

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМ. А.Н.ТУПОЛЕВА

***Д.Л.АЙБАТОВ, Л.Р.АЙБАТОВ***

**ОПТИЧЕСКИЕ НАПРАВЛЯЮЩИЕ СРЕДЫ  
И ПАССИВНЫЕ КОМПОНЕНТЫ ВОЛС**

Конспект лекций

КАЗАНЬ  
2013

## Оптические направляющие среды и пассивные компоненты ВОЛС: Конспект лекций.

Излагаются основы волоконно-оптических систем передачи и физических принципов передачи информации по оптическому волокну, рассмотрены основные типы оптических волокон, оптических кабелей связи, соединительных муфт и пассивных компонентов ВОСП, приведены их характеристики.

Конспект лекций предназначен для студентов, обучающимися по дисциплине СД.Ф.3 "Оптические направляющие среды и пассивные компоненты волоконно-оптических линий связи (ВОЛС)", специальности 210401.65 «Физика и техника оптической связи» направления 210400 «Телекоммуникации» очной и заочной форм обучения технических университетов

Табл. – 9 Ил. – 80 Библиогр. – 16 назв.

## СОДЕРЖАНИЕ

---

Список основных сокращений и обозначений .....	7
Введение .....	11
Раздел 1. Оптические линии связи: Основные положения .....	14
1.1. Краткий обзор и история развития оптических линий связи и направляющих систем передачи.....	14
1.2. Этапы развития ВОСП .....	16
1.3. Виды линий связи .....	19
1.4. Контрольные вопросы .....	22
Раздел 2. Оптические линии связи: Основные положения .....	23
2.1. Модель волоконно-оптической системы связи.....	23
2.1.1. Временное мультиплексирование .....	24
2.1.2. Оптическое частотное мультиплексирование .....	24
2.1.3. Дуплексная система с передачей по одному волоконному световоду оптических сигналов в двух направлениях на разных несущих частотах .....	25
2.2. Диапазоны длин волн, используемые для передачи сигнала по оптоволокну .....	25
2.3. Повышение пропускной способности линии связи.....	27
2.4. Современные технологии WDM .....	28
2.4.1 Стандартный частотный план .....	28
2.4.2. Расширенный частотный план .....	28
2.4.3. Классификация систем WDM .....	29
2.5. Контрольные вопросы .....	29
Раздел 3. Основы электродинамики оптических линий связи .....	30
3.1. Уравнения Максвелла. Волновое и параболическое уравнения .....	30
3.2. Плоские волны .....	34
3.3. Контрольные вопросы .....	38

Раздел 4. Основы электродинамики оптических линий связи .....	40
4.1. Полное отражение.....	40
4.2. Распространение света в анизотропных и гиротропных средах .....	43
4.3. Контрольные вопросы .....	49
Раздел 5. Основы электродинамики оптических линий связи .....	50
5.1. Гауссовы пучки света .....	50
5.2. Волновые пакеты и групповая скорость.....	53
5.3. Контрольные вопросы .....	56
Раздел 6. Оптические волноводные моды.....	57
6.1. Теоретическое описание мод в трехслойном планарном волноводе.....	57
6.2. Теория оптических мод на основе лучевого приближения .....	59
6.1. Контрольные вопросы .....	61
Раздел 7. Решения уравнений Максвелла для планарных и цилиндрических волноводов .....	63
7.1. Решения в общем виде .....	63
7.2. Зависимости для планарных волноводов .....	64
7.3. Зависимости для цилиндрических волноводов.....	65
7.3. Контрольные вопросы .....	66
Раздел 8. Оптическое волокно.....	68
8.1. Типы оптических волокон .....	68
8.2. Многомодовые градиентные волокна.....	71
8.3. Одномодовые волокна.....	71
8.4. Контрольные вопросы .....	72
Раздел 9. Параметры передачи оптических волокон .....	73
9.1. Затухание сигналов.....	73
9.2. Дисперсия и полоса пропускания .....	76
9.2.1. Виды дисперсии .....	76
9.2.2. Межмодовая дисперсия .....	77
9.2.3. Хроматическая дисперсия .....	78
9.2.4. Поляризационная модовая дисперсия.....	81
9.3. контрольные вопросы.....	82
Раздел 10. Геометрические параметры оптических волокон .....	83
10.1. Относительная разность показателей преломления .....	83
10.2. Числовая апертура .....	84
10.3. Нормированная частота.....	85
10.4. Номенклатура мод .....	85
10.5. Количество мод .....	87
10.6. Длина волны отсечки (cutoff wavelength).....	88

10.7. Контрольные вопросы .....	90
Раздел 11. Нелинейные эффекты в оптических волокнах .....	91
11.1. Бриллюэновское и Рамановское рассеяния .....	91
11.2. Фазовая самомодуляция .....	94
11.3. Четырехволновое смешение .....	95
11.4. Модуляционная неустойчивость .....	96
11.5. Формирование солитона .....	96
11.6. Фазовая кросс-модуляция .....	97
11.7. Контрольные вопросы .....	97
Раздел 12. Соединение оптических волокон .....	98
12.1. Разъемные соединители .....	98
12.1.1. Конструкции разъемных соединителей .....	98
12.1.2. Потери обусловленные соединением волокон .....	99
12.1.3. Обратное отражение и контакты типа PC, Super PC, Ultra PC, APC .....	102
12.1.4. Стандарты соединителей .....	104
12.1.6. Оптические шнуры .....	109
12.2. Неразъемные соединители .....	110
12.2.1. Механический сплайс .....	110
12.2.2. Сварной сплайс .....	111
12.3. Контрольные вопросы .....	112
Раздел 13. Конструкции и параметры оптических кабелей связи .....	113
13.1. Классификация оптических кабелей .....	113
13.2. Элементы конструкции оптических кабелей .....	114
13.2.1. Защитное покрытие .....	114
13.2.2. Сердечник ОК .....	115
13.2.3. Силовые (упрочняющие) элементы .....	117
13.2.4. Разделительные (демпфирующие) слои .....	117
13.2.5. Наружные защитные оболочки .....	117
13.2.6. Броневые покровы .....	118
13.2.7. Гидрофобные наполнители .....	118
13.3. Контрольные вопросы .....	119
Раздел 14. Соединительные муфты для оптических кабелей .....	120
14.1. Конструкции соединительных муфт .....	121
14.2. Кассеты для выкладки ОВ .....	124
14.3. Подбор оптических муфт при проектировании и строительстве ВОЛС .....	127
14.4. Контрольные вопросы .....	130
Раздел 15. Пассивные компоненты ВОСП .....	131
15.1. Волоконно-оптические ответвители и разветвители .....	131

15.2. Волоконно-оптические переключатели .....	134
15.2.1. Электромеханические переключатели .....	134
15.2.2. Термооптические переключатели .....	135
15.2.3. Электрооптические коммутаторы .....	137
15.2.4. Технология МЕМ .....	138
15.3. Оптические изоляторы .....	139
15.4. Волоконно-оптические циркуляторы .....	141
15.5. Контрольные вопросы .....	142
Раздел 16. Пассивные компоненты ВОСП.....	143
16.1. Оптические мультиплексоры/демультиплексоры .....	143
16.1.1. Мультиплексоры на основе дифракционной решетки на массиве волноводов .....	143
16.1.2. Оптические мультиплексоры интерференционного типа (ИОМ).....	145
16.2. Электрооптические модуляторы .....	147
16.3. Атенюаторы .....	149
16.4. Оптические фильтры .....	150
16.4.1. Фильтры на тонких пленках.....	150
16.4.2. Фильтры на основе ВРБ.....	152
16.5. Контрольные вопросы .....	154
Раздел 17. Измерение потерь в оптических волокнах .....	156
17.1. Метод оптического рефлектометра (метод OTDR – optical time domain reflectometer) .....	156
17.2. Метод вносимых потерь.....	157
17.3. Метод обрыва .....	158
17.4. Метод измерения возвратных потерь .....	160
17.5. Метод дискретного оптического рефлектометра .....	161
17.6. Контрольные вопросы .....	164
Заключение.....	165
Список литературы.....	166

## **СПИСОК ОСНОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ**

---

ВОСП – волоконно-оптические системы передачи;

ВОЛС – волоконно-оптическая линия связи;

ВОК – волоконно-оптический кабель;

ОВ – оптическое волокно;

ВС – волоконный световод;

DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) – системы плотного спектрального уплотнения;

HDWDM (High Dense Wavelength Division Multiplexing) – системы сверхплотного спектрального уплотнения;

CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing) – системы “грубого” спектрального уплотнения;

ОУ – оптический усилитель;

ПМД – поляризационная модовая дисперсия;

TDM (Time Division Multiplexing) – метод временного уплотнения;

FDM (Frequency Division Multiplexing) – метод частотного уплотнения;

MDM (Mode Division Multiplexing) – модовое уплотнение;

PDM (Polarization Division Multiplexing) – уплотнение по поляризации;

WDM (Wavelength Division Multiplexing) – многоволновое уплотнение оптических несущих;

OTDM (Optical Time Division Multiplexing) – оптическое временное уплотнение;

EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier) – волоконный усилитель на основе легированного эрбием волокна;

MMF (multi mode fiber) – многомодовое оптическое волокно;

SMF (single mode fiber) – одномодовое оптическое волокно;

DSF (dispersion-shifted single mode fiber) – оптическое волокно со смещенной дисперсией;

NZDSF (non-zero dispersion-shifted single mode fiber) оптическое волокно с ненулевой смещенной дисперсией;

ОК – оптический кабель;

SBS (Stimulated Brillouin Scattering) – стимулированное Бриллюэновское рассеяние;

BER (Bit Error Rate) – вероятность возникновения ошибки;

SRS (Stimulated Raman Scattering) – стимулированное Рамановское рассеяние

ФСМ – фазовая самомодуляция;

ЧВС – четырехволновое смешение;

ДГС – дисперсия групповых скоростей;

ФКМ – фазовая кросс-модуляция;

КДЗС – комплект для защиты сростка;

ВОЛП – волоконно-оптические линии передачи;

ТУТ – термоусаживаемая трубка;

ЦСЭ – центральный силовой элемент;

ПБТ – полибутилентерефталат;

МОГ – муфта оптическая городская;

МОГ<sub>у</sub> – муфта оптическая городская укороченная;

МОГ<sub>т</sub> – муфта оптическая городская тупиковая;

ПОС – пассивные оптические сети;

ОМ – оптический мультиплексор;

ВСМ – волноводный спектральных мультиплексоров;

ВСА – волноводный спектральный анализатор;

ИОМ – интерференционный оптический мультиплексор;

ОФ – оптический фильтр;

ЭОМ – электрооптический модулятор;

ВРБ – волоконная решетка Брэгга;

OTDR (Optical Time Domain Reflectometer) – оптический рефлектометр о временной области;

PPM – равновесное распределение мод;

OCWR (Optical Continuous Wave Reflectometer) – оптический рефлектометр длительного излучения;

ORL (Optical Return Loss) – оптические возвратные потери;

$d_{\text{серд}}$  – диаметр сердцевины оптоволокна;

$F$  – полоса пропускания;

$\lambda$  – рабочая длина волны;

$\Delta_{\text{ст}}$  – стандартизированный диапазон;

$\mathbf{E}$  – вектор напряженности электрического поля;

$\mathbf{H}$  – вектор напряженности магнитного поля;

$\mathbf{D}$  – вектор электрической индукции;

$\mathbf{B}$  – вектор магнитной индукции;

$\varepsilon^{(0)}$  – диэлектрическая проницаемость вакуума;

$\mu^{(0)}$  – магнитная проницаемость вакуума;

$\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды;

$\mu$  – магнитная проницаемость среды;

$\hat{\varepsilon}$  – комплексная диэлектрическая проницаемость;

$\mathbf{S}$  – вектор Умова-Пойнтинга;  
 $k$  – волновое число;  
 $\omega$  – круговая частота;  
 $\varphi$  – фаза;  
 $\mathbf{k}$  – волновой вектор;  
 $\mathbf{r}$  – радиус-вектор;  
 $v$  – фазовая скорость;  
 $\mathbf{n}$  – единичный вектор волновой нормали;  
 $i_0$  – угол падения;  
 $r$  – угол отражения;  
 $t$  – угол преломления;  
 $\mathbf{q}$  – нормаль к поверхности раздела сред;  
 $i_{\text{пр}}$  – угол преломления;  
 $n_{\text{в}}$  – показатель преломления поверхностной волны  
 $P(z)$  – комплексное смещение фазы;  
 $q(z)$  – распределение амплитуды в поперечных плоскостях;  
 $w_0$  – поперечный размер волнового пучка;  
 $R(z)$  – радиус кривизны фазовой поверхности;  
 $v_{\text{гр}}$  – групповая скорость;  
 $n$  – показатель преломления;  
 $c$  – скорость света в вакууме;  
 $\beta$  – фазовый коэффициент распространения поля, зависящий от граничных условий;  
 $\alpha$  – коэффициент потерь;  
 $\alpha_{\text{abs}}$  – потери на поглощении;  
 $\alpha_{\text{sct}}$  – потери на рассеянии;  
 $\alpha_{\text{rad}}$  – кабельные потери;  
 $\tau$  – дисперсия;  
 $\tau_{\text{mod}}$  – межмодовая дисперсия;  
 $\tau_{\text{w}}$  – волноводная дисперсия;  
 $\tau_{\text{mat}}$  – материальная дисперсия;  
 $L_{\text{с}}$  – длина межмодовой связи;  
 $W$  – полоса пропускания;  
 $M(\lambda)$  – удельная материальная дисперсия;  
 $N(\lambda)$  – удельная волноводная дисперсия;  
 $D(\lambda)$  – удельная хроматическая дисперсия;  
 $\lambda_0$  – длина волны нулевой дисперсии;  
 $S_0$  – наклон нулевой дисперсии;  
 $\tau_{\text{chr}}$  – хроматическая дисперсия;  
 $\Delta\lambda$  – ширина спектра излучения источника;  
 $\tau_{\text{pmd}}$  – поляризационная модовая дисперсия;  
 $\Delta$  – относительная разность показателей преломления;  
 $\theta_{\text{с}}$  – критический угол падения;  
 $NA$  – числовая апертура;

$\theta_A$  – максимальный угол вводимого в волокно излучения из свободного пространства, при котором свет испытывает полное внутреннее отражение и распространяется по волокну;

$NA_{eff}$  – эффективная числовая апертура;

$V$  – нормированная частота;

$a$  – радиус сердцевины;

$b$  – радиус оболочки;

$\lambda_{CF}$  – волоконная длина волны отсечки;

$\lambda_{CCF}$  – кабельная длины волны отсечки;

$A_m$  – разница затуханий;

$P_s$  – мощность на выходе одномодового волокна;

$P_m$  – мощность на выходе многомодового волокна;

$\nu_B$  – бриллюэновское частотное смещение;

$\omega_A$  – частота акустической волны;

$D_F$  – коэффициент прохождения;

$P_{in}$  – интенсивность излучения на входе соединения;

$P_{out}$  – интенсивность излучения на выходе соединения;

$a$  – вносимые потери;

$a_F$  – потери из-за вариации показателей преломления;

$a_{NA}$  – потери при вариации апертур;

$a_D$  – потери при вариации диаметров;

$L$  – радиальное смещение;

$S$  – осевое смещение;

$n_0$  – показатель преломления среды, заполняющей пространство стыка;

$R$  – коэффициент обратного отражения;

$b$  – обратные потери;

$P_r$  – интенсивность отраженного излучения;

$k_{вн}$  – коэффициент вносимых потерь;

$\rho$  – постоянная Верде;

$r_{ij}$  – электрооптический коэффициент;

$\lambda_B$  – брэгговская длина волн;

$d$  – период брэгговской решетки.

## **ВВЕДЕНИЕ**

---

Волоконно-оптические системы передачи (ВОСП), безусловно, являются одним из самых перспективных направлений в области связи. Пропускные способности оптических каналов на порядки выше, чем у информационных линий на основе медного кабеля. Кроме того оптоволокно невосприимчиво к электромагнитным полям, что снимает некоторые типичные проблемы медных систем связи. Оптические сети способны передавать сигнал на большие расстояния с меньшими потерями. Несмотря на то, что эта технология все еще остается дорогостоящей, цены на оптические компоненты постоянно падают, в то время как возможности медных линий приближаются к своим предельным значениям и требуются все больших затрат на дальнейшее развитие этого направления.

Волоконно-оптическая линия связи (ВОЛС) – это вид системы передачи, при котором информация передается по оптическим диэлектрическим волноводам, известным под названием "оптическое волокно". ВОЛС – это информационная сеть, связующими элементами между узлами которой являются волоконно-оптические линии связи. Технологии ВОЛС помимо вопросов волоконной оптики охватывают также вопросы, касающиеся электронного передающего оборудования, его стандартизации, протоколов передачи, вопросы топологии сети и общие вопросы построения сетей.

Передача информации по ВОЛС имеет целый ряд достоинств перед передачей по медному кабелю. Стремительное внедрение в информационные сети ВОЛС является следствием преимуществ, вытекающих из особенностей распространения сигнала в оптическом волокне.

*Широкая полоса пропускания* – обусловлена чрезвычайно высокой частотой несущей  $10^{14}$  Гц, что дает потенциальную возможность передачи по одному оптическому волокну потока информации в несколько терабит в секунду.

*Малое затухание светового сигнала в волокне.* Выпускаемое в настоящее время оптическое волокно имеет затухание 0,2 – 0,3 дБ/км на длине волны 1550 нм, что позволяют строить участки линий без ретрансляции протяженностью до

100 км и более.

*Низкий уровень шумов* в волоконно-оптическом кабеле позволяет увеличить полосу пропускания, путем передачи различной модуляции сигналов с малой избыточностью кода.

*Высокая помехозащищенность.* Поскольку волокно изготовлено из диэлектрического материала, оно невосприимчиво к электромагнитным помехам со стороны окружающих медных кабельных систем и электрического оборудования. В многоволоконных кабелях также не возникает проблемы перекрестного влияния электромагнитного излучения.

*Малый вес и объем.* Волоконно-оптические кабели (ВОК) имеют меньший вес и объем по сравнению с медными кабелями в расчете на одну и ту же пропускную способность.

*Высокая защищенность от несанкционированного доступа.* Поскольку ВОК практически не излучает в радиодиапазоне, то передаваемую по нему информацию трудно подслушать, не нарушая приема-передачи. Системы мониторинга целостности оптической линии связи, используя свойства высокой чувствительности волокна, могут мгновенно отключить "взламываемый" канал связи и подать сигнал тревоги.

*Гальваническая развязка элементов сети.* Волокно помогает избежать электрических "земельных" петель, которые могут возникать, когда два сетевых устройства неизолированной вычислительной сети, связанные медным кабелем, имеют заземления в разных точках здания, например на разных этажах. При этом может возникнуть большая разность потенциалов, что способно повредить сетевое оборудование. Для волокна этой проблемы просто нет.

*Взрыво- и пожаробезопасность.* Из-за отсутствия искрообразования оптическое волокно повышает безопасность сети на химических, нефтеперерабатывающих предприятиях, при обслуживании технологических процессов повышенного риска.

*Экономичность ВОК.* Волокно изготовлено из кварца, основу которого составляет двуокись кремния, широко распространенного, а потому недорогого материала, в отличие от меди. В настоящее время стоимость волокна по отношению к медной паре соотносится как 2:5. При этом ВОК позволяет передавать сигналы на значительно большие расстояния без ретрансляции.

*Длительный срок эксплуатации.* Со временем волокно испытывает деградацию. Это означает, что затухание в проложенном кабеле постепенно возрастает. Однако, благодаря совершенству современных технологий производства оптических волокон, этот процесс значительно замедлен, и срок службы ВОК составляет примерно 25 лет. За это время может смениться несколько поколений/стандартов приемо-передающих систем.

Целью данного учебного пособия является создание компактного инструмента для интенсификации процесса обучения студентов, обучающимися по дисциплине СД.03 "Оптические направляющие среды и пассивные компоненты волоконно-оптических линий связи (ВОЛС)", специальности 210402 «Физика и техника оптической связи» направления

210400 «Телекоммуникации» очной и заочной форм обучения технических университетов.

Лекции 1 и 2 – обзорные: в них рассмотрены история и этапы развития оптических линий связи и направляющих систем передачи, а также достоинства и недостатки оптических линий связи по сравнению с радио- и СВЧ-системами связи и направляющими электрическими системами, приводится модель волоконно-оптической линии передачи, большое внимание уделяется методам повышения пропускной способности оптических линий связи.

В лекциях 3 – 5 излагаются основы электродинамики оптических линий связи (уравнения Максвелла, плоские волны, полное отражение, распространение света в анизотропных и гиротропных средах, гауссовы пучки света, волновые пакеты и групповая скорость).

Лекция 6 посвящена оптическим волноводным модам; в ней приводится описание мод в планарном трехслойном волноводе, дается теория оптических мод на основе лучевого приближения.

В лекции 7 приводятся решения уравнений Максвелла для планарного и цилиндрического волноводов.

В лекциях 8 – 11 рассматриваются основные типы оптических волокон, применяемые в современных ВОСП, параметры передачи оптических волокон и их геометрические параметры, а также нелинейные эффекты, ухудшающие характеристики системы передачи.

В лекции 12 приводятся методы разъемного и неразъемного соединения оптических волокон, конструкции соединителей, стандарты.

В лекциях 13 – 14 рассматриваются оптические кабели связи и соединительные муфты для них.

Лекции 15 – 16 посвящены пассивным компонентам ВОСП, рассмотрены конструкции и характеристики ответвителей, разветвителей, переключателей, изоляторов, циркуляторов, мультиплексоров/демультиплексоров, модуляторов, аттенюаторов, фильтров.

В лекции 17 рассматриваются различные методы измерения потерь в оптических волокнах.

## РАЗДЕЛ 1. ОПТИЧЕСКИЕ ЛИНИИ СВЯЗИ: ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

---

### 1.1. Краткий обзор и история развития оптических линий связи и направляющих систем передачи

Волоконно-оптическим системам передачи более 30 лет. В середине 70-х годов XX века фирма Corning освоила производство волоконных световодов с низким затуханием, появились надежные лазеры, и с этого времени началось практическое использование ВОСП, стремительное развитие волоконных систем. За 30 лет ВОСП заняли ведущую позицию в системах передачи информации, стали важнейшим звеном в информационной инфраструктуре современного общества.

**1790 г.** – Клод Шапп построил схему оптического телеграфа, которая включала в себя цепь семафорных башен с подвижными сигнальными рейками. Информация передавалась на расстояние 200 км за 15 мин. Устарели с изобретением телеграфа.

**1870 г.** – Джон Тиндаль продемонстрировал, что свет может распространяться в потоке воды. В его эксперименте использовался принцип полного внутреннего отражения, который применяется в современных волоконных световодах.

**1880 г.** – Александр Абрахам Белл изобрел фототон, в котором речевые сигналы могли передаваться с помощью света. Погодные условия и видимость оказывали большое отрицательное влияние на качество связи.

**1881 г.** – передача речи при помощи светового луча.

**1934 г.** – Норман Френг получил патент на оптическую телеграфную систему, в которой речевые сигналы передавались через сеть оптических кабелей.

**1958 г.** – А. Шавлов и Ч. Г. Таунс разработали лазер.

**1960 г.** – создание лазера.

**1962 г.** – признана возможность изготовления лазера из

полупроводниковых материалов, были разработаны элементы приемника в виде полупроводниковых фотодиодов.

**1966 г.** – Чарльз Као и Джордж Хокен предложили использовать стекловолокно для передачи света (потери в световодах 1000 дБ/км).

**1970 г.** – Ж. И. Алферов разработал полупроводниковый лазер, работающий при комнатной температуре.

**1970 г.** – фирма “Corning Glass Works” нашла пути удаления примесей из волокна и достигла потерь 20 дБ/км ( $d_{\text{серд}} = 60$  мкм,  $F = 10$  МГц).

**1973 г.** – получены лазерные диоды со сроком службы 1000 часов.

**1974 г.** – разработано градиентное многомодовое волокно.

**1975 г.** – первый коммерческий полупроводниковый лазер, работающий при комнатной температуре.

**1975 г.** – потери в световодах достигли 2 дБ/км.

**1976 г.** – срок службы лазеров увеличен до 100000 часов (10 лет).

**1976 г.** – открыто третье окно в спектральном диапазоне работы ВОЛС ( $\lambda = 1.55$  мкм).

**1976 г.** – потери в световодах достигли 0.5 дБ/км.

**1977 г.** – срок службы лазеров увеличен до 1 млн. часов (100 лет).

**1978 г.** – тестирование ВОЛС со скоростью передачи информации 32 Мбит/с, длина участка 53 км и рабочая длина волны  $\lambda = 1.3$  мкм.

**1978 г.** – получено затухание в оптическом волокне 0.2 дБ/км ( $\lambda = 1.55$  мкм).

**1978 г.** – освоено производство волокон с сердечником диаметром 5 мкм и полосой пропускания до сотен ГГц. Появились полупроводниковые источники излучения с  $\lambda$  1300 нм 1550 нм.

**1980 г.** – первая коммерческая ВОЛС (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,  $\lambda = 0.85$  мкм).

**1981 г.** – получена скорость передачи сигнала 140 Мбит/с в одномодовом волокне длиной 49 км,  $\lambda = 1.3$  мкм. Начало работ с одномодовыми волокнами со смещенной дисперсией.

**1981 г.** – разработана световодная система связи, позволяющая передавать информацию со скоростью 2 Гбит/с на расстояние 40 км без ретрансляторов.

**1980 – 1982 гг.** – разработаны первые экспериментальные когерентные световодные системы связи с оптической обратной связью в фотоприемнике (гомодинные и гетеродинные оптические системы), что позволило понизить порог чувствительности фотоприемника.

**1987 г.** – разработан эрбиевый оптический усилитель. Начало работ по ВОЛС со спектральным уплотнением.

**1988 г.** – первая трансокеанская ВОЛС – ТАТ-8 (одномодовые волокна,  $\lambda = 1.3$  мкм).

**1993 г.** – начало практического использования оптических усилителей.

**1995 г.** – начало практического использования ВОЛС со спектральным уплотнением.

**1996 г.** – преодолен терабитный барьер передачи данных по одному волокну. Компании AT&T, Fujitsu и NTT мультиплексировали в одно волокно 55 DWDM каналов при скорости передачи 20 Гбит/с, что обеспечило скорость 1.1 Тбит/с.

**1997 г.** – разработка оптических мультиплексеров адресного ввода-вывода.

**1998 – 2000 гг.** – создание систем плотного (DWDM) и сверхплотного (HDWDM) спектрального уплотнения.

**1999 – 2000 гг.** – создание оптических переключателей спектральных каналов.

**2000 г.** – использование систем “грубого” спектрального уплотнения (CWDM).

**2000 – 2002 гг.** – DWDM-системы с пропускной способностью до 1.6 Тбит/с.

В начале пути на ВОЛС в первую очередь возлагались надежды по решению проблемы острой нехватки полосы пропускания каналов передачи информации. В начале эры информатизации, информационные потоки бурно нарастали, а увеличение полосы пропускания систем связи в основном проходило за счет роста числа линий передачи и явным образом отставало от потребностей.

Оптический канал передачи должен был обеспечить полосу передачи более  $10^{12}$  Гц, что давало выигрыш по сравнению с существующими системами передачи не менее четырех порядков. За эти годы волоконные системы смогли реально приблизиться к предельным возможностям волокна как канала передачи информации, при этом впервые решив проблему дефицита пропускной способности каналов передачи информации: в настоящее время актуальной является задача эффективного наполнения трафиком магистральных ВОЛС.

## **1.2. Этапы развития ВОСП**

В своем развитии ВОСП прошли несколько этапов, решались фундаментальные проблемы, интенсивно развивалась наука и технология.

Большая часть проблем и одновременно основные достижения и возможности ВОЛС связаны с двумя элементами систем: волоконными световодами и лазерами. В развитии оптических систем разработчики стремились реализовать два принципа: „быстрее“ и „дальше“.

### **1 этап**

В середине 70-х годов XX века появились полупроводниковые лазеры и волоконные световоды с небольшим затуханием. Первые лазеры для ВОЛС имели длину волны излучения 0,85 мкм (первое окно прозрачности волокна) и невысокую эффективность; волоконные световоды были многомодовыми и имели затухание в несколько дБ/км. Поэтому ВОЛС хотя и показали

преимущества перед системами на медных проводах, но имели скорости и расстояния передачи далекими от ожидаемых. Увеличению скорости передачи в первых ВОЛС мешала временная дисперсия прохождения оптического сигнала по волоконному тракту.

Первые волоконные световоды (многомодовые со ступенчатым профилем показателя преломления) из-за большой межмодовой дисперсии имели полосу пропускания не более 20 МГц·км. Эта проблема была достаточно быстро решена разработкой многомодовых волоконных световодов с градиентным профилем показателя преломления, которые обеспечили увеличение полосы пропускания до 160 МГц·км.

## **2 этап**

Следующим этапом развития ВОЛС стало увеличение дальности передачи информации. Для этого было необходимо снизить величину затухания оптического сигнала в волоконном тракте. Разработка приемопередающей аппаратуры, работающей во втором (1,3 мкм) спектральном диапазоне (окне), позволила снизить затухание в многомодовых волокнах с 3 дБ/км (0,85 мкм) до 1 дБ/км (1,3 мкм). Одновременно у многомодовых волокон повысилась и полоса пропускания до 500 МГц·км.

## **3 этап**

Дальнейшее развитие ВОЛС в направлении „быстрее и дальше“ связано с одномодовым этапом истории ВОЛС. Одномодовые волокна позволили значительно повысить скорость передачи информации за счет отсутствия межмодовой дисперсии, а переход в третье спектральное окно (1,55 мкм) позволил снизить потери в одномодовых волокнах с 0,35 дБ/км (1,31 мкм) до 0,2 дБ/км (1,55 мкм).

Открывшиеся возможности по наращиванию скорости и дальности передачи информации привели к значительному прогрессу цифровых систем передачи информации (сети синхронной цифровой иерархии — SDH). Потребность в развитии таких систем была очень высокой, так как объем передаваемого трафика непрерывно увеличивался, и это стимулировало работы по дальнейшему совершенствованию ВОЛС. Было показано, что увеличению скорости и дальности передачи информации в одномодовых системах препятствует хроматическая дисперсия в волокнах. Эта проблема была успешно решена при разработке оптических волокон с нулевой дисперсией в области длин волн 1,31 мкм (волокна типа G.652) и смещенной в области длин волн 1,55 мкм нулевой дисперсией (волокна типа G.653). Для увеличения дальности передачи информации стали использоваться регенераторы сигнала, которые преобразовывали оптический сигнал в электрический, восстанавливали его форму, а затем формировали оптический сигнал для дальнейшего прохождения по волоконному тракту.

## **4 этап**

Следующий этап — использование оптических усилителей (ОУ), которые позволили эффективно увеличить дальность передачи. ВОЛС с оптическими усилителями и волокном G.653 обеспечивали передачу информации со скоростями до 40 Гбит/с на расстояние более ста километров.

Разработанные ОУ открыли важнейший этап в развитии волоконно-оптической связи — появились системы со спектральным уплотнением. В них используется такое свойство волоконных систем, как возможность независимой передачи информации на разных длинах волн, в разных каналах. Первые ВОЛС со спектральным уплотнением работали в разных спектральных окнах (1,31 мкм и 1,55 мкм). Но системы со спектральным уплотнением наиболее эффективны в третьем спектральном окне (1,55 мкм), так как в этом случае один ОУ усиливает все информационные каналы, расположенные в окне.

Реализация уникальных возможностей таких систем (плотного спектрального уплотнения — DWDM и высокоплотного спектрального уплотнения — HDWDM), в свою очередь, потребовала решения еще одного ряда фундаментальных задач.

Во-первых, это проблема четырехволнового смешения. Наиболее эффективный путь построения ВОЛС со спектральным уплотнением — увеличение числа каналов. При увеличении дальности передачи приходится усиливать оптические сигналы в каждом канале, и при большой суммарной мощности в волокне начинают проявляться нелинейные эффекты. Для DWDM-систем наиболее существенным является эффект четырехволнового смешения, когда в спектре сигнала появляются нежелательные составляющие, перекрестные помехи. При спектральном способе дешифрации оптических сигналов это может привести к значительным ошибкам в передаче информации. Четырехволновое смешение наиболее сильно сказывается в случае равенства скоростей распространения оптических сигналов в каналах. По этой причине оптические волокна со смещенной нулевой дисперсией (G.653) не используются в DWDM-системах, а для уменьшения влияния четырехволнового смешения были разработаны волокна со смещенной ненулевой дисперсией (G.655) и технология компенсации хроматической дисперсии.

Во-вторых, кроме специальных оптических волокон для DWDM-систем были разработаны высокостабильные лазеры с узкой спектральной линией, а также спектральные мультиплексоры/демультиплексоры. Этот цикл работ потребовал значительного продвижения в физике и технологии лазеров и интегрально-оптических схем.

Дальнейшее развитие ВОЛС шло как по пути увеличения числа сравнительно „низкоскоростных“ (несколько Гбит/с) каналов в DWDM- и HDWDM-системах, так и по пути дальнейшего увеличения скорости передачи информации в информационном оптическом канале. В настоящее время серийно выпускаются системы со скоростью передачи 40 Гбит/с, ведутся эксперименты на 100 Гбит/с. Однако уже на скоростях более 10 Гбит/с появляются ограничения, связанные еще с одним видом временной дисперсии —

поляризационной модовой дисперсией (ПМД). Решение этой проблемы потребовало проведения фундаментальных исследований и значительного продвижения в области технологии изготовления волоконных световодов и оптических кабелей, монтажа линии и контроля параметров тракта.

### **5 этап**

В последнее время повышенное внимание уделяется не только высокоскоростным магистральным ВОЛС, но и локальным системам. Массовые локальные волоконно-оптические системы передачи должны обеспечить загруженность региональных и магистральных ВОЛС, повысить эффективность волоконно-оптических сетей связи. При этом целесообразно использовать многомодовые волоконные световоды. Появление новых высокоэффективных лазеров для локальных сетей позволяет значительно повысить скорость и дальность передачи информации в ВОЛС на основе многомодовых волокон. Однако при этом появляется проблема „центрального провала“ в многомодовых волокнах, связанная с несовершенством технологии изготовления заготовок для этих световодов. Значительные отклонения профиля показателя преломления от оптимального в центре волокна вызывали резкое увеличение дисперсии в случае использования современных лазеров. Эта проблема многомодового волокна была решена, что открыло новые возможности в развитии локальных ВОЛС и волоконно-оптических систем в целом.

Решение фундаментальных проблем было подкреплено развитием сопутствующих технологий, которые и обеспечили продвижение ВОЛС к потребителям по пути „быстрее-дальше“. Наиболее существенные успехи наблюдались в технологии производства волоконных световодов и кабелей. Промышленность производит все необходимые виды оптических волокон и кабелей, обеспечивающие самые высокие параметры ВОЛС. При этом рост производства оптических волокон беспрецедентен: с 6,9 млн. км в 1990 г. до 76,6 млн. км в 2000 г. — в 11 раз. Современные технологии монтажа и измерения параметров волоконного тракта полностью соответствуют высокому уровню современных ВОЛС. Достаточно сказать, что сварочные аппараты, например, FSM-40S, обеспечивают эффективный монтаж волоконного тракта с потерями в месте сварки менее 0,02 дБ. Благодаря этому, а также развитию высоких технологий производства оптических передатчиков и приемников, сетевых технологий и технологий спектрального уплотнения и обеспечены высочайшие темпы развития ВОЛС.

## **1.3. Виды линий связи**

Различают два типа линий связи: линии в атмосфере (радиолинии) и направляющие линии передачи.

Отличительной особенностью радиолиний является распространение электромагнитных сигналов в свободном пространстве.

Отличительной особенностью направляющих линий связи является то, что

распространение сигналов в них от одного абонента к другому осуществляется только по специально созданным цепям и трактам линий связи, образующим направляющие системы, предназначенные для передачи электромагнитных сигналов в заданном направлении с должным качеством и надежностью.

Различают три типа направляющих линий связи – кабельные, воздушные и волоконно-оптические. Кабельные и воздушные линии относят к проводным линиям, у которых направляющие системы образуются системами проводник – диэлектрик, а волоконно-оптические линии представляют собой диэлектрические волноводы, направляющая система которых состоит из диэлектриков с различными показателями преломления.

Достоинства и недостатки оптических линий связи по сравнению с радио- и СВЧ-системами связи и направляющими электрическими системами приведены в табл. 1.1 – 1.2

Таблица 1.1. Открытые системы связи

<b>Достоинства</b>	<b>Недостатки</b>
1. Более высокое отношение мощности принимаемого сигнала к излучаемой мощности при меньших апертурах антенн передатчика и приемника 2. Лучшее пространственное разрешение при меньших апертурах антенн передатчика и приемника 3. Малые габариты передающего и приемного модулей, используемых для связи на расстояния до 1 км. 4. Хорошая скрытность связи.  5. Освоение неиспользуемого участка спектра электромагнитных излучений 6. отсутствие необходимости получения разрешения на эксплуатацию антенн связи	1. Малая пригодность для радиовещания из-за высокой направленности лазерного пучка. 2. Высокая требуемая точность наведения антенн передатчика и приемника 3. Низкий к.п.д. оптических излучателей.  4. Сравнительно высокий уровень шума в приемнике, частично обусловленный квантовой природой процесса детектирования оптического сигнала. 5. Влияние характеристик атмосферы на надежность связи. 6. Возможность отказов аппаратуры.

Таблица 1.2. Направляющие системы связи

<b>Достоинства</b>	<b>Недостатки</b>
1. Возможность получения световодов с малыми затуханием и дисперсией, что позволяет сделать большим расстояние между ретрансляторами (10..50 км). 2. Малый диаметр одноволоконного кабеля.  3. Допустимость изгиба световода под малыми радиусами	1. Трудность соединения оптических волокон.  2. Необходимость прокладки дополнительных электропроводящих жил в оптическом кабеле для обеспечения электропитания дистанционно управляемой аппаратуры. 3. Чувствительность оптического волокна к воздействию воды при ее попадании в кабель.

<p>4. Малая масса оптического кабеля при высокой информационной пропускной способности.</p> <p>5. Низкая стоимость материала световода.</p> <p>6. Возможность получения оптических кабелей, не обладающих электропроводностью и индуктивностью. Это означает, что передаваемые по кабелю сигналы не подвергаются электромагнитным воздействиям, кроме того, оконечная аппаратура может быть электрически изолирована друг от друга и при случайном повреждении кабеля не происходит нарушения скрытности связи.</p> <p>7. Пренебрежимо малые перекрестные помехи.</p> <p>8. Высокая скрытность связи: ответвление сигнала возможно только при непосредственном подсоединении к отдельному волокну.</p> <p>9. Гибкость в реализации требуемой полосы пропускания: световоды различных типов позволяют заменить электрические кабели в цифровых системах связи</p> <p>10. Возможность постоянного усовершенствования системы связи по мере появления источников излучения, световодов и фотоприемников с улучшенными характеристиками.</p>	<p>4. Чувствительность оптического волокна к воздействию ионизирующего излучения.</p> <p>5. Низкий к.п.д. источников оптического излучения при ограниченной мощности излучения.</p> <p>6. Нелинейность излучательных характеристик полупроводниковых лазеров, ограничивающая их использование для аналоговой передачи сигналов.</p> <p>7. Отсутствие возможности передачи сигналов в троичном коде.</p> <p>8. Трудности реализации режима многостанционного (параллельного) доступа с помощью шины с временным разделением каналов.</p> <p>9. Высокий уровень шума в приемнике.</p>
--	---

Сравнительные данные электрических кабелей с медными проводниками и оптических кабелей со световодами приведены в табл. 1.3.

Таблица 1.3

Характеристика	Электрические кабели	Оптические кабели
Уровень потерь	Высокий	Низкий
Расстояние между ретрансляторами, км	3..20	До 100
Помехоустойчивость	Низкая	Высокая
Влияние повышенной температуры на затухание	Затухание возрастает	Не влияет
Заземление	Необходимо	Не требуется
Утечка информации	Возможна	Сильно затруднена
Влияние коррозии	Подвержены	Не подвержены
Влияние электромагнитного импульса	Подвержены	Не подвержены
Масса	Большая	Малая
Тенденция к снижению стоимости	Не наблюдается	Прогрессирует

## **1.4. Контрольные вопросы**

- 1.Какие этапы развития ВОЛС можно выделить?
- 2.Какие виды оптических линий связи существуют?
- 3.Когда появились оптические волокна с малым затуханием?
- 4.Какие три типа направляющих линий связи можно выделить?
- 5.Какими достоинствами обладают открытые линии связи?
- 6.Какими недостатками обладают открытые линии связи?
- 7.Какими достоинствами обладают направляющие системы передачи?
- 8.Какими недостатками обладают направляющие системы передачи?

## РАЗДЕЛ 2. ОПТИЧЕСКИЕ ЛИНИИ СВЯЗИ: ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

---

### 2.1. Модель волоконно-оптической системы связи

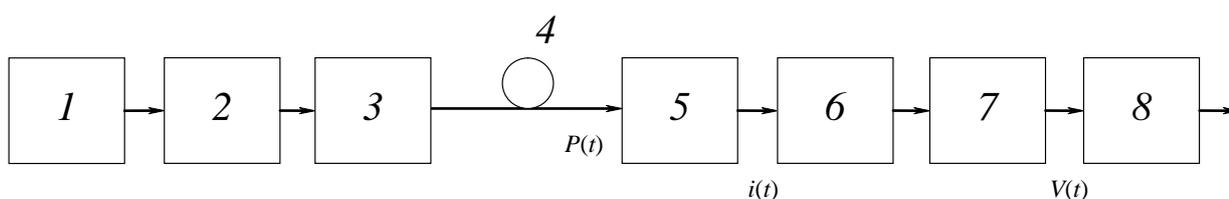


Рис.2.1. Модель волоконно-оптической линии связи:

- 1 – источник электрических сигналов; 2 – кодирующее устройство и модулятор;  
3 – источник оптического излучения; 4 – волоконный световод; 5 – фотодетектор;  
6 – предварительный усилитель; 7 – фильтр нижних частот;  
8 – устройство обработки сигналов

Основными элементами каждой оптоволоконной системы связи являются:

- блок оптического передатчика, в котором электрические сигналы, поступающие на вход системы, преобразуются в оптические импульсы, передаваемые затем в световодную линию связи;
- волоконно-оптическая линия;
- блок оптического приемника, принимающего оптические сигналы и преобразующие их в электрические импульсы, поступающие на выход системы связи после декодирования и усиления.

Блок оптического передатчика содержит оптическую головку с источником света и модулятор. Электрические сигналы от внешнего источника модулируют излучение светодиода или лазерного диода. Импульсы света вводятся в волоконно-оптическую линию, передаются по ней и на ее выходном конце вводятся в оптический приемник. Имеющийся в приемнике фотодетектор преобразует падающий на него пучок света в электрические сигналы. Кроме

фотодетектора в блоке оптического приемника содержатся демодулятор и усилитель. На выход световодной системы связи поступают электрические сигналы, тождественные сигналам, введенным в систему.

Единый световод может быть использован как для одноканальной, так и для многоканальной связи в одном и двух направлениях. При многоканальной связи часто применяют мультиплексирование – уплотнение передаваемой информации.

Многоканальные световодные системы связи часто строят, применяя следующие методы уплотнения каналов:

- мультиплексирование электрических сигналов перед их преобразованием в оптические;
- мультиплексирование оптических сигналов.

### 2.1.1. Временное мультиплексирование

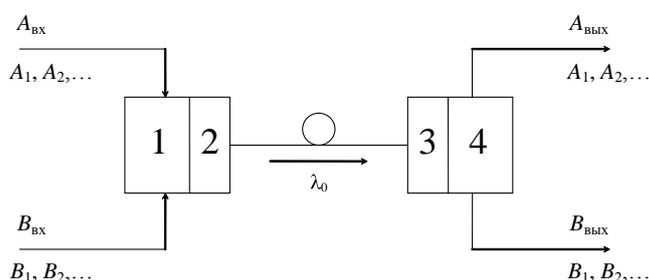


Рис. 2.2.

На входы  $A_{вх}$  и  $B_{вх}$  поступают две серии импульсов ( $A_1, A_2, \dots$  и  $B_1, B_2, \dots$ ), которые через мультиплексор 1 вводятся в заданной последовательности чередования в оптический передатчик 2. В блоке передатчика 2 имеется модулятор, и в световодную линию поступают соответствующие введенным электрическим импульсам оптические сигналы на одной длине волны  $\lambda_0$ . Излучение, прошедшее по линии, преобразуется содержащимся в фотоприемнике 3 фотодетектором в электрические сигналы, которые разделяются имеющимся в блоке фотоприемника демультимплексором 4 на две серии импульсов ( $A_1, A_2, \dots$  и  $B_1, B_2, \dots$ ), поступающих соответственно на выходы  $A_{вых}$  и  $B_{вых}$ .

