

Министерство науки и высшего образования  
Российской Федерации

Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники

А. Е. Мандель

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ  
В ОПТИЧЕСКИХ  
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ  
СИСТЕМАХ

Учебное пособие

Томск  
Издательство ТУСУРа  
2020

УДК 621.391.63(075.8)  
ББК 32.886я73  
М231

**Рецензенты:**

**Тихомиров А.А.**, д-р техн. наук, проф., гл. науч. сотр. Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН;

**Коханенко А.П.**, д-р физ.-мат. наук, проф. радиофизического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета

**Мандель, Аркадий Евсеевич**

М231 Методы и средства измерения в оптических телекоммуникационных системах: учеб. пособие / А. Е. Мандель. – Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2020. – 130 с.  
ISBN 978-5-86889-902-7

Современные волоконно-оптические системы передачи требуют сложной процедуры измерений при их прокладке, настройке и техническом обслуживании, применения большого количества разнообразных средств измерений. В настоящем пособии приводится систематизированный материал по методам и средствам измерения основных параметров волоконно-оптических систем передачи, их отдельных волоконно-оптических и оптоэлектронных компонентов.

Для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки бакалавров и магистров 11.03.02 и 11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи».

УДК 621.391.63(075.8)  
ББК 32.886я73

ISBN 978-5-86889-902-7

© Мандель А. Е., 2020

© Томск. гос. ун-т систем упр.  
и радиоэлектроники, 2020

## Предисловие

В настоящее время интенсивное развитие оптических телекоммуникационных систем является одним из основных направлений научно-технического прогресса. Волоконно-оптические системы связи обеспечивают доставку чрезвычайно большого объема информации с наивысшей скоростью на значительные расстояния, являются основой развития единой цифровой сети интегрированного обслуживания (телефонной и телеграфной связи, телевидения, передачи данных и т. д.).

Современные волоконно-оптические телекоммуникационные системы требуют сложной процедуры измерений при их прокладке, настройке и техническом обслуживании, применения большого количества разнообразных средств измерений, в том числе узкоспециализированных. В настоящем пособии приводится систематизированный материал по методам и средствам измерения основных параметров волоконно-оптических телекоммуникационных систем, их отдельных волоконно-оптических и оптоэлектронных компонентов.

Поскольку книга является учебным пособием, а не монографией, автор использовал материалы, уже опубликованные в учебной, методической и периодической литературе. Эти материалы включены в список литературы [1–25], который позволит желающим глубже изучить интересующие их вопросы.

В последнем разделе пособия приведены тестовые задания по изучаемому материалу. С помощью тестов учащиеся могут оценить степень его усвоения, найти свои слабые места и исправить свои ошибки.

Пособие предназначено для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки бакалавров и магистров 11.03.02 и 11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи».

# 1 КЛАССИФИКАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЙ ВОЛОКОННОЙ ОПТИКИ

---

## 1.1 Основные понятия и определения

Рассмотрим основные понятия и определения системы метрологического обеспечения в телекоммуникациях.

**Физическая величина** – одно из фундаментальных научных понятий – определяет в количественном и качественном отношении свойство физических объектов или физических систем. Следует различать истинное и действительное значение физической величины. Первое идеальным образом отражает в качественном и количественном отношении свойство объекта. Второе находится экспериментальным путем и настолько близко к истинному, что для поставленной измерительной задачи может его заменить. В телекоммуникациях передача информации осуществляется посредством сигналов, распространяющихся в оптической среде. Поэтому в дальнейшем под физической величиной будем подразумевать как физические величины, определяющие среду распространения, так и сигналы, распространяющиеся в той или иной форме в оптической среде.

**Измерение** – определение опытным путем с помощью специальных технических средств значений физических величин, параметров или характеристик устройств. Измерения бывают прямые и косвенные, абсолютные и относительные.

Прямым называется измерение, при котором искомое значение физической величины находят непосредственно из опытных данных. Уравнение прямого измерения:

$$y = cx,$$

где  $y$  – значение измеряемой величины в принятых для нее единицах;  $x$  – отсчет по измерительному устройству в делениях шкалы или непосредственный отсчет по цифровому отсчетному устройству;  $c$  – цена деления шкалы или единичного показания цифрового отсчетного устройства.

Косвенным называется измерение, при котором искомое значение величины  $z$  находят на основании известной зависимости между этой величиной и величинами, определяемыми прямыми измерениями. Уравнение косвенного измерения имеет вид:

$$z = f(x, y, a, b, \dots),$$

где  $x, y$  – измеряемые величины;  $a, b, \dots$  – физические константы и постоянные измерительного устройства.

Абсолютным называется измерение, результат которого есть значение измеряемой величины в единицах принятой системы. Например, измерение мощности светового пучка – в ваттах, энергии светового импульса – в джоулях.

Относительными измерениями называется количественное сравнение двух однородных величин. Это позволяет установить, насколько или во сколько раз одна величина больше или меньше другой.

Значение физической величины, полученное путем ее измерения, называется **результатом измерения**. Основной характеристикой результата измерения является точность. Точность измерения определяется таким понятием, как **погрешность измерения** – отклонение результата измерения от действительного значения измеряемой величины. Погрешность измерения обусловлена погрешностью средства измерения и методики измерения.

В ряде случаев для количественного определения числового значения дискретной величины, независимо от параметров этой величины, используется термин **счет**. Результатом счета является неименованное число.

**Принципом измерения** называется совокупность физических явлений, на которых основаны измерения. Например, при измерении энергии импульса светового излучения в основу могут быть положены различные принципы измерения: тепловой, фотоэлектрический, пьезомоторный и т. д.

**Методом измерения** называется прием или совокупность приемов сравнения измеряемой физической величины с ее единицей в соответствии с принципом, положенным в основу измерения. Методы измерения осуществляются средствами измерения.

**Средствами измерения** называются технические средства, используемые при измерениях и имеющие нормированные метрологические свойства.

Другим понятием, часто используемым совместно с понятием **измерение**, является **контроль**. Контролем будем считать процесс установления соответствия между состоянием или свойствами объекта (или процесса) и заданной нормой. (Под нормой будем понимать область в пространстве состояний физического объекта или процесса). Результатом контроля является качественная характеристика – вывод о нахождении объекта контроля вне нормы или в норме. Контроль может быть аудио, визуальный или осуществляться с помощью технических средств устройством или системой контроля. Измерения и контроль имеют ряд различий:

1) результатом измерения является количественная характеристика объекта; результатом контроля – качественная;

2) измерение осуществляется в широком диапазоне измеряемой величины; контроль выполняется в ограниченной области состояний контролируемого параметра;

3) основной характеристикой измерения является погрешность измерения; основной характеристикой процесса контроля – достоверность результата контроля (т. е. соответствие или несоответствие значения контролируемой величины заданной норме).

В телекоммуникациях наряду с понятиями «измерение» и «контроль» используется понятие «**тестирование**». Тестированием называется процесс установления опытным путем соответствия между состоянием или свойством физической величины и заданной нормой, осуществляемый с помощью технических средств, хранящих единицу или множество единиц этой физической величины. Результат тестирования показывает соответствие или несоответствие физической величины заданной норме. Основной характеристикой тестирования является достоверность тестирования, которая из-за наличия процедуры измерения определяется таким понятием, как погрешность тестирования.

Особое место в области контроля в телекоммуникациях занимает понятие «**анализ протоколов**» передачи данных. Под протоколом понимается набор правил или стандартов, которые

упорядочивают соединение и обмен информацией в телекоммуникациях, сводя к минимуму ошибки. В системах связи правила и стандарты закодированы соответствующими сигналами или их комбинациями, поэтому анализ протоколов можно рассматривать как операции над физическими величинами, а именно кодовыми сигналами, с помощью специальных технических средств. Результат анализа протоколов является качественной характеристикой и выражен в виде: соответствует или не соответствует норме обмен информационными сигналами в процессе соединения при передаче данных в системе связи. Основной характеристикой анализа протоколов является достоверность анализа, которая из-за наличия измерительных процедур определяется понятием «ошибка анализа».

## **1.2 Виды контроля физических величин волоконно-оптических систем передачи**

Весь спектр контроля в телекоммуникациях включает в себя измерение, тестирование, анализ протоколов. Эти операции осуществляются над физическими величинами, такими как механические, акустические, электрические, магнитные, оптические и другие. При этом все виды контроля в волоконно-оптических системах передачи (ВОСП) можно разделить на две группы:

1) прямой контроль, который выполняется в единицах контролируемой физической величины;

2) косвенный контроль, который выполняется на основе прямого контроля физических величин, связанных с искомой физической величиной функциональной зависимостью.

Как прямой, так и косвенный контроль может осуществляться для одной или множества аналоговых, дискретных и кодированных величин. В обоих случаях результатом контроля будет соответствие контролируемой величины установленным нормам или равнозначности заданной норме.

С временной точки зрения контроль может осуществляться одновременно или разновремененно, причем разновремененно с последовательной, параллельной или случайной последовательностью выбора контролируемых физических величин.

Следует различать и пространственный фактор контроля. С этой точки зрения контроль может быть односторонним, двусторонним или многосторонним.

Для контроля функционирования ВОСП могут быть использованы образцовые внешние сигналы, например, сигналы генераторов. В этом случае контроль называется активным контролем. В случае отсутствия внешних воздействий контроль называют пассивным.

По режиму выполнения контроля следует различать ручной, автоматический, автоматизированный режимы контроля. Первый осуществляется только техническим персоналом, второй – при частичном участии персонала, третий – без участия персонала.

При организации контроля само контролирующее оборудование может быть расположено непосредственно у объекта или удалено от него на некоторое расстояние. Поэтому различают локальный и дистанционный контроль. Частным случаем дистанционного контроля является централизованный контроль, при котором управление процессом и получение результатов контроля сосредоточено в одном месте.

Контроль может осуществляться по одной или множеству величин. С этой точки зрения различают элементарный и комплексный контроль. Эти виды контроля различаются числом используемых технических средств и методиками измерения, счета, тестирования и анализа протоколов.

### **1.3 Основные контрольно-измерительные операции волоконно-оптических систем передачи**

Контроль в телекоммуникациях включает процедуры измерений и тестирования, которые совместно используются при технологическом контроле и эксплуатационных испытаниях.

С целью установления соответствия контролируемых параметров ожидаемым или допустимым значениям в телекоммуникациях могут выполняться следующие контрольно-измерительные операции:



1) настроечные (инсталляционные) измерения. Производятся при первоначальной настройке каналов и трактов. Целью этих измерений является контроль на соответствие настроечным нормам. Настроечные измерения выполняются строго последовательно. Эта последовательность определяется взаимозависимостью работы настраиваемого оборудования;

2) приемо-сдаточные измерения. Их назначение заключается в полном объеме измерений на соответствие установочным нормам. Результат измерений отражается в техническом паспорте;

3) профилактические измерения. Выполняются в процессе эксплуатации системы передачи на соответствие эксплуатационным нормам;

4) внеплановые измерения. Являются составной частью ремонтно-восстановительных работ. На заключительном этапе могут входить как в настроечные, так и в приемо-сдаточные измерения.

Под настроечными и эксплуатационными нормами здесь понимаются те значения параметров и характеристик системы передачи, при которых система обеспечивает требуемое качество работы. В процессе эксплуатации системы качество ее функционирования снижается из-за дестабилизирующих факторов (например, изменяются потери в оптоволокне). Поэтому эксплуатационные нормы, как правило, менее жесткие, чем установочные, но должны соответствовать удовлетворяющему качеству связи в любое время между профилактическими настройками. Установочные нормы наиболее жесткие и определяются как минимальные отклонения параметров и характеристик оборудования, каналов и трактов системы передачи от номинальных значений, регламентируемых соответствующими стандартами.

## **1.4 Основные виды измерений волоконной оптики**

Весь спектр измерений в ВОСП можно условно разделить на два основных типа:

1) аппаратурные измерения;

2) системные измерения.

Аппаратурные измерения проводятся для отдельных элементов ВОСП: оптического волокна, приемного и передающего модулей, оптических усилителей. Примерами аппаратурных измерений являются измерения затухания в оптическом волокне, дисперсии, числовой апертуры и т. п.

Системные измерения связаны с определением способности ВОСП функционировать в целом как системы и включают измерение таких характеристик ВОСП, как непрерывность волокна, энергетический потенциал линии связи, коэффициент ошибок (BER), дрейф и дрожание фазы, и т. п.

#### **1.4.1 Измеряемые параметры оптического волокна**

В ВОСП используются многомодовые и одномодовые оптические волокна. В системах передачи на основе многомодовых волокон наиболее важными измеряемыми параметрами оптического волокна являются следующие:

- **Затухание оптического волокна** – параметр, характеризующий ослабление мощности оптического сигнала при его распространении в волокне, обусловленное поглощением в материале сердцевины и рассеянием излучения на неоднородностях материала;

- **Дисперсия** – технический термин для обозначения расширения светового импульса при его распространении в волокне (сужения полосы пропускания) вследствие рассеивания во времени спектральных или модовых составляющих оптического сигнала;

- **Числовая апертура** – один из важнейших измеряемых оптико-геометрических параметров волокна, определяющий значение оптической мощности, которое можно ввести в волокно;

- **Диаметр сердцевины** – параметр, наряду с числовой апертурой, определяющий значение оптической мощности, которое можно ввести в многомодовое волокно. Данный параметр в обязательном порядке измеряется в процессе производства оптических кабелей и всегда может быть получен у изготовителя. Наиболее характерные размеры многомодовых волокон (стандар-

тизованное соотношение диаметров сердцевины и оболочки, принятое в большинстве стран и в нашей стране) в микрометрах: 50/125, 80/125, 90/125, 100/140, 100/200, 100/250, 125/200, 200/230, 200/250, 250/375.

В системах передачи на основе одномодовых волокон измерению подлежат параметры, аналогичные рассмотренным выше для многомодовых волокон: затухание оптического волокна, дисперсия, числовая апертура. Необходимо отметить, что измерения затухания в одномодовом волокне проще, чем в многомодовом. По меньшей мере один фактор, влияющий на воспроизводимость результатов измерений, – наличие многих мод, каждая из которых имеет собственную характеристику ослабления, отсутствует. Полоса пропускания одномодовых волокон в свою очередь зависит в основном от хроматической дисперсии, поэтому для ее определения влияние модовой дисперсии можно не принимать в расчет.

Наряду с вышеуказанными, в ВОСП на основе одномодовых световодов измерению дополнительно подлежат параметры, свойственные только одномодовым оптическим волокнам:

- **Длина волны отсечки** – параметр одномодового волокна, определяющий самую низкую длину волны, которую следует использовать, если особую важность имеет полоса пропускания. Ниже длины волны отсечки будет распространяться большее количество мод;

- **Диаметр модового пятна** – параметр, характеризующий распределение интенсивности светового поля в поперечном сечении на выходе волокна;

- **Поляризационная модовая дисперсия** – параметр, характеризующий расширения светового импульса при его распространении в волокне. Проявляется в одномодовых волокнах и обусловлен нециркулярностью (эллиптичностью) сердцевины и анизотропией, вызванной наведенными механическими напряжениями.

### 1.4.2 Основные измеряемые параметры и характеристики источников оптического излучения

Излучатели предназначены для преобразования электрического входного сигнала в выходной оптический. Известны два основных класса излучателей, пригодных для использования в технике оптической связи: светодиоды (СД) и полупроводниковые лазеры, или лазерные диоды (ЛД).

Светодиоды изготавливают в основном по арсенид-галлиевой технологии. Они генерируют некогерентное излучение, используемое для работы преимущественно по многомодовому волокну на длинах волн  $\lambda = 850$  нм и 1300 нм. Типовая выходная мощность СД приблизительно 1 мВт, ширина спектра излучения, измеренная в точках спектра с половинной мощностью, составляет 20–80 нм. У светодиодов достаточно широкая апертура излучения, что ведет к значительным потерям при вводе света в оптическое волокно – до (10–17) дБ. Быстродействие СД невысоко, полоса частот модуляции не превышает 1 МГц. СД характеризуется почти линейной зависимостью мощности излучения от тока возбуждения (рисунок 1.1).

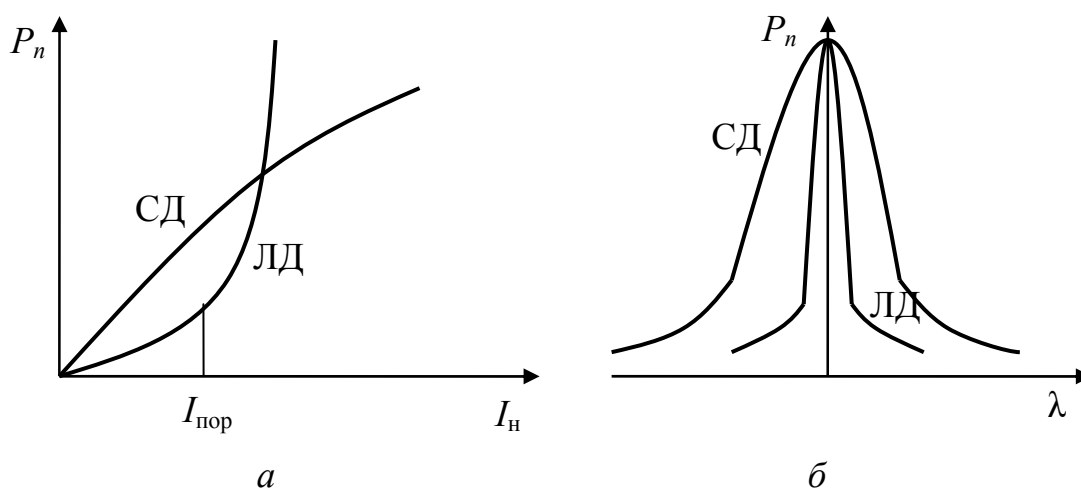


Рисунок 1.1 – Энергетические (а) и спектральные (б) характеристики полупроводникового лазера и светодиода

Принципиальным отличием лазерных диодов от СД является наличие в них встроенного оптического резонатора. Полупроводниковый лазер, в отличие от светодиода, генерирует близкое к

монохроматическому излучению со спектральной шириной 1–5 нм, работает на длинах волн  $\lambda = 1300$  нм,  $\lambda = 1550$  нм и используется для передачи информации по одномодовому кабелю. Меньшая ширина спектральной характеристики ведет к снижению дисперсионных искажений передаваемого сигнала. Быстродействие современных лазеров позволяет модулировать их с частотой до 10 ГГц и выше. Типовая выходная мощность излучения составляет ~5 мВт. Диаграмма направленности полупроводникового излучателя при работе в лазерном режиме имеет меньшую ширину, чем у светодиодов, что при прочих равных условиях позволяет ввести в волокно большую мощность. Потери на ввод излучения ЛД обычно не превышают 2–5 дБ. Зависимость мощности излучения от тока накачки у лазеров имеет ярко выраженный пороговый характер (см. рисунок 1.1).

