

ГОСУДАРСТВЕННАЯ АКЦИОНЕРНАЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНАЯ  
КОМПАНИЯ  
«ЎЗБЕКИСТОН ТЕМИР ЙЎЛЛАРИ»

ТАШКЕНТСКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО  
ТРАНСПОРТА

*На правах рукописи*  
УДК 625.56

**ИБРАГИМОВ КАМОЛЖОН БАХРОМОВИЧ**

**«Реконструкция магистральной волоконно-оптических  
линии связи»**

5А311301-«Устройства и системы передачи информации»

Диссертация  
написанная для получения академической степени магистра



Научный руководитель:  
д.т.н, проф. Шипулин Ю. Г.

Ташкент-2015

«ЎЗБЕКИСТОН ТЕМИР ЙЎЛЛАРИ»  
ДАВЛАТ АКЦИОДОРЛИК ТЕМИР ЙЎЛ КОМПАНИЯСИ  
ТОШКЕНТ ТЕМИР ЙЎЛ МУҲАНДИСЛАРИ ИНСТИТУТИ

*Кўлёзма ҳуқуқида*  
УДК 625.56

**ИБРАГИМОВ КАМОЛЖОН БАХРОМОВИЧ**

**«Реконструкция магистральной волоконно-оптических  
линии связи»**

5A311301- “Ахборот узатиш қурилмалари ва тизимлари”

Магистр  
академик даражасини олиш учун ёзилган  
диссертация



Илмий раҳбар:  
т.ф.д., проф. Шипулин Ю. Г.

Тошкент-2015

## АННОТАЦИЯ

Магистерская диссертационная работа посвящена: **«Реконструкции магистральной ВОЛС»**, состоит из пяти глав. В введение даны вопросы обоснование реконструкции магистральной ВОЛС.

Первая глава посвящена: Основным принципам цифровой системы передачи STM-64, где проанализированы методы мультиплексирования информационных потоков, метод временного мультиплексирования, метод частотного уплотнения, уплотнение по поляризации.

Вторая глава посвящена основным сведения о ВОЛС, где приведены: волоконно-оптические кабели, соединение оптических волокон, распространение световых лучей в оптических волокнах, моды распространяющиеся в оптических волноводах, одномодовое оптические волокна, константа распространения и фазовая скорость.

Третья глава посвящена процессам происходящим в оптическом волокне, и их влиянии на скорость и дальность передачи информации, где рассмотрены: затухание оптического волокна, дисперсия, распространение световых импульсов в среде с дисперсией, физическая природа хроматической дисперсии на работу систем связи, поляризационная модовая дисперсия.

Четвертая глава посвящена: Методам компенсации хроматической дисперсии, где рассмотрены: обзор методов компенсации дисперсии, оптическое волокно, компенсирующее дисперсию, компенсаторы хроматической дисперсии на основе планарных интерферометров и микро оптических устройств.

Пятая глава посвящена: Расчетам технических характеристик магистральной ВОЛС, где рассмотрены расчет дисперсии ВОЛС, расчет поляризационной модовой дисперсии, расчет хроматической дисперсии, расчет энергетического бюджета, расчет линии связи с учетом компенсации дисперсии.

## ANNOTATSIYA

Magistrlik dissertatsiya ishi "Magistral optik tolali aloqa liniyasini qayta tuzishga", bag'ishlangan bo'lib u besh bobdan iborat: Kirishda yangilash joriy etish magistrlik optik tolali aloqa liniyasini qayta tuzish masalalari kiritilgan.

Birinchi bob: Raqamli uzatish tizimlari STM-64, ma'lumotlar oqimlarini multipleksorlash usuli, vaqt orali multipleksorlash usuli, chastotali zichlash usuli, polyarizatsiya bo'yicha zichlash usuliga bag'ishlangan.

Ikkinchi bob optik tolali aloqa liniyasini asosiy ma'lumotlariga bag'ishlangan va quyidagilar keltirilgan: optik tolalarning kabeli, optik tolalarni ulash, optik tolalarda nurlarni tarqatish, modaning optik tolada tarqalishi, yagona optik tola, konstanta tarqalishi va faza tezligi.

Uchinchi bob optik tolada yuzaga kelgan jarayonlarga bag'ishlangan, ularni tezligi axborot uzatishga ta'siri, va quyidagilar kiritilgan: optik tolaning so'nishi, dispersiya, dispersiya muxitida impuls nurlarining tarqalishi, xromatik dispersiyani aloqa tizimlariga ta'siri, polyarizatsiya moda dispersiyasi.

To'rtinchi bob xromatik dispersiyani kompensatsiya usullari va quyidagilar kiritilgan: dispersiyani kompensatsiya qilish usullari, dispersiyani kompensatsialashtiruvchi optik tolalar, planar interferometr va mikro-optik qurilmalar asosida xromatik dispersiya kompensatorlariga bag'ishlangan.

Beshinchi bob magistrlik optik tolali aloqa liniyasini texnik folatini hisob kitobi va quyidagilar kiritilgan, optik tolali aloqa liniyasini hisoblash, polarizatsiya moda dispersiyasini hisoblash, xromatik dispersiyani hisoblash, energiya byudjetini hisoblash, optik tolaning kompensatsiya dispersiyasi bilan bog'liqlik xolatini hisoblashga bag'ishlangan.

## ANNOTATION

Master's degree dissertation work is devoted: "Reconstructions highway to FOCL", consists of five heads. In introduction questions are given ground of Reconstruction highway to FOCL.

The first head is devoted: to Basic principles of the digital system of transmission of STM-64, where the methods of multiplexing of informative streams, method of the temporal multiplexing, method of frequency compression, compression on polarization, are analysed.

The second head is sanctified to basic information about FOCL, where resulted: fiber cables, connection of optical fibres, distribution of light rays in optical fibers, fashions spreading in optical waveguides, single mode optical fibers, constant of distribution and phase speed.

The third head is sanctified to the processes by what begoing on in an optical fiber, and their influence on speed and distance of information transfer, where considered: fading of optical fiber, dispersion, distribution of light impulses in an environment with dispersion, physical nature of chromatic dispersion to work of communication networks, polarization modal dispersion.

A fourth head is devoted: to Methods of indemnification of chromatic dispersion, where considered: review of methods of indemnification of dispersion, optical fiber, compensative dispersion, scrapes of chromatic dispersion on the basis of co-planar interferometers and micro optical devices.

A fifth head is devoted: to Calculations of technical descriptions highway to FOCL, where the calculation of dispersion of FOCL, calculation of polarization module dispersion, calculation of chromatic dispersion, calculation of power budget, calculation of flow line taking into account indemnification of dispersion, is considered.

## Содержание

**Аннотация**

**Введение**

<b>1. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ STM-64.....</b>	<b>13</b>
1.1. Основы синхронной цифровой иерархии.....	13
1.2. Методы мультиплексирования информационных потоков.....	16
1.2.1. Метод временного мультиплексирования (TDM).....	16
1.2.2. Метод частотного уплотнения (FDM).....	17
1.2.3. Уплотнение по поляризации (PDM).....	18
1.2.4. Многоволновое мультиплексирование оптических несущих (WDM).....	18
<b>2. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ВОЛС.....</b>	<b>22</b>
2.1. Волоконно-оптические кабели.....	22
2.1.1. Соединение оптических волокон.....	26
2.2. Оптическое волокно. Общие положения.....	27
2.3. Распространение световых лучей в оптических волокнах.....	28
2.4. Моды, распространяющиеся в оптических волноводах.....	30
2.5. Одномодовые оптические волокна.....	33
2.6. Константа распространения и фазовая скорость.....	36
<b>3. ПРОЦЕССЫ, ПРОИСХОДЯЩИЕ В ОПТИЧЕСКОМ ВОЛОКНЕ, И ИХ ВЛИЯНИЕ НА СКОРОСТЬ И ДАЛЬНОСТЬ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ.....</b>	<b>39</b>
3.1. Затухание оптического волокна.....	39
3.2. Дисперсия.....	42
3.3. Распространение световых импульсов в среде с дисперсией.....	47
3.3.1. Физическая природа хроматической дисперсии.....	51
3.3.2. Влияние хроматической дисперсии на работу систем связи.....	53
3.4. Поляризационная модовая дисперсия.....	53

3.4.1. Природа поляризационных эффектов в одномодовом оптическом волокне.....	54
3.4.2. Контроль PMD в процессе эксплуатации ВОСП.....	59
<b>4. МЕТОДЫ КОМПЕНСАЦИИ ХРОМАТИЧЕСКОЙ ДИСПЕРСИИ.....</b>	<b>62</b>
4.1. Обзор методов компенсации дисперсии.....	62
4.1.1. Оптическое волокно, компенсирующее дисперсию.....	64
4.1.2. Компенсаторы на основе брэгговских решеток с переменным периодом.....	67
4.1.3. Компенсаторы хроматической дисперсии на основе планарных интерферометров и микро-оптических устройств.....	70
4.1.4. Способы компенсации дисперсии, основанные на управлении передатчиком или приемником излучения.....	72
<b>5. РАСЧЕТ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАГИСТРАЛЬНОЙ ВОЛС.....</b>	<b>74</b>
5.1. Паспортные технические данные приемопередающего оборудования и ВОК, используемые при расчетах дисперсии и затухания.....	74
5.2. Расчет дисперсии ВОЛС.....	75
5.2.1. Расчет поляризационной модовой дисперсии.....	76
5.2.2. Расчет хроматической дисперсии.....	76
5.3. Расчет энергетического бюджета.....	78
5.4. Расчет линии связи с учетом компенсации дисперсии.....	78
<b>Заключение.....</b>	<b>82</b>
Список литератур.....	84
<b>Приложение.....</b>	<b>86</b>

## ВВЕДЕНИЕ

**Обоснованности темы магистерской диссертации и её актуальности.** На участке Ташкент - Ангрен проложен волоконно-оптический кабель Fujikura OGNMLJFLAP-WAZE SM·10/125x8C тип 3, по которому осуществляется работа цифровой системы передачи (ЦСП) STM-4, обеспечивающей передачу информации со скоростью 622,08 Мбит/с.

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

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

Используемая в настоящее время ЦСП не удовлетворяет растущим потребностям клиентов в пропускной способности волоконно-оптической линии связи. Так как объем передаваемой информации постоянно возрастает, необходимо увеличить скорость передачи сигналов по ВОЛС

путем реконструкции, которая заключается в замене приемопередающего оборудования ЦСП STM-4 на STM-64.

Перед исполнителем магистерской диссертационной работы поставлены следующие задачи:

- изучить конструкцию и параметры магистральной ВОЛС Ташкент-Ангрен;
- оценить возможность передачи сигнала STM-64 по существующей магистральной ВОЛС Ташкент-Ангрен;
- изучить возможные варианты реконструкции ВОЛС и выделить наиболее эффективный.

Актуальность темы заключается в том, что мир телекоммуникаций и передачи данных сталкивается с динамично растущим спросом на частотные ресурсы. Эта тенденция в основном связана с увеличением числа пользователей Internet и также с растущим взаимодействием международных операторов и увеличением объемов передаваемой информации. Полоса пропускания в расчете на одного пользователя стремительно увеличивается. Это касается как построения протяженных телекоммуникационных магистралей, так и локальных вычислительных сетей. Широкомасштабное использование волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) началось примерно 40 лет назад, когда прогресс в технологии изготовления волокна позволил строить линии большой протяженности. Сейчас объемы инсталляций ВОЛС значительно возросли. В межрегиональном масштабе следует выделить строительство волоконно-оптических сетей синхронной цифровой иерархии (SDH). Стремительно входят в нашу жизнь волоконно-оптические интерфейсы в локальных и региональных сетях Ethernet, FDDI, Fast Ethernet, Gigabit Ethernet, ATM.

Оптическое волокно (ОВ) в настоящее время считается самой совершенной физической средой для передачи информации, а также самой перспективной средой для передачи больших потоков информации на значительные расстояния. Сегодня волоконная оптика находит

применение практически во всех задачах, связанных с передачей информации.

Представляется актуальной задача уточнения модели искажения цифровых импульсов, связанного с действием ХД на ВОЛП. Причем под искажением из-за ХД следует понимать не только увеличение длительности импульса (параметр 1), но и изменение его формы (параметр 2), оцениваемое, например, по среднеквадратическому отклонению входной и выходной форм.

Реконструкция магистральной волоконно-оптической связи и его проектирование является актуальной задачей для исследователей. Так как, расчет создаваемых линий на основе ВОЛС является актуальной.

**Объект и предмет исследования.** Объектом исследования является Магистральная ВОЛС Ташкент-Ангрен.

Предметом исследования является синхронный транспортный модуль STM-64 для передачи оптической информации

**Цель и задачи исследования.** Целью исследования является реконструкция магистральной волоконно-оптической линии связи.

Для достижения данной цели необходимо было решать следующие задачи:

- **Обосновать вопросы реконструирования магистральной ВОЛС, с учетом объекта исследования;**

-**Проанализировать основные принципы цифровой системы передачи**

**STM-64;**

- Изучить конструкцию и параметры магистральной ВОЛС Ташкент-Ангрен;

- Оценить возможность передачи сигнала STM-64 по существующей магистральной ВОЛС Ташкент-Ангрен;

- Изучить возможные варианты реконструкции ВОЛС и выделить наиболее эффективный.

**Научная новизна работы.** По эксплуатируемому в настоящий момент ВОК невозможна передача информации со скоростью 9953,28 Мбит/с (STM-64) из-за значительного уширения оптических импульсов вследствие хроматической дисперсии на выходе оптического волокна. Для решения образовавшейся проблемы автором работы была предложена компенсация дисперсии специальным устройством (модулем компенсации дисперсии).

**Основная задача и гипотеза исследования.** Основной задачей исследования является уменьшение потерь в оптических волокнах и увеличение скорости передачи информации путем замены синхронной транспортно-модуля STM

Гипотеза исследования является в том, что в данный момент скорость передачи информации не удовлетворяет потребности, и затухание большая не можем увеличить дальность передачи информации без регенерации, из-за потерь в оптических волокнах.

**Обзор литературы по теме исследования.** Материалы магистерской диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры «Электрическая связь и радио», а также на научно-методической конференции студентов, магистров, и соискателей в ТашиИИТе.и в ТГТУ и опубликованы в сборниках научных трудов.

1. Махсус фанларни ўқитиш методикаси фанидан амалий дарслар учун вазифалар тайёрлаш. Татқиқотчи: магистрант: Ибрагимов К.Б., илмий рахбар: д.т.н. проф. Шипулин Ю. Г. « Илмий-педагогик ишларининг долзарб муоммолари ». Магистратура талабалари, ёш олимларнинг институтлараро ўн биринчи илмий-услубий конференцияси материаллари.(25 ноябрь) 2014 йил.

2. Обоснование реконструкции магистральной волоконно-оптической линии связи . Татқиқотчи: магистрант: Ибрагимов К.Б., илмий рахбар: д.т.н. проф. Шипулин Ю. Г. « Фан ва техника тараққиётида

интеллектуал ёшларнинг ўрни » Республика илмий анжумани. Марузалар тўплами II-қисим 2015 йил.

3. Основные сведения о волоконно-оптической линии связи Татқиқотчи: магистрант: Ибрагимов К.Б., илмий рахбар: д.т.н. проф. Шипулин Ю. Г. « Ёш илмий татқиқотчи » бакалаврият ва магистратура талабаларининг, стажёр-изланувчи-татқиқотчиларнинг XIII-институтлараро илмий- амалий конференцияси материаллари (7-8 ноябрь) 2015 йил.

**Характеристика, методик примененных в исследования.** При решении поставленных задач использовались аналитические и программные методы исследования на базе разработанных методик с последующей обработкой и анализом полученных результатов.

**Теоретическая и практическая значения результатов исследования.** Теоретическая ценность исследования заключается в расчетах эффективности и энергетических потерь при распространении оптической волны в ОК.

Практическая значимость проведенных исследований заключается в разработке цифровой системы ВОЛС нового поколения связи с чем, позволяет определить место применения сетей с большим экономическим эффектом.

**Характер и структура работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, приложений и списка литературы. Она содержит 85 страниц машинописного текста, 14 рисунков, включая 3 таблиц, а также, 23 список литературы из наименований.

# Глава 1. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ STM-64

## 1.1. Основы синхронной цифровой иерархии

Структура первичной сети предопределяет объединение и разделение потоков передаваемой информации, поэтому используемые на ней системы передачи строятся по *иерархическому принципу*. Применительно к цифровым системам этот принцип заключается в том, что число каналов ЦСП, соответствующее данной ступени иерархии, больше числа каналов ЦСП предыдущей ступени в целое число раз.

Аналоговые системы передачи с ЧРК также строятся по иерархическому принципу, но в отличие от ЦСП для них ступенями иерархии являются не сами системы передачи, а типовые группы каналов.

Цифровая система передачи, соответствующая первой ступени иерархии, называется *первичной*; в этой ЦСП осуществляется прямое преобразование относительно небольшого числа первичных сигналов в первичный цифровой поток. Системы передачи второй ступени иерархии объединяют определенное число первичных потоков во вторичный цифровой поток и т.д. [11].

Существует два типа иерархий ЦСП: *плездохронная цифровая иерархия PDH* и *синхронная цифровая иерархия SDH*. Первичным сигналом для всех типов ЦСП является цифровой поток со скоростью передачи 64 кбит/с, называемым *основным цифровым каналом (ОЦК)*. Для объединения сигналов ОЦК в групповые высокоскоростные цифровые сигналы используется принцип *временного разделения каналов*. [12].