### 2.1.2. Оптическое частотное мультиплексирование

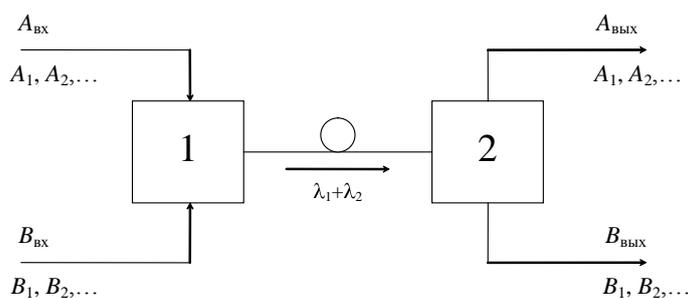


Рис. 2.3

Блок передатчика  $I$  должен содержать два источника излучения в случае двухканальной связи ( $n$  источников при  $n$ -канальной). Электрические сигналы  $A_1, A_2, \dots$  и  $B_1, B_2, \dots$ , поступающие на входы  $A_{\text{вх}}$  и  $B_{\text{вх}}$ , преобразуются в оптические импульсы в блоке передатчика  $I$ , содержащем источники излучения с  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ . Импульсы, которыми кодированы сигналы  $A_1, A_2, \dots$ , передаются по световодной линии излучением с  $\lambda_1$ , а импульсы  $B_1, B_2, \dots$  – с  $\lambda_2$ . Фотоприемник  $2$  содержит демультиплексор, который разделяет прошедший по линии свет на два монохроматических пучка с  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ , а также два фотодетектора, один из которых регистрирует пучки света с  $\lambda_1$ , а другой – с  $\lambda_2$ . После преобразования фотодетекторами оптических сигналов в электрические на выход  $A_{\text{вых}}$  поступают только импульсы  $A_1, A_2, \dots$ , а на выход  $B_{\text{вых}}$  – импульсы  $B_1, B_2, \dots$ .

### 2.1.3. Дуплексная система с передачей по одному волоконному световоду оптических сигналов в двух направлениях на разных несущих частотах

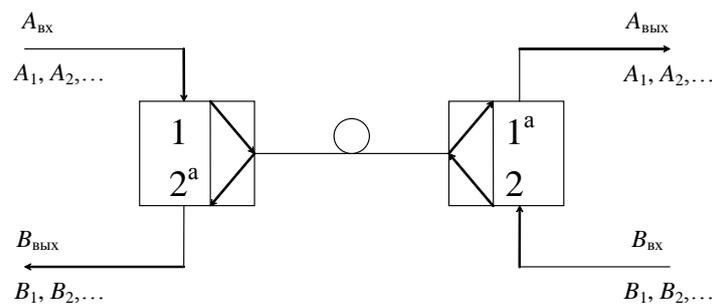
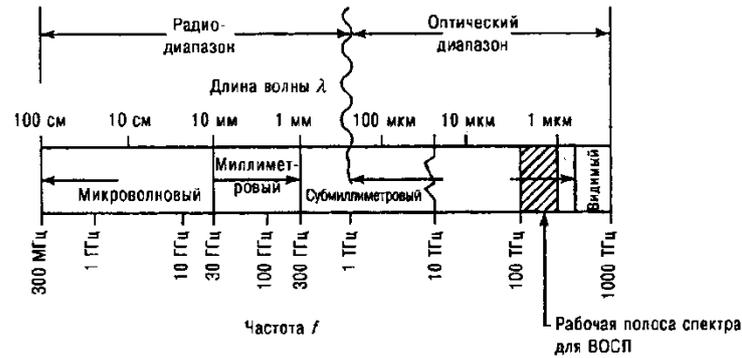


Рис. 2.4.

Система работает аналогично предыдущей.  $1, 2$  – оптические передатчики,  $1^a, 2^a$  – фотоприемники. Используется излучение с двумя длинами волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ .

## 2.2. Диапазоны длин волн, используемые для передачи сигнала по оптоволокну

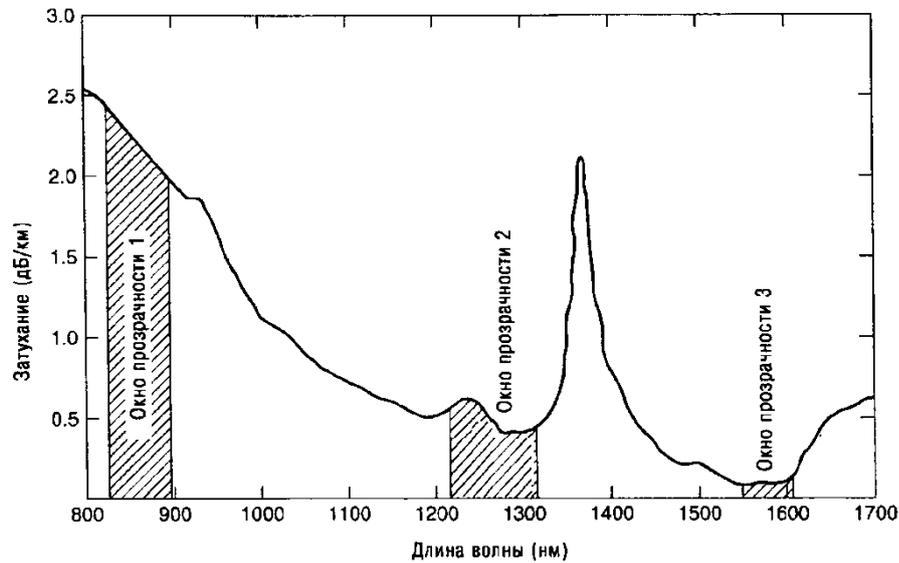
Диапазон рабочих частот ВОСП представлен на рис. 2.5.



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

Рис. 2.5

Затухание оптического волокна в зависимости от длины волны приведен на рис. 2.6.



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

Рис. 2.6

На рис. 2.6 выделено три окна прозрачности:

1. 820 – 900 нм
2. 1280 – 1350 нм
3. 1528 – 1562 нм

Последнее окно может быть расширено до 1620 нм, эту область обычно называют четвертым окном прозрачности.

1383 нм – пик поглощения света “водой”, “вода” характеризуется наличием примесей в волокне, пик поглощения вызван наличием радикалов ОН.

## 2.3. Повышение пропускной способности линии связи

На сегодняшний день для повышения пропускной способности волоконно-оптических систем передачи (ВОСП) применяют следующие технологии

- TDM (Time Division Multiplexing) – метод временного уплотнения;
- FDM (Frequency Division Multiplexing) – метод частотного уплотнения;
- MDM (Mode Division Multiplexing) – модовое уплотнение;
- PDM (Polarization Division Multiplexing) – уплотнение по поляризации;
- Метод уплотнения каналов по полярности;
- WDM (Wavelength Division Multiplexing) – многоволновое уплотнение оптических несущих
  - CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing) – системы “грубого” спектрального уплотнения;
  - обычные WDM;
  - DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) – системы плотного спектрального уплотнения;
  - HDWDM (High Dense Wavelength Division Multiplexing) – системы сверхплотного спектрально уплотнения
- OTDM (Optical Time Division Multiplexing) – оптическое временное уплотнение

Рассмотрим эти технологии более подробно.

*TDM* – технология объединения информации, поступающей по нескольким низкоскоростным линиям, для ее дальнейшей передачи по одному высокоскоростному каналу связи. Уплотнение осуществляется за счет выделения для каждой линии своего временного интервала.

*FDM* – технология уплотнения, при которой каждый информационный поток передается по физическому каналу на соответствующей частоте – поднесущей. Если в качестве физического канала выступает оптическая несущая, то она модулируется по интенсивности групповым информационным сигналом, спектр которого состоит из ряда частот поднесущих, количество которых равно числу компонентных информационных потоков.

*MDM* – согласно геометрической оптики, если на выходной торец многомодового волокна по углом  $\varphi_1 < \varphi_{кр}$  падает оптический луч, то, войдя через этот торец в волокно и распространяясь вдоль этого волокна по строго определенной для него траектории, он выходит из выходного торца под таким же углом  $\varphi_1$ , что справедливо и для остальных лучей вводимых в световод каждый под своим углом  $\varphi_k$ ,  $\varphi_k < \varphi_{кр}$ . Применяя модовые селекторы на входе и выходе волокна, можно осуществлять передачу независимых информационных потоков на соответствующих модах, которые в этом случае играют роль каналов. Модовое уплотнение может работать только в случае отсутствия перемешивания или взаимного преобразования мод.

*PDM* – уплотнение потоков информации с помощью оптических несущих, имеющих линейную поляризацию. При этом плоскость поляризации каждой несущей должна быть расположена под своим углом. Модулирование

осуществляется с помощью специальных оптических призм, например призмы Рошона. Данный метод аналогичен модовому уплотнению, хотя в качестве среды передачи группового потока может быть использовано одномодовое волокно.

*Метод модуляции по полярности* заключается в том, что положительная часть (полярность) несущей модулируется одним сигналом, а отрицательная – другим. Таким сигналом модулируется оптическое излучение, которое вводится в оптическую линию связи.

*OTDM* – разрабатывается согласно концепции создания полностью оптических систем. В системе используются полностью оптические элементы – лазер, оптические модуляторы, разветвители, модуляторы, выполненные на основе электрооптических кристаллов из  $\text{LiNbO}_3$ , оптические усилители и оптические линии задержки.

## **2.4. Современные технологии WDM**

Технология WDM была разработана в 1958 году, но активно развивается последние десять лет. В WDM несущие генерируются отдельными источниками (лазерами), эти несущие затем модулируются внешними информационными сигналами, формируя модулированные по интенсивности световые потоки, которые объединяются оптическим мультиплексором в единый многочастотный сигнал, подаваемый в оптоволокно.

### **2.4.1 Стандартный частотный план**

Первоначально в основу стандарта был положен частотный план с равномерным расположением несущих частот каналов и минимальным шагом несущих в 100 ГГц, что позволяло в стандартизированном диапазоне  $\Delta_{\text{ст}} = 4.1$  ТГц (192.10 – 196.10 ТГц) разместить 41 канал (от 1528.77 нм до 1560.61 нм,  $\lambda = c/f$  [нм/Гц], шаг по  $\lambda = 0.78 \dots 0.80$  нм). Затем стандарт был доработан, и шаг уменьшен до 50 ГГц, что позволило разместить максимально 81 канал.

Весь стандартный диапазон  $\Delta_{\text{ст}}$  был поделен на два поддиапазона:

S – Short Band – короткие волны,

L – Long Band – длинные волны.

Выбор того или иного поддиапазона диктуется достижимой в нем неравномерностью АВХ. Например, для оптического усилителя типа EDFA более предпочтителен поддиапазон L.

Было предложено дальнейшее уменьшение стандартного шага несущих до 25 ГГц (161 несущая с шагом  $\sim 0.2$  нм) и даже до 12.5 ГГц (321 несущая с шагом  $\sim 0.1$  нм).

### **2.4.2. Расширенный частотный план**

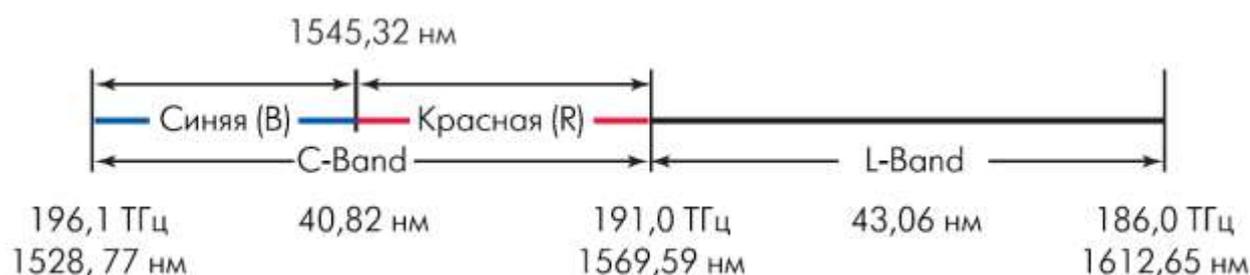


Рис. 2.7.

Расширение числа каналов систем DWDM можно достичь экстенсивным путем, основанном на расширении стандартного диапазона  $\Delta_{ст}$  вправо, до 1612.65 нм от первоначально используемого, что позволяет довести  $\Delta_{ст}$  до 10.2 ТГц (84 нм) за счет использования четвертого окна прозрачности (~1600 нм).

Дальнейшее расширение используемой полосы частот возможно только влево от 196.1 ТГц в область так называемого пятого окна прозрачности, что бы использовать всю доступную полосу 1270 – 1610 нм (340 нм).

### 2.4.3. Классификация систем WDM

- Разреженная WDM – CWDM – системы с шагом по длине волны 20 нм, работающие в полосе 1270 – 1610 нм.
- Обычные WDM – WDM системы с шагом несущих по частоте более 200 ГГц, позволяющие мультиплексировать не более 16 каналов.
- Плотные WDM – DWDM – системы с шагом несущих по частоте от 200 до 50 ГГц.
- Высокоплотные WDM – HDWDM – системы с шагом по частоте менее 50 ГГц (25 и 12.5 ГГц).

## 2.5. Контрольные вопросы

1. Перечислите основные элементы ВОСП. Каковы их функции?
2. Какие методы уплотнения каналов применяются?
3. В каком диапазоне частот работают ВОСП? Что такое «окно прозрачности»?
4. Чем обусловлено затухание света в волокне в диапазоне 1383 нм?
5. Какие существуют способы повышения пропускной способности ОЛС?
6. В чем состоит метод модуляции по полярности?
7. Что такое «стандартный частотный план»?
8. Что такое «расширенный частотный план»?
9. В каком диапазоне лежит пятое окно прозрачности?
10. Какие типы WDM систем существуют?

## РАЗДЕЛ 3. ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ СВЯЗИ

---

### 3.1. Уравнения Максвелла. Волновое и параболическое уравнения

Электромагнитное поле в классической электродинамике определяется совокупностью векторов напряженности электрического поля  $\mathbf{E}$ , магнитного поля  $\mathbf{H}$  и векторов электрической  $\mathbf{D}$  и магнитной  $\mathbf{B}$  индукций. Эти векторы являются непрерывными функциями пространства и времени в пределах заданной непрерывной среды. Они подчиняются уравнениям Максвелла:

$$\operatorname{rot}\mathbf{H} - \frac{\partial\mathbf{D}}{\partial t} = 0, \quad (3.1)$$

$$\operatorname{rot}\mathbf{E} + \frac{\partial\mathbf{B}}{\partial t} = 0, \quad (3.2)$$

$$\operatorname{div}\mathbf{D} = 0, \quad (3.3)$$

$$\operatorname{div}\mathbf{B} = 0. \quad (3.4)$$

Предполагается, что в рассматриваемом пространстве отсутствуют токи и заряды. Для оптического диапазона волн это предположение всегда остается в силе, а уравнения (3.1) – (3.4) достаточно полно описывают все явления физической оптики.

Система уравнений (3.1) – (3.4) должна быть дополнена материальными уравнениями связи между векторами напряженности  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{H}$  и векторами индукции  $\mathbf{D}$ ,  $\mathbf{B}$ . Эта связь определяется свойствами среды и может быть достаточно сложной. Только в вакууме векторы  $\mathbf{D}$ ,  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{H}$  соответственно пропорциональны

$$\mathbf{D} = \varepsilon^{(0)}\mathbf{E}, \quad (3.5)$$

$$\mathbf{B} = \mu^{(0)} \mathbf{H}, \quad (3.6)$$

где  $\epsilon^{(0)}$ ,  $\mu^{(0)}$  – диэлектрическая и магнитная проницаемости вакуума. Для гармонических волн в линейной изотропной среде также сохраняется простая пропорциональность этих векторов:

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}, \quad (3.7)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}. \quad (3.8)$$

Коэффициенты пропорциональности  $\epsilon$ ,  $\mu$  – диэлектрическая и магнитная проницаемость среды.

Если линейная среда анизотропная, то можно оставить связь между векторами в виде (3.7), (3.8), но величины  $\epsilon$ ,  $\mu$  – тензоры второго ранга. В этом случае каждая компонента вектора  $\mathbf{D}$  представляется линейной комбинацией компонент вектора  $\mathbf{E}$  (и наоборот):

$$\begin{aligned} D_x &= \epsilon_{11} E_x + \epsilon_{12} E_y + \epsilon_{13} E_z, \\ D_y &= \epsilon_{21} E_x + \epsilon_{22} E_y + \epsilon_{23} E_z, \\ D_z &= \epsilon_{31} E_x + \epsilon_{32} E_y + \epsilon_{33} E_z. \end{aligned} \quad (3.9)$$

В магнитных средах аналогичное соотношение имеет место и для векторов  $\mathbf{B}$  и  $\mathbf{H}$ . В немагнитных средах, которые обычно рассматриваются в оптике, величина  $\mu$  совпадает с магнитной проницаемостью вакуума.

Если имеется поглощение или усиление света в среде, то это учитывается в макроскопической электродинамике ведением комплексной диэлектрической проницаемости  $\hat{\epsilon} = \epsilon - i\sigma$ , в которой мнимая часть  $\sigma$  определяется величиной коэффициента поглощения (усиления).

Если диэлектрическая проницаемость среды  $\epsilon$  остается неизменной в пределах какого-либо объема, то такую среду называют однородной. В неоднородных средах  $\epsilon$  является функцией координат. На границах однородных тел диэлектрическая проницаемость скачкообразно изменяется. Поскольку электромагнитное поле зависит от среды, то и его векторы также претерпевают резкие изменения на поверхностях раздела разных сред. Соотношения между векторами поля двух граничных сред называются граничными условиями. В простейших случаях они имеют вид

$$D_n^I = D_n^{II}, \quad (3.10)$$

$$B_n^I = B_n^{II}, \quad (3.11)$$

$$E_\tau^I = E_\tau^{II}, \quad (3.12)$$

$$H_{\tau}^I = H_{\tau}^{II}, \quad (3.13)$$

Здесь индекс  $n$  означает нормальную составляющую, а  $\tau$  – тангенциальную. Поскольку в оптическом диапазоне магнитная проницаемость любой среды  $\mu = \mu^{(0)}$ , то для магнитных векторов граничные условия можно записать в виде

$$\mathbf{H}^I = \mathbf{H}^{II}, \quad \mathbf{B}^I = \mathbf{B}^{II} \quad (3.14)$$

Поток энергии электромагнитного поля определяется вектором Умова-Пойнтинга

$$\mathbf{S} = [\mathbf{E}\mathbf{H}], \quad (3.15)$$

где квадратная скобка означает векторное произведение векторов  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$ . Средний по времени поток энергии гармонических волн записывается в виде

$$\bar{\mathbf{S}} = \frac{1}{2} \mathbf{E}\mathbf{H}^*, \quad (3.16)$$

Звездочка означает комплексно сопряженную величину.

При исследовании распространения электромагнитных волн часто удобнее использовать не уравнения Максвелла в форме (3.1) – (3.4), а уравнения, которые следуют из них. Например, для гармонических волн в однородной изотропной среде получаем уравнение

$$\Delta \mathbf{E} + k^2 \mathbf{E} = 0, \quad (3.17)$$

где  $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$  – оператор Лапласа;  $k^2 = \omega^2 \mu \epsilon$ ;  $\omega$  – циклическая частота гармонических колебаний. Такое же уравнение справедливо для всех векторов поля. Это уравнение поля называется волновым уравнением гармонического поля.

При рассмотрении электромагнитных волн в неоднородных изотропных средах векторы  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$  подчиняются следующим уравнениям:

$$\Delta E + k^2 E + \text{grad} \left( \frac{1}{\epsilon} \text{grad} \cdot \mathbf{E} \right) = 0, \quad (3.18)$$

$$\Delta \mathbf{H} + k^2 \mathbf{H} - \frac{1}{\epsilon} \text{grad} \text{rot} \mathbf{H} = 0. \quad (3.19)$$

Если неоднородность среды невелика, так что на расстояниях порядка длины волны диэлектрическая проницаемость практически не изменяется, то можно пренебречь последними членами в уравнениях (3.18), (3.19). В этом случае приближенно получаем, что любые компоненты векторов электромагнитного поля удовлетворяют уравнениям вида (3.17).

Для анизотропных сред волновые уравнения можно получить следующим образом. Уравнения (3.1) и (3.2) перепишем в виде

$$\operatorname{rot}\mathbf{H} = \epsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}, \operatorname{rot}\mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}. \quad (3.20)$$

Подействуем на первое из них сначала тензором  $\epsilon^{-1}$  (обратным тензору  $\epsilon$ ), а затем оператором  $\operatorname{rot}$ . В результате получим

$$\operatorname{rote}^{-1} \operatorname{rot}\mathbf{H} = \operatorname{rot} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}.$$

Меня теперь местами операторы дифференцирования по времени и пространству и используя второе уравнение (3.20), получаем

$$\operatorname{rote}^{-1} \operatorname{rot}\mathbf{H} = -\mu \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2}. \quad (3.21)$$

Для гармонических волн уравнение (3.21) примет вид

$$\operatorname{rote}^{-1} \operatorname{rot}\mathbf{H} - \mu \omega^2 \mathbf{H} = 0. \quad (3.22)$$

Аналогичным образом находятся уравнения для векторов  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{D}$  и  $\mathbf{B}$ :

$$\epsilon^{-1} \operatorname{rot}\operatorname{rot}\mathbf{E} - \mu \omega^2 \mathbf{E} = 0, \quad (3.23)$$

$$\operatorname{rot}\operatorname{rote}^{-1} \mathbf{D} - \mu \omega^2 \mathbf{D} = 0, \quad (3.24)$$

$$\operatorname{rote}^{-1} \operatorname{rot}\mathbf{B} - \mu \omega^2 \mathbf{B} = 0. \quad (3.25)$$

Волновые уравнения описывают электромагнитные поля во всех точках пространства. В узких, например лазерных, пучках поле сконцентрировано около продольной оси пучка и быстро спадает до нуля в поперечных направлениях. Вследствие дифракции такой пучок может медленно расширяться по мере распространения в свободном пространстве. Если же среда неоднородна в поперечной плоскости, то дифракционное расхождение пучка может компенсироваться сжатием его за счет неоднородности.

Математическое описание узких световых пучков можно проводить с помощью уравнений более простых, чем волновые.

Предположим, что монохроматическое поле распространяется в направлении оси  $oz$ , а его энергия быстро убывает в поперечном направлении. В этом случае электромагнитное поле (любая из компонент его векторов) может быть записано в виде

$$u = \varphi(x, y, z) \exp(-ikz), \quad (3.26)$$

где  $\varphi$  – медленно изменяющаяся с ростом  $z$  комплексная функция. Подставляя (3.26) в (3.17) и пренебрегая членом  $\frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2}$  по сравнению с  $k \frac{\partial \varphi}{\partial z}$  и другими членами, приближенно находим следующее уравнение:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} - 2ik \frac{\partial \varphi}{\partial z} = 0, \quad (3.27)$$

которое является параболическим и широко используется в теории гауссовых (лазерных) пучков света.

### 3.2. Плоские волны

Уравнения Максвелла имеют решения в виде распространяющихся волн. Простейшими и наиболее важными из них являются плоские электромагнитные волны

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 \exp(i\mathbf{k}\mathbf{r} - i\omega t), \quad \mathbf{H} = \mathbf{H}_0 \exp(i\mathbf{k}\mathbf{r} - i\omega t). \quad (3.28)$$

Здесь  $\mathbf{k}$  – волновой вектор;  $\mathbf{r}$  – радиус-вектор рассматриваемой точки пространства;  $\omega$  – круговая частота. В изотропных средах волновой вектор  $\mathbf{k}$  и частота  $\omega$

$$\mathbf{k}^2 = \omega^2 \mu \epsilon, \quad (3.29)$$

которое называется дисперсионным.

Подставляя (3.28) в уравнения Максвелла (3.1), (3.2), получаем

$$\omega \mathbf{D} = -[\mathbf{k}\mathbf{H}], \quad \omega \mathbf{B} = -[\mathbf{k}\mathbf{E}]. \quad (3.30)$$

Эти соотношения иногда называют уравнениями Максвелла для плоских волн. Из них очевидна поперечность электромагнитных волн.

Если среда, в которой распространяются волны, прозрачная, то волновой вектор  $\mathbf{k}$  в соответствии с (3.29) вещественен, и его можно записать в виде

$$\mathbf{k}=k\mathbf{n}, \quad (3.31)$$

где  $k=2\pi/\lambda=\omega/v$  – волновое число;  $v$  – фазовая скорость плоских волн;  $\lambda$  – длина волны в среде;  $\mathbf{n}$  – единичный вектор волновой нормали. Если имеется поглощение или усиление волн, то диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  должна быть комплексной величиной и, следовательно, вектор  $\mathbf{k}$  тоже будет комплексным:

$$\mathbf{k}=\mathbf{k}_1+i\mathbf{k}_2. \quad (3.32)$$

При этом вектор  $\mathbf{k}_1$  играет роль волнового вектора, определяющего направление и скорость распространения фазового фронта волны, а вектор  $\mathbf{k}_2$  характеризует затухание (усиление) и направление максимального изменения амплитуды волн. В общем случае векторы  $\mathbf{k}_1$  и  $\mathbf{k}_2$  могут быть не параллельны между собой, и тогда плоскости равных фаз ( $\mathbf{k}_1\mathbf{r}=\text{const}$ ) не параллельны плоскостям равных амплитуд ( $\mathbf{k}_2\mathbf{r}=\text{const}$ ). Такие волны называются неоднородными волнами. Если же случится, что векторы  $\mathbf{k}_1$  и  $\mathbf{k}_2$  параллельны между собой, то волны называются однородными затухающими. Неоднородные волны могут существовать и в прозрачных средах при полном отражении волн на границах раздела сред. Поскольку именно полное отражение лежит в основе локализации энергии в диэлектрических волноводах, то в следующей лекции это явление, а также свойства неоднородных волн, будут подробно рассмотрены.

*Поляризация* электромагнитных волн определяется видом кривой, которую описывает конец электрического вектора  $\mathbf{E}$  в произвольной точке пространства при распространении через нее волны. Для описания поляризации используется несколько методов, в том числе инвариантных. Однако, для применения в оптических волноводах лучше подходит следующий достаточно простой способ. Совместим ось  $oz$  с направлением распространения плоской волны и рассмотрим вид кривой, описываемой концом вектора  $\mathbf{E}$  в поперечной плоскости  $(x, y)$ . Эта кривая определяется точками, координаты которых равны:

$$\begin{aligned} x=E_x &= a \cos(kz - \omega t + \alpha), \\ y=E_y &= b \cos(kz - \omega t + \beta), \\ z=E_z &= 0. \end{aligned} \quad (3.33)$$

Здесь  $a=E_{0x}$ ;  $b=E_{0y}$ ;  $\alpha, \beta$  – начальные фазы. Из (3.33) следует уравнение

$$\frac{x^2}{a^2} - 2 \frac{xy}{ab} \cos \delta - \frac{y^2}{b^2} = \sin^2 \delta, \quad (3.34)$$

где  $\delta = \beta - \alpha$ . Соотношение (3.34) есть уравнение эллипса, вписанного в

прямоугольник со сторонами, параллельными осям  $ox$ ,  $oy$  и равными  $2a$ ,  $2b$ . Координаты точек касания эллипсом сторон прямоугольника равны  $(\pm a, \pm b \cos \delta)$  и  $(\pm a \cos \delta, \pm b)$ . Главные оси эллипса повернуты относительно осей  $ox$ ,  $oy$  на угол  $\theta$ , определяемый уравнением

$$\operatorname{tg} 2\theta = \frac{2ab}{a^2 - b^2} \cos \delta. \quad (3.35)$$

Таким образом, в общем случае волны имеют *эллиптическую* поляризацию. При  $a = b$  и  $\delta = m\pi/2$ ,  $m = \pm 1, \pm 3, \dots$ , эллипс вырождается в окружность. Но обычно, когда говорят, что свет поляризован, имеют в виду *линейную* поляризацию. Она имеет место при  $\delta = \pm m\pi$ , где  $m$  – любое целое число.

Запишем основные законы отражения и преломления электромагнитных волн на поверхности раздела сред. Все величины, характеризующие падающую плоскую волну, будем писать с индексом  $i$ , отраженную – с индексом  $r$ , а преломленную –  $t$ . Пусть плоскость раздела совпадает с плоскостью  $z=0$ .

Из граничных условий (3.10) – (3.13), которые удовлетворяются во всех точках поверхности раздела сред и в любой момент времени, с учетом (3.32) получаем

$$(\mathbf{k}^i \mathbf{r})_{z=0} = (\mathbf{k}^r \mathbf{r})_{z=0} = (\mathbf{k}^t \mathbf{r})_{z=0} \quad (3.36)$$

или

$$k_x^i = k_x^r = k_x^t, \quad (3.37)$$

$$k_y^i = k_y^r = k_y^t. \quad (3.38)$$

Выберем в качестве плоскости падения плоскость  $(xz)$ . Тогда  $k_y^i = k_y^r = k_y^t = 0$ . Из (3.37) находим известные законы отражения и преломления:

$$k^i \sin i_0 = k^r \sin r = k^t \sin t, \quad (3.39)$$

где  $i_0$  – угол падения;  $r$  – угол отражения;  $t$  – угол преломления. Если среда изотропная и однородная, то  $k^i = k^r$  и  $r = i_0$ , а углы падения и преломления подчиняются соотношению Снеллиуса

$$\sin i_0 / \sin t = n'/n, \quad (3.40)$$

где  $n$  – показатель преломления среды при  $z > 0$ , а  $n'$  – при  $z < 0$ .

*Формулы Френеля*, определяющие поляризационные и энергетические характеристики отраженных и преломленных волн, можно получить следующим образом. На основании (3.10) – (3.14) граничные условия для

векторов  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$  запишем в виде

$$[\mathbf{E}^i + \mathbf{E}^r - \mathbf{E}^t, \mathbf{q}] = 0, \quad (3.41)$$

$$\mathbf{H}^i + \mathbf{H}^r - \mathbf{H}^t = 0. \quad (3.42)$$

Здесь  $\mathbf{q}$  – нормаль к поверхности раздела сред, а прямые скобки означают векторное произведение. Уравнения (3.26) перепишем в форме

$$\mathbf{E} = -\sqrt{\frac{M}{\epsilon}} \mathbf{n} \nabla \mathbf{H}, \quad (3.43)$$

$$\mathbf{H} = \sqrt{\frac{\epsilon}{M}} \mathbf{n} \nabla \mathbf{E}, \quad (3.44)$$

Умножая векторно (3.41), (3.42) на  $\mathbf{q}$  и используя (3.44), получаем

$$\mathbf{E}^i + \mathbf{E}^r - \mathbf{E}^t - \mathbf{q} (\mathbf{qE}^i + \mathbf{qE}^r - \mathbf{qE}^t) = 0, \quad (3.45)$$

$$n(\mathbf{n}^i \cdot \mathbf{qE}^i - \mathbf{E}^i \cdot \mathbf{qn}^i) + n(\mathbf{n}^r \cdot \mathbf{qE}^r - \mathbf{E}^r \cdot \mathbf{qn}^r) - \\ - n^r(\mathbf{n}^t \cdot \mathbf{qE}^t - \mathbf{E}^t \cdot \mathbf{qn}^t) = 0, \quad (3.46)$$

где  $\mathbf{n}^i$ ,  $\mathbf{n}^r$ ,  $\mathbf{n}^t$  – волновые нормали соответственно падающей, отраженной и преломленной волн.

Уравнения (3.45), (3.46) дают возможность определить векторы  $\mathbf{E}^r$  и  $\mathbf{E}^t$  через заданный вектор напряженности электрического поля падающей волны  $\mathbf{E}^i$ . Но удобней, используя линейность уравнений Максвелла, произвольную падающую волну разбить на две линейно поляризованные волны с векторами  $\mathbf{E}$ , перпендикулярными и параллельными плоскости падения.

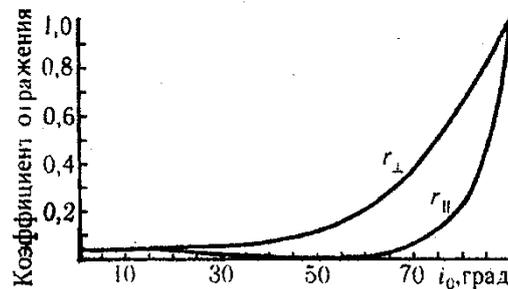


Рис. 3.1. Коэффициенты отражения по интенсивности двух типов волн в зависимости от угла падения  $i_0$  ( $n = 1, n' = 1.5$ )

Если вектор  $\mathbf{E}^i$  перпендикулярен плоскости падения, то  $\mathbf{E}^i \mathbf{q} = 0$ . В изотропных средах отсюда следует и равенства  $\mathbf{E}^r \mathbf{q} = 0$ ,  $\mathbf{E}^t \mathbf{q} = 0$ . При этом из (3.45), (3.46) получаем

$$\mathbf{E}^i + \mathbf{E}^r - \mathbf{E}^t = 0, \quad (3.47)$$

$$n \cos i_0 \mathbf{E}^i - n \cos r \mathbf{E}^r - n' \cos t \mathbf{E}^t = 0.$$

Из этих уравнений окончательно находим

$$\mathbf{E}^t = \frac{2n \cos i_0}{n \cos i_0 + \sqrt{n'^2 - n^2 \sin^2 i_0}} \mathbf{E}^i, \quad (3.48)$$

$$\mathbf{E}^r = \frac{n \cos i_0 - \sqrt{n'^2 - n^2 \sin^2 i_0}}{n \cos i_0 + \sqrt{n'^2 - n^2 \sin^2 i_0}} \mathbf{E}^i. \quad (3.49)$$

Если вектор  $\mathbf{E}$  параллелен плоскости падения, то вектор  $\mathbf{H}$  перпендикулярен ей. В этом случае удобнее граничные условия выписать относительно вектора  $\mathbf{H}$  и решать задачу аналогично изложенному выше. В результате получаем

$$\mathbf{H}^t = \frac{2n' \cos i_0}{n'^2 \cos i_0 + n \sqrt{n'^2 - n^2 \sin^2 i_0}} \mathbf{H}^i, \quad (3.50)$$

$$\mathbf{H}^r = \frac{n'^2 \cos i_0 - n \sqrt{n'^2 - n^2 \sin^2 i_0}}{n'^2 \cos i_0 + n \sqrt{n'^2 - n^2 \sin^2 i_0}} \mathbf{H}^i. \quad (3.51)$$

Соотношения (3.48) – (3.51) называются формулами Френеля.

Коэффициенты отражения волн по интенсивности определяются через отношение квадратов векторов  $\mathbf{E}$  или  $\mathbf{H}$  отраженных и падающих волн. Из формул (3.49) и (3.51) легко убедиться, что коэффициент отражения  $r_{\perp}$  (когда  $E = E_{\perp}$ ) никогда не обращается в ноль, тогда как  $r_{\parallel} = 0$  при условии Брюстера  $\operatorname{tg} i_0 = n'/n$ . Графики коэффициентов отражения приведены на рис. 3.1.

### 3.3. Контрольные вопросы

1. Чем определяется электромагнитное поле в классической электродинамике?
2. Что описывают уравнения Максвелла?
3. Какую среду называют однородной?
4. Что такое граничные условия?
5. Что определяет вектор Умова-Пойнтинга?
6. Какую среду называют анизотропной?
7. Чем определяется поляризация электромагнитных волн?
8. Какую поляризацию имеет поляризованная волна?

9. Что определяют формулы Френеля?

## РАЗДЕЛ 4. ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ СВЯЗИ

---

### 4.1. Полное отражение

Из формул Френеля можно убедиться, что при падении света из более плотной среды в менее плотную ( $n' < n$ ) коэффициент отражения стремится к единице не при  $i_0 = 90^\circ$ , а при меньших углах. В этом случае наблюдается явление полного отражения света. Оно имеет место при углах падения, удовлетворяющих условию

$$\frac{n}{n'} \sin i_0 \geq 1. \quad (4.1)$$

Явление полного отражения играет основную роль в локализации энергии электромагнитных волн в диэлектрических волноводах. Поэтому рассмотрим его подробнее.

Формулы Френеля (3.48) – (3.51) справедливы для любых сред и углов падения света. При углах падения, больших предельного

$$i_{\text{пр}} = \arcsin \frac{n'}{n}, \quad (4.2)$$

Угол преломления становится комплексным, а косинус его мнимым:

$$\cos t = \pm i \sqrt{\frac{n^2}{n'^2} \sin^2 i_0 - 1}. \quad (4.3)$$

В соответствии с выражением (4.1) это приводит к появлению а преломленных волнах затухающего множителя и скачка фазы. Действительно, фазу прошедших волн ( $z < 0$ ) можно записать в следующем виде

$$\begin{aligned} \mathbf{k}\mathbf{r} &= \psi\sqrt{\epsilon'_M} \left[ x \sin t - z \cos t \right] \\ &= \psi\sqrt{\epsilon'_M} \left( x \frac{n}{n'} \sin i_0 - iz \sqrt{\frac{n^2}{n'^2} \sin^2 i_0 - 1} \right). \end{aligned} \quad (4.4)$$

В прозрачных средах знак перед корнем в (4.3), (4.4) выбирается однозначно из физического условия затухания поля на бесконечности от границы раздела. Если же вторая менее плотная среда усиливающая, то выбор знака не совсем очевиден. Однако, как будет показано ниже, при наличии двух границ в оптических волноводах с усилением или поглощением никаких трудностей не возникает.

Подставляя (4.4) в (3.28), для электрического вектора поля преломленной волны получаем выражение

$$\begin{aligned} \mathbf{E}^t &= \mathbf{E}_0^t \exp \left[ \psi\sqrt{\epsilon'_M} \left( ix \frac{n}{n'} \sin i_0 + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + z \sqrt{\frac{n^2}{n'^2} \sin^2 i_0 - 1} \right) - i\psi t \right]. \end{aligned} \quad (4.5)$$

Отсюда следует, что преломленная волна представляет собой поверхностную волну, затухающую по  $z$  и распространяющуюся вдоль оси  $ox$ . Ее волновой вектор

$$k_x = \psi\sqrt{\epsilon'_M} \frac{n}{n'} \sin i_0 = k' \frac{n}{n'} \sin i_0 = k_0 n \sin i_0 = k_0 n_B,$$

где  $k_0 = \omega/c$  – волновое число для вакуума;  $n_B = n \sin i_0$  – показатель преломления поверхностной волны. В такой неоднородной волне плоскости равных амплитуд параллельны плоскости раздела сред  $z = 0$ , а плоскости равных фаз представляются плоскостями  $x = \text{const}$  (рис. 4.1).

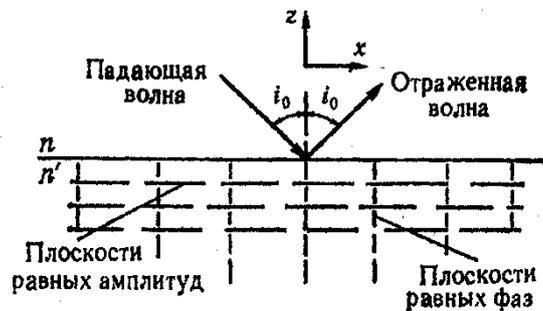


Рис. 4.1. Плоскости равных фаз и амплитуд преломленной волны при полном внутреннем отражении

Формулы Френеля для случая полного отражения можно записать таким образом

$$\mathbf{E}^t = \frac{2n \cos i_0}{n \cos i_0 + i\sqrt{n_B^2 - n'^2}} \mathbf{E}^i, \quad (4.6)$$

$$\mathbf{E}^r = \frac{n \cos i_0 - i\sqrt{n_B^2 - n'^2}}{n \cos i_0 + i\sqrt{n_B^2 - n'^2}} \mathbf{E}^i. \quad (4.7)$$

$$\mathbf{H}^t = \frac{2n'^2 \cos i_0}{n'^2 \cos i_0 + in\sqrt{n_B^2 - n'^2}} \mathbf{H}^i, \quad (4.8)$$

$$\mathbf{H}^r = \frac{n'^2 \cos i_0 - in\sqrt{n_B^2 - n'^2}}{n'^2 \cos i_0 + in\sqrt{n_B^2 - n'^2}} \mathbf{H}^i. \quad (4.9)$$

Из (4.7) и (4.9) следует, что

$$\mathbf{E}^r/\mathbf{E}^t = \rho_1 e^{-2i\delta_1}, \quad (4.10)$$

$$\mathbf{H}^r/\mathbf{H}^t = \rho_2 e^{-2i\delta_2}, \quad (4.11)$$

При этом  $\rho_1 = 1$ ,  $\rho_2 = 1$ ,

$$D_1 = \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{n_B^2 - n'^2}{n^2 - n_B^2}}, \quad (4.12)$$

$$D_2 = \operatorname{arctg} \frac{n^2}{n'^2} \sqrt{\frac{n_B^2 - n'^2}{n^2 - n_B^2}}. \quad (4.13)$$

Коэффициенты отражения, таким образом, равны единице для обеих поляризаций волн. Поэтому это явление называется полным отражением. Фаза отраженных (и преломленных) волн испытывает скачкообразное изменение. Соотношения (4.12), (4.13) и определяют скачок фаз отраженных волн. Изменение фазы отраженных волн обусловлено тем, что энергия волны не отражается у самой границы раздела сред, а проникает во вторую среду и, только описав некоторую кривую траекторию во второй среде, возвращается опять в первую среду. Отражение происходит как бы от некоторой мнимой плоскости, расположенной ниже границы раздела.

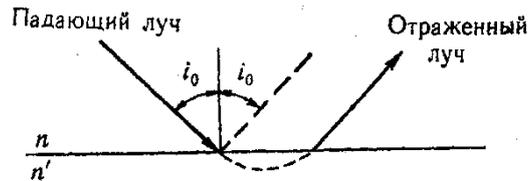


Рис. 4.2. Продольное смещение луча при полном внутреннем отражении.

Поскольку энергия ныряет во вторую среду, световой луч испытывает продольное смещение (рис. 4.2). Продольное смещение лучей при полном отражении различное для различных поляризаций. Это вызывает расщепление световых пучков при полном отражении. Явление расщепления пучка произвольной поляризации на пучки с перпендикулярной и параллельной поляризацией к плоскости падения проявляются в существующем реально разделении ТЕ и ТМ волн в диэлектрических плоских волноводах.

Наряду с общеизвестным продольным смещением световых пучков при полном отражении может существовать еще и боковое смещение, которое впервые было исследовано Ф.И.Федоровым и получило название “сдвиг Федорова”.

## 4.2. Распространение света в анизотропных и гиротропных средах

Анизотропные и гиротропные среды широко используются в оптических волноводах и элементах интегральной оптики для создания различного рода устройств управления параметрами светового сигнала (модуляторы, коммутаторы, ответвители, фильтры, поляризаторы и т.д.). В связи с этим целесообразно привести хотя бы краткие сведения об особенностях распространения света в анизотропных средах.

Для плоских монохроматических волн в анизотропных средах остаются справедливыми уравнения (3.30). Уравнения связи также остаются в прежнем виде:

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}, \mathbf{B} = \mu \mathbf{H}. \quad (4.14)$$

Здесь  $\varepsilon$  – тензор диэлектрической проницаемости. Мы не рассматриваем магнитные среды и поэтому считаем магнитную проницаемость  $\mu$  скаляром, равным проницаемости вакуума.

Тензор диэлектрической проницаемости  $\varepsilon$  для негиротропных прозрачных сред является вещественным симметричным тензором второго ранга. Такой тензор можно привести к диагональному виду

$$\mathbf{e} = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_2 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_3 \end{pmatrix}. \quad (4.15)$$

Соответствующие оси прямоугольной декартовой системы координат называются главными осями тензора диэлектрической проницаемости. Собственные значения  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  называют главными значениями тензора  $\varepsilon$ . В оптически одноосных кристаллах средних сингоний можно положить  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_o, \varepsilon_3 = \varepsilon_e$ . Это означает, что имеется только два независимых параметра. В кристаллах ромбической, моноклинной и триклинной сингоний все три главных значения различны.

Если кристаллическая среда поглощает или усиливает свет, то тензор диэлектрической проницаемости становится комплексным. Такой тензор может быть приведен к диагональному виду только для высокосимметричных кристаллов средних и ромбических сингоний, для которых имеются соответственно 4 и 6 независимых параметров. В случае кристаллов моноклинной и триклинной сингоний комплексный тензор  $\varepsilon$  иногда можно привести к диагональному виду только в комплексной системе координат.

Анизотропия среды, проявляющаяся в тензорности диэлектрической проницаемости, существенным образом влияет на свойства плоских волн в кристаллах. Из уравнения связи (4.14) следует непараллельность векторов  $\mathbf{D}$  и  $\mathbf{E}$ , а из уравнений Максвелла (3.30) – неортогональность вектора  $\mathbf{E}$  волновому вектору  $\mathbf{k}$ . Поперечными по отношению к вектору  $\mathbf{k}$  остаются только векторы  $\mathbf{D}, \mathbf{B}$  и  $\mathbf{H}$ . В отличие от изотропных сред и кубических кристаллов постоянная распространения  $k$  (или показатель преломления  $n$ ) зависит от направления распространения волн.

Соотношение, устанавливающее связь волнового числа  $k$  с волновым вектором  $\mathbf{n}$ , носит название уравнения Френеля и может быть записано в следующем виде:

$$\mathbf{n} \left( \frac{1}{k^2} - \frac{\varepsilon^{-1}}{\omega^2 \mu} \right)^{-1} \mathbf{n} = 0. \quad (4.16)$$

Здесь  $\varepsilon^{-1}$  означает тензор, обратный тензору  $\varepsilon$ . В системе главных осей тензора  $\varepsilon$  уравнение (4.16) запишется таким образом:

$$\frac{n_x^2}{\frac{1}{k^2} - \frac{1}{k_1^2}} - \frac{n_y^2}{\frac{1}{k^2} - \frac{1}{k_2^2}} - \frac{n_z^2}{\frac{1}{k^2} - \frac{1}{k_3^2}} = 0. \quad (4.16)$$

где  $k_i = \omega \sqrt{\varepsilon_i \mu}$  ( $i = 1, 2, 3, \dots$ ) – главные значения постоянной распространения;  $n_x, n_y, n_z$  – направляющие косинусы волновой нормали.