При создании лазерных передатчиков приходится решать ряд сложных инженерных задач, обусловленных следующими особенностями лазера:

- для уменьшения времени задержки и, следовательно, увеличения быстродействия лазерного передатчика рабочая точка в состоянии покоя должна находиться вблизи излома энергетической характеристики;
- величина порогового тока, при котором начинается лазерная генерация, сильно зависит от температуры кристалла излучателя и возрастает с течением времени из-за эффектов его старения;
- большая крутизна энергетической характеристики при токах, превышающих пороговое значение, в сочетании с низкой стойкостью лазера к перегрузкам требует контроля выходной мощности излучения.

Все это приводит к необходимости применения в электронных схемах лазерных передатчиков сложных цепей регулирования и стабилизации с использованием мониторингового фотодиода, что существенно усложняет передающий лазерный оптоэлектронный модуль по сравнению со светодиодным.

При использовании светодиодов и полупроводниковых лазеров в системах передачи основными параметрами и характери-

стиками, источников излучения, подлежащих измерению, являются [5, 10, 12]:

- **ватт-амперная характеристика** – зависимость выходной мощности излучения от тока накачки. По измерениям этой характеристики может быть определен коэффициент передачи (отношение мощности светового излучения к протекающему через диод току) и оценена нелинейность преобразования;

- **полоса частот модуляции.** Эти измерения позволяют оценить быстродействие источников излучения;

- **центральная длина волны и ширина спектра излучения.** Эти параметры определяются по спектральному распределению мощности излучения. Результаты этих измерений важны, поскольку позволяют оценить влияние дисперсии на передачу световых импульсов;

- **размер излучающей области и пространственное распределение мощности.** Эти два параметра необходимы для обеспечения эффективности соединения источника излучения с оптическим волокном.

### **1.4.3 Основные измеряемые параметры и характеристики фотоприемных устройств**

Фотоприемное устройство (ФПУ) является составной частью линейного тракта ВОСП. Оно входит в состав оконечных и промежуточных обслуживаемых и необслуживаемых пунктов линии связи. В фотоприемном устройстве происходит преобразование оптического сигнала в электрический сигнал и его усиление. При необходимости в ФПУ могут быть включены схемы обработки сигнала, позволяющие получить параметры сигнала, при которых аппаратура, подключенная к выходу ФПУ, может нормально функционировать.

Типичная функциональная схема фотоприемного устройства с прямым детектированием приведена на рисунке 1.2. Оптический соединитель осуществляет ввод излучения в ФПУ и согласование с приемником излучения. Преобразование оптического сигнала в электрический в ФПУ осуществляется фотоэлектрическим полупроводниковым приемником излучения. Усиление, необходимое

для восстановления уровня сигнала и достижения максимально возможного при данных условиях отношения сигнала к шуму, обеспечивают усилители, входящие в состав ФПУ. После усилителя сигнал поступает в схему цифровой обработки (в цифровых ВОСП) или к потребителю информации (в аналоговых ВОСП).



Рисунок 1.2 – Схема фотоприемного устройства

Из множества фотоприемных преобразователей излучения наибольшее распространение в ВОСП получили быстродействующие  $p-i-n$ -фотодиоды и лавинные фотодиоды (ЛФД). Они хорошо стыкуются со световодом, имеют высокую квантовую эффективность, позволяют получать малое время фотоотклика. Спектральный диапазон приборов, в основном, определяется материалом. Для изготовления фотодиодов  $p-i-n$ -структуры наиболее часто используемым материалом в области близкой к инфракрасной (850 нм) является Si. Фотодиоды  $p-i-n$ -структуры на длину волны, превышающую 1 мкм, выполняют из Ge, InGaAs и InGaAsP. ЛФД изготавливают на основе Si, InGaAs, InGaAsP. Структура ЛФД совмещает в себе свойства  $p-i-n$  и обычного лавинного диода, позволяя получать значительное усиление фототока при сохранении высокой квантовой эффективности и быстродействия. По сравнению с  $p-i-n$ -фотодиодом ЛФД позволяет выиграть в пороге чувствительности, работает в меньшем диапазоне температур, но требует повышенного напряжения питания. При использовании ЛФД в качестве фотодетектора можно изменять подаваемое на него напряжение обратного смещения и таким путем регулировать коэффициент лавинного умножения

(усиления) фотодиода. Это позволяет существенно расширить динамический диапазон ФПУ, но требует наличия блока автоматической регулировки усиления (АРУ). Лавинные фотодиоды, за счет эффекта внутреннего умножения имеющие на порядок более высокую чувствительность, чем *p-i-n*-диоды, находят применение в линиях связи большой протяженности. В локальных системах высокая чувствительность является излишней, и оптические приемники аппаратуры построены в основном на *p-i-n*-диодах.

Фотоприемное устройство, имеющее единое конструктивное оформление, называется приемным оптическим модулем (ПРОМ). Модули бывают аналоговыми и цифровыми. Аналоговые модули, как правило, не содержат схем обработки сигнала и состоят из оптического соединителя, фотоприемника, предварительного усилителя и схемы стабилизации режимов приемника. Цифровые модули включают в себя декодирующие устройства или преобразователи кодов. ФПУ при этом может быть составлено из набора специализированных блоков, часть из которых, или все, являются унифицированными. В настоящее время промышленность выпускает приемные оптические модули различной степени интеграции.

Основными метрологическими параметрами приемников излучения являются чувствительность, уровень собственных шумов, пороговая мощность, соотношение сигнал/шум.

**Чувствительность фотоприемника** представляет собой отношение изменения уровня электрического сигнала на выходе приемника, вызванного падающим на него излучением, к количественной характеристике этого излучения, представленной любой энергетической или фотометрической величиной. Чувствительность, таким образом, – это свойство фотоприемника вырабатывать электрический сигнал определенной величины под действием падающего на него потока излучения. Необходимо отметить, что при нелинейной зависимости сигнала от падающего потока для полного описания фотоприемника нужно знать всю эту зависимость.

Чувствительность к немонахроматическому излучению заданного спектрального состава называется интегральной чувстви-



тельностью  $S_u$ . В тех случаях, когда рассматривается реакция приемника на монохроматическое излучение, говорят о монохроматической чувствительности. Для приемников ВОСП обычно указывается монохроматическая чувствительность по току  $S_\lambda$  [А/Вт]. Монохроматическая чувствительность может быть абсолютной и относительной. В последнем случае величина абсолютной монохроматической чувствительности нормируется на максимум спектральной чувствительности.

Зависимость монохроматической чувствительности фотоприемника от длины волны регистрируемого потока излучения называют спектральной характеристикой чувствительности. Типичный пример спектральных характеристик чувствительности *p-i-n*-диодов приведен на рисунке 1.3.

Зависимость интегральной или спектральной чувствительности фотоприемника от интенсивности засветки называют характеристикой преобразования фотоприемника. Абсолютная спектральная чувствительность (коэффициент преобразования) не остается строго постоянной в широком рабочем диапазоне изменения входных оптических сигналов, то есть оптическому приемнику свойственна некоторая нелинейность. Отклонение от линейности преобразования в фотоприемниках наступает либо при больших уровнях входного оптического сигнала, что связано с ограничением тока фотодиода сопротивлением нагрузки и внутренним сопротивлением при определенном напряжении питания, либо при очень малых уровнях входного сигнала, когда выходной сигнал становится сравнимым с шумами. Типичная зависимость выходного напряжения фотоприемника  $U_{\text{вых}}$  от входной оптической мощности  $P_{\text{вх}}$  приведена на рисунке 1.4.

В фотоприемном устройстве, включающем в себя фотоприемник и усилитель, верхний предел линейности может определяться как характеристиками фотоприемника, так и характеристиками усилителя. У фотоприемного устройства может наблюдаться отклонение от линейности и внутри рабочего диапазона. Нелинейность характеристики преобразования фотоприемного устройства внутри рабочего диапазона может приводить к

искажению сигналов в аналоговых ВОСП. Для цифровых систем это существенного значения не имеет.

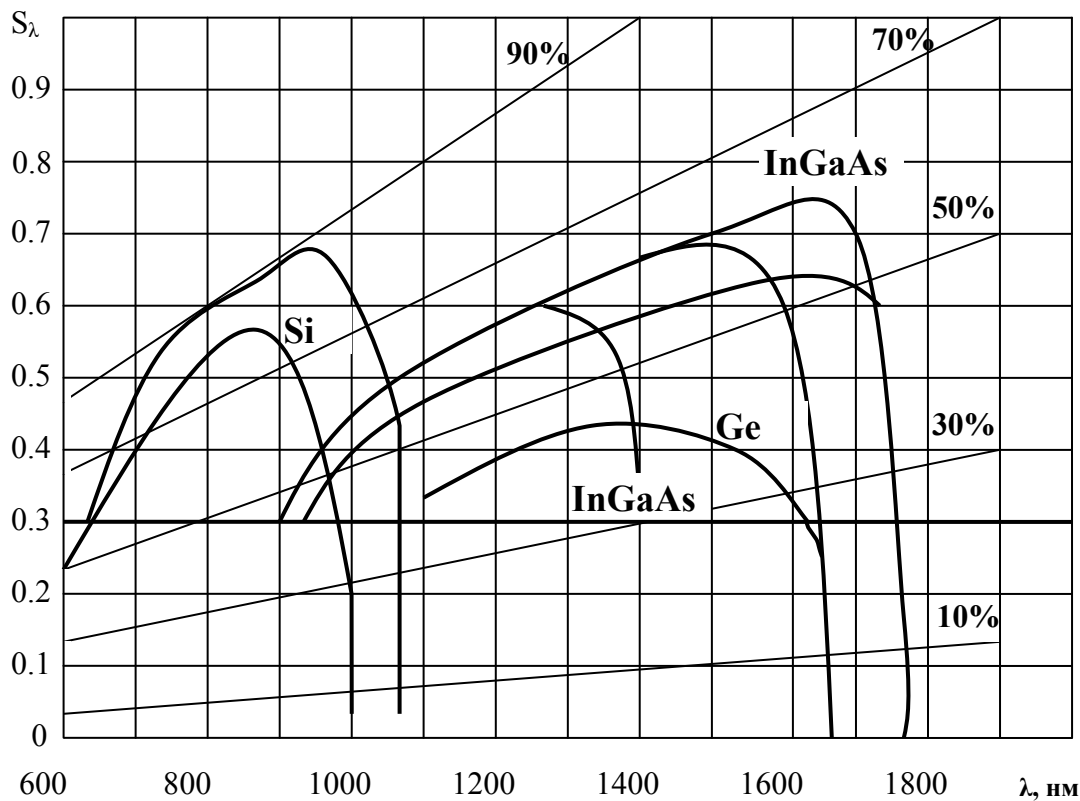


Рисунок 1.3 – Зависимость относительной спектральной чувствительности  $p-i-n$ -диодов от длины волны оптического излучения

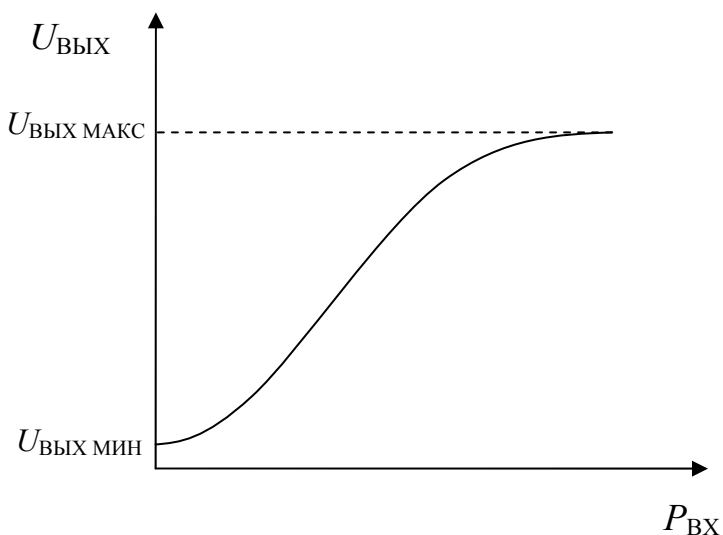


Рисунок 1.4 – Зависимость выходного напряжения фотоприемника от входной оптической мощности

Зависимость чувствительности фотоприемного устройства от частоты гармонической модуляции потока излучения называют частотной характеристикой фотоприемника. Для большинства практических приложений с достаточной точностью частотная (амплитудно-частотная) характеристика фотодиода может быть описана характеристикой эквивалентного  $RC$ -звена:

$$U(f) = \frac{U_0}{(1 + 4\pi^2 f^2 \tau^2)^{1/2}},$$

где  $U_0$  – напряжение фотосигнала на нулевой частоте (в отсутствие модуляции светового потока);  $\tau = 1/(2\pi f_0)$  – время фотоотклика, которое часто называют постоянной времени фотоприемника;  $f_0$  – граничная частота (частота отсечки), определяемая из условия  $U(f_0) = 0,707U_0$ .

Параметром  $\tau$  иногда пользуются, чтобы описать реакцию фотоприемника на импульсное излучение. Если времена нарастания и спада оптических импульсов настолько малы, что импульсы можно представить как прямоугольные, то под  $\tau$  понимают время, в течение которого фотосигнал успевает возрасти до 63 %, т. е. в  $(1 - 1/e)$  раз от своего максимального значения.

При близкой к экспоненциальной переходной характеристике  $f_0$  и  $\tau$  однозначно определяют инерционные свойства фотоприемника. Можно связать время нарастания  $\tau$  от уровня 0,1 до уровня 0,9 выходного импульса с частотой отсечки  $f_0$  выражением

$$\tau \cong \frac{0,35}{f_0}, \quad (1.1)$$

где частоту отсечки  $f_0$  часто принимают равной ширине полосы пропускания фотоприемника. Типичная зависимость чувствительности фотоприемника от частоты модуляции светового сигнала приведена на рисунке 1.5.

Частотная характеристика фотоприемного устройства определяется главным образом частотой отсечки фотодиода  $f_0$ . Она может зависеть и от верхней граничной частоты усиления усилительной схемы, но, как правило, усилитель проектируется исходя

из характеристик фотодиода таким образом, чтобы не оказывать влияния на частотную характеристику фотоприемного устройства.

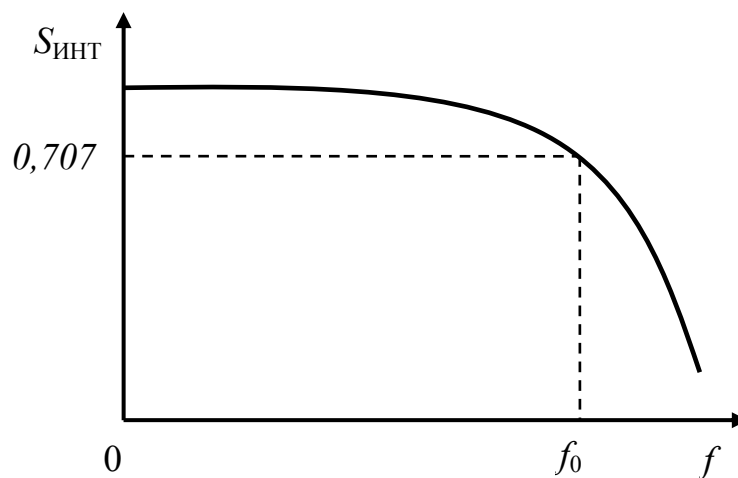


Рисунок 1.5 – Частотная характеристика фотоприемника

**Шумы** являются неотъемлемой составляющей практически любого электронного устройства, в том числе и фотоприемного. Основными видами шумов, имеющих место в *p-i-n*-диодах и ЛФД фотодиодах являются: дробовой, тепловой, генерационно-рекомбинационный, радиационный.

Усилительные электронные приборы, входящие в состав фотоприемного устройства, такие как, например, транзистор, также имеют много источников шума, более сложных по своей природе. Уровень шумов транзистора зависит от его материала и конструкции, а также от характера смещения *p-n*-перехода. Шумы, возникающие в электронной схеме фотоприемного устройства или ее элементе, накладываются на любые сигналы, проходящие через цепь.

Метрологически важным является уровень собственных шумов фотоприемного устройства, который можно оценить по уровню сигнала на выходе фотоприемника при отсутствии оптического сигнала на входе. В этом случае основными слагаемыми собственных шумов фотоприемного устройства будут шумы, вызванные темновым током фотодиода, и шумы, возникающие в электронной схеме усилителя.

**Отношение сигнал/шум** есть отношение значения полезного сигнала  $I$  на выходе фотоприемника к уровню собственных шумов фотоприемного устройства  $I_{ш}$

$$K = \left| \frac{I}{I_{ш}} \right|.$$

На практике отношение сигнал/шум ограничивается максимальным уровнем полезного сигнала, пришедшего на фотоприемник, а также уровнем шума, превышающим теоретический из-за влияния различных паразитных наводок, плохой экранировки элементов и т. д. Шум, вызванный током оптического сигнала, также может быть значительным, что приводит к уменьшению отношения сигнал/шум приемного устройства. Отношение сигнал/шум является важным метрологическим параметром приемников излучения, поскольку именно оно определяет качество канала связи.

**Пороговая мощность** – минимальная средняя мощность оптического сигнала на входе приемников излучения, при которой обеспечивается номинальное соотношение сигнал/шум для аналоговых фотоприемных устройств или номинальное выходное напряжение логических состояний для цифровых приемников излучения. Измеряется пороговая мощность в ваттах или децибелах по отношению к 1 мВт.

#### 1.4.4 Системные измерения

В процессе строительства и технической эксплуатации волоконно-оптических линий передачи проводится комплекс измерений для определения состояния кабелей и линейных сооружений, качества функционирования аппаратуры линейного тракта. Эти измерения, связанные с определением способности волоконно-оптической линии связи функционировать в целом как системы, можно назвать системными измерениями. В соответствии с действующими в настоящее время стандартами системные измерения для цифровых линий связи должны включать:

- измерение непрерывности оптического волокна;

- измерение энергетического потенциала линии связи, который представляет собой разность между измеренными уровнями средней мощности оптического излучения на выходе передающего устройства и входе приемного устройства, при вносимых потерях, обеспечивающую допустимое значение коэффициента ошибок;
- измерение битовой скорости передачи информации;
- измерение коэффициента ошибок (BER), который представляет собой число ошибок (обусловленное каналом связи и приемником) на заданное количество переданных битов информации;
- измерение фазового дрожания (джиттера) цифрового сигнала, который представляет собой кратковременное фазовое отклонение цифрового сигнала от его идеального состояния во времени; дрейфа фазы (вандера).

#### **1.4.5 Основные измерения в многоволновых системах передачи**

Рассмотренные выше измерения являются наиболее распространенными и применяются при настройке и эксплуатации одноволновых систем передачи. С развитием многоволновых систем, в частности WDM-систем, использующих мультиплексирование по длинам волн, возникает потребность в измерении ряда дополнительных параметров. Это обусловлено необходимостью получения точных характеристик компонентов и линий связи в функции длины волны.

