

В.Н. Цуканов, М.Я. Яковлев

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

Практическое руководство



«Инфра-Инженерия»

В.Н. ЦУКАНОВ, М.Я. ЯКОВЛЕВ

ВОЛОКОННО- ОПТИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

Практическое руководство

**Инфра-Инженерия
Москва
2014**

УДК 621.39
ББК 32.88
Ц85

Цуканов В.Н., Яковлев М.Я.

Ц 85 Волоконно-оптическая техника. Практическое руководство. – М.: Инфра-Инженерия, 2014. – 304 с.

ISBN 978-5-9729-0078-7

Рассмотрена отечественная волоконно-оптическая компонентная база, предназначенная для жестких условий эксплуатации. Приведены основные технические характеристики, а также методы их измерения, оптических волокон, волоконно-оптических кабелей, оптических соединителей, объединителей, разветвителей, переключателей, пассивных и активных волоконно-оптических линий задержки, дискретных передающих и приемных оптоэлектронных модулей, оптических трансиверов и ретрансляторов.

Предложены методы контроля параметров безотказности волоконно-оптических компонентов с учетом их принципиальных отличий от электронных компонентов.

Книга содержит практические рекомендации по построению традиционных и оригинальных цифровых волоконно-оптических систем передачи (ВОСП), оптических концентраторов, коммутаторов, медиаконверторов, автономных источников питания узлов подводных ВОСП, волоконно-оптических систем распределения СВЧ сигналов, волоконно-оптических фазовращателей, активных волоконно-оптических линий задержки, оптоэлектронных генераторов СВЧ диапазона, оптоэлектронных АЦП и ЦАП.

Книга рассчитана на широкий круг читателей: студентов, инженерно-технических работников, ученых, интересующихся данной тематикой и профессионально связанных с разработкой или эксплуатацией волоконно-оптической техники.

© Цуканов В.Н., Яковлев М.Я., 2014
© Издательство «Инфра-Инженерия», 2014

ISBN 978-5-9729-0078-7

Введение

В апреле 1977 года состоялась первая всесоюзная конференция «Волоконно-оптические линии связи». Участниками конференции был ограниченный перечень предприятий, родоначальников развития волоконно-оптической техники в России:

- организатор конференции, Государственный Оптический Институт им. Г.И. Вавилова, (основные докладчики – Д.К. Саттаров, Г.Я. Конаева, К.М. Фрейверт);
- Физический Институт им. П.Н. Лебедева АН СССР, в настоящее время институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, (основные докладчики – А.С. Беланов, Е.М. Дианов, А.М. Прохоров);
- Центральный Научно-Исследовательский Институт Связи (основные докладчики – И.И. Теумин, А.Г. Мурадян, И.С. Гольдфарб, О.К. Сляров);
- Центральный Научно-Исследовательский Технологический Институт, (основные докладчики – В.Д. Каплун, В.Н. Цуканов, М.Я. Яковлев, в настоящее время специалисты ЗАО «Центральный Научно-Исследовательский Технологический Институт «Техномаш-ВОС»).

Первые оптические волокна для передачи информационных сигналов строились в то время из поликомпонентных стекол.

Самые чистые оптические стекла того времени могли обеспечить затухание в оптическом волокне на уровне нескольких тысяч децибел на километр.

Но уже в это время были отмечены большие перспективы волоконной оптики для средств связи.

Попытки производителей оптических волокон очистить стекло в процессе варки различными известными методами позволили уменьшить потери до нескольких сот децибел на километр, казалось, это был предел возможного.

Но вот специалисты американской фирмы «Corning Glass» получили волокно с потерями 20 дБ/км и даже несколько меньше. Используя идеи получения сверхчистых материалов, применяемые в полупроводниковой технологии, они разработали метод получения сверхчистого кварцевого стекла из газа - газовой фазы (метод парофазного осаждения стекла).

В дальнейшем и за рубежом и в нашей стране в научно-исследовательских институтах промышленности и Академии наук, используя передовые технологии, начали производить оптические кварцевые волокна с низкими потерями, менее 1 дБ/км.

Основной областью применения оптических волокон явились волоконно-оптические телекоммуникационные системы.

В настоящее время волоконно-оптические компоненты находят и другие сферы применения в качестве измерительных преобразователей датчиков, элементов радиофотоники, линий задержек различного назначения и др.

Книга обобщает опыт и знания, накопленные авторами при выполнении более 50 опытно-конструкторских и научно-исследовательских работ направленных на:

- разработку специального технологического контрольно-измерительного оборудования;
- стандартизацию волоконной техники;
- разработку перспективной волоконно-оптической компонентной базы для жестких условий эксплуатации;
- разработку измерительных преобразователей волоконно-оптических датчиков;
- разработку цифровых волоконно-оптических систем передачи информации на большие расстояния;
- разработку цифровых локальных волоконно-оптических систем для объектов специальной техники;
- разработку аналоговых систем передачи широкополосных СВЧ сигналов;
- разработку активных волоконно-оптических линий задержки различного назначения;

- исследования показателей надежности волоконно-оптических компонентов;
- разработку оптических волокон со специальными свойствами;
- исследования новых методов высокоскоростной передачи информации;
- разработку элементов радиофотоники, таких как волоконно-оптические СВЧ фазовращатели, системы распределения СВЧ сигналов по полотну фазированных антенных решеток и др.

Книга состоит из 4 глав.

Первая глава посвящена рассмотрению современной волоконно-оптической компонентной базы, включающей:

- оптические волокна и кабели;
- пассивные и активные компоненты волоконно-оптических систем передачи (ВОСП), в том числе: оптические соединители, оптические разветвители и объединители, пассивные и активные волоконно-оптические линии задержки, оптические коммутаторы и переключатели, передающие и приемные оптоэлектронные модули, оптические трансиверы, оптические ретрансляторы и модуляторы.

Особое внимание уделено компонентам отечественного производства для жестких условий эксплуатации.

В главе рассмотрены вопросы надежности компонентов с учетом их принципиальных отличий от электронной компонентной базы. Рассмотрены новые подходы к определению показателей надежности и проверке их соответствия предъявляемым требованиям, опирающиеся на нормативные документы (ОСТ-ы и ГОСТ-ы) по надежности компонентов ВОСП, в разработку которых принимали участие авторы публикации.

Большое внимание в главе обращено на терминологию, опирающуюся на государственные стандарты, разработанные авторами и определяющими термины и определения, основные технические характеристики, параметры и размеры и методы испытаний компонентов ВОСП.

Во второй главе приведен опыт, накопленный авторами, по проектированию аналоговых и цифровых ВОСП различного назначения. В главе рассмотрены перспективные технические решения по построению таких узлов ВОСП, как концентраторы волоконно-оптических сетей Fast Ethernet, коммутаторы волоконно-оптических сетей Fast Ethernet и Gigabit Ethernet, медиаконвертеров и др. Рассмотрены особенности проектирования магистральных и подводных ВОСП, а также вопросы тестирования узлов ВОСП. Оканчивается глава рассмотрением нетрадиционных методов построения ВОСП. Рассмотрены новые методы передачи цифровых данных в ВОСП: символьный, с комбинированным спектральным и временным уплотнением передаваемой информации и кластерный метод.

Особый интерес представляет собой кластерный метод, основанный на уплотнении передаваемой информации подобно архивированию файлов в компьютерной технике. Метод удостоен дипломом «Innovations for investments to the future» и золотой медалью в рамках интернациональной программы «Golden Galaxy».

В третьей главе приводится опыт проектирования измерительных преобразователей волоконно-оптических датчиков. Рассматриваются распределенные волоконно-оптические преобразователи для измерения распределения температуры и деформаций протяженных объектов.

Четвертая глава посвящена проектированию изделий радиофотоники:

- узлов активных фазированных антенных решеток: волоконно-оптических линий передачи и распределения СВЧ сигналов, а также волоконно-оптических фазовращателей;
- активных волоконно-оптических линий задержки;
- оптоэлектронных генераторов СВЧ диапазона;
- оптоэлектронных АЦП и ЦАП.

Книга рассчитана на широкий круг читателей: студентов, инженерно-технических работников, ученых, интересующихся данной тематикой и профессионально связанных с разработкой или эксплуатацией изделий волоконно-оптической техники.

