине волны 0.85 мкм у многомодовых волокон находится в пределах 3-4 дБ/км и не может быть существенно улучшено.

- полоса пропускания у многомодовых волокон достигает 800 МГц*км, что приемлемо для локальных сетей связи, но не достаточно для магистральных линий.

Обобщенные сравнительные характеристики одномодовых и многомодовых оптических волокон приведены в таблице 2.3.1.

	Параметры	Одномодовые
Многомодовые	Используемые длины волн	1,3 и 1,5 мкм
0,85 мкм, реже 1,3 мкм	Затухание, дБ/км	0,4 - 0,5
1,0 - 3,0	Тип передатчика	лазер, реже светодиод
светодиод	Толщина сердечника	8 мкм
50 или 62,5 мкм	Стоимость волокон и кабелей	Около 70% от многомодового
-	Средняя стоимость конвертера в витую пару Fast Ethernet	\$300
\$100	Дальность передачи Fast Ethernet	около 20 км
до 2 км	Дальность передачи специально разработанных устройств Fast Ethernet	более 100 км.
до 5 км	Возможная скорость передачи	10 Гб, и более
до 1 Гб. на ограниченной длине	Область применения	телекоммуникации

Многомодовое волокно		Одномодовое волокно		
SF (NDSF) ступенчатое волокно	DSF волокно со смещенной дисперсией	NZDSF волокно с ненулевой смещенной дисперсией		ЛВС (Ethernet, Fast/Gigabit Ethernet, FDDI, ATM)
	ЛВС (Ethernet, Fast/Gigabit Ethernet, FDDI, ATM)		Протяженные сети (Ethernet, Fast/Gigabit Ethernet, FDDI, ATM), магистрали SDH)	Сверхпротяжен- ные сети, супермагистрали (SDH, ATM)

Ethernet/ Fast Ethernet/ Gigabit Ethernet – стандарты локальных волоконных сетей (ЛВС)

Потери на поглощение зависят от чистоты материала, потери на рассеяние зависят от неоднородностей показателя преломления материала.

Другой важнейший параметр оптического волокна - дисперсия, т.е. рассеяние во времени спектральных и модовых составляющих оптического сигнала. Существуют три основных типа дисперсии: модовая, материальная и волноводная. Модовая дисперсия присуща многомодовому волокну и обусловлена наличием большого числа мод, время распространения которых различно. Материальная дисперсия обусловлена зависимостью показателя преломления от длины волны. Волноводная дисперсия обусловлена процессами внутри моды и характеризуется зависимостью скорости распространения моды от длины волны. Поскольку светодиод или лазер излучает некоторый спектр длин волн, дисперсия приводит к уширению импульсов при распространении по волокну и тем самым порождает искажения сигналов. При оценке пользуются термином "полоса пропускания" - это величина, обратная к величине уширения импульса при прохождении им по оптическому волокну расстояния в 1 км. Измеряется полоса пропускания в МГц*км. Из определения полосы пропускания видно, что дисперсия накладывает ограничение на дальность передачи и на верхнюю частоту передаваемых сигналов. Если при распространении света по многомодовому волокну как правило преобладает модовая дисперсия, то одномодовому волокну присущи только два последних типа дисперсии. На длине волны 1.3 мкм материальная и волноводная дисперсии в одномодовом волокне компенсируют друг друга, что обеспечивает наивысшую пропускную способность.

Одномодовое волокно:

Преимущества:

- лучшие характеристики по затуханию
- лучшие характеристики по полосе пропускания

Недостатки:

- одномодовое волокно требует одномодовых источников излучения на 1.3 и 1.5 мкм, цена которых в несколько раз дороже многомодовых;
- в одномодовое волокно труднее ввести излучение из-за малых размеров световодной жилы, по этой же причине одномодовые волокна сложно сращивать;
- оконцевание одномодовых кабелей оптическими разъемами обходится дороже многомодовых.