К основным измерениям, которые необходимо проводить в многоволновых системах, можно отнести:

1) измерение мощности канала. Эти измерения необходимы для определения «спектральной однородности» оптической мощности, т. е. равномерности распределения оптической мощности во всей полосе рабочих частот оптического диапазона, которые используются в линии связи;

2) измерение центральной длины волны канала и канальных интервалов. Целью этих измерений является обнаружение нежелательных смещений в спектре лазерных источников излучения;

- 3) измерение отношения сигнал/шум для каждого канала;
- 4) измерение перекрестных помех. Эти измерения определяют уровень нежелательного сигнала (шум плюс помехи от других каналов) в полосе пропускания тестируемого канала;
- 5) измерение общей оптической мощности. Суммирование значений мощности отдельных каналов позволяет оценить нелинейные искажения волокна, которые зависят от общей мощности оптического излучения;
- 6) измерение поляризационной модовой дисперсии. Эти измерения должны проводиться при настройке высокоскоростных систем, так как пренебрежение этим фактором может привести к снижению скоростных характеристик системы передачи и необходимости увеличения запаса оптической мощности.

#### **1.4.6 Основные измеряемые параметры оптических усилителей**

Оптические усилители стали неотъемлемым компонентом волоконно-оптических телекоммуникационных сетей и включаются в протяженные ВОСП, так как позволяют компенсировать возникающие в них системные потери.

Основными измеряемыми параметрами оптических усилителей являются:

- 1) коэффициент усиления оптического сигнала, который представляет собой отношение выходного и входного оптических сигналов по мощности. Для многоканальных усилителей коэффициент усиления измеряется на длине волны каждого канала;
- 2) шум оптического усилителя. Для многоканальных усилителей шумы измеряются на длине волны каждого канала;
- 3) центральная длина волны, полоса пропускания, амплитудно-частотная характеристика, которые определяют частотные свойства и неравномерность усиления в полосе пропускания.

## 2 ИЗМЕРЕНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ

---

### 2.1 Измерение абсолютной оптической мощности

Измерение оптической мощности является метрологической основой волоконной оптики. Почти в каждом средстве измерения параметров световой волны, как правило, в той или иной форме используется измерительный преобразователь оптической мощности. Более того, большинство измерительных задач сводится к определению численных значений мощности оптического излучения. Это измерения средней мощности, максимальной импульсной мощности, распределения энергии светового импульса во времени (форма импульса) и в пространстве (плотность мощности) и т. п. Различают измерения абсолютной и относительной оптической мощности. Первое служит для определения характеристик источников и приемников излучения, например мощности оптического передатчика, чувствительности оптического приемника, а второе – для измерения затухания в оптическом волокне, коэффициента усиления оптического усилителя, потерь, вносимых различными элементами системы передачи.

В общем случае измерение абсолютной оптической мощности представляет собой подключение к измерителю оптической мощности источника излучения с последующим снятием показаний (рисунок 2.1). Как правило, данной процедуре предшествует калибровка. При необходимости измерений оптической мощности в ограниченном спектре излучения используются оптические фильтры. Такая схема позволяет определить спектральную мощность излучения в заданном диапазоне длин волн.

Для измерения абсолютной оптической мощности прежде всего необходим правильный выбор приемников излучения, которые должны быть метрологически аттестованы как первичные измерительные преобразователи мощности излучения. Измерительные оптические преобразователи обычно преобразуют оптический сигнал в электрический. Мощность электрического



сигнала может быть точно определена по измерениям тока и напряжения.

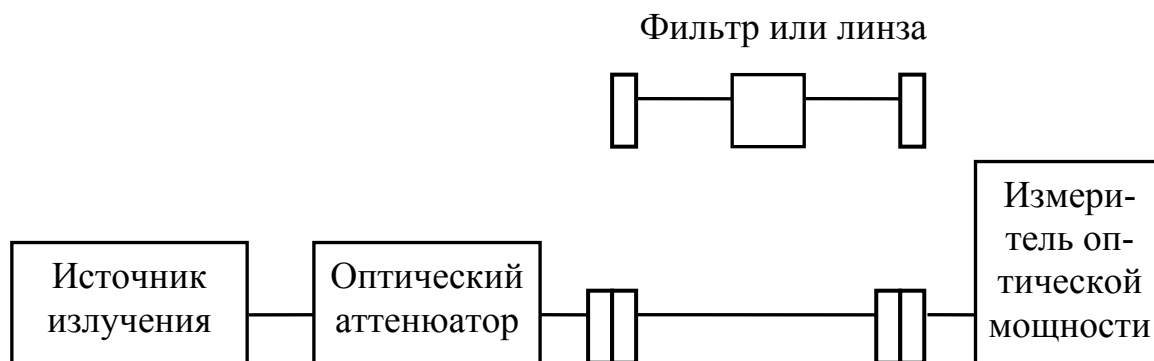


Рисунок 2.1 – Схема измерения абсолютной оптической мощности

Можно выделить два принципа измерения оптической мощности, которые в основном используются в волоконной оптике:

1) тепловой принцип, в основе которого лежит двукратное преобразование: сначала световая энергия преобразуется в тепловую, затем тепловая – в электрический сигнал;

2) принцип прямого фотоэлектрического преобразования световой энергии в пропорциональную ей энергию электрического сигнала.

Соответственно этим принципам измерений можно выделить две основные группы измерителей оптической мощности, которые используются в ВОСП [10]:

1) измерители на основе термофотодиодов (*TFD*), в которых используется тепловой принцип и регистрируется изменение температуры, вызванное оптическим излучением;

2) измерители на основе фотодиодов (*FD*), в которых на основе внутреннего фотоэффекта в полупроводниках энергия оптического излучения преобразуется в пропорциональную ей электрическую энергию.

Измерители оптической мощности на фотодиодах обладают достаточно небольшим диапазоном рабочих частот, а также нуждаются в абсолютной калибровке. Тем не менее они чаще используются вследствие своей высокой чувствительности (регистрируют оптические сигналы мощностью порядка 1 пВт). Измерители

на основе термофотодиодов менее чувствительны (регистрируют оптические сигналы мощностью порядка 10 мкВт), но обладают высокой стабильностью, и их показания независимы от длины волны оптического излучения. Кроме того, сами термофотодиоды могут быть непосредственно поверены при помощи измерений электрической мощности. Эти измерители предпочтительнее для использования в метрологических лабораториях.

## **2.2 Измерители оптической мощности на основе термофотодиодов**

В настоящее время наиболее распространенным методом измерения мощности с помощью термофотодиодов является радиометрический метод замещения. Согласно этому методу измеритель мощности (термофотодиод) сначала подвергается воздействию оптического излучения. Затем оптическое излучение устраняется (с помощью прерывателя, шторки) и заменяется электрически генерируемой мощностью, которая может быть с высокой точностью определена по значениям тока и напряжения.

На точность измерения влияют следующие факторы:

1) термофотодиод реагирует не только на излучение источника, но и на изменение комнатной температуры. Поэтому необходимы гарантии, что *TFD* облучается только оптическим источником. Для устранения влияния засветки используют ряд диафрагм и тепловую изоляцию, что блокирует влияние фоновой засветки;

2) термофотодиод должен обладать высокой поглощающей способностью (желательно 100 %), так как отраженный и рассеянный свет искажают результат измерений. Для увеличения поглощающей способности слой *TFD* покрывают черной краской. Измерение отражательной способности *TFD* проводится как составная часть начальной калибровки;

3) тепловое сопротивление между нагревателем и поглощающим слоем должно быть мало, а тепловое сопротивление оболочки велико. В противном случае энергия потерь на тепловое

излучение, пропорциональная температуре в четвертой степени, будет велика, что приведет к искажению результата.

Тепловые измерители оптической мощности могут быть использованы в диапазоне длин волн от инфракрасных до ультрафиолетовых при постоянной времени от нескольких секунд до нескольких минут в зависимости от размера термофотодиода. Они регистрируют оптические сигналы мощностью порядка 10 мкВт и выше при погрешности не хуже  $\pm 1\%$ . Наибольшей проблемой при использовании тепловых измерителей оптической мощности является их низкая чувствительность и большая постоянная времени. Эти характеристики позволяют использовать такие измерители мощности для поверок, калибровки, но в других сферах волоконно-оптических измерений они практически не используются.

Особым типом теплового измерителя мощности является криогенный радиометр, представляющий собой измеритель оптической мощности, помещенный в вакуум и охлажденный жидким гелием приблизительно до 6 К. Криогенные радиометры являются наиболее точными измерителями световой мощности благодаря тому, что:

1) при 6 К масса поглощающего материала значительно снижается, так как снижается энергия, необходимая для увеличения температуры на 1 К. Это уменьшает постоянную времени и, следовательно, время измерения;

2) тепловые потери вследствие излучения устраняются, так как энергия тепловых потерь пропорциональна температуре в четвертой степени;

3) потери вследствие конвекции устраняются при эксплуатации термофотодиодов в вакууме.

Криогенные радиометры при измерении оптической мощности позволяют достичь погрешности в  $\pm 0,01\%$ . Однако из-за их высокой стоимости и сложности в эксплуатации используются только в национальных калибровочных лабораториях.

## 2.3 Измерители оптической мощности на основе фотодиодов

При измерениях малоинтенсивного импульсного излучения в качестве базового используется метод прямого фотоэлектрического преобразования энергии оптического излучения в пропорциональный ему электрический сигнал. В большинстве измерительных средств, применяемых в волоконной оптике, в качестве первичного преобразователя используются *p-i-n*-диоды или ЛФД. Они способны измерять модулируемую высокочастотную мощность уровнем менее 1 пВт (−90 дБ), обладают высокой чувствительностью, малой инерционностью, сравнительно просты в применении.

При использовании фотодиода как измерительного преобразователя одним из основных его параметров является чувствительность, которая может быть определена как отношение фототока диода  $I$  на единицу измеряемой оптической мощности  $P$ :

$$\gamma = \frac{I}{P}. \quad (2.1)$$

Пусть за время  $\Delta t$  один фотон светового излучения выбивает один электрон в фотодиоде. Тогда фототок диода равен заряду одного электрона  $e$  в течение времени  $\Delta t$ :

$$I = \frac{e}{\Delta t}. \quad (2.2)$$

Оптическая мощность за то же время  $\Delta t$  при частоте световой волны  $\nu$

$$P = \frac{h\nu}{\Delta t} = \frac{hc}{\lambda\Delta t}, \quad (2.3)$$

где  $h$  – постоянная Планка;  $c$  – скорость света в вакууме.

Таким образом, чувствительность с учетом квантовой эффективности  $\eta$  (которая для *p-i-n*-диодов равна 1) будет пропорциональна длине волны  $\lambda$ :

$$\gamma = \frac{e\lambda}{hc} \eta. \quad (2.4)$$

Учитывая, что мощность оптического излучения с напряженностью поля  $E(t)$  равна  $P = |E(t)|^2$ , мгновенное значение фототока  $i(t)$   $p$ - $i$ - $n$ -диода будет определяться выражением

$$i(t) = \gamma |E(t)|^2. \quad (2.5)$$

При наличии усиления (в ЛФД) зависимость мгновенного значения фототока  $i(t)$  от мощности оптического излучения определяется выражением

$$i(t) = M\gamma |E(t)|^2, \quad (2.6)$$

где  $M$  – коэффициент усиления.

На практике фотодиоды проявляют отклонение от этой зависимости. Причины отклонения заключаются в целом ряде факторов, существенным образом влияющих на чувствительность фотодиодов и, соответственно, на точность измерения абсолютной мощности светового излучения. Рассмотрим основные из этих факторов.

1. Существуют ограничения по длине волны  $\lambda$ . За пределами верхней критической длины волны  $\lambda_{кр}$  энергия фотона становится ниже запрещенной энергетической зоны используемого полупроводникового материала, и чувствительность  $\gamma$  резко падает.

2. Вследствие рекомбинации, когда электроны соединяются с дырками и до того момента, когда они достигнут электродов, происходит снижение чувствительности  $\gamma$  и, как следствие, уменьшение фототока. Этот эффект различается для разных фотодиодов.

3. При короткой длине волны некоторые фотоны поглощаются за пределами  $i$ -области  $p$ - $i$ - $n$ -диода, вследствие чего уменьшается количество электронно-дырочных пар.

4. Любые отражения от поверхности фотодиода также уменьшают его чувствительность. Последний фактор является очень важным. Например, чистый InGaAs имеет показатель преломления  $n = 3,5$ . Френелевское отражение при этом составляет 31 % от уровня падающей мощности. Для уменьшения отражения света в фотодиодах применяют антиотражательные покрытия.

Однослойные четвертьволновые покрытия снижают уровень отражения до 1 % в пределах ограниченного диапазона длин волн. Для достижения данного уровня отражений в более широком диапазоне длин волн используют многослойные покрытия. Отражательная способность разных фотодиодов значительно отличается, причем небольшие изменения толщины покрытия могут существенно изменить значение коэффициента отражения. Это приводит к погрешностям в измерении абсолютной мощности.

5. Чувствительность фотодиодов  $\gamma$  имеет температурную зависимость. Например, сильная температурная зависимость наблюдается для германия (Ge) при длине волны  $\lambda = 1550$  нм. Она может быть описана как смещение верхней критической длины волны приблизительно на 1 нм/К. По этой причине измерители мощности с термостабилизированными диодами имеют лучшую воспроизводимость результатов.

6. Чувствительность фотодиодов  $\gamma$  изменяется в разных точках поверхности полупроводникового диода из-за неоднородности полупроводниковой структуры. В процессе измерения положение и диаметр падающего луча, как правило, не контролируются, и пространственная неоднородность полупроводниковой структуры приводит к погрешностям измерений.

Одним из ограничений достижения достоверных результатов измерения оптической мощности с помощью фотодиодов в широком динамическом диапазоне является нелинейность функции преобразования измерителя. Обычно считается, что фотодиод характеризуется высокой линейностью в диапазоне шести и более декад оптической мощности. Однако существует ряд причин, нарушающих линейность функции преобразования измерителя. Отклонение от линейности преобразования у фотодиодов наступает либо при высоких уровнях оптической мощности (порядка нескольких милливатт), когда увеличение оптической мощности не ведет к увеличению тока фотодиода, либо при очень малых уровнях входного сигнала, когда выходной сигнал становится сравнимым с шумами. При низких уровнях входной мощности (менее 10 мкВт) уровень шума растет с увеличением оптической мощности, нарушая линейность преобразователя.

## 2.4 Устройство измерителей оптической мощности на основе фотодиодов

Как выше подчеркивалось, измерение абсолютного значения оптической мощности является одним из важнейших видов измерений при строительстве, настройке и эксплуатации ВОСП, так как данные измерения позволяют определить соответствие энергетических параметров ВОСП государственным стандартам.

Основными параметрами измерителей абсолютной мощности являются [10]:

- 1) диапазон рабочих длин волн, в котором измеряют среднюю мощность;
- 2) динамический диапазон измерений средней мощности в указанном диапазоне длин волн или на одной длине волны;
- 3) пределы относительной погрешности измерения уровня мощности.

В настоящее время ГОСТ 51060-97 регламентирует основные технические характеристики (таблица 2.1), которые должны обеспечивать измерители мощности.

Таблица 2.1

Наименование параметра	Значение
Диапазон рабочих длин волн, мкм	0,6 – 1,7
Диапазон измерений средней мощности, Вт	$10^{-12}$ – $10^{-2}$
Пределы основной допускаемой погрешности, %	
– диапазон $10^{-10}$ – $10^{-2}$ Вт	6 – 8
– диапазон $10^{-12}$ – $10^{-3}$ Вт	8 – 10

Эти параметры должны обеспечиваться в нормальных климатических условиях по установлению рабочего режима прибора (время установления должно быть от 4 секунд до 30 минут).

Устройство измерителей оптической мощности на основе фотодиодов схематически представлено на рисунке 2.2.

Наиболее важным элементом оптического измерителя мощности, определяющим характеристики прибора, является оптический детектор. Оптический детектор представляет собой

твердотельный фотодиод, который принимает входной оптический сигнал и преобразует его в электрический сигнал заданной интенсивности. Полученный электрический сигнал поступает через АЦП на сигнальный процессор, где производится пересчет полученного электрического сигнала в единицы измерений (децибелы или ватты), представляемые затем на экране прибора (цифровом дисплее). Для обеспечения стабильной работы твердотельного фотодиода в приборах используется термостабилизирование.

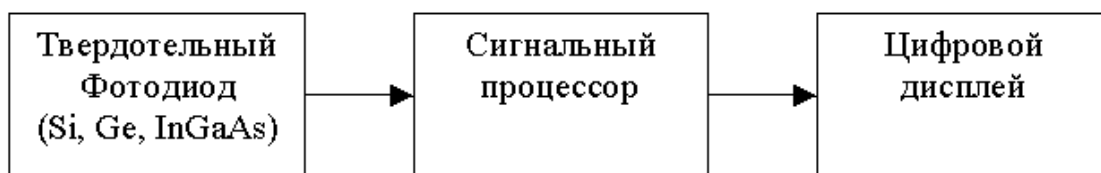


Рисунок 2.2 – Устройство измерителя оптической мощности на основе фотодиодов

Как отмечалось в п. 1.4.3, важной характеристикой прибора является зависимость выходного сигнала фотодиода от мощности входного оптического сигнала на разных длинах волн. Возможную нелинейность этой характеристики фотодиода в большей или меньшей степени должен компенсировать сигнальный процессор. В результате, если характеристика фотодиода сильно неравномерна, для ее компенсации сигнальный процессор должен иметь более сложную структуру. С другой стороны, более высокотехнологичный фотодиод будет иметь более равномерную характеристику. При этом сигнальный процессор может быть довольно простым.

Другой важной характеристикой фотодиодов является спектральная характеристика, т. е. зависимость эффективности работы фотодиода от длины волны передаваемого сигнала.

В таблице 2.2 представлены типы фотодиодов в зависимости от длины волны принимаемого излучения.

Из таблицы видно, что кремниевый фотодиод может использоваться при измерениях оптического сигнала от 800 до 900 нм. На практике измерители оптической мощности, использующие



этот тип детектора, калиброваны на более широкий диапазон – от 400–450 до 1000 нм.

Таблица 2.2 – Типы фотодиодов в зависимости от длины волны в ВОЛС

Рабочая длина волны, нм	Оптимальный тип фотодиода
850	Si (кремний)
850/1300	Ge (германий) и InGaAs
1300/1550	InGaAs
850/1300/1550	InGaAs

Для измерений на длинах волн 1310 нм и 1550 нм, получивших наибольшее распространение в современных системах связи, обычно используются германиевые детекторы или фотодиоды на основе сплава InGaAs (см. таблицу 2.2). Соответственно измерители мощности, использующие эти фотодиоды, калиброваны в диапазонах от 780 до 1600 нм для Ge и от 800 до 1700 нм для InGaAs. Детекторы на основе InGaAs имеют наиболее широкий спектр измерения по длинам волн. В связи с этим они используются для измерений на всех трех длинах волн: 850, 1310 и 1550 нм.

Еще одним важным параметром измерителей оптической мощности является линейность работы прибора и его чувствительность, на которые оказывает влияние принцип работы усилителя электрического сигнала.

В современной технике усиления используются два основных принципа усиления: логарифмическое и линейное.

Использование логарифмического усиления не обеспечивает должной точности измерений и характеризуется рядом недостатков. Обычно в измерителях оптической мощности результаты измерений представляют в децибелметрах или в ваттах. Приборы с логарифмическим усилителем не позволяют представлять результаты измерений в ваттах, а технология логарифмического усиления, использующая обычно транзисторный *p-n*-переход, приводит к дополнительной зависимости работы усилителя от температуры.