Глава 1

Волоконно-оптическая компонентная база

1.1 Общие сведения

По определению [1.1] компонентом системы называется изделие, являющееся частью этой системы как самостоятельное изделие с точки зрения требований к испытаниям, приемке, поставке и эксплуатации.

Волоконно-оптическими компонентами будем называть компоненты, построенные с использованием оптических волокон, используемых для передачи оптических сигналов.

В книге будут рассмотрены особенности, основные технические характеристики и методы их измерения компонентов, предназначенных для построения изделий волоконно-оптической техники, такие как:

- оптические волокна;
- оптические кабели;
- пассивные компоненты волоконно-оптических систем передачи:
 - оптические соединители;
 - оптические разветвители;
 - оптические объединители;
 - оптические переключатели и коммутаторы;
 - волоконно-оптические линии задержки;
- активные компоненты волоконно-оптических систем передачи:
 - передающие и приемные оптоэлектронные модули;
 - оптические усилители;
 - оптические модуляторы;
 - оптические волновые конвертеры;
 - активные волоконно-оптические линии задержки.

Особое внимание в книге уделяется компонентам отечественного производства для жестких условий эксплуатации.

1.2 Оптические волокна

1.2.1 Общие сведения

Оптические волокна, предназначенные для передачи оптических сигналов, можно разбить на две большие группы: многомодовые и одномодовые.

Название групп условно и отражает режим работы волокна:

- одномодовый режим характеризуется одним типом канализируемой в оптическом волокне типом электромагнитной волны;
- в многомодовом режиме в оптическом волокне могут возбуждаться много типов колебаний.

Режим работы волокна зависит от соотношения рабочих длин волн оптического излучения для данного волокна и его геометрических размеров.

Под рабочим диапазоном длин волн оптического излучения будем понимать спектральный диапазон длин волн оптического излучения, для которого нормированы его параметры.

Параметры современных оптических волокон нормируются, как правило, в следующих диапазонах длин волн:

- 0,85 ± 0,05 мкм;
- 1,27 – 1,61 мкм.

В настоящее время выпускаются оптические волокна, выполненные в виде нити, со-

стоящей из сердцевины, покрытой кварцевой оболочкой и защитным буферным покрытием. Для стандартных оптических волокон соотношения диаметров сердцевины и оболочки в микрометрах следующие: 100/140, 85/125, 65/125, 50/125, (7-10)/125 [1.2].

Диаметр внешнего защитного покрытия, как правило, $- 242 \pm 5$ мкм.

К многомодовым оптическим волокнам относят оптические волокна с диаметром сердцевины намного превышающим длину волны оптического излучения. Это волокна с соотношением диаметров сердцевины и оболочки: 100/140, 85/125, 62,5/125, 50/125. Волокна с соотношением $-(7-10)/125$ принято называть одномодовыми.

Наличие большого числа распространяемых мод в многомодовых волокнах ограничивает их полосу пропускания. Ограничение полосы пропускания связано с разбросом времени распространения мод, называемым модовой дисперсией.

Перечень основных характеристик оптических волокон приведен в таблице 1.1.

Т а б л и ц а 1.1 — Перечень основных характеристик оптических волокон

Наименование характеристики	Одномодовые оптические волокна	Многомодовые оптические волокна
Геометрические характеристики		
Диаметр оболочки, мкм	+	+
Диаметр сердцевины, мкм	–	+
Неконцентричность сердцевины и оболочки, мкм	+	+
Диаметр поля моды, мкм	+	–
Оптические характеристики		
Погонное затухание, дБ/км	+	+
Прирост затухания при изгибе, дБ, в зависимости от диаметра оправки в мм	+	+
Длина волны отсечки, нм	+	–
Хроматическая дисперсия, пс/(нм·км)	+	–
Длина волны нулевой дисперсии, нм	+	–
Числовая апертура	–	+
Характеристики передачи		
Полоса пропускания, МГц·км	–	+
Поляризационная модовая дисперсия, пс/км ^{1/2}	+	–

Рассмотрим перечисленные характеристики более подробно.

1.2.2 Геометрические характеристики

Геометрические характеристики являются наиважнейшими при изготовлении оптических соединителей, так как определяют потери оптической мощности в месте соединения.

Для принятых за стандартные оптических волокон фирмы Corning, обеспечивают следующие допуски на основные геометрические размеры:

- на диаметр оболочки для одномодовых волокон $\pm 0,7$ мкм, для многомодовых $\pm 2,0$ мкм;
- на диаметр сердцевины для многомодовых волокон $\pm 2,0$ мкм;
- на неконцентричность сердцевины и оболочки, для одномодовых волокон $\pm 0,5$ мкм, для многомодовых $\pm 1,5$ мкм;

- на диаметр поля моды для одномодовых волокон $\pm 0,4$ мкм.

Микронные и субмикронные точности измерения геометрических параметров определяют необходимость использования для их измерения и контроля интерферометрических методов.

Как правило, измерение геометрических размеров оптического волокна производится одновременно с контролем геометрии оптических наконечников, являющихся основным узлом разъемных оптических соединителей. Методы контроля и описание измерительного оборудования приведены в [1.3].

Для измерений геометрических и других характеристик оптических волокон кроме измерительных приборов необходимо иметь инструмент и принадлежности для подготовки оптического волокна к измерениям, а также адаптеры для оптического волокна со снятым буферным покрытием.

Для снятия буферного покрытия диаметром 242 мкм понадобится стриппер, имеющий прецизионно выполненное отверстие и V-образно раскрывающееся лезвие, которое позволяет сделать точный срез оболочки.

После очистки буферного покрытия необходимо сделать скол оптического волокна поперек оптической оси, угол отклонения скола не должен превышать 2° . Промышленность выпускает широкую номенклатуру скалывателей, отличающихся допустимым отклонением угла скола и ресурсом.

Как правило, перечисленные инструменты входят в комплекты инструментов для разделки оптических кабелей. На российском рынке присутствуют комплекты инструментов как отечественного, так и зарубежного производства. К комплектам зарубежного производства можно отнести наборы «НИМ-25» и «НИМ-Эксперт» (изготовитель «Pelican», США), ТК-01 (изготовитель «TCM Communications», Великобритания) и др.

Из наборов российского производства можно выделить комплект инструментов и приспособлений для оперативного сращивания одномодового и многомодового волокна «КСВ-1» ТУ6692-001-41085936-2007 (изготовитель ЗАО «Центральный Научно-Исследовательский Технологический Институт «Техномаш-ВОС», владимирское отделение).

Комплект предназначен для оперативного ремонта волоконно-оптических кабелей на борту стационарных и подвижных объектов.

Комплект относится к категории качества «ВП», имеет группу исполнения ЗУ и размещается в прочном металлическом корпусе (чемодане) с общим весом не более 6кг. В комплект поставки входят:

- чемодан;
- устройство для скола оптического волокна «Скол - ОМ»;
- инструмент для снятия буферного покрытия «СПОВ»;
- модуль механического соединения оптических волокон «КРОВ»;
- принадлежности (кисти, пакеты для сбора отходов и др.).

Для подключения обнаженного оптического волокна со сколотым торцом к измерительной аппаратуре понадобятся адаптеры. Адаптеры состоят из оптического соединителя, сопрягаемого с соединителем измерительной аппаратуры, и специализированного зажимного устройства, которое может удерживать волокно. На российском рынке присутствуют как отечественные адаптеры, так и адаптеры зарубежных фирм. Из отечественных можно выделить адаптеры ООО «Конструктив», ЗАО «Компонент» и др.

1.2.3 Погонное затухание

Погонное затухание определяет потери оптической мощности, распространяемой по волокну, вносимые оптическим волокном в тракт передачи. Погонное затухание линейно зависит от длины волокна и измеряется в дБ/км. Величины погонного затухания для оптических волокон фирмы Corning приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 — Погонное затухание оптических волокон фирмы Corning

Наименование оптического волокна	Погонное затухание, дБ/км на длине волны оптического излучения, мкм, не более				
	0,85	1,31	1,49	1,55	1,625
Одномодовое волокно SMF28e+LL	–	0,33	0,21	0,18	0,22
Многомодовое волокно 50/125	2,42	0,65	–	0,57	–
Многомодовое волокно InfiniCor 62,5/125	2,9	0,6	–	–	–

Прирост затухания при изгибе для одномодового волокна SMF28e+LL составляет:

- не более 0,5 дБ при намотке одного витка на оправку диаметром 20 мм;
- не более 0,05 дБ при намотке десяти витков на оправку диаметром 30 мм;
- не более 0,01 дБ при намотке ста витков на оправку диаметром 60 мм.