Новые технологии телекоммуникаций стали развиваться в связи с переходом от аналоговых к цифровым методам передачи данных,

основанных на импульсно-кодовой модуляции (ИКМ) и мультиплексировании с временным разделением каналов. В плезиохронной цифровой иерархии PDH мультиплексор сам выравнивает скорости входных потоков путем добавления нужного числа выравнивающих бит в каналы с меньшими скоростями передачи. Отсюда следовали недостатки PDH - невозможность вывода потока с меньшей скоростью из потока с большей скоростью передачи без полного демультиплексирования этого потока и удаления выравнивающих бит. Недостатки PDH вызвали необходимость в разработке синхронной цифровой иерархии SDH, которая позволила вводить/выводить входные потоки без необходимости проводить их сборку/разборку и систематизировать иерархический ряд скоростей передачи [1].

SDH имеет следующие преимущества перед PDH :

- упрощение сети, вызванное возможностью вводить/выводить цифровые потоки без их сборки или разборки как в PDH;
- помехозащищенность - сеть использует волоконно-оптические кабели (ВОК), передача по которым практически не подвержена действию электромагнитных помех;
- выделение полосы пропускания по требованию - этот сервис теперь может быть предоставлен в считанные секунды путем переключения на другой (широкополосный) канал;
- прозрачность для передачи любого трафика - факт, обусловленный использованием виртуальных контейнеров для передачи трафика, сформированного другими технологиями, включая самые современные технологии Frame Relay, ISDN и ATM;
- универсальность применения - технология используется для создания глобальных сетей или глобальной магистрали и для корпоративной сети, объединяющей десятки локальных сетей;
- простота наращивания мощности - при наличии универсальной стойки для размещения аппаратуры переход на следующую более высокую

скорость иерархии можно осуществить просто вынув одну группу функциональных блоков и вставив новую (рассчитанную на большую скорость) группу блоков.

SDH позволяет организовать *универсальную транспортную систему*, охватывающую все участки сети и выполняющую функции как передачи информации, так и контроля и управления. Она рассчитана на транспортирование всех сигналов PDH, а также всех действующих и перспективных служб, в том числе и широкополосной цифровой сети с интеграцией служб (ISDN), использующей асинхронный способ переноса (ATM).

Линейные сигналы SDH организованы в так называемые *синхронные транспортные модули STM (Synchronous Transport Module)* (Табл. 1.1). Первый из них - STM-1 - соответствует скорости передачи информации 155 Мбит/с. Каждый последующий имеет скорость в 4 раза большую, чем предыдущий, и образуется побайтным синхронным мультиплексированием. В настоящее время эксплуатируются или разрабатываются SDH системы со скоростями, соответствующими окончательной версии SDH иерархии: STM-1, STM-4, STM-16, STM-64, STM-256 или 155,52, 622,08, 2488,32, 9953,28, 39813,12 Мбит/с. Три первых уровня (называемых по-старому первым, четвертым и шестнадцатым) были стандартизованы в последней версии ITU-T Rec. G.707 [2].

Таблица 1.1. Скорость передачи синхронного транспортного модуля

Уровень	Модуль	Скорость передачи
1	STM-1	155,52 Мбит/с
4	STM-4	622,08 Мбит/с
16	STM-16	2488,32 Мбит/с

64	STM-64	9953,28 Мбит/с
256	STM-256	39813,12 Мбит/с

Мультиплексирование STM-1 в STM-N или STM-N в STM-4\*N осуществляется непосредственно по схеме:  $4 \times STM - N \rightarrow STM - 4 \times N$ . Увеличение скорости передачи приводит к уменьшению длительности импульсного сигнала. Т.к. при распространении по ОВ происходит «размывание» (см. п. 3.2.) и «наплывание» импульсов друг на друга, при слишком длинной ВОЛС приемник излучения уже не может распознать отдельные импульсы. В результате усиливаются требования к ВОЛС по дисперсии, которая и определяет увеличение длительности.

## 1.2. Методы мультиплексирования информационных потоков

Существует несколько способов увеличения пропускной способности систем передачи информации. Большинство из них сводится к одному из методов уплотнения компонентных информационных потоков в один групповой, который передается по линии связи. Поскольку большинство из методов уплотнения находит широкое применение в современных системах связи, рассмотрим каждый из них. [13].

### 1.2.1. Метод временного мультиплексирования (TDM)

В настоящее время метод временного уплотнения информационных потоков (TDM — Time Division Multiplexing) является наиболее распространенным. Он применяется при передаче информации в цифровом виде. Суть его состоит в следующем. Процесс передачи разбивается на ряд временных циклов, каждый из которых в свою очередь разбивается на  $N$  субциклов, где  $N$  — число уплотняемых потоков (или каналов). Каждый субцикл подразделяется на временные позиции, т.е. временные интервалы, в течение которых передается часть информации одного из цифровых мультиплексируемых потоков. Кроме того, некоторое число позиций

отводится для идентификационных синхроимпульсов, вставок и цифрового потока служебной связи.

Метод временного уплотнения подразделяется на два вида — асинхронное или плезиохронное, временное мультиплексирование (PDH, ATM) и синхронное временное мультиплексирование (SDH). Современные технологии позволяют обеспечить скорость передачи группового сигнала 10 Гбит/с (STM-64). Несколько лет назад считалось, что это предел для электронных устройств мультиплексирования. Однако, благодаря развитию новых электронных технологий (полупроводниковые структуры на основе арсенида галлия, микровакуумных элементов) уже созданы лабораторные образцы электронных мультиплексоров для скорости 40 Гбит/с (STM-256), подготовленные для серийного промышленного производства [3]. Научные исследования в этой области продолжаются с целью дальнейшего увеличения скорости передачи.

### 1.2.2. Метод частотного уплотнения (FDM)

При частотном методе мультиплексирования (FDM — Frequency Division Multiplexing) каждый информационный поток передается по физическому каналу на соответствующей частоте — поднесущей  $f_{\text{пн}}$ . Если в качестве физического канала выступает оптическое излучение — оптическая несущая, то она модулируется по интенсивности групповым информационным сигналом, спектр которого состоит из ряда частот поднесущих, количество которых равно числу компонентных информационных потоков. Частота поднесущей каждого канала выбирается исходя из условия  $f_{\text{пн}} \geq 10f_{\text{вчп}}$ , где  $f_{\text{пн}}$  — частота поднесущей,  $f_{\text{вчп}}$  — верхняя частота спектра информационного потока. Частотный интервал между поднесущими  $\Delta f_{\text{пн}}$  выбирается из условия  $\Delta f_{\text{пн}} \geq f_{\text{вчп}}$ .

На приемной стороне оптическая несущая попадает на фотодетектор, на нагрузке которого выделяется электрический групповой поток, поступающий после усиления в широкополосном усилителе приема на

входы узкополосных фильтров, центральная частота пропускания которых равна одной из поднесущих частот [3].

В качестве компонентных потоков могут выступать как цифровые, так и аналоговые сигналы, В настоящее время в кабельных системах передачи частотное уплотнение применяется в многоканальном кабельном телевидении, где для этой цели отведен диапазон частот 47 - 860 МГц, т.е. как метровый, так и дециметровый диапазоны ТВ.

### **1.2.3. Уплотнение по поляризации (PDM)**

Уплотнение потоков информации с помощью оптических несущих, имеющих линейную поляризацию, называется уплотнением по поляризации (PDM — Polarization Division Multiplexing). При этом плоскость поляризации каждой несущей должна быть расположена под своим углом. Мультиплексирование осуществляется с помощью специальных оптических призм, например, призмы Рошона. Поляризационное мультиплексирование возможно только тогда, когда в среде передачи отсутствует оптическая анизотропия, т.е. волокно не должно иметь локальных неоднородностей и изгибов. Это одна из причин весьма ограниченного применения данного метода уплотнения. В частности, он применяется в оптических изоляторах, а также в оптических волоконных усилителях, которые используются в устройствах накачки эрбиевого волокна для сложения излучения накачки двух лазеров, излучение которых имеет выраженную поляризацию в виде вытянутого эллипса [3].

### **1.2.4. Многоволновое мультиплексирование оптических несущих (WDM)**

Решение задачи дальнейшего роста пропускной способности ВОСП путем увеличения скорости передачи при помощи TDM ограничивается не только технологическими сложностями при электронном временном

уплотнении, но и ограничениями, вызванными временной (хроматической) дисперсией оптических импульсов в процессе их распространения в ОВ. Это наглядно видно из сопоставления допустимых величин хроматической дисперсии для систем передачи STM-16 и STM-64 соответственно: 400 пс/нм и 100 пс/нм и поляризационной модовой дисперсии — 40 пс и 10 пс.

Указанная выше задача успешно решается с помощью оптического мультиплексирования с разделением по длинам волн — WDM (Wavelength Division Multiplexing). Суть этого метода состоит в том, что  $m$  информационных цифровых потоков, переносимых каждый на своей оптической несущей на длине волны  $\lambda_m$  и разнесенных в пространстве, с помощью специальных устройств — оптических мультиплексоров (ОМ) — объединяются в один оптический поток  $\lambda_1.. \lambda_m$ , после чего он вводится в оптическое волокно. На приемной стороне производится обратная операция демультиплексирования. Примерная структурная схема такой системы с WDM представлена на рис. 1.1.

Оптические параметры систем WDM регламентируются рекомендациями, в которых определены длины волн и оптические частоты для каждого канала. Согласно этим рекомендациям, мнговолновые системы передачи работают в 3-ем окне прозрачности ОВ, т.е. в диапазоне длин волн 1530-1565 нм.

Для этого установлен стандарт длин волн, представляющий собой сетку оптических частот, в которой расписаны регламентированные значения оптических частот в диапазоне 196,1-192,1 ТГц с интервалами 100 ГГц и длины волн - 1528,77-1560,61 нм с интервалом 0,8 нм. Стандарт состоит из 41 длины волны, т.е. рассчитан на 41 спектральный канал. Но на практике используется 39 каналов из представленной сетки частот, поскольку два крайних не используются, так как они находятся на склонах частотной характеристики оптических усилителей, применяемых в системах WDM.

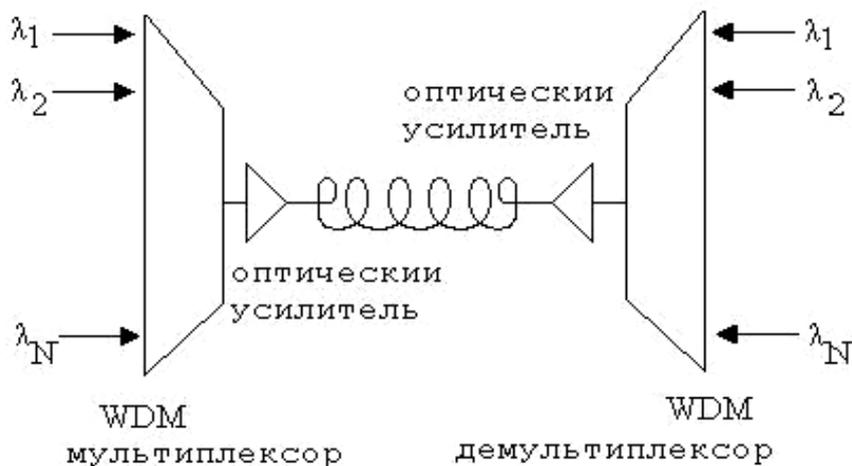


Рис. 1.1. Простейшая структурная схема системы передачи WDM.

В последнее время установилась четкая тенденция уменьшения частотного интервала между спектральными каналами до 50 ГГц и даже до 25 ГГц, что приводит к более плотному расположению спектральных каналов в отведенном диапазоне длин волн (1530-1565 нм). Такое уплотнение получило название DWDM. Очевидно, что DWDM вызвано стремлением увеличить количество передаваемых каналов. Отметим также, что в настоящее время аббревиатура DWDM закрепилась и для систем с многоволновым уплотнением, у которых частотный интервал между каналами равен 100 ГГц.

В настоящее время в оборудовании систем связи с DWDM, рассчитанных для передачи до 32-х каналов, ряд фирм применяет длину волны 1510 нм, а некоторые — 1625 нм. Но с увеличением количества передаваемых каналов до 128 и более возникает необходимость освоения более длинно волновой части оптического спектра, в частности L-диапазона (или 4-е окно прозрачности ОВ), в который будет входить длина волны 1625 нм.

Создание систем передачи DWDM потребовало разработки целого ряда как активных, так и пассивных квантовых и оптических элементов и

устройств с высокостабильными параметрами. Сюда относятся полупроводниковые лазеры с узкой спектральной шириной линии излучения (менее 0,05 нм) при стабильности не хуже  $\pm 0,04$  нм. Волоконно-оптические усилители должны иметь стабильный коэффициент усиления, малую неравномерность коэффициента усиления, ( $< \pm 0,5$  дБ) во всем спектральном диапазоне усиления и ряд других характеристик. Среди пассивных элементов наиболее ответственными являются оптические мультиплексоры/ демультиплексоры для большого количества каналов при работе в одном окне прозрачности (1530-1565 нм). Расстройка по длине волны этих элементов не должна превышать 0,05 нм. Такая стабильность обеспечивается жесткой температурной стабилизацией этих элементов с точностью не хуже  $\pm 1^\circ\text{C}$ . Все это резко повышает стоимость систем DWDM. [14].

## Глава 2. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИИ СВЯЗИ

### 2.1. Волоконно-оптические кабели

В волоконно-оптических системах передачи (ВОСП) информация передается электромагнитными волнами высокой частоты, около 200 ТГц, что соответствует ближнему инфракрасному диапазону оптического спектра 1500 нм. Волноводом, переносящим информационные сигналы в ВОСП, является оптическое волокно (ОВ), которое обладает важной способностью передавать световое излучение на большие расстояния с малыми потерями. Потери в ОВ количественно характеризуются затуханием. Скорость и дальность передачи информации определяются искажением оптических сигналов из-за дисперсии и затухания. Волоконно-оптическая сеть - это информационная сеть, связующими элементами между узлами которой являются волоконно-оптические линии связи. Технологии волоконно-оптических сетей помимо вопросов волоконной оптики охватывают также вопросы, касающиеся электронного передающего оборудования, его стандартизации, протоколов передачи, вопросы топологии сети и общие вопросы построения сетей.

Оптическое волокно в настоящее время считается самой совершенной физической средой для передачи информации, а также самой перспективной средой для передачи больших потоков информации на значительные расстояния. Основания так считать вытекают из ряда особенностей, присущих оптическим волноводам:

- широкополосность оптических сигналов, обусловленная чрезвычайно высокой частотой несущей  $f_0 = 10^{12} - 10^{14}$  Гц. Это означает, что по оптической линии связи можно передавать информацию со скоростью порядка  $10^{12}$  бит/с (1Тбит/с). Говоря другими словами, по

одному волокну можно передать одновременно 10 миллионов телефонных разговоров и миллион видеосигналов. Скорость передачи данных может быть увеличена за счет передачи информации сразу в двух направлениях, так как световые волны могут распространяться в одном волокне независимо друг от друга. Кроме того, в оптическом волокне могут распространяться световые сигналы двух разных поляризаций, что позволяет удвоить пропускную способность оптического канала связи. На сегодняшний день предел по плотности передаваемой информации по оптическому волокну не достигнут;

- очень малое (по сравнению с другими средами) затухание светового сигнала в оптическом волокне. Лучшие образцы российского волокна имеют затухание 0,22 дБ/км на длине волны 1,55 мкм, что позволяет строить линии связи длиной до 100 км без регенерации сигналов. Для сравнения, лучшее волокно Sumitomo на длине волны 1,55 мкм имеет затухание 0,154 дБ/км. В оптических лабораториях США разрабатываются еще более «прозрачные», так называемые фторцирконатные оптические волокна с теоретическим пределом порядка 0,02 дБ/км на длине волны 2,5 мкм. Лабораторные исследования показали, что на основе таких волокон могут быть созданы линии связи с регенерационными участками через 4600 км при скорости передачи порядка 1 Гбит/с;

- ОВ изготовлено из кварца, основу которого составляет двуокись кремния, широко распространенного, а потому недорогого материала, в отличие от меди;

- оптические волокна имеют диаметр около 100 мкм, то есть очень компактны и легки, что делает их перспективными для использования в авиации, приборостроении, в кабельной технике;

- т.к. оптические волокна являются диэлектриками, следовательно, при строительстве систем связи автоматически достигается гальваническая развязка сегментов. В оптической системе они электрически полностью изолированы друг от друга, и многие проблемы, связанные с заземлением

и снятием потенциалов, которые до сих пор возникали при соединении электрических кабелей, теряют свою актуальность. Применяя особо прочный пластик, на кабельных заводах изготавливают самонесущие подвесные кабели, не содержащие металла и тем самым безопасные в электрическом отношении. Такие кабели можно монтировать на мачтах существующих линий электропередач, как отдельно, так и встроенные в фазовый провод, экономя значительные средства на прокладку кабеля через реки и другие преграды;

- системы связи на основе оптических волокон устойчивы к электромагнитным помехам, а передаваемая по световодам информация защищена от несанкционированного доступа. Волоконно-оптические линии связи нельзя подслушать неразрушающим способом. Всякие воздействия на ОВ могут быть зарегистрированы методом мониторинга (непрерывного контроля) целостности линии;

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

Но существуют также некоторые недостатки волоконно-оптических технологий:

- при создании линии связи требуются высоконадежные активные элементы, преобразующие электрические сигналы в свет, и свет в электрические сигналы. Для соединения ОВ с приемо-передающим оборудованием используются оптические коннекторы (соединители), которые должны обладать малыми оптическими потерями и большим ресурсом на подключение-отключение. Погрешности при изготовлении таких элементов линии связи должны быть порядка доли микрона, т.е. соответствовать длине волны излучения. Поэтому производство этих

компонентов оптических линий связи очень дорогостоящее;

- другой недостаток заключается в том, что для монтажа оптических волокон требуется прецизионное, а потому дорогое, технологическое оборудование.

Как следствие, при аварии (обрыве) оптического кабеля затраты на восстановление выше, чем при работе с медными кабелями.

Преимущества от применения волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) настолько значительны, что, несмотря, на перечисленные недостатки оптического волокна, эти линии связи все шире используются для передачи информации. [15].

Одним из важнейших компонентов ВОЛС является волоконно-оптический кабель (ВОК).