Уравнение (4.16) является биквадратным относительно показателя преломления. Из этого следует, что вдоль любого направления в кристалле (вперед и обратно) могут распространяться две волны с разными фазовыми скоростями. Каждая из этих волн характеризуется разными наборами векторов

$\mathbf{E}'$ ,  $\mathbf{D}'$ ,  $\mathbf{H}'$ ,  $\mathbf{B}'$  и  $\mathbf{E}''$ ,  $\mathbf{D}''$ ,  $\mathbf{H}''$ ,  $\mathbf{B}''$ . Эти векторы оказываются линейными и определяют, следовательно, линейную поляризацию волн в кристаллах. Можно убедиться, что между этими векторами существует следующая зависимость:

$$\mathbf{H}' \perp \mathbf{H}'', \mathbf{D}' \perp \mathbf{D}'', \mathbf{E}' \perp \mathbf{D}'', \mathbf{E}' \perp \mathbf{H}'', \mathbf{E}'' \perp \mathbf{D}', \mathbf{E}'' \perp \mathbf{H}', \mathbf{D}' \parallel \mathbf{H}'', \mathbf{D}'' \parallel \mathbf{H}',$$

где знак  $\perp$  означает перпендикулярность, а  $\parallel$  – параллельность векторов. Все анизотропные кристаллы в оптическом отношении разделяются на одноосные и двухосные.

*Одноосные кристаллы* имеют два одинаковых главных значения  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_0$ ,  $\varepsilon_3 = \varepsilon_e$  (соответственно  $k_1 = k_2 = k_0$ ,  $k_3 = k_e$  и  $n_1 = n_2 = n_0$ ,  $n_3 = n_e$ ). В этом случае из (4.16) для показателя преломления получает два уравнения:

$$n^2 = n_0^2, \quad (4.17)$$

$$n_x^2 + n_y^2 \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{n_e^2} \right) + n_z^2 \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{n_0^2} \right) = 0. \quad (4.18)$$

Уравнение (4.17) определяет показатель преломления обыкновенных волн одноосных кристаллов, а (4.18) – необыкновенных. Для обыкновенных волн, как видно, показатель преломления не зависит от направления распространения. Поэтому-то они и называются обыкновенными. Для необыкновенных волн существует зависимость показателя преломления от направления распространения. Эта зависимость может быть описана проще следующим образом. Введем радиус-вектор  $\mathbf{r} = \mathbf{nn}$ , тогда уравнение (4.18) можно записать в виде

$$\frac{x^2}{n_e^2} + \frac{y^2}{n_e^2} + \frac{z^2}{n_0^2} = 1. \quad (4.19)$$

Это уравнение эллипсоида вращения (рис. 4.3 и 4.4)

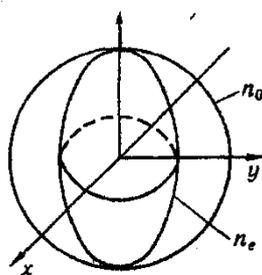


Рис. 4.3. Поверхность показателей преломления Френеля отрицательных кристаллов ( $n_e < n_0$ )

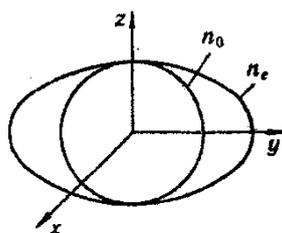


Рис. 4.4. Поверхность показателей преломления Френеля положительных кристаллов ( $n_e > n_0$ )

Из рис. 4.3 и 4.4 и уравнений (4.17), (4.19) следует, что при распространении волн вдоль оси  $oz$  ( $n_x = n_y = 0$ ) показатели преломления обыкновенной и необыкновенной волн совпадают. Такие направления в кристалле и называются оптическими осями. В кристаллах средних сингоний они обычно совпадают с осями симметрии высших порядков. Поляризация волн вдоль оптических осей может быть произвольной.

*Двухосные кристаллы* имеют различные главные значения диэлектрической проницаемости и соответственно различные главные значения показателей преломления. Предположим, что  $n_1 > n_2 > n_3$ . В этом случае геометрическое место точек концов радиуса-вектора  $\mathbf{r} = \mathbf{nn}$  образует более сложную, чем в одноосных кристаллах, двуполостную поверхность показателей преломления. Только главные сечения этой поверхности имеют вид окружностей и эллипсов (рис. 4.5).

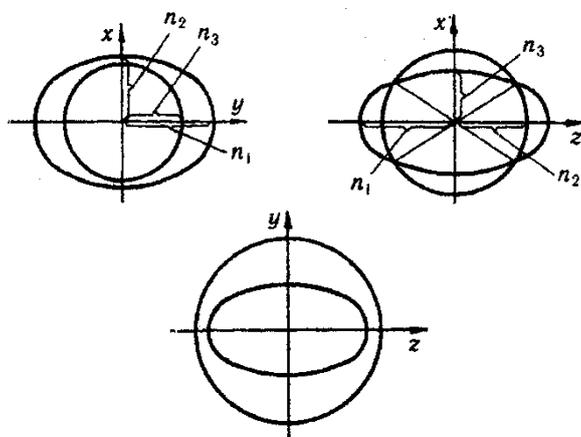


Рис. 4.5. Главные сечения двуполостной поверхности показателей преломления Френеля

Для характеристики оптических свойств кристаллов часто используют более простую однополостную поверхность показателей преломления, которую называют эллипсоидом Френеля. Чтобы построить такую поверхность, необходимо показатели преломления обеих изонормальных волн, т.е. волн, распространяющихся в некотором произвольном направлении в кристалле, откладывать не в направлении волновой нормали, как это делалось в случае двуполостной поверхности Фарадея, а в направлении векторов  $\mathbf{D}'$  и  $\mathbf{D}''$ . Уравнение такой поверхности можно записать в виде

$$\mathbf{r}\boldsymbol{\varepsilon}^{-1}\mathbf{r} = 1, \quad (4.20)$$

где  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость. В системе главных осей тензора  $\varepsilon$  имеем

$$\frac{x^2}{n_1^2} + \frac{y^2}{n_2^2} + \frac{z^2}{n_3^2} = 1. \quad (4.21)$$

Это трехосный эллипсоид. Его центральные сечения представляются эллипсами. Направления осей этих эллипсов совпадают с направлением поляризации (с направлением векторов  $\mathbf{D}'$ ,  $\mathbf{D}''$ ), а величина полуосей равна соответствующим показателям преломления  $n'$ ,  $n''$  волн, распространяющихся в направлении нормали к данному центральному сечению. Нормали к круговым сечениям совпадают с направлениями оптических осей. Их в кристаллах низших сингоний две.

Наконец, напомним, что вектор потока энергии Умова-Пойнтинга  $\mathbf{S} = [\mathbf{E}\mathbf{H}]$  не совпадает в кристаллах по направлению с волновой нормалью  $\mathbf{n}$ . Это обусловлено непараллельностью векторов  $\mathbf{D}$  и  $\mathbf{E}$  и реально проявляется в том, что узкий световой пучок в кристалле распространяется в направлении, отличном от направления волновой нормали, которое определяется законом Снеллиуса. При нормальном падении, например, узкий световой пучок может распространяться в кристалле в косом направлении.

До сих пор рассматривались негиротропные кристаллы. Но в интегральной оптике используются и гиротропные кристаллы. Поэтому кратко рассмотрим свойства таких кристаллов. Сначала поясним само понятие “гиротропия”. Чаще всего под гиротропией понимают естественную оптическую активность, заключающуюся во вращении плоскости поляризации линейно поляризованного света. Существует и вынужденное вращением плоскости поляризации под действием магнитного поля. Это явление носит название эффекта Фарадея, и именно оно используется в оптических волноводах для создания управляющих световым пучком элементов.

В случае эффекта Фарадея внешнее магнитное поле  $\mathbf{H}_0$  параллельно направлению распространения волн. Диэлектрическая проницаемость первоначально изотропных сред в этом случае может быть записана в виде

$$\boldsymbol{\varepsilon} = a + b\mathbf{n}\cdot\mathbf{n} + ic\mathbf{n}^\times, \quad (4.22)$$

где  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – скаляры;  $\mathbf{n}\cdot\mathbf{n}$  – тензор-диада;  $\mathbf{n}^\times$  – тензор, дуальный вектору волновой нормали  $\mathbf{n}$ . Если вдоль волновой нормали направить ось  $oz$  прямоугольной системы координат, то тензор (4.22) можно записать таким образом:

$$\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_0 & i\varepsilon_{12} & 0 \\ -i\varepsilon_{21} & \varepsilon_0 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_e \end{pmatrix}. \quad (4.23)$$

Для гиротропных кристаллов диэлектрическая проницаемость запишется в виде тензора

$$\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} & i\varepsilon_{12} & 0 \\ -i\varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33} \end{pmatrix}. \quad (4.23)$$

Напомним эффект Фарадея для изотропных сред. С учетом (4.22) связь между векторами  $\mathbf{D}$  и  $\mathbf{E}$  принимает форму

$$\mathbf{D} = \varepsilon\mathbf{E} = a\mathbf{E} + ic[\mathbf{n}, \mathbf{E}]. \quad (4.24)$$

Используя это уравнение и уравнения (3.30), для вектора  $\mathbf{E}$  можем получить уравнение

$$\omega a\mathbf{E} + i\omega c[\mathbf{n}, \mathbf{E}] = -\frac{1}{\omega\mu} \text{grad div} \mathbf{E} - \Delta \mathbf{E}.$$

или

$$\omega^2\mu(a\mathbf{E} + ic[\mathbf{n}, \mathbf{E}]) = k^2\mathbf{E}. \quad (4.25)$$

Из (4.25) находим, что

$$\mathbf{E} = i\frac{c}{k^2 - \omega^2\mu a} \text{grad div} \mathbf{E}. \quad (4.26)$$

Отсюда сразу следует круговая поляризация волн и двойное преломление

$$k^2 = \omega^2\mu a \pm c, \quad (4.27)$$

что и приводит к вращению плоскости поляризации.

### 4.3. Контрольные вопросы

1. Когда наблюдается явление полного отражения?
2. Что происходит при углах падения света, больших критического?
3. Что представляет собой преломленная волна?
4. Чем обусловлено изменение фазы отраженных волн?
5. Что такое «сдвиг Федорова»?
6. Как влияет анизотропия среды на распространение плоских волн в кристаллах?
7. Что такое гиротропная среда?
8. Что такое одноосные кристаллы?
9. Что такое двухосные кристаллы?

## РАЗДЕЛ 5. ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ СВЯЗИ

---

### 5.1. Гауссовы пучки света

Известно, что волноводные свойства может иметь неоднородная среда, диэлектрическая проницаемость которой неизменна в каком-либо определенном направлении (оси неоднородности) и убывает в поперечной к этому направлению плоскости. Функция этого изменения  $\varepsilon$  очень часто может быть представлена в виде  $\varepsilon = \varepsilon_0 - ar^2$ . Такие среды называют квадратичными или самофокусирующими (selfoc). Последнее название вызвано тем, что они могут самофокусировать волны. Волноведущие свойства таких сред хорошо описывают с помощью гауссовых пучков, общие свойства которых будут кратко рассмотрены ниже.

Для узких световых пучков можно использовать параболическое уравнение (лекция 3)

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} - 2ik \frac{\partial \varphi}{\partial z} = 0, \quad (5.1)$$

Простейшим решением этого уравнения является функция

$$\varphi = \exp \left[ -i \left( P + \frac{k}{2q} (x^2 + y^2) \right) \right]. \quad (5.2)$$

Здесь параметры  $P, q$  – комплексные функции продольной координаты  $z$ . Параметр  $P(z)$  определяет комплексное смещение фазы, а  $q(z)$  характеризует распределение амплитуды в поперечных плоскостях и кривизну фазовой поверхности.

Если поместить точку  $z = 0$  в том месте, где волновой пучок имеет наименьший поперечный размер  $2w_0$  и плоскую фазовую поверхность, то в

этом случае оказывается, что

$$P(z) = \ln(1 - iz/z_0), \quad (5.3)$$

$$q(z) = iz_0 + z, \quad (5.4)$$

где  $z_0 = \pi w_0^2/\lambda$ . Из (5.2) – (5.4) следует, что с увеличением продольной координаты  $z$  фазовая поверхность пучка искривляется, а поперечный размер его растет. Радиус кривизны фазовой поверхности и размер пучка представляются соответственно функциями

$$R(z) = z(1 + z_0^2/z^2), \quad (5.5)$$

$$w(z) = w_0^2(1 + z^2/z_0^2). \quad (5.6)$$

Используя эти функции и формулы (3.26), (5.2), приходим к выводу, что любая из компонент векторов электромагнитного поля узкого светового пучка может быть представлена в виде

$$u = \frac{w_0}{w} \exp \left\{ -ikz + i\Phi - i \frac{k}{2R} (x^2 + y^2) - \frac{x^2 + y^2}{w^2} \right\}, \quad (5.2)$$

где  $\Phi = \arctg \frac{z}{z_0}$ . Третий член в показателе экспоненты (5.7) дает изменение

фазового фронта, а четвертый – амплитуды пучка в сравнении с плоской волной. Второй член показывает отличие фазы пучка на оси  $oz$  от фазы плоской волны, обусловленное дифракционной расходимостью. Максимальное искривление фазовой поверхности пучков наблюдается при  $z = \pm z_0$ . В этих точках минимальный радиус кривизны  $R_{\min} = 2z_0$ . Следовательно, радиус кривизны фазовой поверхности пучка вначале уменьшается от  $R = \infty$  при  $z = 0$  до  $R_{\min} = 2z_0$  при  $z = z_0$ , а затем вновь увеличивается до  $R = \infty$  при  $z \rightarrow \infty$ . Для световых пучков, например, при  $\lambda \sim 1$  мкм и  $w_0 \sim 1$  мм минимальный радиус кривизны фазовой поверхности  $\sim 2 - 3$  м.

Как следует из (5.7), амплитуда волновых пучков в любой поперечной плоскости  $z = \text{const}$  убывает по закону Гаусса. Поэтому они и называются гауссовыми пучками. С ростом координаты  $z$  растет и гауссов параметр  $w$ , который и определяет поперечный размер пучка. Это означает, что по мере распространения в свободном пространстве гауссов пучок расширяется, а его амплитуда в центре убывает по закону  $1/w(z)$  (рис. 5.1).

Выражения (5.2), (5.7) определяют простейший тип гауссовых пучков, так называемую нулевую моду круговых пучков. Электромагнитное поле такого пучка имеет круговую симметрию и изменяется в поперечной плоскости только по закону Гаусса. Но параболическому уравнению (5.1) удовлетворяют и пучки

с более сложным поперечным разделением энергии. Это так называемые пучки Эрмита – Гаусса, для которых

$$\varphi = H_m \left( \frac{\sqrt{2}x}{w} \right) H_n \left( \frac{\sqrt{2}y}{w} \right) \exp \left\{ -ikz - i \frac{k(x^2 + y^2)}{2R} - \frac{x^2 + y^2}{w^2} + i \left[ m + n + n \arctg \frac{z}{z_0} \right] \right\}, \quad (5.8)$$

Здесь  $H_m, H_n$  – функции Эрмита.

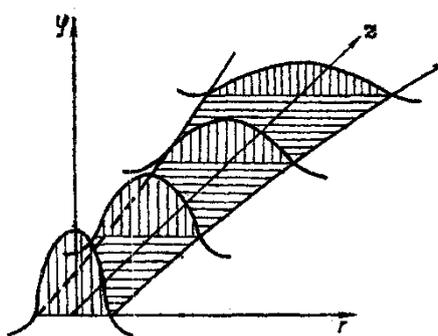


Рис. 5.1. Изменение распределения амплитуды основного гауссова пучка с глубиной проникновения его в среду

Однако и пучки Эрмита – Гаусса представляют собой сравнительно простой вид световых пучков, в которых пространственная форма и фазовая поверхность являются поверхностями вращения. Такие пучки формируются, например, лазерами, резонаторы которых образованы сферическими зеркалами и которые не содержат элементов, нарушающих круговую симметрию. Однако на практике используются излучательные или передающие световой пучок системы, у которых отсутствует симметрия вращения. Это связано с астигматичностью зеркал резонаторов или линз лучеводов, с неизбежной необходимостью применения различных несимметричных элементов. В таких случаях световые пучки имеют в поперечнике эллиптическую форму.

В простейшем случае эллиптичность пучков может быть учтена, если искать решение параболического уравнения (5.1) в форме

$$\varphi = \exp \left[ -i \left( \frac{kx^2}{2q_x} + \frac{ky^2}{2q_y} + P \right) \right]. \quad (5.9)$$

Поперечные сечения таких гауссовых пучков представляются эллипсами, а фазовая поверхность их может быть весьма сложной. Основное отличие фазовой поверхности эллиптических пучков от фазовой поверхности круговых пучков заключается в ее астигматичности. При этом главные радиусы кривизны могут иметь как одинаковые знаки, так и разные. Это означает, что фазовая

поверхность может быть как выпуклой, так и седлообразной.

Если излучательная система или среда, в которой распространяется световой пучок, не имеют даже плоскостей симметрии, то в таких случаях формируются гауссовы вращающиеся пучки. В этих пучках эллипсы поперечного сечения. В этих пучках эллипсы поперечного сечения пространственной формы и фазовая поверхность вращаются по мере распространения пучка. Если вращающийся пучок формируется в лазере, то он продолжает вращаться и в свободном пространстве.

## 5.2. Волновые пакеты и групповая скорость

До сих пор рассматривались решения уравнений Максвелла в виде плоских монохроматических волн с заданными частотой и волновым вектором. В действительности таких идеальных волн нет. Любой реальный источник испускает волны в некотором интервале частот и углов. Немонохроматичность световых волн вызывается многими причинами, но важнейшими из них и всегда существующими являются конечность излучаемого импульса во времени и собственная ширина линии излучения источника. В силу линейности уравнений Максвелла любой реальный импульс можно получить суперпозицией плоских монохроматических волн. Однако при этом необходимо учитывать различие фазовых скоростей отдельных волн и возможное различное их затухание. Как известно, это различие параметров плоских волн, образующих импульс, приводит к искажению передаваемых в реальных системах импульсов.

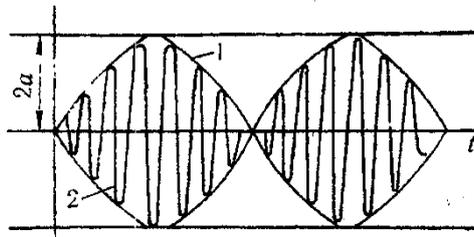


Рис. 5.2. Амплитуда волнового пакета в зависимости от времени:

1 – огибающая с частотой  $(\omega_1 - \omega_2)/2 = \Omega$ ;

2 – колебания с частотой  $(\omega_1 + \omega_2)/2 = \omega$

Рассмотрим, например, волновой пакет из двух волн с одинаковыми амплитудами, но разными частотами:

$$u_1 = a \cos(\omega_1 t - k_1 x), u_2 = a \cos(\omega_2 t - k_2 x). \quad (5.10)$$

В сумме эти волны образуют волну

$$u = 2a \cos\left(\Omega t - \frac{k_1 - k_2}{2} x\right) \cos\left(\omega t - \frac{k_1 + k_2}{2} x\right). \quad (5.11)$$

Частота колебаний  $\omega = (\omega_1 + \omega_2)/2$  этой волны близка к частотам  $\omega_1, \omega_2$ , которые мы предполагаем близкими по величине. Амплитуда суммарной волны оказывается модулированной (изменяющейся) во времени с частотой  $\Omega = (\omega_1 - \omega_2)/2$  и в пространстве с волновым вектором  $k = (k_1 - k_2)/2$  (рис. 5.2).

Скорость перемещения этого пакета волн

$$v_{\text{гр}} = \Omega/k = (\omega_1 - \omega_2)/(k_1 - k_2). \quad (5.12)$$

Групповая скорость  $v_{\text{гр}}$  есть скорость перемещения максимума амплитуды суммарной волны, т.е. это скорость переноса энергии. Если фазовые скорости обеих волн одинаковы и равны  $v$ , то  $\omega_1 = vk_1, \omega_2 = vk_2$  и  $v_{\text{гр}} = v$ . В таком случае суммарный пакет волн распространяется тоже со скоростью  $v$  без искажения. Если же фазовые скорости отдельных волн разные ( $\omega_1/k_1 \neq \omega_2/k_2$ ), то групповая скорость пакета  $v_{\text{гр}} = \Omega/k = \Delta\omega/\Delta k$ , или, точнее,

$$v_{\text{гр}} = \frac{d\omega}{dk} = \frac{d(v\lambda)}{d\lambda} = v + \lambda \frac{dv}{d\lambda}. \quad (5.13)$$

В этом случае суммарный пакет волн уже не сохраняется неизменным. Среда, в которой фазовая скорость зависит от частоты, называется диспергирующей. Обычно  $dv/d\lambda > 0$  и  $v_{\text{гр}} < v$ . Это нормальная дисперсия. Если же  $dv/d\lambda < 0$  и  $v_{\text{гр}} > v$ , то имеется аномальная дисперсия.

Когда же волновой пакет образован  $N$  волнами, частоты которых различаются на  $\delta\omega$ , а амплитуды одинаковы, суммарное колебание в точке  $x = 0$  представляется в виде

$$u = a \cos(\omega_0 t) + a \cos(\omega_0 + \delta\omega)t + \\ + a \cos(\omega_0 + 2\delta\omega)t + \dots + a \cos(\omega_0 + N\delta\omega)t. \quad (5.14)$$

Частотный спектр этого пакета приведен на рис. 5.3, а. Сумма (5.14) равна:

$$u = a \frac{\sin N\delta\omega t/2}{\sin \delta\omega t/2} \cos \omega t, \quad (5.15)$$

где  $\omega = \omega_0 + \frac{1}{2}N\delta\omega$ . Частотная ширина импульса  $\Delta\omega = N\delta\omega$ , отсюда  $\delta\omega = \Delta\omega/N$ .

При достаточно больших  $N$  и конечных интервалах времени можно положить  $\delta\omega t = \Delta\omega t/N \ll 1$ . При этом

$$u = Na \frac{\sin \Delta\omega t/2}{\Delta\omega t/2} \cos \omega t, \quad (5.16)$$

или

$$u = A \frac{\sin \alpha}{\alpha} \cos \omega t, \quad (5.17)$$

где  $A = Na$ ;  $\alpha = \Delta\omega t/2$ .

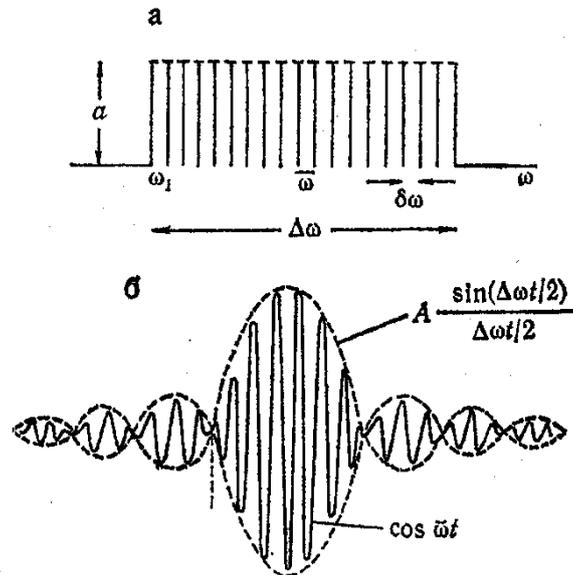


Рис. 5.3. Прямоугольный волновой импульс с частотной шириной  $\Delta\omega$ , состоящий из  $N$  гармоник с одинаковой амплитудой  $a$  (а), и представление этого импульса на временной оси (б)

Из (5.14) заключить, что фактически  $\alpha$  есть разность фаз между первой и последней частотными компонентами в момент времени  $t$ . При  $t=0$  все составляющие пакета имеют одинаковую фазу и дают в сумме максимальную амплитуду  $A = Na$ . Через интервал времени  $\Delta t$ , когда разность фаз между первой и последней частотными компонентами достигает значения

$$\alpha = \Delta\omega\Delta t/2 = \pi, \quad (5.18)$$

суммарная амплитуда обратиться в ноль. Следовательно, интервал  $\Delta t$ , определяемый соотношением (5.18), можно принять за длительность импульса во времени (рис. 5.3, б). Точнее говоря, длительность импульса равна  $2\Delta t$ , а если ее определять не по нулю, что не всегда возможно, а по некоторому уровню, то равенство (5.18) нужно заменить приближенным соотношением

$$\Delta\omega\Delta t \approx 2\pi \text{ или } \Delta\nu\Delta t \approx 1. \quad (5.19)$$

Соотношение (5.19) иногда называют теоремой о ширине частотной полосы. Она гласит, что сумма компонент колебаний с частотной шириной  $\Delta\nu$  образует импульс длительностью  $\Delta t$ , в последующие моменты времени импульс

затухает из-за случайных фаз составляющих его компонент. Иначе можно сказать, что одиночный импульс длительностью  $\Delta t$  получается в результате сложения постоянно существующих монохроматических компонент, частоты которых составляют интервал  $\Delta\nu$ . Здесь даже уместно такое соображение. В том месте, где реально фиксируется одиночный импульс длительностью  $\Delta t$ , при наличии идеальных приемников, способных фиксировать отдельные монохроматические волны, мы должны были бы все время наблюдать такие волны. Но таких приемников нет, и реально мы фиксируем только конечные во времени импульсы. При этом чем короче мы хотим иметь импульс, тем шире должно быть  $\Delta\nu$  и наоборот. Для монохроматической волны  $\Delta\nu = 0$ ,  $\Delta t = \infty$ .

Аналогичным образом для пространственной длительности импульса получаем соотношение

$$\Delta x \Delta k \approx 2\pi. \quad (5.20)$$

Если же волновой пакет образуется суперпозицией компонент с разными амплитудами, то суммирование производится методом Фурье.

### 5.3. Контрольные вопросы

1. Какие среды называют самофокусирующими?
2. Какие особенности распространения гауссова пучка в пространстве?
3. Что представляют собой пучки Эрмита-Гаусса?
4. Что такое волновой пакет?
5. Что такое групповая скорость?
6. Какая среда называется диспергирующей?
7. В чем заключается теорема о ширине частотной полосы?
8. Что такое пространственная длительность импульса?

## РАЗДЕЛ 6. ОПТИЧЕСКИЕ ВОЛНОВОДНЫЕ МОДЫ

---

### 6.1. Теоретическое описание мод в трехслойном планарном волноводе

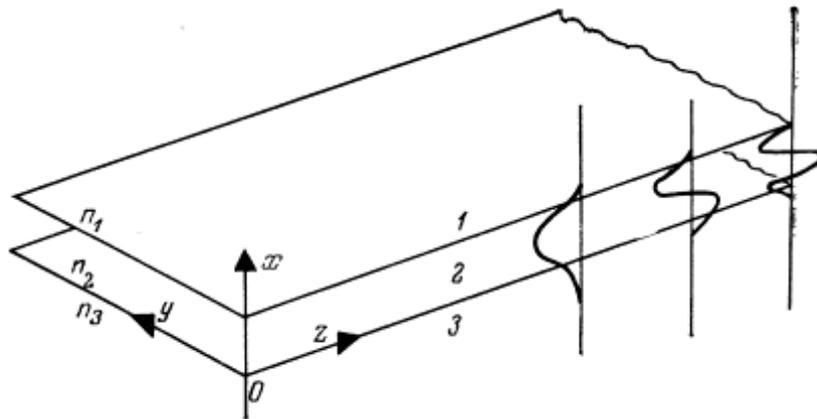


Рис. 6.1.

Рассмотрим простую трехслойную волноводную структуру (рис. 6.1). Предполагается, что световые волны распространяются в направлении  $z$ .

Мода представляет собой пространственное распределение оптической энергии в одном или более направлениях (измерениях). Эквивалентное математическое определение моды состоит в том, что она является электромагнитным полем, которое описывается решением волнового уравнения Максвелла.

$$\nabla^2 \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \frac{n^2(\mathbf{r})}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}(\mathbf{r}, t)}{\partial t^2}, \quad (6.1)$$

где  $\mathbf{E}$  – вектор электрического поля;  $\mathbf{r}$  – радиус-вектор;  $n$  – показатель преломления;  $c$  – скорость света в вакууме. Решение уравнения (6.1) имеет следующий вид

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}(\mathbf{r}) \exp i[\omega t - \varphi(\mathbf{r})], \quad (6.1)$$



Решения уравнений (6.5) являются либо синусоидальными, либо экспоненциальными функциями  $x$  в каждой из областей в зависимости от того, будет ли  $k^2 n_i^2 - \beta^2$ ,  $i = 1, 2, 3$ , больше или меньше нуля.  $E(x, y)$  и  $\partial E(x, y) / \partial x$  должны быть непрерывными на границе между слоями.

Когда  $\beta > kn_2$ , функция  $E(x)$  экспоненциальна во всех трех областях, граничные условия удовлетворяет только мода  $a$  (рис. 6.2). Физически данная мода не реализуема, т. к. поле неограниченно возрастает в областях 1 и 3.

Моды  $b$  и  $c$  являются локализованными модами волновода.

Если  $kn_1 < \beta < kn_3$ , то будет возникать мода  $d$  – радиационная мода подложки, быстро затухает по мере распространения.

Если  $\beta < kn_1$ , то решение для функции  $E(x)$  будет имеет колебательный характер во всех трех областях волноводной структуры. Они называются воздушными радиационными модами волноводной структуры.

## 6.2. Теория оптических мод на основе лучевого приближения

Для объяснения эффекта удержания света в планарном трехслойном волноводе с помощью оптико-лучевого метода понадобится лишь закон отражения Снеллиуса в сочетании с явлениями полного внутреннего отражения.

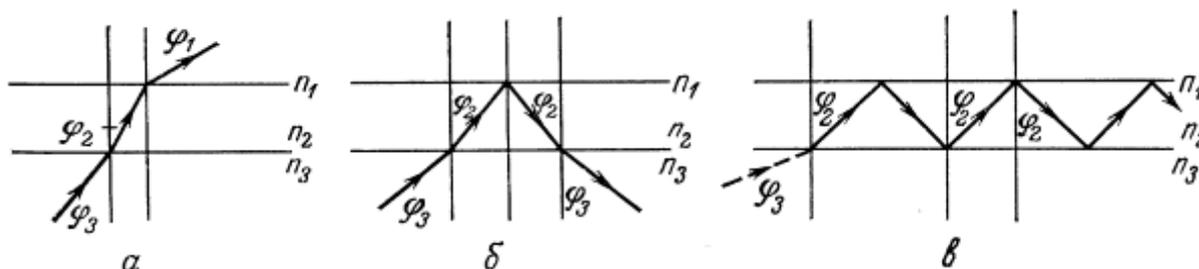


Рис. 6.3. Картины оптических лучей для воздушной радиационной моды (а), моды, излучающей в подложку (б), и волноводной моды (в).

Корреляцию между физическим и лучевым приближением можно заметить, обращаясь к уравнениям (6.5). Решение уравнения в волноводной области имеет следующий вид

$$E_y(x, y) \propto \sin(hx + \gamma), \quad (6.6)$$

где предполагается мода ТЕ типа, а  $h$  и  $\gamma$  от конкретной волноводной структуры. Подставляя (6.6) в (6.5) для области 2 получим условие

$$\beta^2 + h^2 = k^2 n_2^2. \quad (6.7)$$

$\beta$ ,  $h$  и  $kn_2$  – являются константами распространения, имеющими размерность (длина)<sup>-1</sup>.

Таким образом, моду с постоянным распространением  $\beta_m$  в направлениях  $z$  и  $h$  в направлении  $x$  можно представить плоской волной, движущейся под углом  $\theta_m = \text{arctg}(h/\beta_m)$  по отношению к направлению  $z$  с постоянной распространения  $kn_2$ .

Так как частота постоянна, то величина  $kn_2 \equiv (\omega/c)n_2$  так же постоянна.  $\theta_m$ ,  $\beta_m$  и  $h$  – параметры, связанные с  $m$ -й модой и имеющие различные значения для разных мод.

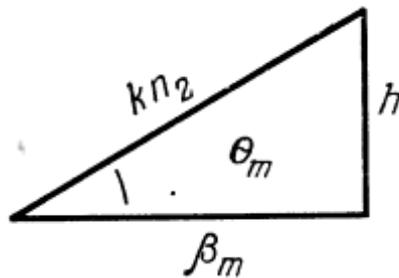


Рис. 6.4. Геометрическое соотношение между постоянными распространения в оптическом волноводе

Углы падения и преломления  $\varphi_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) измеряются от нормали к поверхности раздела.

Из закона Снеллиуса следует

$$\frac{\sin \varphi_1}{\sin \varphi_2} = \frac{n_2}{n_1}, \quad (6.8)$$

$$\frac{\sin \varphi_2}{\sin \varphi_3} = \frac{n_3}{n_2}. \quad (6.9)$$

Условие полного внутреннего отражения на границе раздела  $n_2 - n_1$  дается выражением

$$\varphi_2 \geq \arcsin \frac{n_1}{n_2}, \quad (6.10)$$

или, комбинируя (6.10) и (6.9), получим

$$\varphi_3 \geq \arcsin \frac{n_1}{n_3}. \quad (6.11)$$

В случае полностью отраженной волны критический угол определяется выражением:

$$\varphi_2 \geq \arcsin \frac{n_3}{n_2}. \quad (6.12)$$

или комбинируя выражения (6.12) и (6.9)

$$\varphi_3 \geq \arcsin(1) = 90^\circ. \quad (6.13)$$

Покажем эквивалентность между лучевым и физическим приближением относительно определения типа мод. Из рис. 6.4

$$\sin \varphi_2 = \beta / kn_2. \quad (6.14)$$

Если  $\beta \leq kn_1$ , то

$$\sin \varphi_2 = kn_1 / kn_2 = n_1 / n_2. \quad (6.15)$$

Условие  $kn_1 < \beta < kn_3$  соответствует излучательным модам подложки. В случае  $\beta \geq kn_3$  могут существовать ограниченные волноводные моды. Если  $\beta \geq kn_3$ , то

$$\sin \varphi_2 = \frac{\beta}{kn_2} \geq \frac{kn_3}{kn_2} \geq \frac{n_3}{n_2}. \quad (6.16)$$

Если  $\beta \geq kn_2$ , то

$$\sin \varphi_2 = \frac{\beta}{kn_2} \geq 1. \quad (6.17)$$

Уравнение (6.17) физически нереализуемо, соответствует нереализуемым модам  $a$ -типа.

## 6.1. Контрольные вопросы

1. Что представляет собой мода?
2. В чем состоит эквивалентное математическое определение моды?
3. Что такое локализованные моды волновода?
4. Что такое радиационная мода подложки?
5. Что такое воздушная радиационная мода волноводной структуры?
6. Как записывается закон отражения Снеллиуса?
7. Как записывается условие полного внутреннего отражения на границе раздела двух сред?

8. Как определяется критический угол?

## РАЗДЕЛ 7. РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЙ МАКСВЕЛЛА ДЛЯ ПЛАНАРНЫХ И ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДОВ

---

### 7.1. Решения в общем виде

Рассмотрим соотношения поля вначале для планарного диэлектрического волновода, а затем для цилиндрического диэлектрического волновода. Такой подход используется, т. к. компоненты поля для планарного волновода включают в себя только элементарные функции, производить действия с которыми легче, чем с функциями, описывающими поля в цилиндрических волокнах. Тем не менее, метод математического расчета аналогичен для обоих случаев.

В случае планарного волновода решение будет следующее:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{E} &= \mathbf{E}(x, y)e^{i(\omega t - \beta z)} \\ \mathbf{H} &= \mathbf{H}(x, y)e^{i(\omega t - \beta z)} \end{aligned} \right\}, \quad (7.1)$$

а в случае цилиндрического

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{E} &= \mathbf{E}(r, \theta)e^{i(\omega t - \beta z)} \\ \mathbf{H} &= \mathbf{H}(r, \theta)e^{i(\omega t - \beta z)} \end{aligned} \right\}, \quad (7.2)$$

где  $\beta$  – фазовый коэффициент распространения поля, зависящий от граничных условий, наложенных на  $\mathbf{E}(x, y)$  или  $\mathbf{E}(r, \theta)$ ;  $\omega$  – угловая частота волны, которая связана с фазовой скоростью  $v_p$

$$v_p = \omega/\beta. \quad (7.3)$$

В свободном пространстве  $\varepsilon = \varepsilon_0$ ,  $\mu = \mu_0$  и  $v_p = c$  и отношение скорости в свободном пространстве к скорости в диэлектрической среде, где  $\mu = \mu_0$ , определяет показатель преломления  $n = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}}$ .

## 7.2. Зависимости для планарных волноводов

Для бесконечного планарного волновода, лежащего в плоскости  $yz$  можно допустить  $\partial/\partial y = 0$ . Тогда

$$\text{TE – волны } (E_y, H_x, H_z) \begin{cases} \beta E_y = -\mu\omega H_x; & (7.4) \\ -i\beta H_x - \frac{\partial H_z}{\partial x} = i\varepsilon\omega E_y; & (7.5) \\ \frac{\partial E_y}{\partial x} = -i\mu\omega H_z; & (7.6) \end{cases}$$

$$\text{TM – волны } (E_x, E_z, H_y) \begin{cases} \beta H_y = -\varepsilon\omega E_x; & (7.7) \\ i\beta E_x + \frac{\partial E_z}{\partial x} = i\omega\mu H_y; & (7.8) \\ \frac{\partial H_y}{\partial x} = i\varepsilon\omega E_z; & (7.9) \end{cases}$$

Из анализа (7.4) – (7.9) следует, что все составляющие поля образуют две независимые группы:

- одна состоит из трех связанных компонент  $E_y$ ,  $H_x$  и  $H_z$ ,
- а другая – из  $E_x$ ,  $E_z$ ,  $H_y$  спаренных волн.

Составляющие поля, связанные с первой группой, соответствуют поперечным электрическим (ТЕ) модам, а компоненты, связанные со второй группой, – поперечным магнитным (ТМ) модам.

Объединяя уравнения (7.4) – (7.9) и исключая из них  $H_x$  и  $H_z$ , получаем следующее волновое уравнение для  $E_y$ :

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + \varepsilon\mu\omega^2 - \beta^2 E_y = 0. \quad (7.10)$$

Аналогично получаем уравнение для  $H_y$ :

$$\frac{\partial^2 H_y}{\partial x^2} + \varepsilon\mu\omega^2 - \beta^2 H_y = 0. \quad (7.11)$$

Уравнения (7.10) и (7.11) указывают на то, что  $E_y$  и  $H_y$  плоские волны, и определяются они следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} E_y &= e^{ik_x x}; \\ H_y &= e^{ik_x x}, \end{aligned} \right\} \quad (7.12)$$

где  $k_x$  – постоянная распространения в направлении  $x$  с амплитудой

$$k_x = \sqrt{\omega^2 \varepsilon \mu - \beta^2}. \quad (7.13)$$

Из (7.13) можно выразить амплитуду результирующего волнового вектора  $\mathbf{k}$  таким способом

$$|\mathbf{k}| = \sqrt{k_x^2 + \beta^2} = \omega \sqrt{\varepsilon \mu}, \quad (7.14)$$

$\varepsilon \mu = K_e K_m \varepsilon_0 \mu_0$ , где  $K_e \approx n^2$  – диэлектрическая постоянная;  $K_m = 1$ ;  $\varepsilon_0 \mu_0 = 1/c^2$ ,  $c$  – скорость света.

Следовательно (7.14) можно переписать следующим образом

$$\omega \sqrt{\varepsilon \mu} = nk_0, \quad (7.15)$$

где  $k_0 = 2\pi/\lambda_0$  является амплитудой волнового вектора в свободном пространстве.

### 7.3. Зависимости для цилиндрических волноводов

Из уравнений Максвелла в полярных координатах и (7.2) получим следующие выражения

$$\frac{1}{r} \left( \frac{\partial E_z}{\partial \theta} + i\beta r E_\theta \right) = -i\omega \mu H_r; \quad (7.16)$$

$$i\beta E_r + \frac{\partial E_z}{\partial r} = i\omega \mu H_\theta; \quad (7.17)$$

$$\frac{1}{r} \left( \frac{\partial r E_\theta}{\partial r} - \frac{\partial E_r}{\partial \theta} \right) = -i\omega \mu H_z; \quad (7.18)$$

$$\frac{1}{r} \left( \frac{\partial H_z}{\partial \theta} + i\beta r H_\theta \right) = i\omega \varepsilon E_r; \quad (7.19)$$

$$i\beta H_r + \frac{\partial H_z}{\partial r} = -i\omega \varepsilon E_\theta; \quad (7.20)$$

$$\frac{1}{r} \left( \frac{\partial r H_\theta}{\partial r} - \frac{\partial H_r}{\partial \theta} \right) = -i\omega \varepsilon E_z; \quad (7.21)$$

Из уравнений (7.16) – (7.21) можно выразить составляющие поля для  $r$  и  $\theta$  координат через составляющую  $z$  в следующем виде

$$E_r = -\frac{i}{k_r^2} \left( \beta \frac{\partial E_z}{\partial r} + \omega \mu \frac{1}{r} \frac{\partial H_z}{\partial \theta} \right); \quad (7.22)$$

$$E_\theta = -\frac{i}{k_r^2} \left( \frac{\beta}{r} \frac{\partial E_z}{\partial \theta} - \omega \mu \frac{\partial H_z}{\partial r} \right); \quad (7.23)$$

$$H_r = -\frac{i}{k_r^2} \left( \beta \frac{\partial H_z}{\partial r} - \omega \varepsilon \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial \theta} \right); \quad (7.24)$$

$$H_\theta = -\frac{i}{k_r^2} \left( \frac{\beta}{r} \frac{\partial H_z}{\partial \theta} + \omega \varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial r} \right); \quad (7.25)$$

где  $k_r$  – радиальная составляющая вектора  $\mathbf{k}$  в волноводе и имеет амплитуду, рассчитываемую при помощи уравнения

$$k_r = \sqrt{\omega^2 \varepsilon \mu - \beta^2}. \quad (7.26)$$

Анализируя (7.22) – (7.25), можно сделать вывод, что в случае оптического волновода компоненты поля в цилиндрических координатах неразделимы. Они значительно более сложные и представлены не только линейно поляризованными  $TE$ - и  $TM$ -модами, но также смешанными  $HE$ - и  $EH$ -модами.

Но когда разница в показателях преломления между сердцевиной и оптической оболочкой мала, можно пренебречь этими взаимосвязями. Таким образом, получим набор выражений, которые описывают моды с точки зрения ряда линейно поляризованных полей –  $LP$ -моды.

### 7.3. Контрольные вопросы

1. Как записываются уравнения Максвелла для планарного волновода в общем виде?
2. Как записываются уравнения Максвелла для цилиндрического волновода в общем виде?
3. От чего зависит фазовый коэффициент распространения поля?
4. Как угловая частота связана с фазовой скоростью?
5. Как определяется показатель преломления среды?
6. Какие группы волн существуют в планарном волноводе?
7. Что такое  $TE$  моды?

8. Что такое ТМ моды?
9. Какие моды существуют в цилиндрическом волноводе?

## РАЗДЕЛ 8. ОПТИЧЕСКОЕ ВОЛОКНО

---

### 8.1. Типы оптических волокон

Оптические волокна производятся разными способами, обеспечивают передачу оптического излучения на разных длинах волн, имеют различные характеристики и выполняют разные задачи. Все 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. 8.1. 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.

Если сравнивать многомодовые волокна между собой (рис. 8.1 *а, б*), то градиентное волокно имеет лучшие 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, что приводит к большей пропускной способности у градиентного волокна.

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 передатчиков.