Многомодовое волокно:

Преимущества:

- многомодовые волокна более удобны при монтаже, так как в них размер световодной жилы в несколько раз больше, чем в одномодовых волокнах;

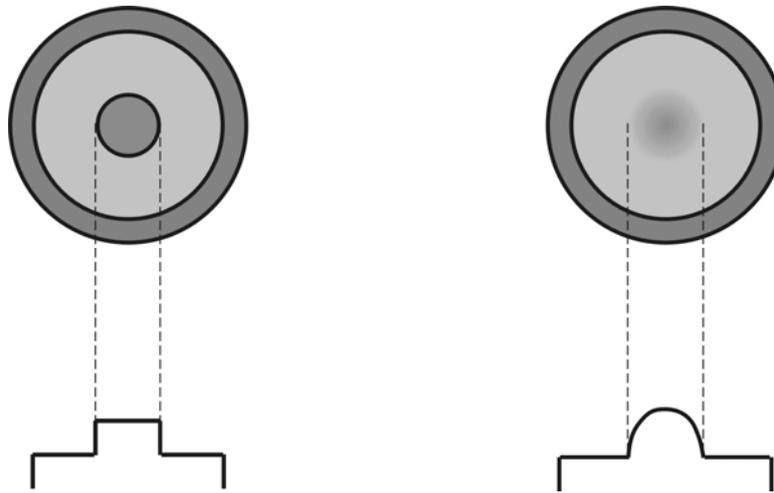


Рис.2.1.3. Оптическое волокно со ступенчатым (а) и градиентным (б) профилем показателя преломления

Соответственно, пассивные и активные оптические волокна могут иметь как ступенчатый, так и градиентный профиль показателя преломления.

В систему классификации оптического волокна может быть также заложен принцип однородности показателя преломления или толщины по длине оптического волокна. Тогда все волокна можно разделить на следующие два основных класса:

- **регулярные волокна.** Эти осесимметричные волокна по всей своей длине не имеют никаких изменений - ни показателя преломления, ни толщины (рис.2.1.4).

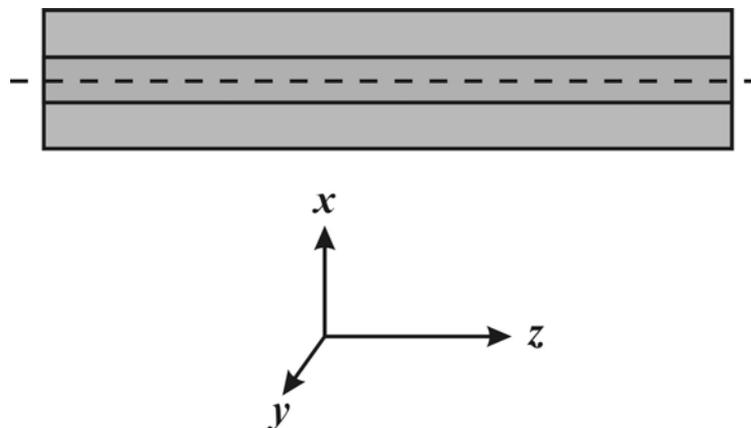


Рис.2.1.4. Регулярное оптическое волокно

- **нерегулярные волокна.** Эти волокна на определенных участках длины (направления распространения света – z) могут иметь или периодическое изменение показателя преломления, и такие волокна называются **брэгговскими** (рис.2.1.5,а), или периодическое изменение толщины, и такие волокна называются **гофрированными** (рис.2.1.5,б). Нерегулярные волокна (чаще всего брэгговские, FBG - fiber Bragg grating) обычно используются в качестве спектральных и модовых селекторов, фильтров или зеркал. Например, в эрбиевых волоконно-оптических усилителях (erbium doped fiber amplifiers – EDFA) для выравнивания контура спектра усиления, в рамановских усилителях (Raman amplifiers)

для спектральной селекции излучения, в волоконных лазерах с чирпированными брэгговскими решетками (CBG – chirped Bragg gratings) для компрессии световых импульсов, или волоконных лазерах с распределенной обратной связью (DFB – distributed feedback) и т.д.