Определяющими параметрами при производстве ВОК являются условия эксплуатации и пропускная способность линии связи.

По условиям эксплуатации кабели подразделяют на:

- монтажные;
- станционные;
- зонные;
- магистральные.

Первые два типа кабелей предназначены для прокладки внутри зданий и сооружений. Они компактны, легки и, как правило, имеют небольшую строительную длину.

Кабели последних двух типов предназначены для прокладки в колодцах кабельных коммуникаций, в грунте, на опорах вдоль ЛЭП, под водой. Эти кабели имеют защиту от внешних воздействий и строительную длину более двух километров.

Для обеспечения большой пропускной способности линии связи производятся ВОК, содержащие небольшое число (до 8) одномодовых волокон с малым затуханием, а кабели для распределительных сетей могут содержать до 144 волокон как одномодовых, так и многомодовых, в

зависимости от расстояний между сегментами сети.

При изготовлении ВОК в основном используются два подхода:

- конструкции со свободным перемещением элементов;
- конструкции с жесткой связью между элементами.

По видам конструкций различают кабели повивной скрутки, пучковой скрутки, кабели с профильным сердечником, а также ленточные кабели. Существуют многочисленные комбинации конструкций ВОК, которые в сочетании с большим ассортиментом применяемых материалов позволяют выбрать исполнение кабеля, наилучшим образом удовлетворяющее всем условиям проекта, в том числе - стоимостным.

Особый класс образуют кабели, встроенные в грозозащитный трос (оптические волокна укладываются в стальные трубки, которые заменяют провод заземления), используемые для подвески на опорах воздушных линий электропередачи [4]. Такие кабели характеризуются способностью выдерживать высокие механические и электрические нагрузки, обладают высокой молниестойкостью и высокой стойкостью к вибрации, и предназначены для соединения электростанций и станций управления, используя действующие высоковольтные линии.

### **2.1.1. Соединение оптических волокон**

Развитие волоконно-оптических телекоммуникационных технологий в основном определяется качеством волоконно-оптических кабелей (ВОК) на многомодовых и одномодовых оптических волокнах, изготовленных методом покрытия кварцевой жилы полимерными или кварцевыми материалами. Некоторые из этих волокон в настоящее время по ряду характеристик приблизились к предельно возможным показателям. Так, одномодовое волокно с рабочей длиной волны 1,55 мкм практически достигло предела по затуханию, равного 0,154 дБ/км. Это позволило в настоящее время строить регенерационные участки длиной до 200 км и более, снижая тем самым затраты на строительство волоконно-оптических

линий связи. Однако ввиду естественных ограничений производить волокна таких длин не представляется возможным. Поэтому осуществляют соединение оптических волокон, называя участок между соединениями строительной длиной. Снижение коэффициента затухания оптического волокна обуславливает ужесточение требований к качеству соединений. Это объясняется тем, что число таких соединений, как правило, достаточно велико. Иные требования предъявляются к устройствам соединения волоконно-оптических кабелей, предназначенных для локальных сетей, имеющих небольшие длины участков. Данные устройства должны быть компактными, допускать многоразовое соединение и отличаться простотой выполнения соединения [5].

## 2.2. Оптическое волокно. Общие положения

Важнейший из компонентов ВОЛС - оптическое волокно. Для передачи сигналов применяются два вида волокна: одномодовое и многомодовое. Свое название волокна получили от способа распространения в них излучения.



Рис 2.1. Общий вид типового ОВ

Оптическое волокно (рис. 2.1) состоит из *сердцевины*, по которой происходит распространение световых волн, и *оболочки*, предназначенной, с одной стороны, для создания лучших условий отражения на границе раздела «сердцевина - оболочка», а с другой - для снижения излучения энергии в окружающее пространство. С целью повышения прочности и тем самым надежности волокна поверх оболочки, как правило, накладываются *защитные упрочняющие покрытия*.

Такая конструкция ОВ используется в большинстве оптических кабелей (ОК) в качестве базовой [5]. Сердцевина изготавливается из оптически более плотного материала. Оптические волокна отличаются диаметром сердцевины и оболочки, а также профилем показателя преломления сердцевины, т.е. зависимостью показателя преломления от расстояния от оси ОВ (см. рис 2.3).

Все оптические волокна делятся на две основные группы: многомодовые MMF (multi mode fiber) и одномодовые SMF (single mode fiber). В многомодовых ОВ, имеющих диаметр светонесущей жилы на порядок больше длины волны передачи, распространяется множество различных типов световых лучей - мод. Многомодовые волокна разделяются по профилю показателя преломления на ступенчатые (step index multi mode fiber) и градиентные (graded index multi mode fiber).

### **2.3. Распространение световых лучей в оптических волокнах**

Основными факторами, влияющими на характер распространения света в волокне, наряду с длиной волны излучения, являются:

- геометрические параметры волокна;
- затухание;
- дисперсия.

Принцип распространения оптического излучения вдоль оптического волокна основан на явлении полного внутреннего отражения на границе

сред с разными показателями преломления. Процесс распространения световых лучей в оптически более плотной среде, окруженной менее плотной показан на рис. 2.2.

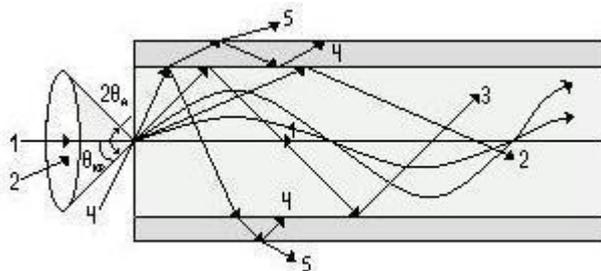


Рис. 2.2. Распространение излучения по ступенчатому и градиентному многомодовым и одномодовому ОВ

Угол полного внутреннего отражения, при котором падающее на границу оптически более плотной и оптически менее плотной сред излучение полностью отражается, определяется соотношением:

$$\theta_{кр} = \arcsin(n_2/n_1), \quad (2.3.1)$$

где  $n_1$  - показатель преломления сердцевины ОВ,  $n_2$  - показатель преломления оболочки ОВ, причем  $n_1 > n_2$ . При попадании светового излучения на торец ОВ в нем могут распространяться три типа световых лучей, называемые *направляемыми*, *вытекающими* и *излучаемыми* лучами, наличие и преобладание какого-либо типа лучей определяется углом их падения на границу раздела «сердцевина - оболочка». Те лучи, которые падают на границу раздела под углом  $\theta \geq \theta_{кр}$  (лучи 1, 2 и 3), отражаются от нее и вновь возвращаются в сердцевину волокна, распространяясь в ней и не претерпевая преломления. Так как траектории таких лучей полностью расположены внутри среды распространения — сердцевины волокна, они распространяются на большие расстояния и называются направляемыми.

Лучи, падающие на границу раздела под углами  $\theta < \theta_{кр}$  (лучи 4),

носят название вытекающих лучей (лучей оболочки). Достигая границы «сердцевина - оболочка», эти лучи отражаются и преломляются, теряя каждый раз в оболочке волокна часть энергии, в связи с чем исчезают вовсе на некотором расстоянии от торца волокна. Лучи, которые излучаются из оболочки в окружающее пространство (лучи 5), носят название излучаемых лучей и возникают в местах нерегулярностей или из-за скручивания ОВ. Излучаемые и вытекающие лучи являются паразитными и приводят к рассеиванию энергии и искажению информационного сигнала. [16].

#### 2.4. Моды, распространяющиеся в оптических волноводах

В общем случае распространение электромагнитных волн описывается системой уравнений Максвелла в дифференциальной форме:

$$\begin{aligned}
 \operatorname{rot} \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} &= 0, \\
 \operatorname{div} \vec{B} &= 0, \\
 \operatorname{rot} \vec{H} - \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} &= \vec{j}, \\
 \operatorname{div} \vec{D} &= \rho,
 \end{aligned}
 \tag{2.4.1}$$

где  $\rho$  - плотность электрического заряда,  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  – напряженности электрического и магнитного полей соответственно,  $\vec{j}$  – плотность тока,  $\vec{D}$  и  $\vec{B}$  – электрическая и магнитная индукции.

Если представить напряженность электрического и магнитного поля  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  при помощи преобразования Фурье [5]:

$$\begin{aligned}
 \vec{E}(r, t) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{\vec{E}}(r, \omega) e^{-j\omega t} d\omega, \\
 \vec{H}(r, t) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{\vec{H}}(r, \omega) e^{-j\omega t} d\omega
 \end{aligned}
 \tag{2.4.2}$$

то волновые уравнения примут вид:

$$\begin{aligned} \nabla^2 \tilde{E} + \frac{\omega^2 n^2(\omega)}{c^2} \tilde{E} &= 0 \\ \nabla^2 \tilde{H} + \frac{\omega^2 n^2(\omega)}{c^2} \tilde{H} &= 0 \end{aligned}, \quad (2.4.3)$$

где  $\nabla^2$  - оператор Лапласа.

Световод можно представить идеальным цилиндром с продольной осью  $z$ , оси  $x$  и  $y$  в поперечной ( $xy$ ) плоскости образуют горизонтальную ( $xz$ ) и вертикальную ( $yz$ ) плоскости. В этой системе существуют 4 класса волн ( $E$  и  $H$  ортогональны):

поперечные  $T$ :  $E_z = H_z = 0$ ;  $E = E_y$ ;  $H = H_x$ ;

электрические  $E$ :  $E_z = 0$ ,  $H_z = 0$ ;  $E = (E_y, E_z)$  - распространяются в плоскости ( $yz$ );  $H = H_x$ ;

магнитные  $H$ :  $H_z = 0$ ,  $E_z = 0$ ;  $H = (H_x, H_z)$  - распространяются в плоскости ( $xz$ ),  $E = E_z$ ;

смешанные  $EH$  или  $HE$ :  $E_z = 0$ ,  $H_z = 0$ ;  $E = (E_y, E_z)$ ,  $H = (H_x, H_z)$  - распространяются в плоскостях ( $xz$ ) и ( $yz$ ).

При решении системы уравнений Максвелла удобнее использовать цилиндрические координаты ( $z, r, \varphi$ ), при этом решение ищется в виде волн с компонентами  $E_z, H_z$  вида:

$$\begin{aligned} E_z(r, \omega) &= A(\omega) F(r) e^{jm\varphi} e^{-j\beta \cdot z} \\ H_z(r, \omega) &= B(\omega) F(r) e^{jm\varphi} e^{-j\beta \cdot z} \end{aligned}, \quad (2.4.4)$$

где  $A(\omega)$  и  $B(\omega)$  - нормирующие постоянные,  $F(r)$  - искомая функция,  $\beta$  - продольный коэффициент распространения волны.

Решения для  $F(r)$  получаются в виде наборов из  $m$  (появляются целые индексы  $m$ ) простых функций Бесселя  $J_m(k_c r)$  для сердцевины и модифицированных функций Ханкеля  $H_m(k_{o\delta} r)$  для оболочки, где  $k_c = \sqrt{n_1^2 k^2 - \beta^2}$  и  $k_{o\delta} = \sqrt{n_2^2 k^2 - \beta^2}$  - поперечные коэффициенты

распространения в сердцевине и оболочке соответственно,  $k = n\omega$  - волновое число. Параметр  $\beta$  определяется как решение характеристического уравнения, получаемого из граничных условий, требующих непрерывности тангенциальных составляющих компонент  $E_z$  и  $H_z$  электромагнитного поля на границе раздела сердцевины и оболочки. Характеристическое уравнение, в свою очередь, дает набор из  $n$  решений (появляются целые индексы  $n$ ) для каждого целого  $m$ , т.е. имеем  $\beta_{mn}$  собственных значений, каждому из которых соответствует определенный тип волны, называемый *модой*. В результате формируется набор мод, перебор которых основан на использовании двойных индексов.

Условием существования направляемой моды является экспоненциальное убывание ее поля в оболочке вдоль координаты  $r$ , что определяется значением поперечного коэффициента распространения в оболочке. При  $k_{o\bar{o}} = 0$  устанавливается критический режим, заключающийся в невозможности существования направляемой моды, что соответствует [5]:

$$J_0(k_c r) = 0. \quad (2.4.5)$$

Последнее уравнение имеет бесчисленное множество решений [5]:

$$k_c r = \sqrt{(n_1^2 - n_2^2) \cdot (kr)^2 - (k_{o\bar{o}} r)^2} = \sqrt{(n_1^2 - n_2^2) \cdot (2\pi r / \lambda)^2 - (k_{o\bar{o}} r)^2}. \quad (2.4.6)$$

Введем величину, называемую нормированной частотой  $V$ , которая связывает структурные параметры ОВ и длину световой волны, и определяемую следующим выражением:

$$V = \frac{2\pi r}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{2\pi r}{\lambda} NA, \quad (2.4.7)$$

При  $k_{o\bar{o}} = 0$  для каждого из решений уравнения (2.4.5) имеет место критическое значение нормированной частоты  $V_{nm}$  ( $m = 1, 2, 3, \dots, n = 0, 1, 2, 3, \dots$ ):

$$V_{01} = 2,405; V_{02} = 5,520 \text{ и т.д.}$$

Для моды  $HE_{11}$  критическое значение нормированной частоты  $V_{11} = 0$ . Эта мода распространяется при любой частоте и структурных параметрах волокна и является фундаментальной модой ступенчатого ОВ. Выбирая параметры ОВ можно добиться режима распространения только этой моды, что осуществляется при условии:

$$V = \frac{2\pi r}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} < 2,405 \quad (2.4.8)$$

Минимальная длина волны, при которой в ОВ распространяется фундаментальная мода, называется волоконной длиной волны отсечки. Значение определяется из последнего выражения как:

$$\lambda_{CF} = 2\pi r \sqrt{n_1^2 - n_2^2} / 2,405 \quad (2.4.9)$$

## 2.5. Одномодовые оптические волокна

*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).

В ступенчатом одномодовом оптическом волокне (SF) (рис. 2.3) диаметр светонесущей жилы составляет 8-10 мкм и сравним с длиной световой волны. В таком волокне при достаточно большой длине волны света  $\lambda > \lambda_{CF}$  ( $\lambda_{CF}$  - длина волны отсечки) распространяется только один луч (одна мода). Одномодовый режим в оптическом волокне реализуется в окнах прозрачности 1310 нм 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 0,20 - 0,25 дБ/км достигается в окне 1550 нм. В одномодовом оптическом волокне со смещенной дисперсией (DSF) (рис. 2.3) длина волны, на которой дисперсия обращается в ноль, - длина волны нулевой дисперсии  $\lambda_0$  - смещена в окно прозрачности 1550 нм. Такое смещение достигается благодаря специальному профилю показателя преломления волокна.

Таким образом, в волокне со смещенной дисперсией реализуются наилучшие характеристики, как по минимуму дисперсии, так и по минимуму потерь. Поэтому такое волокно лучше подходит для строительства протяженных сегментов с расстоянием между ретрансляторами до 100 и более км. Разумеется, единственная рабочая длина волны берется близкой к: 1550 нм.

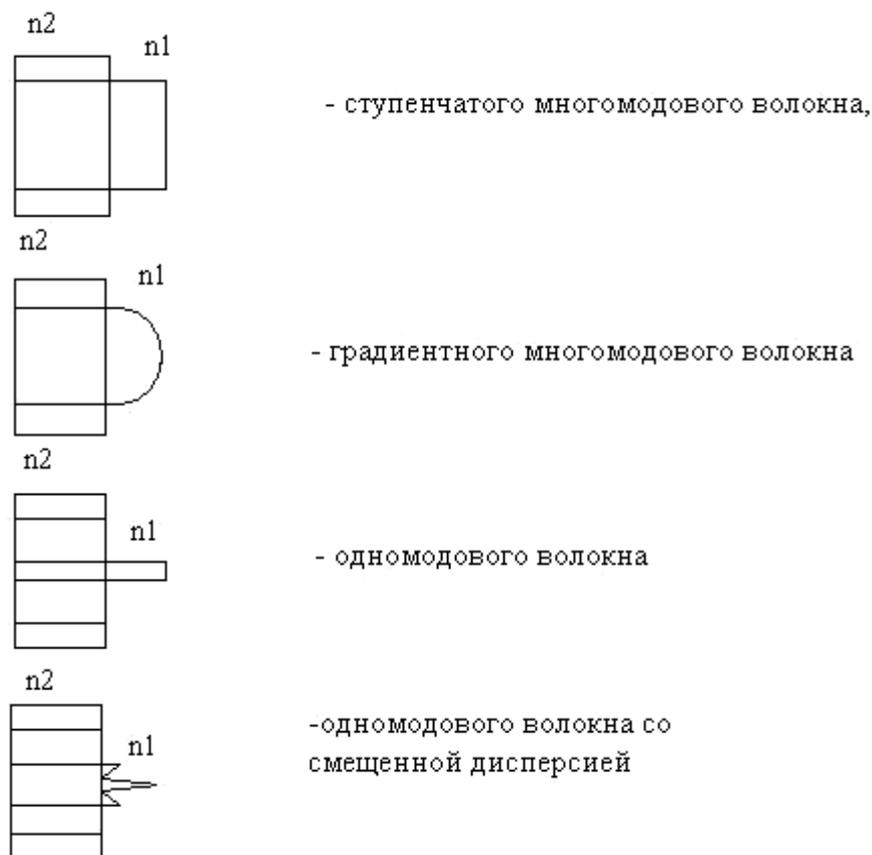


Рис. 2.3. Профили показателя преломления

*Одномодовое оптическое 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.

Оптимизация трех перечисленных типов одномодовых ОВ 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 [5]. Однако длина безретрансляционного участка при использовании волокна SF будет меньше, чем при использовании NZDSF, или иначе потребуется очень узкая полоса спектрального излучения лазерных передатчиков для уменьшения результирующей хроматической дисперсии. Максимальное допустимое расстояние определяется техническими характеристиками как самого волокна (затуханием, дисперсией), так и приемопередающего оборудования (мощностью, частотой, спектральным уширением излучения передатчика, чувствительностью приемника).