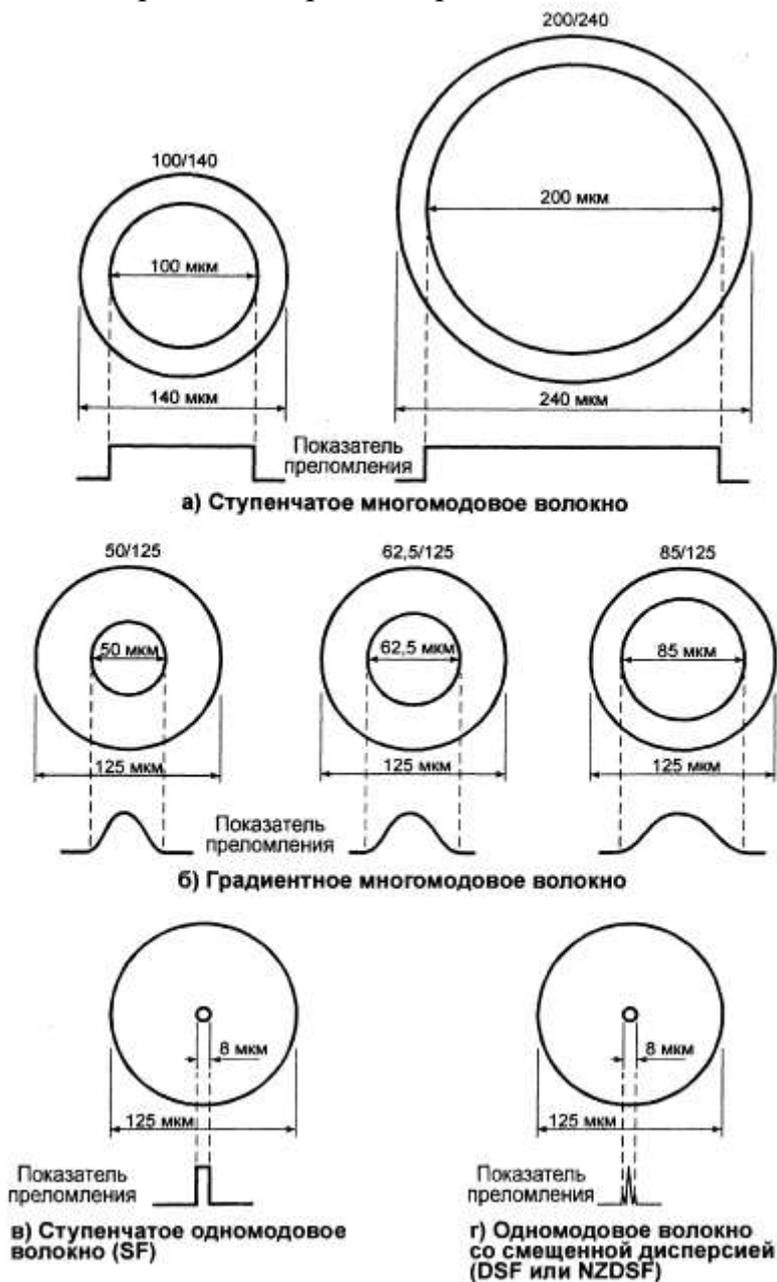


Рис. 8.1. Типы оптических волокон

В ВОЛС наиболее широко используются следующие стандарты волокон (табл. 8.1):

- многомодовое градиентное волокно 50/125 (рис. 8.1 а);
- многомодовое градиентное волокно 62,5/125 (рис. 8.1 б);
- одномодовое ступенчатое волокно SF (волокно с несмещенной дисперсией или стандартное волокно) 8 – 10/125 (рис. 8.1 в);
- одномодовое волокно со смещенной дисперсией DSF 8 – 10/125 (рис. 8.1 г);
- одномодовое волокно с ненулевой смещенной дисперсией NZDSF (по профилю показателя преломления это волокно схоже с предыдущим типом

волокна).

В табл. 8.2 приведены типичные характеристики ОВ.

Таблица 8.1.

Стандарты оптических волокон и области их применения

Многомодовое волокно		Одномодовое волокно		
ММФ 50/125 градиентное волокно	ММФ 62,5/125 градиентное 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), магистралы SDH)	Сверхпротяже нные сети, супермагистр алы (SDH, ATM)	Сверхпротяженные сети, супермагистралы (SDH, ATM), полностью оптические сети

Таблица 8.2

Типичные характеристики ОВ.

Тип ОВ	Числовая апертура	Рабочий диапазон, мкм	Коэффициент затухания, дБ/км	Коэффициент широкополос- ности, МГц-км	Удельная хроматическая дисперсия пс/км-нм
<i>Многомодовое градиентное ОВ</i>					
50/125 мкм (МСЭ-Т G 651)	0.2	0.825...0.8	$\leq 2.7$	$\geq 400$	
		75	$\leq 1.0$	$\geq 600$	
62,5/125 мкм	0.28	1.27...1.34			
		0,825...0,8	$\leq 3.5$	$\geq 200$	
		75	$\leq 2.0$	$\geq 500$	
		1.27...1.34			
<i>Одномодовое ОВ</i>					
SF 9/125 мкм (МСЭ- Т G 652)	0.1	1.285...1.3	$\leq 0.43$		$\leq 3.5$
		3	$\leq 0.28$		$\leq 18$
DSF 8/125 мкм (МСЭ- Т G 653)	0.1	1.525...1.5			
		75	$\leq 0.43$		$\leq 18$
		3	$\leq 0.28$		$\leq 3.5$
		1.525...1.5			
		75			

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. Именно окрестности этих трех длин волн образуют локальные минимумы затухания сигнала и обеспечивают большую дальность передачи.

## 8.2. Многомодовые градиентные волокна

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.

## 8.3. Одномодовые волокна

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  $\lambda > \lambda_{CF}$  ( $\lambda > \lambda_{CF}$  – 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.

В одномодовом волокне со смещенной дисперсией (DSF) длина волны, на которой результирующая дисперсия обращается в ноль, – длина волны нулевой дисперсии  $\lambda_0$  – смещена в окно 1550 нм. Такое смещение достигается благодаря специальному профилю показателя преломления волокна, рис. 2.1 г. 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 ста и более километров. Разумеется, единственная рабочая длина волны берется близкой к 1550 нм.

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.

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 (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 отличие 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 потребуются 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 приемопередающего оборудования (мощностью, частотой, спектральным уширением излучения передатчика, чувствительностью приемника).

#### **8.4. Контрольные вопросы**

1. На какие две основные группы делятся оптические волокна?
2. Какой тип волокна имеет лучшие технические характеристики по дисперсии?
3. Какие стандарты оптических волокон наиболее широко применяются в ВОСП?
4. Какой тип оптического волокна применяется при строительстве ЛВС?
5. Какой тип оптического волокна применяется при строительстве сверхпротяженных сетей и супермагистралей?
6. Какие окна прозрачности используют для передачи света по многомодовому волокну?
7. Как можно получить смещение дисперсии в одномодовом волокне?
8. Какой тип оптического волокна может применяться для строительства полностью оптических сетей?

## РАЗДЕЛ 9. ПАРАМЕТРЫ ПЕРЕДАЧИ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

---

### 9.1. Затухание сигналов

Волокно характеризуется двумя важнейшими параметрами: затуханием и дисперсией. Чем меньше затухание (потери) и чем меньше дисперсия распространяемого сигнала в волокне, тем больше может быть расстояние между регенерационными участками или повторителями.

На затухание света в волокне влияют такие факторы, как: потери на поглощении; потери на рассеянии; кабельные потери.

Потери на поглощении и на рассеянии вместе называют *собственными потерями*, в то время как кабельные потери в силу их природы называют также *дополнительными потерями*, рис. 9.1.



Рис. 9.1. Основные типы потерь в волокне

Полное затухание в волокне (измеряется в дБ/км) определяется в виде суммы:

$$\alpha = \alpha_{\text{int}} + \alpha_{\text{rad}} = \alpha_{\text{abs}} + \alpha_{\text{sct}} + \alpha_{\text{rad}} \quad (9.1)$$

*Потери на поглощении*  $\alpha_{\text{abs}}$  состоят как из собственных потерь в кварцевом стекле (ультрафиолетовое и инфракрасное поглощение), так и из потерь, связанных с поглощением света на примесях. Примесные центры, в зависимости от типа примеси, поглощают свет на определенных (присущих

данной примеси) длинах волн и рассеивают поглощенную световую энергию в виде джоулева тепла. Даже ничтожные концентрации примесей приводят к появлению пиков на кривой потерь, рис. 9.1. Следует отметить характерный максимум в районе длины волны 1480 нм, который соответствует примесям ОН. Этот пик присутствует всегда. Область спектра в районе этого пика ввиду больших потерь практически не используется.

Собственные потери на поглощении растут и становятся значимыми в ультрафиолетовой и инфракрасной областях. При длине волны излучения выше 1,6 мкм обычное кварцевое стекло становится непрозрачным из-за роста потерь, связанных с инфракрасным поглощением, рис. 9.1.

*Потери на рассеянии  $\alpha_{sc}$ .* Уже к 1970 году изготавливаемое оптическое волокно становится настолько чистым (99,9999%), что наличие примесей перестает быть главенствующим фактором затухания в волокне. На длине волны 800 нм затухание составило 1.5 дБ/км. Дальнейшему уменьшению затухания препятствует так называемое рэлеевское рассеяние света. *Рэлеевское рассеяние* вызвано наличием неоднородностей микроскопического масштаба в волокне. Свет, попадая на такие неоднородности, рассеивается в разных направлениях. В результате часть его теряется в оболочке. Эти неоднородности неизбежно появляются во время изготовления волокна.

Потери на рэлеевском рассеянии зависят от длины волны по закону  $\lambda^{-4}$  и сильнее проявляются в области коротких длин волн, рис. 9.2.

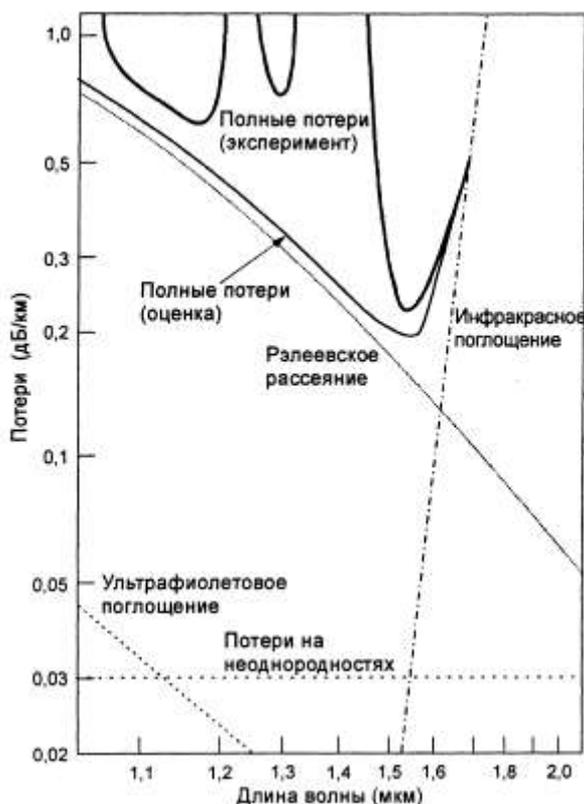


Рис. 9.2. Факторы, влияющие на затухание в области длины волны 1500 нм.

Длина волны, на которой достигается нижний предел собственного

затухания чистого кварцевого волокна, составляет 1550 нм и определяется разумным компромиссом между потерями вследствие рэлеевского рассеяния и инфракрасного поглощения.

Внутренние потери хорошо интерполируются формулой;  $\alpha = K_{rel}\lambda^{-4} + \delta_{OH}(\lambda) + C \cdot e^{-k/\lambda}$ , где  $\delta_{OH}(\lambda)$  отражает пик поглощения на примесях OH с максимумом при 1480 нм, а первое и последнее слагаемые соответствуют рэлеевскому рассеянию и инфракрасному поглощению соответственно ( $K_{rel} = 0.8 \text{ мкм}^4 \cdot \text{дБ/км}$ ;  $C = 0.9 \text{ дБ/км}$ ;  $k = 0.7 - 0.9 \text{ мкм}$ ; данные приведены для кварца). На рис. 1.3 приводится общий вид спектральной зависимости собственных потерь с указанием характерных значений четырех основных параметров (минимумов затухания в трех окнах прозрачности 850, 1300 и 1550 нм, и пика поглощения на длине волны 1480 нм) для современных одномодовых и многомодовых волокон.

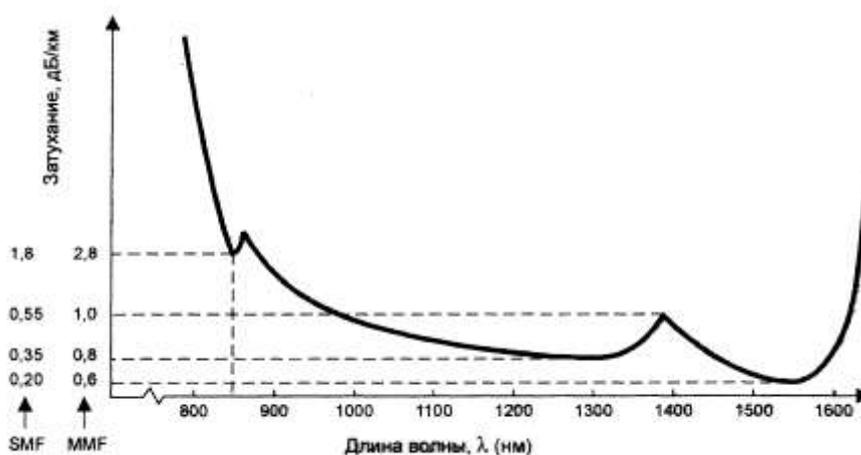


Рис. 9.3. Собственные потери в оптическом волокне

*Кабельные (радиационные) потери*  $\alpha_{rad}$  обусловлены скруткой, деформациями и изгибами волокон, возникающими при наложении покрытий и защитных оболочек, производства кабеля, а так же в процессе инсталляции ВОК. При соблюдении ТУ на прокладку кабеля номинальный вклад со стороны радиационных потерь составляет не больше 20% от полного затухания. Дополнительные радиационные потери появляются, если радиус изгиба кабеля становится меньше минимального радиуса изгиба, указанного в спецификации на ВОК.

Защитное покрытие, как указывалось выше, предназначено для повышения механической надежности ОВ и уменьшения взаимных (перекрестных) помех между ними при плотной укладке в ОК. Чем больше толщина оболочки ОВ, тем меньше поле направляемых мод на ее внешней границе с покрытием и, следовательно, меньше дополнительные потери в защитном покрытии. С другой стороны увеличение толщины оболочки приводит к ухудшению гибкости ОВ и увеличению его стоимости. Поэтому обычно у многомодовых ОВ диаметр оболочки выбирается в 2.0..2.5 раза больше диаметра сердцевины. При этом потери в защитном покрытии не превышают 0.1 дБ/км. У одномодовых ОВ соотношение между указанными параметрами иное.

Поскольку поле основной моды проникает в оболочку на значительную глубину, для обеспечения малой величины потерь в покрытии толщина оболочки должна в 10 и более раз превышать радиус сердцевины.

Деформация ОВ при изготовлении кабеля (микроизгибы, скрутка, сжатие) является другой причиной появления дополнительных потерь. При соответствующем выборе кабельных материалов, конструкции и технологии изготовления ОК эти потери в многомодовых и одномодовых ОВ составляют не больше 20 % от полных потерь.

Дополнительные потери мощности практически постоянны в диапазоне длин волн 0.8..1.7 мкм.

При строительстве и эксплуатации оптических кабельных линий возможно появление так называемых эксплуатационных потерь. Прежде всего, эти потери связаны с макроизгибами ОВ (радиус изгиба  $\gg 1$  мм), которые неизбежно возникают при прокладке ОК. Другая причина – постепенное увеличение собственных потерь ОВ.

Потери на макроизгибах обусловлены преобразованием направляемых мод в моды излучения. Они резко возрастают и становятся недопустимо большими, как только радиус изгиба уменьшается до критического значения, которое для типичных ОВ составляет несколько сантиметров. Поэтому при проектировании ОК необходимо предусматривать конструктивные элементы, ограничивающие до необходимых пределов радиус изгиба.

Основной причиной постепенного увеличения собственных потерь ОВ является влага, проникающая в ОК. Под ее действием происходит помутнение стекла и образование микротрещин. Для защиты от влаги применяют влагозащитные оболочки и гидрофобное заполнение.

## 9.2. Дисперсия и полоса пропускания

### 9.2.1. Виды дисперсии

По оптическому волокну передается не просто световая энергия, но также полезный информационный сигнал. Импульсы света, последовательность которых определяет информационный поток, в процессе распространения расплываются. При достаточно большом уширении импульсы начинают перекрываться, так что становится невозможным их выделение при приеме.

Дисперсия – уширение импульсов – имеет размерность времени и определяется как квадратичная разность длительностей импульсов на выходе и входе кабеля длины  $L$  по формуле  $\tau(L) = \sqrt{t_{\text{out}}^2 - t_{\text{in}}^2}$ . Обычно дисперсия нормируется в расчете на 1 км, и измеряется в пс/км. Дисперсия в общем случае характеризуется тремя основными факторами, рассматриваемыми ниже:

- различием скоростей распространения направляемых мод (межмодовой дисперсией  $\tau_{\text{mod}}$ ),
- направляющими свойствами световодной структуры (волноводной дисперсией  $\tau_w$ ),
- свойствами материала оптического волокна (материальной дисперсией  $\tau_{\text{mat}}$ ).



Рис. 9.4. Виды дисперсии

Чем меньше значение дисперсии, тем больший поток информации можно передать по волокну. Результирующая дисперсия  $\tau$  определяется из формулы:

$$\tau^2 = \tau_{\text{mod}}^2 + \tau_{\text{chr}}^2 = \tau_{\text{mod}}^2 + (\tau_{\text{mat}} + \tau_w)^2. \quad (9.2)$$

### 9.2.2. Межмодовая дисперсия

*Межмодовая дисперсия* возникает вследствие различной скорости распространения у мод, и имеет место только в многомодовом волокне. Для ступенчатого многомодового волокна и градиентного многомодового волокна с параболическим профилем показателя преломления ее можно вычислить соответственно по формулам:

$$\tau_{\text{mod step}}(L) \cdot L = \begin{cases} \frac{n_1 \Delta}{c} L, & L < L_c, \\ \frac{n_1 \Delta}{c} \sqrt{L \cdot L_c}, & L > L_c, \end{cases} \quad (9.3)$$

$$\tau_{\text{mod grad}}(L) \cdot L = \begin{cases} \frac{n_1 \Delta^2}{2c} L, & L < L_c, \\ \frac{n_1 \Delta^2}{2c} \sqrt{L \cdot L_c}, & L > L_c, \end{cases} \quad (9.4)$$

где  $L_c$  – длина межмодовой связи (для ступенчатого волокна порядка 5 км, для градиентного – порядка 10 км).

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

Вследствие квадратичной зависимости от  $\Delta$  значения межмодовой дисперсии у градиентного волокна значительно меньше, чем у ступенчатого,

что делает более предпочтительным использование градиентного многомодового волокна в линиях связи.

На практике, особенно при описании многомодового волокна, чаще пользуются термином *полоса пропускания*. При расчете полосы пропускания  $W$  можно воспользоваться формулой:

$$W=0.44/\tau. \quad (9.5)$$

Измеряется полоса пропускания в МГц·км. Из определения полосы пропускания видно, что дисперсия накладывает ограничения на дальность передачи и верхнюю частоту передаваемых сигналов. Физический смысл  $W$  – это максимальная частота (частота модуляции) передаваемого сигнала при длине линии 1 км. Если дисперсия линейно растет с ростом расстояния, то полоса пропускания зависит от расстояния обратно пропорционально.

### 9.2.3. Хроматическая дисперсия

*Хроматическая дисперсия* состоит из материальной и волноводной составляющих и имеет место при распространении как в одномодовом, так и в многомодовом волокне. Однако наиболее отчетливо она проявляется в одномодовом волокне из-за отсутствия межмодовой дисперсии.

*Материальная дисперсия* обусловлена зависимостью показателя преломления волокна от длины волны. В выражение для дисперсии одномодового волокна входит дифференциальная зависимость показателя преломления от длины волны:

$$\tau_{\text{mat}}(\Delta\lambda, L) = \Delta\lambda \cdot L \cdot \frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n}{d\lambda^2} = \Delta\lambda \cdot L \cdot M(\lambda). \quad (9.6)$$

*Волноводная дисперсия* обусловлена зависимостью коэффициента распространения моды от длины волны:

$$\tau_w(\Delta\lambda, L) = \Delta\lambda \cdot L \cdot 2n_1^2 \Delta / c\lambda = \Delta\lambda \cdot L \cdot N(\lambda), \quad (9.7)$$

где введены коэффициенты  $M(\lambda)$  и  $N(\lambda)$  – удельные материальная и волноводная дисперсии соответственно, а  $\Delta\lambda$  (нм) – уширение длины волны вследствие некогерентности источника излучения. Результирующее значение коэффициента удельной хроматической дисперсии определяется как  $D(\lambda)=M(\lambda)+N(\lambda)$ . Удельная дисперсия имеет размерность пс/(нм·км). Если коэффициент волноводной дисперсии всегда больше нуля, то коэффициент материальной дисперсии может быть как положительным, так и отрицательным. И здесь важным является то, что при определенной длине волны (примерно  $1310 \pm 10$  нм для ступенчатого одномодового волокна) происходит взаимная компенсация  $M(\lambda)$  и  $N(\lambda)$ , а результирующая дисперсия  $D(\lambda)$  обращается в ноль. Длина волны, при которой это происходит, называется

длиной волны нулевой дисперсии  $\lambda_0$ . Обычно указывается некоторый диапазон длин волн, в пределах которых может варьироваться  $\lambda_0$  для данного конкретного волокна.

Фирма Corning использует следующий метод определения удельной хроматической дисперсии. Измеряются задержки по времени при распространении коротких импульсов света в волокне длиной не меньше 1 км. После получения выборки данных для нескольких длин волн из диапазона интерполяции (800 – 1600 нм для MMF, 1200 – 1600 нм для SF и DSF) делается повторная выборка измерения задержек на тех же длинах волн, но только на коротком эталонном волокне (длина 2 м). Времена задержек, полученных на нем, вычитаются из соответствующих времен, полученных на длинном волокне.

Для одномодового ступенчатого и многомодового градиентного волокна используется эмпирическая формула Селмейера:

$$\tau(\lambda) = A + B\lambda^2 + C\lambda^{-2}. \quad (9.8)$$

Коэффициенты  $A$ ,  $B$ ,  $C$  являются подгоночными, и выбираются так, чтобы экспериментальные точки лучше ложились на кривую  $\tau(\lambda)$ , рис. 9.5. Тогда удельная хроматическая дисперсия вычисляется по формуле:

$$D(\lambda) = \frac{\partial \tau}{\partial \lambda} = 2B\lambda - C\lambda^{-3} \equiv S_0 \left( \lambda - \frac{\lambda_0^4}{\lambda^3} \right) / 4, \quad (9.9)$$

где  $\lambda_0 = (C/B)^{1/4}$  – длина волны нулевой дисперсии, новый параметр  $S_0 = 8B$  – наклон нулевой дисперсии (размерность пс/(нм<sup>2</sup>·км)), а  $\lambda$  – рабочая длина волны, для которой определяется удельная хроматическая дисперсия.

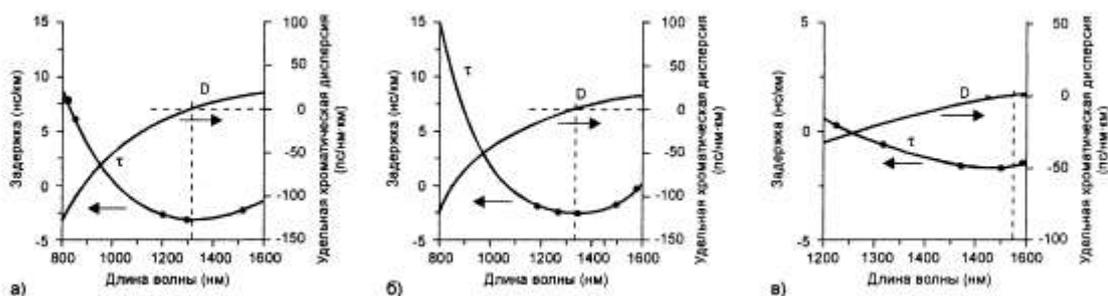


Рис. 9.5. Кривые временных задержек и удельных хроматических дисперсий для:  
 а) многомодового градиентного волокна (62,5/125);  
 б) одномодового ступенчатого волокна (SF);  
 в) одномодового волокна со смещенной дисперсией (DSF)

Для волокна со смещенной дисперсией эмпирическая формула временных задержек записывается в виде

$$\tau(\lambda) = A + B\lambda + C\lambda \ln \lambda, \quad (9.10)$$

а соответствующая удельная дисперсия определяется как

$$D(\lambda) = \partial\tau/\partial\lambda = B + C \ln \lambda = \lambda_0 S_0 \ln(\lambda/\lambda_0), \quad (9.11)$$

со значениями параметров  $\lambda_0 = e^{-B/C}$  и  $S_0 = C/\lambda_0$ , где  $\lambda$  – рабочая длина волны,  $\lambda_0$  – длина волны нулевой дисперсии, и  $S_0$  – наклон нулевой дисперсии.

Хроматическая дисперсия связана с удельной хроматической дисперсией простым соотношением

$$\tau_{\text{chr}}(\lambda) = D(\lambda) \cdot \Delta\lambda, \quad (9.12)$$

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

Таблица 9.1.  
Дисперсия оптических сигналов в различных оптических волокнах

Тип волокна	$\lambda$ , нм	Межмодовая дисперсия, пс/км $\tau_{\text{mod}}$	Удельная хроматическая дисперсия, пс/(нм км) $D(\lambda)$	Результирующая удельная полоса пропускания, МГц км, $W=0,44/\tau$ $1/\tau^2 = 1/\tau_{\text{mod}}^2 + (\Delta\lambda - D(\lambda))^2$		
				$\Delta\lambda=2$ нм	$\Delta\lambda=4$ нм	$\Delta\lambda=35$ нм
MMF 50/125	850	414 <sup>1)</sup>	99.6 <sup>3)</sup>	958	766	<b><u>125</u></b>
	1310	414	1.0	1062	<b><u>1062</u></b>	<b><u>1050</u></b>
	1550	414	19.2	1058	1044	540
MMF 62,5/125	850	973 <sup>2)</sup>	106.7 <sup>4)</sup>	441	414	<b><u>114</u></b>
	1310	973	4.2	452	<b><u>452</u></b>	<b><u>450</u></b>
	1550	973	17.3	451	450	384
SF 8/125	1310	0	<1.8 <sup>5)</sup>	<b><u>&gt;120000</u></b>	<b><u>61000</u></b>	<b><u>6900</u></b>
	1550	0	17.5	<b><u>12600</u></b>	6300	720
DSF 8/125	1310	0	21.2 <sup>6)</sup>	10400	5200	594
	1550	0	<1.7	>120000	65000	7400

<sup>1)</sup> – на основе формулы (2.2),  $\Delta=0.013$ ,  $n_1 = 1,47$

<sup>2)</sup> – на основе формулы (2.2),  $\Delta=0.02$ ,  $n_1 = 1,46$

<sup>3)</sup> – на основе формулы (2.9),  $\lambda_0=1297..1316$  нм,  $S_0 \leq 0.101$  пс/(нм<sup>2</sup>км)

<sup>4)</sup> – на основе формулы (2.9),  $\lambda_0= 1322..1354$  нм,  $S_0 \leq 0.097$  пс/(нм<sup>2</sup>км)

<sup>5)</sup> – на основе формулы (2.9),  $\lambda_0= 1301.5..1321.5$  нм,  $S_0 \leq 0.092$  пс/(нм<sup>2</sup>км)

<sup>6)</sup> – на основе формулы (2.9),  $\lambda_0=1535..1565$  нм,  $S_0 \leq 0.085$  пс/(нм<sup>2</sup>км)

Технические характеристики взяты у волокон, производимых фирмой Corning.

К уменьшению хроматической дисперсии ведет использование более когерентных источников излучения, например лазерных передатчиков ( $\Delta\lambda=2$  нм), и использование рабочей длины волны более близкой к длине волны нулевой дисперсии. В табл. 9.1 представлены дисперсионные свойства различных оптических волокон.

Для того чтобы при передаче сигнала сохранялось его приемлемое качество – соотношение сигнал/шум было не ниже определенного значения – необходимо, чтобы полоса пропускания волокна на длине волны передачи превосходила частоту модуляции.

#### 9.2.4. Поляризационная модовая дисперсия

Поляризационная модовая дисперсия  $\tau_{\text{pmd}}$  – возникает вследствие различной скорости распространения двух взаимно перпендикулярных поляризационных составляющих моды. Коэффициент удельной дисперсии  $T$  нормируется в расчете на 1 км и имеет размерность (пс/ $\sqrt{\text{км}}$ ), а  $\tau_{\text{pmd}}$  растет с ростом расстояния по закону  $\tau_{\text{pmd}}=T \cdot \sqrt{L}$ . Для учета вклада в результирующую дисперсию следует добавить слагаемое  $\tau_{\text{pmd}}$  в правую часть (2.1). Из-за небольшой величины  $\tau_{\text{pmd}}$  может проявляться исключительно в одномодовом волокне, причем когда используется передача широкополосного сигнала (полоса пропускания 2.4 Гбит/с и выше) с очень узкой спектральной полосой излучения 0.1 нм и меньше. В этом случае хроматическая дисперсия становится сравнимой с поляризационной модовой дисперсией.

В одномодовом волокне в действительности может распространяться не одна мода, а две фундаментальные моды – две перпендикулярные поляризации исходного сигнала. В идеальном волокне, в котором отсутствуют неоднородности по геометрии, две моды распространялись бы с одной и той же скоростью, рис. 9.6, а. Однако на практике волокна имеют не идеальную геометрию, что приводит к различной скорости распространения двух поляризационных составляющих мод, рис. 9.6, б.

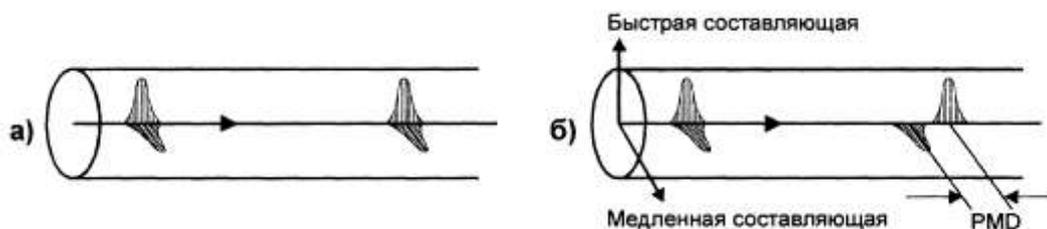


Рис. 9.6. Появление поляризационной модовой дисперсии

Избыточный уровень  $\tau_{\text{pmd}}$ , проявляясь вместе с chirпированным модулированным сигналом от лазера, а также поляризационной зависимостью потерь, может приводить к временным колебаниям амплитуды аналогового видеосигнала. В результате ухудшается качество изображения, или появляются диагональные полосы на телевизионном экране. При передаче цифрового сигнала высокой полосы (>2,4 Гбит/с) из-за наличия  $\tau_{\text{pmd}}$  может возрастать битовая скорость появления ошибок.

Главной причиной возникновения поляризационной модовой дисперсии является нециркулярность (овальность) профиля сердцевины одномодового волокна, возникающая в процессе изготовления или эксплуатации волокна. При изготовлении волокна только строгий контроль позволяет достичь низких значений этого параметра.

### **9.3. контрольные вопросы**

1. Из чего складывается полное затухание в оптоволокне?
2. Чем обусловлены потери на поглощение?
3. Чем обусловлены потери на рассеяние?
4. В каком диапазоне вклад собственных потерь в оптическом волокне наиболее существенен?
5. Вследствие чего возникают кабельные потери?
6. Как связана дисперсия и полоса пропускания?
7. Какие виды дисперсии существуют?
8. Что такое длина волны нулевой дисперсии?
9. Какие методы определения хроматической дисперсии существуют?
10. Чем обусловлена поляризационная модовая дисперсия?

## РАЗДЕЛ 10. ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН.

---

### 10.1. Относительная разность показателей преломления

Волокно состоит из сердцевины и оболочки. Оболочка окружает оптически более плотную сердцевину, являющуюся светонесущей частью волокна, рис. 10.1. Будем обозначать через  $n_1$  и  $n_2$  показатели преломления сердцевины и оболочки, соответственно. Один из важных параметров, который характеризует волокно, это – относительная разность показателей преломления  $\Delta$ :

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2}. \quad (10.1)$$

Если показатель преломления оболочки выбирается всегда постоянной величиной, то показатель преломления сердцевины в общем случае может зависеть от радиуса. В этом случае для проведения различных оценок параметров волокна в место  $n_1$  используют  $n_{1\text{eff}}$ .

Распространение света по волокну можно объяснить на основе принципа полного внутреннего отражения, вытекающего из закона преломления света Снеллиуса:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2, \quad (10.2)$$

где  $n_1$  – показатель преломления среды 1,  $\theta_1$  – угол падения,  $n_2$  – показатель преломления среды 2,  $\theta_2$  – угол преломления.

Формальные выкладки удобнее производить для ступенчатого волокна (волокна со ступенчатым профилем показателя преломления), в котором показатель преломления сердцевины является постоянной величиной ( $n_1 = \text{const}$ ). На рис. 10.1 показан ход лучей в таком волокне. Так как сердцевина является оптически более плотной средой по отношению к оболочке ( $n_1 > n_2$ ),

то существует критический угол падения  $\theta_c$  – внутренний угол падения на границу, при котором преломленный луч идет вдоль границы сред ( $\theta_2 = 90^\circ$ ). Из закона Снеллиуса легко найти этот критический угол падения:

$$\theta_c = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right). \quad (10.3)$$

Если угол падения на границу раздела меньше критического угла падения (луч 2), то при каждом внутреннем отражении часть энергии рассеивается наружу в виде преломленного луча, что приводит в конечном итоге к затуханию света. Если же угол падения больше критического угла (луч 1), то при каждом отражении от границы вся энергия возвращается обратно в сердцевину благодаря полному внутреннему отражению.

Лучи, траектории которых полностью лежат в оптически более плотной среде, называются направляемыми. Поскольку энергия в направляемых лучах не рассеивается наружу, такие лучи могут распространяться на большие расстояния.



Рис. 10.1. Ход лучей в многомодовом оптическом волокне со ступенчатым профилем

## 10.2. Числовая апертура.

Важным параметром, характеризующим волокно, является числовая апертура  $NA$ . Она связана с максимальным углом  $\theta_A$  вводимого в волокно излучения из свободного пространства, при котором свет испытывает полное внутреннее отражение и распространяется по волокну, формулой:

$$NA = \sin \theta_A. \quad (10.4)$$

Фирмы-изготовители волокна экспериментально измеряют угол  $\theta_A$  и указывают соответствующее значение числовой апертуры для каждого поставляемого типа волокна. Для волокна со ступенчатым профилем легко получить значение числовой апертуры, выраженное через показатели преломления:

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = n_1 \sqrt{2\Delta}. \quad (10.5)$$

Для градиентного волокна используется понятие локальной числовой апертуры  $NA(r) = \sqrt{n_1^2(r) - n_2^2}$ , значение которой максимально на оси и падает до 0 на границе сердцевины и оболочки. Для градиентного волокна с параболическим профилем показателя преломления определяется эффективная числовая апертура, которая равна

$$NA_{eff} = \sqrt{n_1^2(0) - n_2^2} / \sqrt{2}, \quad (10.6)$$

где  $n_1(0)$  – максимальное значение показателя преломления на оси.

### 10.3. Нормированная частота.

Другим важным параметром, характеризующим волокно и распространяющийся по нему свет, является *нормированная частота*  $V$ , которая определяется как

$$V = \pi \cdot d \cdot NA / \lambda, \quad (10.7)$$

где  $d$  – диаметр сердцевины волокна.

### 10.4. Номенклатура мод.

При более строгом рассмотрении процесса распространения света по волокну следует решать волновые уравнения Максвелла. Именно в этой трактовке лучи ассоциируются с волнами, причем различные типы волн – решения уравнений – называются *модами*. Сами моды обозначаются буквами  $E$  и/или  $H$  с двумя индексами  $n$  и  $m$  ( $E_{nm}$  и  $H_{nm}$ ). Индекс  $n$  характеризует азимутальные свойства волны (число изменений поля по окружности), а  $m$  – радиальные (число изменений поля по диаметру). По оптическому волокну распространяются только два типа волн: симметричные ( $E_{0m}$  и  $H_{0m}$ ), у которых только одна продольная составляющая, и несимметричные (смешанные) ( $E_{nm}$  и  $H_{nm}$ ), у которых имеется две продольные составляющие. При этом, если преобладает продольная составляющая электрического поля –  $E_z$ , то волна обозначается  $EH_{nm}$ , а если преобладает продольная составляющая магнитного поля –  $H_z$ , то волна называется  $HE_{nm}$ . Сопоставляя волновую теорию с геометрической оптикой, следует отметить, что симметричные моды  $E_{0m}$  и  $H_{0m}$  соответствуют меридиональным лучам, несимметричные моды  $E_{nm}$  и  $H_{nm}$  – косым лучам.

По волокну могут распространяться как только одна мода – одномодовый режим, так и много мод – многомодовый режим. Многомодовый или одномодовый характер идущего по волокну света коренным образом влияет на

дисперсию, а следовательно, и на пропускную способность волокна. Расчет на основе уравнений Максвелла позволяет найти простой критерий распространения одной моды:  $V < 2.405$  (точное значение константы в правой части неравенства определяется первым нулем функции Бесселя  $I_0(x)$ ). Это гибридная мода  $HE_{11}$ . Отметим, что нормированная частота явно зависит от длины волны света. В табл. 10.1 приведены значения нормированной частоты, вычисленные по формуле (10.7).

Как видно из табл. 10.1, в одномодовом ступенчатом волокне при длине волны света 1550 нм выполняется критерий  $V < 2.405$ , и поэтому распространяется только одна мода. При длине волны 1310 нм критерий не выполнен, что означает возможность распространения нескольких мод в одномодовом волокне на этой длине волны. На практике, однако, волокно помещается в кабель, который, будучи проложенным, имеет множество изгибов. Особенно велики искривления волокна в сплайс-боксах. Искривление волокна приводит к быстрому затуханию неосновных мод. Во всех остальных случаях наблюдается многомодовый характер распространения света. Отметим, что при длине волны 850 нм критерий  $V < 2.405$  нарушается для всех типов волокон. Таким образом, если вводить излучение длиной волны 850 нм в одномодовое волокно, то иметь место будет многомодовый режим распространения света. Противоречия здесь нет. Дело в том, что ступенчатое одномодовое волокно 8/125 предназначено для использования в спектральных окрестностях двух длин волн: 1310 нм и 1550 нм, где оно в истинном смысле проявляет себя как одномодовое.

Таблица 10.1 Значения основных оптических параметров волокон и нормированной частоты  $V$  для различных длин волн

№	Оптическое волокно				$\lambda$ (нм)		
	Название и диаметр	$\Delta$ (%)	$n_1$	NA	1550	1310	850
1	step MMF 200/240	-	-	0.39	$V=158.09$	187.06	288.29
2	step MMF 100/140	-	-	0.29	58.77	69.54	107.18
3	grad MMF 62,5/125	2.1	1.47	0.28	35.46	41.96	64.67
4	grad MMF 50/125	1.25	1.46	0.20	20.26	23.98	36.95
5	step SMF (SF) 8,3/125	0.36	1.468	0.13	2.187	2.588	3.990

Обозначения: step MMF (multi mode fiber) – ступенчатое многомодовое волокно; step SMF (single mode fiber) – ступенчатое одномодовое волокно; grad MMF – градиентное многомодовое волокно

## 10.5. Количество мод.

Если при  $V < 2,405$  может распространяться только одна мода, то с ростом  $V$  количество мод начинает резко расти, причем новые типы мод "включаются" при переходе  $V$  через определенные критические значения, табл. 10.2.

Таблица 10.2 Номенклатура мод низких порядков

Нормированная частота $V$	Число мод $N_m$	Типы мод
0 – 2.405	1	HE <sub>11</sub> – основная мода (единственная допустимая для одномодового волокна)
2.405 – 3.832	4	HE <sub>11</sub> , H <sub>01</sub> , E <sub>01</sub> , HE <sub>21</sub>
3.832 – 5.136	7	HE <sub>11</sub> , H <sub>01</sub> , E <sub>01</sub> , HE <sub>21</sub> , HE <sub>12</sub> , EH <sub>11</sub> , HE <sub>31</sub>
5.136 – 5.52	9	HE <sub>11</sub> , H <sub>01</sub> , E <sub>01</sub> , HE <sub>21</sub> , HE <sub>12</sub> , EH <sub>11</sub> , HE <sub>31</sub> , EH <sub>21</sub> , HE <sub>41</sub>
5.52 – 6.38	12	HE <sub>11</sub> , H <sub>01</sub> , E <sub>01</sub> , HE <sub>21</sub> , HE <sub>12</sub> , EH <sub>11</sub> , HE <sub>31</sub> , EH <sub>21</sub> , HE <sub>41</sub> , H <sub>02</sub> , E <sub>02</sub> , HE <sub>22</sub>
6.38 – 7.02	14	HE <sub>11</sub> , H <sub>01</sub> , E <sub>01</sub> , HE <sub>21</sub> , HE <sub>12</sub> , EH <sub>11</sub> , HE <sub>31</sub> , EH <sub>21</sub> , HE <sub>41</sub> , H <sub>02</sub> , E <sub>02</sub> , HE <sub>22</sub> , EH <sub>31</sub> , HE <sub>51</sub>
7.02 – 7.59	17	HE <sub>11</sub> , H <sub>01</sub> , E <sub>01</sub> , HE <sub>21</sub> , HE <sub>12</sub> , EH <sub>11</sub> , HE <sub>31</sub> , EH <sub>21</sub> , HE <sub>41</sub> , H <sub>02</sub> , E <sub>02</sub> , HE <sub>22</sub> , EH <sub>31</sub> , HE <sub>51</sub> , HE <sub>13</sub> , EH <sub>12</sub> , HE <sub>31</sub>
7.59 – 8.42	19	HE <sub>11</sub> , H <sub>01</sub> , E <sub>01</sub> , HE <sub>21</sub> , HE <sub>12</sub> , EH <sub>11</sub> , HE <sub>31</sub> , EH <sub>21</sub> , HE <sub>41</sub> , H <sub>02</sub> , E <sub>02</sub> , HE <sub>22</sub> , EH <sub>31</sub> , HE <sub>51</sub> , HE <sub>13</sub> , EH <sub>12</sub> , HE <sub>31</sub> , EH <sub>41</sub> , HE <sub>61</sub>

При больших значениях  $V$  количество мод  $N_m$  для ступенчатого волокна можно оценить по формуле:

$$N_m = \frac{1}{2} V^2 = \frac{1}{2} \left( \frac{\pi d}{\lambda} NA \right)^2 = \frac{1}{2} \left( \frac{\pi d}{\lambda} \right)^2 \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (10.8)$$

Значение этого выражения может быть как целым, так и дробным. В действительности же число мод может быть только целым и составлять величину от одной до нескольких тысяч.

Количество мод для градиентного оптического волокна с параболическим профилем сердцевины:

$$n(r) = \begin{cases} n_1 \sqrt{1 - 2\Delta \left( \frac{r}{a} \right)^2}, & 0 \leq r \leq a \\ n_2 & a \leq r \leq b \end{cases} \quad (10.9)$$

( $a$  – радиус сердцевины,  $b$  – радиус оболочки) определяется так:

$$N_m = \frac{1}{4} \left( \frac{\pi d}{\lambda} \right)^2 (n_1^2 - n_2^2) \quad (10.10)$$

На рис. 10.2 показана общая картина распространения света по разным типам световодов: многомодовому ступенчатому, многомодовому градиентному, и одномодовому ступенчатому волокну.

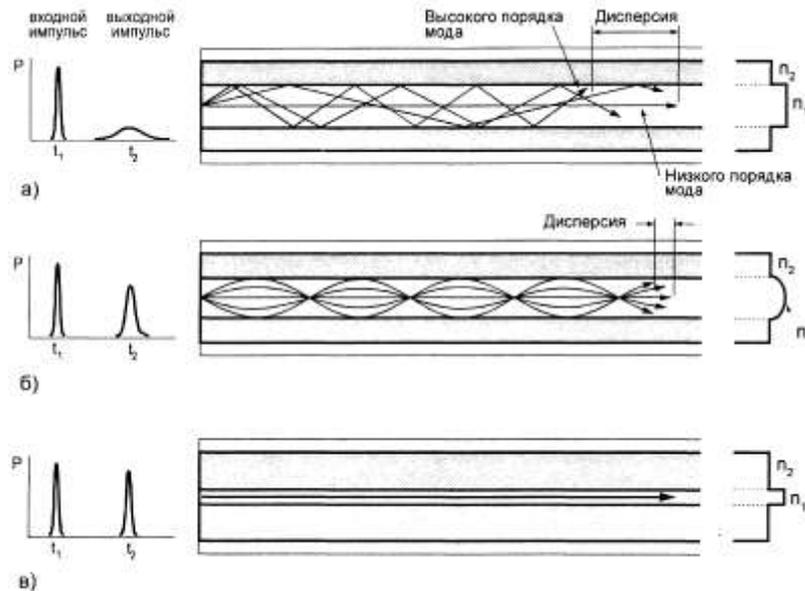


Рис. 10.2. Распространение света по разным типам волокон:

- а) многомодовое ступенчатое волокно,
- б) многомодовое градиентное волокно,
- в) одномодовое ступенчатое волокно

## 10.6. Длина волны отсечки (cutoff wavelength)

Минимальная длина волны, при которой волокно поддерживает только одну распространяемую моду, называется *длиной волны отсечки*. Этот параметр характерен для одномодового волокна. Если рабочая длина волны меньше длины волны отсечки, то имеет место многомодовый режим распространения света. В этом случае появляется дополнительный источник дисперсии – межмодовая дисперсия, ведущий к уменьшению полосы пропускания волокна.

Различают *волоконную длину волны отсечки* ( $\lambda_{CF}$ ) и *кабельную длину волны отсечки* ( $\lambda_{CCF}$ ). Первая соответствует слабо напряженному волокну. На практике же волокно помещается в кабель, который при прокладке испытывает множество изгибов. Кроме этого, сильные искривления волокон происходят при их укладке в сплайс-боксах. Все это ведет к подавлению побочных мод и смещению  $\lambda_{CCF}$  в сторону коротких длин волн по сравнению с  $\lambda_{CF}$ .

С практической точки зрения кабельная длина волны отсечки представляет больший интерес.