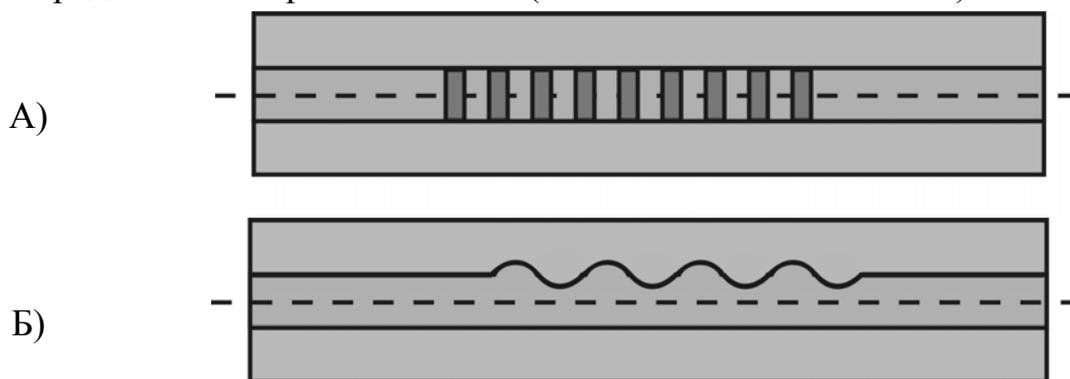


Рис.2.1.5. Нерегулярные оптические волокна:
 а) - волоконная брэгговская решетка
 б) - волоконная гофрированная решетка

Нерегулярные волокна также могут иметь в поперечном сечении по разным осям (например, x и y) разное изменение показателя преломления или толщины. Это, так называемые, **осесимметричные, эллиптические или анизотропные волокна** (рис.2.1.6). Основная задача таких волокон – сохранять поляризацию света на всем пути его распространения по волокну. Анизотропные волокна широко используются в самых разнообразных измерительных, диагностических и высокочувствительных системах контроля и управления. На основе анизотропных одномодовых волоконных световодов создаются датчики для измерения различных физических величин и такие уникальные приборы как волоконно-оптические гироскопы.



Рис.2.1.6. Анизотропные оптические волокна:
 а) - с эллиптической сердцевиной
 б) - с эллиптической оболочкой
 в) - с эллиптической сердцевиной и оболочкой

Особое место среди оптических волокон занимают **микроструктурированные волокна (дырчатые волокна)** или чаще называемые в англоязычной литературе - **фотоннокристаллические волокна** (PCF – photonic crystal fibers). В этих волокнах показатель преломления или толщина стенок периодически изменяются по сечению волокна (по осям x и y) (рис.2.17). Это принципиально новый тип волокон, которые имеют характеристики, намного превосходящие обычные регулярные волокна.

- одномодовое волокно со смещенной дисперсией DSF 8-10/125 (рис.2.2.4);
- одномодовое волокно с ненулевой смещенной дисперсией NZDSF (по профилю показателя преломления это волокно схоже с предыдущим типом волокна – рис.2.2.4).

Большинство устройств волоконной оптики используют область инфракрасного спектра в диапазоне от 800 до 1600 нм в основном в трех окнах прозрачности: 850, 1310 и 1550 нм, рис.2.2.5. Именно окрестности этих трех длин волн образуют локальные минимумы затухания сигнала и обеспечивают большую дальность передачи.



Рис. 2.2.3. Стандартное ступенчатое одномодовое волокно



Рис. 2.2.4. Стандартное одномодовое волокно со смещенной дисперсией (DSF или NZDSF)

2.3. Сравнение многомодовых и одномодовых волокон

В одномодовом волокне диаметр световодной жилы порядка 8-10 мкм, то есть сравним с длиной световой волны. При такой геометрии в волокне может распространяться только один луч (одна мода). В многомодовом волокне размер световодной жилы порядка 50-60 мкм, что делает возможным распространение большого числа лучей (много мод).

Оба типа волокна характеризуются двумя важнейшими параметрами: затуханием и дисперсией. Затухание измеряется в дБ/км и определяется потерями на поглощение и на рассеяние излучения в оптическом волокне.