В ВОЛС наиболее широко используются следующие стандарты волокон:

- многомодовое градиентное волокно 50/125;
- многомодовое градиентное волокно 62,5/125;
- одномодовое ступенчатое волокно SF (волокно с несмещенной дисперсией или стандартное волокно) 8-10/125;
- одномодовое волокно со смещенной дисперсией DSF 8-10/125;
- одномодовое волокно с ненулевой смещенной дисперсией NZDSF

(по профилю показателя преломления это волокно схоже с предыдущим типом волокна).

## 2.6. Константа распространения и фазовая скорость

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

$$\beta = n_1 k \sin i = n_1 k \cos \theta \quad (2.6.1)$$

где  $\theta$  - угол, дополняющий угол  $i$  до  $90^\circ$  (или угол между лучом и осью, как показано на рис. 2.4) ,  $\beta$  называется константой распространения и играет такую же роль в волноводе как волновое число  $k$  в свободном пространстве [6]. Т.к.  $\beta = \beta(\lambda)$ , то в соответствии с (ф. 2.6.1)  $\theta$  и  $i$  зависят от длины волны.

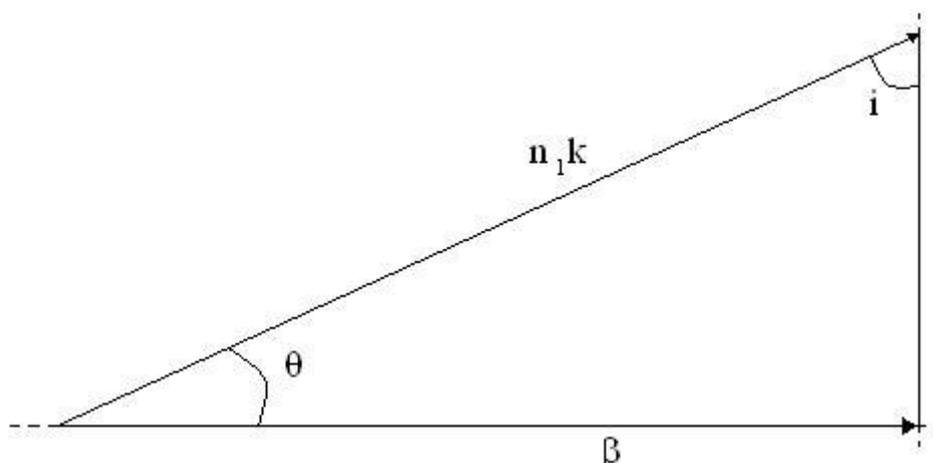


Рис. 2.4. Волновой вектор и константа распространения

Угол падения  $i$  изменяется между  $i_c$  и  $\pi/2$ . Следовательно:

$$kn_1 < \beta < kn_2 \quad (2.6.2)$$

Таким образом, величина константы распространения внутри волновода всегда лежит между значениями волновых чисел плоской световой волны в материале сердцевины и оболочки. Если учесть, что

$c = \frac{\omega}{k}$ , то можно переписать это соотношение на языке фазовых скоростей:

$$\frac{c}{n_1} < v < \frac{c}{n_2} \quad (2.6.3)$$

Фазовые скорости распространения мод  $v = \frac{\omega}{\beta}$  заключены между фазовыми скоростями волн в двух объемных материалах.

Скорость распространения светового сигнала или групповая скорость - это скорость распространения огибающей светового импульса. В общем случае групповая скорость  $u$  не равна фазовой скорости. Различие фазовых скоростей мод приводит к искажению входного пучка света по мере его распространения в волокне.

В волокне с параболическим градиентным показателем преломления наклонные лучи распространяются по криволинейной траектории, которая, естественно, длиннее, чем путь распространения аксиального луча. Однако из-за уменьшения показателя преломления по мере удаления от оси волокна, скорость распространения составляющих светового сигнала при приближении к оболочке оптического волокна возрастает, так что в результате этого время распространения составляющих по ОВ оказывается примерно одинаковым. Таким образом, дисперсия или изменение времени распространения различных мод, сводится к минимуму, а ширина полосы пропускания волокна увеличивается. Точный расчет показывает, что разброс групповых скоростей различных мод в таком волокне существенно

меньше, чем в волокне со ступенчатым профилем показателя преломления. Оптические волокна, которые могут поддерживать распространение только моды самого низкого порядка, называются одномодовыми.

Одномодовые оптические волокна применяются в межконтинентальных линиях связи и других магистральных линиях, где требуется чрезвычайно высокое качество передаваемой информации (например, передача банковских данных). В цифровых линиях связи (наиболее распространенном типе линий) качество передаваемой информации характеризуется коэффициентом битовых ошибок. Его величина тем больше, чем больше вероятность принять бит 0 за бит 1. Вероятность такой ошибки возрастает с уменьшением амплитуды импульсов и увеличением их ширины. [17].

Таким образом, каждая мода, распространяющаяся в ОВ, характеризуется постоянным по длине световода распределением интенсивности в поперечном сечении, постоянной распространения  $\beta$ , а также фазовой  $\nu$  и групповой  $u$  скоростями распространения вдоль оптической оси, которые различны для разных мод. Из-за различия фазовых скоростей мод волновой фронт и распределение поля в поперечном сечении изменяются вдоль оси волокна. Из-за различия групповых скоростей мод световые импульсы расширяются, и это явление называется межмодовой дисперсией.

В одномодовом волокне существует только одна мода распространения, поэтому такое волокно характеризуется постоянным распределением поля в поперечном сечении, в нем отсутствует межмодовая дисперсия, и оно может передавать излучение с очень широкой полосой модуляции, ограниченной только другими видами дисперсии (см. п. 3.2).

### Глава 3. ПРОЦЕССЫ, ПРОИСХОДЯЩИЕ В ОПТИЧЕСКОМ ВОЛОКНЕ, И ИХ ВЛИЯНИЕ НА СКОРОСТЬ И ДАЛЬНОСТЬ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

#### 3.1. Затухание оптического волокна

По мере распространения света в оптической среде он ослабевает, что носит название затухания среды — *затухания* ОВ. Затухание зависит от длины волны излучения, вводимого в волокно. В настоящее время передача сигналов по волокну осуществляется в трех диапазонах: 850 нм, 1300 нм, 1550 нм, так как именно в этих диапазонах кварц имеет повышенную прозрачность. Затухание (рис. 3.1) обычно измеряется в дБ/км и определяется потерями на поглощение и на рассеяние излучения в оптическом волокне [5]:

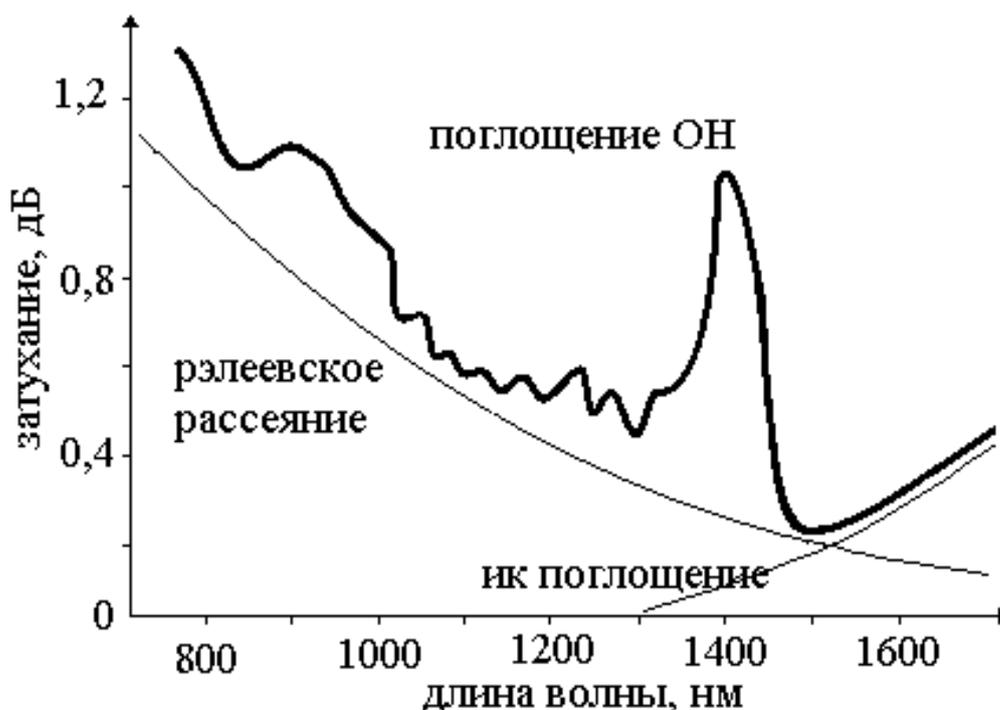


Рис. 3.1. Затухание

- рэлеевское рассеяние;
- рассеяние на дефектах волокна;
- собственное поглощение кварцевого стекла;
- примесное поглощение;
- поглощение на микро и макроизгибах.

где  $\alpha_n$  — коэффициент затухания, обусловленный потерями на поглощение световой энергии. Собственное поглощение кварцевого стекла определяется поглощением фотонов при котором энергия фотона переходит в энергию электронов или в колебательную энергию решетки. Спектр собственного электронного поглощения кварцевого стекла лежит в ультрафиолетовой области ( $\lambda < 0,4$  мкм). Спектр поглощения решетки лежит в инфракрасной области ( $\lambda > 7$  мкм). Поскольку структура кварцевого стекла аморфная, полосы поглощения имеют размытые границы, а их «хвосты» заходят в видимую область спектра. Во втором и третьем окнах прозрачности в диапазоне длин волн 1,3-1,6 мкм потери, вызванные собственным поглощением, имеют порядок 0,03 дБ/км.

$\alpha_p$  — коэффициент затухания, обусловленный рэлеевским рассеиванием на неоднородностях материала ОВ, размеры которых значительно меньше длины световой волны, и тепловыми флуктуациями показателя преломления. Этот вид рассеяния определяет теоретическую границу, ниже которой затухание не может быть уменьшено и в современных ОВ является основным источником потерь в рабочих областях спектра. Рэлеевское рассеяние вызывается рассеянием на неоднородностях показателя преломления, возникших в расплавленном кварце в связи с локальными термодинамическими флуктуациями концентрации молекул (плотности) кварца из-за их хаотического движения в расплавленном состоянии. При затвердевании волокна неоднородности, возникшие в расплавленной фазе, застывают в структуре кварцевого стекла. Колебания плотности приводят к случайным флуктуациям

показателя преломления в масштабе, меньшем, чем длина световой волны  $\lambda$ .

$\alpha_{np}$  — коэффициент затухания, вызванный присутствующими в ОВ примесями, приводящими к дополнительному поглощению оптической мощности, это ионы металлов (Fe, Cu, Ni, Mn, Cr), вызывающие поглощение в диапазоне длин волн 0,6-1,6 мкм, и гидроксильные группы (ОН), из-за которых появляются резонансные всплески затухания  $\alpha(\lambda)$  на длинах волн 0,75 мкм, 0,97 мкм и 1,39 мкм.

$\alpha_k$  — дополнительные потери, определяемые деформацией ОВ в процессе изготовления кабеля, вызванной скруткой, изгибом, отклонением от прямолинейного расположения и термомеханическими воздействиями, имеющими место при наложении оболочек и покрытий на сердцевину волокна при изготовлении ОК (их называют кабельными).

$\alpha_{ик}$  — коэффициент затухания, зависящий от длины волны оптического излучения и за счет поглощения в инфракрасной области возрастающий в показательной степени с ростом длины волны.

В настоящее время в технике связи в основном применяются кварцевые ОВ, область эффективного использования которых находится в диапазоне длин волн до 2 мкм. На более длинных волнах в качестве материала для волокна используются галоидные, халькогенидные и фторидные стекла. По сравнению с кварцевыми волокнами они обладают большей прозрачностью и обеспечивают снижение потерь на несколько порядков. С появлением ОВ из новых материалов становится реальным создание ВОЛС без ретрансляторов.

Затухание оптического волновода учитывается при расчете энергетического бюджета.

Затухание оптоволоконной линии с учетом потерь на разъемных соединениях и сращениях (неразъемных соединениях) определяется по формуле:

$$A = A_{nc} \cdot n_{nc} + \alpha \cdot L + A_{pc} \cdot n_{pc}, \quad (3.1.2)$$

где  $A_{nc}$  и  $A_{pc}$  - значение потерь на срезке и разъеме соответственно,  $n_{nc}$  и  $n_{pc}$  - количество срезов и разъемных соединений на протяжении оптоволоконной линии длиной  $L$ ,  $\alpha$  - километрический коэффициент затухания оптического волокна, измеряемый в дБ/км.

Тогда энергетический бюджет рассчитывается по формуле:

$$A_{\text{эб}} = P_{\text{вых}} - P_{\text{фпр}} - A_{\text{эза}} - A_{\text{эзк}} - A, \quad (3.1.3)$$

где  $P_{\text{вых}}$  и  $P_{\text{фпр}}$  - мощность источника оптического излучения и чувствительность фотоприемника в дБ соответственно;  $A_{\text{эза}}$  и  $A_{\text{эзк}}$  - эксплуатационный запас для аппаратуры и для кабеля, (дБ), которые берутся из технических условий (контрактных спецификаций) для оборудования ВОЛС.

### 3.2. Дисперсия

Световой сигнал в цифровых системах передачи поступает в световод импульсами, которые вследствие некогерентности реальных источников излучения содержат составляющие с различной частотой. Уширение светового импульса, вызываемое различием времени распространения его спектральных и поляризационных компонент, и называется дисперсией.

Световая волна, распространяющаяся вдоль направления  $x$ , описывается уравнением:

$$\xi(x, t) = A \cos(\omega \cdot t - kx) \quad (3.2.1)$$

где  $A$  - амплитуда световой волны;  $\omega$  - ее угловая частота,  $k$  - волновое число.

Если взять фиксированное значение фазы волны:

$$\omega \cdot t - kx = \text{const}, \quad (3.2.2)$$

то скорость перемещения фазы в пространстве или *фазовая скорость* будет:

$$v = \frac{\omega}{k}. \quad (3.2.3)$$

Световой импульс, распространяющийся в ОВ представляет собой суперпозицию электромагнитных волн с частотами, заключенными в интервале  $\Delta\omega$ , которая называется *группой волн* вида (3.2.1). В момент времени  $t$  в разных точках для разных  $x$  волны будут усиливать друг друга, что приводит к появлению максимума интенсивности группы волн (*центр группы волн*), или ослаблять. Центр группы волн перемещается со скоростью:

$$u = \frac{d\omega}{dk}, \quad (3.2.4)$$

называемой *групповой*. Заменив  $k=2\pi/\lambda$  и выразив  $\omega = vk$ , получим соотношение, выражающее зависимость групповой скорости от длины волны:

$$u = v - \lambda \frac{dv}{d\lambda}. \quad (3.2.5)$$

Это и является причиной, приводящей к различию скоростей распространения частотных составляющих излучаемого спектра по оптическому волокну. В результате по мере распространения по оптическому волокну частотные составляющие достигают приемника в разное время. Вследствие этого импульсный сигнал на выходе ОВ видоизменяется, становясь «размытым». Это явление называется *волноводной дисперсией*, определяемой показателем преломления ОВ и шириной спектра излучения источника  $\Delta\lambda$  и имеющей размерность времени [5]:

$$\tau_w(\Delta\lambda, L) = \Delta\lambda \cdot L \cdot \frac{2n_1^2 \Delta}{c\lambda} = \Delta\lambda \cdot L \cdot N(\lambda), \quad (3.2.6)$$

где  $\Delta$  - относительная разность показателей преломления сердцевины

и оболочки,  $L$  - длина ОВ,  $N(\lambda)$  - коэффициент волноводной дисперсии, называемый удельной волноводной дисперсией. Зависимость удельной волноводной дисперсии от длины волны показана на рис. 3.2.

Скорость распространения волны зависит не только от частоты, но и от среды распространения. Для объяснения этого явления электроны внутри атомов и молекул рассматриваются в теории дисперсии квазиупруго связанными. При прохождении через вещество световой волны каждый электрон оказывается под воздействием электрической силы и начинает совершать вынужденные колебания. Колеблющиеся электроны возбуждают вторичные волны, распространяющиеся со скоростью  $c$ , которые, складываясь с первичной, образуют результирующую волну. Эта результирующая волна распространяется в веществе с фазовой скоростью  $v$ , причем, чем ближе частота первичной волны к собственной частоте электронов, тем сильнее будут вынужденные колебания электронов и различие между  $v$  и  $c$  будет больше, что объясняет зависимость  $v = v(\omega)$ . В результате смещения электронов из положений равновесия молекула вещества приобретает электрический дипольный момент. То есть при взаимодействии электромагнитной волны со связанными электронами отклик среды зависит от частоты светового импульса, что и определяет зависимость показателя преломления от длины волны, которая характеризует дисперсионные свойства оптических материалов:

$$n^2 = 1 + \frac{Ne^2}{\pi mc^2} \sum_i \frac{(e_i^2/m_i)\lambda_{0i}^2\lambda^2}{\lambda_{0i}^2 - \lambda^2}, \quad (3.2.7)$$

где  $N$  - плотность частиц (число частиц в единице объема),  $m$  и  $e$  - масса и заряд электрона соответственно,  $\lambda_{0i}$  - резонансные длины волн,  $f_i = e_i^2/m_i$  - вынуждающие осцилляции электрические силы. В широком спектральном диапазоне, включающем обычный ультрафиолет, видимую область и ближнюю инфракрасную область, кварцевое стекло прозрачно и

данная формула Солмейера применима с очень высокой точностью [5, 7].