Волоконную длину волны отсечки можно оценить как теоретически, так и

экспериментально. Теоретически легко это сделать для ступенчатого одномодового волокна – на основании выражений (10.7), (10.8) и (10.10) получаем

$$\lambda_{CF} = \pi \cdot d \cdot NA / 2.405 = 1,847 \cdot d \cdot n_1 \cdot \sqrt{\Delta}. \quad (10.11)$$

Длину волны  $\lambda_{CCF}$ , в отличие от  $\lambda_{CF}$ , можно оценить только экспериментальным образом. Одним из практических методов измерения длин волн отсечки  $\lambda_{CF}$  и  $\lambda_{CCF}$  является метод передаваемой мощности (transmitted power method). Сравнивается измеренная переданная спектральная мощность в зависимости от длины волны для образца одномодового волокна длиной 2 м с аналогичным параметром, полученным на образце многомодового волокна. Строится кривая

$$A_m(\lambda) = 10 \lg \frac{P_s(\lambda)}{P_m(\lambda)} \text{ [дБ]} \quad (10.12)$$

где  $A_m$  – разница затуханий;  $P_s$  – мощность на выходе одномодового волокна;  $P_m$  – мощность на выходе многомодового волокна.

Многомодовое волокно является эталонным. При этом один и тот же источник излучения с перестраиваемой длиной волны используется как для одномодового, так и многомодового волокна. Строится кривая  $A_m(\lambda)$ , рис. 10.3, длинноволновый участок которой 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.

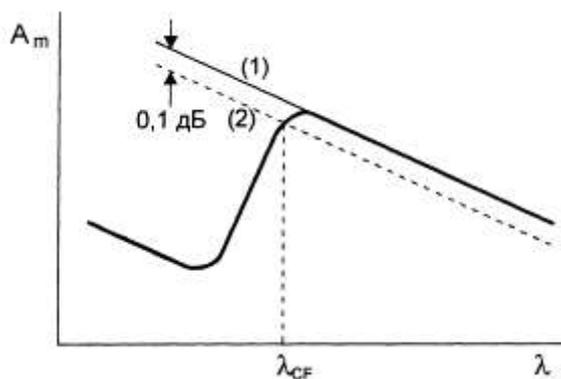


Рис. 10.3. Определение длины волны отсечки

Концы волокна очищаются от защитного покрытия, скалываются – угол скола не должен превышать  $2^\circ$ . Диаметр светового пятна от источника излучения – 200 мкм; числовая апертура вводимого излучения 0.20; полная ширина спектра излучения  $<10$  нм, измеренная на полумаксимуме; измеряемый диапазон длин волн от 1000 нм до 1600 нм с шагом 10 нм.

При измерении длины волны отсечки волокна  $\lambda_{CF}$  образец волокна должен

иметь длину 2 м и располагаться таким образом, чтобы образовывалась одна петля радиусом 140 мм, рис. 10.4 а. Не должно быть дополнительных изгибов волокна с радиусом, меньшим 140 мм. Экспериментально измеренная длина волны отсечки волокна близка к теоретическому значению, которое можно получить из критерия (10.7), если обратить его в равенство.

При измерении кабельной длины волны отсечки  $\lambda_{CCF}$  тестируемый образец волокна должен иметь длину 22 м. Большая часть волокна свертывается 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 сплайс-блоках, рис. 10.4 б. И, наконец, в средней части делается две дополнительные петли радиусом, меньшим 140 мм.

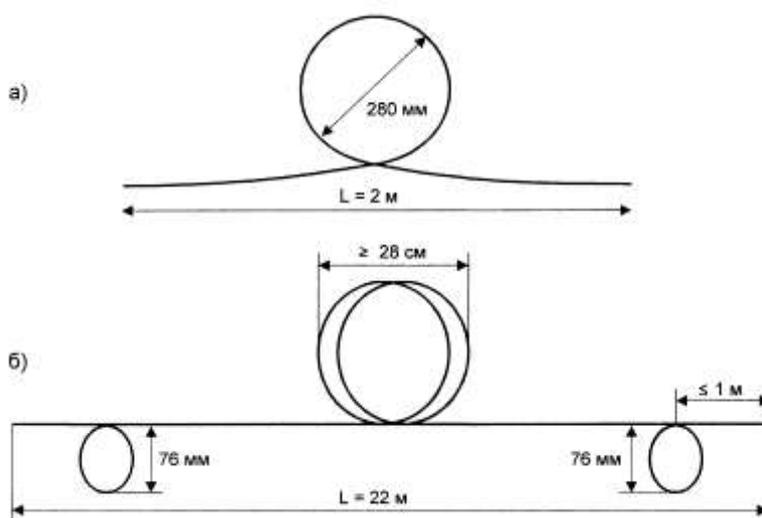


Рис. 10.4. Размещение волокна: а) при определении  $\lambda_{CF}$ ; б) при определении  $\lambda_{CCF}$

## 10.7. Контрольные вопросы

1. Что такое относительная разность показателей преломления?
2. Как записывается закон преломления света Снеллиуса?
3. Что показывает числовая апертура?
4. Что такое нормированная частота?
5. Какие моды существуют в оптических волокнах?
6. При каком условии оптическое волокно работает в одномодовом режиме?
7. При каком условии оптическое волокно работает в многомодовом режиме?
8. Какой критерий распространения только одной моды в световоде?
9. Что такое длина волны отсечки?
10. Как определяется кабельная длины волны отсечки?

## **РАЗДЕЛ 11. НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ**

---

В этой лекции мы кратко рассмотрим семь различных явлений:

1. вынужденное рассеяние Бриллюэна (SBS),
2. вынужденное Рамановское рассеяние (SRS),
3. фазовую самомодуляцию (ФСМ),
4. четырехволновое смешение (ЧВС),
5. модуляционную нестабильность (МН),
6. формирование солитона,
7. фазовую кросс-модуляцию.

Эти нелинейности могут быть разбиты на две основные группы: нелинейности связанные с эффектами рассеяния (рассеяния Бриллюэна и Рамана) и эффектами типа эффекта Керра, который состоит в изменении показателя преломления материала под действием электрического поля, что приводит к зависимости показателя преломления от интенсивности излучения. К этой группе нелинейностей относят фазовую самомодуляцию, фазовую кросс-модуляцию, модуляционную нестабильность, солитоны и четырехволновое смешение. Эти эффекты определяются следующими параметрами оптического волокна и сигнала, распространяющегося по нему: дисперсионными характеристиками волокна, эффективной площадью сердцевины волокна, числом и шагом между оптическими каналами в многоканальных системах, полной не регенерируемой длиной системы, интенсивностью сигнала и толщиной излучаемой спектральной линии.

### **11.1. Бриллюэновское и Рамановское рассеяния**

Стимулированное Бриллюэновское рассеяние (SBS – Stimulated Brillouin Scattering) устанавливает верхний предел на уровень оптической мощности, который может быть передан по оптическому волокну. При превышении определенного уровня оптической мощности, именуемого порогом SBS, в ОВ возникает акустическая волна (см. рис. 11.1), под воздействием которой

меняется величина показателя преломления  $n$ . Изменения  $n$  вызывают рассеяние света, приводя к дополнительной генерации акустических волн.

В конечном счете, вследствие этого эффекта, возникает волна со смещенной частотой (волна Стокса – Stokes), распространяющаяся в обратном направлении к источнику света (рис. 11.1), в результате чего полезная передаваемая оптическая мощность ослабляется (рис. 11.2). Тем самым ограничивается предельно достижимая мощность, которая может быть передана передатчиком в линию. Отметим, что при малых оптических мощностях (т.е. до порога SBS см. рис. 11.2) отраженная световая волна увеличивается прямо пропорционально уровню подводимой оптической мощности, т.е. подчиняется Бриллюэновскому и Рэлеевскому законам рассеяния, и отличается друг от друга на постоянную величину, определяемую законом рассеяния Бриллюэна-Мандельштама (в основном зависит от эффективной площади ядра ОВ –  $A_{эфф}$  для данного материала). И только после превышения порога SBS наступает лавинный процесс увеличения мощности отраженной волны. Типовое значение порога SBS для линии протяженностью в 10 км составляет 6...10 дБм. Выше этого уровня наблюдается значительное увеличение потерь ОВ, зависящих от уровня вводимой оптической мощности.

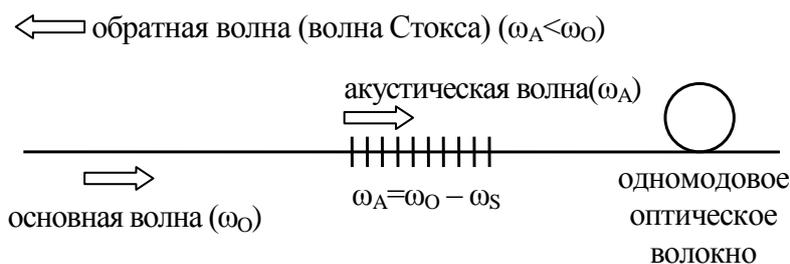


Рис. 11.1.

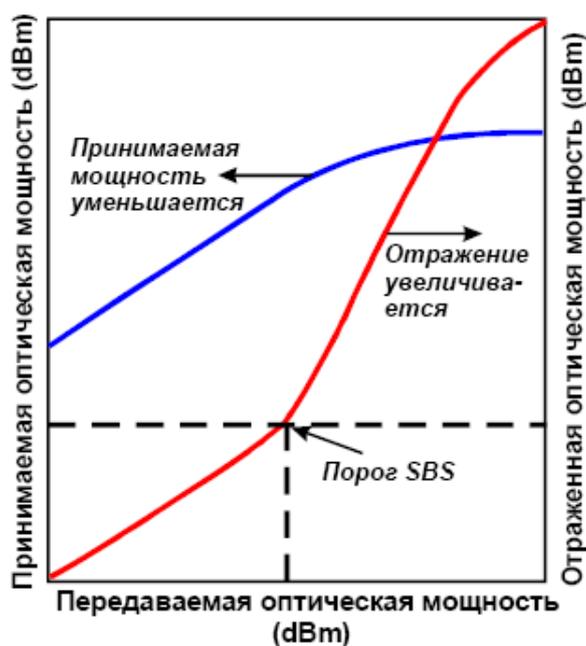


Рис. 11.2.

Помимо эффекта снижения полезной мощности возникают и шумы (повышается относительная интенсивность шума – RIN, например, с -155 дБ/Гц до -138 дБ/Гц), ухудшающие характеристики BER (вероятность возникновения ошибки). Особенно важно контролировать SBS в высокоскоростных транспортных оптических системах, обязательно используя модуляторы с внешней модуляцией (External modulators) и лазерные источники непрерывных колебаний (CW – Continuous Wave). Предварительно отметим, что традиционные уровни сигналов в CATV на длине волны 1550 нм часто вызывают эффект SBS, т.к. находятся обычно в пределах 8...14 дБ, т.е. выше типового значения порога SBS.

Появляющаяся акустическая волна (с частотой  $\omega_A$ , см. рис. 11.2) по своей природе является гиперзвуковой, и ее частотный спектр может располагаться до 10...13 ТГц ( $10^{13}$  Гц). Бриллюэновское частотное смещение  $\nu_B$ , определяемое частотой акустической волны  $\omega_A$  по формуле:

$$\nu_B = \frac{\omega_A}{2\pi} = \frac{2n\nu_A}{\lambda_0}. \quad (11.1)$$

Так, для  $\lambda=1550$  нм скорость акустической волны в кварцевом ОВ составляет  $\nu_A \approx 5 \times 10^3$  м/с и  $\nu_B \approx 10$  ГГц ( $\sim 0,1$  нм). Часто, для лучшего восприятия физики процесса, частотное Бриллюэновское смещение сравнивают с модуляцией светового потока акустической гиперзвуковой волной или эффектом Доплера. Графическое представление Бриллюэновского смещения приведено на рис. 11.4.

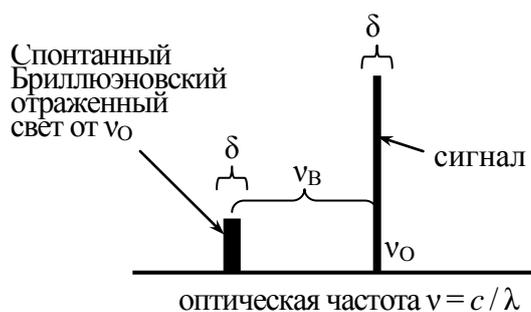


Рис. 11.3.

Стимулированное Рамановское рассеяние (SRS – Stimulated Raman Scattering) представляет собой значительно меньшую проблему в сравнении со стимулированным Бриллюэновским рассеянием (SBS). Реальные волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) допускают использование оптического усилителя (EDFA) с уровнем порядка 25 дБм или нескольких усилителей с меньшим уровнем выходного сигнала.

SRS по своему характеру проявления близко к SBS, но вызывается другими физическими явлениями. SRS является частотно зависимым и

проявляется более выражено на коротких волнах в сравнении с длинноволновыми (т.е. на более высоких частотах).

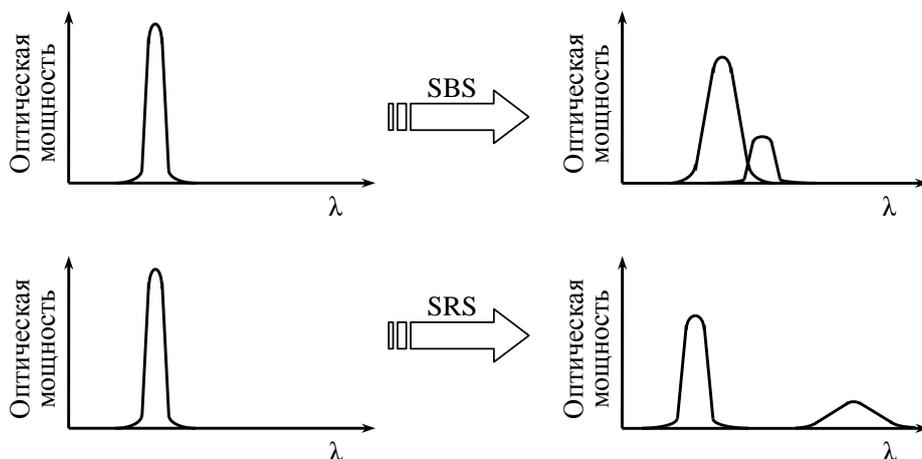


Рис. 11.4.

Явления SBS и SRS проявляются в том, что оптический сигнал рассеивается и смещается в область более длинных волн (рис. 11.4). Если при SBS спектр стимулированного излучения узкий (не более 60 МГц) и смещен в длинноволновую сторону на 10...11 ГГц, то при SRS спектр стимулированного излучения широкий (~7 ТГц) и смещен в длинноволновую сторону на величину порядка 10...13 ТГц. При схожести SBS и SRS, можно выделить несколько существенных отличий:

- SBS наблюдается только для встречной волны, рассеяние происходит только назад, по направлению к источнику сигнала. SRS же наблюдается как для встречных волн (стоксово излучение с уровнем порядка -50...-60 дБ относительно интенсивности исходного излучения), так и для сонаправленных волн (антистоксово излучение с уровнем порядка -70...-80 дБ относительно основной волны). Стоксовая и антистоксовая волны располагаются частотно симметрично относительно основной передаваемой частоты излучения.
- При SRS спектр стимулированного излучения смещен относительно сильнее (разница примерно на три порядка), а ширина его намного больше (примерно на три порядка), чем при SBS.
- Пороговая мощность SRS намного больше (примерно на три порядка), чем SBS.

## 11.2. Фазовая самомодуляция

Когда выходной уровень источника света становится слишком большим, сигнал может модулировать свою собственную фазу. Как подразумевает само название, это явление является фазовой самомодуляцией (ФСМ). Как показано на рис. 11.5, это приводит к уширению переданного импульса и временному

расширению или сужению сигнала. Что происходит, расширение или сужение, зависит от знака (положительного или отрицательного) хроматической дисперсии. В результате происходит сдвиг фронта импульса в сторону длинных волн и сдвиг среза импульса в сторону коротких волн.

В общем случае влияние ФСМ значительно только в системах с высоким значением накопленной дисперсии или в системах очень большой протяженности.

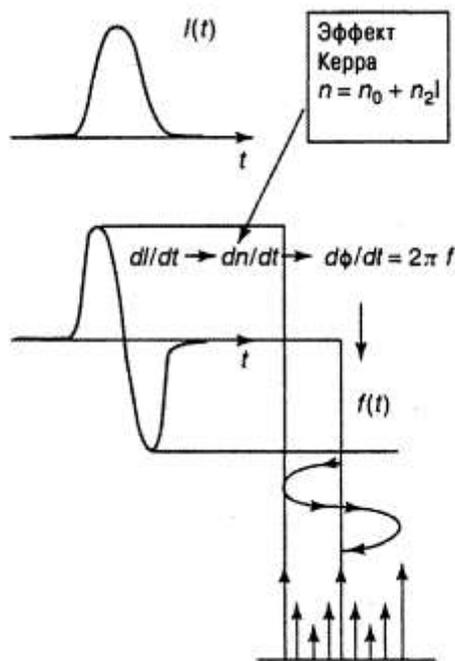


Рис. 11.5. Механизм спектрального уширения за счет фазовой самомодуляции.

### 11.3. Четырехволновое смешение

Четырехволновое смешение появляется тогда, когда интенсивность лазерного сигнала достигает критического уровня. ЧВС заявляет о себе появлением побочных сигналов, некоторые из которых могут соответствовать частотам рабочих каналов. Всякий раз, когда три или более сигналов распространяются по волокну, можно ожидать возникновения ЧВС. Эти три световых сигнала:  $\omega_i, \omega_j, \omega_k$ , генерируют четвертый сигнал  $\omega_{ijk}$ , подчиняющийся соотношению:

$$\omega_{ijk} = \omega_i + \omega_j - \omega_k. \quad (11.2)$$

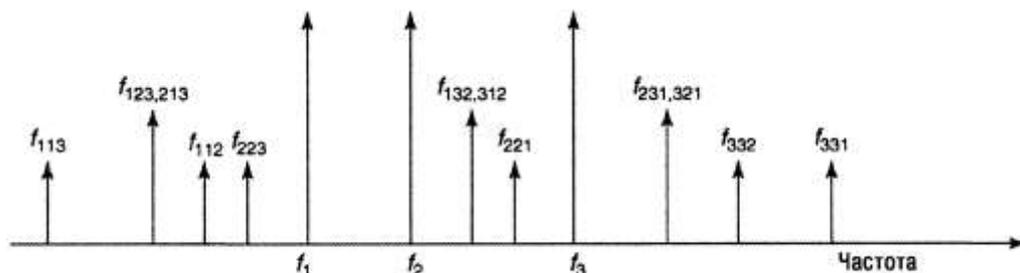


Рис. 11.6. Смесью продуктов, генерируемых благодаря ЧВС, для 3-х оптических сигналов.

В системах DWDM с числом каналов  $N$  общее число возникающих в результате действия ЧВС частот составляет  $N^2(N-1)/2$ . Например, четырехканальная система WDM формирует в результате 24 побочных канала, а восьмиканальная – 224 побочных канала, и т.д.

Уровень ЧВС чувствителен к следующим системным характеристикам:

- увеличению мощности в канале;
- увеличению числа каналов;
- уменьшению шага между каналами.

## 11.4. Модуляционная неустойчивость

Модуляционная неустойчивость (MI) приводит к превращению непрерывного сигнала или импульса в модулированную структуру. Сдвиг частот и усиление боковых полос определяется интенсивностью исходной волны, а также дисперсией и нелинейными коэффициентами волокна. Максимальная эффективность таких преобразований имеет место на частоте сдвига, определяемой из выражения:

$$\Omega_{\max} = \pm \sqrt{\frac{8\pi^2 c n_2 P_0}{\lambda^3 A_{\text{eff}} D(\lambda)}}, \quad (11.3)$$

где  $n_2$  – нелинейный коэффициент преломления диоксида кремния,  $A_{\text{eff}}$  – площадь эффективной области волокна,  $P_0$  – вводимая оптическая мощность,  $D(\lambda)$  – коэффициент хроматической дисперсии,  $\lambda$  — рабочая длина волны.

Боковые полосы располагаются на расстоянии  $\pm\Omega_{\max}$  от несущей, которая испытывает усиление на единицу длины, равное  $g_{\max} = 4\pi P_0 / (\lambda A_{\text{eff}})$ .

## 11.5. Формирование солитона

Солитон — это импульс, который не изменяет своей формы по мере того, как он распространяется по волокну. Он демонстрирует баланс между нелинейностью и дисперсией. Нелинейности волокна противодействуют накапливанию дисперсии при распространении импульса по волокну. Иначе говоря, оптический солитон является результатом баланса между дисперсией групповых скоростей и фазовой самомодуляцией.

Ограничения длины и поддерживаемой скорости передачи солитонной линии связи:

- **Уширение солитонного импульса за счет потерь.** Солитонный импульс должен поддерживать достаточно большую амплитуду в противном случае уменьшенная пиковая мощность ослабляет нелинейные эффекты, необходимые для противодействия влиянию ДГС.

- **Шум усилителя.** Усилители, восстанавливающие энергию солитона, добавляют шум, источником которого является усиленное спонтанное излучение (ASE).
- **Дрожание фазы (джиттер) за счет линейных оптических усилителей.** Джиттер вносит отклонение позиции солитона от исходно предписанной позиции – в центре битового интервала.

Формирование фундаментального солитона может быть полезным, однако, солитоны другого порядка приводят к существенному ухудшению передаваемого сигнала. Следовательно, формирование солитонов более высокого порядка устанавливает предел максимальной мощности, которая может быть введена в волокно.

## 11.6. Фазовая кросс-модуляция

В системах WDM, и в особенности в системах DWDM, фазовая кросс-модуляция – ФКМ постепенно расширяет спектр сигнала, когда изменения оптической интенсивности приведут к изменениям, вызванным взаимодействием между соседними каналами. Величина расширения, вносимого ФКМ, зависит от шага между каналами, т.к. внесенные дисперсией дифференциальные групповые скорости будут вызывать дальнейшее отделение взаимодействующих импульсов при их движении по волокну.

Уширение за счет ФКМ может привести к интерференции соседних каналов в системах WDM.

Влияние ФКМ можно существенно уменьшить, если адекватно выбрать шаг между каналами.

Дополнительные ухудшения за счет дисперсии, вызванные наличием фазовой кросс-модуляции, могут быть устранены при установке в системе через определенные интервалы модулей компенсации дисперсии.

## 11.7. Контрольные вопросы

1. На какие две основные группы могут быть разбиты нелинейные эффекты в оптических волокнах?
2. В чем состоит эффект Керра?
3. Какими параметрами сигнала определяются нелинейные эффекты?
4. Когда возникает вынужденное Бриллюэновское рассеяние?
5. Как проявляется вынужденное Рамановское рассеяние?
6. К чему приводит фазовая самомодуляция?
7. Когда проявляется четырехволновое смешение?
8. К чему приводит модуляционная неустойчивость?
9. Что такое солитон? Как он возникает?
10. Как проявляется фазовая кросс-модуляция?

## **РАЗДЕЛ 12. СОЕДИНЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН**

---

Самым важным вопросом передачи информации по ВОЛС является обеспечение надежного соединения оптических волокон. Оптический соединитель – это устройство, предназначенное для соединения различных компонентов волоконно-оптического линейного тракта в местах ввода и вывода излучения. Такими местами являются: оптические соединения оптоэлектронных модулей (приемников и передатчиков) с волокном кабеля, соединения отрезков оптических кабелей между собой, а также с другими компонентами. Различают неразъемные и разъемные соединители. *Неразъемные соединители* используются в местах постоянного монтажа кабельных систем. Основным методом монтажа, обеспечивающим неразъемное соединение, является *сварка*. *Разъемные соединители* (широко употребляется термин *коннекторы, connectors*) допускают многократные соединения/разъединения. Промежуточное положение занимают соединения типа *механический сплайс*.

### **12.1. Разъемные соединители**

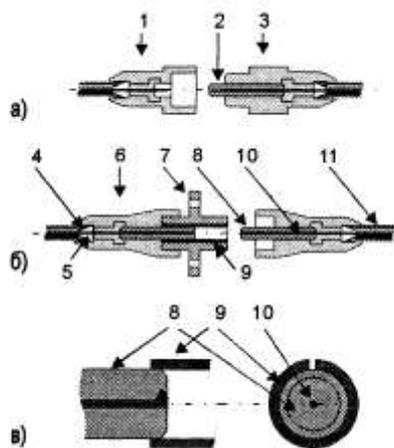
#### **12.1.1. Конструкции разъемных соединителей**

По конструкции соединения бывают симметричными и несимметричными. Упрощенные схемы соединений показаны на рис. 12.1.

*При несимметричной конструкции* для организации соединения требуется два элемента: соединитель гнездовой и соединитель штекерный, рис. 12.1, *а*. Оптическое волокно в капиллярной трубке коннектора-штекера не доходит до торца капилляра, а остается в глубине. Напротив, волокно в гнездовом соединителе выступает наружу. При организации соединения физический контакт волокон происходит внутри наконечника-капилляра, который обеспечивает соосность волокон. Открытое волокно, и капиллярная полость у этих соединителей являются основными недостатками, снижающими надежность несимметричной конструкции. Особенно недостатки сказываются при большом количестве переподключений. Поэтому такой тип конструкции

получил меньшее распространение.

При симметричной конструкции для организации соединения требуется три элемента: два соединителя и переходная розетка (coupling), рис. 12.1, б. Главным элементом соединителя является наконечник (ferrule). Переходная розетка снабжается центрирующим элементом, выполненным в виде трубки с продольным разрезом – должен быть контакт между наконечником и центрирующим элементом розетки, рис. 12.1, в. Центрирующий элемент плотно охватывает наконечники и обеспечивает их строгую соосность.



Обозначения:

1. соединитель гнездовой;
2. наконечник-капилляр;
3. соединитель штекерный;
4. кевларовые нити;
5. эпоксидный наполнитель;
6. соединитель;
7. переходная соединительная розетка (адаптер);
8. оптический наконечник;
9. центрирующий элемент розетки;
10. оптическое волокно;
11. миникабель

Рис. 12.1. Конструкции соединителей:

а) несимметричная;

б) симметричная;

в) наконечник и центратор розетки симметричного соединителя

К соединителям предъявляются следующие основные требования: малые вносимые потери, малое обратное отражение, устойчивость к внешним механическим, климатическим и другим воздействиям, высокая надежность и простота конструкции, незначительное ухудшение характеристик после многократных повторных соединений.

### 12.1.2. Потери обусловленные соединением волокон

Коэффициент передачи оптической мощности (коэффициент прохождения)  $D$  при торцевом соединении определяется как  $D = P_{out}/P_{in}$ , а вносимые потери  $a$  – исходя из соотношения  $a = -10 \lg D = -10 \lg P_{out}/P_{in}$  [дБ], где  $P_{in}$  и  $P_{out}$  соответственно интенсивности излучения на входе и выходе соединения. Точный замер этих параметров на практике соответствует следующей процедуре. Сначала находят интенсивность на непрерывном участке волокна, что соответствует градуировке приемника ( $P_{in}$ ). Затем разрывают волокно и после оконцевания соединителями мест разрыва вновь соединяют. Вторичный замер интенсивности соответствует  $P_{out}$ . Обычно вносимые потери зависят от типа волокна (многомодовое или одномодовое), типов и качества соединителей и составляют от 0,3 до 0,5 децибела. Вносимые

потери можно разбить на две категории: внутренние и внешние потери.

**Внутренние потери** определяются факторами, которые невозможно контролировать (достичь их улучшения при заделке волокна в соединитель), а именно парной вариацией диаметров сердцевин, показателей преломления, числовых апертур, эксцентриситетов сердцевина/оболочка и концентричностей сердцевин у волокон с разных сторон. Причем следует аддитивно учитывать все эти потери. Эти факторы проявляются меньше на непрерывном сегменте оптического кабеля, так как они плавно меняются с длиной. На внутренние потери влияет технология производства волокна и соответствующие критерии контроля качества, а не конструктор соединителя. Зная разброс значений перечисленных выше параметров, можно определить максимальное значение внутренних потерь.

*Потери из-за вариации показателей преломления* являются следствием чисто френелевского отражения и определяются в простейшем случае для волокна со ступенчатым профилем как  $a_F = -10 \lg(4n_1n_2/(n_1+n_2)^2)$  [дБ], где  $n_1$  и  $n_2$  – показатели преломления волокон (зазора между волокнами нет). Эти потери пропадают только при равенстве показателей преломления.

*Потери при вариации апертур* возникают в том случае, если апертура волокна, передающего сигнал  $NA_1$ , больше апертуры волокна, принимающего сигнал  $NA_2$ , и определяются как  $a_{NA} = -10 \lg(NA_2/NA_1)^2$  [дБ]. При  $NA_1 < NA_2$  апертурные потери не возникают.

*Потери при вариации диаметров* возникают, когда диаметр передающего волокна меньше диаметра принимающего, и определяются соотношением  $a_D = -10 \lg(D_2/D_1)^2$  [дБ], где  $D_1$  и  $D_2$  – диаметры передающего и принимающего волокон, соответственно. При  $D_1 < D_2$  потери не возникают.

*Соединение волокон 62,5/125 и 50/125.* Если свет распространяется из волокна 50/125 в волокно 62,5/125, то потери интенсивности света не происходит. Если же свет переходит из волокна 62,5/125 в волокно 50/125, то только доля  $(50/62,5)^2$  интенсивности света будет во втором волокне, что соответствует потерям 1,94 дБ. Этот факт учитывается при производстве оптических приемопередатчиков. Так, обычно светодиод передатчика рассчитан на волокно меньшего диаметра (50 мкм), а приемник в этом же устройстве на волокно большего диаметра (62,5 мкм).

*Соединение многомодового и одномодового волокон.* Большие внутренние потери (примерно 16 дБ) возникают при сопряжении многомодового и одномодового волокна, когда свет распространяется из первого во второе волокно.

**Внешние потери** – это потери, которые являются следствием несовершенства как самой конструкции соединителя, так и процесса сборки оптического шнура. Внешние потери зависят от таких факторов как: механическая нестыковка (угловое смещение  $\theta$ , радиальное смещение  $L$ , осевое смещение  $S$ ); шероховатости на торце сердцевин; загрязнение участка между торцами волокон, рис. 12.2.

Потери при угловом  $\theta$ , радиальном  $L$  и осевом  $S$  смещениях определяются

соответственно формулами (рис. 12.2 а, б, в):

$$a_{\theta} = -10 \lg \left( 1 - \frac{2}{\pi} \frac{\theta}{\arcsin NA} \right) [\text{дБ}], \quad (12.1)$$

$$a_L = -10 \lg \left[ 1 - \frac{4}{\pi} \frac{L}{D} \right] [\text{дБ}], \quad (12.2)$$

$$a_S = -10 \lg \left[ \frac{1}{\left( 1 + 2 \frac{S}{D} \right) \left[ \arcsin \frac{NA}{n_0} \right]} \right]^2 [\text{дБ}], \quad (12.3)$$

где  $NA$  – апертура волокна,  $D$  – диаметр светонесущей части волокна,  $L$  – радиальное смещение,  $S$  – осевое смещение,  $n_0$  – показатель преломления среды, заполняющей пространство стыка.

Некачественная полировка торцов волокон, а также трение, возникающее при многократном переключении соединителей (имеющих физический контакт), может привести еще к одному типу потерь – потерь, связанных с рассеянием на микротрещинах (рис. 12.2, г).

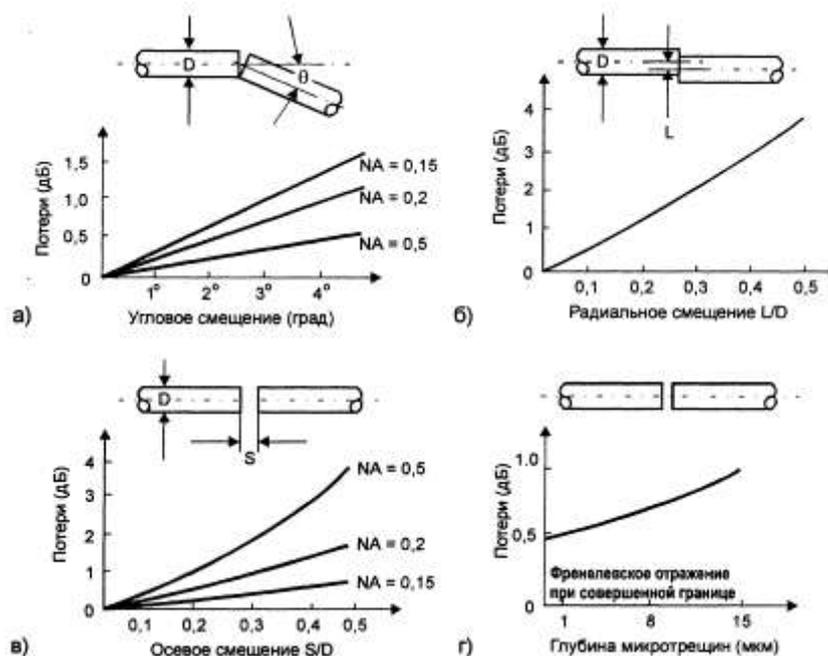


Рис.12.2. Четыре главных вида внешних потерь в соединителе:

- а) потери при угловом смещении;
- б) потери при радиальном смещении;
- в) потери при осевом смещении;
- г) потери из-за френелевского рассеяния на неоднородностях

Приведенное соотношение для потерь при осевом смещении учитывает только фактор апертурной расходимости светового потока. Однако при появлении зазора между волокнами появляется и френелевское отражение из-за того, что среда, заполняющая пространство между открытыми плоскостями торцов волокон имеет отличный от волокон показатель преломления, рис. 12.3.

С учетом двух скачков показателей преломления коэффициент прохождения определяется из соотношения:

$$D_F = \frac{4n_1^2 n^2}{4n_1^2 n^2 + n_1^2 - n^2 \sin^2 \frac{2\pi n S}{\lambda}} \quad (12.4)$$

При величине зазора, сравнимой с длиной волны или большей, по осцилляциям синуса можно произвести усреднение. Тогда потери определяются как  $a_F = -10 \lg D_F = -10 \lg(2n_1 n / (n_1^2 + n^2))$  [дБ], где  $n_1$  – показатель преломления волокна ( $\approx 1,5$ ), одинаковый для обеих сторон,  $n$  – показатель преломления среды в зазоре, рис. 12.3. В случае воздушного зазора ( $n=1$ ) потери составляют 0,35 дБ. Френелевские потери можно уменьшить, подбирая наполнитель между соединителями, близкий по показателю преломления к волокну, или делая зазор много меньше длины волны.

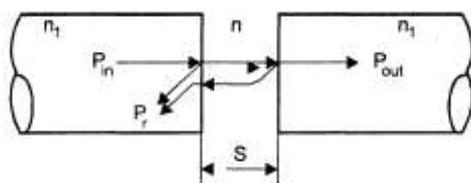


Рис. 12.3. Френелевское отражение

Обычно суммарные потери в соединителе составляют до 0,3 – 0,4 дБ для одномодового и многомодового волокон. При этом, естественно, более жесткие требования предъявляются к качеству одномодового соединителя.

### 12.1.3. Обратное отражение и контакты типа PC, Super PC, Ultra PC, APC

Обратное отражение является вторым по пагубности фактором после вносимых потерь. Коэффициент обратного отражения  $R$  определяется как  $R = P_r / P_{in}$ , а *потери на обратном отражении* или просто *обратные потери*  $b$  – определяются как  $b = 10 \lg R = 10 \lg P_r / P_{in}$  [дБ], где  $P_r$  – интенсивность отраженного излучения. Знак минус (в отличии от соотношения для вносимых потерь) здесь намеренно отсутствует, что ведет к отрицательным значениям для обратных потерь. Лучшими характеристиками обладает соединение с более низкими вносимыми потерями (ближе к 0 дБ) и более низкими (более отрицательными) обратными потерями.

Основным фактором, вносящим вклад в обратное отражение, является френелевское отражение вследствие зазора  $S$  (обычно воздушного) между торцами волокон. Наиболее общее выражение для коэффициента отражения имеет вид

$$R_F = \frac{n_1^2 - n^2 \sin^2 \left( \frac{\pi n S}{\lambda} \right)}{4n_1^2 n^2 + n_1^2 - n^2 \sin^2 \left( \frac{\pi n S}{\lambda} \right)}, \quad (12.5)$$

где  $n_1$  – показатель преломления волокна (одинаковый для обеих сторон),  $n$  – показатель преломления среды в зазоре (рис. 12.3). Обычно пренебрегают разницей в показателях преломления между волокнами при разъемном соединении. Заметим, что  $R_F + D_F = 1$ , что соответствует закону сохранения энергии. Непараллельность торцов приводит к разным значениям зазора  $S$  для разных участков сердцевины. В этом случае, происходит усреднение по осцилляциям синуса, а обратные потери определяются как  $b_F = -10 \lg R_F = -10 \lg \left( \frac{(n_1 - n)^2}{(n_1^2 + n^2)} \right)$  [дБ]. При  $n_1 = 1,5$  и  $n = 1,0$  они равны  $-11$  дБ. Коэффициент отражения может обращаться в нуль при ненулевых значениях зазора  $S$ , когда аргумент синуса кратен  $n$ . Однако практически это невозможно достичь. Более того, это выполнялось бы только для одной длины волны или ее узкой окрестности. Поэтому, только путем уменьшения величины зазора можно достичь более низких значений коэффициента отражения и, соответственно, обратных потерь.

При малых значениях  $S/\lambda$  ( $S/\lambda < 0,1$ ) вклад френелевского отражения во вносимые потери пренебрежимо мал, тем не менее именно френелевское отражение является главным фактором обратных потерь.

Значительное уменьшение зазора достигается при сферической поверхности торцов, что позволяет обеспечить *физический контакт* (physical contact, PC) волокон. Плоскую поверхность торцов не используют, потому, что на практике создание очень близких к нормали поверхностей затруднительно. Более вероятно, что торцы обоих наконечников будут иметь небольшие отклонения, но вполне достаточные, чтобы образовался зазор между сердцевинами волокон, рис. 12.4, а. Так, отклонение на угол  $\varphi = 0,05^\circ$  между плоскостями наконечников приводит к зазору около 1 мкм (диаметр наконечника 2,5 мм). При сферической поверхности торцов соприкосновение всегда происходит в окрестности светонесущей сердцевины волокон, рис. 12.4, б.

Существуют три градации физического контакта, отличающиеся уровнем потерь на обратном отражении: PC <  $-30$  дБ; SuperPC <  $-40$  дБ; UltraPC <  $-50$  дБ.

Радиус кривизны  $R$  при PC-соединении может находиться в диапазоне от 15 до 25 мм. Причиной различных значений является не технология процесса полировки, а разные требования, предъявляемые к разным конструкциям и элементам соединителей (например, к керамическим и металлическим

наконечникам).

Обратное рассеяние может быть еще больше уменьшено при использовании углового (наклонного) физического контакта (angled PC, APC), рис. 12.4 в. При наклонном торце даже в том случае, когда нет физического контакта, сильный отраженный сигнал не распространяется обратно по сердцевине волокна, а попадает в оболочку. Угол наклона  $\theta$  наконечника определяется как угол между осью световодной сердцевины и нормалью к плоскости, касательной в точке поверхности, где находится сердцевина, рис.12.4 в. Потери на обратном отражении для APC обычно меньше  $-60$  дБ, а типичные значения могут быть  $-75$  дБ.

Радиус кривизны  $R$  для APC может находиться в диапазоне от 5 до 15 мм. Уменьшение радиусов кривизны по сравнению с PC объясняется тем, что меньший радиус кривизны обеспечивает большую вариацию угла  $\Delta\theta=\theta_1-\theta_2$  между наконечниками при сохранении физического контакта. При использовании ступенчатого одномодового волокна угол наклона  $\theta$  составляет  $8^\circ$ , что приводит к потерям на обратное отражение в районе  $-70$  дБ. Что касается волокна со смещенной дисперсией, то оно имеет большие числовые апертуры по сравнению со ступенчатым. Поэтому при использовании одномодового волокна со смещенной дисперсией для того, чтобы обеспечить такие же низкие потери на обратном отражении, угол наклона делают больше – стандартизировано значение  $12^\circ$ .

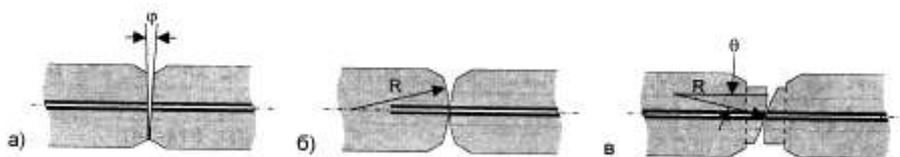


Рис. 12.4. Типы контактов соединителей:

- а) плоская поверхность;
- б) сферическая поверхность – физический контакт (PC);
- в) наклонная сферическая поверхность – угловой физический контакт (APC)

Из-за более сложной процедуры изготовления стандарт APC не получил еще достаточного распространения. Однако в широкополосных абонентских сетях HFC, а также в ультраскоростных оптических магистралях (до 1 Гбит/с и более) рекомендуется использование стандарта APC.

К росту обратного отражения ведет большое количество микротрещин на торцевой поверхности волокна. Уменьшать их количество можно, выбирая оптимальную технологию полировки поверхности наконечника.

#### 12.1.4. Стандарты соединителей

Номенклатура стандартных соединителей достаточно велика: Biconic, D4, D-hole FC, FC, SC, MIC (FDDI), ESCON, SMA, ST, Лист-Х и другие. Наиболее широкое распространение получили соединители SC, ST и FC. Общие же

тенденции говорят о том, что в будущем станет преобладать соединитель SC.

## SC



Рис. 12.5. Стандарт SC: а) соединитель SC; б) соединитель Duplex SC; в) розетка SC; г) розетка Duplex SC; д) розетка 4SC

Соединитель SC считается самым перспективным, и применяется во всех отраслях, связанных с ВОЛС. Прямоугольная форма внешней конструкции с малыми размерами обеспечивают высокую компактность соединителя SC, рис. 12.5 а.

Конструкция – защелка с фиксатором (push-pull) – обеспечивает простое подключение и большую концентрацию соединителей на оптических панелях. Соединитель SC выпускается как на многомодовое, так и на одномодовое волокно. Основные характеристики стандарта SC приведены в табл. 12.1.

## ST

Соединитель ST (рис. 12.6, а, б) появился раньше, чем SC. Его основная область применения – сети передачи данных, в особенности локальные сети. Соединители ST выпускаются как на многомодовое, так и на одномодовое волокно. Соединители ST имеют круглое поперечное сечение, с подпружиненным наконечником и байонетным типом фиксации с ключом. Основные характеристики стандарта ST приведены в табл. 12.1.



Рис. 12.6. Стандарт ST: а) соединитель ST; б) соединитель ST (под волокно во вторичном буфере); в) розетка ST

## FC

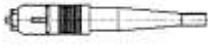
Резьбовой соединитель FC (рис. 12.7, а, б) был разработан в начале 80-х годов. Он имеет наконечник такого же диаметра, как SC и ST (2,5 мм). Преимущественно используется с одномодовым волокном. Его оптические характеристики такие же, как у SC. Закручивание гайки при подключении делает его менее удобным, чем SC, и не позволяет ему иметь дуплексный аналог. По этой же причине соединитель FC не такой компактный, как SC. Основные характеристики стандарта FC приведены в табл. 12.1.



Рис. 12.7. Стандарт FC: а) соединитель FC; б) соединитель FC (под волокно во

вторичном буфере); в) розетка FC

Таблица 12.1.  
Оптические соединители FC, SC, ST

<b>Внешний вид соединителя</b>						
<b>Стандарт</b>	FC	SC		ST		
<b>Обозначение</b>	FC/PC	SC MM	SC SM	ST MM	ST SM	
<b>Физические характеристики</b>						
<b>Тип соединения (фиксация)</b>	Резьба M8x0.75, ключ	Защелка с фиксатором (дизайн push-pull)		Байонетная фиксация с ключом		
<b>Стыковка</b>	Скругленный торец, физический контакт, плавающий наконечник, конструкция без утягивания кабеля			Скругленный торец, физический контакт, подпружиненный наконечник		
<b>Совместимое волокно</b>	SMF: D/125 мкм	MMF: 50/125; 62,5/125 мкм	SMF: D/125 мкм	MMF: 50/125; 62,5/125 мкм	SMF: D/125 мкм	
<b>Оптические характеристики</b>						
<b>Вносимые потери</b>	FLAT	< 1,0 дБ	-	-	-	-
	PC	< 0,5 дБ	< 0,25 дБ	< 0,5 дБ	< 0,7 дБ	< 1,0 дБ
	SPC	< 0,5 дБ	< 0,25 дБ	< 0,5 дБ	-	< 0,7 дБ
	UPC	< 0,5 дБ	-	< 0,5 дБ	-	< 0,7 дБ
	APC	< 0,5 дБ	-	< 0,5 дБ	-	-
<b>Обратные потери</b>	FLAT	-	-	-	-	-
	PC	< -27 дБ	< ~22 дБ	< -27 дБ	-	< -30 дБ
	SPC	< -40 дБ	< -36 дБ	< -40 дБ	-	< -40 дБ
	UPC	< -50 дБ	-	< -50 дБ	-	< -50 дБ
	APC	< -60 дБ	-	< -60 дБ	-	-
<b>Применение</b>						
<b>ЛВС</b>	-	+	+	+	+	
<b>Системы связи</b>	+	-	+	-	+	
<b>Кабельное телевидение</b>	+	-		-	-	

Сокращения: SMF – одномодовое волокно, MMF – многомодовое волокно, D – диаметр сердцевины SMF (8+10 мкм), FLAT – плоский торец, PC – сферический торец, SPC – сферический торец, UPC – сферический торец, APC – угловой сферический торец

## МІС

Полярный дуплексный соединитель МІС (media interface connector) был разработан специально для локальной сети FDDI, рис. 12.8. Этот соединитель схож с соединителем Duplex SC. Ключ, являющийся неизменным атрибутом соединителя МІС, задает не только нужную полярность подключения, но и тип порта (А, В, Master, Slave).