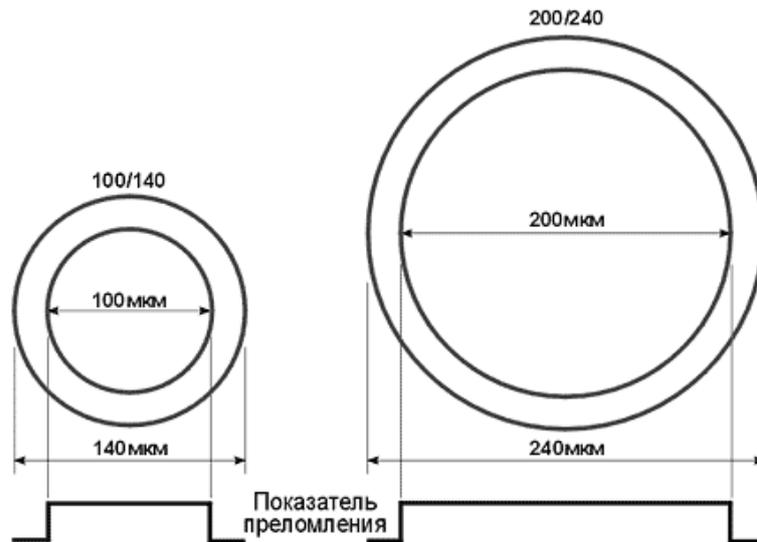


Рис. 2.2.1 Ступенчатое многомодовое волокно

Если сравнивать многомодовые волокна между собой (рис. 2.2.1 и 2.2.2), то градиентное волокно имеет лучше технические характеристики, чем ступенчатое, по дисперсии. Главным образом это связано с тем, что межмодовая дисперсия в градиентном многомодовом волокне - основной источник дисперсии - значительно меньше, чем в ступенчатом многомодовом волокне. Это приводит к большей пропускной способности у градиентного волокна.



Рис. 2.2.2. Стандартное градиентное многомодовое волокно с диаметром сердцевины 50 мкм (а), 62,5 мкм (б) и 85 мкм (в)

Одномодовое волокно имеет значительно меньший диаметр сердцевины по сравнению с многомодовым и, как следствие, из-за отсутствия межмодовой дисперсии, более высокую пропускную способность. Однако оно требует использования более дорогих лазерных источников.

В волоконно-оптических линиях связи наиболее широко используются следующие стандарты волокон:

- многомодовое градиентное волокно 50/125 (рис.2.2.2.а);
- многомодовое градиентное волокно 62,5/125 (рис.2.2.2.б);
- одномодовое ступенчатое волокно SF (волокно с несмещенной дисперсией или стандартное волокно) 8-10/125 (рис.2.2.3);