Явление, возникновение которого связано с характерными частотами, на которых среда поглощает электромагнитное излучение вследствие осцилляции связанных электронов, и которое определяет уширение длительности светового импульса после его прохождения через дисперсионную среду, называется в технике волоконно-оптической связи *материальной дисперсией* [5]:

$$\tau_{mat}(\Delta\lambda, L) = \Delta\lambda \cdot L \cdot \frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_1}{d\lambda^2} = \Delta\lambda \cdot L \cdot M(\lambda), \quad (3.2.8)$$

где коэффициент  $M(\lambda)$  называется удельной материальной дисперсией. На длине волны  $\lambda = 1276$  нм у кварца величина  $d^2 n_1 / d\lambda^2 = 0$ , следовательно коэффициент материальной дисперсии  $M(\lambda) = 0$  (см. рис. 3.2). При длине волны  $\lambda > 1276$  нм  $M(\lambda)$  меняет знак и принимает отрицательные значения, в результате чего на длине волны (примерно  $1310 \pm 10$  нм для ступенчатого одномодового волокна) происходит взаимная компенсация  $M(\lambda)$  и  $N(\lambda)$ . 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 оптического волокна.

Результирующая дисперсия складывается из волноводной и материальной и называется *хроматической дисперсией*. Дисперсию в оптических волокнах принято характеризовать коэффициентом дисперсии или удельной дисперсией, измеряемом в пс/(нм·км). Коэффициент дисперсии численно равен увеличению длительности светового импульса (в пикосекундах), спектральная ширина которого равна 1 нм, после прохождения отрезка ОВ длиной 1 км. Значение коэффициента хроматической дисперсии определяется как  $D(\lambda) = M(\lambda) + N(\lambda)$ . Удельная дисперсия имеет размерность пс/(нм·км).

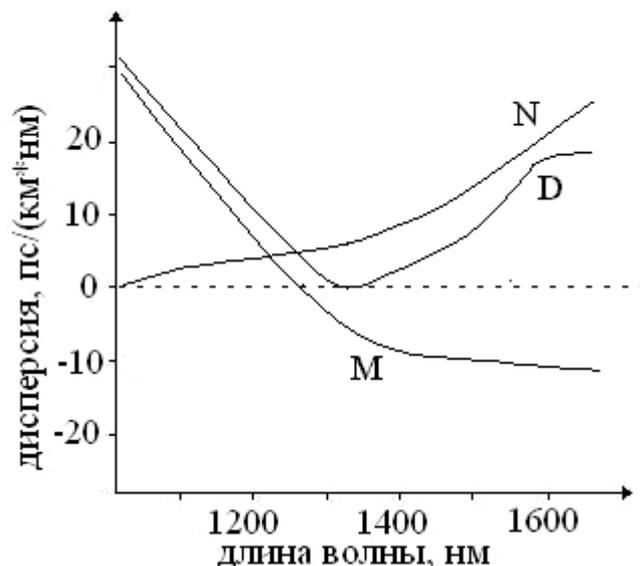


Рис. 3.2. Зависимости коэффициентов волноводной, материальной и результирующей хроматической дисперсии от длины волны

При допущениях, которые исходят из результатов опытов для различных веществ, из выражения (3.2.7) может быть получена приближенная формула зависимости показателя преломления от длины волны:

$$n(\lambda) = a + b/\lambda^2 + c/\lambda^4 + \dots, \quad (3.2.9)$$

где  $a$ ,  $b$  и  $c$  - постоянные, значения которых определяются экспериментально для каждого вещества.

Для одномодового, ступенчатого и многомодового градиентного оптических волокон для расчета дисперсии применима эмпирическая формула Селмейера [5]:

$$\tau(\lambda) = A + B\lambda^2 + C\lambda^{-2}. \quad (3.2.10)$$

Коэффициенты  $A$ ,  $B$ ,  $C$  являются подгоночными и определяются для каждого материала ОВ экспериментальным путем. Тогда удельная хроматическая дисперсия вычисляется по формуле [5]:

$$D(\lambda) = \partial\tau/\partial\lambda = 2(B\lambda - C\lambda^{-3}) = S_0(\lambda - \lambda_0^4/\lambda^3)/4, \quad (3.2.11)$$

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.

Хроматическая дисперсия связана с удельной хроматической дисперсией простым соотношением:

$$\tau_{chr}(\lambda) = D(\lambda) \cdot \Delta\lambda \cdot L. \quad (3.2.12)$$

К уменьшению хроматической дисперсии ведет использование более когерентных источников излучения, например лазерных передатчиков, и использование рабочей длины волны более близкой к длине волны нулевой дисперсии.

### 3.3. Распространение световых импульсов в среде с дисперсией

Электрическое поле линейно поляризованного светового сигнала, распространяющегося в одномодовом волокне, можно описать следующим образом [6]:

$$\vec{E}(x, y, z, t) = \vec{e}(u(x, y)E(z, t) \cdot e^{j(\beta z - \omega t)}), \quad (3.3.1)$$

где  $\vec{e}$  - единичный вектор,  $E(z, t)$  - медленно меняющаяся амплитуда (огибающая) светового импульса, представляющая собой комплексный скаляр, который изменяется в направлении  $z$  и во времени  $t$ ,  $u(x, y)$  - распределение амплитуды поля в поперечном направлении,  $\beta = \beta(\omega)$  - постоянная распространения,  $\omega$  - угловая частота.

Распределение амплитуды поля основной моды в поперечном направлении описывается следующим уравнением [6]:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + (\varepsilon(\omega, x, y) \cdot (\omega/c)^2 - \beta^2) \cdot u = 0, \quad (3.3.2)$$

где  $\varepsilon(\omega)$  - диэлектрическая проницаемость среды.

В отсутствие в волокне нелинейных явлений рассчитать изменение формы светового импульса в процессе распространения вдоль волокна можно, воспользовавшись преобразованием Фурье [6].

Рассмотрим распространение спектральных компонент светового сигнала  $E(z, \omega - \omega_0)$ , получаемых преобразованием Фурье огибающей светового импульса  $E(z, t)$ :

$$E(z, \omega - \omega_0) = \int_{-\infty}^{\infty} E(z, t) e^{j(\omega - \omega_0)t} dt, \quad (3.3.3)$$

где  $\omega_0$  - несущая частота.

Спектральные компоненты удовлетворяют уравнению:

$$\frac{\partial E(z, \omega - \omega_0)}{\partial z} = j(\beta(\omega) - \beta_0)E(z, \omega - \omega_0) - \alpha, \quad (3.3.4)$$

где  $\alpha$  - коэффициент затухания сигнала,  $\beta_0 = \beta(\omega_0)$ .

Решение этого уравнения известно и характеризует затухание сигнала и сдвиг фаз, пропорциональный пройденному расстоянию:

$$E(z, \omega - \omega_0) = E_{ex}(\omega) \exp\left(-\int_0^z \alpha(z) dz\right) \exp\left(j \int_0^z (\beta(z, \omega) - \beta_0) dz\right), \quad (3.3.5)$$

где Фурье - образ входного светового сигнала имеет вид:

$$E_{ex}(\omega - \omega_0) = \int_{-\infty}^{\infty} E(0, t) e^{j\omega t} dt, \quad (3.3.6)$$

Для однородного волокна выражение упрощается:

$$E(z, \omega - \omega_0) = E_{ex}(\omega) e^{-\alpha z} e^{j(\beta - \beta_0)z}. \quad (3.3.7)$$

Как следует из выражения (3.3.7), в процессе распространения по волокну разные спектральные компоненты приобретают различный фазовый сдвиг, поэтому Фурье - образ выходного сигнала, прошедшего участок однородного ОВ длиной  $L$ , имеет вид:

$$E_{вых}(\omega) = E_{ex}(\omega) e^{j(\beta - \beta_0)L} e^{-\alpha L}. \quad (3.3.8)$$

Форма выходного сигнала может быть получена из Фурье – образа

обратным преобразованием Фурье:

$$E_{\text{вых}}(t) = E(L, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} E_{\text{вых}}(\omega - \omega_0) e^{-j\omega t} d\omega . \quad (3.3.9)$$

Искажение световых импульсов при распространения в ОВ можно оценить, разложив постоянную распространения  $\beta(\omega)$  в ряд Тейлора около несущей частоты  $\omega_0$  [6]:

$$\beta(\omega) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} \beta_n (\omega - \omega_0)^n , \quad (3.3.10)$$

где:

$$\beta_n = \left. \frac{\partial^n \beta}{\partial \omega^n} \right|_{\omega_0} \quad (3.3.11)$$

Выражение (3.3.10), ограниченное первыми четырьмя членами разложения, имеет вид:

$$\beta(\omega) = \beta_0 + \beta_1(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2} \beta_2(\omega - \omega_0)^2 + \frac{1}{6} \beta_3(\omega - \omega_0)^3 . \quad (3.3.12)$$

Если в разложении (3.3.12) пренебречь степенями выше первой, что соответствует распространению светового импульса по ОВ без искажений, то после подстановки (3.3.12) в (3.3.8), (3.3.9) получается:

$$E_{\text{вых}}(t) = E(L, t) = \frac{1}{2\pi} e^{-\alpha L} \int_0^L E_{\text{вх}}(\omega - \omega_0) e^{-j\beta_1 L + j\omega t} d\omega . \quad (3.3.13)$$

Сделав замену переменных  $T = t - \beta_1 L$ , получим  $E_{\text{вых}}(T) = E_{\text{вх}}(t) e^{-\alpha L}$ . Т.е. в рассмотренном приближении световой импульс затухает, форма его не меняется, и на выходе из волокна он оказывается с временной задержкой  $\beta_1 L$ . Следовательно, групповая скорость распространения светового импульса равна  $1/\beta_1$ .

Обычно коэффициент при квадрате разности частот не равен нулю, в этом случае световой импульс искажается. Для светового импульса произвольной формы получить аналитическое выражение не удастся, но

для импульса гауссовой формы ( $E_{ex}(t) = \exp(-t^2/2T_0^2)$ ) аналитическое выражение для выходного импульса имеет следующий вид:

$$E_{вых}(T) = e^{-\alpha L} \frac{T_0^2}{T_0^2 - j\beta_2 L} \exp\left(-\frac{T^2}{2(T_0^2 - j\beta_2 L)}\right), \quad (3.3.14)$$

где  $T_0$  - начальная длительность импульса.

Таким образом, гауссовский импульс сохраняют свою форму, но его длительность  $T_1$ , увеличивается [7]:

$$T_1 = T_0 \left(1 + \frac{z}{T_0^2 / |\beta_2|}\right)^{\frac{1}{2}}, \quad (3.3.15)$$

где величина  $L_D = T_0^2 / |\beta_2|$  называется дисперсионной длиной. Выражение (3.3.15) показывает, что при  $\beta_2 \neq 0$  импульс расширяется. Темп расширения импульса определяется дисперсионной длиной  $L_D$ . При определенной длине световода более короткий импульс уширяется больше, т.к. его дисперсионная длина меньше. При  $z = L_D$  гауссовский импульс уширяется в  $\sqrt{2}$  раз. Импульс, вначале не имевший частотной модуляции, приобретает ее по мере распространения в ОВ.

Из выражения (3.3.15) следует, что уширение гауссовского импульса, не обладавшего на входе частотной модуляцией, не зависит от знака параметра дисперсии  $\beta_2$ . Поведение изменяется, однако, если импульс на входе имеет некоторую частотную модуляцию. В случае линейной частотной модуляции гауссовского импульса амплитуда огибающей записывается в виде [6]:

$$E_{ex}(T) = E_{ex}(0) \exp\left(-\frac{(1 + jC)T^2}{2T_0^2}\right), \quad (3.3.16)$$

где  $C$  - параметр модуляции. Полуширина спектра (на уровне интенсивности  $1/e$  от максимальной) определяется выражением:

$$\Delta\omega = \left( \frac{(1 + C^2)^{\frac{1}{2}}}{T_0} \right), \quad (3.3.17)$$

что в  $(1 + C^2)^{\frac{1}{2}}$  раз больше, чем ширина спектра импульса той же длительности, но без частотной модуляции. Квазимонохроматический импульс без частотной модуляции имеет минимальную длительность, достижимую при заданном спектре. Поэтому световые импульсы без частотной модуляции называются спектрально ограниченными [7].

Форма прошедшего через оптическое волокно светового импульса с линейной частотной модуляцией (чирпом) имеет вид:

$$E_{\text{вых}}(T) = e^{-\alpha L} \frac{T_0^2}{T_0^2 - j\beta_2 L(1 + jC)} \exp\left(-\frac{(1 + jC)T^2}{2(T_0^2 - j\beta_2 L(1 + jC))}\right). \quad (3.3.18)$$

Таким образом, частотно-модулированный (чирпированный) гауссовский импульс сохраняет свою форму при распространении. Длительность импульса  $T_1$  на выходе волокна связана с длительностью на входе соотношением:

$$\frac{T_1}{T_0} = \left( \left( 1 + \frac{C\beta_2 L}{T_0^2} \right)^2 + \left( \frac{\beta_2 L}{T_0^2} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (3.3.19)$$

Из выражения (3.3.19) следует, что уширение зависит от знаков параметра  $\beta_2$  и параметра частотной модуляции  $C$ . Гауссовский импульс монотонно расширяется с увеличением расстояния, если  $\beta_2 C > 0$ .

### 3.3.1. Физическая природа хроматической дисперсии

Математическое описание эффектов дисперсии в оптическом волокне, проведенное в предыдущем разделе, основано на разложении постоянной распространения  $\beta(\omega)$  в ряд Тейлора вблизи несущей частоты

$\omega_0$  (см. ф. 3.3.10, 3.3.12). Огибающая светового импульса движется с групповой скоростью  $u = 1/\beta_1$ , а параметр  $\beta_2$  определяет расширение импульса [7].

Параметр  $\beta_2$  связан с показателем преломления  $n$  следующим образом:

$$\beta_2 = \frac{1}{c} \left( 2 \frac{dn}{d\omega} + \omega \frac{d^2n}{d\omega^2} \right) \approx \frac{\omega}{c} \frac{d^2n}{d\omega^2} = \frac{\lambda^3}{2\pi c^2} \frac{d^2n}{d\lambda^2}. \quad (3.3.20)$$

Показатель преломления вещества определяется двумя физическими механизмами: зависимостью от частоты (длины волны) и волноводными характеристиками волокна. Зависимость показателя преломления вещества от частоты называется материальной дисперсией, а зависимость от каналирующих свойств волокна - волноводной дисперсией (см. п. 3.2).

Дисперсию в оптических волокнах, как было сказано выше, принято характеризовать коэффициентом хроматической дисперсии или удельной хроматической дисперсией  $D$ , измеряемом в пс/(нм·км). Значение коэффициента  $D$  связано с коэффициентом  $\beta_2$  следующей формулой:

$$D = \frac{\partial}{\partial \lambda} \frac{1}{v} = \frac{\partial^2 \beta}{\partial \lambda \partial \omega} \approx -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2. \quad (3.3.21)$$

Коэффициент  $D$  можно найти, также, из известного распределения  $n(\lambda)$ :

$$D = -\frac{\lambda}{c} \frac{\partial^2 n(\lambda)}{\partial \lambda^2}. \quad (3.3.22)$$

Коэффициент хроматической дисперсии  $D$  стремится к нулю на длине волны приблизительно 1,31 мкм и становится положительным для больших длин волн. Длина волны, при которой  $D = 0$ , называется длиной волны нулевой дисперсии  $\lambda_{D0}$ .

В стандартном одномодовом волокне влияние волноводного вклада в дисперсию сводится, в основном, к смещению длины волны нулевой

дисперсии  $\lambda_{D0}$  в длинноволновую область:  $\lambda_{D0} \approx 1,31$  мкм. [18]. Важной особенностью волноводной дисперсии является то, что ее вклад в  $D$  зависит от параметров оптического волокна. В общем случае, волноводная дисперсия увеличивается при уменьшении размеров сердцевины. Этот факт может использоваться для смещения длины волны нулевой дисперсии [7].

### 3.3.2. Влияние хроматической дисперсии на работу систем связи

Хроматическая дисперсия ограничивает максимальную дальность передачи цифровых сигналов без восстановления их первоначальной формы. Для того чтобы охарактеризовать дальность передачи вводится понятие «дисперсионной длины», как расстояние, на котором происходит относительное расширение импульса по амплитуде в  $\sqrt{2}$  раз. Оценить дисперсионную длину для сигнала с шириной  $\Delta\lambda$  можно с помощью следующей формулы [7]:

$$L_D = 1 / \beta D \Delta\lambda. \quad (3.3.23)$$

### 3.4. Поляризационная модовая дисперсия

Стремительное развитие техники оптической передачи информации в последнее десятилетие привело к тому, что поляризационные эффекты в волоконно-оптических линиях связи, еще недавно считавшиеся незначительными, стали играть роль основного фактора, сдерживающего дальнейшее увеличение скорости и дальности передачи информации. Это связано с тем, что ограничения, накладываемые затуханием световых сигналов, и ограничения, накладываемые искажениями световых сигналов из-за хроматической дисперсии, успешно преодолеваются по мере внедрения оптических усилителей и улучшения их характеристик и в результате разработки эффективных методов компенсации хроматической

дисперсии. По мере увеличения скорости передачи информации по одному каналу до 10 и 40 Гбит/с и дальности до нескольких тысяч километров даже слабые эффекты поляризационной модовой дисперсии PMD (polarization mode dispersion), накапливаясь, дают заметный вклад в работу системы.

### 3.4.1. Природа поляризационных эффектов в одномодовом оптическом волокне

Так как свет представляет собой электромагнитную волну, а ее распространение в любой среде описывается уравнениями Максвелла, распространение света может рассматриваться путем определения развития связанных с ним векторов электрического  $\vec{E}(r,t)$  и магнитного  $\vec{H}(r,t)$  полей в пространстве и времени [4]. Здесь  $r$  обозначает пространственное положение вектора. Более удобно оперировать с преобразованием Фурье этих векторов (см. ф. 3.3.3). Преобразование Фурье для  $\vec{H}(r,t)$  определяется аналогичным образом.