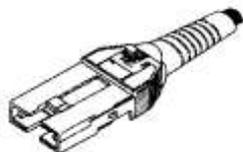


Рис. 12.8. Соединитель МІС (FDDI)

### 12.1.6. Оптические шнуры

Оптический шнур – это оптический миникабель, оконцованный с обеих сторон соединителями. Оптические шнуры бывают одномодовые, многомодовые (с одномодовым и многомодовым волокном, соответственно), одиночные (с одним волокном), двойные (с двумя волокнами). Они также различаются типом соединителей и могут поставляться разной длины под заказ. Пример обозначения оптического шнура: ST – Duplex SC MM 50/125 5м. Это двойной оптический шнур с многомодовым волокном 50/125 длиной 5м, оконцованный с одной стороны соединителем Duplex SC, с другой стороны – двумя соединителями ST.

*Основные функция оптического шнура* – обеспечение соединения: между разными активными сетевыми устройствами; между сетевым устройством и оптическим распределительным узлом; внутри оптического соединительного узла или кросса (внутренняя кросс-коммутация).

Примеры оптических шнуров приведены на рис. 12.9.



Рис. 12.9. Примеры одиночных оптических шнуров: а) ST-ST; б) SC-ST

Розетка должна соответствовать типу соединителей. Выпускаются переходные розетки, обеспечивающие сочленение разнородных соединителей. Однако такие розетки получили меньшее распространение из-за того, что не составляет большого труда изготовление оптического шнура с разными типами соединителей.

## 12.2. Неразъемные соединители

Неразъемные соединители предназначены для соединения оптоволокон при сращивании кабелей в муфтах и при терминировании кабелей в распределительных устройствах. Часто такие соединители называют сплайсами (англ. splice = соединение). Сплайсы бывают двух видов: *механические* и *сварные*.

### 12.2.1. Механический сплайс.

Основную идею механического сплайса можно пояснить с помощью рис. 12.10, на котором изображено его поперечное сечение.

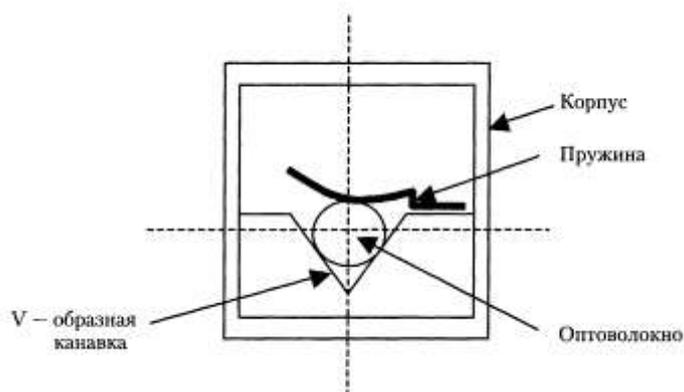


Рис. 12.10. Поперечное сечение механического сплайса

В корпусе длиной около 40 мм имеется V-образная центрирующая канавка, заполненная иммерсионным гелем, и пружина, прижимающая к ней оптоволокну. Соединение оптоволокон осуществляется в следующей последовательности. Волокна «зачищаются» от буферных оболочек, протираются спиртом, скалываются прецизионным скалывателем для получения перпендикулярного и гладкого торца, вставляются с двух сторон в сплайс до соприкосновения друг с другом и в таком положении фиксируются пружиной. Готовый сплайс размещается в организаторе сплайсов, который, в свою очередь, размещается в шкафу на оптической полке.

Конструкции механических сплайсов не стандартизируются, поскольку при их использовании нет необходимости сочетать детали разных производителей. В связи с этим имеется большое разнообразие конструкций механических сплайсов. Центровка волокон может осуществляться с помощью цилиндрических капилляров. Пружина может размещаться как внутри, так и снаружи корпуса. В зависимости от конструкции, от ее качества, точности и надежности варьируются и цены механических сплайсов, достигая в лучших образцах 10 – 20 долларов за штуку.

Механические сплайсы могут различаться назначением: одни предназначаются для одномодовых, другие – для многомодовых волокон. При этом их конструкции внешне не различаются, а отличие состоит в точности

деталей: одномодовые волокна с диаметром 8 мкм необходимо совмещать по оси с точностью не хуже  $\pm 1$  мкм, а многомодовые с сердцевиной 50 или 62,5 мкм – с точностью не хуже  $\pm 3$  мкм.

Качество оптического соединения в механическом сплайсе зависит от многих факторов: от точности центрирующих устройств и их надежности, от качества геля и т. д., но основным фактором является качество скола оптоволокна. Поэтому при изготовлении механических сплайсов необходимо использовать дорогостоящие прецизионные скалыватели, которые обеспечивают перпендикулярность торца оптоволокна к его оси в пределах не более  $0,5^\circ$ . Обычно, потери в механических сплайсах не превышают 0,1 дБ.

Иммерсионный гель, имеющий показатель преломления, близкий к показателю преломления стекла, заполняет промежуток между торцами оптоволокон и уменьшает потери на отражение в соединении. Гель достаточно вязок, а канал с двух сторон «заткнут» оптоволоконными, поэтому гель в механическом сплайсе не вытекает и не высыхает. Соединение оптоволокон с помощью механического сплайса является дешевым и доступным способом. Кроме того, в случае неудачной сборки механический сплайс можно переделать несколько раз. В условиях атмосферы или грунта, а также в линиях связи большой протяженности уровень надежности и потерь механического сплайса становится недостаточным и в этих условиях используют сварной сплайс.

### 12.2.2. Сварной сплайс.

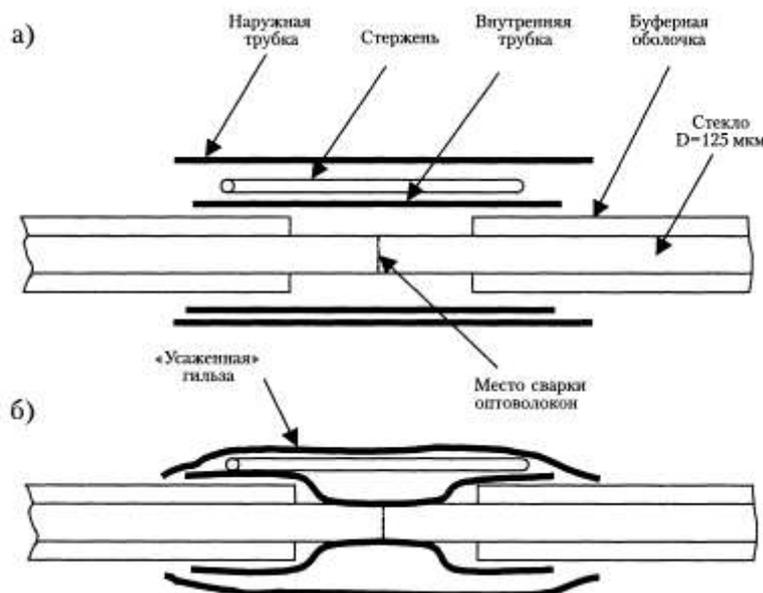


Рис. 12.11. Схема сварного сплайса оптоволокна: а) защитная гильза до термоусадки, б) «усаживаемая» гильза

Идея сварного соединения оптоволокон поясняется рис. 12.11 и состоит в следующем. На одно из волокон надевается защитная гильза (англ. protective sleeve). Гильза состоит из двух коаксиальных трубок из термоусадочной пластмассы длиной 60 мм, между стенками которых расположен

металлический стержень чуть меньшей длины с наружным диаметром около 2 мм. (В отечественной практике защитная гильза называется «комплект для защиты сростка» (КДЗС)). Затем оптоволоконная зачищается от буферных покрытий, скалывается прецизионным скальвателем и размещается в сварочном аппарате, в котором они свариваются импульсной электрической дугой. На место сварки надвигается защитная гильза и этот участок оптоволокон вместе с гильзой помещается в термостат, где находится 1 – 2 мин. при температуре около 270°C. Изготовленная из термоусадочной пластмассы гильза уменьшается в диаметре, плотно охватывает оптоволоконно и герметизирует его обнаженный участок. Наружная трубка плотно прижимает стержень к месту сварки и он не позволяет изгибать в этом месте сваренные волокна. Остывшая гильза размещается затем в специальном организаторе.

Сварной сплайс обладает малыми (не более 0,01 дБ) потерями, отличается высокой надежностью, изготавливается быстро, но сварка является наиболее дорогим способом соединения оптоволокон: требуется дорогой (от 12 000 до 40 000 долларов) сварочный аппарат, прецизионный скальватель и высококвалифицированный оператор. Защитные же гильзы относительно недороги: наилучшие стоят около 50 центов.

### **12.3. Контрольные вопросы**

1. Каково назначение оптических разъемных соединителей?
2. Опишите конструкцию оптических разъемных соединителей.
3. Какие существуют основные формы торца наконечника оптических разъемных соединителей?
4. Чем отличаются РС и АРС наконечники оптических разъемных соединителей?
5. Назовите основные факторы потерь оптических разъемов.
6. Каковы величины потерь в оптических разъемах?
7. Назовите основные типы оптических разъемных соединителей, их достоинства и недостатки.
8. Опишите конструкцию механического сплайса.
9. Какие особенности сварного соединения оптических волокон?

## **РАЗДЕЛ 13. КОНСТРУКЦИИ И ПАРАМЕТРЫ ОПТИЧЕСКИХ КАБЕЛЕЙ СВЯЗИ**

---

### **13.1. Классификация оптических кабелей**

Оптический кабель представляет собой в общем случае сложную многокомпонентную конструкцию, содержащую ОВ, совокупность элементов, назначение которых, во-первых, защищать ОВ от механических напряжений, возникающих в процессе изготовления, транспортировки, прокладки и эксплуатации ОК и, во-вторых, сохранять стабильными параметры передачи ОВ в течение всего срока службы ОК, который может достигать 25...30 лет. Кроме того, конструкция должна обеспечивать простоту монтажа и низкую стоимость ОК.

Существующие ОК по назначению подразделяют на следующие группы:

- магистральные,
- зоновые (внутризоновые),
- городские,
- внутриобъектовые (локальные),
- монтажные,
- полевые.

Магистральные и зоновые ОК предназначены для передачи всех видов современной информации на большие расстояния. Поэтому они должны обладать малым затуханием и дисперсией (большой широкополосностью).

Городские ОК применяют в качестве соединительных линий между РАТС и узлами связи. Они рассчитаны для передачи информации на короткие расстояния (5..15 км) без промежуточных ретрансляционных устройств и при сравнительно небольшом количестве каналов.

Внутриобъектовые (локальные) кабели используют для передачи различной информации внутри предприятий и подвижных объектов и на локальных вычислительных сетях, а монтажные ОК – для внутри- и межблочного монтажа компьютеров и аппаратуры. Они содержат, как правило, большое количество узкополосных ОВ.

Полевые ОК предназначены для ремонтно-восстановительных работ при авариях на электрических и оптических кабельных магистралях, а также для скрытой связи тактического военного назначения.

В зависимости от условий прокладки и эксплуатации ОК подразделяют на следующие группы:

- подземные,
- для прокладки в кабельной канализации, коллекторах и трубах,
- подводные,
- подвесные,
- внутренние (станционные).

Подземные ОК прокладывают в грунтах всех категорий, через неглубокие болота и несудоходные реки.

Кабели второй группы предназначены для прокладки в кабельной канализации, трубах, блоках, коллекторах, шахтах и на мостах.

Подводные ОК используют на морских магистралях, а также для прокладки через глубокие водоемы, где от них требуется высокая механическая прочность.

Подвесные ОК применяют для прокладки на грозотросе и фазовом проводе ЛЭП, контактной сети электрифицированных железных дорог, а также для устройства переходов от одного здания к другому в городских условиях и для прокладки на опорах воздушных линий связи и специальных стойках в сельских районах.

Внутренние (станционные) ОК предназначены для прокладки внутри зданий и на подвижных объектах.

## **13.2. Элементы конструкции оптических кабелей**

В серийно изготавливаемых ОК применяют одномодовые и многомодовые ОВ. Для них широко используются кварцевые стекла. Кроме того, многомодовые ступенчатые ОВ могут иметь кварцевую сердцевину и полимерную оболочку или полностью изготавливаться из полимерных материалов или многокомпонентных стекол.

Элементы конструкции ОК можно подразделить на следующие группы:

- защитное покрытие ОВ,
- сердечник ОК,
- силовые (упрочняющие) элементы,
- разделительные (демпфирующие) слои,
- наружные защитные оболочки,
- броневые покровы,
- гидрофобные наполнители.

### **13.2.1. Защитное покрытие.**

Теоретический предел прочности кварцевого стекла очень велик (более  $6000 \text{ н/мм}^2$ ), а у тонких волокон еще больше. Однако на практике прочность ОВ зависит от различных дефектов и внутренних напряжений. Для защиты ОВ от

внешних воздействий на его оболочку наносится защитное покрытие (первичное и вторичное).

Первичное покрытие препятствует появлению и развитию микротрещин. Его обычно выполняют из акрила и окрашивают в цвета идентификации волокон. Диаметр ОВ с первичным покрытием обычно составляет  $245 \pm 10$  мкм. Специальная защита от влаги и водорода достигается использованием тонкого металлического или углеродного слоя на оболочке. Эти герметичные и устойчивые к старению ОВ обычно используют в глубоководных подводных ОК.

На первичное покрытие ОВ наносят вторичное покрытие из эластичного высокопрочного полимера (полиэтилен, нейлон) и предназначено оно для защиты ОВ от изгибающих, сжимающих и растягивающих усилий. Внешний диаметр вторичного покрытия составляет  $0,8 \dots 1,0$  мм.

Первичное защитное покрытие должно устранять взаимные помехи между ОВ при их плотной укладке в ОК, которые обусловлены модами излучения. Для этого пригодны акрил или силиконовая смола, имеющие большое поглощение на рабочей длине волны (порядка 1 дБ/мкм). Желательно, чтобы этот материал имел несколько больший показатель преломления, чем оболочка ОВ, чтобы предотвратить распространение вытекающих мод.

### 13.2.2. Сердечник ОК.

При всем многообразии конструкций современных ОК кабельные сердечники в зависимости от компоновки ОВ можно подразделить на две группы: плотные и свободные. Примеры сердечников плотной группы приведены на рис. 13.1. В повивной конструкции (рис. 13.1, а) ОВ в первичных и вторичных защитных покрытиях скручены концентрически вокруг центрального силового элемента. При большом количестве ОВ кабель может содержать несколько повивов, либо при одном повиве вместо одиночных ОВ можно применить модули, образованные несколькими ОВ в первичных покрытиях в общем трубчатом вторичном покрытии.

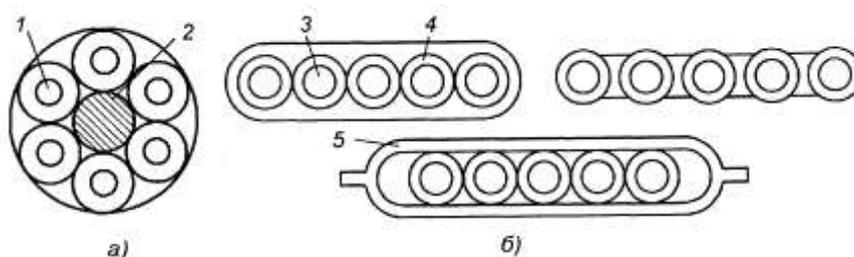


Рис. 13.1. Виды сердечников плотной конструкции: 1 — ОВ в первичном и вторичном покрытиях; 2 — силовой элемент; 3 — ОВ в первичном покрытии; 4 — вторичное ленточное покрытие; 5 — пластмассовая лента

В ленточной конструкции (рис. 13.1, б) ОВ в первичных защитных покрытиях располагаются в один ряд либо в общем вторичном ленточном покрытии, либо в липком заполнении между двумя пластмассовыми лентами, соединенными краями. Такой ленточный модуль может содержать 2..24 ОВ.

Сердечник ОК состоит из стопки ленточных модулей (ленточной матрицы).

Сердечники свободной конструкции (рис. 13.2) подразделяются на трубчатые (модульные) и профильные. В первом случае (рис. 13.2, а) одно или несколько ОВ в первичных покрытиях свободно размещаются в полимерных трубках, выполняющих роль вторичного покрытия. Диаметр трубок составляет 2..3 мм. Образованные таким образом модули скручиваются по спирали вокруг центрального силового элемента.

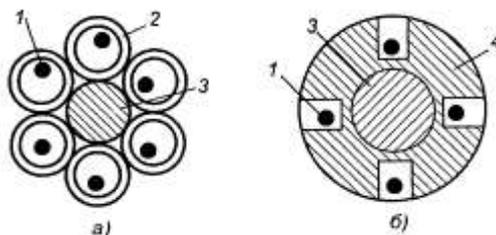


Рис. 13.2. Виды сердечников свободной конструкции: 1 – ОВ; 2 – полимерная трубка; 3 – силовой элемент; 4 – опорный пластмассовый стержень

Профильный сердечник (рис. 13.2, б) содержит пластмассовый стержень с прямоугольными или V-образными пазами (канавками), расположенными по спирали. В пазах свободно можно разместить одно или несколько ОВ в первичных покрытиях. Силовой элемент размещают по оси стержня.

Плотные конструкции сердечника отличаются относительно простой технологией изготовления и высокой степенью заполнения поперечного сечения, т.е. небольшими габаритами. Однако механические и температурные изменения размеров ОК вызывают в ОВ механические напряжения и приводят к образованию микротрещин. Следствие этого – значительный рост дополнительных (кабельных) потерь, изменение во времени оптических параметров и обрыв ОВ.

Свободные конструкции лишены указанных недостатков: ОВ защищены от продольных воздействий на разрыв при ограниченном растяжении или изгибе ОК. Это повышает надежность ОК и существенно снижает уровень дополнительных потерь. Профильные конструкции довольно сложны в производстве, что существенно повышает их стоимость. В то же время они не имеют значительных преимуществ по сравнению с модульными сердечниками. Вот почему в последние годы интерес к ОК с профильными сердечниками стал меньше. Этому способствовало и то, что технология их разделки, например, при сращивании строительных длин, сложнее, чем для ОК с модульными сердечниками.

Рассмотренные конструкции сердечника служат основой для изготовления ОК с большим количеством ОВ. Например, в ОК с ленточным сердечником может быть несколько сотен ОВ. Широко используются ОК с 2-, 3-, 7- и 21-профильными сердечниками, в которых количество ОВ достигает до 210. Освоено промышленное производство ОК, в которых использованы технологические преимущества ленточной конструкции и надежность свободной укладки. Среди них чаще встречается конструкция ОК с опорным

пластмассовым стержнем, в пазы которого уложены ленточные матрицы (рис. 13.3). Она позволяет получить очень высокую плотность упаковки волоконных лент, отличается простотой и хорошей защитой ОВ.

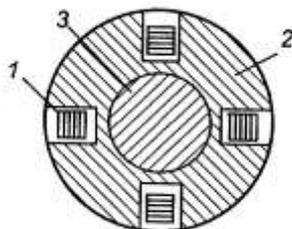


Рис. 13.3. Вид сердечника комбинированной конструкции в разрезе: 1 – ленточная матрица; 2 – опорный пластмассовый стержень; 3 – силовой элемент

### **13.2.3. Силовые (упрочняющие) элементы**

Конструкция ОК должна обеспечивать защиту ОВ от чрезмерных механических напряжений: механические напряжения должны прикладываться не к ОВ, а к силовым (упрочняющим) элементам кабеля, которые ограничивают растяжение ОК (0,1... 1 %), обеспечивают необходимые радиусы изгиба и повышают стойкость ОК при механических радиальных воздействиях.

В повивной, трубчатой и профильной конструкциях силовые элементы размещены вдоль центральной оси кабеля. Конструктивно они могут быть выполнены в виде стержней или жгутов из тонких волокон из металлических и синтетических материалов. Для металлических элементов обычно используется оцинкованная или покрытая медью стальная проволока. Неметаллические силовые элементы чаще всего изготавливают из пластмассы повышенной прочности (кевлар, терлон, тварон). Они дороже стальных, но обеспечивают высокую прочность ОК и небольшой вес. При необходимости между сердечником кабеля и оболочкой помещают дополнительные силовые (армирующие) элементы: повив из арамидовых (кевларовых) нитей или стекловолоконных лент.

В ленточной конструкции и конструкции с одной центральной трубкой роль силового элемента играют стальные или синтетические (FRP) нити внутри оболочки. Между сердечником ОК и оболочкой может размещаться также повив из арамидовых нитей или стекловолоконных лент.

В подвесных ОК роль силового элемента играет стальной несущий трос. В кабелях, имеющих броню из круглых проволок, механическое напряжение прикладывается к этим проволокам.

### **13.2.4. Разделительные (демпфирующие) слои**

Противостоят сжимающим механическим усилиям, уменьшая давление друг на друга различных элементов конструкции ОК. Они выполняются как заполнение из пенопласта.

### **13.2.5. Наружные защитные оболочки**

Предохраняют ОК от проникновения влаги, паров вредных веществ и внешних механических воздействий, возникающих при прокладке и

эксплуатации кабеля. Оболочки подразделяются на три основных типа: металлопластмассовые (комбинированные), пластмассовые и пластмассовые с силовыми элементами.

Металлопластмассовые (комбинированные) оболочки состоят из тонкой металлической оболочки и пластмассового покрытия. Алюминиевая или стальная лента наматывается по сплошной спирали (внахлест) или накладывается в продольном направлении, образуя трубку с нахлестом, края которой свариваются или пропаяваются. Для улучшения гибкости ОК и сопротивления раздавливанию металлическая оболочка гофрируется вокруг сердечника. Такие комбинированные оболочки являются прекрасным влагонепроницаемым барьером. Кроме того, гофрированная стальная оболочка часто заменяет броневой покров,

Пластмассовые оболочки с силовыми элементами содержат продольные стальные или синтетические (FRP, кевлар) нити, и позволяют совместить в одном конструктивном элементе две функции.

Пластмассовое покрытие ОК наружной прокладки чаще всего изготавливают из полиэтилена. Защита от ультрафиолетового излучения достигается добавлением в полиэтилен черного угля. Традиционным материалом оболочек ОК внутренней прокладки до недавнего времени являлся поливинилхлорид. Однако этот материал имеет опасное свойство: при нагревании до высоких температур он разрушается и образует соляную кислоту. Едкость и токсичность поливинилхлорида привели к тому, что в последнее время его не применяют. Оболочку ОК внутренней прокладки изготавливают из термопластичного полимера с минеральными наполнителями (например, гидроксид алюминия  $Al(OH)_3$ ). При горении и полимер, и наполнитель образуют нетоксичные, малодымные продукты распада, эффективно препятствующие распространению огня.

### **13.2.6. Броневые покровы**

Применяются для защиты подземных ОК от давления земляной засыпки. Наряду с традиционными видами стальной проволочной брони широко используют оплетку из тонких стальных проволок и броню из неметаллических материалов в виде повива из арамидовых нитей или пластмассовых лент с упрочняющими стекловолокнами. Подводные кабели имеют усиленную двойную броню из стальной проволоки с цинковым покрытием или проволоки из нержавеющей стали.

### **13.2.7. Гидрофобные наполнители**

В ОК наружной прокладки очень важна защита ОВ от проникновения воды. Традиционный метод защиты заключается в использовании гидрофобного компаунда в виде желе или геля. Компаунд в сердечник вводят под давлением при температуре 65...70 °С.

Защита от проникновения воды может быть обеспечена использованием разбухающих порошков, лент или нитей. Порошок вводят в сердечник, а ленту и нить наматывают, как правило, поверх элементов из ОВ или поверх

сердечника. При намокании эти защитные устройства увеличиваются в объеме, заполняя все пустоты ОК, куда может проникнуть вода.

### **13.3. Контрольные вопросы**

1. Что представляет собой оптический кабель?
2. Как классифицируются оптические кабели по назначению?
3. Как классифицируются оптические кабели в зависимости от условий прокладки и эксплуатации?
4. Из каких элементов состоит оптический кабель?
5. Какие типы защитных покрытий применяются?
6. Какие виды сердечников применяются?
7. Какую функцию выполняют силовые элементы кабеля?
8. Что собой представляет гидрофобный компаунд?

## **РАЗДЕЛ 14. СОЕДИНИТЕЛЬНЫЕ МУФТЫ ДЛЯ ОПТИЧЕСКИХ КАБЕЛЕЙ**

---

Оптические кабели производятся строительными длинами. Волоконно-оптические линии передачи (ВОЛП) строятся на основе отдельных строительных длин ОК. Соединение строительных длин ОК включает в себя сращивание оптических волокон, восстановление бронепокровов и наружной оболочки. Для выполнения этих операций используются соединительные муфты, позволяющие соединить, как минимум, две строительные длины ОК.

Соединение отдельных строительных длин или отрезков оптических кабелей производится в следующих случаях:

- когда прокладка кабеля одной строительной длиной между начальной и конечной точками трассы является невозможной или нецелесообразной по тем или иным причинам из-за местных особенностей (большая протяженность, наличие многочисленных поворотов и препятствий, невозможность протянуть очень длинный отрезок кабеля через кабельную канализацию без превышения допустимого растягивающего усилия);
- когда местная особенность кабельной линии связи позволяет использовать ветвление кабелей большой емкости на два или более кабеля меньшей емкости для минимизации стоимости и продолжительности строительства;
- при выполнении ремонта поврежденного кабеля или плановой замене одного отрезка кабеля на другой (выполняется монтаж вставки).

Место соединения двух и более (в случае ветвления) строительных длин в середине кабельной трассы защищается соединительной муфтой. Основным назначением муфт является:

- организация сростков той же или иной конструкции (в подавляющем большинстве случаев неразъемных) с соблюдением технологических ограничений на их параметры по радиусам изгиба, растягивающим усилиям и т.д. размещения технологического запаса оптических волокон, укладку гильз или сплайсов сростков на специальных

кассетах и защиту их от механических повреждений;

- восстановление целостности силовых и защитных покровов кабелей и предохранения кабелей от воздействия влаги путем обеспечения герметизации места сращивания.

Муфты применяются на магистральных, зонавых и местных линиях связи, для всех условий прокладки и эксплуатации оптических кабелей связи: на подземных, подвесных, подводных кабельных линиях, а также в кабелях, прокладываемых в трубах кабельной канализации или коллекторах. Смонтированные муфты укладываются в коллекторах и колодцах кабельной канализации, непосредственно в грунт, болота, или под воду, подвешиваются на опорах воздушных линий связи. Существуют конструкции муфт, предназначенные для каждого из условий применения. Также существуют универсальные конструкции муфт, которые могут использоваться для нескольких условий применения оптических кабелей.

### 14.1. Конструкции соединительных муфт

Основой муфты является полимерный или металлический корпус в форме цилиндра или параллелепипеда (реже диска), в котором размещается лоток с кассетами для укладки оптических сростков и механические фиксаторы кабелей. В конструкции муфты предусматриваются элементы герметизации внутреннего объема, а также обеспечения непрерывности броневых и упрочняющих элементов кабеля.

Корпус муфты может состоять из двух частей, разделенных в продольном направлении. Нижняя часть используется в качестве монтажного основания для лотка с кассетами, верхняя часть выполняет функции крышки. На таких корпусах часто имеются внешние ребра жесткости. Во втором варианте корпус муфты представляет собой цельный цилиндр, который надвигается на лоток после завершения операций сращивания и укладки волокон. Такой корпус обычно закрывается с двух сторон конусообразными переходами.

В зависимости от количества и расположения кабельных вводов различают прямую (вводы с разных сторон корпуса) и тупиковую, или стаканчиковую (вводы с одной стороны корпуса) муфты, причем они могут быть как проходными (два ввода), так и разветвительными (более двух вводов). Основные типы соединительных муфт приведены на рис. 14.1.

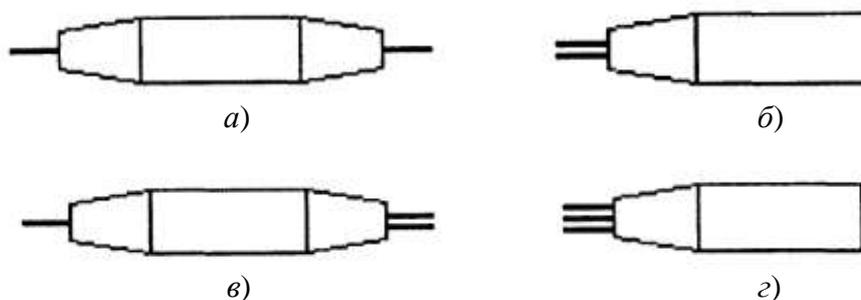


Рис. 14.1 Типы соединительных муфт:  
а) прямая, проходная; б) тупиковая, проходная;

в) прямая разветвительная; з) тупиковая разветвительная

Рабочий температурный диапазон промежуточных муфт с металлическим корпусом, составляет от  $-40$  до  $+50$  °С, муфты с полимерным корпусом могут эксплуатироваться при температурах до  $-60$  °С.

Герметизация муфты осуществляется холодным и горячим способами с помощью заливочной массы, термоусаживаемых трубок, прокладок и манжет, а также специальных мастик и герметизирующих лент, например ленты типа VM производства американской компании 3M. Некоторые типы муфт за счет применения в их конструкции высококачественных герметизирующих прокладок и манжет, а также крепления крышки на болтах допускают многократную сборку и разборку, более технологичны в работе.

Для проверки герметичности внутреннего объема на корпусе некоторых типов муфт импортного производства предусмотрен ниппель для закачки сжатого воздуха и подключения манометра. Примером может служить муфта серии 2500 производства компании Lucent Technologies, а также муфта серии 2178 компании 3M.

Конструкция муфт характеризуется способом герметизации – «холодным» или «горячим» и видом соединения строительных длин: проходным, тупиковым или универсальным, см. рис. 14.2.



Рис. 14.2 Классификация конструкции по способу герметизации и виду соединения

«Холодный» способ восстановления оболочек ОК имеет разновидности, которые базируются на соединении наружных частей муфт с помощью:

- болтов (муфты: BR компании Morel; UCS04-6 АО «Межгорсвязьстрой» + RXS; металлические муфты серий MOM3 и MOMУ АО «Лентелефонстрой»);
- хомутов (муфты: FOSC компании Raychem, FSCO компании Fuji-kura, а также муфты компаний Hellermann и Egerton);
- защелок (муфта 2500 LG/DC4 компании Lucent Technologies).

«Горячий» способ восстановления оболочек ВОК предусматривает применение огня или горячего воздуха. При этом способе наружные части

муфты соединяются:

- нагревом полиэтиленовых или термоусаживаемых лент;
- нагревом манжет или термоусаживаемых трубок (ТУТ) (муфты: FOSC-100 компании Raychem и МТОК96 ЗАО «Связьстройдеталь»).

В ряде конструкций одновременно используются методы «холодного» и «горячего» способа герметизации муфт. Например, в муфте FOSC-400 компании Raychem корпус с оголовником соединяется механическим способом на хомутах, а ввод ОК в оголовник герметизируется ТУТ. То же можно видеть на муфтах компании Ericsson и Hesibel, где кабельные вводы герметизируются ТУТ, а корпус муфты с помощью резиновой прокладки и болтов.

В настоящее время более 25 фирм предлагают на рынке России более 80 муфт для монтажа ОК различного конструктивного исполнения.

Конструкция проходных муфт позволяет использовать их как тупиковые, осуществляя ввод ОК только с одной (вторая сторона закрывается заглушками). Такие муфты имеют термин «универсальные» муфты (UCSO 4-6 компании RXS, 2178 компании ЗМ). В промышленном производстве предпочтение отдается муфтам с «холодным» способом крепления частей муфт. При этом, муфт тупикового и проходного типов производится примерно поровну, хотя следует отметить, что муфты тупикового типа обладают рядом преимуществ перед проходными муфтами, например, при их установке в грунтах не возникают изгибающие и осевые напряжения, на тупиковых муфтах проще производить соединение частей муфты и ремонтные работы.

Выбор конструкции любой муфты зависит от условий их применения и способов прокладки ОК. Любая муфта должна иметь:

- детали для закрепления наружной оболочки ОК;
- узлы для обеспечения электрической непрерывности и механической прочности силовых элементов конструкции ОК;
- кассеты для хранения и защиты ОВ;
- узлы для заземления.

Базовые требования к конструкциям муфт изложены в рекомендациях МСЭ-Т. Большое влияние на уточнение конструкций муфт оказывают их назначение и условия эксплуатации.

Как известно, соединительные муфты могут размещаться в помещениях, колодцах кабельной канализации, коллекторах, шахтах, грунтах различных категорий, водоемах и на открытом воздухе. Такое разнообразие установки требует при разработке конструкции муфт обеспечить:

- простоту и надежность монтажа ОК (заделка бронепокровов и центрального силового элемента (ЦСЭ));
- минимально допустимые радиусы изгиба ОВ (не менее 30 мм) и надежное закрепление мест соединения и выкладку ОВ в кассетах;
- выкладку запаса модулей для компенсации изменения длины ОВ в зависимости от изменения температуры в интервале от -60 до +70°C;
- возможность ввода дополнительного ОК в действующую муфту; возможность ввода кабеля транзитом, а также через ответвительные и

разветвительные соединения;

- механическую прочность оболочек и всех пластмассовых деталей; возможность установки защитных кожухов, предохраняющих муфту от актов вандализма и ультрафиолетового (солнечного) излучения;
- герметичность в условиях воздействия факторов окружающей среды (температуры, состояния атмосферы, грунтовых вод, дождя);
- сохранения всех параметров надежности на весь период эксплуатации; ремонтпригодность.

Чтобы обеспечить эти требования, в муфте применяются высокопрочные светостабилизированные пластмассы или нержавеющие стали, термоусаживаемые материалы с подклеивающей основой, самоотверждающиеся компаунды, вулканизированная резина, мастики, ленты и клеи как отечественного, так и зарубежного производства.

Наибольшей эксплуатационной надежностью должны обладать, те части соединительных муфт, которые осуществляют защиту ОК от напряжения изгиба, кручения и продольного проникновения воды под броней, например, узлы заделки бронепокровов. В некоторых конструкциях муфт предусматриваются дополнительные меры защиты от действия токов молнии. С этой целью, например, муфта МТОК 96-01, используемая для монтажа магистральных кабелей 1, 2 и 3 типов, снабжена узлом (штуцером) для закрепления стальных круглых проволок брони вводимого в муфту кабеля 01,2-2,5 мм любой жесткости без дополнительного изгиба. Такой узел крепления обеспечивает приложение усилия растяжения до 50-80 % от максимально допустимого растягивающего усилия монтируемого ВОК. Канал штуцера на входе и выходе промежуточной оболочки ВОК герметизируется мастиками для защиты от продольного проникновения воды.

Для крепления проводов заземления с целью получения электрически замкнутых и изолированных бронепокровов сращиваемых ОК, используется узел крепления, который допускает прохождение токов молнии до 114 кА. В оголовнике муфты имеются патрубки для вывода проводов заземления наружу и подсоединения их к контейнеру заземления.

Внутри соединительной муфты находятся узлы и детали, предназначенные для размещения и крепления КОНСТРУКТИВНЫХ элементов ОК:

ЦСЭ крепится специальным механическим узлом; устройства для размещения и крепления запасов ОВ любых используемых типов кабелей, в том числе кабелей с модульными трубками любой жесткости со свободно лежащими в одной трубке ОВ; обеспечение возможности прохождения части волокон транзитом.

## **14.2. Кассеты для выкладки ОВ**

Одной из основных частей муфты является кассета для выкладки и закрепления ОВ. Кассета состоит из одного или более «поддонов», которые предназначены для размещения и удержания соединения волокон заданным образом без дополнительного растяжения.

Кассета должна обеспечить:

- функцию хранения и защиты соединений ОВ; радиус изгиба ОВ не менее 30 мм; идентификацию и доступ к любому ОВ;
- хранение запаса ОВ, необходимого для соединения и пересоединения при монтаже и ремонте.

Для обеспечения сохранности ОВ при проведении монтажных работ, конструкция крепления кассеты должна допускать свободное перемещение одной кассеты относительно другой. Такое перемещение обеспечивается, например, поворотом кассет вокруг поперечной оси (компания Ray-chem); вращением на петле вокруг продольной оси (компания Reichle De Massari); поднятием из стопки (компании PLP, Ericsson, и ЗАО «Связьстройдеталь»); размещением крепления с разных сторон относительно центральной стойки (компания Hellermann и Egerton); снятием только ложементов – держателей сростков (компания Lucent Technologies).

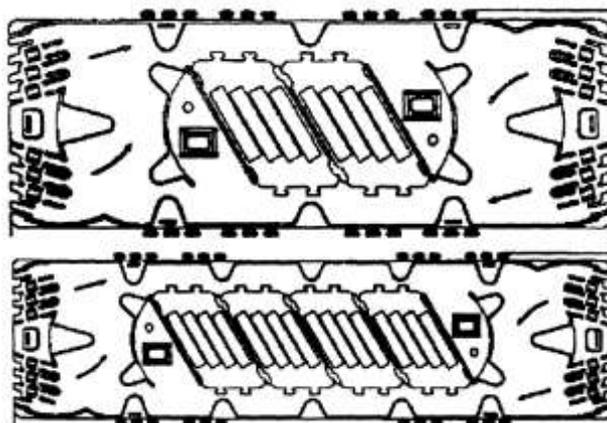


Рис. 14.3. Кассеты муфты серии 178-L/S компании ЗМ, США



Рис. 14.4. Кассеты муфты серии USCO 4-6, ОАО «Межгорсвязьстрой» +RXS

Кассеты должны обеспечивать такое соединение волокон, чтобы передача сигналов осуществлялась без ухудшения их параметров, в том числе и в процессе механических (вибрация, удар) и климатических (изменение температур) воздействий.

При разработке конструкции кассет должны учитываться оптические параметры ОВ, при этом требования по затуханию сростков одномодовых ОВ

могут колебаться от 0,01 до 0,1 дБ, а выбираемый аппарат для сварки должен обеспечить эти требования.

Кассеты должны допускать выкладку запаса ОВ для кабеля любой конструкции. Самое большое внимание должно быть уделено монтажу волокон, расположенных в модуле из материала полибутилентерефталата (ПБТ), так как нет сведений о влиянии модульных трубок из ПБТ на оптические параметры.

При проведении испытания муфт МТОК 96П в испытательной лаборатории ЗАО «Трансвок» обнаружено, что свободно размещённые в кассете модулей запасы ОВ в центральных трубках из ПБТ при температуре от -50 до +60°С изменяют свои линейные размеры, что создает механическое давление на ОВ и приводит к увеличению затухания в ОВ. При растяжении (заневоливании) модулей при укладке на внутреннем контуре кассеты (150x75 мм) затухание ОВ снижается незначительно.

В Руководстве по монтажу муфт серии МТОК 96, разработанным ЗАО «Связьстройдеталь», дано указание заменять модульные трубки из ПБТ на мягкие трубки из ПВД марки 108-03 (адаптер) на той части, которая укладывается в кассете модулей. Замена трубок из ПБТ на трубки адаптера из ПВД позволило снизить затухание ОВ в испытываемых муфтах при температуре – 60°С до нормы (не более 0,054 дБ).

Запас ОВ в большинстве кассет создается за счет двух составляющих:

- запаса ОВ в модульных трубках адаптера, расположенных в кассете модулей;
- запаса ОВ в первичном покрытии на кассете ОВ.

Требования запасной выкладки ОВ в модулях длиной до 1,5 м (2,5 – 3 витка) были определены в тот период разработки ОК, когда его конструкции были несовершенны. Запас предназначался для компенсации повреждений ОВ в первичном покрытии на кассете и для обеспечения при необходимости 2-3-кратной переделки места сварки, а также обеспечения одной замены защитной гильзы при ремонте.

ЗАО «Связьстройдеталь» предлагает на обсуждение новый подход к технологии монтажа ОК, при котором запас ОВ остается только в первичном покрытии с увеличением длины запасного ОВ с учетом всех возможных переделок. При обрыве ОВ в этом случае рекомендуется использовать при входе на кассету дополнительную разделку ОК.

Практическое применение кассет тесно привязано к конструкциям ВОК и зависит от числа сращиваемых ОВ. На практике используются кассеты в основном на 8 – 12 мест укладки сварных соединений (муфты компании Raichle & DE-Massari). В некоторых муфтах предусматриваются места для размещения ОК шлейфом (компании Rauchem, Egerton).

Как известно, сrostки ОВ должны обладать малым и неизменяемым оптическим затуханием в течение всего срока службы ВОСП. Затухание на сrostках может возникать по двум причинам. Первая причина связана с предмонтажной подготовкой ОВ и может устраняться при сварке. Вторая

причина обусловлена свойствами соединяемых волокон, различие которых приводит к возникновению внутреннего затухания сростка. Уменьшить эту часть затухания можно при повторных сварках.

Соединения ОВ осуществляются в муфтах разными методами, в том числе:

- методом сварки, плавлением предварительно подготовленного ОВ; юстировка волокон при сварке осуществляется автоматически; для сварки, как правило, используется электрическая дуга, где соединение ОВ происходит автоматически. Время сварки колеблется от 20 до 50 с. в зависимости от модели аппарата для сварки, затухание сростка 0,02 – 0,05 дБ; сросток требует его защиты от воздействия окружающей среды и механических факторов (растяжение, изгиб, кручение).
- методом механического соединения предварительно подготовленного ОВ юстировка волокон осуществляется элементами соединителя; этот вид соединения ОВ используется на сельских ВОСП, так как при этом методе используются недорогие инструменты для монтажа; величина затухания механических сростков, как правило, колеблется от 0,1 до 0,15 дБ.

В некоторых конструкциях муфт, например, в муфте RXS – «Межгорсвязьстрой» для соединения ОВ используется сварка, а места соединения закрываются силиконовой пастой, что затрудняет ремонтные работы.

### **14.3. Подбор оптических муфт при проектировании и строительстве ВОЛС**

Выбор типа и комплекта оптических муфт является очень важным этапом в процессе проектирования и строительства ВОЛС.

Подобранные муфты и дополнительные защитные и установочные комплекты должны обеспечивать комфортные условия для бесперебойной работы оптических волокон сращиваемых кабелей.

Эти условия должны обеспечиваться в любом месте установки муфты и при любой степени воздействия окружающей среды на муфту и на входящие в муфту кабели.

*Подбор муфт осуществляют в следующем порядке:*

1. Тип муфты подбирается по типу и конструкции оптического кабеля (ОК).
2. Вариант муфты – соединительный или разветвительный на определенное количество направлений подбирают в соответствии с проектом.
3. По проекту выбираются и варианты муфт, которые обеспечивают соединение или разрыв брони, вывод проводов заземления и устройство защиты от ударов молнии.
4. Защитные кожухи, чугунные муфты, установочные кронштейны, устройства для сматывания и крепления запасов ОК выбираются после

обследования трассы в натуре, когда для каждой муфты будут определены условия, в которых она будет работать.

Оптические муфты для любых видов ОК и для любых условий эксплуатации производит ЗАО "Связьстройдеталь". Муфты типов МОГ и МТОК 96 сертифицированы в системе сертификации "Электросвязь" и полностью соответствуют требованиям действующих нормативных и руководящих документов Министерства связи РФ.

Городские оптические муфты типа МОГ предназначены для ОК, проложенных в кабельной канализации. В этих муфтах можно смонтировать ОК любой конструкции. Обеспечивается продольная герметизация ОК и соединение металлических элементов ОК.

Муфты МОГ имеют варианты стандартной длины, которые укладываются на консолях в типовых колодцах, шахтах и коллекторах, а также укороченные (МОГУ) и тупиковые (МОГТ) варианты.

Укороченные и тупиковые муфты используются в нетиповых колодцах, т. е. там, где невозможно разместить муфту стандартной длины. Муфты МОГ и МОГУ имеют разветвительные варианты на 2, 3, 4 и 5 направлений. Муфта МОГТ имеет разветвительный вариант только на 2 направления.

Муфта МОГТ используется и при монтаже подвесных оптических кабелей. При установке на опорах она размещается в специальном шкафу или в стальном защитном кожухе.

Муфты типа МОГ оснащаются кассетами типа К. На каждой такой кассете можно разместить 32 сварных соединения волокон в гильзах КДЗС. В муфте МОГ стандартной длины размещаются до 3-х кассет, в муфтах МОГУ и МОГТ - до 2-х кассет. По спецзаказу возможно изготовление муфт МОГ стандартной длины с увеличенным корпусом, в котором можно установить до 5-ти кассет типа К.

Муфты поставляются потребителю в виде основного комплекта, который дополняется после уточнения особенностей ВОЛС заказчика.

*В состав основного комплекта входит:*

- корпус муфты МОГ, детали для его герметизации и для герметизации вводов ОК;
- одна рабочая кассета типа К;
- крепежные и маркировочные детали.

Если количество волокон превышает 32, то к основному комплекту добавляются кассеты типа К с комплектом креплений и маркеров.

Гильзы КДЗС поставляются дополнительно из расчета по 10 КДЗС на каждые 8 волокон.

Разветвительные варианты муфт МОГ оснащаются оголовниками с заглушенными патрубками. Каждую разветвительную муфту МОГ, МОГУ или МОГТ можно смонтировать как соединительную, оставляя заглушенные патрубки для довода ОК в будущем, в процессе развития сетей.