Для проведения измерений на нескольких длинах волн логарифмические усилители требуют до 4–6 потенциометров, что также приводит к нежелательным последствиям в результате окисления потенциометров. Таким образом, использование логарифмического усилителя приводит к низкой точности и необходимости частой калибровки прибора.

Всех перечисленных недостатков практически лишены усилители, построенные на основе линейного усиления. Обычно линейные усилители хорошо стабилизированы, что дает возможность компенсировать как ошибки начального сдвига, так и сдвиг сигнала в процессе измерений из-за климатических и прочих причин. Современные приборы, построенные на основе линейного усиления, могут содержать специально калиброванные данные, которые используются в режиме автокалибровки линейных усилителей в процессе измерений. В связи с этим приборы, имеющие линейный усилитель и систему автокалибровки, не требуют частой поверки.

## 2.5 Измерение затухания

Затуханием оптического волокна называется ослабление интенсивности света по мере распространения его в оптическом световоде. Затухание является наиболее важным параметром оптических волокон. Полное затухание оптического сигнала в световодах определяется коэффициентом затухания  $\alpha$ , который в общем виде равен:

$$\alpha = \alpha_{\text{п}} + \alpha_{\text{р}} + \alpha_{\text{пр}} + \alpha_{\text{к}}, \quad (2.7)$$

где  $\alpha_{\text{п}}$  – составляющая коэффициента затухания, которая характеризует ослабление излучения за счет собственного поглощения материала сердцевины. Эта составляющая в значительной степени зависит от спектрального состава передаваемого излучения;  $\alpha_{\text{р}}$  – составляющая коэффициента затухания, характеризующая ослабление излучения за счет рассеивания световой энергии. Составляющая  $\alpha_{\text{р}}$  определяется в основном рэлеевским рассеянием, обусловленным малыми по сравнению с длиной волны флуктуа-

циями (в том числе и тепловыми) показателя преломления оптического волокна;  $\alpha_{\text{пр}}$  – составляющая коэффициента затухания, связанная с наличием в оптическом волокне посторонних примесей, приводящих к дополнительному поглощению оптической мощности. Такими примесями являются ионы металлов ( $\text{Fe}^{+2}$ ,  $\text{Cu}^{+2}$ ,  $\text{Cr}^{+3}$ ) и гидроксидные группы (ОН), приводящие к резонансному всплеску затухания на определенных длинах волн;  $\alpha_{\text{к}}$  – составляющая коэффициента затухания, характеризующая дополнительные потери оптической мощности за счет скрутки, деформации и изгибов оптического волокна при изготовлении оптического кабеля (эти потери называют кабельными).

Измеряют, как правило, коэффициент полного затухания оптического световода по мощности  $\alpha$ . Обычно  $\alpha$  выражается в децибелах и определяется по формуле

$$\alpha = 10 \lg \left[ \left( P_0 I_S / 1 - \rho^2 \right) / P_L \right], \quad (2.8)$$

где  $P_0$  – оптическая мощность, проходящая через площадь поперечного сечения на входе волокна;  $P_L$  – оптическая мощность, проходящая через площадь поперечного сечения на выходе волокна;  $\rho$  – коэффициент отражения от входного торца волокна;  $I_S$  – эффективность ввода излучения в оптический световод.

При согласованном вводе и выводе излучения, к чему обычно стремятся на практике, приходим к традиционной формуле:

$$\alpha = 10 \lg \left( \frac{P_0}{P_L} \right). \quad (2.9)$$

Измерение затухания оптического световода – сложная научно-техническая задача. Однозначно определить  $\alpha$  трудно. На воспроизводимость результатов влияют микро- и макроизгибы, изменения температуры и давления, способ возбуждения оптического волокна. В многомодовых волокнах измерение осложняется распространением большого количества мод в волокне, каждая из которых имеет собственные характеристики распространения. В связи с этим необходимыми условиями измерения затухания являются:

1) постоянство мощности оптического излучателя, его центральной длины волны  $\lambda$  и ширины спектра излучения  $\Delta\lambda$ , причем  $\Delta\lambda$  не должна превышать характеристику спектрального затухания волокна;

2) неизменность модового состава оптического излучения, что позволяет избежать потерь мощности в многомодовых волокнах за счет быстро затухающих мод высшего порядка;

3) вывод мод оболочки, что позволяет избежать их влияния на мощность оптического сигнала на выходе волокна.

Первое условие – постоянство характеристик источника излучения – обеспечивается выбором излучателя.

Второе условие – неизменность модового состава оптического излучения – выполняется в многомодовых волокнах только при достижении равновесного распределения мод. Эффективная длина установления равновесного распределения мод в волокне может составлять от сотен метров до нескольких километров и зависит от типа волокна, способа возбуждения, микро- и макроизгибов. Для формирования распределения мод, близкого к равновесному в коротких отрезках волокна, широкое применение находят смесители и фильтры мод. Известно несколько конструкций фильтров мод: спиральный фильтр мод, который образуется несколькими витками световода (3–5 витков), намотанными на стержень диаметром 15–40 мм; система штырей – гребенка, через которую оптическое волокно пропускается с небольшим радиусом изгиба. Хорошей эффективностью обладает биконический фильтр, образованный двойным конусным переходом световода через меньший размер на прежние параметры. Такой фильтр можно создать перетяжкой разогретого волокна на диаметр 0,6 от номинального на длине 1–2 мм.

Общим для всех смесителей и фильтров мод является обеспечение условий для сильной связи мод различных порядков на вызываемых внешними причинами макроизгибах и микронеоднородностях волокна и достижение равной мощности излучения во всех модах и неизменность модового состава.

Третье условие – вывод мод оболочки – обеспечивается обычно иммерсионной жидкостью, показатель преломления которой равен или больше показателя преломления оболочки.

Для однородного волокна в состоянии равновесия можно определить погонный коэффициент затухания  $\alpha_{\Pi}$  – затухание на единицу длины волокна:

$$\alpha_{\Pi}(\lambda) = \frac{\alpha(\lambda)}{L} \text{ [дБ/км] ,} \quad (2.10)$$

которое не зависит от выбранной длины волокна.

К настоящему времени согласно рекомендациям ГОСТ 26814-86 на практике применяются следующие методы измерения затухания: метод обламывания; безобломный метод (другое его название – метод вносимых потерь). Методы относятся к группе «точка-точка» [12], в которых измеритель и источник размещаются по разные стороны тестируемого объекта. Схема измерения затухания методом обламывания приведена на рисунке 2.3.

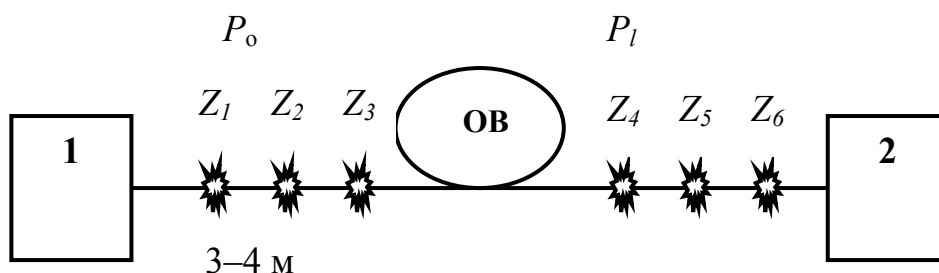


Рисунок 2.3 – Измерение затухания методом обламывания

Измерение выполняется следующим образом. Сначала фиксируются показания измерителя мощности при подключении к источнику излучения тестируемого волокна. Затем при выключенном источнике производится обламывание волокна на расстоянии  $\sim 3-4$  м от источника и фиксируется торец отрезка на входе измерителя мощности. При включении излучателя вновь фиксируются показания измерителя. Потери определяются как разность между эталонным уровнем (на коротком отрезке) и уровнем измерения на всей длине волокна:

$$\alpha = \alpha_{\text{ЭТ}} - \alpha_{\text{ИЗМ}} . \quad (2.11)$$

Для повышения точности при малом значении потерь измерение производят несколько раз, обламывая оптическое волокно в

нескольких точках. Если необходимо значение погонного затухания  $\alpha_{\text{п}}$ , то полученное затухание  $\alpha$  делится на длину волокна.

Метод обламывания является наиболее точным методом измерения затухания, сравнительно прост, но из-за необходимости разрыва волокна его использование при настройке и техническом обслуживании ВОЛС в полевых условиях неэффективно. Поэтому он применяется только при производстве оптических волокон.

Схема измерения затухания методом вносимых потерь приведена на рисунке 2.4. Согласно этому методу измерения осуществляются в два этапа.

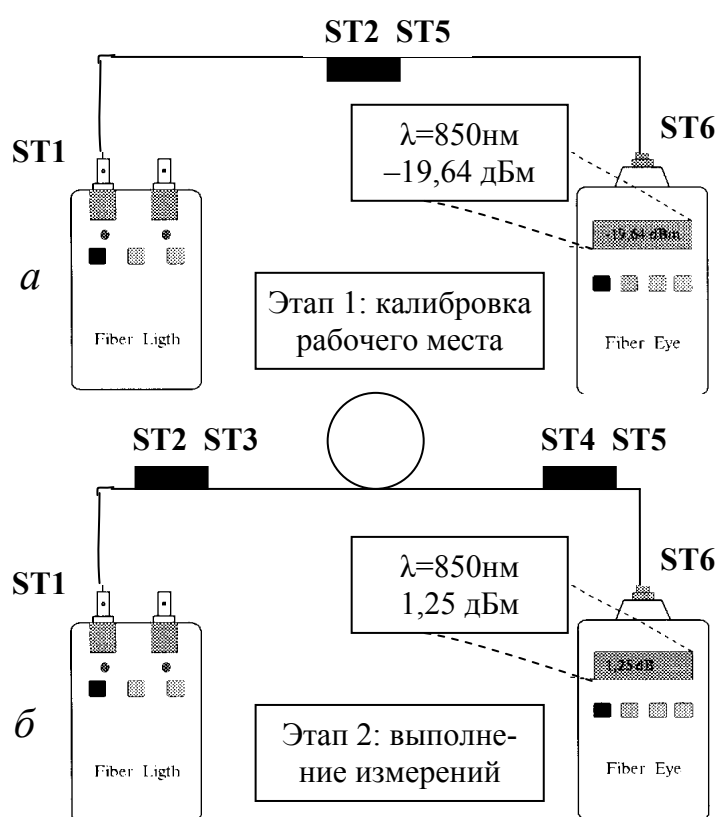


Рисунок 2.4 – Выполнение измерений затухания методом вносимых потерь

На первом этапе (этап калибровки) производится измерение оптической мощности на выходе вспомогательного волокна (рисунок 2.4, а). Это может быть волокно того же типа, что и измеряемое, но длиной не более 2 м, чтобы можно было пренебречь его затуханием. На втором этапе, схема которого изображена на рисунке 2.4, б, подсоединяется измеряемое волокно и соединение

регулируется по максимальному уровню мощности. Потери оптического излучения в волокне определяются как разность между эталонным уровнем мощности и уровнем второго измерения. Для увеличения точности измерения рекомендуется производить его в двух направлениях с усреднением полученного результата.

Метод вносимых потерь требует качественного соединения волокон и менее точен, чем предыдущий из-за погрешности, обусловленной непостоянством потерь в коннекторе при соединении кабелей. Однако этот метод не требует разрыва волокна и обычно используется в полевых условиях.

Отметим, что затухание оптического волокна, как и потери, вносимые в линию связи отдельными компонентами линии, есть всегда частное от деления двух уровней мощности. Поэтому при измерениях затухания или вносимых потерь точность измерения абсолютной мощности не важна. Важна погрешность отношения мощностей и, следовательно, в первую очередь необходима линейность характеристики фотоприемника.

Для определения затухания сигнала в кабельной системе линии и отдельных ее компонентах используются измерители оптических потерь (оптические тестеры). Оптическими тестерами называют приборы, в которых используются согласованные пары: источник излучения – приемник (измеритель оптической мощности).

Оптические тестеры применяются при входном контроле параметров оптического кабеля, монтаже кабеля, приемо-сдаточных испытаниях кабельной системы, контроле выходных параметров активного оборудования, обслуживании действующих линий связи.

По конструктивному исполнению тестеры подразделяются на два типа:

- комплекты из двух приборов – источника и измерителя;
- совмещающие в одном корпусе источник и измеритель.

Тестеры в виде комплекта из двух приборов более универсальны, так как позволяют применять большее число методов измерений.

Типичные примеры оптических тестеров в комплекте из источника и измерителя в одном корпусе приведены на рисунке 2.5.



*a*



*б*

Рисунок 2.5 – Оптические тестеры в комплекте из источника и измерителя в одном корпусе: *a* – тестер EXFO BRT-320A, имеет пять конфигураций: с источником на одну длину волны: 1310нм, 1550 нм или 1625 нм, с источником на две длины волны: 1310 нм;1550 нм или 1550нм; 1625 нм; *б* – оптический тестер серии FOD-1203, имеет две конфигурации: с источником на одну длину волны 850 нм или 1310 нм с источником на три длины волны: 850нм, 1310 нм и 1550 нм



### 3 ИЗМЕРЕНИЕ ЧИСЛОВОЙ АПЕРТУРЫ

Числовая апертура является одной из важнейших оптико-геометрических характеристик волоконного световода и важным измеряемым параметром, поскольку световод должен обеспечивать распространение потоков излучения, входящих под максимально большим углом к его продольной оси [4, 5, 10]. На рисунке 3.1 показаны продольное осевое сечение ступенчатого волокна и процесс распространения световых лучей в рамках геометрической оптики.

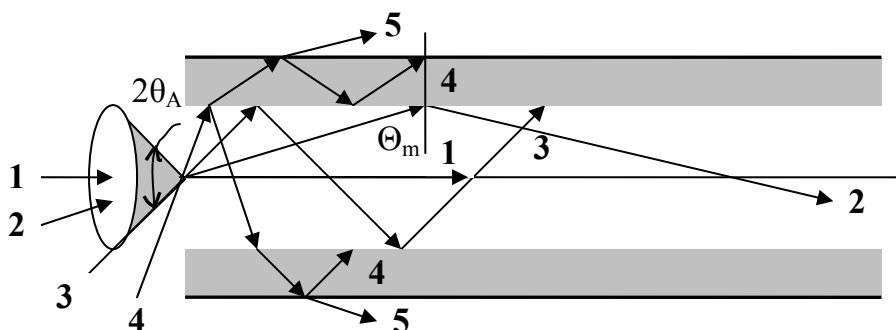


Рисунок 3.1 – Распространение световых лучей в волоконном световоде:  $\theta_{\text{п}}$  – углом падения светового луча на оболочку;  $\theta_{\text{А}}$  – апертурный угол

При попадании светового луча на торец ОВ в нем могут распространяться три типа световых лучей: направляемые (лучи 1, 2, 3), вытекающие – лучи оболочки (луч 4) и излучаемые, которые излучаются из оболочки в окружающее пространство (луч 5). Очевидно, что излучаемые и вытекающие волны – это паразитные волны, приводящие к рассеиванию энергии, искажению информационного сигнала.

Направляемые лучи в зависимости от траектории следует разделить на меридианные и косые световые лучи. Траектория меридианных лучей лежит в плоскости, проходящей через ось волокна, и имеет зигзагообразный вид (лучи 2, 3 на рисунке 3.1). Косые лучи распространяются по спиралеобразной траектории, проекция которой на поперечное сечение волокна имеет вид правильного незамкнутого треугольника.

Меридианные световые лучи характеризуются углом падения на оболочку  $\theta_{\text{п}}$ , образованным лучом и нормалью к оси волокна. Критический режим соответствует условию

$$\sin \theta_{\text{кр}} = n_u / n_c, \quad (3.1)$$

где  $\theta_{\text{кр}}$  – угол полного внутреннего отражения;  $n_c$ ,  $n_u$  – показатели преломления сердцевины и оболочки соответственно.

При выполнении условия  $\theta_{\text{п}} < \theta_{\text{кр}}$  луч распространяется вдоль сердцевины волокна и может обеспечить передачу сигнала на большие расстояния.

Угол  $\theta_A$  между оптической осью и одной из образующих светового конуса (луч 3 на рисунке 3.1) носит название апертуры оптического волокна. Для лучей, падающих на торец оптического волокна под углом меньшим апертурного  $\theta_A$ , в дальнейшем выполняется условие полного внутреннего отражения. Физически апертура характеризует эффективность ввода оптического излучения в волокно, а для ее числовой оценки используется понятие номинальной числовой апертуры ( $NA$ ), значение которой для ступенчатого оптического волокна определяется выражением

$$NA = n_0 \sin \theta_A, \quad (3.2)$$

где  $n_0$  – показатель преломления воздуха,  $n_0 = 1$ .

В соответствии с законом Снеллиуса для лучей на входном торце оптического волокна можно записать:

$$n_0 \sin \theta_A = n_u \sin (\pi/2 - \theta_{\text{кр}}),$$

и, учитывая, что

$$\theta_{\text{кр}} = \arcsin (n_u / n_c),$$

выражение для числовой апертуры примет вид:

$$NA = \sqrt{n_c^2 - n_u^2} \approx n_c \sqrt{\Delta}, \quad (3.3)$$

где величина  $\Delta = (n_c^2 - n_u^2) / 2n_c^2 \approx (n_c - n_u) / n_c$  называется относительной разностью показателей преломления сердцевины и оболочки оптического волокна.

Из последнего выражения видно, что с увеличением разности показателей преломления сердцевины и оболочки величина числовой апертуры  $NA$  возрастает и, следовательно, улучшается эффективность ввода излучения в оптическое волокно.

Полученное выражение учитывает только меридианные лучи, в то время как в оптическом волокне в основном имеют место косые лучи с гораздо более сложной траекторией распространения. Получить простое выражение для числовой апертуры косых лучей не удастся. Однако отметим, что апертура, полученная по данному выражению для меридианных лучей ступенчатого волокна, меньше действительной апертуры, учитывающей все введенные лучи.

В градиентных оптических волокнах числовая апертура не постоянна по сечению сердцевины волокна. Для градиентных волокон вводится понятие локальной числовой апертуры, равной

$$NA(r) = \sqrt{n_c^2(r) - n_u^2}. \quad (3.4)$$

Излучение, падающее на торец градиентного волокна в произвольной точке  $r$ , будет распространяться, только если в этой точке оно окажется в пределах локальной числовой апертуры  $NA(r)$ . Очевидно, что при  $r = 0$ , т. е. при вводе излучения вдоль оси волокна, локальная числовая апертура равна номинальной. При удалении от оси в градиентном волокне уменьшается и локальная числовая апертура  $NA(r)$ . Таким образом, эффективная числовая апертура градиентного волокна оказывается меньшей, чем у ступенчатого волокна. Для наиболее распространенного градиентного волокна с параболическим профилем показателя преломления числовая апертура определяется выражением

$$NA = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{n_c^2 - n_u^2}. \quad (3.5)$$

Апертура представляет интерес и является предметом изменений в связи с тем, что равенство числовых апертур источника излучения, оптического волокна и приемника излучения – одно из необходимых условий достижения малых потерь при их соединениях.