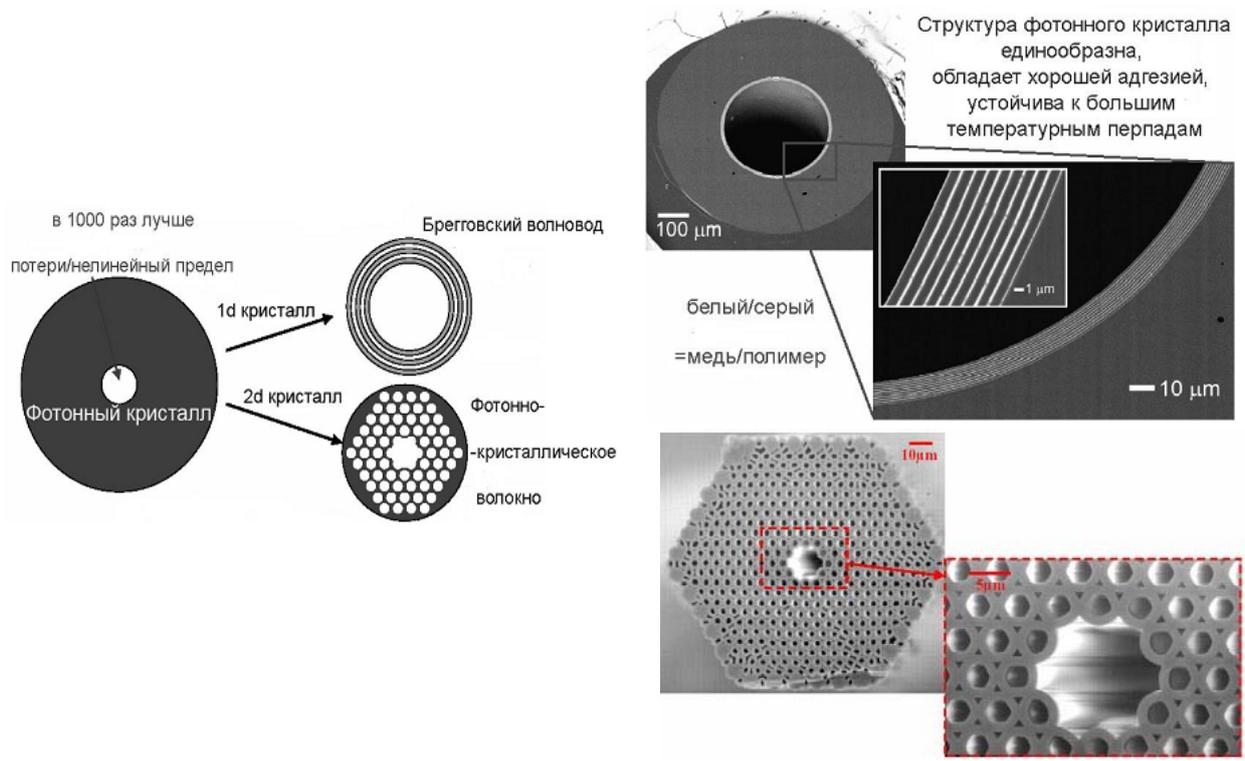


Рис.2.1.7.а. Фотоннокристаллические волокна 1d и 2d с полый сердцевиной

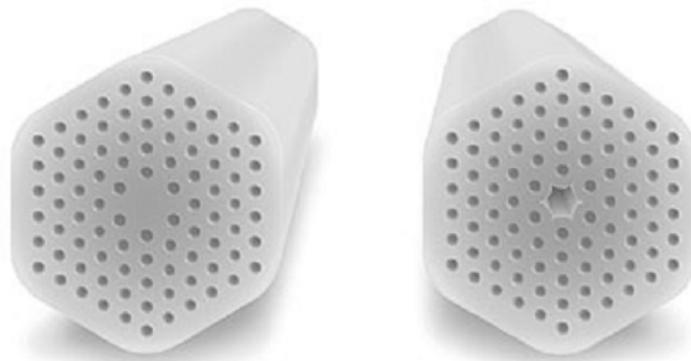


Рис. 2.1.7, б. Фотоннокристаллические волокна со сплошной и полый световедущей жилой в центре

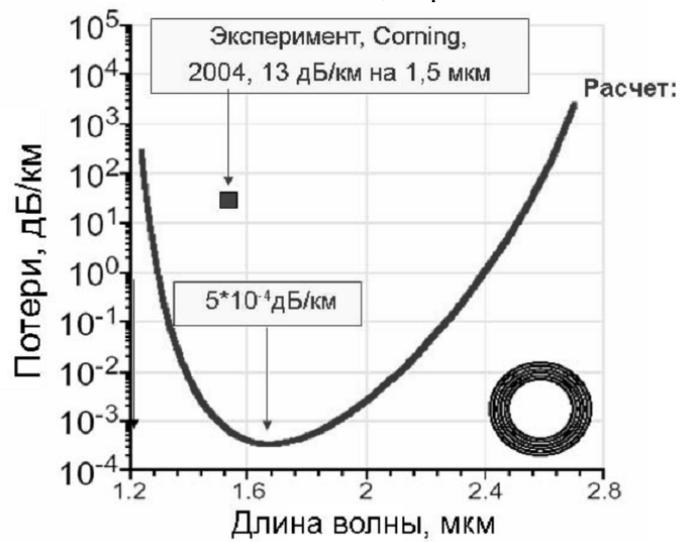


Рис.2.1.7, в. Фотоннокристаллическое волокно (расчет и эксперимент)

Создание фотонно-кристаллических волокон является одним из наиболее значительных достижений оптических технологий последних лет. Это научное направление в настоящее время бурно развивается: в мире стремительно растет число научных групп, занимающихся исследованиями фотонных кристаллов, открываются новые потенциальные области их применения.

В настоящее время известны два типа волоконных световодов со структурой фотонных кристаллов. Это волоконные световоды со сплошной световедущей жилой, о которых упоминалось выше, и волоконные световоды с полой световедущей жилой. В России и те, и другие называются **дырчатыми волокнами**, хотя на самом деле между ними существует важное различие в механизмах, обеспечивающих волноведущие свойства световодов.