На магистральных и внутризоновых ВОЛС используются муфты типа МТОК 96. Варианты этих муфт оснащаются узлами ввода для кабелей с

различными видами силовых элементов.

Муфты МТОК 96-01-IV предназначены для укладки в грунт в чугунной защитной муфте, имеют три патрубка для ввода оптических кабелей и три патрубка для ввода проводов заземления. При таком количестве вводов они могут использоваться как соединительные и как разветвительные на два направления.

В соответствии с действующими требованиями Минсвязи РФ муфты МТОК 96-01-IV обеспечивают электрическое соединение металлических элементов сращиваемых кабелей или изолирование проволочной брони каждого из кабелей от остальных с выводом отдельного провода заземления из муфты. Провода выводятся на столбик КИП или в подземный контейнер проводов заземления.

Остальные варианты муфт МТОК 96 оснащаются узлами ввода кабелей определенной конструкции, все варианты муфт указаны ниже на рисунках для подбора.

Все узлы ввода взаимозаменяемы и могут быть установлены в любую муфту МТОК 96. Это необходимое условие при доводе кабеля в муфту или при замене поврежденного ОК кабелем другой конструкции.

В связи с тем, что количества вводимых в муфты ОК и сращиваемых волокон у разных заказчиков не одинаковы, муфты комплектуются следующим образом. Каждая из них, обозначенная в прайслисте как муфта оптическая, например, МТОК 96n-01-IV представляет собой базовый минимальный комплект деталей, который не зависит от количества вводимых кабелей и волокон.

Этот минимальный комплект обеспечивает ввод и герметизацию двух ОК, а также герметизацию собранного корпуса муфты. В муфте установлена одна кассета.

Базовый комплект – это соединительная муфта.

Для превращения ее в разветвительную в муфтах типа МТОК к комплекту соединительной муфты добавляется еще один узел ввода.

В муфты МТОК 96 устанавливаются кассеты типа КУ.

В базовый комплект муфт МТОК 96 включается одна кассета на 32 КДЗС и подкассетник для укладки запаса модулей.

В муфтах МТОК 96 возможна установка 3-х кассет типа КУ.

Для кассет КУ разработаны сменные ложементы для укладки гильз КДЗС, соединителей Fiberlok фирмы ЗМ и соединителей CORELINK фирмы АМР.

К базовому комплекту муфты любого типа консультанты ЗАО "Связьстройдеталь" добавляют все необходимые детали, приспособления и инструменты. Например, добавляются гильзы КДЗС, дополнительные кассеты, защитные кожухи и муфты, контейнеры и провода заземления, установочные и монтажные кронштейны, а также специальные инструменты и приспособления. Руководства по монтажу также поставляются дополнительно.

Комплектация муфт производится после получения от заказчика информации о трассе и муфтах.

## 14.4. Контрольные вопросы

1. Каково назначение соединительных муфт?
2. Каковы область и условия применения соединительных муфт?
3. Каковы требования к соединительным муфтам?
4. Дайте классификацию соединительных муфт по способу герметизации.
5. Какие методы герметизации муфт применяются при «холодном» способе?
6. Какие методы герметизации муфт применяются при «горячем» способе?
7. Каковы назначения кассет?
8. Какие требования предъявляют к кассетам?
9. Зачем нужен запас ОВ в кассетах? Какова его величина?
10. Каким методом соединяются ОВ в муфтах?

## РАЗДЕЛ 15. ПАССИВНЫЕ КОМПОНЕНТЫ ВОСП

---

### 15.1. Волоконно-оптические ответвители и разветвители

Волоконно-оптические ответвители и в особенности разветвители, наряду с оптическими кабелями, являются основными элементами пассивных оптических сетей доступа (ПОС), получающих все большее применение. Это главный элемент древовидной топологии ПОС (точка – много точек). Ответвители по большей части применяются в системах и устройствах контроля параметров и управления оборудованием и систем ВОСП, а также в измерительных приборах для ВОСП, в особенности в оптических рефлектометрах. В соответствии с названием, оптические ответвители выполняют функцию ответвления части энергии светового потока с заданным коэффициентом ответвления. В волноводной технике (а оптическое волокно – это волновод оптического диапазона) ответвители называются направленными, потому что ответвление происходит только при распространении оптического излучения в прямом направлении. При распространении излучения в обратном направлении ответвления не происходит, хотя при этом в точке ответвления часть энергии теряется. В настоящее время существует два типа направленных ответвителей: ответвители X-типа и Y-типа. Широкое применение получили ответвители X-типа. На рис. 15.1, *a* представлена схема такого направленного ответвителя.

Ответвитель X-типа изготавливается из двух отрезков оптических волокон. На некоторой длине  $L$  у каждого из волокон сошлифовывается часть рабочей оболочки (или удаляется травлением), после чего оба волокна сплавляются с помощью сварочного аппарата. В результате такой технологической операции сердечники волокон располагаются параллельно на длине  $L$ . В зависимости от расстояния  $H$  между центрами сердечников ОВ и длины  $L$  между волноводами происходит взаимодействие, выражающееся в том, что на определенном расстоянии от точки  $A$  в направлении точки  $B$  энергия мод волновода  $B1$  переходит в волновод  $B2$ , при дальнейшем распространении она возвращается в волновод  $B1$ . На некоторой промежуточной длине  $L$  мощность излучения распределяется поровну в обоих каналах. Величина  $L$  зависит от зазора  $H$  и от

длины волны излучения. Наиболее часто ответвитель типа X выполняется для этого последнего случая, т. е. для режима деления входной мощности на две равные части, хотя для устройств контроля изготавливают и такие X-ответвители, у которых коэффициент ответвления может составлять менее 10%.

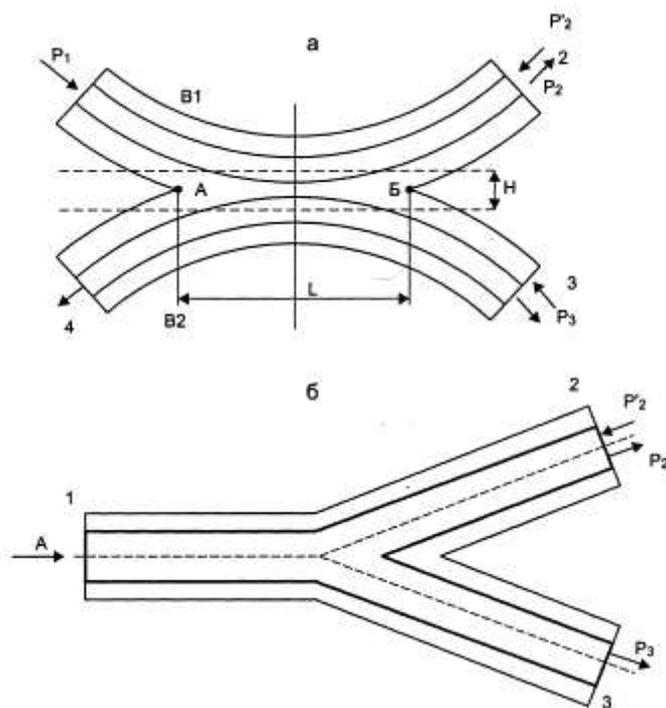


Рис. 15.1. Направленный ответвитель X-типа (а) и разветвитель типа Y (б)

Не менее широкое применение находит второй тип ответвителей – ответвитель типа Y. Схема его устройства представлена на рис. 15.1 б. Этот ответвитель в подавляющем большинстве случаев используется как делитель мощности на две части (которые могут быть не равными), поэтому он чаще называется разветвителем. Этот тип разветвителя является базовым для изготовления многоканальных матричных разветвителей и различных интерферометров.

Оба типа ответвителей характеризуются следующими параметрами:

коэффициент передачи:

$$k_{12} = P_2/P_1 \text{ или } k_{12} = 10 \lg P_2/P_1 \text{ дБ; } k_{12} \approx k_{21}$$

$$k_{13} = P_3/P_1 \text{ или } k_{13} = 10 \lg P_3/P_1 \text{ дБ; } k_{13} \approx k_{31}$$

коэффициент развязки (изоляция),

или переходное затухание:

$$k_{23} = k_{32} = 10 \lg P_{21}/P_{31}$$

Этот параметр определяет ту часть энергии, которая проникает, например, в плечо 3 при вводе излучения в плечо 2 или наоборот – в плечо 2 при вводе энергии в плечо 3. При этих измерениях торец общего плеча (канала 1) должен помещаться в кювет с иммерсионной жидкостью с показателем преломления, равным показателю преломления сердечника ОВ. Эта операция необходима для исключения внутреннего отражения света от торца при вводе его в одно из боковых плеч. В случае с X-ответвитель также поступают и с плечом 4. Часто в качестве иммерсионной жидкости используется обычный обезвоженный глицерин, показатель преломления которого  $n_2=1.478$ , хотя для этих целей

созданы специальные гели. Третий параметр – коэффициент вносимых потерь  $k_{вн}$ :

$$k_{вн} = \frac{P_1 - (P_2 + P_3)}{P_1} \text{ или } k_{вн} = 10 \lg \frac{P_1 - (P_2 + P_3)}{P_1}. \quad (15.1)$$

Для Х-ответвителя при измерении этого параметра вход 4 также помещается в иммерсионную среду. Современные ответвители и разветвители Y- и X-типов имеют вносимые потери  $k_{вн} = 0,1 \dots 0,5$  дБ.

В настоящее время оптические ответвители и разветвители производят 29 фирм и компаний. Из них ответвители с вносимыми потерями 0,1 дБ выпускают только две: Michael S Cohen, Qikertown PA18961 (США) и Nanonics Imaging Ltd, Jerusalem. 91487 Israel. В России с такими параметрами ответвители X-типа производит НПО «ИРЭ-ПОЛЮС» (г. Фрязино Московской области). Ниже приводятся параметры этих ответвителей:

- коэффициент ответвления %:.....50/50; 30/70; 20/80; 10/90; 5/95; 1/99;
- рабочая длина волны, мкм.....0.83; 1.06; 1.3; 1.55;
- вносимые потери, дБ..... <0.1 (класс А); <0.2 (класс В);
- неравномерность коэффициента ответвления, дБ.....0.1;
- обратное отражение, дБ.....<-60;
- поляризационная чувствительность, дБ.....0.1.

Для повышения эффективности ввода энергии в волокно и вывода обратного излучения предложен несимметричный Y-разветвитель, схема которого представлена на рис. 15.2.

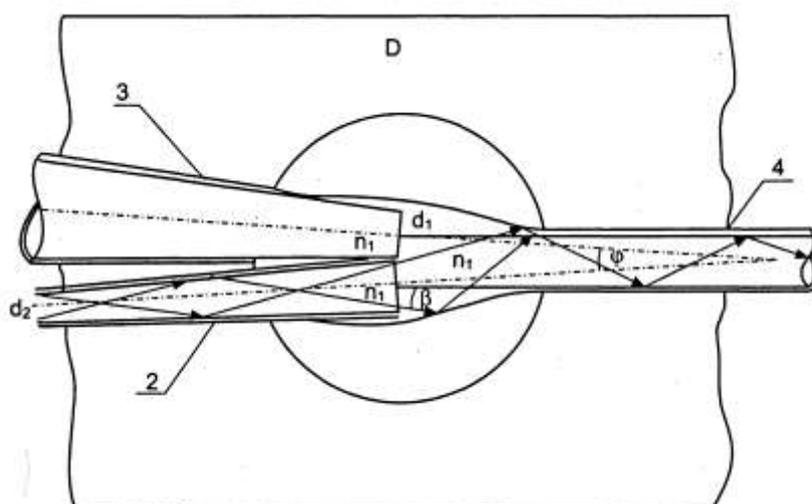


Рис. 15.2. Несимметричный Y-разветвитель

На подложке  $D$  закреплены: коническое волокно 2 (1-е боковое плечо), коническое волокно 3 (2-е боковое плечо) и 4 – цилиндрическое волокно (общее плечо). Точка встречи трех волокон располагается в центре отверстия подложки  $D$ , где они закреплены между собой специальным оптическим клеем,

показатель преломления которого в застывшем состоянии близок к показателям преломления сердечников волокон 1, 2, 3. В пределах отверстия, диаметр которого равен 2 мм, с концов перечисленных волокон методом травления сняты отражающие оболочки. Излучение вводится в торец волокна 2 с меньшим диаметром ( $d_2$ ), выходной торец с большим диаметром, как видно из схемы, сопряжен с торцами волокон 3 и 4. Благодаря коллимирующему действию конического волокна 2, расходимость излучения на его выходе уменьшается, в результате чего оно падает на внутреннюю поверхность конусообразного тела, образованного застывшим клеем, под углом  $\beta$ , при котором происходит полное внутреннее отражение. Так что излучение входит в волокно 4 торцом с меньшим диаметром, благодаря чему волокном 3 перехватывается большая часть отраженного излучения. Измеренные потери описанного разветвителя имеют следующие значения: потери мощности при передаче из волокна 2 в общее плечо 4 составили 1.5 дБ, при передаче из волокна 4 в волокно 3 ~2 дБ. Развязка между волокнами 2 и 3 составляет 40 дБ.

## **15.2. Волоконно-оптические переключатели**

Изменение архитектуры волоконно-оптических сетей, оперативная маршрутизация в сетях доступа и локальных системах ВОСП невозможны без быстрой и эффективной коммутации оптических информационных потоков. Эта коммутация осуществляется с помощью волоконно-оптических переключателей. Существует довольно большое количество типов волоконно-оптических переключателей: электромеханические, термооптические, акустооптические, электрооптические и переключатели с управлением оптическим же сигналом, основанные на нелинейных явлениях.

### **15.2.1. Электромеханические переключатели**

Принцип действия электромеханических волоконных переключателей аналогичен работе обычных электромагнитных реле: на неподвижной части реле под некоторым углом расположены два торца оптических волокон. Напротив торца одного из них на подвижной части реле закреплен конец подвижного ОВ торцом, расположенным соосно с упомянутым выше неподвижным ОВ. С точки зрения потерь эти переключатели имеют неплохие параметры: коэффициент передачи ~0,3...1,5 дБ, развязка >60 дБ, малая потребляемая мощность – 2...20 мВт. Недостаток таких переключателей – низкое быстродействие, чувствительность к внешним воздействиям, особенно к вибрациям, относительно большие габариты и невозможность применения в интегрально-оптических устройствах. Тем не менее, этот тип волоконно-оптических переключателей находит достаточно широкое применение.

Все большее распространение приобретают термооптические, акустооптические и электрооптические переключатели.

### 15.2.2. Термооптические переключатели

Этот тип переключателей основан на нескольких принципах работы.

На рис. 15.3 представлена схема термооптического переключателя. Он состоит из следующих элементов. Световод *1*, являющийся общим каналом, имеет, как обычно, сердцевину и оболочку и расположен соосно со световодом *2*. Плоскость выходного торца световода *1* наклонена к оси под углом  $(\psi - \pi)/2 - \varphi$ , плоскость входного торца световода *2* нормальна к его оси. Рядом со световодом *2* расположен световод *3*. Его ось наклонена к оси световодов *1* и *2* под некоторым углом  $\alpha$ . Как и для световода *2*, входной торец световода *3* плоский и нормальный к оси. Из схемы видно, что выходной торец световода *1* расположен на некотором расстоянии от входных торцов световодов *2* и *3* и образует промежуток. Нижняя часть промежутка заполнена иммерсионной жидкостью *4*, показатель преломления которой  $n_1'$  подбирается равным показателю преломления сердечника ОВ –  $n_1$ . Количество жидкости должно быть таким, чтобы ее поверхность была ниже сердцевин световодов. Оставшийся промежуток заполнен сжатым воздухом с давлением  $\sim 1,1..1,2$  атм.

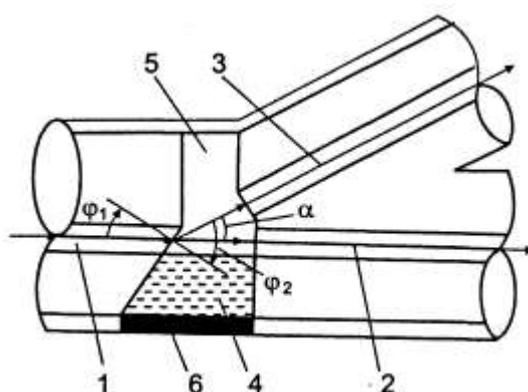


Рис. 15.3. Термооптический переключатель

Принцип действия коммутатора состоит в следующем. Излучение, проходя через сердечник световода *1* и преломляясь на его выходном торце под углом  $\varphi_2$ , падает нормально на входной торец световода *3* и с учетом отражения при нормальном падении ( $\sim 4\%$ ) вводится в него и, распространяясь по световоду *3*, выходит из его выходного торца. При нагревании жидкость *4* расширяется и, если температура нагрева достаточна, заполняет промежуток между выходным торцом световода *1* и входным торцом световода *2*. Поскольку показатель преломления жидкости приблизительно равен показателю преломления сердечников световодов *1* и *2*, среда вдоль всей оси становится оптически однородной и поток, введенный в световод *1*, выходя из его выходного торца, не преломляется и проходит через световод *2*. После снятия нагрева сжатый воздух выталкивает жидкость в прежнее состояние и световой поток отклоняется в исходное положение. Отметим, что при размерах световодов, принятых в технике волоконно-оптической связи, т. е. при внешнем диаметре  $d_2 = 125$  мкм и диаметре сердцевин  $10..50$  мкм, величина промежутка равна

одному диаметру сердечника. При таких размерах промежутка неизбежно действие капиллярного эффекта, в результате которого пространство между сердечниками может заполниться жидкостью. Избыточное давление воздуха в остальном пространстве промежутка способствует решению двух задач – устранению капиллярного эффекта и ускорению вытеснения жидкости 4 в исходное положение после прекращения нагревания, т. е. повышению быстродействия коммутатора.

На рис. 15.4 представлена схема другого варианта термооптического волоконного переключателя, где он выполнен из трех различных оптических волокон с одинаковыми геометрическими параметрами.

По типу он соответствует Y-разветвителю, у которого общее плечо 1 выполнено из обычного кварцевого волокна, состоящего из сердечника с показателем преломления  $n_1$  и оболочки с показателем преломления  $n_2$ , причем,  $n_1 > n_2$ . Торцевое волокно в области соединения с волокном верхнего 2 и нижнего бокового плеча 3 сошлифовано, как показано на чертеже, с двух сторон в виде остроугольной “крыши” с углом при вершине  $\varphi$ . Торцы волокон 2 и 3 сошлифованы под углом  $\varphi$  каждое с одной стороны и состыкованы с остроугольным торцом волокна общего плеча 1, например, методом спекания. При температуре, выбранной в качестве исходной, показатель преломления  $n_1 > n_3 = n_2$  и  $n_1 = n_4$ . Однако температурные коэффициенты приращения показателей преломления должны быть в соотношениях  $\beta_3 > \beta_1$ ,  $|\beta_1| < |\beta_4|$ , а температурный коэффициент приращения показателя преломления  $n_4$  должен при этом иметь отрицательный знак. Таким образом, при повышении температуры устройства показатель преломления  $n_3$  должен возрасти быстрее, чем  $n_1$ , а показатель преломления  $n_4$  должен при этом уменьшаться. При повышении температуры  $n_2$  всегда должен быть меньше, чем  $n_1$ ,  $n_3$  и  $n_4$ .

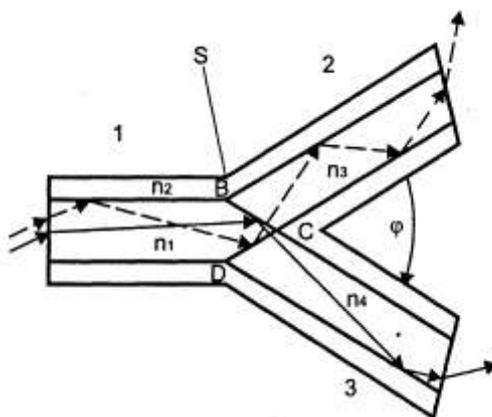


Рис. 15.4. Термооптический волоконно-оптический переключатель

Принцип работы коммутатора состоит в следующем. В исходном состоянии при соблюдении указанных выше условий излучение, введенное во входной торец волокна 1 при достижении его двоякоскошенного торца, претерпевает полное внутреннее отражение от границы BC и направляется в волокно 3, как показано на рисунке. При некоторой температуре равенство

$n_1=n_4$  нарушается и превращается в неравенство  $n_1>n_4$ , а неравенство  $n_1>n_3$ , наоборот, становится равенством –  $n_1=n_3$  и тогда излучение (на схеме показано пунктиром) претерпевает полное внутреннее отражение от границы  $D1$  и направляется в волокно 2.

В настоящее время широкое распространение получили термооптические коммутаторы на основе интерферометров Маха-Цендера, одно из плеч которого выполнено из термочувствительного оптического материала. Вследствие изменения показателя преломления в этом плече создается сдвиг фазы оптического излучения, приводящее к отклонению излучения от исходного состояния в другом направлении.

### 15.2.3. Электрооптические коммутаторы

Наибольшее распространение в системах ВОЛС, в локальных сетях и т. д. получают волоконно-оптические коммутаторы, работа которых основана на использовании электрооптических и акустических явлений.

Существуют электрооптические материалы, например, ниобат лития  $\text{LiNbO}_3$ ;  $\text{Ti} + \text{LiNbO}_3$ ;  $\text{LiTiO}_3$ ;  $\text{LiTaO}_3$  и др., которые превращаются в оптически анизотропные при приложении к ним электрического поля. Анизотропия наступает вследствие изменения показателя преломления материала под воздействием электрического поля. В принципе действие таких электрооптических коммутаторов аналогично работе термооптических коммутаторов. На рис. 15.5 представлена схема электрооптического коммутатора на основе направленного ответвителя X-типа.

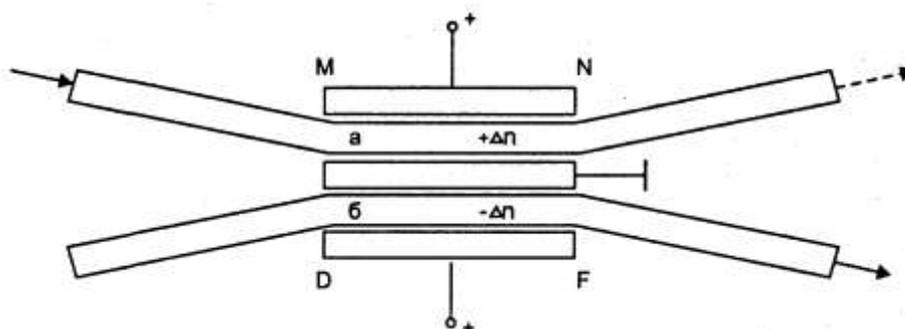


Рис. 15.5. Схема электрооптического коммутатора на основе X-разветвителя

Световоды 1 и 2 на участках MN и DF выполнены из электрооптического материала. С наружных сторон и между волноводами имеются прозрачные электроды. Прикладывая напряжение к электродам, можно изменять показатели преломления, изменяя коэффициент направленности ответвителя. Электрооптические коммутаторы обладают большими преимуществами по сравнению с термооптическими и тем более электромеханическими:

- во-первых*, их быстродействие достигает единиц наносекунд,
- во-вторых*, для них требуется малое управляющее напряжение – 2.5...3 В, т. е. они могут управляться интегральными цифровыми микросхемами.

Преимуществом электрооптических коммутаторов является также

возможность интегрального исполнения в структурах интегральной оптики. Электрооптические материалы применяются также в коммутаторах, основанных на использовании интерферометров Маха-Цендера, разветвителей типа Y. Электрооптические коммутаторы хорошо подходят для создания коммутационных матриц, применяемых для оперативного изменения топологии сетей.

#### **15.2.4. Технология МЕМ**

В последние 2 – 3 года в оптических кросс-коммутаторах оптических сетей началось широкое использование электромеханических зеркальных микрокоммутаторов на основе технологий микроэлектромеханических переключателей световых потоков. Основной деталью этих переключателей является микрозеркало диаметром 0.5 мм. Это микрозеркало закреплено на двухкоординатном узле, представляющим собой две карданные подвески. Эти подвески выполнены в виде полосок из специального сплава. При протекании электрического тока эти полоски увеличиваются по длине (или сокращаются), поворачивая при этом зеркало в одном или другом направлении. На рис. 15.6 представлен вариант такой подвески круглого микрозеркала.

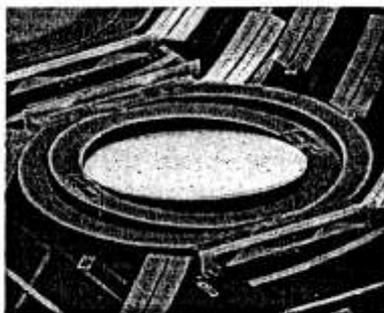


Рис. 15.6. Вариант карданной подвески круглого микрозеркала

На рис. 15.7 представлено устройство микроэлектромеханического оптического коммутатора.

Коммутатор представляет собой массив из 256 микрозеркал. Диаметр этих зеркал 0,5 мм, расстояние между зеркалами 1 мм. Напротив центра каждого из зеркал расположены торцы 256 волокон с торцевыми микролинзами. Излучение, выходящее с торцов одного из волокон, подается на соответствующее микрозеркало. Если это зеркало наклонено относительно оси волокна, отражающийся от него свет направляется на общий отражатель, который также наклонен под определенным углом. От этого отражателя свет направляется на другое микрозеркало, которое направляет луч на торец другого волокна. Так осуществляется сканирование лучей по 256 направлениям. Оптические коммутаторы МЕМ имеют следующие параметры: вносимые потери менее 1 дБ, время переключения – единицы миллисекунд. Управление производится электрическими сигналами: напряжение – 2.5 В при токе до 25 – 30 мА.

Таким образом, оптические коммутаторы МЕМ, коммутирующие

сигнальные оптические потоки по отношению к этим потокам, являются полностью оптическими, но управляются электрическими сигналами, т.е. не могут считаться полностью оптическими во всех отношениях.

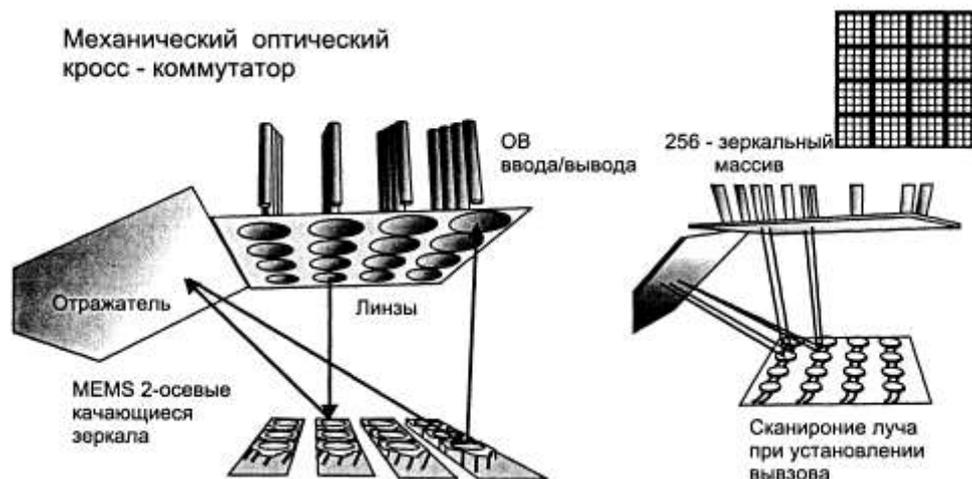


Рис. 15.7. Микроэлектромеханический оптический коммутатор

### 15.3. Оптические изоляторы

Оптические изоляторы или вентили – устройства, пропускающие свет только в одном направлении. Они широко применяются в различных устройствах волоконно-оптических систем, в частности в волоконно-оптических усилителях.

Принцип работы оптического вентиля основан на явлении вращения плоскости поляризации света при прохождении его через некоторые вещества, чувствительные к магнитному полю. Наибольшая чувствительность проявляется в том случае, когда магнитные силовые линии перпендикулярны направлению распространения света. Если тело, изготовленное из такого вещества, имеет длину  $L$ , то угол поворота плоскости поляризации  $\psi$  определяется из выражения:

$$\psi = \rho \cdot L \cdot H, \quad (15.2)$$

где:  $\rho$  – постоянная Верде,  $H$  – напряженность магнитного поля. Поскольку явление поворота плоскости поляризации в магнитном поле открыл Фарадей, иногда оптический изолятор, основанный на использовании этого явления, называют фарадеевским.

На рис. 15.8, *a* представлена схема работы оптического изолятора. неполяризованный луч света направляется на поляризатор  $1$ , пропускающий плоскополяризованное излучение  $P_{\perp}$ , затем проходит через фарадеевский элемент  $2$  с постоянной Верде  $\rho$ , находящийся в перпендикулярном магнитном поле  $H$ , создаваемом постоянным магнитом  $3$ . На выходе этого элемента  $2$  плоскость поляризации луча повернется на угол  $\psi$ , определяемым постоянной  $\rho$ , длиной элемента  $2$  –  $L$  и величиной  $H$ . Значения этих параметров выбираются

такими, чтобы угол поворота  $\varphi$  был равен  $45^\circ$ . Таким образом, элемент 4 в данном случае играет роль поляризационного анализатора. Если теперь с другой стороны, справа, направить луч, то та его составляющая, плоскость поляризации которой совпадает с плоскостью поляризации элемента 4, проходит через него и вводится в фарадеевский элемент 2, в котором плоскость поляризации поворачивается еще на  $45^\circ$ . Таким образом, попадая справа на элемент 1, плоскость поляризации луча оказывается развернутой по отношению к входному лучу на  $90^\circ$ , вследствие чего поляризатор 1 его не пропускает.

Необходимо отметить, что излучение, распространяющееся в ОВ, как правило, неполяризованное. Поэтому при прохождении через поляризатор теряется половина мощности излучения (3 дБ).

На рис. 15.8, б представлена схема оптического изолятора, применяемая на практике, где 1 – оптический элемент с анизотропными свойствами, благодаря которым неполяризованный луч расщепляется на два ортогонально поляризованных луча – с перпендикулярной плоскостью поляризации (обыкновенный луч) и с параллельной – необыкновенный луч (в качестве такого элемента может служить призма, например, Николя или Рошона). Оба луча направляются на фарадеевский элемент 2, на выходе которого плоскость поляризации поворачивается на  $45^\circ$ . После этого оба луча направляются также на призму 4, развернутую по отношению к призме 1 на  $45^\circ$ . Поскольку призмы 1 и 4 обладают свойством обратимости, то на выходе призмы 4 излучение будет неполяризованным. Если теперь излучение на призму 4 направить справа, то, пройдя через эту призму и элемент 2, плоскость поляризации каждого луча (обыкновенного и необыкновенного) повернется еще на  $45^\circ$ , так что к элементу 1 оба луча подойдут с плоскостями поляризации, развернутыми на  $90^\circ$  по отношению к входным, вследствие чего через призму 1 они не пройдут.

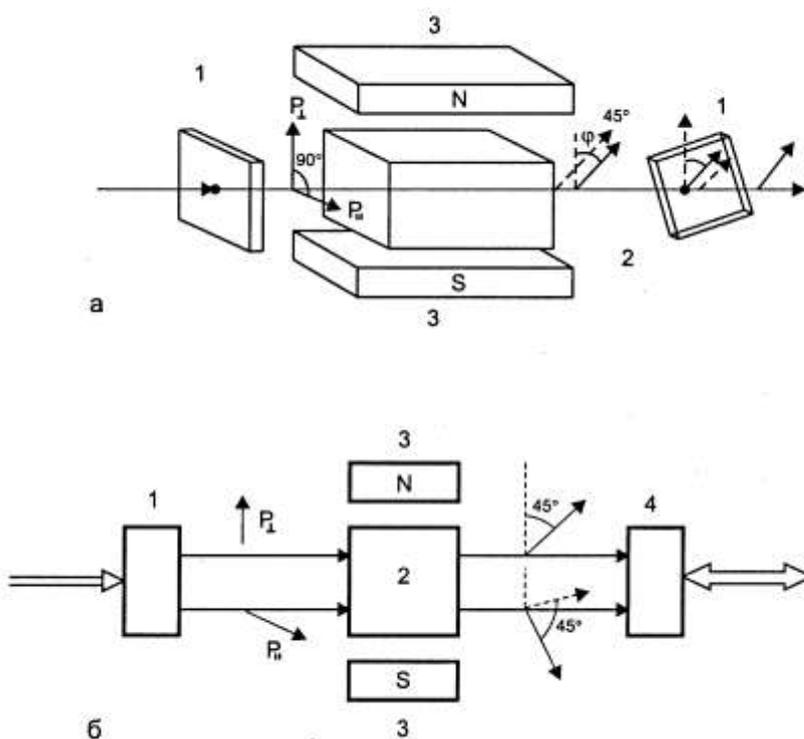


Рис. 15.8. Схема и принцип работы оптического изолятора

В настоящее время элемент 2 для оптических изоляторов выполняется из железиттриевого граната YIG или более подходящего материала на основе двуокиси титана  $TiO_2 + CaCO_2$ . Современные оптические изоляторы имеют потери мощности излучения в прямом направлении менее 1 дБ, в обратном – более 50 дБ. Конструктивно оптические изоляторы выполняются в виде цилиндра диаметром 8...10 мм и длиной 30...60 мм.

## 15.4. Волоконно-оптические циркуляторы

Эффект Фарадея применяется еще в одном волоконно-оптическом устройстве – оптическом циркуляторе. В отличие от двух портовых оптических изоляторов, имеющих один вход и один выход (т. е. они двухпортовые), оптические циркуляторы являются 3- или 4-портовыми, т. е. они могут иметь один вход и два выхода или два входа и два выхода. Распределение излучения между этими портами определяется направлением распространения. На рис. 15.9, а и б представлены схемы соответственно 3- и 4-портовых циркуляторов.

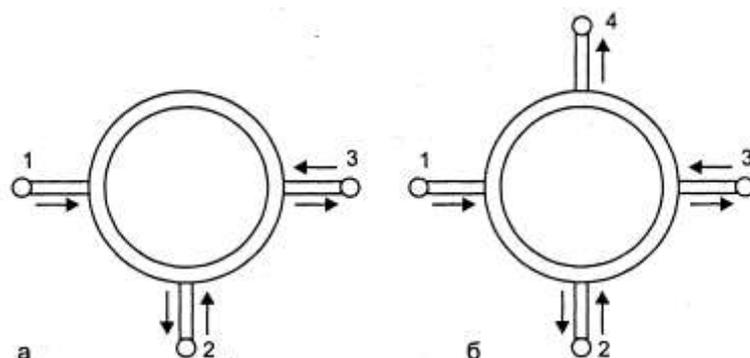


Рис. 15.9. Схемы 3- и 4-портовых оптических циркуляторов

Циркулятор, соответствующий рис. 15.9, а (Y – циркулятор), обладает следующими свойствами: излучение, входящее в порт 1, проходит к порту 2; однако излучение, введенное в порт 2, не возвращается в порт 1, а проходит в порт 3, излучение, введенное в порт 3, в порт 2 не проходит.

Циркулятор, выполненный по схеме рис. 15.9, б, обладает следующими свойствами: излучение, введенное в порт 1, проходит к порту 2; излучение, введенное в порт 2, выходит из порта 3; излучение, введенное в порт 3, проходит в порт 4, а введенное в этот порт 4 – выходит из порта 1. Собственно говоря, этот тип циркулятора представляет собой два циркулятора Y-типа, соединенные параллельно.

Принцип работы оптического циркулятора аналогичен принципу работы изолятора. Отличие состоит в том, что кроме элементов, имеющих в изоляторе, в циркулятор введена трехгранная призма, которая пропускает

излучение в одном направлении по прямой и в противоположном – отклоняет его на  $90^\circ$ . Оптические циркуляторы имеют следующие характеристики:

- вносимые потери.....<1,2 дБ,
- изоляция.....>40 дБ,
- перекрестные помехи.....<-59 дБ,
- обратные отражения.....<-50 дБ,
- поляризационная чувствительность.....<0,2 дБ.

## 15.5. Контрольные вопросы

1. Какие типы ответвителей применяются?
2. Какими параметрами характеризуются оптические ответвители?
3. Как работает несимметричный Y-разветвитель?
4. В чем состоит принцип действия электромеханических оптических переключателей?
5. Что представляет собой термооптический переключатель?
6. Какие преимущества электрооптических коммутаторов?
7. Что представляет собой технология микроэлектромеханических переключателей световых потоков?
8. На чем основан принцип работы оптического изолятора?
9. Как определяется распределение излучения между портами оптического циркулятора?

## **РАЗДЕЛ 16. ПАССИВНЫЕ КОМПОНЕНТЫ ВОСП**

---

### **16.1. Оптические мультиплексоры/демультиплексоры**

#### **16.1.1. Мультиплексоры на основе дифракционной решетки на массиве волноводов**

Системы ВОЛС с многоволновым уплотнением – WDM, DWDM и CWDM были бы невозможны без устройств объединения пространственно разделенных оптических информационных потоков с  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ , и  $\lambda_N$  в один поток с общим направлением (на передаче) и устройств, выполняющих обратную операцию (на приеме). Эта задача решается с помощью мультиплексоров/демультиплексоров. Кроме систем ВОЛС с DWDM, мультиплексоры применяются в волоконно-оптических усилителях, в локальных сетях при волновой маршрутизации и в некоторых других случаях.

По характеру решаемой задачи мультиплексоры можно разделить на два типа:

- мультиплексоры, объединяющие небольшое количество спектральных каналов (не более 4-х) при расстоянии между каналами по длине волны от долей до сотен нм;
- мультиплексоры, объединяющие количество спектральных каналов более 8-ми: 8, 16, 32, 40 – до 160 и более при расстоянии между каналами (частотный интервал или шаг) по длине волны от 0,4 нм до 0,08 – 0,04 нм.

По принципам работы, устройству и технологии изготовления оптические мультиплексоры также можно разделить на два типа:

- оптические мультиплексоры (ОМ), основанные на использовании дифракционных решеток,
- ОМ, работа которых основана на свойствах и характеристиках многослойных оптических интерференционных покрытий – интерференционных фильтров.

В высокоскоростных системах ВОЛС с DWDM применяются оптические мультиплексоры, основанные на использовании дифракционных фазовых решеток. В качестве дифракционной фазовой решетки в таком мультиплексоре (МП) применена ее разновидность – эшелон майкельсона. Классический

эшелон майкельсона представляет собой сложенные одна на другую строго параллельные пластины разной длины  $L$ , но разность  $\Delta L$  должна быть постоянной. Сложенные пластины образуют единую прозрачную призму, одна грань которой плоская, противоположная – ступенчатая с одинаковыми ступеньками. Пройдя через всю призму, лучи на указанных ступеньках дифрагируют. Угол дифракции зависит от длины волны (при постоянных размерах ступенек). В мультиплексорах для волоконно-оптических систем функции пластин в эшелоне майкельсона выполняют оптические волноводы (планарные или волоконные). Мультиплексоры, использующие фазовые решетки, получили название волноводных спектральных мультиплексоров (ВСМ) или волноводных спектральных анализаторов (ВСА).

На рис. 16.1 изображен волноводный (волоконный) вариант эшелона Майкельсона. Из рисунка видно, что каждый поток должен падать на все торцы волноводов. Для этого применяются специальные оптические элементы, коллимирующие или фокусирующие оптический поток. На рис. 16.2 показано устройство мультиплексора.

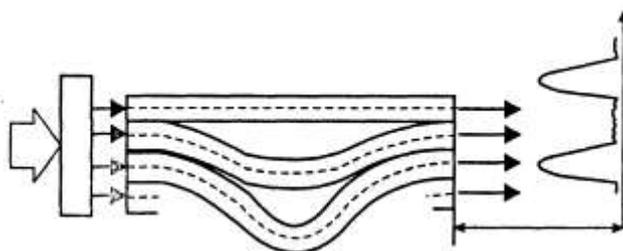


Рис. 16.1. Волноводный вариант эшелона Майкельсона



Рис. 16.2. Схема устройства волноводного мультиплексора

Оптический поток, представляющий собой сумму отдельных потоков на  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ , и  $\lambda_N$ , поступает на коллимирующий элемент (первая пластина), в которой происходит распределение энергии на все торцы волноводов, образующих волновую матрицу (эшелон Майкельсона). С его выхода поток подается на вторую пластину, распределяющую отдельные потоки, каждый на своей длине

волны  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ , и  $\lambda_N$ , на торцы соответствующих волокон. Все перечисленные элементы расположены на кварцевой подложке. Как видно из рисунка, в таком мультиплексоре потери энергии происходят при вводе или выводе излучения в волноводную пластину (1-ю и 2-ю) в месте стыка этих пластин с волновой матрицей, в изгибах волноводов, составляющих эту матрицу. Из рисунка и описания работы ВСМ понятно, что это устройство обладает свойством обратимости, или взаимности, т. е. одно и то же устройство может выполнять функцию объединения пространственно разделенных потоков с длинами волн  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ , и  $\lambda_N$  в один поток (мультиплексор) или наоборот – функцию пространственного разделения единого оптического потока на отдельные потоки с соответствующими длинами волн. Многоканальные ОМ на основе фазовых решеток, которые далее назовем мультиплексорами решеточного типа (AWG — arrayed waveguide grating), являются высокоселективными оптическими устройствами. Ширина полосы каждого спектрального канала зависит от числа мультиплексируемых спектральных каналов и частотного межканального интервала. Поэтому одним из важнейших параметров ОМ являются перекрестные помехи, проникающие в канал. Для оптических мультиплексоров перекрестные помехи разделяются на два типа: перекрестные помехи по соседнему (смежному) каналу и перекрестные помехи от дальних спектральных каналов (кумулятивная помеха). Влияние этих помех особенно сильно проявляется при демультиплексировании, т. е. когда устройство выполняет функцию обратного мультиплексирования.

### **16.1.2. Оптические мультиплексоры интерференционного типа (ИОМ)**

Другой тип оптических мультиплексоров основан на использовании многослойных интерференционных покрытий с заданными спектральными характеристиками. На рис. 16.3 представлена схема устройства и работы ИОМ.

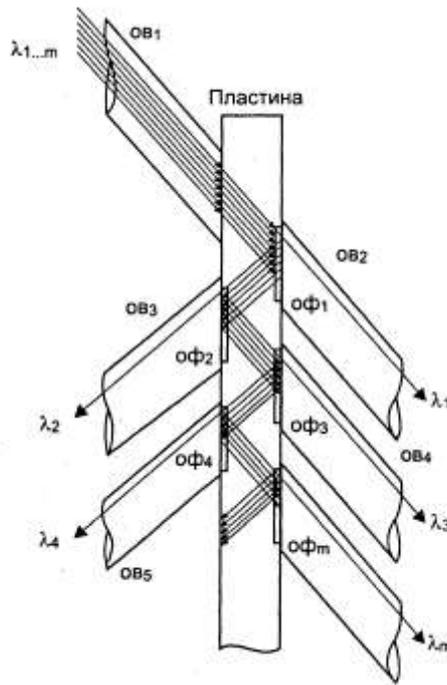


Рис. 16.3. Схема устройства интерференционных оптических мультиплексоров (ИОМ)

На тонкой кварцевой пластине толщиной 1 – 2 мм нанесены методом напыления многослойные покрытия – оптические интерференционные фильтры  $ОФ_1...ОФ_m$ . Они нанесены на обеих сторонах пластины с определенным шагом и смещением по отношению к другой стороне. Оптический групповой сигнал DWDM с длинами волн  $\lambda_1... \lambda_m$  в оптическом волокне  $ОВ_1$  направляется на левую сторону пластины и через нее направляется на  $ОФ_1$ . Как видно из рисунка, оси волокон  $ОВ_1, ОВ_2, ОВ_m$  наклонены к плоскости пластины под определенными углами. Оптический интерфильтр  $ОФ_1$  рассчитан и выполнен так, чтобы через него проходила только длина волны  $\lambda_1$ , остальная часть потока с длинами волн  $\lambda_2... \lambda_m$  отражается и падает на покрытие  $ОФ_2$  на противоположной, внутренней стороне, пластины. Этот фильтр  $ОФ_2$  пропускает только  $\lambda_2$ , остальную часть потока с  $\lambda_3... \lambda_m$  отражает в сторону  $ОФ_3$ , который пропускает только  $\lambda_2$  и т. д.

Мультиплексоры этого типа отличаются почти полным отсутствием кумулятивной помехи, а величина перекрестной помехи по соседнему каналу составляет величину менее  $-60$  дБ (по уровню  $-20$  дБ). Это одно из достоинств интерОМ по сравнению с ОМ решеточного типа. Второе, не менее важное их достоинство – слабая зависимость спектральных параметров, не требующая жесткой температурной стабилизации.

Основной недостаток ИОМ – сильная зависимость вносимых потерь в канале от числа каналов. При мультиплексировании до 10 спектральных каналов вносимые потери от сотых долей дБ в первых каналах возрастают до  $(0,97 \cdot 0,98)^{10} = 0,74$  или 1,3 дБ. При увеличении количества спектральных каналов до 32 потери возрастают до 4,2 дБ, до 40 – 5.3 дБ. Вторым недостатком ИОМ – сложность технологии изготовления и связанная с этим высокая стоимость.

Дальнейшее наращивание числа уплотняемых спектральных каналов

осуществляется с помощью каскадного включения мультиплексоров. В настоящее время ведутся интенсивные разработки ОМ других типов, в частности, на основе фотонных кристаллов.

## 16.2. Электрооптические модуляторы

В современных ВОСП используется два типа внешних модуляторов: электрооптические модуляторы на основе эффекта Поккельса и полупроводниковые (электроабсорбционные) модуляторы на основе эффекта Келдыша–Франца.