Для измерения числовой апертуры волокна обычно определяют апертурный угол  $\theta_A$ . Апертурный угол можно определить на основании измерений **угловой характеристики излучения волокна**. Для этого в отрезок волокна длиной не менее нескольких метров вводится через смеситель мод и фильтр оболочечных мод излучение лазера. На выходе волокна, на расстоянии 10–20 см от его торца, сканирующим фотоприемником измеряется относительная яркость излучения  $r(\theta)$  под различными углами к оси волокна:

$$r(\theta) = L_\theta / L_0, \quad (3.6)$$

где  $L_\theta$  – яркость в направлениях, образующих угол  $\theta$  с осью волокна;  $L_0$  – яркость в направлении  $\theta = 0$ . Апертурный угол  $\theta_A$  выбирается так, чтобы в световом конусе, ограниченном апертурным углом, содержалось 90 % излучаемой энергии. При измерениях выходной торец волокна должен быть хорошо обработан и плоскость его должна быть перпендикулярна оси волокна. Кроме того, ось волокна должна совпадать с осью фотоприемника при его угловом центральном положении.

Другим методом измерения апертурного угла является **метод трех колец**. Метод основан на том, что на выходном торце волокна (рисунок 3.2) ярче светится сердцевина 1, если на входной торце световой пучок падает под углом меньше апертурного. Если на входной торце волокна световой пучок падает под углом больше апертурного, то ярче светится оболочка 2. Если световой пучок падает на торец волокна под углом равным апертурному, то граница раздела сердцевины и оболочки 3 представляет ярко светящееся кольцо.

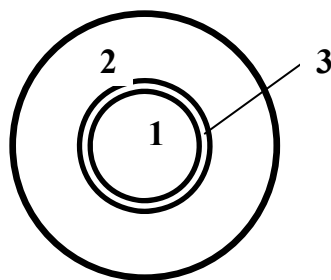


Рисунок 3.2 – Метод трех колец

Структурная схема установки для измерения апертуры методом трех колец представлена на рисунке 3.3. Коллимированный пучок лазера 1 фокусируется системой 2 на входной торец исследуемого волокна 4, закрепленного на поворотном столике 3.

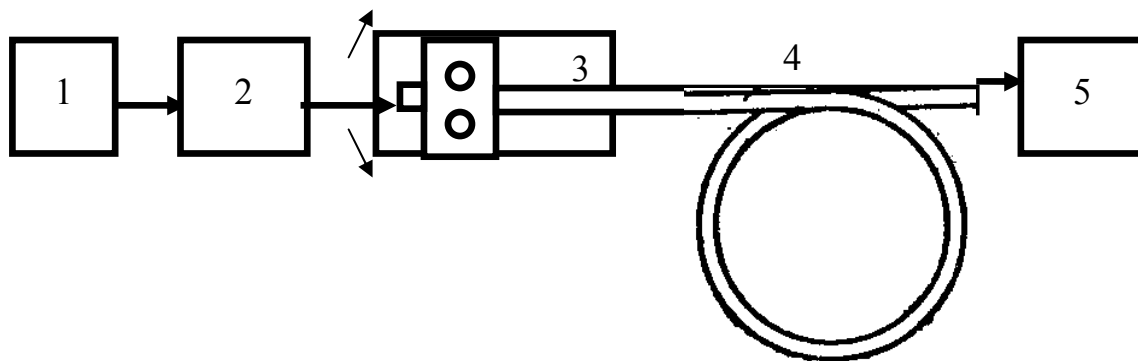


Рисунок 3.3 – Схема установки для измерения апертуры методом трех колец

Стол вращается вокруг оси, перпендикулярной оси симметрии волокна. Выходной торец волокна рассматривается через микроскоп 5. Четкое кольцо на границе сердцевины и оболочки наблюдается при определенном угле падения света на входной торец волокна, который фиксируют. Вращая стол в сторону, при которой ярко светится сердцевина, до момента появления такого же кольца – снова фиксируют угол падения света на входной торец волокна. Полусумма этих двух углов определяет апертурный угол. Метод применим главным образом для многомодовых волокон с диаметром больше 1 мм. Это связано с трудностями ввода оптического излучения под меняющимся углом в волокно меньшего диаметра.

## 4 ИЗМЕРЕНИЕ ДИАМЕТРА МОДОВОГО ПОЛЯ

Одной из основных характеристик одномодового волокна является распределение интенсивности светового поля в поперечном сечении на выходе волокна, определяемое еще как модовое пятно.

Распределение поля основной моды как для градиентных, так и для ступенчатых волокон вблизи длины волны отсечки с хорошей точностью можно аппроксимировать функцией Гаусса. При выполнении этого условия диаметр модового пятна можно определить как расстояние между двумя точками, в которых измеренная интенсивность света составляет уровень, в  $e^2$  раз меньший уровня максимальной интенсивности. Распределение интенсивности светового излучения на выходе из волокна показано на рисунке 4.1.

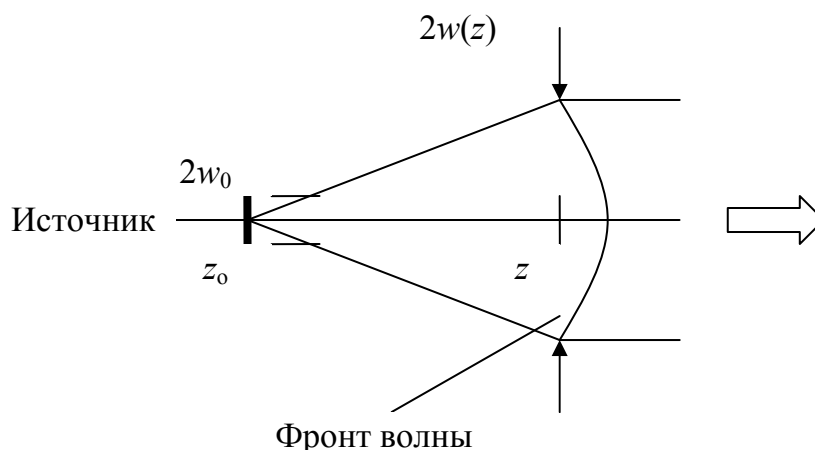


Рисунок 4.1 – Распределение интенсивности светового излучения на выходе из волокна

На рисунке 4.1 через  $z$  обозначено расстояние, измеряемое в направлении распространения,  $w(z)$  – радиус луча,  $w_0$  – радиус излучающей области на выходе волокна.

При этом на любом расстоянии  $z$  радиус луча  $w(z)$  определяется выражением

$$w^2(z) = w_0^2 \left[ 1 + \left( \lambda z / \pi w_0^2 \right)^2 \right]. \quad (4.1)$$

Особенностью Гауссова светового пучка является то, что он полностью определяется только двумя показателями: радиусом светового пучка  $w_0$  и длиной световой волны  $\lambda$ . Поэтому характеристики излучения, в частности распределение интенсивности светового поля на выходе волокна, могут быть определены исходя из измерений размеров светового пятна **в дальней зоне**. Анализ интенсивности излучения на некотором расстоянии от торца волокна позволяет осуществить подсчет эффективности соединения одномодового волокна с другими оптическими компонентами линии связи.

Другой метод измерения диаметра модового поля – **метод ближнего поля** – обеспечивает прямое измерение диаметра модового поля. Метод основан на измерении диаметра модового пятна на выходном торце одномодового волокна с помощью хорошо сфокусированной оптики, которая осуществляет передачу распределения мощности излучения по торцу волокна на площадку фотодиода. Результаты измерений с малыми погрешностями получаются только при использовании высококачественной оптической системы, при наличии хорошо обработанных и плоских торцов у исследуемого волокна и применении детекторов с большим динамическим диапазоном. Данный метод позволяет определять и геометрические параметры волокна, в частности диаметр и неконцентричность сердцевины.

Третий метод измерения диаметра модового поля – **метод поперечного смещения** – основан на измерении мощности излучения, выходящего из двух последовательно соединенных одномодовых волокон при их взаимном радиальном смещении в месте соединения. Размер модового пятна определяется по уровню  $1/e^2$  мощности излучения в зависимости от смещения. Максимальное значение проходящая световая мощность имеет при соосном расположении волокон.

Отличительной особенностью данного метода является его простота. При этом точность измерения не уступает другим описанным выше методам. В отличие от предыдущих, данный метод не позволяет определять геометрические параметры волокна.

## 5 ИЗМЕРЕНИЕ ДЛИНЫ ВОЛНЫ ОТСЕЧКИ ОДНОМОДОВЫХ ВОЛОКОН

---

В оптическом волноводе могут распространяться два типа волн: симметричные  $E_{nm}$  и  $H_{nm}$ , у которых, наряду с двумя поперечными, имеется по одной продольной составляющей, и несимметричные волны, имеющие одновременно по две продольные составляющие, одна из которых  $EH_{nm}$  с преобладанием электрической составляющей, другая  $HE_{nm}$  с преобладанием магнитной составляющей. Индекс  $n$  здесь означает число перемен знака в поперечном распределении поля вдоль угловой координаты, индекс  $m$  – вдоль радиуса. Следует отметить, связывая электромагнитную теорию с лучевой теорией, что симметричные волны соответствуют меридианным лучам, а несимметричные – косым лучам.

Область существования каждой моды зависит от нормированной частоты оптического световода  $v$ :

$$v = \frac{2\pi R}{\lambda} \sqrt{n_c^2 - n_u^2} = \frac{2\pi R}{\lambda} NA, \quad (5.1)$$

где  $R$  – радиус сердцевинки;  $NA$  – числовая апертура;  $\lambda$  – длина распространяющейся световой волны;  $n_c$  и  $n_u$  – показатели преломления сердцевинки и оболочки волокна.

Так как для оптических волокон радиус  $R$  сердцевинки, показатели преломления сердцевинки  $n_c$  и оболочки  $n_u$  имеют постоянные значения, область изменений нормированной частоты определяется изменением длины волны  $\lambda$ .

Среди направляемых мод особое положение занимает мода  $HE_{11}$ , у которой критическое значение нормированной частоты  $v_{11} = 0$ . Это основная (фундаментальная) мода ступенчатого оптического волокна, поскольку она распространяется при любой частоте света и любых структурных параметрах волокна. С точки зрения геометрической оптики мода  $HE_{11}$  образуется лучом, вводимым вдоль оси волокна, так как только характеристики такого луча не зависят от условий отражения на границе «сердцевина –



оболочка». Именно при работе на этой моде волокно называют одномодовым. Выбирая параметры оптического волокна, можно получить режим распространения одной только моды  $HE_{11}$ , что реализуется при условии

$$v = \frac{2\pi R}{\lambda} \sqrt{n_c^2 - n_u^2} < 2,405. \quad (5.2)$$

Минимальная длина волны, при которой в волокне распространяется только одна фундаментальная мода, называется длиной волны отсечки. Значение длины волны отсечки определяется из выражения

$$\lambda_0 = 2\pi R \sqrt{n_c^2 - n_u^2} / 2,405. \quad (5.3)$$

Длина волны отсечки одномодового волокна устанавливает самую низкую длину световой волны, которую следует использовать. При более низкой длине световой волны  $\lambda < \lambda_0$  в волокне будут распространяться и другие моды, которые принято называть высшими.

Измерение длины волны отсечки осуществляется двумя методами: методом передаваемой мощности и методом контроля диаметра модового пятна.

Измерение длины волны отсечки **методом передаваемой мощности** основано на измерении мощности светового излучения на выходе волокна в зависимости от длины волны. Для проведения измерений в качестве источника излучения используется перестраиваемый по длине волны лазер с шириной спектра, не превышающей 10 нм. Метод заключается в сравнении сигнала, передаваемого по одномодовому волокну небольшой длины, с образцовым сигналом, который получают на выходе либо испытываемого волокна, согнутого в кольцо диаметром менее 10 см (метод изгиба), либо многомодового волокна длиной от 1 до 2 м.

Процедура измерений включает два этапа. На первом этапе проводят измерение оптической мощности  $P_1(\lambda)$  в испытываемом волокне небольшой длины (прямом либо слабоизогнутым). На втором этапе измеряют мощность  $P_2(\lambda)$  на выходе испытываемого волокна, изогнутого в кольцо радиусом, составляющим 3–5 см,

или мощность  $P_3(\lambda)$  на выходе многомодового волокна длиной 1–2 м. Выходную мощность регистрируют на каждой длине волны диапазона измерений, предположительно включающего длину волны отсечки. Отношение передаваемой мощности  $P_1(\lambda)$  к  $P_2(\lambda)$  или  $P_1(\lambda)$  к  $P_3(\lambda)$  рассчитывают согласно выражению

$$\xi = 10 \lg \frac{P_1(\lambda)}{P_i(\lambda)}, \quad (5.4)$$

где  $i$  – индекс равный двум или трем в зависимости от метода.

В первом случае (использование изогнутого в кольцо одномодового волокна) длину волны отсечки  $\lambda_0$  определяют по максимальной длине волны, при которой отношение передаваемой мощности  $\xi(\lambda)$  становится равным 0,1 дБ (рисунок 5.1).

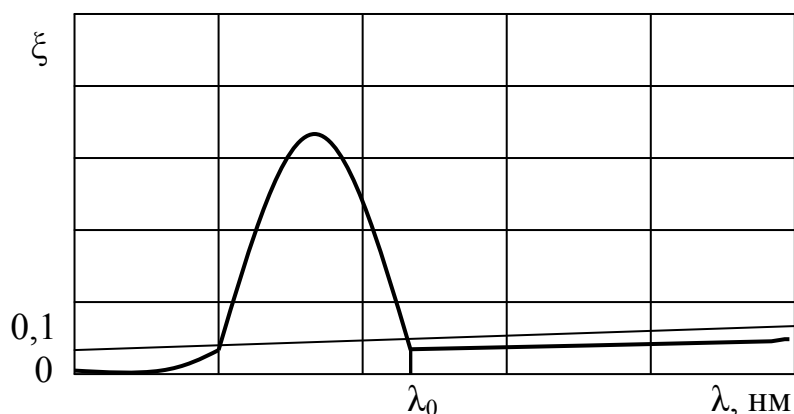


Рисунок 5.1 – Измерение длины волны отсечки с использованием изогнутого в кольцо одномодового волокна

Во втором случае (использование отрезка многомодового волокна) длину волны отсечки  $\lambda_0$  определяют при пересечении прямой 1 (рисунок 5.2), проведенной на 0,1 дБ выше линейного участка 2, характеризующего отношение передаваемых мощностей  $\xi(\lambda)$ .

При переходе через длину волны, равную длине волны отсечки  $\lambda_0$ , в обоих случаях происходит изменение пропускания волокна. В первом случае – сильно изогнутого одномодового волокна – изменение пропускания волокна происходит за счет рассеяния на изгибах по сравнению с прямым или слабоизогну-

тым волокном. Во втором случае – сравнения передаваемой световой мощности прямого одномодового волокна и многомодового волокна – определяющим является то, что спектральная зависимость пропускания многомодового волокна не имеет резких изменений.

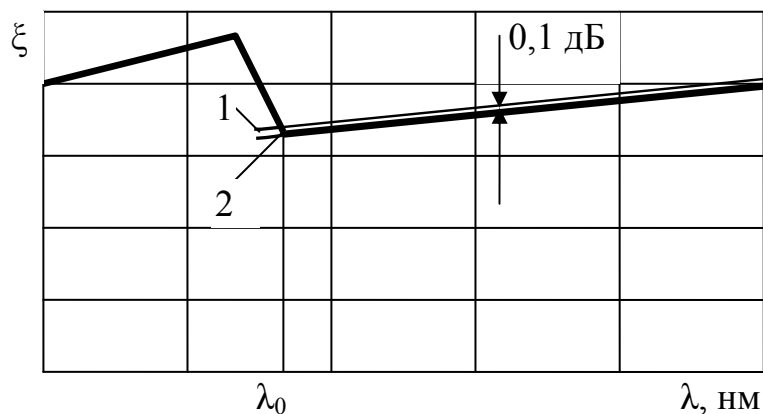


Рисунок 5.2 – Измерение длины волны отсечки с использованием многомодового волокна

Применение для измерений коротких образцов связано с необходимостью уменьшения до минимально возможного влияния микроизгибов, под действием которых длина волны отсечки перемещается в коротковолновую область.

Измерение длины волны отсечки методом контроля диаметра модового поля основано на зависимости диаметра модового пятна  $W$  от длины волны передаваемой по волокну световой мощности (рисунок 5.3).

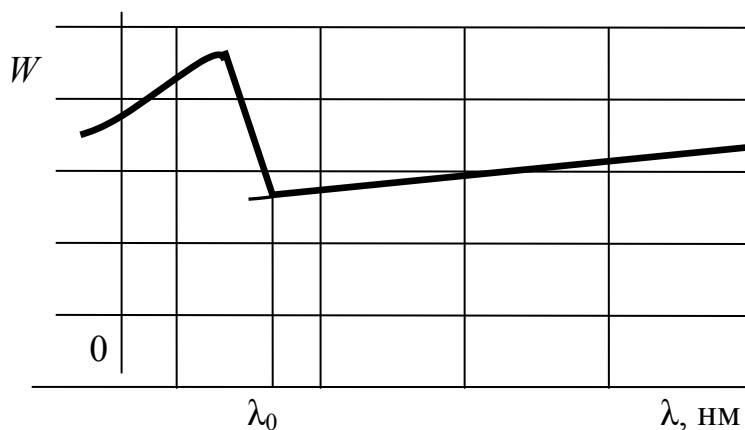


Рисунок 5.3 – Измерение длины волны отсечки методом контроля диаметра модового поля

Процедура измерений включает два этапа. На первом этапе измеряется диаметр модового пятна  $W$  на выходном торце волокна в зависимости от длины волны. Измерения проводятся одним из методов, приведенных в разделе 4. На втором этапе строится график, отражающий зависимость диаметра модового пятна  $W$  от длины волны, и определяется длина волны отсечки по резкому увеличению диаметра модового пятна  $W$ .

## 6 ИЗМЕРЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

### 6.1 Анализ оптического спектра

Анализ оптического спектра представляет собой измерение оптической мощности в зависимости от длины волны. В связи с развивающимися технологиями *WDM*-уплотнения анализ оптического спектра становится одним из важнейших видов измерений в высокоскоростных волоконно-оптических системах передачи информации. В общем виде анализ оптического спектра проводится по схеме, приведенной на рисунке 6.1.

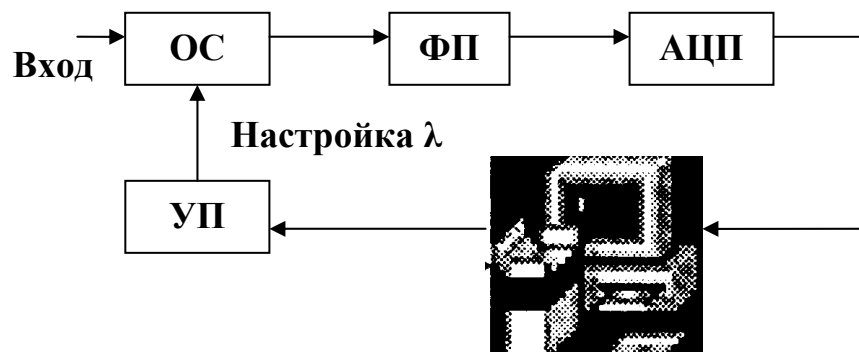


Рисунок 6.1 – Обобщенная схема анализатора оптического спектра

Входной сигнал поступает через оптическую систему (ОС) на фотоприемник (ФП), а затем после аналого-цифрового преобразования (АЦП) на компьютер. Компьютер осуществляет обработку данных, их отображение и управление оптической системой (УП). Алгоритмы управления и обработки данных определяются оптической системой анализатора.