Поскольку электроны в атоме заряжены отрицательно, а ядро несет положительный заряд, то при действии электрического поля на материал, подобный кварцу, происходит поляризация атомов. Индуцированная поляризация описывается вектором  $\vec{P}$ , зависящим от особенностей среды и прилагаемого электрического поля и связанным с вектором  $\vec{E}(r,t)$  и электрической индукцией  $\vec{D}$  выражением:

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P}. \quad (3.4.1)$$

Связь  $\vec{P}$  и  $\vec{E}$  в оптическом волокне определяется свойствами среды и является причиной важного явления – дисперсии.

Рассмотрим поведение фундаментальной моды, представив электрическое поле  $\vec{E}(r,t)$  световой волны в виде:

$$\vec{E}(r,t) = \tilde{E}_x \vec{e}_x + \tilde{E}_y \vec{e}_y + \tilde{E}_z \vec{e}_z, \quad (3.4.2)$$

где  $\vec{e}_x$ ,  $\vec{e}_y$  и  $\vec{e}_z$  - соответственно единичные векторы, причем  $z$  – направление распространения света. Данное уравнение имеет два линейно независимых решения, которые соответствуют фундаментальной моде.

Изменяющееся со временем электрическое поле считается линейно поляризованным, если его направление остается постоянным (не зависит от времени). Если электрическое поле, ассоциируемое с электромагнитной волной, не имеет продольной компоненты, поле считается поперечным, в противном случае – продольным. Учитывая это, два линейно независимых решения волнового уравнения представляют линейно поляризованные вдоль осей  $x$  и  $y$  электрические поля, которые в силу взаимной перпендикулярности называются ортогонально поляризованными составляющими электрического поля или состояниями поляризации SOP (State of Polarization). Любая линейная комбинация этих двух линейно поляризованных составляющих также является решением уравнения и, таким образом, фундаментальной модой. В идеальном изотропном оптическом волокне оба состояния поляризации имеют одну и ту же постоянную распространения, т.е. распространяются с одинаковой скоростью, и в результате прохождения такой среды длительность результирующего импульса остается неизменной. Но в реальных оптических волокнах из-за нарушения круговой симметрии возникает небольшая анизотропия, поэтому, учитывая, что световая энергия распределена между SOP, различие констант распространения вызывает увеличение длительности импульса на выходе ОВ.

Анизотропия или двулучепреломление оптического волокна может быть связано либо с нарушением идеальной круговой формы сердцевинки, либо с наведенным двулучепреломлением вещества, например, из-за несимметричных напряжений в материале ОВ как это показано на рис. 3.4а, или из-за несовпадения геометрических центров сердцевинки и оболочки.

Потеря круговой симметрии приводит к появлению анизотропии,

при этом, в оптическом волокне распространяются две ортогонально поляризованные моды с различными фазовыми и групповыми скоростями.

Скорости распространения поляризационных компонентов светового импульса различны, что приводит к возникновению временной задержки  $\delta\tau$ , которую принято называть дифференциальной групповой задержкой DGD (Differential Group Delay), приводящей к уширению результирующего сигнала. Состояния поляризации, задающие самое быстрое и самое медленное распространение сигнала, называются быстрым и медленным главными состояниями поляризации PSP (Principal State of Polarization). Оси линейных поляризаций быстрого и медленного PSP называются «быстрой» и «медленной» осями анизотропной среды. Различие скоростей приводит к отставанию импульса, поляризованного вдоль медленной оси PSP [18].

Возникновение DGD вызывает ряд искажений информационного сигнала, включая увеличение длительности импульса. Но в отличие от хроматической дисперсии, PMD не является стабильной, а имеет статистическую природу. Существует несколько факторов роста анизотропии профиля волокна:

статические факторы:

- собственно несовершенство заводского процесса вытяжки волокон;
- скрутка волокон при изготовлении волоконно-оптического кабеля (ВОК);
- изгибы ВОК и как следствие механические деформации волокон, возникающие в процессе укладки кабеля;

и динамические факторы:

- вариации температуры окружающей среды – для ВОК, проложенных в грунт;
- динамические деформации во окон (ветровые нагрузки, вариации температуры окружающей среды, деформации вследствие оледенения кабеля) – для подвесных ВОК.

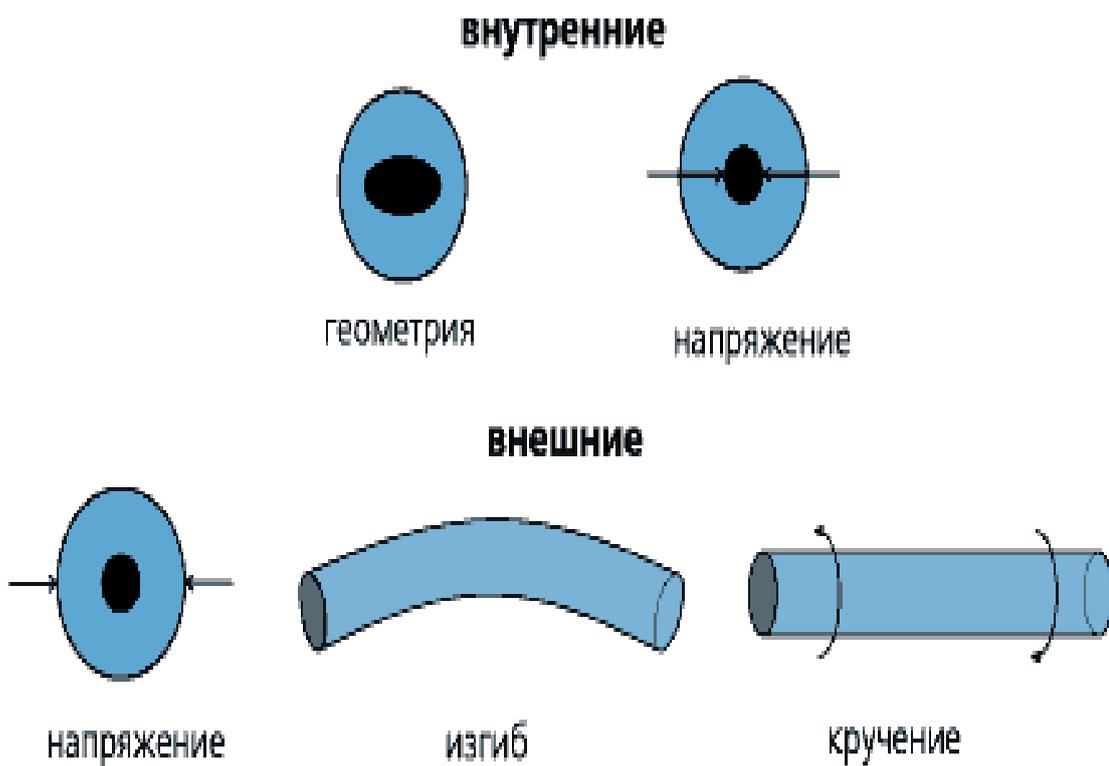


Рис. 3.4а. Причины возникновения анизотропии оптического волокна

(см. рис. 3.4б) от импульса, поляризованного вдоль быстрой оси PSP на величину относительной задержки  $\delta\tau$ .

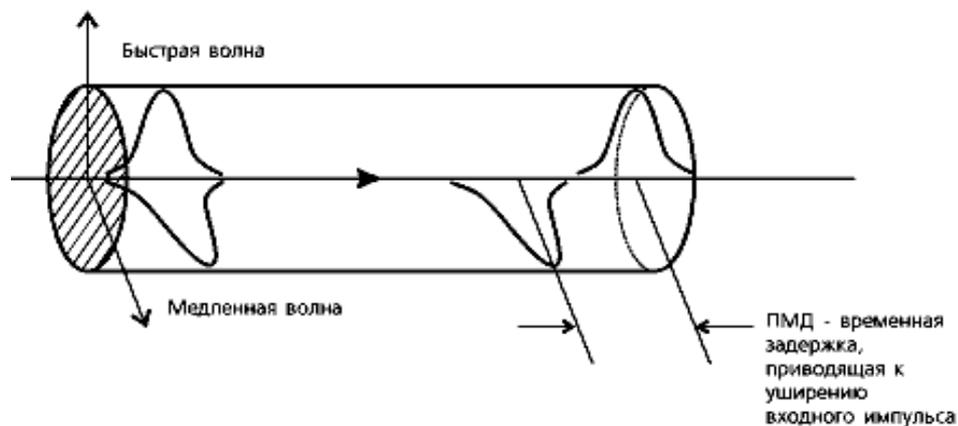


Рис. 3.4б. Появление PMD при распространении световых импульсов в оптическом волокне

Из-за наличия динамических факторов даже в пределах отдельного сегмента волокна невозможно определить направление поляризации сигнала после прохождения этого сегмента. Тем более, невозможно определить пропорцию, в которой распределиться энергия между PSP на следующем участке волокна. Итак, дифференциальная групповая задержка  $\delta\tau$  не постоянная величина, а изменяется со временем, причем случайным образом. Детальный анализ динамического поведения DGD показывает, что эта случайная величина наилучшим образом подпадает под распределение Максвелла, а среднеквадратичное отклонение  $\langle \delta\tau^2 \rangle$  связано со средним значением дифференциальной групповой задержки соотношением [5]:

$$\langle \delta\tau^2 \rangle = \frac{3\pi}{8} \langle \delta\tau \rangle_{Max}^2, \quad (3.4.3)$$

где индекс *Max* – обозначает усреднение по функции распределения Максвелла.

Поляризационной модовой дисперсией PMD называют среднеквадратичное значение дифференциальной групповой задержки:

$$\tau_{PMD} = \sqrt{\langle \delta\tau^2 \rangle}. \quad (3.4.4)$$

Она обычно измеряется в пс.

В линии с большим числом сегментов значение PMD определяется в зависимости от суммарного расстояния по формуле [5]:

$$\tau_{PMD} = D_{PMD} \sqrt{L}, \quad (3.4.5)$$

где  $L$  - протяженность оптической линии связи (км),  $D_{PMD}$  - коэффициент PMD оптического волокна (пс/км<sup>1/2</sup>).

Значение коэффициента  $D_{PMD}$  для типичных ОВ находится в пределах от 0,1 до 2 пс/км<sup>1/2</sup>. В табл. 3.4. для них при разных скоростях цифровой передачи приведены значения максимальной протяженности линии связи.

Таблица 3.4. Значения максимальной протяженности волоконно-оптической линии связи.

	$D_{PMD}$ (пс/км <sup>1/2</sup> )	0,1	0,5	2,0
$V=2,5\Gamma$ бит/с	$L$ (км)	160000	6 400	400
$V=10\Gamma\text{б}$ ит/с	$L$ (км)	10 000	400	25
$V=40\Gamma\text{б}$ ит/с	$L$ (км)	625	25	1,56

Задержка световой волны, поляризованной вдоль медленной оси, относительно волны, поляризованной вдоль быстрой оси, приводит к появлению разности фаз  $\Delta\varphi$  между двумя поляризационными компонентами, прямо пропорциональной DGD  $\delta\tau$  и угловой частоте  $\omega$  световой волны:

$$\Delta\varphi = \varphi_s - \varphi_f = \omega\Delta\tau. \quad (3.4.6)$$

Линейная зависимость разности фаз двух поляризационных компонент приводит к периодической зависимости поляризации выходного излучения от частоты.

### 3.4.2. Контроль PMD в процессе эксплуатации волоконно-оптических систем передач

Показатель преломления у телекоммуникационных волокон хоть и слабо, но зависит от состояния поляризации света, т.е. эти волокна обладают двулучепреломлением, причем в основном линейным. Оно наводится в номинально круглом волокне при его изготовлении из-за неизбежного появления небольшой эллиптичности сердцевины и внутренних напряжений, не обладающих аксиальной симметрией. Так как

наведенные в волокне натяжения не имеют выделенного направления, величина и азимут линейного двулучепреломления изменяется случайным образом вдоль оси волокна. [19].

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

После прокладки кабеля многие параметры, в том числе и PMD, могут по ряду причин (деформации волокна, температурные изменения, натяжение и т.д.) испытывать отклонения от паспортных данных. Это требует проведения измерений PMD оптических волокон после инсталляции волоконно-оптической кабельной системы. Также в процессе эксплуатации следует проводить регулярные проверки параметра PMD. Для сложных линий с большим числом последовательных сегментов волоконно-оптических кабелей следует проводить тестирование PMD и отдельных сегментов. Если линия состоит из  $N$  сегментов ВОК, дисперсия в каждом из которых равна  $D_{PMDi}$ , то результирующая поляризационная модовая дисперсия определяется из выражения в соответствии с законом суммы независимых случайных величин [5]:

$$D_{PMD}^2 = D_{PMD1}^2 + D_{PMD2}^2 + \dots + D_{PMDn}^2 \quad (3.4.7)$$

Исследуем на простом примере. Пусть линия состоит из девяти сегментов, восемь из которых имеет  $D_{PMD} = 0,2 \text{ пс/км}^{1/2}$  и один  $D_{PMD} = 2,0 \text{ пс/км}^{1/2}$ . Результирующая  $D_{PMD}$  такой линии равна  $2,078 \text{ пс/км}^{1/2}$ . Если

же все девять сегментов имеют  $D_{PMD} = 0,2$  пс/км<sup>1/2</sup>, то результирующая  $D_{PMD}$  будет равна 0,6 пс/км<sup>1/2</sup>. Это означает, что все сегменты должны тестироваться, чтобы исключить возможность резкого влияния низких характеристик одного сегмента на линию в целом [4].

## Глава 4. МЕТОДЫ КОМПЕНСАЦИИ ХРОМАТИЧЕСКОЙ ДИСПЕРСИИ

### 4.1. Обзор методов компенсации дисперсии

В настоящее время предложено и исследовано большое количество способов компенсации дисперсии. Их можно разделить на следующие три класса [7]:

- способы компенсации дисперсии, основанные на управлении пространственным распределением дисперсии волоконно-оптической линии связи (ВОЛС) для обеспечения нулевого суммарного (интегрального) значения дисперсии для всей линии;
- способы компенсации дисперсии, основанные на управлении передатчиком или приемником излучения;
- способы компенсации дисперсии, использующие нелинейные оптические эффекты для управления пространственно - временными характеристиками светового импульса.

Принцип компенсации дисперсии, основанный на управлении пространственным распределением дисперсии волоконно-оптической линии связи заключается в том, что в ВОЛС между участками телекоммуникационного волокна устанавливаются устройства, дисперсия которых равна по величине и противоположна по знаку дисперсии предшествующего им участка телекоммуникационного ОК. Можно рассматривать хроматическую дисперсию как фазовый сдвиг между разными длинами волн сигнала. В компенсирующем волокне фазовый сдвиг постоянен, что предполагает только статический метод компенсации. В идеальном случае фазовый сдвиг спектральных компонент полностью компенсируется в устройстве - компенсаторе хроматической дисперсии. Этот принцип поясняет рис. 4.1.

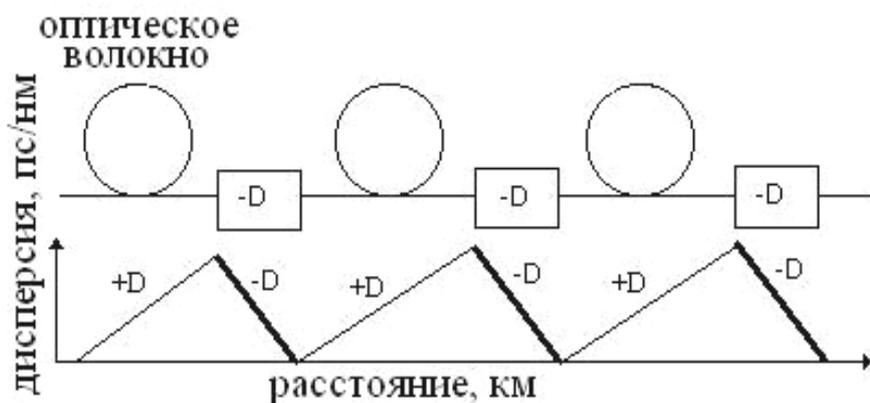


Рис. 4.1. Применение устройства компенсации дисперсии

Большинство типов телекоммуникационного волокна в рабочей области спектра обладает положительной дисперсией, поэтому для их компенсации используются устройства с отрицательной дисперсией.

Наиболее распространенными устройствами для компенсации дисперсии ВОЛС являются:

- отрезки компенсирующего дисперсию волокна (DCF);
- устройства на основе брэгговских дифракционных решеток с изменяющимся периодом решетки;
- интерферометрические устройства.

Класс устройств, основанных на управлении пространственным распределением дисперсии волоконно-оптической линии связи для обеспечения нулевого суммарного значения дисперсии для всей линии, является наиболее удобным и находит наибольшее практическое применение.

Ко второму классу относятся устройства, использующие либо модуляцию передаваемого сигнала, либо специальную обработку сигналов на фотоприемнике для восстановления информации. Наиболее широко в этом классе применяются устройства компенсации дисперсии, основанные на внесении линейной частотной модуляции передаваемого сигнала (чирпировании сигнала), знак которой противоположен модуляции,

возникающей в ОВ. [20].

К классу нелинейно-оптических методов компенсации хроматической дисперсии относится инверсия спектра световых сигналов в середине линии связи. Принцип работы инверторов спектра основан на явлении обращения волнового фронта (ОВФ), которое заключается в преобразовании одной волны в другую с идентичным распределением амплитуды и фазы и с противоположным направлением распространения. ОВФ получают методом четырехволнового смешения [8]. В этом методе в нелинейной среде интерферируют четыре световых пучка. Три из них подаются извне: объектный пучок, который требуется обратить, и две опорные волны. Опорные пучки, распространяющиеся навстречу друг другу, имеют обычно плоский волновой фронт и одинаковую частоту, ту же, что и объектный пучок. Объектный пучок может направляться в среду с любого направления. Четвертый — генерируемый пучок — обращен по отношению к объектному. В результате прохождения устройства инверсии импульс сохраняет свою форму, но передний фронт становится длинноволновым, а задний фронт — коротковолновым. Инвертор устанавливается в середине линии связи, поэтому из-за дисперсии во второй половине линии восстанавливается первоначальная форма оптического импульса.