Эффект Поккельса заключается в создании искусственной анизотропии в кристаллах под воздействием электрического поля. Кристалл под воздействием электрического поля из оптически изотропного (однородного) превращается в оптически анизотропный (двуосный), т. е. происходит изменение двойного лучепреломления света и направления оптических осей определенных типов кристаллов. Электрооптический эффект описывается соотношениями, выражающими зависимость величин оптических поляризационных констант от величины напряженности электрического поля. При приложении электрического поля в некоторых кристаллах возникают как линейные (пропорциональные напряжению  $E$ ), так квадратичные (пропорциональные  $E^2$ ) эффекты, однако последние весьма малы и ими можно пренебречь.

Рассмотрим принцип работы электрооптического модулятора (ЭОМ). Пусть поляризованный свет попадает в среду с двойным лучепреломлением. Среда с двойным лучепреломлением – это такая среда, в которой свет распространяется по двум осям с взаимноперпендикулярными (ортогональными) плоскостями поляризации. Если направление луча не совпадает с оптической осью среды, то в ней с разной скоростью будут распространяться две волны, у которых электрические векторы колеблются в плоскостях, параллельных осям соответствующего сечения оптической индикатрисы. Если свет распространяется вдоль продольной оси кристалла, находящегося под воздействием электрического поля, то плоскости колебаний электрического вектора обеих волн будут параллельны ортогональным осям оптической индикатрисы кристалла. Характер и степень поляризации излучения на выходе кристалла, помещенного в электрическое поле, будет зависеть от разности фаз и амплитуд обеих волн. При приложении к кристаллу электрического поля он становится двулучепреломляющим вследствие переориентации электрических диполей молекул, а, следовательно, изменения диэлектрической проницаемости, связанной с показателем преломления вещества, вызванным электрооптическим эффектом, в зависимости от амплитуды электрического поля определяется выражением:

$$\Delta n = -\frac{n^3}{2} r_{ij} E, \quad (16.1)$$

где:  $n$  – показатель преломления при  $E=0$ ,  $E$  – напряженность электрического поля,  $r_{ij}$  – электрооптический коэффициент.

Фаза  $\varphi$  оптического излучения, проходящего через кристалл, под воздействием электрического поля будет изменяться в соответствии с выражением:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n \cdot l, \quad (16.2)$$

где  $\lambda$  – длина волны излучения,  $l$  – длина пути в веществе (кристалле).

В результате происходит фазовая модуляция оптической несущей. Если после кристалла, на выходе излучения поместить поляризатор (анализатор поляризации), то излучение с фазовой модуляцией будет преобразовано в излучение, модулированное по интенсивности. На рис. 16.4 представлена модуляционная характеристика ЭОМ,  $a$  – для нулевого смещения,  $b$  – четвертьволновое смещение.

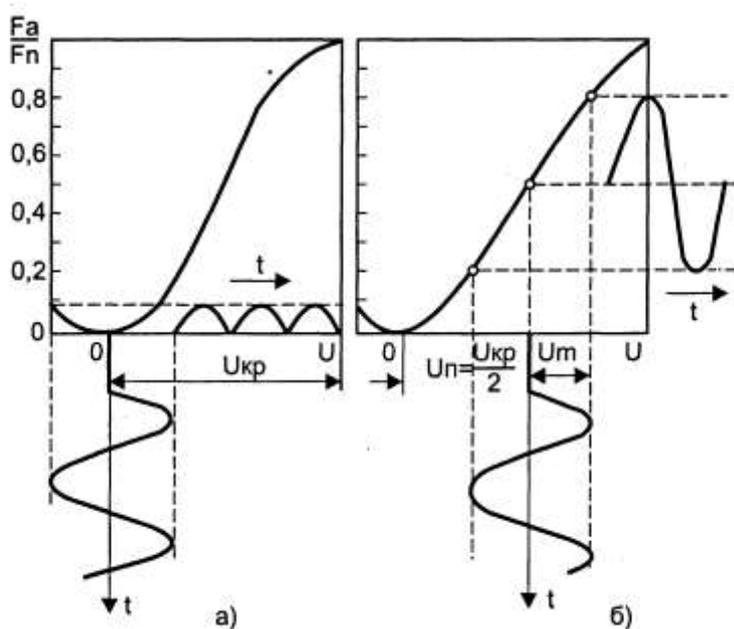


Рис. 16.4. Модуляционная характеристика электрооптического модулятора

Из характеристик видно, что при нулевом смещении происходит удвоение частоты огибающей модулированного излучения по сравнению с частотой модулирующего сигнала. На практике практически всегда пользуются модулятором со смещением, поскольку в этом случае огибающая практически повторяет форму модулирующего сигнала.

Современные ЭОМ создаются на основе кристаллов ниобата лития ( $\text{LiNbO}_3$ ) или танталата лития ( $\text{LiTaO}_3$ ), а также на основе полупроводниковых материалов  $A^{III}B^V$ . В настоящее время ЭОМ представляет собой интерферометр Маха-Цендера на базе интегрально-оптических волноводных модуляторов с использованием электрооптических эффектов, описанных выше.

Интерферометр образован двумя параллельно расположенными волноводами, связанными на входе и выходе разветвителями Y-типа. Схема модулятора представлена на рис. 16.5.

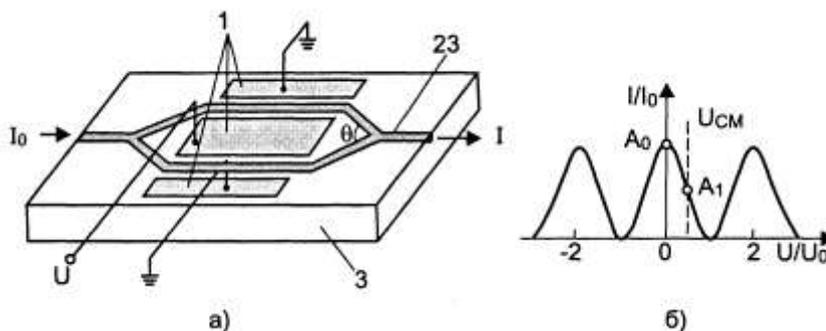


Рис. 16.5. Схема электрооптического модулятора Маха-Цендера (а), модуляционная характеристика (б)

Входной разветвитель делит оптический поток на две равные части. Пройдя разные плечи интерферометра, обе части суммируются в выходном Y-разветвителе с учетом их фазовых соотношений. На плечи интерферометра нанесены электроды. Приложенное электрическое поле, вследствие описанных выше электрических эффектов, изменяет показатель преломления, вносящего фазовый сдвиг такой величины, при которой волны на выходе (в общем плече выходного разветвителя) оказываются либо в фазе, либо в противофазе. Интенсивность излучения на выходе такого ЭОМ определяется соотношением:

$$I_{\text{вых}} = I_{\text{вх}} \cos^2 \left[ 0.5 \Delta\varphi_0 + \Delta\varphi \right] \quad (16.3)$$

где  $\Delta\varphi_0$  – разность фаз при  $E = 0$ .

Для получения коэффициента модуляции порядка 90% (или коэффициента экстинкции ~10 дБ) ЭОМ для современных ВОСП достаточно напряжения электрического сигнала 2,5 В.

### 16.3. Атенюаторы

Атенюаторы используются с целью уменьшения мощности входного оптического сигнала. Такая необходимость может возникнуть как при передаче цифрового, так и аналогового сигнала. При цифровой передаче большой уровень способен привести к насыщению приемного оптоэлектронного модуля. При передаче аналогового сигнала чрезмерно высокий уровень приводит к нелинейным искажениям и ухудшению изображения. По принципу действия аттенюаторы бывают переменные и фиксированные.

*Переменные аттенюаторы* допускают регулировку величины затухания в пределах 0-20 дБ для многомодовых и одномодовых волокон с точностью установки величины затухания 0,5 дБ. Регулировка достигается путем изменения величины воздушного зазора.

*Фиксированные аттенюаторы* имеют установленное изготовителем значение затухания, величина которого может составлять 0, 5, 10, 15 или 20 дБ. Затухание может вноситься посредством воздушного зазора фиксированной величины, или посредством специального поглощающего фильтра, встроенного в аттенюатор. В последнем случае значительно уменьшается обратное отражение, поскольку фильтр имеет близкий к волокну показатель преломления, что сильно уменьшает обратное френелевское рассеяние.

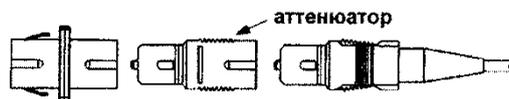


Рис. 16.6. Внешний вид аттенюатора-FM розетки стандарта SC

Доступны разнообразные исполнения аттенюаторов: аттенюаторы-шнуры, аттенюаторы-розетки, аттенюаторы-FM розетки. *Аттенюаторы-шнуры* оконцовываются с обеих сторон стандартными соединителями (ST, SC или FC). Затухание в шнуре обеспечивается благодаря специальному волокну. *Аттенюаторы-розетки* бывают как переменные (с регулируемым воздушным зазором), так и фиксированные (с нерегулируемым воздушным зазором или фильтром). *Аттенюаторы-FM розетки*, рис. 16.6, устанавливаются между стандартной переходной розеткой и оптическим соединителем, обычно выпускаются с фиксированным набором значений затухания 5, 10, 15 и 20 дБ (затухание обеспечивается либо нерегулируемым воздушным зазором, либо фильтром).

## 16.4. Оптические фильтры

### 16.4.1. Фильтры на тонких пленках

Тонкопленочные фильтры используют многослойные покрытия диэлектрических фильтров. Когда многоволновой сигнал падает на поверхность фильтра, то каждый слой фильтра вынуждает различные длины волн падающего сигнала отразиться или пройти через него, в зависимости от длины волны и конструкции фильтра. Каждая длина волны, таким образом, вносит конструктивный или деструктивный вклад в проходящий сигнал. Соответствующие длины волн такого сигнала или исчезали, или сохранялись, проходя до самого выхода.

Такие фильтры, обычно, имеют большое число слоев, так, что их характеристиками пропускания можно достаточно жестко управлять. Это позволяет передавать (пропускать) относительно узкую полосу длин волн, или, даже, одну длину волны.

Тонкопленочная технология плохо приспособлена для систем с плотной упаковкой каналов (например, для шага между несущими 50 ГГц). Однако, тонкопленочные фильтры обеспечивают достаточно узкую полосу пропускания для использования с мультиплексорами-демультиплексорами систем WDM, имеющих 16 – 32 канала. При большей плотности каналов в системах

используются другие технологии.

Оптические фильтры достаточно малы. Их можно встраивать в оптические разъемы, адаптеры и даже в оптоволокно. Типичные характеристики такого встроенного фильтра, работающего в полосе частот 1550 – 1625 нм, приведены ниже:

- вносимые потери.....< 1.0..1.5 дБ;
- коэффициент изоляции длин волн..... $\geq 35$  дБ;
- возвратные потери.....40 дБ;
- рабочая температура.....– 20°С..+70°С.

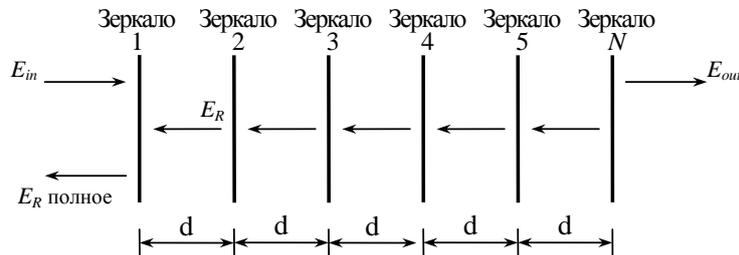
### 16.4.2. Фильтры на основе ВРБ

На рис. 16.7 приведена модель, которую мы будем использовать для описания принципа работы *дифракционной решетки Брэгга*.

Решетка Брэгга является последовательностью полупрозрачных параллельных пластин. Эти пластины отделены одна от другой на расстояние  $d$ . Свет, состоящий из нескольких или большого числа длин волн, входит с левой стороны. В зависимости от расстояния  $d$  будет наблюдаться отражение одной или нескольких длин волн. Этот отраженный свет выходит также с левой стороны, тогда как остальная группа длин волн света выйдет с правой стороны. Условия точного отражения длин волн, или *условия Брэгга* таковы:

$$d = -n\lambda_B / 2, \quad (16.4)$$

где  $n$  – произвольное число, а  $\lambda_B$  – длина волны отраженного канала;  $d$  – представляет собой шаг, или *период брэгговской решетки*, который должен быть целым кратным половины длины волны. Отрицательный знак означает отражение, а  $n$  – означает порядок решетки Брэгга. Когда  $n = 1$  (первый порядок), имеем  $d = \lambda_B / 2$ , а при  $n = 2$  (второй порядок), имеем  $d = \lambda_B$ . Решетка Брэгга дает возможность получить прекрасный полосовой фильтр.



- (1) Первый световой импульс у зеркала 1 =  $E_{in}$
- (2) Отраженная часть =  $E_R$
- (3)  $\lambda_B = -\frac{2d}{n}$  (знак минус означает отражение)

Рис. 16.7. Модель дифракционной решетки Брэгга

*Волоконная решетка Брэгга (ВРБ)* состоит из отрезка оптического волокна, показатель преломления которого периодически изменяется по длине волокна. Эти изменения показателя преломления моделируют структуру решетки Брэгга. Общий метод изготовления ВРБ состоит в том, что волокно подвергается интенсивному ультрафиолетовому облучению через шаблон, который имеет период, равный периоду решетки, подлежащей изготовлению. Когда германий-силикатная сердцевина волокна экспонируется интенсивным светом, прошедшим через шаблон, в ней формируются структурные дефекты и, следовательно, возникают постоянные изменения показателя преломления. Они имеют ту же периодичность, что и облучаемый ультрафиолетом шаблон.

На рис. 16.8 схематично показана структура волоконной решетки Брэгга. Для наглядности и лучшей иллюстрации композиции и структуры, размеры волокна и период решетки были намеренно увеличены.

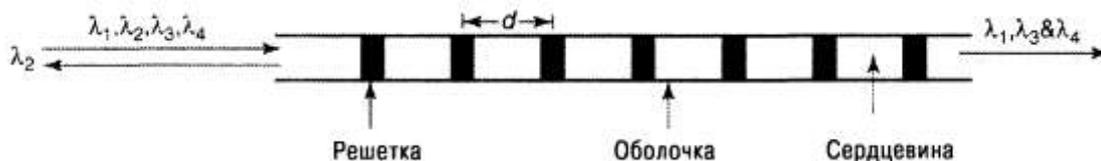


Рис. 16.8. Иллюстративная модель волоконной решетки Брэгга. Для окна 1550 нм,  $d$  может быть в диапазоне от 1 до 10 мкм.

Другой метод формирования отражательной решетки Брэгга основан на многослойной (стековой) диэлектрической структуре, составленной из слоев толщиной  $\lambda/4$ . Она известна как *фотонная решетка*, каждая с различным коэффициентом преломления. Такие решетки отражают длины волн для всех возможных углов падения, причем они не поглощают энергию падающего луча, как это делают отражатели на зеркалах.

ВРБ широко используются вместе с оптическими циркуляторами, обычно в оптических мультиплексорах ввода-вывода, где ВРБ обратно отражает только те длины волн, для которых она была спроектирована. Остальная часть агрегатного потока длин волн может после этого быть передана другой комбинации циркулятору–ВРБ, для того, чтобы выделить другую длину волны, и т. д. Этот принцип показан на рис. 8.3. ВРБ могут быть использованы как полосовые фильтры, интерференционные фильтры, компенсаторы хроматической дисперсии, а также для выравнивания выходной характеристики усилителей EDFA.

ВРБ чувствительны к изменению температуры, независимо от периодичности или ширины полосы. Их обычно размещают в специальных термостатах.

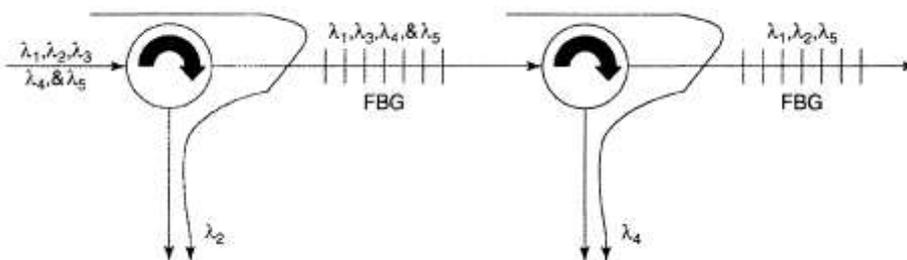


Рис. 16.9. Комбинация: циркулятор-решетка ВРБ выделяет канал с одной несущей из агрегатного канала, за которым следует аналогичная комбинация, выделяющая другой канал. FBG – волоконная решетка Брэгга

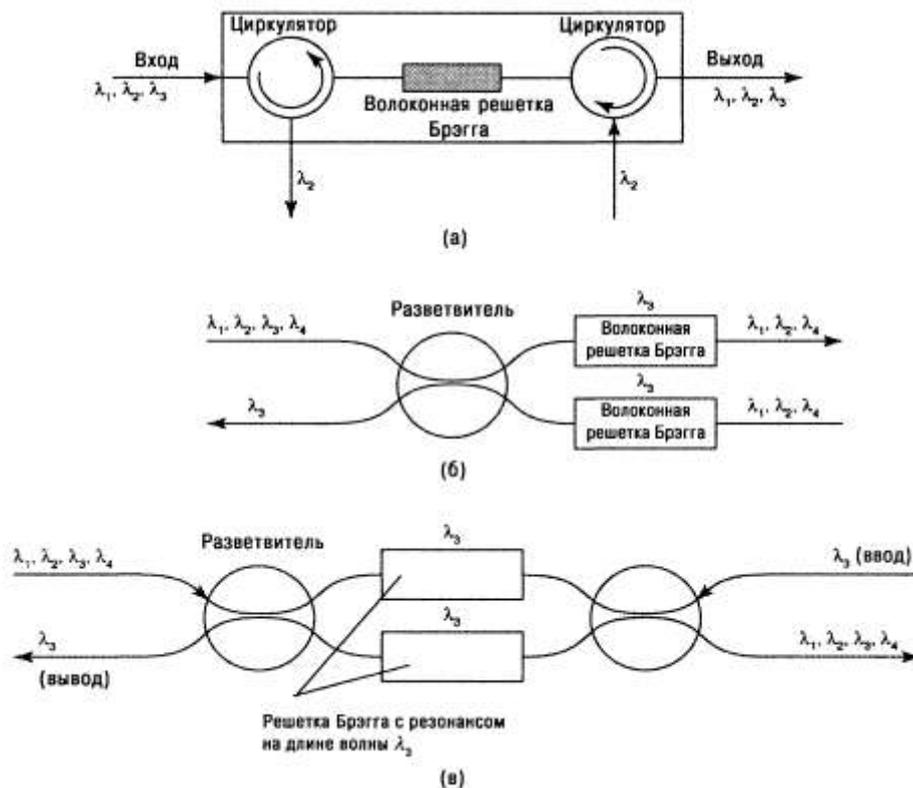


Рис. 16.10. Применение фильтров DWDM на основе волоконных решеток Брэгга,  
 (а) интерферометр Майкельсона,  
 (б) интерферометр Маха-Цендера,  
 (в) конфигурация, допускающая ввод-вывод оптической несущей

Существует ряд приложений, где используются свойства оптической фильтрации ВРБ, позволяющие выделять определенные длины волн. В простейшем случае оптическая дифракционная решетка работает как рефракционный фильтр, центральная длина волны которого может управляться путем изменения периода решетки, а полоса пропускания может подстраиваться путем изменения удельной плотности полос решетки и небольшой частотной модуляцией периода решетки. ВРБ могут применяться для построения стабилизирующих фильтров, фильтров выравнивания волновой характеристики усилителей EFDA, компенсации хроматической дисперсии.

На рис. 16.10 приведены фильтры DWDM, основанные на ВРБ, в конфигурациях оптических мультиплексоров ввода-вывода.

## 16.5. Контрольные вопросы

1. Какие устройства применяются для объединения пространственно разделенных оптических информационных потоков?
2. Какие типы мультиплексоров применяются в высокоскоростных системах ВОЛС с DWDM?
3. Что собой представляет эшелон Майкельсона? Объясните принцип его работы?
4. Опишите принцип работы интерференционного оптического

мультиплексора?

5. В чем заключается эффект Погкельса?
6. Как работает электрооптический модулятор?
7. С какой целью применяются аттенюаторы?
8. Что собой представляют фильтры не тонких пленках?
9. Что представляет собой волоконная решетка Брэгга?
10. Какие фильтры DWDM на основе волоконных решеток Брэгга применяются в ВОСП?

## **РАЗДЕЛ 17. ИЗМЕРЕНИЕ ПОТЕРЬ В ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ**

---

### **17.1. Метод оптического рефлектометра (метод OTDR – optical time domain reflectometer)**

Метод OTDR предназначен, в первую очередь, для оценки распределения потерь по оптической длине волокна и определения местонахождения отдельных неоднородностей. Он заключается в том, что в оптическое волокно вводится импульс света, который, при распространении вызывает рассеяние Рэлея, вызванное неупорядоченностью структуры стекла и микроскопическими изменениями его состава, приводящими к небольшим изменениям показателя преломления, распределенным по длине волокна. Такое рассеяние является основной причиной потерь в кварцевых волокнах. Часть рассеяния Рэлея распространяется в обратном направлении к источнику, в результате чего его можно принять и обработать. Таким образом, вводя в волокно оптический импульс и принимая отраженное от неоднородностей показателя преломления излучение, вызванное этим импульсом, можно получить карту распределения различных неоднородностей по длине волокна, обычно называемую рефлектограммой. Основное преимущество применения приборов OTDR заключается в том, что измерения можно проводить, располагаясь с прибором на одном конце волокна. Однако наряду с этим достоинством, метод имеет и определенные недостатки. Во-первых, это наличие «мертвой зоны» - участка волокна, располагающегося непосредственно у прибора, на котором измерения невозможны. Во-вторых, недостаточная точность рефлектометра; в-третьих, небольшой динамический диапазон; в-четвертых, высокая стоимость измерительного прибора. Кроме того, оптическое волокно может обладать разными потерями при передаче сигналов с той или с другой стороны, что приводит к необходимости проведения двухсторонних измерений, а это ликвидирует одно из основных преимуществ приборов OTDR (другим основным преимуществом наряду с односторонними измерениями является наглядность получаемых результатов).

## 17.2. Метод вносимых потерь

Базовая схема измерений потерь приведена на рис. 17.1.

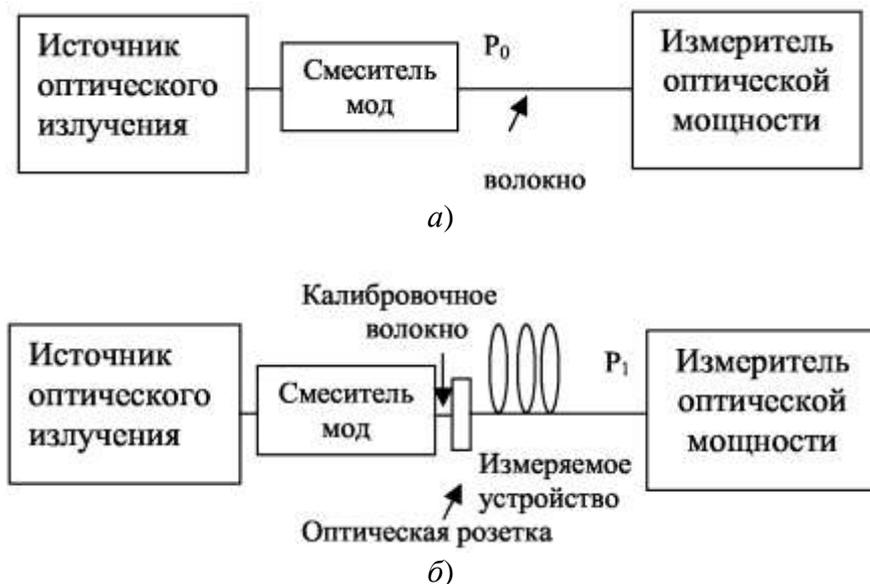


Рис. 17.1. Основная схема проведения измерений ослабления сигнала методом вносимых потерь:

- а) калибровка измерителя перед началом измерений;
- б) проведение измерений

Потери в измеряемом устройстве:  $\alpha$  (дБ) =  $P_0$  (дБм) –  $P_1$  (дБм)

Смеситель мод – специальное устройство, предназначенное для выравнивания оптических мощностей отдельных мод и установления режима равновесного распределения энергетике мод – РРМ (об этом подробнее написано ниже). Следует заметить, что многие рекомендуемые зарубежными разработчиками методики измерения затухания требуют обязательного применения смесителей при проведении любых измерений, в том числе и при измерении потерь с помощью импульсного оптического рефлектометра. Этого же требуют и действующие в России ГОСТы. Примем это за обязательное условие, и в нижеследующих схемах будем иметь в виду присутствие смесителя, не изображая его.

В качестве источника излучения применяют светодиод или лазер с фиксированной длиной волны или лампу белого света с монохроматором при измерении спектральных потерь на отдельных длинах волн.

В приведенной выше схеме на рис. 17.1, а. в целом обеспечиваются условия ввода оптического излучения в измеряемое волокно. Считается, что для большинства случаев таких условий ввода вполне достаточно. Однако, после присоединения измеряемого устройства к калибровочному волокну, условия ввода излучения могут измениться, поскольку при проведении калибровки по рис. 17.1, а свет из волокна полностью попадает на фоточувствительную площадку измерителя, а при подключении измеряемого устройства в него, вследствие неточной юстировки или различий в геометрии

сердцевин волокон, в измеряемое волокно может попасть не вся, а лишь часть мощности, вышедшей из калибровочного волокна. Для того чтобы снизить, а в некоторых случаях и полностью компенсировать такую погрешность, желательна схема рис. 17.1, а несколько усложнить, как показано на рис. 17.2.

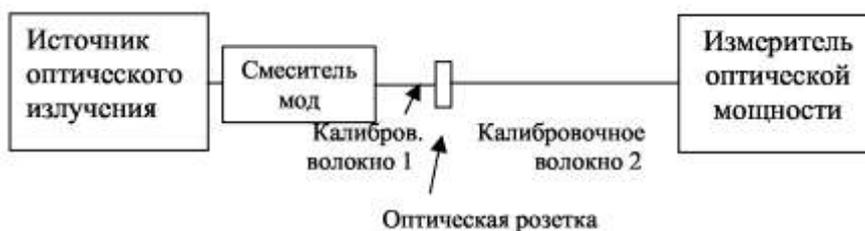


Рис. 17.2. Усовершенствованная схема калибровки измерителя.

Измеряемое устройство включается в разрыв между двумя калибровочными волокнами. При этом как калибровочные волокна, так и измеряемое устройство по возможности должны быть выполнены из одного и того же волокна (если измеряемое устройство является волокном). При таком включении появляются две оптических розетки, каждая из которых вносит определенные паспортные потери. Эти потери могут быть впоследствии учтены и исключены из результатов.

### 17.3. Метод обрыва



Рис. 17.3. Измерение потерь методом обрыва:

- а) измерение полных потерь в измеряемом устройстве;
- б) обрыв волокна вблизи источника;
- в) измерение введенной в тестируемое волокно мощности

Приведенные выше схемы предназначены для проложенного волокна, оконцованного с обеих сторон стандартными коннекторами. Но во многих случаях требуется измерить потери в неоконцованном волокне, которое, к тому же, не имеет хорошо обработанных торцов. В таких случаях приходится применять другой метод измерения и принимать специальные меры по подготовке торцов. При этом используют так называемый «метод обрыва».

Точность измерения потерь методом обрыва существенно выше, чем методом вносимых потерь, поскольку при измерении введенной в волокно мощности вся она попадает на фоточувствительную площадку измерителя, размеры которой достаточно велики по сравнению с диаметром оптического волокна (1-5 мм и 10 – 50 – 62,5 мкм соответственно). Кроме того, в данном методе отсутствует разброс параметров на первом стыке (на оптической розетке, см. рис. 17.2), возникающий при переключении шнуров и волокон.

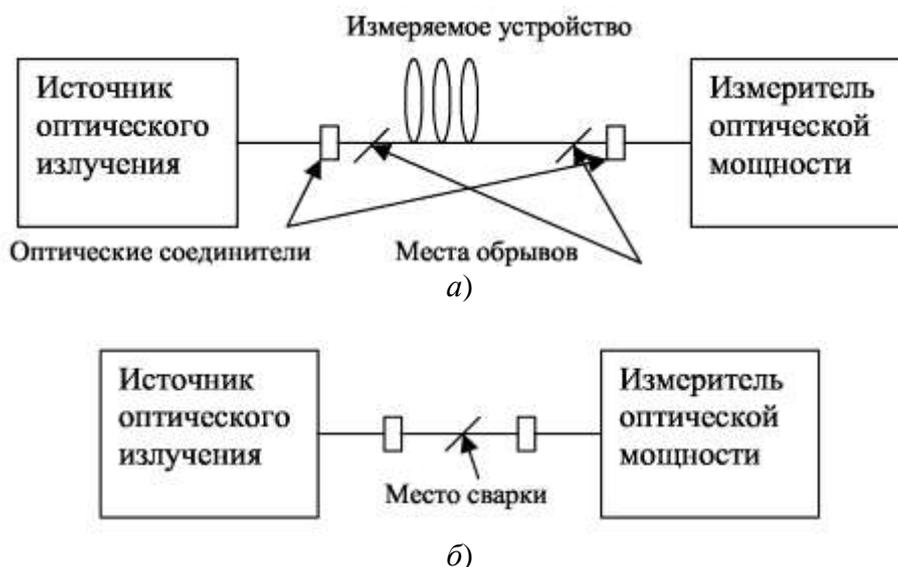


Рис. 17.4. Модифицированный метод обрыва с использованием сварки:

- a) начальная схема измерения мощности;  
 б) схема определения вводимой в устройство мощности

Многие зарубежные методики определения потерь рекомендуют проводить измерения с максимальным использованием сварных соединений, потери в которых почти не влияют на величину реальных потерь в тестируемом устройстве (см. рис. 17.4).

Достоинством такого метода является то, что здесь нет необходимости переключать волокна и, соответственно, менять условия ввода, а погрешность определяется лишь качеством выполненных сварочных работ, которая может составлять лишь 0,01 дБ.

## 17.4. Метод измерения возвратных потерь

Для измерения возвратных (или обратных) потерь, большая величина которых может внести значительное ухудшение качества передачи в системе связи (особенно одномодовой) применяется метод, получивший в западной литературе название OCWR – optical continuous wave reflectometer – оптический рефлектометр длительного излучения. Он изображен на рис. 17.5.

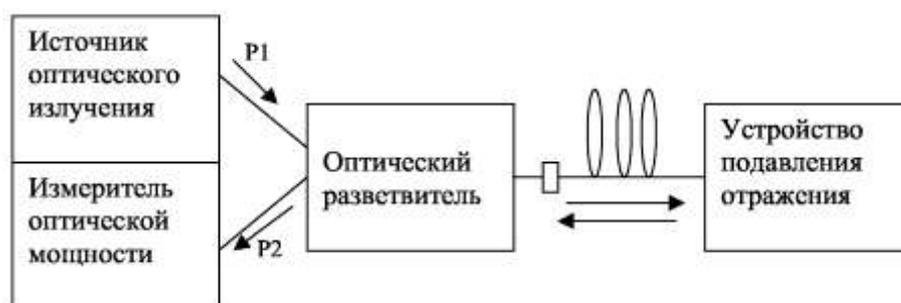


Рис. 17.5. Измерение возвратных потерь методом рефлектометра длительного излучения.

Оптические возвратные потери (в английской аббревиатуре – ORL) – это отношение оптической мощности, вернувшейся назад (к источнику излучения) к мощности, введенной в систему источником. По сути, это смесь отражений от имеющихся в волокне неоднородностей и обратного рассеяния Рэлея. В одномодовых системах большие возвратные потери могут стать главным источником возникновения и передачи ошибочных битов. Особенно опасными бывают отражения от торцов световодов в коннекторах, где величина отражения может достигать 4 – 5% от падающей на них мощности. Отраженный свет попадает в кристалл лазерного диода и может вызвать перескок моды и модальный шум.

Вследствие того, что величина динамического диапазона требуемого для измерения затухания отражения составляет – 30... – 80 дБ, для таких измерений необходим лазерный источник с большой мощностью излучения. Кроме того, излучение лазера должно быть достаточно стабильно, поскольку измерения проводятся в течение продолжительного времени.

Точность метода OCWR зависит от вносимых потерь и отражений компонентов. Для повышения точности должны быть выполнены 2 условия:

- 1) прибор должен быть откалиброван по известному отражению;
- 2) должны быть измерены фоновые излучения (фоновые возвратные потери – уровни мощности, отраженные от устройств, не подлежащих измерению – которые затем необходимо вычесть из результатов измерения).

С целью калибровки OCWR для точных измерений, к выходу источника подключается калибровочный кабель. Затем измеряется уровень вернувшейся мощности, с которым сравниваются все последующие измерения.

Возвратные потери выражаются в децибелах. Так, если вернувшаяся к

источнику мощность составляет 0.001 часть от введенной мощности, то возвратные потери будут – 30 дБ (- 10 lg 0.001). Чем больше значение возвратных потерь (по абсолютной величине), тем меньше их влияние на источник излучения и величину погрешности измерения потерь в волокне.

Для всех вышеперечисленных методов измерения обязательным условием их проведения является обеспечение режима равновесного распределения мод (РРМ). Свет, распространяющийся по волокну, существует в виде множества отдельных мод, обладающих различной энергией. Так как в процессе распространения с модами происходят изменения, вызванные как внешними, так и внутренними причинами, то и энергия их не остается постоянной, а все время меняется, в том числе, путем преобразования одной моды в другую. Однако такое перераспределение энергии происходит не на всем протяжении распространения (ограниченном, например, длиной волокна), а на расстоянии, после которого наступает РРМ – равновесное распределение мод, при котором энергетика отдельных мод остается неизменной и дальнейшее перераспределение энергии в нормальных условиях не происходит. При этом ослабление света (потери оптической мощности) будет пропорционально уже не длине волокна, а квадратному корню из величины пройденного расстояния.

С точки зрения точности определения потерь, происходящих при распространении света, РРМ является определяющим параметром. Большинство производителей оценивают величину потерь в своих изделиях исходя из значений, получившихся в результате установления режима РРМ. Поэтому для повышения точности в процессе измерений необходимо выполнить процедуры по установлению такого режима. Это касается как многомодовых, так и одномодовых световодов. Одномодовые световоды в зависимости от соотношения длины волны, диаметра сердцевины и разности показателей преломления сердцевины и оболочки могут иметь многомодовый режим распространения света. Поэтому даже при облучении их торца одномодовым источником вследствие преобразования мод на неоднородностях и изгибах в них появляется некоторое количество дополнительных мод, обладающих разной энергией.

Кроме установления РРМ перед проведением измерительных процедур надо устранить влияние оболочечных мод, то есть той части оптической мощности, которая распространяется по оболочке и, не обладая информационным потенциалом, может увеличить погрешность измерения. С этой целью на выходе смесителя мод устанавливается фильтр мод оболочки, обеспечивающий их удаление.

## **17.5. Метод дискретного оптического рефлектометра**

Метод дискретного оптического рефлектометра был разработан для измерений на коротких длинах многоканальных систем и заключается в зондировании волокна импульсами, которые вводятся в волокно от стабилизированного импульсного источника с помощью оптического ответвителя, как показано на рис. 17.6, а.

Метод дискретного рефлектометра применяется для измерения величины отраженной от неоднородности оптической мощности. Вышедшие из источника оптические импульсы через ответвитель попадают в измеряемое устройство. Отраженные от неоднородности импульсы попадают в фотоприемник, усилитель и затем подвергаются дискретизации (разбиению по времени) и квантуются по амплитуде. Дискретизация процесса по времени и амплитуде позволяет выделить и затем измерить отдельные отражения.

Фотодиод, на который попадает возвратившаяся часть света, это устройство с очень высокой линейностью, поэтому амплитуда отражений прямо пропорциональна отражательной способности неоднородности или компонента оптической кабельной системы. Калибровка таких приборов производится по отражению от торца коннектора, составляющего примерно 4-5% падающей мощности. Это отражение применяется для создания опорного уровня (относительно которого производятся все последующие измерения) и образуется путем подключения к четвертому выходу ответвителя короткого волокна с хорошо отполированным торцом (см. рис. 17.6).

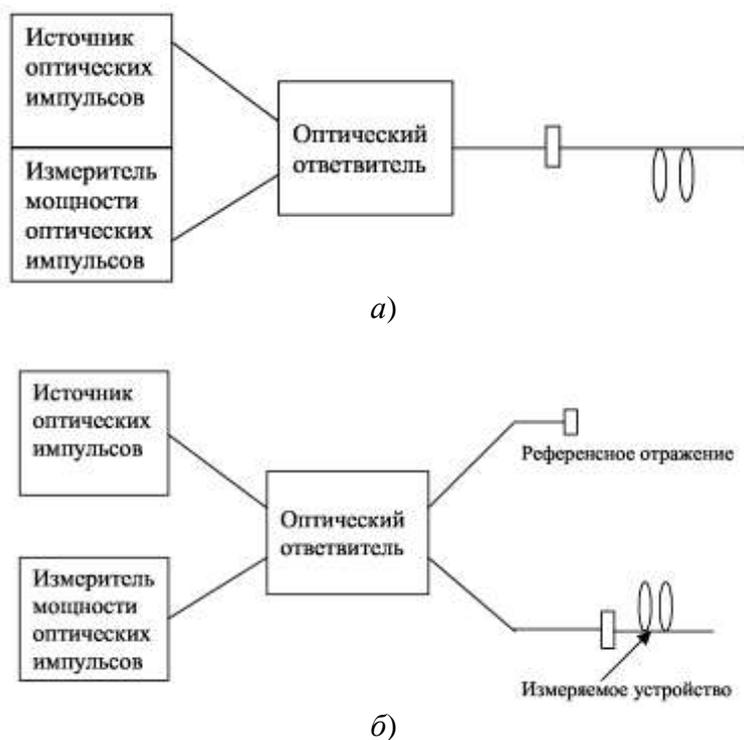


Рис. 17.6. Измерение отражения с помощью метода дискретного оптического рефлектометра:  
 а) базовая схема метода измерения обратного отражения;  
 б) схема метода дискретного рефлектометра с калибровкой по отражению

Теперь попробуем дать ответ на второй вопрос, – что же мы получаем в результате измерений? Ответом на него будет утверждение, что результатом измерений будет та часть оптической мощности источника, которую удалось ввести из измеряемого волокна (устройства) во второе (иногда называемое приемным) калибровочное волокно или непосредственно в фоточувствительный элемент. После этого различными способами из

полученного результата вычитается мощность, которая вводится в тестируемое устройство, а полученное значение (без учета знака) и принимается за истинное затухание световой энергии. Общие потери мощности при этом происходят на вводе оптического излучения из источника в первое калибровочное волокно (иногда называемое передающим), на переходе из передающего волокна в измеряемое устройство и на переходе света из измеряемого устройства в приемное волокно. Существуют также и потери на приеме излучения измерительным устройством, которые делятся на две составляющие: потери на отражении от фоточувствительной поверхности фотодиода и потери при оптоэлектронном преобразовании. Последние потери учитываются при создании измерительных устройств и не вносят дополнительных погрешностей в результаты измерения. Нас же интересуют лишь потери в измеряемом устройстве, поэтому остальные компоненты потерь необходимо устранять. Таким образом, в результате измерений получается сумма потерь в различных оптических, оптоэлектронных, электрооптических и электронных компонентах, через которые распространяется тестовый сигнал. Точность определения затухания именно в тестируемом оптическом устройстве заключается в высококачественном выделении и устранении «мешающих» потерь из этой смеси (сюда включается качество, как измерительных процедур, так и математической обработки полученных результатов). При этом относительная погрешность результата измерений (не путать с относительной погрешностью измерительного прибора) согласно ГОСТ 26814-86 не должна превышать 20% (при измерении потерь в волокне).

После рассмотрения основных схем измерения потерь, необходимо выяснить внешние и внутренние условия, при которых данные процедуры внесут наименьшие погрешности в результат. Способ возбуждения световода, изменения температуры и давления, наличие макро- и микроизгибов не считаются источниками основной погрешности измерения затухания. Они лишь должны учитываться при подведении окончательных результатов в условиях, отличных от паспортных данных, а при проведении измерений в нормальных стабильных условиях вообще не вносят (точнее, не должны вносить) никакой погрешности.

Если длина волны излучения источника системы передачи, и длина волны оптического генератора измерительного прибора не совпадают, то возможна ошибка измерения (несовпадение истинных потерь передаваемого оптического сигнала и полученных результатов измерения), особенно при наличии в кабельной системе компонентов с сильной спектральной зависимостью. В этом случае необходимо определение спектральных характеристик измерительного прибора с последующим пересчетом полученных значений либо применение более сложных спектральных приборов.

Если кабельная система состоит из нескольких соединенных между собой участков, то измерение общего затухания не позволяет однозначно определить ее реальные потери при передаче сигналов. В этом случае необходимо исследовать зависимость потерь от типа моды и распределение мощности по

модам. Это более сложные измерительные процедуры, которые можно использовать лишь в самых неблагоприятных случаях, требующих ответственного подхода к определению затухания.

## **17.6. Контрольные вопросы**

1. Какие методы измерения потерь в оптических волокнах применяются?
2. Что позволяет определить метод оптического рефлектометра?
3. Как реализуется измерение методом вносимых потерь?
4. Как производится измерение потерь методом обрыва?
5. Какое достоинство метода обрыва с использованием сварки?
6. Как можно измерить возвратные потери?
7. В чем заключается метод дискретного оптического рефлектометра?
8. Что можно измерить методом дискретного оптического рефлектометра?

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

---

Рассмотренные в настоящем конспекте лекций вопросы касаются непосредственно основ построения ВОСП и основ работы пассивных компонентов.

Волоконно-оптические системы передачи в настоящее время переживают революционный бум, обусловленный развитием и применением высоких технологий в опто- и микроэлектронике, волоконной оптике, цифровых методов обработки информации и т.п.

Данный курс позволит студентам получить достаточно высокий уровень знаний, чтобы, опираясь на него, перейти к дальнейшему самостоятельному изучению современных оптических систем передачи информации.

Для студентов следует напомнить, что контрольные вопросы для изучения сформулированы в заголовках разделов и подразделов данного конспекта, а также вынесены в отдельный список в конце разделов. Основные термины и определения, которые необходимо знать студенту, выделены в конспекте курсивом. Изучение данного конспекта лекций следует совмещать с изучением литературных источников, приведенных в списке литературы, а также методических указаний к лабораторным работам.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

---

1. Андреев В.А., Бурдин В.А., Попов Б.В., Попов В.Б. Технология строительства ВОСП: Учебное пособие для вузов / под ред. В.А. Андреева – Самара, СРТТЦ ПГАТИ, 2006. – 374 с.: ил.
2. Андреев В.А., Бурдин В.А., Попов Б.В., Попов В.Б., Платонов А.Н. Монтаж муфт и оконечных устройств волоконно-оптических кабелей: Учебное пособие для вузов / под ред. В.А. Андреева – Самара, СРТТЦ ПГАТИ, 2006. – 159 с.: ил.
3. Андреев В.А., Бурдин В.А., Воронков А.А., Есин С.Р., Лиманский Н.С. Основы технической эксплуатации ВОСП: Учебное пособие для вузов – Самара, СРТТЦ ПГАТИ, 2007. – 216 с.: ил.
4. Адамс М. Введение в теорию оптических волноводов. Пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 512 с.: ил.
5. Гауэр Дж. Оптические системы связи: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1989. – 504 с.: ил.
6. Гитин В.Я., Кочановский Л.Н. Волоконно-оптические системы передачи. Учебное пособие для техникумов связи. – М.: Радио и связь, 2003. – 128 с.: ил.
7. Залялов Р.Г., Потапова О.В., Лаврушев В.Н. Проектирование оптоволоконных направляющих систем электросвязи: Учебное пособие. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2002. – 118 с.
8. Иоргачев Д.В. Волоконно-оптические кабели и линии связи. – М.: ЭКО-ТРЕНДЗ, 2002. – 284 с.
9. Портнов Э.Л. Оптические кабели связи: Конструкции и характеристики. – М.: Горячая линия – Телеком, 2002. – 232 с.: ил.
10. Складов О.К. Волоконно-оптические сети и системы связи. – М.: СОЛОН-Пресс, 2001. – 237 с: ил. – (Серия “Библиотека инженера”)

11. Слепов Н.Н. Современные технологии цифровых оптоволоконных систем связи. – М.: Радио и связь, 2000. – 486 с.: ил.
12. Убайдуллаев Р.Р. Волоконно-оптические сети. – М.: Эко-Трендз, 2001. – 266 с.
13. Унгер Х.-Г. Планарные и волоконные оптические волноводы. – М.: Мир, 1981. – 516 с.
14. Фриман Р. Волоконно-оптические системы связи, 2-е дополнительное издание. – М.: Техносфера, 2006. – 496 с.
15. Хансперджер Р. Интегральная оптика: Теория и технология. Пер. с англ. – М.: Мир, 1985. – 384 с.: ил.
16. Чео П.К. Волоконная оптика: Приборы и системы: Пер. с англ. М.: Энергоатом издат, 1988. – 280 с.: ил.