Прирост затухания при изгибе для многомодового волокна 50/125 и InfiniCor 62,5/125 составляет не более 0,5 дБ при намотке ста витков на оправку диаметром 75 мм.

Погонное затухание, а также прирост затухания при изгибе, могут быть измерены при помощи оптического рефлектометра. Рефлектометрические методы контроля изложены в [1.4].

1.2.4 Длина волны отсечки

Длина волны отсечки соответствует граничному значению длины волны, при которой еще обеспечивается одномодовый режим распространения сигналов. На длинах волн меньших длине волны отсечки число распространяющихся мод становится большим единицы.

Различают волоконную длину волны отсечки (λ_{CF}) и кабельную длину волны отсечки (λ_{CCF}). Первая соответствует слабо напряженному волокну. Вторая — волокну, помещенному в кабель. В кабеле волокно испытывает множество изгибов, что ведёт к подавлению побочных мод и смещению λ_{CCF} в сторону коротких длин волн.

Для волокна фирмы Corning кабельная длина волны отсечки составляет 1260 нм.

Одним из практических методов измерений длин волн отсечки является метод передаваемой мощности [1.5]. Для измерений понадобится источник с широким спектром оптического излучения. Излучение источника направляют в одномодовое оптическое волокно и измеряют спектр выходного излучения. Аналогичные измерения проводят для многомодового отрезка оптического волокна. Сравниваются спектральные характеристики. Находится отношение спектральных характеристик A_m , выраженное в дБ, по формуле

$$A_m(\lambda) = 10 \lg P_s / P_m,$$

где P_s - мощность на выходе одномодового волокна;

P_m - мощность на выходе многомодового волокна;

λ - длина волны оптического излучения.

Многомодовое оптическое волокно в данном методе измерений является эталонным. Строится кривая $A_m(\lambda)$. Вид получаемой зависимости представлен на рисунке 1.1.

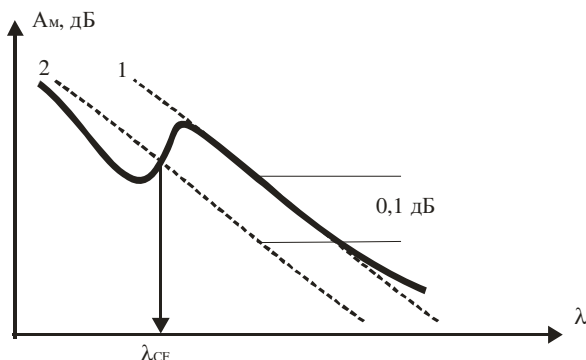


Рис. 1.1.1. Кривая зависимости отношения спектральных характеристик от длины волны.

Длинноволновый участок кривой $A_m(\lambda)$ экстраполируется прямой (1). Строится параллельная прямая (2), отстоящая ниже от (1) на 0,1 дБ. Точка пересечения прямой (2) с кривой $A_m(\lambda)$ соответствует длине волны отсечки, λ_{CF} .

Условия измерения должны соответствовать рекомендациям Ассоциации телекоммуникационной промышленности (ТИА) и международного консультационного комитета по телефонии и телеграфии (ССИТТ). Рекомендации заключаются в следующем:

- концы волокна очищаются от защитного покрытия;
- оптическое волокно скалывается поперек оптической оси, угол отклонения скола не должен превышать 2° ;
- диаметр светового пятна от источника излучения должен быть равен 200 мкм;
- наименьшая длина волны спектра излучения, измеренный на полумаксимуме, должна быть не более 1000 нм;
- наибольшая длина волны спектра излучения, измеренный на полумаксимуме, должна быть не менее 1600 нм.

При измерении длины волны отсечки волокна λ_{CF} , образец оптического волокна должен располагаться таким образом, чтобы образовывалась одна петля диаметром 280 мм, расстояние между концами волокна должно быть не менее 2 м, см. рис. 1.2.

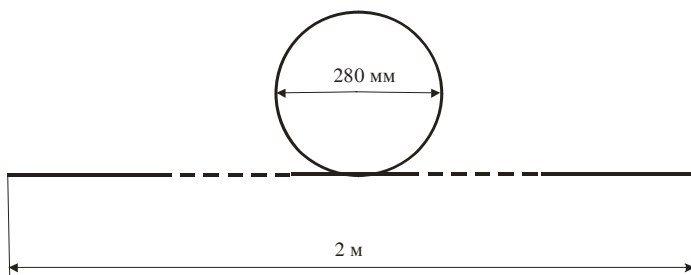


Рис. 1.2. Размещение волокна при измерении λ_{CF} .

Не должно быть дополнительных изгибов волокна с радиусом, меньшим 140 мм.

При измерении кабельной длины волны отсечки λ_{CCF} тестируемый образец волокна должен иметь длину более 22 м. Большая часть волокна свёртывается и располагается на катушке с радиусом не меньше, чем 140 мм, что моделирует кабельные эффекты. Затем делается по одной петле диаметром 76 мм на расстоянии 1 м от каждого конца волокна для моделирования эффекта изгиба волокна. В средней части делается две дополнительные петли диаметром 280 мм, см. рисунок 1.3.

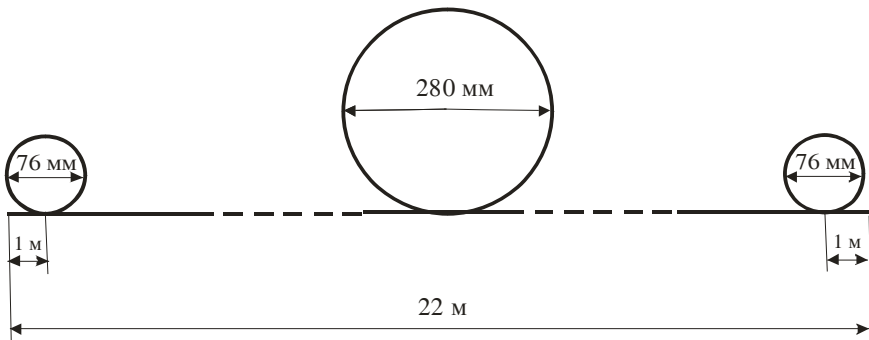


Рис. 1.3. Размещение волокна при измерении λ_{CCF} .

Как было отмечено выше, основной причиной ограничивающей полосу пропускания многомодовых оптических волокон является рассеяние времени распространения различных мод излучения или модовая дисперсия. В одномодовых оптических волокнах распространяется только одна мода и модовая дисперсия отсутствует. Основное ограничение полосы пропускания для таких волокон связано с наличием хроматической дисперсии. Это название передает суть явления, которое состоит в том, что разные спектральные составляющие сигнала распространяются в волокне с разными групповыми скоростями.

1.2.5 Хроматическая дисперсия и длина волны нулевой дисперсии

Хроматическая дисперсия состоит из материальной и волноводной составляющих.

Материальная дисперсия обусловлена зависимостью показателя преломления кварцевого стекла от длины волны оптического излучения. В выражение для материальной дисперсии $\tau_{\text{mat}}(\Delta\lambda, L)$ входит дифференциальная зависимость показателя преломления от длины волны

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

Волноводная дисперсия $\tau_w(\Delta\lambda, L)$ обусловлена зависимостью коэффициента распространения моды от длины волны

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

здесь введены коэффициенты $M(\lambda)$ и $N(\lambda)$ – удельные материальная и волновая дисперсии соответственно, а $\Delta\lambda$ (нм) – ширина спектра источника излучения.

Результирующее значение коэффициента удельной хроматической дисперсии $D(\lambda)$ в пс/(нм·км) определяется как

$$D(\lambda) = M(\lambda) + N(\lambda).$$

Если коэффициент волноводной дисперсии всегда больше нуля, то коэффициент материальной дисперсии может быть как положительным, так и отрицательным. Важным является то, что при определённой длине волны (примерно 1310 ± 10 нм) для стандартного оптического волокна происходит взаимная компенсация $M(\lambda)$ и $N(\lambda)$, а результирующая дисперсия обращается в ноль. Длина волны, на которой это происходит, называется длиной волны нулевой дисперсии λ_0 .