Для узкополосного с высоким разрешением спектрального анализа используются методы оптической фильтрации. В этом случае оптическая система анализатора спектра представляет собой перестраиваемый по длине волны оптический фильтр. Оптический фильтр проводит пространственное разделение входного излучения на спектральные составляющие, которые фотоприемником преобразуются в электрический ток, пропорциональный

мощности соответствующей спектральной составляющей. В качестве оптического фильтра могут быть использованы интерферометр Фабри – Перо или дифракционные решетки.

## 6.2 Анализаторы оптического спектра на основе интерферометра Фабри – Перо

Классический интерферометр Фабри – Перо (*FPI*), выполняющий функции оптического фильтра, состоит из двух параллельных зеркал с высоким коэффициентом отражения (рисунок 6.2). Зеркала образуют оптический резонатор, фильтрующий входное оптическое излучение.

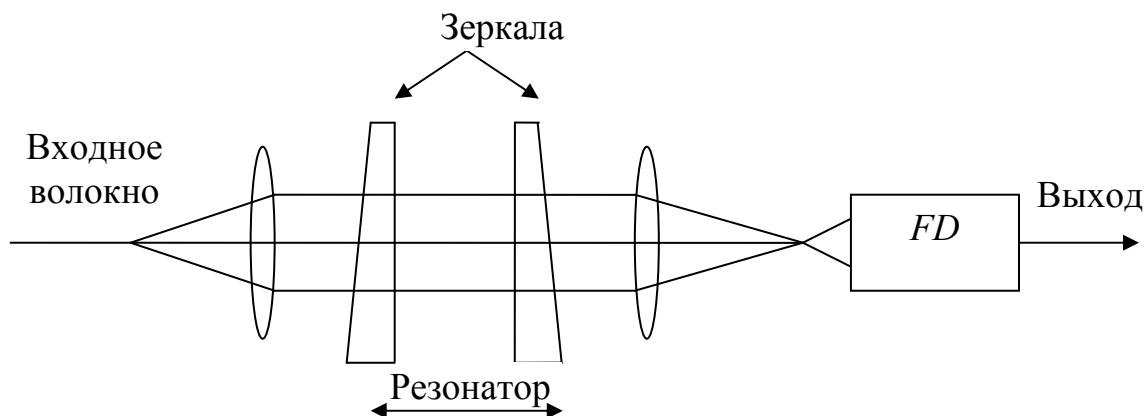


Рисунок 6.2 – Оптическая система анализатора оптического спектра на основе интерферометра Фабри – Перо

Исследуем интерференцию многих световых пучков, возникающую при прохождении плоской монохроматической волны через две параллельные пластины.

Пусть на первое зеркало *A* интерферометра падает волна амплитуды  $E_0$  под углом  $\varphi$  (рисунок 6.3).

Волна проходит в полость резонатора с коэффициентом пропускания  $t_0$  и, частично отражаясь на втором зеркале *B* с коэффициентом отражения пластины  $r_0$ , выходит из резонатора с амплитудой  $E_1$ :

$$\dot{E}_1 = t_0 t_1 \dot{E}_0 e^{-ikl} = t E_0 e^{-ikl}, \quad (6.1)$$

где  $t_1$  – коэффициент пропускания второго зеркала;  $t = t_0 t_1$  – коэффициент пропускания обоих зеркал;  $kl = 2\pi nd/\lambda \cos \varphi$  – набег фазы;  $d$  – длина резонатора;  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число;  $n$  – показатель преломления;  $\lambda$  – длина волны в вакууме;  $\varphi$  – угол падения луча.

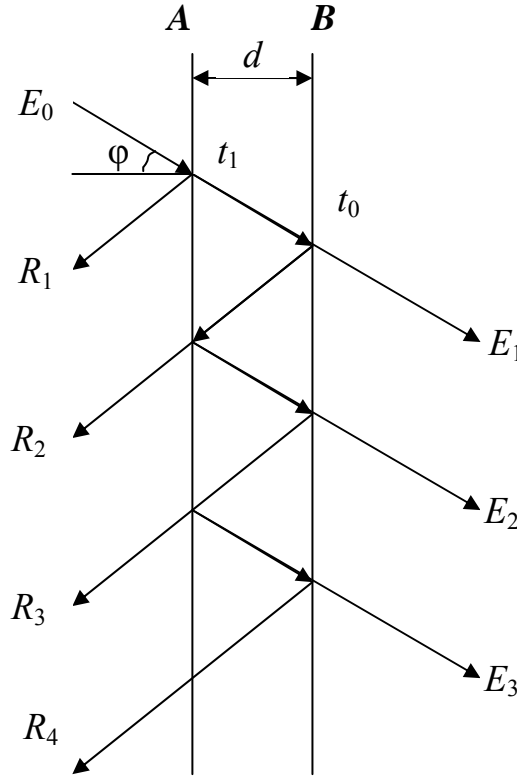


Рисунок 6.3 – Ход лучей в интерферометре Фабри – Перо

При дальнейшем распространении электромагнитное поле, отраженное от второго зеркала, претерпевает еще два отражения, и на выходе второй луч будет с амплитудой  $E_2$  :

$$\dot{E}_2 = tr_0^2 \dot{E}_0 e^{-i3kl} = trE_0 e^{-i3kl}, \quad (6.2)$$

где  $r = r_0^2$ .

При достаточно большом коэффициенте отражения зеркал  $r_0$  на выходе имеем интерференцию многих лучей. Разность хода между любыми соседними лучами есть  $\Delta = 2dn \cos \varphi$ , а разность фаз между этими же лучами определяется выражением

$$\delta = \frac{4\pi}{\lambda} dn \cos \varphi. \quad (6.3)$$

Примем начальную фазу на выходе из интерферометра для первого прямопроходящего луча за ноль. Тогда результирующее поле, представляющее сумму всех частичных полей  $E_i$ , может быть представлено в виде

$$E = \sum_{i=1}^N E_i = tE_0 \left[ 1 + re^{-i\delta} + r^2 e^{-i2\delta} + \dots + r^N e^{-iN\delta} \right]. \quad (6.4)$$

Последний ряд убывающий (поскольку  $r < 1$ ) и, соответственно

$$E = \frac{tE_0}{1 - re^{-i\delta}}. \quad (6.5)$$

Сигнал на выходе фотоприемника пропорционален не значению электрического поля, а значению интенсивности световой волны, которое можно определить как

$$I = \frac{1}{2} E \cdot E^*.$$

В результате интенсивность проходящей световой волны будет:

$$I_{\text{пр}} = I_0 \frac{t}{(1-r)^2 + 4r \sin^2(\delta/2)} = \frac{(1-r)^2}{(1-r)^2 + 4r \sin^2(\delta/2)}, \quad (6.6)$$

где  $I_0 = E_0^2$  – интенсивность падающей волны;  $r$  – коэффициент отражения зеркал по мощности.

Из полученного соотношения (6.6) следует, что интерферирующие лучи усилят друг друга и интенсивность прошедшего луча будет максимальна всякий раз, когда  $\sin^2(\delta/2) = 0$ , т. е. когда  $(\delta/2) = m\pi$ , где  $m > 0$  – любое целое число. Очевидно, что резонансные частоты интерферометра  $f_M$  будут определяться выражением

$$f_M = \frac{mc}{2dn \cos \varphi}, \quad (6.7)$$

где  $c$  – скорость света в вакууме.

Однако больший интерес, чем резонансные частоты, представляют интервалы между ними. Ширина свободной зоны между



максимумами по частоте  $S(f)$ , определенная из соотношения (6.7), будет [10]:

$$S(f) = \frac{c}{2nd \cos \varphi}. \quad (6.8)$$

А в терминах длины волны расстояние между максимумами определится выражением

$$S(\lambda) = \frac{\lambda^2}{2nd \cos \varphi}. \quad (6.9)$$

Как видно из приведенных выражений, резонансные частоты интерферометра и ширина свободной зоны между максимумами зависят от расстояния между зеркалами  $d$  и наклона зеркал интерферометра (угол  $\varphi$ ) относительно входного луча.

Охарактеризуем форму контура интерференционной полосы. Обозначим через  $\varepsilon$  ширину интерференционной полосы – расстояние между двумя точками, для которых  $I_{\text{пр}}/I_0 = 1/2$ . Это соотношение интенсивностей прошедшего  $I_{\text{пр}}$  и падающего  $I_0$  излучения получается при фазовом сдвиге:

$$\frac{\delta}{2} = m\pi \pm \frac{\varepsilon}{2}. \quad (6.10)$$

Тогда, поскольку  $\varepsilon/2$  мало и можно заменить значение  $\sin \varepsilon/2$  его аргументом, получим из формулы (6.6):

$$\begin{aligned} \frac{I_{\text{пр}}}{I_0} &= \frac{(1-r)}{(1-r)^2 + 4r \sin^2(\varepsilon/2)} \approx \\ &\approx \frac{(1-r)^2}{(1-r)^2 + 4r(\varepsilon/2)^2} = \frac{1}{1 + 4(\varepsilon/2)^2 \frac{r}{(1-r)^2}} = \frac{1}{2}. \end{aligned} \quad (6.11)$$

Вычислив  $\varepsilon$  из соотношения (6.11), получим, что ширина интерференционной полосы  $\varepsilon$  определяется выражением

$$\varepsilon = \frac{1-r}{\sqrt{r}}. \quad (6.12)$$

Из соотношения (6.12) следует, что характер распределения света на выходе из интерферометра существенно зависит от

коэффициента отражения зеркал  $r$ . Распределение интенсивности света, пропускаемого интерферометром, приведено на рисунке 6.4. Характерно, что чем выше коэффициент отражения  $r$ , тем острее максимумы, разделенные широкими минимумами.

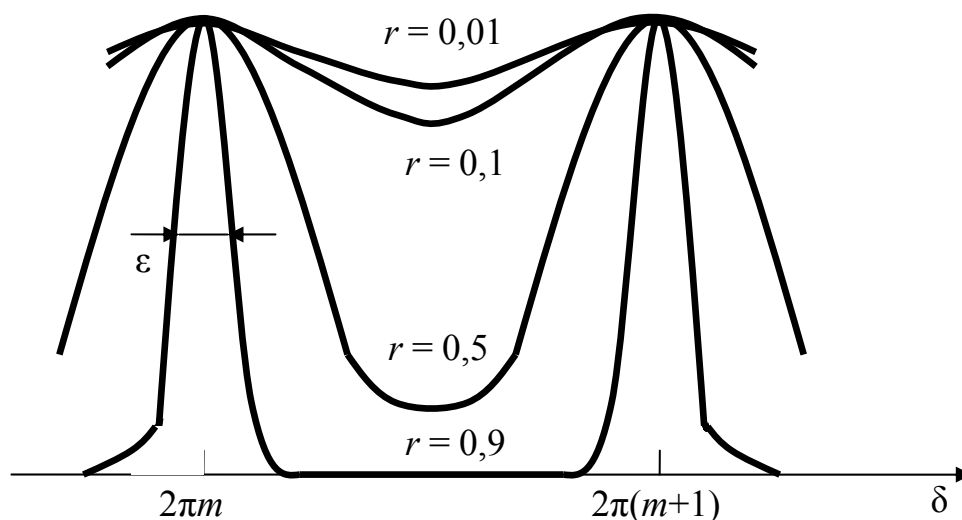


Рисунок 6.4 – Распределение интенсивности при многолучевой интерференции

Связь между шириной интерференционной полосы и шириной интервала между максимумами (которому соответствует изменение  $\delta$  на  $2\pi$ ) характеризуется критерием резкости  $F$ :

$$F = \frac{2\pi}{\varepsilon} = \frac{\pi\sqrt{r}}{1-r}. \quad (6.13)$$

Чем выше резкость полос, тем более четко разделяются полосы, принадлежащие различным спектральным составляющим падающего излучения. В реальных интерферометрах при коэффициенте отражения зеркал  $r \approx 0,9$  резкость  $F \approx 30$ , и расстояние между двумя соседними максимумами в 30 раз больше ширины полосы каждого из них.

Оценим, на какой угол будут разведены два пучка света с длинами волн  $\lambda$  и  $\lambda + d\lambda$ , т. е. определим дисперсию интерферометра  $D$ :

$$D = \frac{d\varphi}{d\lambda}. \quad (6.14)$$

Условием возникновения максимума интенсивности интерференционной картины является соотношение

$$\frac{\delta}{2} = \frac{2\pi nd \cos \varphi}{\lambda} = m\pi. \quad (6.15)$$

Дифференцируя его, получим:

$$-2nd \sin \varphi d\varphi = m d\lambda$$

и окончательно:

$$D = \left| \frac{d\varphi}{d\lambda} \right| = \frac{m}{2nd \sin \varphi}. \quad (6.16)$$

Как видно из формулы (6.16), дисперсия наибольшая для центрального кольца интерференционной картины, где угол  $\varphi$  минимален. Измерения обычно проводят в области второго или третьего кольца.

Основными факторами, которые не позволяют достичь предельно узких полос пропускания, являются непараллельность зеркал, наличие потерь в оптической системе, неравномерность поверхности зеркал. Разрешающая способность интерферометра в основном зависит от коэффициента отражения зеркал и расстояния между ними. Поэтому настройка длины волны в интерферометре осуществляется регулировкой расстояния между зеркалами либо наклоном интерферометра относительно входного луча. Чтобы избежать неоднозначности при этих измерениях, диапазон изменений базы интерферометра не должен превышать расстояние, равное половине длины волны ( $\lambda/2$ ) источника излучения. Обычно для перемещения одного из зеркал используют пьезоэлектрическую керамику.

### **6.3 Анализаторы оптического спектра на основе дифракционной решетки**

Анализаторы спектра на основе дифракционной решетки, используемой в качестве перестраиваемого оптического фильтра, наиболее широко применяются в волоконной оптике. Типичная

оптическая система анализатора спектра с дифракционной решеткой приведена на рисунке 6.5.

Совокупность элементов оптической системы: входное отверстие, дифракционная решетка, выходное отверстие, зеркала – служит для разделения входного оптического излучения на спектральные составляющие и называется монохроматором.

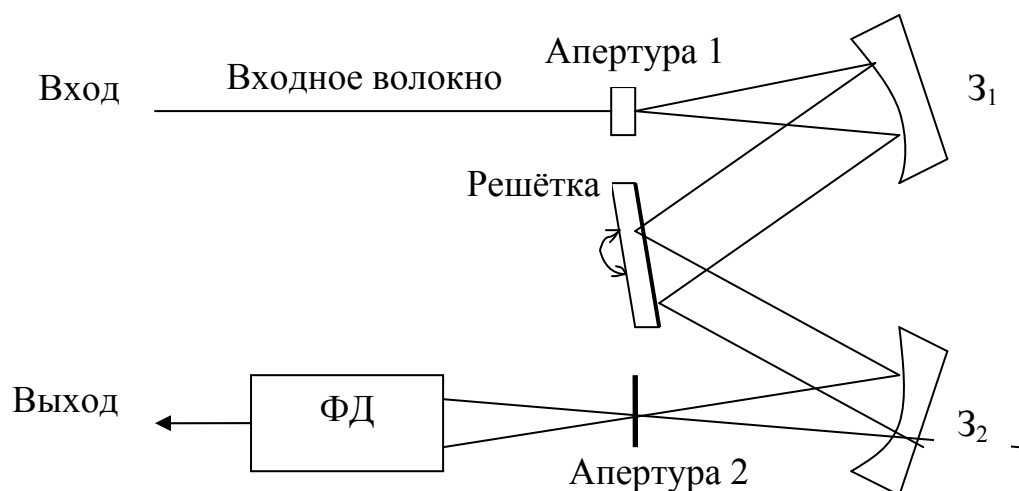


Рисунок 6.5 – Оптическая система анализатора оптического спектра с однопроходным монохроматором

В монохроматоре дифракционная решетка выводит дифрагированный свет под углом, зависящим от длины волны. В видимом диапазоне для пространственного разделения света в зависимости от длины волны зачастую применяется призма, но в инфракрасном излучении, используемом в оптоволоконных линиях, применение призм неэффективно. Это связано с тем, что изменение показателя преломления стекла в зависимости от длины волны в диапазоне 1–2 мкм очень мало. Поэтому в анализаторах спектра для телекоммуникационных систем используют дифракционные решетки, которые обеспечивают лучшее разделение по длинам волн, т. е. лучшую разрешающую способность. Монохроматор вместе с фотодиодом, который фиксирует спектр излучения, называется спектрометром.

## 6.4 Дифракционная решетка анализатора оптического спектра

Дифракционная решетка в анализаторах оптического спектра представляет собой расположенные последовательно через равные промежутки параллельные щели (в случае пропускающей решетки) или зеркала (в случае отражающей).

Пусть на пропускающую решетку из  $N$  щелей с периодом  $d$  и размером щелей  $b$  падает плоская монохроматическая волна. Будем считать, что  $N$  – большое число. Рассмотрим распределение интенсивности при дифракции в параллельных лучах от такой решетки. Найдем интенсивность  $I_\varphi$  в направлении, составляющем угол  $\varphi$  с нормалью к плоскости решетки.

От элемента  $dx$   $n$ -й щели в направлении оси  $Z'$  распространяется волна

$$dE_\varphi = \frac{E_0 dx}{b} e^{i[\omega t - [k(n-1)d + kx] \sin \varphi]}, \quad (6.17)$$

где  $E_0$  – амплитуда напряженности электрического поля падающей на решетку волны;  $k(n-1)d \sin \varphi$  – запаздывание по фазе волны от  $n$ -й щели по отношению к первой щели;  $kx \cdot \sin \varphi$  – запаздывание по фазе волны от элемента  $dx$   $n$ -й щели по отношению к  $(n-1)$ -й щели.

Обозначим через  $E_{1\varphi}$  напряженность поля в направлении оси  $Z'$ , создаваемую первым структурным элементом решетки. Для первой щели поле  $E_{1\varphi}$  определяется суммированием волн от всех элементарных участков щели  $dx$  и выражается формулой

$$E_{1\varphi} = \frac{E_0 e^{i\omega t}}{b} \int_0^b e^{-ikx \sin \varphi} dx = E_0 e^{i\omega t} \frac{\sin u}{u}, \quad (6.18)$$

где  $u = \pi b \sin \varphi / \lambda$ .