#### **4.1.1. Оптическое волокно, компенсирующее дисперсию**

Оптическое волокно с компенсацией дисперсии является основным компонентом при статическом подавлении хроматической дисперсии. Его отрицательная хроматическая дисперсия в несколько раз превышает положительную хроматическую дисперсию одномодового волокна. Добавление участка волокна с компенсацией дисперсии определенной длины компенсирует дисперсию линии передачи, обращая ее в ноль. Отрицательная дисперсия, как правило, обеспечивается уменьшением диаметра сердцевины и слабым волноводным распространением. К

сожалению, недостатком таких волокон со слабым каналированием света является увеличение затухания и потерь на изгибы.

Один из недостатков использования волокна DCF для компенсации дисперсии заключается в волновой зависимости хроматической дисперсии  $D(\lambda)$ . В линейном приближении эту зависимость описывает параметр  $S$  - наклон дисперсионной кривой. Компенсация дисперсии, например, статическим методом на одной длине волны приведет к неточной компенсации на других длинах волн в системах DWDM. [14].

Для количественного сравнения качества компенсации дисперсии часто используют понятие добротности компенсирующего волокна  $Q_{DCF}$  [7]. Добротностью компенсирующего волокна называется отношение абсолютного значения дисперсии, выраженного в пс/нм/км к затуханию, выраженному в дБ/км. Добротность не единственный показатель качества компенсирующего дисперсию волокна. Необходимо учитывать, в частности, насколько высока чувствительность к потерям на изгибах. Поэтому, при использовании значения добротности для сравнения различных видов оптических волокон нужно стремиться к тому, чтобы измерять добротность в тех условиях, в которых ОВ будет реально работать.

Оптические волокна DCF с высоким показателем добротности используются как дополнительные элементы линии связи, они увеличивают потери в линии, примерно, на 30%. Так, для пролета длиной 300 км может потребоваться около 50 км волокна с компенсацией дисперсии, при этом дополнительные потери мощности составят 18 дБ.

Для компенсации дисперсии применяется также новый тип ОВ, названного оптическим волокном с обратной дисперсией (RDF) (Рис. 4.2.). Волокно RDF обладает коэффициентом дисперсии примерно равным по величине и противоположным по знаку соответствующему параметру стандартного одномодового волокна. Измеренное значение потерь на изгиб в RDF волокне оказалось меньше, чем в стандартном ОВ.

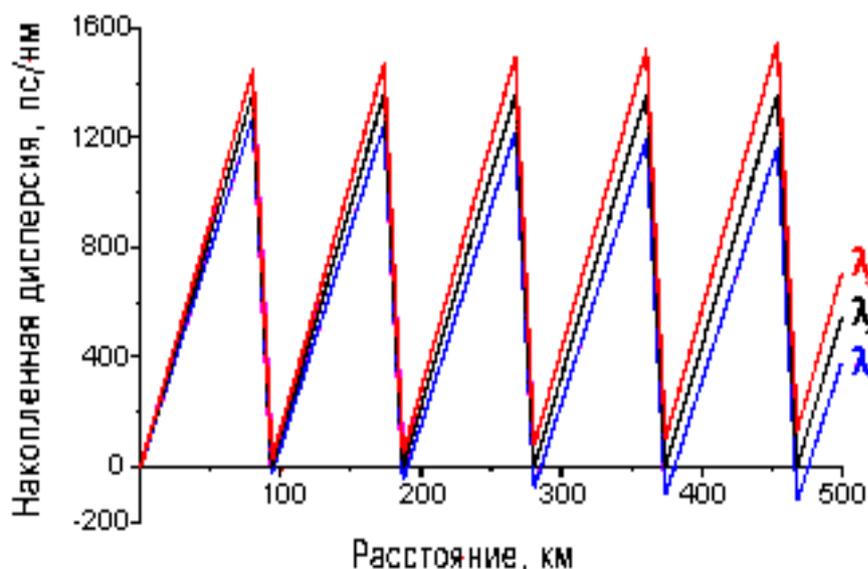


Рис. 4.2. Поведение накопленной дисперсии в линии (период 80 км SMF + DCF) с компенсацией дисперсии для одной длины волны.

Это позволяет изготавливать оптические кабели с RDF волокном. Кабель на основе RDF волокна соединяется с ОК на основе стандартного ОВ примерно той же длины. Дисперсионный коэффициент такого соединения не превышает  $\pm 0,5$  пс/нм/км в полосе длин волн 1530 нм - 1564 нм. Поскольку затухание RDF волокна 0,25 дБ/км при затухании стандартного волокна 0,2 дБ/км, среднее затухание в линии равно 0,225 дБ/км. Еще одним преимуществом RDF волокна является меньшая по сравнению с DCF нелинейность.

Рассмотренные выше различные типы компенсирующих дисперсию волокон позволяют достаточно хорошо компенсировать дисперсию и наклон дисперсионной зависимости стандартного оптического волокна (SMF). В настоящее время в большинстве модулей компенсации дисперсии используется DC волокно, т.к. такие модули не потребляют мощность, имеют малую стоимость и удобны в применении (обычно размещается на выходе оптического усилителя).

#### 4.1.2. Компенсаторы на основе брэгговских решеток с переменным периодом

Компенсаторы на основе брэгговских решеток с переменным периодом привлекают в последнее время большое внимание исследователей своими большими потенциальными возможностями. Волоконная брэгговская решетка FBG (fiber Bragg grating) - оптический элемент, основанный на периодическом изменении показателя преломления сердцевины или оболочки оптического волокна. Принцип работы компенсаторов на основе брэгговских решеток с переменным периодом поясняет рис. 4.3. Он основан на том, что компоненты с различной длиной волны отражаются от различных участков решетки и, таким образом, проходят различный путь. Решетки записываются (прочерчиваются) в волокне с использованием фоточувствительности определенных типов оптических волокон. Обычное кремниевое волокно при добавлении примеси германия становится чрезвычайно фоточувствительным. Подвергая это волокно воздействию ультрафиолетового света, можно вызвать изменения показателя преломления в сердцевине волокна. В таком волокне решетка может быть создана с помощью облучения волокна двумя интерферирующими ультрафиолетовыми пучками. Это заставляет интенсивность излучения изменяться периодически по длине волокна. Там, где интенсивность высокая, показатель преломления увеличивается, а где она мала, показатель остается без изменений [4].

Фазовый сдвиг в компенсаторах на волоконных решетках зависит от модуляции интервалов между зонами с повышенным показателем преломления в решетке. Если эти интервалы возрастают вдоль волоконной решетки, то длинноволновая часть сигнала проникнет глубже в решетку, прежде чем полностью отразится. Это приводит к задержке длинноволновых составляющих относительно коротких. Если расстояние между коротковолновой и длинноволновой частями решетки составляет

1 мм, то длинноволновые составляющие будут задержаны приблизительно на 10 пс.

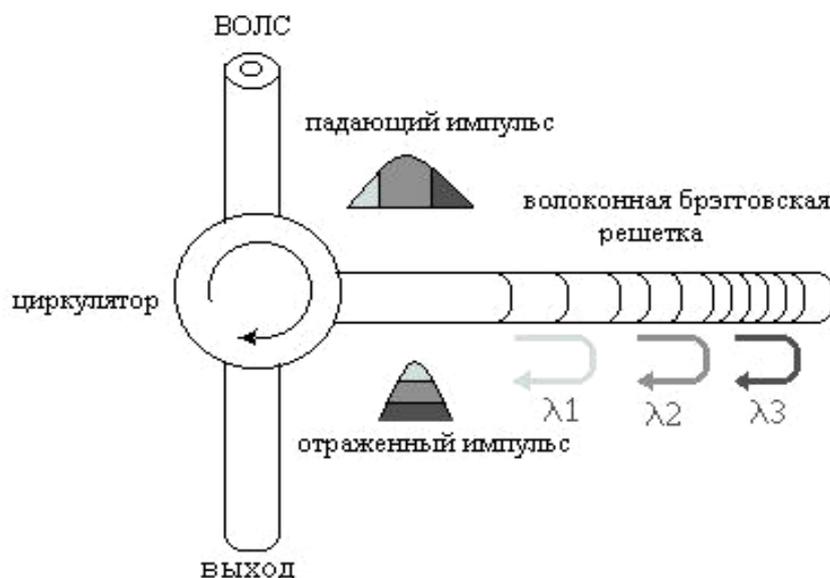


Рис. 4.3. Брэгговская решетка, предназначенная для компенсации дисперсии

Так как период решетки изменяется вдоль волокна, то и условия отражения для различных спектральных компонент выполняются на разных участках. Для компенсации положительной дисперсии стандартного одномодового волокна используются решетки, а которых коротковолновые составляющие световой волны отражаются в точке, расположенной дальше от начала устройства, чем точка, в которой отражаются длинноволновые составляющие. Тем самым коротковолновые составляющие задерживаются относительно длинноволновых составляющих.

В идеале желательно получить решетку, которая вносит большую дисперсию для широкого диапазона длин волн для применения в системах передачи WDM и DWDM. Максимальная задержка, которая может быть получена с помощью решетки, составляет 1 нс. Эта задержка соответствует произведению дисперсии, вносимой решеткой и длины волны, на которой

она возникает. Следовательно, можно получить решетки, которые вносят большую дисперсию для малых диапазонов волн, 1000 пс/нм в диапазоне 1 нм, или малую дисперсию в больших диапазонах волн, например, 100 пс/нм в диапазоне 10 нм. Заметим, что 100 км стандартного волокна вносят общую дисперсию 1700 пс/нм. Поэтому на практике для того, чтобы использовать решетки с линейно изменяющимся периодом для оптического волокна длиной несколько сотен километров, они должны быть очень узкодиапазонными, т.е. необходимо использовать разные решетки для различных длин волн.

Поэтому решетки с линейно изменяющейся постоянной идеально подходят для компенсации отдельных длин волн. Напротив, компенсирующее волокно (DCF) лучше подходит для компенсации широкого диапазона длин волн в системах WDM и DWDM. Однако, по сравнению с решетками с линейно изменяющейся постоянной, DCF вносят большие потери и дополнительные задержки из-за увеличивающихся нелинейностей.

Фазовый сдвиг, вызываемый волоконной решеткой, можно настраивать изменяя интервалы между зонами с повышенным показателем преломления, изменяя показатель преломления самого волокна и воздействуя на оба эти фактора одновременно. Действуя по отдельности, или одновременно, можно изменять положение точки отражения для конкретной длины волны в ОВ. Такие решетки с переменным периодом называются чирпированными.

Эти устройства могут быть компактными. Решетка длиной 5 см, в принципе, может компенсировать дисперсию в системе длиной 300 км с внешней модуляцией и скоростью передачи 10 Гбит/с.

Но FBG имеют и существенные недостатки:

- решетки изготавливаются фотоспособом из фоточувствительного ОВ, со временем под действием световых сигналов происходит нарушение решетки (размывание);

- у большинства компенсаторов на основе волоконных решеток имеется недостаток, заключающийся в том, что сигнал с компенсированной дисперсией отражается в обратном направлении, поэтому для отделения входа от выхода нужно использовать оптический циркулятор;
- для нормального функционирования устройства на основе FBG необходима стабилизация температурных условий, что увеличивает общую стоимость компенсатора.

#### **4.1.3. Компенсаторы хроматической дисперсии на основе планарных интерферометров и микро-оптических устройств**

Некоторые оптические интерферометры, в частности эталоны Фабри - Перо, Жире - Турнуа и Маха - Цендера, обладают дисперсионными характеристиками, которые могут быть использованы для компенсации дисперсии ВОЛС.

Фазовый фильтр (all - phase filter) идеально передает свет на всех длинах волн в своем рабочем диапазоне и может сдвигать фазы на определенных длинах волн. Два важных примера представлены эталонами и кольцевыми резонаторами [7].

В хорошо известном эталоне Фабри - Перо свет курсирует в резонаторе, ограниченном двумя полупрозрачными зеркалами. Резонанс наступает при условии, что в полный путь света между зеркалами туда обратно  $d$  укладывается целое число длин волн  $\lambda$  в среде с показателем преломления  $n$ , или  $2d = N\lambda/n$ . Такие резонансные длины волн задерживаются резонатором, что приводит к их фазовому сдвигу относительно других длин волн. Однако эталон Фабри - Перо не является правильным фазовым фильтром, так как свет может покинуть его из любого из двух зеркал.

Менее известный эталон конструкции Жире - Турнуа (Gires - Tournois) действует как фазовый фильтр, так как заднее зеркало является

полностью отражающим, и весь свет выходит из частично прозрачного переднего зеркала (см. рис. 4.4). Как и в эталоне Фабри-Перо резонансы возникают, когда полный путь света кратен целому числу длин волн. Свет на резонансных длинах волн испытывает фазовую задержку, проводя больше времени в резонансной полости в сравнении с другими длинами волн.



Рис. 4.4. Перестраиваемые оптические фазовые фильтры можно построить двумя способами: два фазовращателя помещают в кольцевой резонатор (слева), либо электростатическая - управляемая мембрана служит частично пропускающим зеркалом в эталоне Жире - Турнуа (справа).

Изменяя расстояние между зеркалами можно настроиться на условие резонанса и большую фазовую задержку. В одном из подходов подвижное переднее зеркало перемещается взад-вперед относительно полного отражателя. В качестве альтернативы используют температурную регулировку показателя преломления, что приводит к такому же эффекту фазового сдвига на резонансных длинах волн. Резонансные фазовые сдвиги не проявляются очень резко, а размазаны в некотором диапазоне длин волн (см. рис. 4.5).

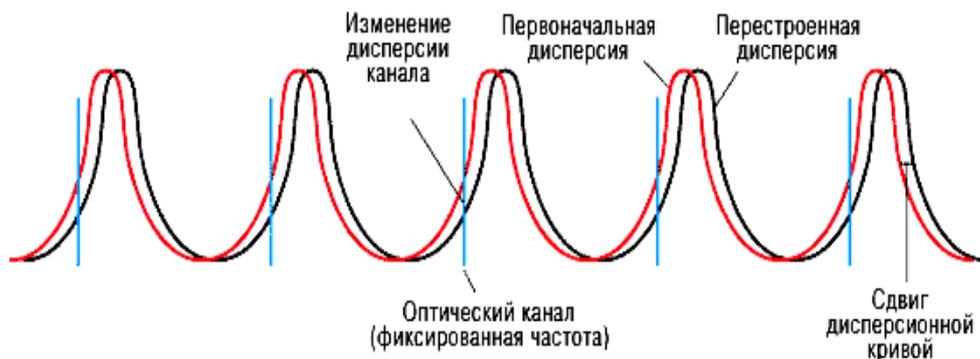


Рис. 4.5. Фазовая задержка в эталоне Жире-Турнуа меняется периодически

Конструкция эталона допускает возникновение нескольких резонансов на равноотстоящих длинах волн. Таким образом, сразу несколько рабочих каналов могут испытывать фазовую задержку, хотя данный метод не позволяет настраивать разные наклоны дисперсионной кривой.

Другой тип фазового фильтра с перестраиваемой фазовой задержкой в кольцевом резонаторе показан на рис. 4.4. В состав кольца входит пара термооптических фазовращателей, с помощью которых регулируют фазовую задержку и, следовательно, хроматическую дисперсию. (Кольцо с одним фазовращателем обеспечивает постоянную фазовую задержку.) Эта методика не разработана столь хорошо как фазовый фильтр на основе эталона, но допускает исполнение на базе интегральной оптики и обещает налаживание дешевого производства.

#### 4.1.4. Способы компенсации дисперсии, основанные на управлении передатчиком или приемником излучения

В большинстве способов компенсации дисперсии, основанных на управлении передатчиком, осуществляется частотная модуляция световых импульсов — чирпирование. Влияние предварительной частотной

модуляции на длительность светового импульса описывается выражением (3.3.19). Предварительное chirпирование передаваемого импульса в большинстве случаев создается внешней фазовой модуляцией. Для осуществления внешней фазовой модуляции могут использоваться любые фазовые модуляторы [7].

Простота реализации таких методов делает их привлекательными для применения в городских сетях связи, работающих при скорости передачи информации 2,5 и 10 Гб/с.

Устранить дисперсионное расширение сигналов на фотоприемнике удастся при использовании гетеродинного приема. В когерентном приемнике поступающие сигналы смешиваются гетеродином с опорным излучением; тем самым любые колебания фаз и амплитуды оптического сигнала передаются на электронную часть приемника.

## Глава 5. РАСЧЕТ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАГИСТРАЛЬНОЙ ВОЛОКОННО ОПТИЧЕСКОЙ ЛИНИИ СВЯЗИ

### 5.1. Паспортные технические данные приемопередающего оборудования и волоконно-оптического кабеля, используемые при расчетах дисперсии и затухания

В качестве приемопередающей аппаратуры предполагается использовать оборудование компании Huawei Technologies, а именно мультисервисную транспортную платформу OptiX 10G, необходимые технические характеристики которой приведены ниже.

При расчете брались худшие технические характеристики в связи с обеспечением теоретического расчета без допущений [Приложение].