Таким образом, полоса пропускания оптического одномодового волокна зависит не только от характеристик волокна, но и от ширины спектра излучения источника оптического излучения.

Для характеристики хроматической дисперсии с учетом характеристик источника излучения было введено понятие удельной хроматической дисперсии. Хроматическая дисперсия связана с удельной хроматической дисперсией соотношением

$$\tau_{chf}(\lambda) = D(\lambda) \cdot \Delta\lambda,$$

где $\Delta\lambda$ - ширина спектра источника излучения.

Разработано несколько методов измерения хроматической дисперсии. Наибольшее распространение получил метод измерения задержек спектральных составляющих оптических сигналов в оптическом волокне [1.6].

Измеряют задержки распространения оптического излучения в отрезке волокна длиной не менее 1 км для нескольких длин волн оптического излучения в диапазоне 1200 – 1600 нм.

Методами экстраполяции, используя эмпирическую формулу Сел Мейера

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

находят коэффициенты A , B , C .

Хроматическую дисперсию находят по формуле

$$D(\lambda) = \frac{\partial \tau}{\partial \lambda} = 2(B\lambda - C\lambda^{-3}) = S_o \left(\lambda - \frac{\lambda_o^4}{\lambda^3} \right) / 4,$$

где $\lambda_o = (C/B)^{1/4}$ – длина волны нулевой дисперсии, $S_o = 8B$ – наклон нулевой дисперсии.

Для одномодового волокна SMF28e+LL величина хроматической дисперсии составляет на длине волны оптического излучения 1550 нм не более 18 пс/нм·км, на длине волны 1625 нм – не более 22 пс/нм·км.

1.2.6 Числовая апертура

Числовая апертура NA (Numeric Aperture) определяет величину оптической мощности, которую может быть введена в оптическое волокно. Для описания процессов распространения оптических сигналов в многомодовых оптических волокнах справедливы законы геометрической оптики. При этом понятие мода может быть заменено понятием оптического луча. Числовая апертура NA определяется для таких волокон предельным углом ввода или вывода оптических лучей в соответствии с законом полного отражения на границе раздела двух сред [1.7] и равна синусу максимального угла падения луча по отношению к оси волокна, при котором излучение входит в сердцевину и далее распространяется по волокну.

Величина числовой апертуры NA зависит от соотношения показателей преломления сердцевины n_c и оболочки n_o волокна и может быть найдена по формуле

$$NA = \frac{1}{n_{cp}} \sqrt{n_c^2 - n_o^2},$$

где n_{cp} – показатель преломления окружающей среды.

Методы измерения числовой апертуры основаны на исследовании индикатрис или диаграммы направленности излучения на выходе оптического волокна.

Наиболее известные методы измерения числовой апертуры и эффективной числовой апертуры рассмотрены в [1.8]. Для многомодовых оптических волокон с диаметром сердцевины 50 мкм числовая апертура равна 0,2, а для волокон с диаметром сердцевины 62,5 мкм – 0,275. Для одномодовых оптических волокон SMF28e+LL числовая апертура равна 0,14.

1.2.7 Полоса пропускания

Дисперсия $\tau(L)$ имеет размерность времени и определяется как квадратичная разность длительности импульсов на выходе и входе оптического волокна длиной L по формуле

$$\tau(L) = \sqrt{t_{out}^2 - t_{in}^2},$$

где t_{out} и t_{in} – длительность оптического импульса на выходе и входе оптического волокна.

Полоса пропускания W в МГц·км может быть оценена по формуле

$$W = \frac{0,44}{\tau},$$

где W - полоса пропускания в МГц·км.

Полоса пропускания может быть измерена прямым частотным методом или косвенным методом во временной области с использованием преобразования Фурье. Методы рассмотрены в [1.6]. Для многомодовых оптических волокон фирмы Corning InfiniCor 62,5 полоса пропускания на длине волны оптического излучения 1310 нм составляет не менее 500 МГц·км.

1.2.8 Поляризационная модовая дисперсия

В одномодовом оптическом волокне может распространяться только одна мода. Но оптическая волна может существовать в различных состояниях поляризации. Таким образом, основную моду распространения можно представить в виде двух поляризованных мод с перпендикулярными друг другу поляризациями. Оптическое волокно изменяет поляризацию сигнала случайным образом, потому что моды с различными состояниями поляризации распространяются по волокну с различными скоростями. Это приводит к тому, что импульсы с двумя ортогональными поляризациями приходят к приемнику излучения с разными задержками, определяющими поляризационно-модовую дисперсию (ПМД). ПМД статистически накапливается пропорционально корню из длины волокна. ПМД выражают в пикосекундах, а коэффициент ПМД может быть выражен в пс/км^{1/2}.

ПМД измеряется интерферометрическими методами в соответствии с рекомендациями TIA-FOTP-124, которые описаны в [1.9]. Для одномодовых оптических волокон фирмы Corning SMF28e+LL коэффициент ПМД не более 0,1 пс/км^{1/2}.

1.2.9 Типы оптических волокон

Промышленность выпускает одномодовые и многомодовые оптические волокна для различных сфер применения. Чтобы классифицировать выпускаемые типы оптических волокон, разработаны международные стандарты. Разрабатывались стандарты двумя организациями: Международным союзом электросвязи, сектором стандартизации электросвязи (МСЭ-Т), преимущественно для потребителей волокон, и Международной электротехнической комиссией (МЭК), для производителей оптического волокна.

Рассмотрим рекомендации МСЭ-Т относящиеся к параметрам оптических волокон.

G.650 дает общие определения типов волокон, перечень основных характеристик и параметров одномодовых волокон, а также методов измерения и контроля этих параметров.

G.651 распространяется на многомодовое оптическое волокно с диаметром сердцевины 50 мкм и оболочки 125 мкм. Рекомендация содержит основные параметры этих волокон и допустимые нормы.

G.652 распространяется на стандартное одномодовое волокно с несмещенной дисперсией (значение нулевой хроматической дисперсии находится в области 1310 нм). Область применения таких волокон – волоконно-оптические линии передачи без спектрального уплотнения, работающие на длине волны оптического излучения 1310 нм.

G.653 распространяется на одномодовое волокно ориентированные на построение систем передачи, работающих на длине волны оптического излучения 1,55 мкм. Как было показано выше, затухание оптических сигналов в кварцевых оптических волокнах на этой длине волны минимальное. Волокно по данной рекомендации должно иметь нулевую дисперсию в области 1,55 мкм, что достигается более сложным профилем показателя преломления в поперечном сечении. Такое оптическое волокно называется волокном со смещенной дисперсией. Волокно типа G.653 применяется в волоконно-оптических линиях передачи без спектрального уплотнения, работающих на длине волны оптического излучения 1550 нм.

G.654 распространяется на одномодовое волокно для построения подводных линий связи. К основной особенности подводных морских и океанских линий связи можно отнести высокую протяженность, при этом расстояние между необслуживаемыми ретранслято-

рами должно быть максимальным. Для удлинения межтрансляционных участков волокно типа G.654 может передавать более высокие уровни оптической мощности. Это достигается за счет больших, чем у волокна типа G.653 размеров сердцевины. Волокно типа G.654 применяется в волоконно-оптических линиях передачи без спектрального уплотнения, работающих на длине волны оптического излучения 1550 нм.

G.655 относится к волокну со смещенной ненулевой дисперсией — NZDSF (Non-Zero Dispersion Shifted Fiber). Это волокно предназначено для применения в магистральных волоконно-оптических линиях и глобальных сетях связи, использующих технологии плотного спектрального уплотнения (DWDM) в диапазоне длин волн 1,55 мкм. Волокно типа G.655 имеет слабую, контролируемую дисперсию и большой диаметр световедущей жилы по сравнению с волокном типа G.653.

G.656 описывает новый тип оптических волокон, отличающихся от волокон других типов диапазоном рабочих длин волн от 1460 до 1625 нм и диапазоном допустимых абсолютных значений коэффициента хроматической дисперсии от 2 до 14 пс/(нм·км). Величина этого коэффициента превышает некоторое ненулевое значение во всем рабочем диапазоне длин волн 1460–1625 нм и всегда положительная. В дальнейшем возможно расширение диапазона рабочих длин волн. Волокна типа G.656 могут использоваться как в DWDM-системах, так и в системах с грубым спектральным уплотнением, CWDM.