При нормальном падении монохроматической волны на плоскость решетки (рисунок 6.6) разность хода соседних пучков  $\Delta = d \sin \varphi$ , откуда запаздывание по фазе волны от второй щели по сравнению с волной от первой щели будет:

$$\delta = k\Delta = \frac{2\pi d \sin \varphi}{\lambda}. \quad (6.19)$$

Напряженность  $E_{2\varphi}$ , создаваемая в направлении оси  $Z'$  второй щелью отличается от напряженности  $E_{1\varphi}$  только множителем  $\exp(i\delta)$ , выражающим запаздывание этой волны по фазе. Напряженность от третьей щели имеет вид  $E_{3\varphi} = E_{1\varphi} \exp(2i\delta)$  и т. д.

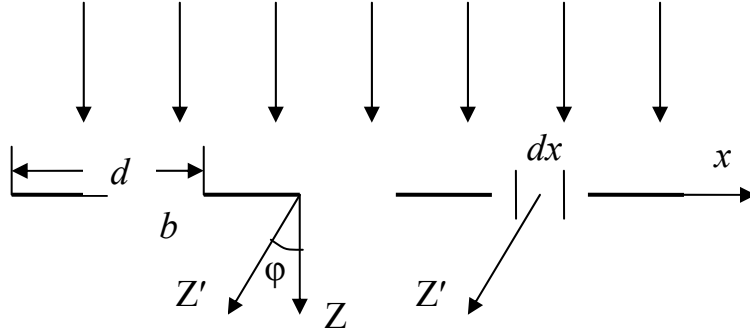


Рисунок 6.6 – Дифракционная пропускающая решетка

Полная напряженность поля в направлении оси  $Z'$ , создаваемая всеми  $N$  щелями решетки, представляется суммой геометрической прогрессии:

$$E_{\varphi} = E_{1\varphi} \left[ 1 + e^{i\delta} + e^{i2\delta} + \dots + e^{i(N-1)\delta} \right] = E_{1\varphi} \frac{1 - e^{iN\delta}}{1 - e^{i\delta}}. \quad (6.20)$$

Умножая  $E_{\varphi}$  на комплексно-сопряженное и взяв реальную часть, получаем выражение для интенсивности света в направлении оси  $Z'$ :

$$I_{\varphi} = I_0 \left( \frac{\sin u}{u} \right)^2 \left( \frac{\sin N\delta/2}{\sin \delta/2} \right)^2, \quad (6.21)$$

где  $I_0 (\sin u/u)^2$  – интенсивность от одной щели, а последний множитель в выражении (6.21) учитывает интерференцию между пучками от всех щелей.

В результате интерференции  $N$  когерентных вторичных волн происходит перераспределение светового потока по направлениям. В тех направлениях  $\varphi$ , для которых  $\delta/2 = m\pi$  ( $m = 0, \pm 1,$

$\pm 2, \dots$ ), второй множитель в формуле (6.21) принимает значения  $N^2$ :

$$I_{\varphi} = I_0 \left( \frac{\sin u}{u} \right)^2 N^2$$

и интенсивность в  $N^2$  раз больше, чем от одной щели в том же направлении. Это результат того, что разность хода вторичных волн для этих направлений равна целому числу длин волн и все они приходят в точку наблюдения в фазе. В отсутствие интерференции суммарная интенсивность в этих направлениях была бы пропорциональна числу щелей  $N$ . Максимумы, возникающие при выполнении условия  $\delta/2 = m\pi$ , называются главными максимумами. Они появляются, когда одновременно  $\sin N\delta/2$  и  $\sin \delta/2$  равны нулю. Между главными максимумами возникает  $(N-1)$  минимумов, когда  $\sin N\delta = 0$ , но  $\sin \delta \neq 0$ . Между минимумами есть дополнительные максимумы, в которых интенсивность света мала по сравнению с интенсивностью главных максимумов. При увеличении числа дифрагировавших пучков ( $N = 200000$  в современных решетках) главные максимумы становятся резкими, а интенсивность в промежутках между ними можно считать равной нулю. График функции  $\sin^2(N\delta/2) / \sin^2(\delta/2)$  приведен на рисунке 6.7.

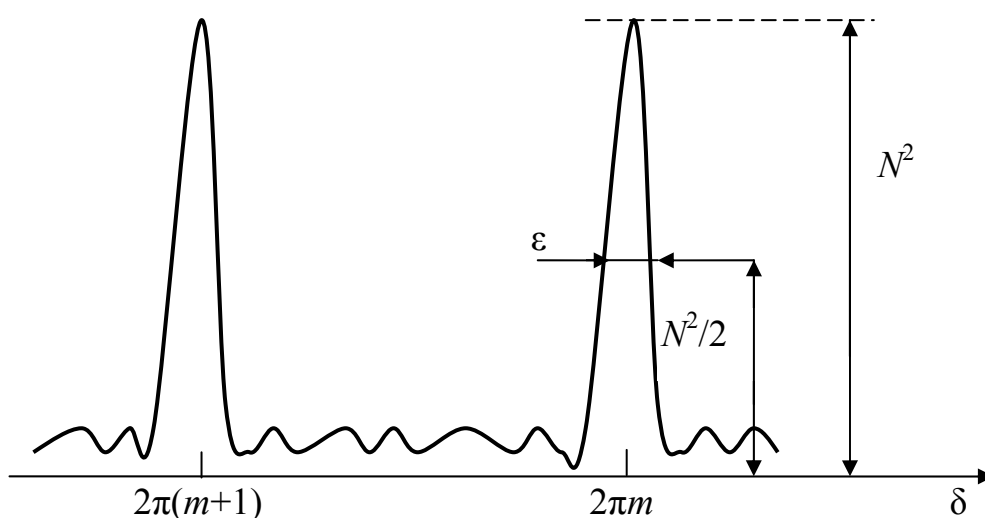


Рисунок 6.7 – Распределение интенсивности при интерференции  $N$  световых пучков

Рассмотрим роль второго сомножителя в формуле (6.21), для чего исследуем функцию  $\sin^2(u)/u^2$ , где  $u = \pi b \sin \varphi / \lambda$ . Этот множитель дает минимумы при тех значениях функции  $u$ , которые кратны  $\pi$ :  $u = m\pi$ , где  $m = 1, 2, 3, \dots$

В результате совместного действия интерференции  $N$  пучков и дифракции от щели получим картину распределения интенсивности, представленную на рисунке 6.8.

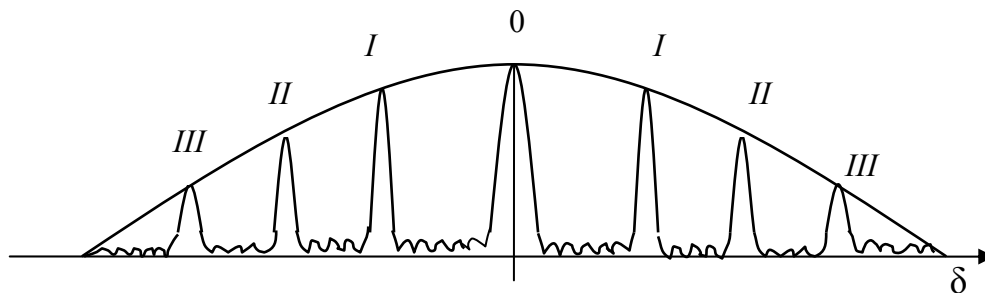


Рисунок 6.8 – Результат совместного действия интерференции  $N$  пучков и дифракции от щели

Для дальнейшего анализа учтем, что

$$\sin \varphi = \frac{m\lambda}{d},$$

и функцию  $u$  можно записать в виде

$$u = \frac{\pi b}{\lambda} \frac{m\lambda}{d} = \pi m \frac{b}{d}. \quad (6.22)$$

В этом случае выражение для интенсивности главных максимумов можно представить как

$$I_M = I_0 N^2 \frac{d^2}{(\pi b m)^2} \sin^2 \left( \frac{\pi m b}{d} \right). \quad (6.23)$$

Анализ формулы (6.23) показывает, во-первых, что интенсивность главных максимумов пропорциональна  $1/m^2$ , т. е. с увеличением порядка дифракции интенсивность главных максимумов уменьшается пропорционально  $m^2$ . Во-вторых, интенсивность света в  $m$ -м максимуме зависит от отношения  $b/d$ . При  $bm/d = m'$ , где  $m'$  – целое число, синус в (6.23) обращается в нуль



и интенсивность  $m$ -го главного максимума равна нулю. Особый интерес представляет случай, когда решетка образована системой щелей шириной  $b = d/2$ . В этом случае в распределении интенсивности можно учитывать лишь три главных максимума – нулевой и два первых при  $m = \pm 1$ .

Направления на главные максимумы зависят от длины волны (за исключением случая  $m = 0$ ). Поэтому решетка разлагает падающее немонахроматическое излучение в спектры нескольких порядков и может использоваться в качестве диспергирующего элемента в спектральных приборах.

Для обычной щелевой решетки интенсивность дифрагировавшего света распределена в основном между всеми главными максимумами. У современных решеток штрихам придают определенный профиль. Это позволяет сконцентрировать большую часть энергии дифрагировавшего света в одном или двух главных максимумах, лежащих по одну сторону от центрального.

Оценим, на какой угол будут разведены два дифрагировавших пучка света с длинами волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2 = \lambda_1 + d\lambda$ , т. е. определим угловую дисперсию решетки  $D$ :

$$D = \frac{d\varphi}{d\lambda}.$$

Будем исходить из условия возникновения главного максимума при нормальном падении света на решетку:

$$d \sin \varphi = m\lambda.$$

Дифференцируя, получим:

$$d \cos \varphi d\varphi = m d\lambda$$

и окончательно:

$$D = \left| \frac{d\varphi}{d\lambda} \right| = \frac{m}{d \cos \varphi} = \frac{\sin \varphi}{\lambda \cos \varphi} = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\lambda}. \quad (6.24)$$

Таким образом, угловая дисперсия при заданном значении угла дифракции  $\varphi$  не зависит от периода и других параметров решетки. Она растет с увеличением угла дифракции  $\varphi$ . Для спектра определенного порядка  $m$  дисперсия тем больше, чем меньше период решетки  $d$ . Очевидно, что дисперсия дифракционной

решетки изменяется с длиной волны. Это приводит к снижению разрешающей способности монохроматора. Некоторые спектроанализаторы имеют специальные устройства, корректирующие влияние этого эффекта.

Наряду с дисперсией, для характеристики способности прибора разлагать излучение на составляющие вводят понятие разрешающей силы решетки. Разрешающая сила решетки определяется отношением  $\lambda/\delta\lambda$ , где  $\delta\lambda = |\lambda_2 - \lambda_1|$  – разность длин волн между двумя максимумами, для которых выполняется критерий Рэлея. Согласно критерию Рэлея две спектральные линии равной интенсивности различимы, если максимум первой с длиной волны  $\lambda_1$  совпадает с ближайшим минимумом второй с длиной волны  $\lambda_2$  (рисунок 6.9)

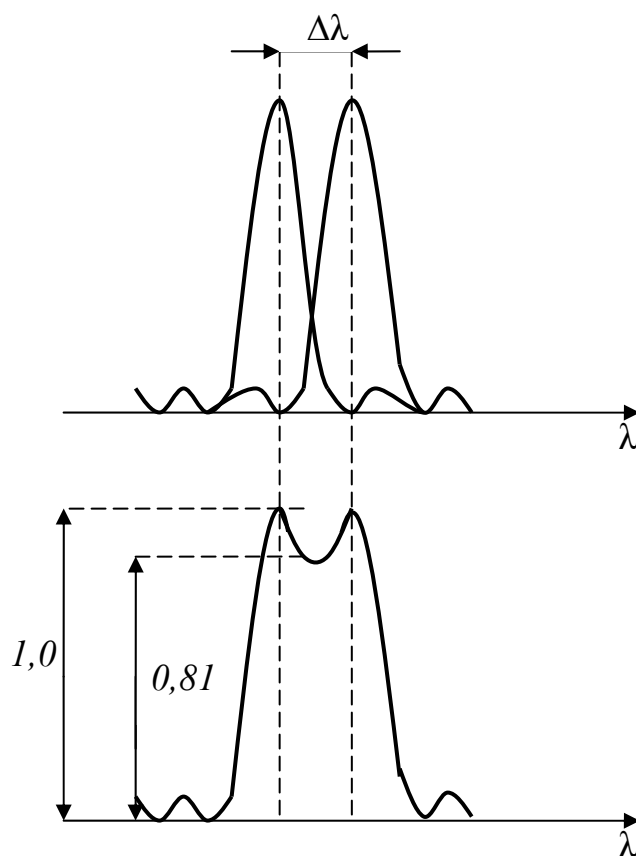


Рисунок 6.9 – Критерий Рэлея

Для вычисления разрешающей силы дифракционной решетки рассмотрим максимумы, выделенные дифракционной решеткой с числом штрихов  $N$ . Пусть максимуму излучения с длиной волны

$\lambda_1$  соответствует угол дифракции  $\varphi'$ , а максимуму излучения с длиной волны  $\lambda_2 - \varphi''$ . Условия возникновения главных максимумов:

$$d \sin \varphi'_{\max} = m\lambda_1,$$

$$d \sin \varphi''_{\max} = m\lambda_2.$$

Известно, что между двумя главными максимумами располагается  $(N-1)$  минимум. Условие возникновения первого минимума спектральной линии с длиной волны  $\lambda_2$

$$d \sin \varphi''_{\max} = (m + 1/N)\lambda_2.$$

Согласно критерию Рэлея  $\varphi' = \varphi''$ , т. е.

$$m\lambda_1 = m\lambda_2 + \lambda_2/N,$$

откуда

$$\lambda/(\lambda_2 - \lambda_1) = mN. \quad (6.25)$$

Левую часть выражения (6.25) с достаточной точностью можно записать как

$$\lambda/\delta\lambda = mN. \quad (6.26)$$

Отметим, что разрешающая сила дифракционной решетки в спектре заданного порядка  $m$  определяется только полным числом штрихов  $N$  в отличие от дисперсии, которая зависит от периода  $d$ , т. е. от числа штрихов на единицу длины решетки. При заданном значении постоянной решетки  $d$  разрешающая способность решетки возрастает с увеличением длины ее рабочей области.

Таким образом, эффективность дифракционной решетки как оптического фильтра зависит от числа штрихов на 1 мм, общего числа освещенных линий решетки, угла дифракции, длины измеряемой волны, а эффективность спектроанализатора в целом – от размеров входной и выходной апертур, а также качества коллимирующих оптических компонентов.

## 6.5 Конструкции анализаторов оптического спектра на основе дифракционных решеток

Однопроходный монохроматор, оптическая схема которого приведена на рисунке 6.5, состоит из входного отверстия, фокусирующей системы, дифракционной решетки, коллимирующей системы, выходного отверстия. Входное отверстие, выходное отверстие и количество освещенных на дифракционной решетке линий являются ключевыми факторами, обеспечивающими минимальную ширину полосы пропускания. Следовательно, важно иметь высококачественную оптическую систему с минимальной выходной апертурой. Дифракционная решетка, вращаясь, осуществляет отражение света под углом пропорциональным длине волны  $\lambda$ . Изменяя угол падения на дифракционную решетку, можно настроить спектроанализатор на определенную длину волны. Для вращения дифракционной решетки используются очень точные редукторы с прецизионными следящими системами. Угол наклона дифракционной решетки точно контролируется. Разрешающая способность такого монохроматора составляет  $\Delta\lambda \approx 0,1$  нм при  $\lambda = 1550$  нм. Повысить избирательность монохроматора можно за счет увеличения коллимирующего пучка и размеров дифракционной решетки, но это приводит к увеличению габаритов устройства. Более эффективным способом повышения избирательности является каскадное соединение двух монохроматоров. Сдвоенный монохроматор эквивалентен паре однопроходных, но его реализация требует точной настройки соединения монохроматор – монохроматор, и поэтому такие схемы практически не используются.

Альтернативой сдвоенному монохроматору является двухпроходной монохроматор, выполненный по схеме, приведенной на рисунке 6.10. В такой схеме сочетаются достоинства широкого динамического диапазона сдвоенного монохроматора при улучшенной избирательности одиночного монохроматора, так как дифракционная решетка и коллимирующая система используются дважды по ходу светового луча.

В соответствии со схемой коллимированный входной пучок света попадает на дифракционную решетку и затем рассеивается на ряд лучей, пропорциональных длине волны. Выделенная длина волны поворотом дифракционной решетки согласуется с апертурой, ширина которой определяет полосу пропускания. Отфильтрованный свет вновь через коллимирующую систему посылается на дифракционную решетку. Второй проход приводит к более высокому разрешению, чем у однопроходного монохроматора, и высокому динамическому диапазону, как у двойного.

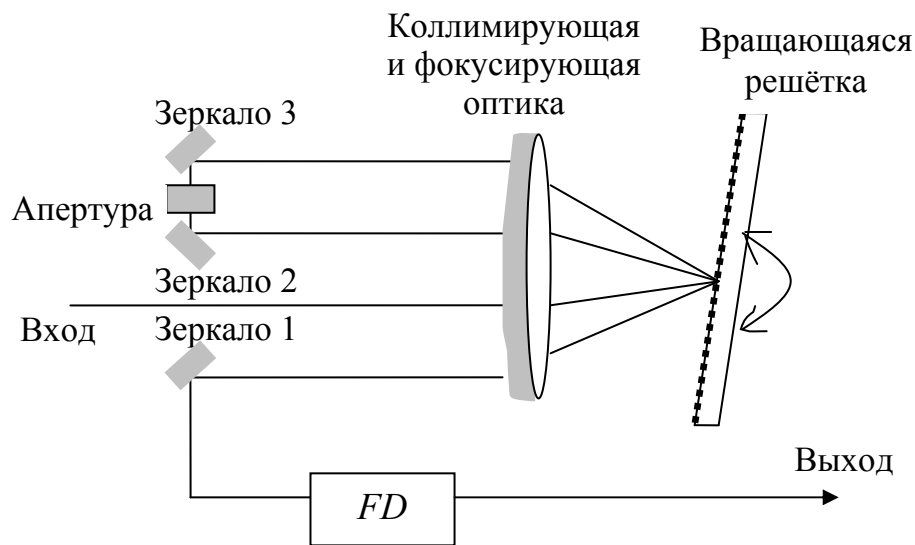


Рисунок 6.10 – Оптическая система анализатора оптического спектра на двухпроходном монохроматоре

В отличие от рассмотренного выше классического монохроматора в другой схеме – монохроматоре Литтмана – дифракционная решетка обеспечивает большую угловую дисперсию длины волны за счет освещения под очень малым углом (рисунок 6.11).

Дифрагированный решеткой свет отражается зеркалом вновь на решетку для второго прохода и затем фокусируется на выходном отверстии оптической системы. Основное преимущество конфигурации Литтмана заключается в высоком разрешении при небольших размерах монохроматора. Решетка размещена под небольшим углом и для полного освещения ее достаточно малого размера коллимируемого пучка света, в то время как для освещения большего числа линий решетки обычно требуется большое фокусное расстояние при коллимировании.