Фотонно-кристаллический световод со сплошной световедущей жилой представляет собой сердцевину из кварцевого стекла в оболочке из фотонного кристалла (кварцевое стекло с воздушными полостями-каналами), имеющей более низкий средний коэффициент преломления по отношению к жиле. Поэтому волноведущие свойства таких световодов обеспечиваются одновременно двумя эффектами: полного внутреннего отражения, как в обычных световодах, и зонными свойствами фотонного кристалла. Наличие оболочки в виде фотонного кристалла существенно отличает фотонно-кристаллические волокна от обычных волоконных световодов.

Фотонно-кристаллические световоды с большим диаметром световедущей жилы также могут использоваться в качестве среды передачи световых потоков высокой интенсивности.

Благодаря своим уникальным дисперсионным свойствам, фотонно-кристаллические световоды уже находят свое применение в качестве компенсаторов дисперсии в волоконных системах связи. Они достаточно легко и с малыми потерями привариваются к стандартному оптическому волокну и совмещаются с другими элементами волоконно-оптических систем.

В фотонно-кристаллическом волокне с малыми размерами соответствующей жилы снижаются пороги всех нелинейных эффектов, что представляет большой интерес для создания эффективных рамановских лазеров и усилителей, генераторов континуума и оптических переключателей. Очень привлекательной является идея создания генератора суперконтинуума — источника белого света с очень высокой энергетической яркостью. Такие источники могут применяться в DWDM--системах, а также в спектроскопии и метрологии.

Технология изготовления фотонно-кристаллических волоконных световодов с полой световедущей жилой практически не отличается от технологии аналогичных световодов со сплошной световедущей жилой. Основное отличие этого волокна заключается в том, что световедущая жила представляет собой не кварцевый стержень, а воздушную полость с

диаметром, превышающим диаметр регулярных воздушных каналов в оболочке. Такая структура может направлять излучение видимого и ближнего ИК диапазонов. В этом случае волноводный режим обеспечивается исключительно зонной структурой фотонного кристалла. Свойства дырчатых световодов с полый световедущей жилой (потери, дисперсионные и нелинейные характеристики) изучены недостаточно. Ясно лишь то, что свет в таких световодах, в отличие от стандартных, распространяется преимущественно в полый сердцевине, а не по кварцу. Расчеты показывают, что потери в таких световодах должны быть очень низкими ($5 \cdot 10^{-4}$ дБ/км), так как материальное поглощение и релеевское рассеяние в воздухе ничтожны по сравнению с кварцевым стеклом. На рис.7, в приведены оптические потери экспериментального фотонно-кристаллического волокна компании Corning по сравнению с расчетными потерями.

Фотонно-кристаллические световоды со сплошной световедущей жилой в ближайшие годы могут найти практическое применение в широкополосных волоконно-оптических сетях в качестве среды передачи оптических сигналов и функциональных устройств волоконных сетей связи.

Более подробно фотонно-кристаллические волокна описаны в главе 1 части 2 настоящего пособия.

2.2. Классификация регулярных оптических волокон

Все регулярные оптические волокна делятся на две основные группы: **многомодовые** MMF (multi mode fiber) и **одномодовые** SMF (single mode fiber). Многомодовые волокна подразделяются на ступенчатые (step index multi mode fiber) и градиентные (graded index multi mode fiber). Одномодовые волокна подразделяются на ступенчатые одномодовые волокна (step index single mode fiber) или стандартные волокна SF (standard fiber), на волокна со смещенной дисперсией DSF (dispersion-shifted single mode fiber), и на волокна с ненулевой смещенной дисперсией NZDSF (non-zero dispersion-shifted single mode fiber).

Типы и размеры волокон приведены на рис. 2.2.1-2.2.4. Каждое волокно состоит из сердцевины и оболочки с разными показателями преломления. Сердцевина, по которой происходит распространение светового сигнала, изготавливается из оптически более плотного материала. При обозначении волокна указываются через дробь значения диаметров сердцевины и оболочки. Волокна отличаются диаметром сердцевины и оболочки, а также профилем показателя преломления сердцевины. У многомодового градиентного волокна и одномодового волокна со смещенной дисперсией показатель преломления сердцевины зависит от радиуса. Такой более сложный профиль делается для улучшения технических характеристик или для достижения специальных характеристик волокна.