G.657 распространяется на оптические волокна с малой чувствительностью к изгибам. Волокна этого типа используют в оптических кабелях для построения сетей доступа. Волокно типа G.657 обеспечивает этим кабелям характеристики изгиба, аналогичные характеристикам изгиба кабелей связи с медными жилами.

1.2.10 Перспективы производства оптических волокон в России

1.2.10.1 История освоения производства оптических волокон и кабелей в России [1.10]

В 1977 г. был изготовлен образец оптического кабеля (на волокне ГОИ им. Вавилова), который в составе действующей линии связи демонстрировался на международной выставке «Связь-77». По оптическому кабелю передавался сигнал цветного телевидения. Кроме СССР действующую линию связи на данной выставке демонстрировала только Япония.

Первые образцы оптического волокна имели коэффициент затухания около 30 дБ/км на длине волны 0,85 мкм, но уже содержали основные элементы будущих конструкций.

К 1979 году появились оптические волокна с коэффициентом затухания менее 5 дБ/км.

Ключевым моментом в развитии оптических систем связи в СССР следует считать 1981 год, когда Постановлением ЦК КПСС и Совета Министров СССР была принята комплексная программа развития волоконно-оптических систем связи.

В течение 1981-1985 годов были спланированы задания на разработку и организацию серийного производства оптического волокна и кабеля.

В развитие программы Постановлением Совета Министров СССР от 07.02.85 «О создании в 12-ой пятилетке световодных линий связи для Единой автоматизированной сети связи страны» Минэлектротехпрому поручалось осуществить изготовление и поставку оптических волокон в количестве 22,0 тыс. км в 1986 году, а в 1990 году – до 250,0 тысяч км.

В целях создания и внедрения передовой промышленной технологии и оборудования для производства оптических волокон, а также волоконно-оптических и оптоэлектронных элементов для волоконно-оптических линий связи Постановлением ЦК КПСС и Совета Министров СССР от 12.12.85 № 1230 был организован Межведомственный научно-технический комплекс (МНТК) «Световод».

К 1986 году уровень отечественных оптических волокон был достаточно высоким. Подтверждением этому могут служить таблицы 1.3, 1.4 и 1.5.

Т а б л и ц а 1.3 — Сравнительная характеристика многомодовых оптических волокон отечественного и зарубежного производства выпуска 1981 года

Наименование параметра	Значение параметра			
	отечественного волокна, изготовленного по ТУ16.705.286-81	аналогичных волокон, изготовленных фирмами		
		Pirelli (Италия)	Kabelmetall Electro (ФРГ)	NKF Kabel (Голландия)
Коэффициент затухания на длине волны оптического излучения 0,85 мкм, дБ/км, не более	5	5	3,5	4,0
Ширина полосы пропускания, МГц·км, не менее	250	200	200	400
Срок службы, лет, не менее	15	15	15	15

Т а б л и ц а 1.4 — Сравнительная характеристика многомодовых оптических волокон отечественного и зарубежного производства выпуска 1986 года

Наименование параметра	Значение параметра			
	отечественного волокна, изготовленного по ТУ16.705.286-86	аналогичных волокон, изготовленных фирмами		
		Pirelli (Италия)	Kabelmetall Electro (ФРГ)	NKF Kabel (Голландия)
Коэффициент затухания на длине волны оптического излучения 1,3 мкм, дБ/км, не более	1,5	2,0	1,5	1,5
Ширина полосы пропускания, МГц·км, не менее	500	200	600	200
Срок службы, лет, не менее	15	15	15	15

Т а б л и ц а 1.5 — Сравнительная характеристика одномодовых оптических волокон отечественного и зарубежного производства выпуска 1986 года

Наименование параметра	Значение параметра			
	отечественного волокна, изготовленного по ТУ16.705.286-86	аналогичных волокон, изготовленных фирмами		
		Pirelli (Италия)	Kabelmetall Electro (ФРГ)	NKF Kabel (Голландия)
Коэффициент затухания на длине волны оптического излучения 1,3 мкм, дБ/км, не более	0,7	1,0	2,0	1,0
Дисперсия, нс/нм·км	3,5	3,5	-	3,5
Срок службы, лет, не менее	15	15	15	15

Взятый темп развития производства оптических волокон требовал новых решительных действий для его поддержания и осуществления.

В феврале 1986 года был подготовлен проект Решения «О дальнейшем развитии работ по созданию компонентной базы волоконно-оптических средств на период 1986-1990 годы», в котором предусматривалось в части освоения промышленного выпуска оптических волокон:

- разработка новых конструкций одномодовых оптических волокон с коэффициентом затухания менее 0,3 дБ/км на длине волны 1,55 мкм и менее 0,7 дБ/км на длине волны 1,31 мкм строительной длиной 2; 6 и 100 км;
- разработка новых конструкций многомодовых оптических волокон с коэффициентом затухания до 0,5 дБ/км на длинах волны 1,31 и 1,55 мкм строительной длиной 2, 6, 10 и 40 км;

- разработка кварц-полимерных и радиационно-стойких оптических волокон.

В 1986-1990 годах в соответствии с ранее упомянутым Постановлением Совета Министров СССР была разработана Государственная программа развития оптических систем связи, предусматривавшая целый комплекс научно-исследовательских работ в следующих областях:

- усовершенствование технологии изготовления механически прочных и долговечных оптических волокон, на поверхности которых созданы сжимающие напряжения, тормозящие развитие поверхностных дефектов в процессе их эксплуатации;
- разработка основ методов ускоренных форсированных испытаний, позволяющих прогнозировать эксплуатационную долговечность оптических волокон с учетом локализации возможных дефектов как на поверхности, так и внутри;
- создание новых защитно-упрочняющих покрытий оптических волокон на основе эпоксиакрилатов с ультрафиолетовым отверждением и плавающих фильер для нанесения этих покрытий;
- разработка беспылевых высокотемпературных печей для вытяжки кварц-полимерных и кварц-кварцевых световодов;
- создание методов упрочнения поверхностных слоев заготовок оптических волокон перед их вытяжкой;
- организация производства автоматизированного оборудования для изготовления заготовок методом внутреннего парофазного осаждения и промышленной вытяжки оптических волокон.

В 1986 году оптические волокна выпускались рядом отечественных предприятий на самых современных на тот период времени установках вытяжки. Перечень предприятий приведен в таблице 1.6.

Т а б л и ц а 1.6 — Предприятия, выпускающие в 1986 году оптические волокна

Предприятие	Установки для вытяжки оптического волокна			Тип внешнего упрочняющего покрытия
	Тип	Количество	Скорость вытяжки, м/мин	
НИИЭС, г. Москва (в настоящее время Научно-Производственный Центр «Научно-исследовательский институт электровакуумного стекла», ОАО)	И4.013.0091-01, г. Саратов	5	15 – 20	Термо-отверждаемое СИЭЛ
	И4.013.0091-01, г. Саратов	2	60 – 70	УФ-отверждаемое
	Фирмы SGC	1	60 – 70	
Ливанский стекольный завод, г. Ливаны, Латвийская Советская Социалистическая Республика (в настоящее время завод переоборудован в музей)	На базе И4.013.0091-01, г. Саратов	2	20 – 30	Термо-отверждаемое ЛОСК-СИЭЛ
ГОИ, г. Ленинград (в настоящее время ОАО «Государственный Оптический Институт им. С.И. Вавилова)	«Optec»	2	60 – 70	УФ-отверждаемое