Протяженность ВОЛС Ташкент - Ангрен:  $L = 80,394$  км;

Показатель преломления сердцевины:  $n = 1,467$ ;

Рабочая длина волны:  $\lambda = 1,55$  мкм;

Количество муфт (количество сростков):  $n_{нс} = 23$ ;

Километрическое затухание в ОВ:  $\alpha = 0,24$  дБ/км;

Количество разъёмных соединений:  $n_{рс} = 4$ ;

Потери на неразъёмных соединениях (сростках):  $A_{нс} = 0,05$  дБ;

Потери на разъёмных соединениях:  $A_{рс} = 0,2$  дБ;

Эксплуатационный запас для аппаратуры:  $A_{эза} = 3$  дБ;

Эксплуатационный запас для кабеля:  $A_{эзк} = 3$  дБ;

Мощность источника оптического излучения:  $P_{вых} = + 13$  дБм;

Чувствительность приемника:  $P_{фпр} = - 25$  дБм;

Диапазон длин волн с нулевой дисперсией: от  $\lambda_0 = 1301,5 \div 1321,5$  нм;

Максимальная величина крутизны нулевой дисперсии:  $S_0 = 0,092$

пс/(нм<sup>2</sup>·км);

Максимальная ширина спектра излучения источника:  $\Delta\lambda = 0,04$  нм;

Коэффициент поляризационной модовой дисперсии:  $D_{PMD} = 0,5$   
пс/км<sup>1/2</sup>.

Скорость передачи при STM-4  $B_0 = 622,08$  Мбит/с;

Скорость передачи при STM-64  $B_0 = 9953,28$  Мбит/с;

Начальная длительность импульса для STM-4  $\tau_0 = 401,88$  пс;

Начальная длительность импульса для STM-64  $\tau_0 = 25,13$  пс;

$A_{\text{эза}}$  и  $A_{\text{эзк}}$  берутся из технических условий (контрактных спецификаций) для оборудования ВОЛС.

## 5.2. Расчет дисперсии волоконно-оптической линии связи

При передаче сигналов по ВОЛС используются методы ИКМ, в результате чего передаваемая информация представляется в виде двоичных кодов - битов 1 и 0, причем 1 соответствует высокому уровню мощности, а 0 - низкому. Модулированный сигнал передается по ОВ импульсами с длительностью  $\tau_0$  и скоростью передачи  $B_0$  бит/с. В процессе распространения вследствие дисперсии происходит «размывание» импульсов, т.е. увеличение их длительности.

Если длительность  $\tau_L$  полученных приемником импульсов превысит битовый интервал, то произойдет наложение соседних импульсов друг на друга, что вызовет межсимвольную интерференцию. Следовательно, приемник не сможет распознать отдельные импульсы, и в результате этого увеличится коэффициент битовых ошибок BER. Битовый интервал  $T_0$  связан со скоростью передачи сигналов  $B_0$  соотношением:

$$T_0 = \frac{1}{B_0}. \quad (5.2.1)$$

Таким образом, для нормального функционирования ВОЛС необходимо:

- обеспечить длительность полученного импульса  $\tau_L$ , не превышающую исходный битовый интервал;
- обеспечить полученную мощность равную чувствительности приемника  $P_{фпр}$  или ввести запас, превышающий  $P_{фпр}$ .

Вот почему при проектировании ВОЛС с большей скоростью передачи важнейшими техническими характеристиками являются дисперсия и затухание ОВ.

### 5.2.1. Расчет поляризационной модовой дисперсии

Поляризационная модовая дисперсия рассчитывается из выражения (3.4.7):

$$\tau_{PMD} = D_{PMD} \cdot \sqrt{L} = 0,5 \cdot \sqrt{80,394} = 4,48 \text{ пс.}$$

### 5.2.2. Расчет хроматической дисперсии

Предельное значение коэффициента хроматической дисперсии с учетом диапазона длин волн нулевой дисперсии определяется из следующих выражений (см.ф. 3.2.16):

$$D_{\max}(\lambda) = S_0(\lambda - \lambda_{0\min}^4 / \lambda^3) / 4, \quad (5.2.2)$$

Отсюда,  $D_{\max}(\lambda) = 0,092 \cdot (1550 - (1301,5)^4 / 1550^3) / 4 = 17,92$  пс/(нм·км), что соответствует техническим характеристикам, взятым из паспорта волоконно-оптического кабеля, для длины волны  $\lambda = 1,55$  мкм [Приложение].

Отсюда можно рассчитать значение хроматической дисперсии:

$\tau_{chr\max}(\lambda) = D(\lambda) \cdot \Delta\lambda \cdot L = 17,92 \cdot 0,04 \cdot 80,394 = 57,63$  (пс), которое определяет увеличение длительности импульса (см. п. 3.2).

С учетом поляризационной модовой дисперсией результирующая дисперсия будет определяться из следующего выражения [5]:

$$\tau_{рез} = \sqrt{\tau_{chr}^2 + \tau_{PMD}^2} = \sqrt{(57,63)^2 + (4,48)^2} = 57,8 \text{ пс.}$$

Т.к. битовый интервал  $T_0 = \frac{1}{B_0}$  получим:

для STM-4:  $T_0 = 1607,5$  пс,

для STM-64:  $T_0 = 100,5$  пс.

Максимально допустимая величина уширения импульсов определяется из условия, что допустимая длительность импульса [9]:

$$\tau = \frac{T_0}{2}. \quad (5.2.3)$$

Следовательно, при скорости передачи  $B_0 = 622,08$  Мбит/с (STM-4) допустимая длительность импульса будет  $\tau = 824$  пс, а при скорости передачи  $B_0 = 9953,28$  Мбит/с –  $\tau = 50,25$  пс. Начальная длительность импульсов определяется из выражения [9]:

$$\tau_0 = \frac{T_0}{4}. \quad (5.2.4)$$

Конечная длительность импульса выражается через его начальную длительность  $\tau_0$  соотношением [5]:

$$\tau = \sqrt{\tau_0^2 + \tau_{рез}^2}. \quad (5.2.5)$$

Тогда длительность импульса, увеличенная за счет дисперсии, будет:

для STM-4:  $\tau = \sqrt{(401,88)^2 + (57,80)_{рез}^2} = 406,01$  пс,

для STM-64:  $\tau = \sqrt{(25,13)^2 + (57,80)_{рез}^2} = 63,01$  пс. Т.е. при скорости

передачи  $B_0 = 9953,08$  Мбит/с (STM-64), оптический импульс, уширенный вследствие дисперсии, превысит допустимую величину  $\tau = 50,25$  пс. Поэтому, чтобы по ВОК передавать сигналы STM-64, необходимо компенсировать хроматическую дисперсию в линии связи.

### 5.3. Расчет энергетического бюджета

Используя данные, затухание ВОЛС рассчитывается по формуле (3.1.4):

$$A = A_{нс} \cdot n_{нс} + \alpha \cdot L + A_{рс} \cdot n_{рс} = 0,05 \cdot 23 + 0,24 \cdot 80,394 + 0,2 \cdot 4 = \\ = 1,15 + 19,295 + 0,4 = 21,045(\text{дБ})$$

Следовательно, энергетический бюджет будет [формула 3.1.4]:

$$A_{эб} = P_{вых} - P_{фпр} - A_{эза} - A_{эзк} - A = + 13 - (- 25) - 3 - 3 - 21,045 = \\ = 10,955 (\text{дБм})$$

Полученное значение затухания волоконно-оптической линии находится в пределах допустимых значений, т.к. рассчитанный энергетический бюджет ( $A_{эб}$ ) получился положительным.

### 5.4. Расчет линии связи с учетом компенсации дисперсии

Модули для компенсации дисперсии должны удовлетворять ряду требований:

- малые потери;
- малые габариты и вес;
- малая потребляемая мощность;
- малая стоимость.

На сегодняшний день для компенсации дисперсии применяют два метода:

- основанный на использовании DC волокна;
- на основе FBG.

Учитывая достоинства и недостатки упомянутых методов (см. п. 4.1.1 и п. 4.1.2) фирмы, занимающиеся предоставлением услуг ВОС, предпочитают использовать модули компенсации с DCF.

Модули с DC волокнами удовлетворяют большинству требований, в частности не потребляют мощность и обладают небольшими габаритами и весом, и в основном используются в системах со скоростью передачи 10 Гбит/с (STM-64).

Компании Corning и Lucent Technologies в настоящее время являются основными производителями модулей с DC волокнами. В таблице 5.4 для сравнения показаны технические характеристики устройств, производимых этими компаниями [9].

Таблица 5.4. Параметры модулей с DCF для компенсации дисперсии.

Компания	Corning			Lucent Technologies		
	D CM-40	D CM-60	D CM-80	DK-40	DK-60	DK-60
Компенсируемая длина линии	40	60	80	40	60	80
Среднее значение PMD, пс	1,1	1,4	1,5	0,6	0,75	0,9
Вносимое затухание, дБ	5,0	6,8	8,6	5,2	7,0	7,9
Полная дисперсия, пс/нм	- 658	- 988	- 1317	- 680	- 1020	- 1360

В результате анализа приведенных данных автор дипломной работы сделала вывод, что для эффективной компенсации дисперсии в линии связи Ташкент-Ангрен необходимо использовать модуль DK-80 Lucent Technologies.

Физически модуль для компенсации дисперсии устанавливается в стойке приемопередающей аппаратуры, один компенсатор на одно оптическое волокно. Но из-за больших потерь, вносимых модулем, его нежелательно устанавливать на выходе оптического кабеля, т.к. это

приведет к уменьшению сигнала на входе в оптический усилитель, и, следовательно, к увеличению отношения сигнал/шум. [10].

На практике принято компенсировать дисперсию по всему линейному тракту после каждого оптического усилителя. Но так как в данной ВОЛС усилители входят в состав приемопередающей аппаратуры, то оптимальным является размещение модуля между оптическим усилителем передающего оборудования и оптическим кабелем.

Полная скомпенсированная дисперсия рассчитывается с учетом ранее полученных параметров и данных из таблицы 5.4.

Полная отрицательная дисперсия модуля компенсации:

$$\tau_{DC} = (-1360) \cdot 0,04 = -54,4 \text{ (пс)}.$$

Следовательно, полная скомпенсированная дисперсия в каждом ОВ линии связи будет [9]:

$$\tau_{резC} = \tau_{рез} + \tau_{DC} = 57,8 - 54,4 = 3,4 \text{ (пс)}.$$

В результате, конечная длительность импульса на выходе оптического кабеля при скорости передачи  $B_0 = 9953,28$  Мбит/с (STM-64) будет:

$$\tau_C = \sqrt{(25,125)^2 + (3,4)^2} = 25,35 \text{ (пс)},$$

что намного меньше допустимого значения.

Поскольку компенсатор дисперсии вносит дополнительные достаточно большие потери, необходимо рассчитать энергетический бюджет с учетом этих потерь:

$$A_{эб} = P_{вых} - P_{фпр} - A_{эза} - A_{эзк} - A - A_{DC} = + 13 - (- 25) - 3 - 3 - 21,045 - 7,9 = 3,055 \text{ (дБ)},$$

где  $A_{DC}$  – потери, вносимые модулем компенсации дисперсии.

Таким образом, из полученных значений параметров можно заключить, что после компенсации дисперсии энергетический бюджет остается положительным, а конечная длительность импульса находится в

допустимых пределах. Следовательно, передача информации со скоростью 10 Гбит/с на данной ВОЛС становится осуществимой.

## ***ЗАКЛЮЧЕНИЕ***

В данной магистерской диссертационной работе перед исполнителем поставлены задачи, для решения которых были изучены следующие вопросы:

1. Основы теории волоконной - оптических линий связи, параметры оптического волокна и его конструкция. Конструкция волоконно-оптического кабеля, его технические характеристики.
2. Основные принципы цифровой системы передачи STM - 64, основы синхронной цифровой иерархии и методы мультиплексирования информационных потоков.
3. Процессы, происходящие при распространении света в оптическом волокне. Их влияние на скорость и дальность передачи информационных сигналов.
4. Обзор методов компенсации хроматической дисперсии.

В ходе работы над диссертационной работой из предварительных расчетов было обнаружено, что по эксплуатируемому в настоящий момент ВОК невозможна передача информации со скоростью 9953,28 Мбит/с (STM-64) из-за значительного уширения оптических импульсов вследствие хроматической дисперсии на выходе оптического волокна. Для решения образовавшейся проблемы автором работы была предложена компенсация дисперсии специальным устройством (модулем компенсации дисперсии). Было произведено сравнение возможных методов компенсации дисперсии, и на основании соответствующих технических характеристик из предлагаемых на сегодняшний момент модулей был выбран наиболее эффективный.

С учетом компенсации дисперсии были проведены повторные расчеты. На основе полученных результатов исполнитель диссертационной работы сделала вывод, что после компенсации дисперсии

технические характеристики данного ВОК полностью удовлетворяют требованиям цифровой системы передачи STM-64 по дисперсии и затуханию.

Таким образом, согласно полученным результатам автор диссертационной работы заключил, что по волоконно-оптическому кабелю, входящему в состав реконструируемой ВОЛС Ташкент-Ангрен возможна передача сигнала STM-64 (9953,28 Мбит/с), но для этого необходима установка приемопередающего оборудования Optix 10G фирмы Huawei Technologies и применение для компенсации дисперсии модуля DK-80 Lucent Technologies.

## *Список литературы*

4. Слепов Н.Н. Синхронные цифровые сети SDH. – М., 1997.
5. Рекомендации ITU-T Rec. G.707.
6. <http://kunegin.narod.ru>.
7. <http://optictelecom.ru>.
8. Иванов А.Б. Волоконная оптика: компоненты, системы передачи, измерения. – М.: Компания САЙРУС СИСТЕМС, 1999.
9. G.P.Agraval. Fiber-optic communication systems. – 2<sup>nd</sup> ed., John Wiley&Sons, Inc., 1997.
10. Г.П.Агравал. Нелинейная волоконная оптика. – М., Мир, 1996.
11. Зельдович Б.Я., Шкунов В.В. Обращение волнового фронта. – В мире науки, 1992.
12. Листвин А.В., Листвин В.Н., Швырков Д.В. Оптические волокна для линий связи. – Вэлком, 2002.
13. Приложение – технические данные на ВОК.
14. В. В. Виноградов, В. К. Котов, В. Н. Нуприк. Волоконно-оптические линии связи. - М., 2002.
15. Требования к оптическим волокнам связи с развитием 100 Гбит/с систем передачи / С. Тен [и др.] // Фотон-экспресс. № 7. 2010.
16. Технология строительства ВОЛП: Учебное пособие для ВУЗов / В. А. Андреев [и др.] / под ред. В. А. Андреева. Самара, СРТГЦ ПГАТИ, 2006.
17. Гордиенко В. Н., Тверецкий М. С. Многоканальные телекоммуникационные системы. М.: Горячая линия-Телеком, 2007
18. Снайдер А., Лав Дж. Теория оптических волноводов. М.: Радио и связь, 1987.
19. Волоконно-оптические системы передачи: вопросы оценки работоспособности / А. Х. Султанов [и др]. М.: Радио и связь, 2005. 372 с.

20. Убайдуллаев Р.Р. Волоконно-оптические сети. Эко-Трендз, М.: 2000. 267 с.
21. Унгер Х.-Г. Планарные и волоконные оптические волноводы. М.:Мир. 1977. 656 с.
22. Виноградова И. Л. Моделирование процессов в многоканальных волоконно-оптических сетях и их компонентах на основе алгебраических объектов матричного типа: Дис... д-ра техн. наук: 05.13.18. – Защищена 19.12.2009; Утв. 25.05.2010. Уфа, 2009.
23. Optical Fiber Telecommunications, Vol. IVA,B, ed. By I.P. Kaminow and Li Tingye, Academic Press, 2002.
24. Махсус фанларни ўқитиш методикаси фанидан амалий дарслар учун вазифалар тайёрлаш. Татқиқотчи: магистрант: Ибрагимов К.Б., илмий рахбар: д.т.н. проф. Шипулин Ю. Г. « Илмий-педагогик ишларининг долзарб муоммолари ». Магистратура талабалари, ёш олимларнинг институтлараро ўн биринчи илмий-услубий конференцияси материаллари.(25 ноябрь) 2014 йил.
25. Обоснование реконструкции магистральной волоконно-оптической линии связи . Татқиқотчи: магистрант: Ибрагимов К.Б., илмий рахбар: д.т.н. проф. Шипулин Ю. Г. « Фан ва техника тараққиётида интеллектуал ёшларнинг ўрни » Республика илмий анжумани. Марузалар тўплами II-қисим 2015 йил.
26. Основные сведения о волоконно-оптической линии связи Татқиқотчи: магистрант: Ибрагимов К.Б., илмий рахбар: д.т.н. проф. Шипулин Ю. Г. « Ёш илмий татқиқотчи » бакалавриат ва магистратура талабаларининг, стажёр-изланувчи-татқиқотчиларнинг XIII-институтлараро илмий- амалий конференцияси материаллари (7-8 ноябрь) 2015 йил.

# **приложение**

## *Список принятых сокращений*

ВОЛС – волоконно-оптическая линия связи

ВОСП – волоконно-оптическая система передачи

ВОК – волоконно-оптический кабель

ОК – оптический кабель

ОВ – оптическое волокно

SDH – (Synchronous Digital Hierarchy) синхронная цифровая иерархия

DWDM – (Dense Wavelength Division Multiplexing) сверхплотное волновое мультиплексирование по длине волны

ЦСП – цифровая система передачи

STM-4 – (Synchronous Transport Module) синхронный транспортный модуль уровня 4, соответствующий скорости передачи информации 622,08 Мбит/с

STM-64 – (Synchronous Transport Module) синхронный транспортный модуль уровня 64, соответствующий скорости передачи информации 9953,28 Мбит/с

TDM – (Time Division Multiplexing) временное мультиплексирование информационных потоков

SOP – (State of Polarization) ортогонально поляризованные составляющие электрического поля или состояния поляризации

DGD – (Differential Group Delay) дифференциальная групповая задержка

PSP – (Principal State of Polarization) состояния поляризации, задающие самое быстрое и самое медленное распространение сигнала, называются быстрым и медленным главными состояниями поляризации

PMD – (Polarization Mode) поляризационная модовая дисперсия

DCF – (Dispersion Compesating Fiber) компенсирующее дисперсию ВОЛОКНО

FBG – (Fiber Bragg Grating) волоконная брэгговская решетка - оптический элемент, основанный на периодическом изменении показателя преломления сердцевины или оболочки оптического волокна