Предприятие	Установки для вытяжки оптического волокна			Тип внешнего упрочняющего покрытия
	Тип	Количество	Скорость вытяжки, м/мин	
ГосНИИКС, г. Ленинград (в настоящее время ОАО «Стектвар»)	И4.013.0091-01, г. Саратов «Ортек» «ЛИТМО»	5	40 – 50	Силикон
		2	60 – 70	УФ-отверждаемое
		1	40 – 60	
КБ «Кабель», г. Уфа (в настоящее время ОАО НИИ «Солитон»)	SGC	1	60 – 70	УФ-отверждаемое
Завод технического стекла, г. Гусь-Хрустальный (в настоящее время ОАО «Тех-стекло»)	И4.013.0091-01, г. Саратов	1	40 – 50	Силикон
Опытный завод ВНИИ КП, г. Подольск (в настоящее время подольский опытно-экспериментальный завод ОАО «Экспокабель»)	«Ортек»	1	60 – 70	УФ-отверждаемое. Термо-отверждаемое ЛОСК-СИЭЛ
	«QS»	1	30 – 40	
ОКБ КП г. Мытищи (в настоящее время ОАО «Особое Конструкторское Бюро Кабельной Промышленности»)	«Ортек» СКБ ИРЭ	1	60 – 70	УФ-отверждаемое
		2	30 – 40	
Завод им. Ф.Э. Дзержинского, г. Гусь-Хрустальный (в настоящее время ОАО «Гусевский завод технического стекла им. Ф.Э. Дзержинского»)	SGC И4.013.0091-01	2	60 – 70	УФ-отверждаемое. СИЭЛ
		2	30 – 40	
Завод «Электропровод», г. Москва (в настоящее время ЗАО «Народная Фирма «Электропровод»)	«Ортек»	1	60 – 70	УФ-отверждаемое

1987 год можно считать переломным годом в части концентрации работ по улучшению качества заготовок для вытяжки оптического волокна. Рост потребности в волокне привел к резкому скачку в части количества и качества производимых заготовок. Всего было изготовлено около одной тонны оптических заготовок в условиях жесткой изоляции со стороны западных стран.

В этот же период на пяти кабельных заводах: «Одескабель», «Севкабель», «Электропровод», «Средазкабель» и опытно-производстве ОКБ КП, был налажен серийный выпуск оптических кабелей для нужд Минсвязи СССР.

В 12 пятилетке предполагалось довести объем выпуска оптических кабелей до:

25,0 тысяч км в 1987 году;

135,0 тысяч км в 1988 году;

215,0 тысяч км в 1989 году;

255,0 тысяч км в 1990 году.

Однако в 1990 году уровень государственного финансирования стал катастрофически снижаться, производство оптических волокон в России было практически прекращено.

Иностранные фирмы, в частности фирма «Corning», нанесли удар по разваливающейся экономике СССР, наводнив отечественный рынок своими образцами волокна более дешевого и более высокого качества. Отечественной промышленности по производству оптических волокон было суждено погибнуть.

В 1994 году было принято решение Правительства РФ о повышении таможенных пошлин на оптические кабели до 15% при одновременном снижении таможенных пошлин на ОВ до 5%. Таким образом, было поддержано развивающееся направление кабельной

промышленности в его борьбе с иностранными конкурентами, однако производство отечественного оптического волокна с повестки дня было снято.

Но логика развития техники сама напоминает о допущенных ошибках и упущениях.

Практически все производство оптического кабеля, в том числе и для нужд Министерства обороны РФ и предприятий оборонных отраслей промышленности, стало базироваться на применении импортного оптического волокна.

1.2.10.2 Перспективы освоения производства оптических волокон и кабелей в России

По сравнению с ведущими странами мира Россия располагает очень «тощей» сетью волоконно-оптических линий связи, несоизмеримой с ее территорией, с потребностями развивающейся промышленности и современной инфраструктуры всех регионов страны [1.11]. В 2004 году общая потребность в оптических волокнах составила в России более 1,4 млн. км. Это означает, что целесообразно производить оптические волокна, так как известно, что рубеж потребления в 1 млн. км является ориентиром для рентабельного производства оптических волокон. В настоящее время объемы потребления оптического волокна в России по сравнению с мировыми составляют около 3%. При этом по типам потребляемых волокон прослеживается аналогия с мировыми тенденциями [1.12].

Как было показано выше, в России (СССР) благодаря усилиям ряда институтов Академии Наук и отраслевых организаций оптические волокна с малыми потерями, пригодные для производства волоконно-оптических кабелей, были получены в конце 70-х годов. До начала 90-х годов в России (СССР) успешно проводились работы в области волоконной оптики, хотя и с некоторым отставанием от ведущих западных стран. И, несмотря на то, что, начиная с 1992-93 г.г. в России нет промышленного производства ОВ, все прошедшие годы российские ученые, инженеры, технологи, несмотря на абсолютно недостаточное финансирование, продолжали вести работу в области волоконной оптики, отслеживая все тенденции ее развития, создавая в лабораторных условиях новые конструкции и технологии изготовления оптических волокон [1.11].

В настоящее время разработки и производство специальных типов оптического волокна в России сосредоточены на предприятиях:

- НТО «ИРЭ-Полус» (г. Фрязино Московской области) — производство активных (с рамановским усилением) оптических волокон;

- ООО «ГЕНЗОР» (г. Санкт-Петербург) — разработка и производство специальных типов оптического волокна;

- ОАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания» — производство плоскополяризованных оптических волокон для оптических гироскопов;

- ООО «Оптолинк» (г. Арзамас) — разработка и производство плоскополяризованных и радиационно-стойких типов оптического волокна;

- Государственный оптический институт имени Вавилова (ГОИ) (г. Санкт-Петербург) — разработка плоско-поляризованных, радиационно-стойких видов оптического волокна, специальных волокон, волокон для ультрафиолетового излучения и др.;

- институт химии высокочистых веществ РАН (г. Нижний Новгород) — разработка, совместно с НЦВО ИОФ РАН, технологии и опытного производства заготовок для специальных типов оптического волокна;

- Миасский машиностроительный завод (г. Миасс, Челябинской области) — работы по производству особо чистого кварцевого стекла КС-4В и заготовок из него, делаются попытки организации собственного производства оптического волокна;

- ЗАО НТЦ «Оптическое волокно» (г. Санкт-Петербург) — разработка и производство специальных видов оптических волокон;

Содержание

Введение	3
Глава 1	
Волоконно-оптическая компонентная база	
1.1 Общие сведения.....	5
1.2 Оптические волокна.....	5
1.2.1 Общие сведения.....	5
1.2.2 Геометрические характеристики.....	6
1.2.3 Погонное затухание.....	8
1.2.4 Длина волны отсечки.....	8
1.2.5 Хроматическая дисперсия и длина волны нулевой дисперсии.....	10
1.2.6 Числовая апертура.....	11
1.2.7 Полоса пропускания.....	11
1.2.8 Поляризационная модовая дисперсия.....	12
1.2.9 Типы оптических волокон.....	12
1.2.10 Перспективы производства оптических волокон в России.....	13
1.2.10.1 История освоения производства оптических волокон и кабелей в России.....	13
1.2.10.2 Перспективы освоения производства оптических волокон и кабелей в России.....	17
1.3 Оптические кабели.....	18
1.3.1 Общие сведения.....	18
1.3.2 Оптические модули.....	19
1.3.2.1 Модули со свободной укладкой волокон.....	19
1.3.2.2 Модули с плотной упаковкой волокон.....	19
1.3.2.3 Ленточные модули.....	20
1.3.3 Силовой сердечник.....	20
1.3.4 Защитные покровы и силовые элементы защитных покровов.....	20
1.3.5 Наружная оболочка.....	21
1.3.6 Основные параметры и характеристики.....	22
1.3.7 Основные типы оптических кабелей.....	22
1.3.8 Монтажные и бортовые оптические кабели типа ОК-МС06, ОК-БС06, ОК-БС06Е.....	22
1.3.9 Бортовые оптические кабели типа ОК-БС08, ОК-БС09.....	24
1.3.10 Бортовой оптический кабель типа ОК-БС10.....	24
1.3.11 Термостойкий бортовой оптический кабель типа ОК-БС11.....	25
1.3.12 Термостойкий бортовой оптический кабель типа ОК-БС12.....	26
1.3.13 Монтажный оптический кабель типа ОК-МС09.....	26
1.3.14 Монтажный оптический кабель типа ОК-МС11.....	27
1.3.15 Монтажные оптические кабели типа ОК-МС14 и ОК-МС16.....	28
1.3.16 Термостойкий монтажный оптический кабель типа ОК-МС17.....	28
1.3.17 Кабель оптический специальный ОКЦ-О-3Е1.....	29
1.3.18 Кабели оптические полевые ОК-ПП-04(06)-0,7-2 и ОК-ПП-03(05)-0,7-2.....	30
1.4 Компоненты волоконно-оптических систем передачи.....	31
1.4.1 Общие сведения.....	31
1.4.2 Пассивные оптические компоненты.....	32
1.4.2.1 Оптические соединители.....	32
1.4.2.1.1 Общие сведения.....	32
1.4.2.1.2 Основные параметры разъемных оптических соединителей.....	36
1.4.2.1.2.1 Конструктивно-технологические параметры.....	36
1.4.2.1.2.2 Параметры передачи.....	36

1.4.2.1.2.2.1 Вносимые оптические потери.....	37
1.4.2.1.2.2.2 Потери на отражение.....	42
1.4.2.1.2.2.3 Динамическая нестабильность оптических вносимых потерь.....	44
1.4.2.1.2.2.4 Переходное затухание на ближнем и дальнем концах (для многополюсных оптических соединителей).....	45
1.4.2.1.2.2.5 Нестабильность оптических вносимых потерь оптического вращающего перехода при взаимном вращении соединяемых оптических наконечников.....	45
1.4.2.1.3 Отечественные разъемные оптические соединители для жестких условий эксплуатации.....	47
1.4.2.1.3.1 Оптические соединители по ТУ6665-001-41085936-96.....	47
1.4.2.1.3.2 Оптические соединители по ТУ6665-001-11651143-2001.....	51
1.4.2.1.3.3 Оптические соединители по ТУ6665-011-41085936-2008.....	58
1.4.2.1.3.4 Оптические соединители по ТУ6665-016-41085936-2009.....	61
1.4.2.2 Оптические разветвители и объединители.....	65
1.4.2.2.1 Общие сведения.....	65
1.4.2.2.2 Области применения оптических разветвителей и объединителей.....	66
1.4.2.2.2.1 Применение оптических разветвителей для «горячего» резервирования в аналоговых и цифровых волоконно-оптических системах передачи....	67
1.4.2.2.2.2 Применение оптических разветвителей и объединителей в цифровых волоконно-оптических системах передачи для уплотнения передаваемой информации.....	67
1.4.2.2.2.2.1 Применение оптических мультиплексоров и демультиплексоров в волоконно-оптических системах передачи со спектральным уплотнением.....	67
1.4.2.2.2.2.2 Применение оптических мультиплексоров и демультиплексоров в волоконно-оптических системах передачи с временным уплотнением.....	68
1.4.2.2.2.2.3 Применение оптических разветвителей в пассивных оптических сетях доступа.....	74
1.4.2.2.2.2.4 Применение оптических разветвителей и объединителей в оптических концентраторах.....	74
1.4.2.2.2.3 Применение оптических разветвителей и объединителей в аналоговых системах передачи.....	76
1.4.2.2.3 Основные параметры оптических разветвителей и объединителей.....	79
1.4.2.2.3.1 Конструктивно-технологические параметры.....	79
1.4.2.2.3.2 Параметры передачи.....	79
1.4.2.2.3.2.1 Рабочий диапазон длин волн.....	79
1.4.2.2.3.2.2 Оптические вносимые потери.....	80
1.4.2.2.3.2.3 Оптические избыточные потери.....	80
1.4.2.2.3.2.4 Коэффициент передачи между оптическими полюсами на дальнем конце.....	80
1.4.2.2.3.2.5 Переходное затухание на ближнем и дальнем концах.....	80
1.4.2.2.3.2.6 Неравномерность коэффициента передачи между оптическими полюсами.....	80
1.4.2.2.3.2.7 Интервал частот (или длин волн) оптических сигналов на входных оптических полюсах оптического спектрального мультиплексора и демультиплексора.....	80
1.4.2.2.3.2.8 Скорость передачи сигнала на выходном полюсе оптического временного мультиплексора и на входном полюсе оптического временного демультиплексора.....	81

1.4.2.2.4 Оптические разветвители и объединители для жестких условий эксплуатации.....	82
1.4.2.2.4.1 Одномодовые разветвители и объединители, изготавливаемые по ТУ6665-018-41085936-2006.....	84
1.4.2.2.4.2 Многомодовые оптические спектральные мультиплексоры и демультимплексоры, изготавливаемые по ТУ6665-018-41085936-2006.....	86
1.4.2.3 Волоконно-оптические линии задержки.....	88
1.4.2.3.1 Общие сведения.....	88
1.4.2.3.2 Волоконно-оптическая линия задержки МЛЗ-5-FC/APC.....	88
1.4.2.3.3 Элемент задержки ЭЗ-2,0.....	89
1.4.2.4 Оптические переключатели и коммутаторы.....	90
1.4.2.4.1 Общие сведения.....	90
1.4.2.4.2 Электромеханические оптические переключатели.....	90
1.4.2.4.3 Электрооптические переключатели.....	91
1.4.2.4.4 Другие типы оптических переключателей.....	92
1.4.2.5 Условные обозначения типов пассивных компонентов.....	93
1.4.2.5.1 Условные обозначения неразъемных оптических соединителей.....	93
1.4.2.5.2 Условные обозначения разъемных оптических соединителей.....	94
1.4.2.5.3 Условные обозначения оптических разветвителей, объединителей, мультиплексоров, демультимплексоров.....	94
1.4.2.5.4 Условные обозначения оптических переключателей или коммутаторов.....	95
1.4.2.5.5 Условные обозначения волоконно-оптических линий задержки.....	95
1.4.2.6 Вопросы надежности пассивных оптических компонентов для волоконно-оптических систем передачи информации.....	95
1.4.2.6.1 Оценка долговечности пассивных волоконно-оптических компонентов.....	95
1.4.2.6.2 Контроль безотказности пассивных компонентов волоконно-оптических систем передачи.....	97
1.4.2.6.2.1 Особенности волоконно-оптических компонентов по сравнению с электронными компонентами.....	97
1.4.2.6.2.2 Выбор нулевой гипотезы для наработок до отказа волоконно-оптических компонентов.....	99
1.4.2.6.2.3 Особенности планирования испытаний на соответствие требований безотказности пассивных компонентов ВОСП.....	103
1.4.2.6.2.4 Оптимальное планирование нормальных испытаний.....	104
1.4.2.6.2.5 Расчет объема выборки и продолжительности испытаний.....	104
1.4.2.6.2.6 Определение параметров распределения Вейбулла.....	106
1.4.2.6.2.7 Определение параметров нормального распределения.....	107
1.4.2.6.2.8 Определение параметров логарифмически нормального распределения.....	108
1.4.2.6.2.9 Особенности проверки адекватности нулевой гипотезы.....	108
1.4.2.6.2.10 Расчет вероятности безотказной работы компонентов за наработку в течение T_v , если наработки до отказа распределены по закону Вейбулла.....	109
1.4.2.6.2.11 Расчет вероятности безотказной работы компонентов за наработку в течение T_v , если наработки до отказа распределены по нормальному закону.....	109
1.4.2.6.2.12 Расчет вероятности безотказной работы компонентов за наработку в течение T_v , если наработки до отказа распределены по логарифмически нормальному закону.....	111
1.4.2.6.2.13 Порядок вычисления $P(T_v)$ методом множительной оценки.....	111
1.4.3 Активные оптические компоненты.....	112
1.4.3.1 Передающие и приемные оптоэлектронные модули.....	113
1.4.3.1.1 Общие сведения.....	113

1.4.3.1.2 Дискретные передающие и приемные оптоэлектронные модули.....	112
1.4.3.1.2.1 Аналоговые дискретные передающие и приемные оптоэлектронные модули.....	112
1.4.3.1.2.2 Цифровые дискретные передающие и приемные оптоэлектронные модули.....	115
1.4.3.1.2.2.1 Цифровые дискретные передающие оптоэлектронные модули ПОМ-26.....	116
1.4.3.1.2.2.2 Цифровые дискретные приемные оптоэлектронные модули ПРОМ-14.....	120
1.4.3.1.3 Оптические трансиверы.....	123
1.4.3.1.3.1 Оптические трансиверы типа 1x9.....	123
1.4.3.1.3.2 Оптические трансиверы SFF типа 2x5 и GBIC.....	126
1.4.3.1.3.3 Оптические трансиверы SFP.....	126
1.4.3.1.3.4 Оптические трансиверы XFP.....	130
1.4.3.2 Активные волоконно-оптические линии задержки.....	131
1.4.3.2.1 Общие сведения.....	131
1.4.3.2.2 Аналоговая волоконно-оптическая линия задержки типа ФКЯИ.203731.010.....	131
1.4.3.2.3 Аналоговая волоконно-оптическая линия задержки ВОЛЗА-120.....	132
1.4.3.3 Оптические ретрансляторы.....	133
1.4.3.3.1 Общие сведения.....	133
1.4.3.3.2 Ретрансляторы уровня 1R.....	133
1.4.3.3.2.1 Эрбиевые волоконные усилители.....	134
1.4.3.3.2.1.1 Эрбиевые оптические усилители типа DTL-НА5900.....	135
1.4.3.3.2.1.2 Подводные эрбиевые оптические усилители НТО «ИРЭ-Полнос».....	136
1.4.3.3.2.2 Рамановские волоконные усилители.....	136
1.4.3.3.2.3 Ретрансляторы уровня 2R, 3R и оптические волновые конвертеры.....	137
1.4.3.4 Оптические модуляторы.....	138
1.4.3.4.1 Общие сведения.....	138
1.4.3.4.2 Электрооптические модуляторы.....	139
1.4.3.4.3 Магнитооптические модуляторы.....	140
1.4.3.4.4 Акустооптические модуляторы.....	140
1.4.3.4.5 Интегрально-оптические модуляторы.....	140

Глава 2

Опыт проектирования волоконно-оптических систем передачи

2.1 Терминология, классификация волоконно-оптических систем передачи.....	141
2.2 Вопросы проектирования аналоговых волоконно-оптических систем передачи.....	142
2.2.1 Температурная стабилизация рабочей точки лазерного диода.....	143
2.2.2 Использование оптических изоляторов в аналоговых ВОСП.....	145
2.2.3 Шумовые параметры аналоговых ВОСП.....	147
2.2.4 Влияние дисперсии времени распространения оптического излучения в оптическом волокне.....	149
2.3 Вопросы проектирования цифровых волоконно-оптических систем передачи.....	152
2.3.1 Введение.....	152
2.3.2 Специфика проектирования цифровых объектовых ВОСП.....	152
2.3.2.1 Анализ технологий и интерфейсов цифровых объектовых ВОСП.....	152
2.3.2.1.1 CAN.....	153
2.3.2.1.2 AS-Interface.....	153
2.3.2.1.3 FOUNDATION fieldbus и PROFIBUS-PA.....	153
2.3.2.1.4 MIL-STD-1553B.....	154
2.3.2.1.5 IEEE 1394 (Firewire).....	155
2.3.2.1.6 Fiber Distributed Data Interface (FDDI).....	155
2.3.2.1.7 Fibre Channel (FC).....	156

2.3.2.1.8 Asynchronous Transfer Mode (ATM).....	156
2.3.2.1.9 Промышленный Ethernet.....	156
2.3.2.2 Заключение.....	160
2.3.2.3 Простые концентраторы сети Fast Ethernet.....	161
2.3.2.3.1 Построение концентратора на базе микросхемы LXT983.....	161
2.3.2.3.2 Нетрадиционные подходы к построению схемы концентратора.....	163
2.3.2.4 Коммутаторы сети Gigabit Ethernet.....	166
2.3.2.5 Медиаконвертеры.....	169
2.3.2.5.1 Построение медиаконвертеров с применением микросхем трансиверов.....	170
2.3.2.5.2 Построение медиаконвертеров с применением микросхем коммутаторов.....	170
2.3.2.5.3 Построение медиаконвертеров с применением оптических трансиверов.....	171
2.3.3 Специфика проектирования магистральных сегментов ВОСП.....	174
2.3.3.1 Введение.....	174
2.3.3.2 Планирование магистральной ВОСП.....	176
2.3.3.3 Обзор телекоммуникационного оборудования.....	178
2.3.3.3.1 Мультиплексоры SDH группы компаний «Натекс».....	178
2.3.3.3.2 Мультиплексоры SDH ООО «Кьютэк».....	180
2.3.3.3.3 Мультиплексоры SDH ОАО «Супертел».....	180
2.3.3.3.4 Мультиплексоры SDH Ericsson.....	180
2.3.3.3.5 Оборудование Cisco System.....	180
2.3.4 Специфика проектирования подводных ВОСП.....	185
2.3.4.1 Расчет ретрансляционных участков.....	185
2.3.4.1.1 Расчет длины ретрансляционных участков ограниченных затуханием.....	186
2.3.4.1.2 Расчет длины ретрансляционных участков ограниченных дисперсией.....	188
2.3.4.2 Расчет максимального количества последовательно включенных оптических усилителей.....	189
2.3.4.3 Расчет электропитания.....	190
2.3.4.3.1 Обзор автономных источников электропитания.....	191
2.3.4.3.2 Расчет электропитания по медным жилам кабеля.....	192
2.3.4.4 Анализ вариантов построения DC/DC преобразователей.....	195
2.3.4.4.1 Построение преобразователя с применением пьезотрансформаторов.....	195
2.3.4.4.2 Построение DC/DC преобразователя с применением емкостных накопителей энергии.....	196
2.3.4.4.3 Построение DC/DC преобразователя на полупроводниковых инверторах.....	201
2.3.4.4.4 Заключение.....	202
2.3.5 Вопросы тестирования узлов цифровых ВОСП.....	202
2.3.5.1 Оборудование, проверяемые параметры.....	203
2.3.5.2 Проверка пропускной способности канала передачи фрагмента сети Fast Ethernet.....	207
2.3.5.3 Проверка пропускной способности канала передачи фрагмента сети Gigabit Ethernet.....	212
2.3.5.4 Проверка параметра ошибок по битам канала передачи фрагментов сети Fast Ethernet и Gigabit Ethernet.....	215
2.3.6 Нетрадиционные подходы к построению цифровой ВОСП.....	216
2.3.6.1 Традиционный подход к построению цифровой ВОСП.....	216
2.3.6.2 Символьный метод передачи цифровой информации.....	216
2.3.6.3 Метод комбинированного спектрального и временного уплотнения.....	217
2.3.6.4 Кластерный метод передачи цифровых данных.....	223
2.4 Надежность ВОСП.....	230

Глава 3

Опыт проектирования измерительных преобразователей волоконно-оптических датчиков

3.1 Терминология и классификация.....	233
---------------------------------------	-----

3.2 РВОД использующие эффект рассеяния Мандельштама-Бриллюэна.....	234
3.2.1 Эффект рассеяния Мандельштама-Бриллюэна.....	234
3.2.2 Эффект вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна.....	235
3.2.3 Влияние деформаций и температуры на спектр рассеяния Мандельштама-Бриллюэна.....	236
3.2.4 Метрологические характеристики при измерении деформаций и температуры по спектру рассеяния Мандельштама-Бриллюэна.....	236
3.2.5 Методы построения РВОД на основе эффекта рассеяния Мандельштама-Бриллюэна.....	238
3.2.5.1 Метод измерения усиления/ослабления.....	238
3.2.5.2 Метод оптической рефлектометрии.....	239
3.3 РВОД использующие эффект рамановского рассеяния.....	243
3.3.1 Теория эффекта рамановского рассеяния.....	243
3.3.2 Методы построения РВОД на основе эффекта рамановского рассеяния.....	245
3.4 Квази РВОД для измерения распределения температуры.....	247
3.5 Квази РВОД для измерения превышения заданного уровня деформации.....	251
Глава 4	
Опыт проектирования изделий радиофотоники	
4.1 Общие сведения.....	255
4.2 Компонентная база радиофотоники.....	256
4.3 Опыт проектирования устройств СВЧ с использованием радиофотоники.....	256
4.3.1 Опыт проектирования узлов АФАР с использованием достижений радиофотоники.....	257
4.3.1.1 Опыт проектирования волоконно-оптических линий передачи и распределения СВЧ сигналов.....	257
4.3.1.2 Опыт проектирования волоконно-оптических фазовращателей.....	262
4.3.2 Опыт проектирования активных волоконно-оптических линий задержки.....	267
4.3.3 Опыт проектирования оптоэлектронных генераторов СВЧ диапазона.....	272
4.3.4 Опыт проектирования оптоэлектронных АЦП и ЦАП.....	274
Список сокращений.....	279
Список литературы.....	281