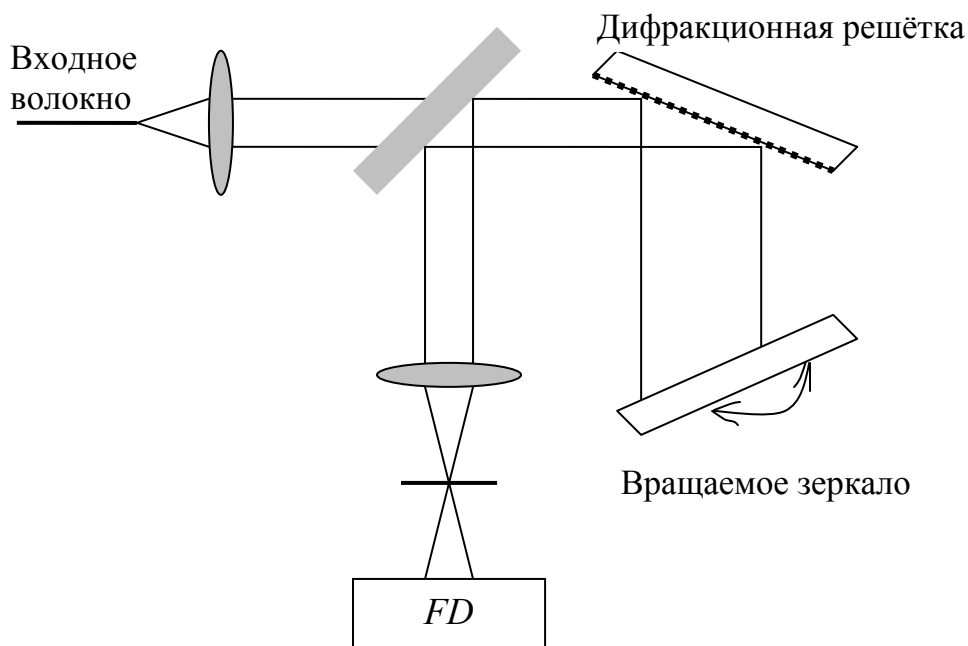


Рисунок 6.11 – Оптическая система анализатора оптического спектра на двойном монохроматоре Литтмана

Для выбора длины волны в конфигурации Литтмана требуется поворачивать не решетку, а зеркало, которое может быть выполнено в виде уголкового отражателя.

## 6.6 Методы калибровки анализаторов оптического спектра по длине волны

Анализаторы оптического спектра измеряют длину волны света в воздухе, представляя результат измерения в терминах длин волн или оптической частоты. Поскольку показатель преломления воздуха зависит от температуры, давления и влажности, необходимо точно устанавливать значения показателя преломления при проведении измерений. Например, при  $\lambda = 1550$  нм на уровне моря, при температуре  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  и отсутствии влажности показатель преломления воздуха составляет 1,000273. Преобразование длины волны в вакууме в длину волны в воздухе без учета реального показателя преломления приведет к ошибке в 0,4 нм. Если интервалы между каналами составляют  $\sim 1$  нм (как, например, в системах DWDM), то эта ошибка становится значительной.

Все анализаторы оптического спектра требуют периодической калибровки, так как наличие механических частей в них влияет на точность установки длины волны. Одним из способов калибровки спектроанализатора является калибровка по источнику излучения с известной длиной волны. На одной длине волны калибровка может быть проведена в соответствии с длинами волн гелий-неонового лазера. Такая одноточечная калибровка отличается высокой точностью, но, начиная с этой точки, ошибки могут накапливаться. Другой метод калибровки основан на применении перестраиваемого лазера, контролируемого с помощью измерителя длины волны. Этот метод позволяет проводить калибровку в широком диапазоне длин волн, но из-за использования высокоточного перестраиваемого источника излучения метод достаточно дорогостоящий.

Еще одним методом калибровки является калибровка по линиям поглощения газообразных веществ, поскольку линии газов являются природными константами. Линии поглощения около важной волоконно-оптической полосы 1550 нм имеют ацетилен и цианид водорода, вакуумные длины волн которых были измерены с точностью 0,001 нм. В процессе калибровки свет от широкополосного источника проходит через стеклянную трубку, содержащую молекулярный газ. Газ поглощает излучение около резонансной частоты молекул, а результирующий свет собирается и проходит на анализатор оптического спектра.

## **6.7 Измерение спектральных характеристик с высоким разрешением**

Предположим, что тестируемый лазер работает в режиме одной продольной моды, при котором все частоты лазерного резонатора, кроме основной моды, подавляются. Ширина линии современного полупроводникового лазера с непрерывным излучением не превышает 10 МГц или в длинах волн  $\Delta\lambda \approx 0,0001$  нм. Типовой спектроанализатор на дифракционной решетке имеет разрешающую способность  $\Delta\lambda = 0,01-0,1$  нм. Таким образом, чтобы измерить ширину линии одномодового лазера, требуется

тысячекратное улучшение разрешающей способности спектроанализатора. В то же время из-за фазового шума, обусловленного спонтанными переходами в полупроводниковом лазере, и вследствие модуляции лазера по интенсивности происходит увеличение ширины спектра излучения лазера. Поскольку показатель преломления оптического волокна зависит от длины волны излучателя, наличие этих изменений может привести к непредусмотренному расплыванию оптических импульсов и межсимвольной интерференции в высокоскоростных цифровых линиях связи. Из-за этого для решения задач измерения спектральных характеристик с высоким разрешением были разработаны интерференционные методы, основанные на оптическом смещении световых волн.

### Гетеродинный метод измерения спектральных характеристик

Пусть на вход фотодиода  $FD$  (рисунок 6.12) воздействует оптический сигнал лазерного диода  $LD$  с напряженностью поля

$$E_S(t) = \sqrt{I_S(t)} e^{i[2\pi f_S t + \varphi_S(t)]}, \quad (6.27)$$

где  $I(t) = |E(t)|^2$  – интенсивность оптического сигнала;  $f$  и  $\varphi(t)$  – частота и фаза оптического поля, причем в фазе  $\varphi(t)$  учтены фазовый шум и модуляция оптической частоты.

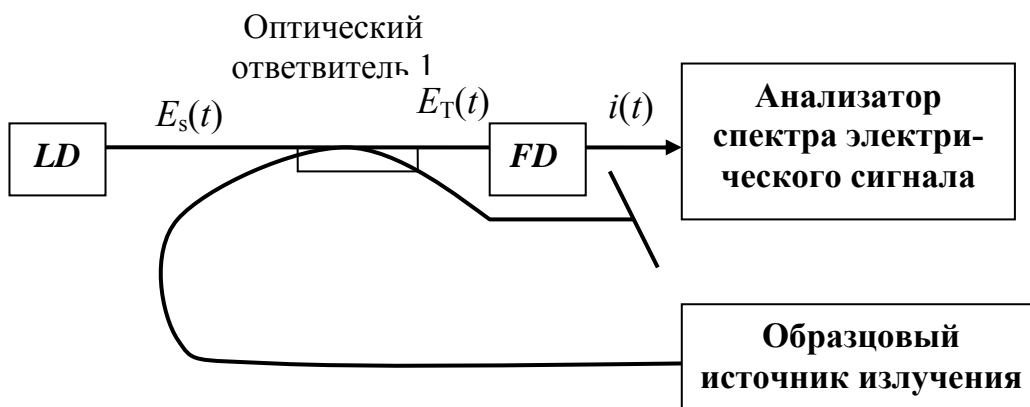


Рисунок 6.12 – Гетеродинное детектирование оптического сигнала



Полная фаза  $[2\pi ft + \varphi(t)]$  оптического поля изменяется очень быстро (при  $\lambda = 1550$  нм, например, изменения происходят с частотой 194000 ГГц). Электронное оборудование не успевает зарегистрировать эти изменения. Чтобы получить спектр входного оптического сигнала, возьмем второй оптический генератор с частотой  $f_L$ , которая ниже частоты входного сигнала, и напряженностью поля

$$E_L(t) = \sqrt{I_L(t)} e^{i[2\pi f_L t + \varphi_L(t)]}. \quad (6.28)$$

Оптические поля двух генераторов объединяются в оптическом ответвителе, пространственно накладываясь друг на друга. Напряженность суммарного оптического поля на входе фотодиода  $FD$  будет

$$E_\Sigma = E_S + E_L,$$

а ток фотодиода

$$i(t) = \gamma |E_\Sigma(t)|^2,$$

где  $\gamma$  – чувствительность детектора.

Подставив в последнее выражение значения полей  $E_S$  и  $E_L$ , получим:

$$i(t) = \gamma \left[ I_S(t) + I_L(t) + 2\sqrt{I_S I_L} \cos(2\pi f_R t + \Delta\varphi(t)) \right]. \quad (6.29)$$

Первые два члена характеризуют интенсивности сигналов  $E_S$  и  $E_L$ , третий член представляет собой результат гетеродинного смешения, в результате которого члены с действительной оптической частотой отсутствуют, а остается лишь член с разностной частотой  $f_R = f_S - f_L$ . Таким образом, мы транспонируем спектр с высоких оптических частот на частоты, которые могут быть измерены обычными электронными средствами, например электрическим анализатором спектра.

Гетеродинный метод дает возможность измерить ширину линии оптического излучателя, спектр оптической мощности и может быть использован при измерениях спектра модулированного лазерного излучения.

Метод обладает высокой чувствительностью и спектральным разрешением. Высокая чувствительность обеспечивается большой мощностью эталонного генератора. Однако тепловой шум приемника, дробовой шум эталонного генератора, шумы интерференции вследствие оптических отражений в схеме измерения могут существенно снизить чувствительность измерений.

Высокое спектральное разрешение обеспечивается использованием высокостабильного эталонного лазера с узкой шириной линии. Измеренный спектр представляет собой свертку спектра мощности сигнала со спектром мощности эталонного генератора. Это устанавливает минимальное спектральное разрешение, равное ширине линии излучения эталонного лазера. Для типового полупроводникового лазера с внешним резонатором ширина спектра излучения составляет  $\sim 100$  кГц, но может быть произвольно увеличена из-за изменений характеристик резонатора вследствие изменения условий окружающей среды.

### **Автогетеродинный метод измерения спектральных характеристик**

Модификацией гетеродинного метода измерения ширины спектра излучения лазера является автогетеродинный метод измерения. Этот метод измерения заключается в создании задержки оптического сигнала с помощью оптического волокна и последующем смешении прямого и задержанного сигналов.

Как показано на рисунке 6.13, выходное излучение лазерного диода  $LD$  делится на два луча, частота одного из которых смещена относительно другого с помощью частотного модулятора на величину  $\delta f$ . Если задержка одного луча  $\tau_0$  превышает время когерентности лазера  $\tau_c$ , то лучи не дают интерференционной картины и взаимодействуют так, будто бы они исходят от двух разных источников света. Минимальная задержка  $\tau_0$  должна быть меньше  $1/\Delta f$ , где  $\Delta f$  – ширина спектра лазерного излучателя. При выполнении этого условия система функционирует аналогично рассмотренному выше принципу. Электронный анализатор спектра отображает свертку спектров мощности самого сигнала и сиг-

нала, смещенного по частоте на величину  $\delta f$ . Смещение частоты может быть получено при помощи различных устройств, например при помощи акустооптического фазового модулятора.

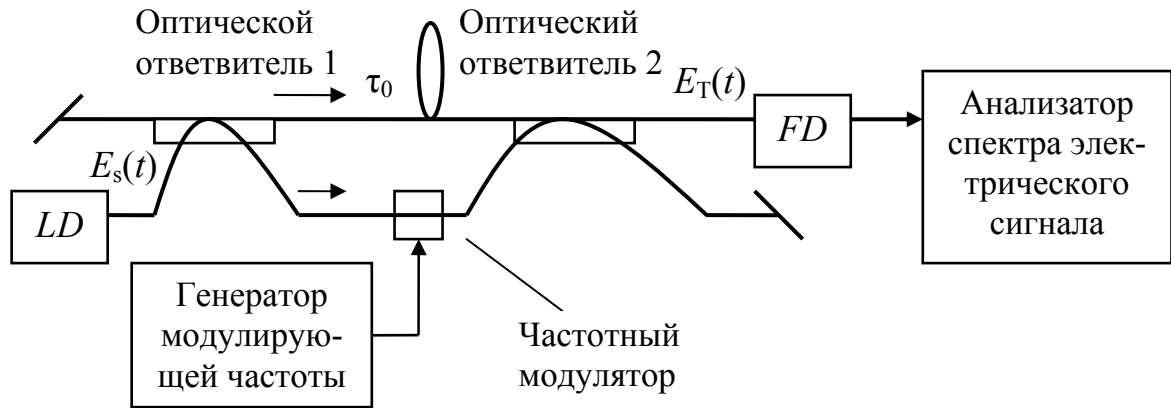


Рисунок 6.13 – Автогетеродинный метод измерения спектральных характеристик

Достоинства автогетеродинного метода измерения заключаются в отсутствии эталонного генератора и меньшей, чем в гетеродинном методе, чувствительности к медленным колебаниям длины волны. Измерения ширины спектра методом автогетеродина осуществляется в диапазоне от 10 КГц до 1 ГГц.

## 7 ИЗМЕРЕНИЕ ДИСПЕРСИИ

---

### 7.1 Виды дисперсии оптических волокон

В волоконной оптике различают три вида дисперсии: межмодовую дисперсию, хроматическую и поляризационную модовую дисперсию. Наличие дисперсии любого вида ухудшает амплитудно-фазовые характеристики световых сигналов и снижает объем передаваемой информации либо за счет увеличения длительности импульсов в цифровых системах, либо за счет увеличения искажений сигналов в аналоговых системах. При разработке ВОСП дисперсию необходимо минимизировать, а следовательно, измерять.

Методы измерения дисперсии оптических волокон, компонентов ВОСП и систем ВОСП разработаны ведущими группами стандартизации, такими как Ассоциация телекоммуникационной индустрии и ее международными отделениями.

### 7.2 Межмодовая дисперсия

Межмодовая дисперсия возникает из-за различия времени пробега распространяющихся по волокну мод. Согласно геометрической интерпретации распространение светового импульса по многомодовому волокну может быть представлено в виде набора аксиальных и наклонных лучей, каждый из которых соответствует определенной моде (рисунок 7.1).

Время пробега  $t_a$  аксиальным лучом расстояния  $L$  определяется выражением

$$t_a = \frac{L}{V_\phi} = \frac{Ln_c}{c}, \quad (7.1)$$

где  $V_\phi$  – фазовая скорость;  $n_c$  – показатель преломления сердцевины;  $c$  – скорость света в вакууме.

Время пробега того же расстояния  $L$  наклонным лучом с максимально возможным значением критического угла  $\theta_{кр}$  составляет

$$t_{\text{н}} = \frac{Ln_c}{c \cos \theta_{\text{кр}}} = \frac{n_c^2 L}{n_u c}, \quad (7.2)$$

где  $n_u$  – показатель преломления оболочки.

Когда эти два луча, переносящие световую энергию, складываются на выходе световода, наклонный луч имеет временное запаздывание  $\tau_{\text{ММ}}$ :

$$\tau_{\text{ММ}} = t_{\text{н}} - t_{\text{а}} = \frac{n_c L}{n_u c} (n_c - n_u). \quad (7.3)$$

При этом запаздывание на единицу длины пути

$$\frac{\tau_{\text{ММ}}}{L} = \frac{n_c}{n_u c} (n_c - n_u). \quad (7.4)$$

Для типичного волокна со ступенчатым профилем показателя преломления, имеющего  $n_c = 1,5$  и разность показателей преломления сердцевины и оболочки  $\Delta n \approx 0,01$ , временная задержка  $\tau_{\text{ММ}}$  между самым быстрым и самым медленным лучами составляет  $\sim 50$  нс/км.

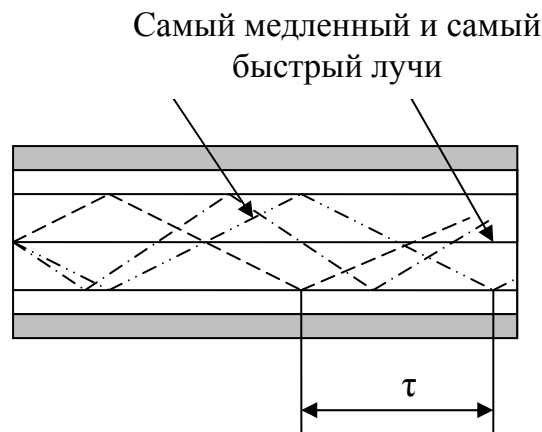


Рисунок 7.1 – Распространение светового импульса по многомодовому волокну

Различия времени пробега распространяющихся по волокну мод приводит к искажению формы (расширению) выходного импульса по сравнению с входным. В многомодовых световодах со ступенчатым профилем показателя преломления вклад межмодовой дисперсии является основным в расширении импульсов передачи и ограничении ширины полосы пропускания.

Межмодовую дисперсию многомодового световода можно уменьшить, используя градиентные волокна с плавным изменением профиля показателя преломления. За счет уменьшения показателя преломления от оси оптического волокна к оболочке скорость распространения лучей, удаленных от оси, увеличивается и время распространения аксиальных и наклонных лучей выравнивается. При оптимальном профиле показателя преломления близком к параболическому значение межмодовой дисперсии определяется выражением

$$\tau_{\text{мм}} = t_{\text{н}} - t_{\text{а}} = \frac{n_c L}{8c} (n_c - n_u)^2. \quad (7.5)$$

При этом временная задержка  $\tau_{\text{мм}}$  между самым быстрым и самым медленным лучами при  $n_c = 1,5$  и  $\Delta n \approx 0,01$  уменьшается до 62,5 пс/км.

Частотные свойства многомодовых волокон из-за преобладания межмодовой составляющей дисперсии мало зависят от спектральных свойств источника излучения. Поэтому их удобно оценивать коэффициентом широкополосности  $B$ , который является эквивалентом дисперсии в частотной области. Для пересчета коэффициента широкополосности в дисперсию и обратно можно использовать соотношение

$$B = \frac{1}{\tau_{\text{мм}}}. \quad (7.6)$$

Современные многомодовые волокна имеют на основных рабочих длинах волн типовое значение коэффициента широкополосности  $B = 200\text{--}1000$  МГц·км.

### 7.3 Измерение межмодовой дисперсии

Межмодовая дисперсия вызывает изменение формы импульсов и обычно ограничивает расстояние передачи многомодового кабеля до 1 км и менее, обеспечивая битовую скорость не более 1 Гб/с. Для аттестации и сопоставления дисперсионных свойств многомодовых волокон необходимо стандартизовать условия измерения. В первую очередь это относится к способам оптического

возбуждения, которые должны обеспечить повторяемость результатов при измерении дисперсии. Стандартизованным способом возбуждения при измерении дисперсии является равновесное возбуждение мод, поскольку оно создает условия, наименее благоприятные для распространения и обеспечивает максимальную дисперсию [5]. Как правило, на входе оптического волокна устанавливается смеситель мод, который формирует режим равновесного распределения мод и исключает влияние условий ввода светового импульса в волокно. Кроме того, необходимо устранить распространение мод по оболочке.

**Метод измерения межмодовой дисперсии по искажению оптического импульса.** Дисперсионные свойства световода можно характеризовать искажениями, которые претерпевает распространяющийся в нем оптический импульс. В соответствии со схемой измерений (рисунок 7.2) генератор электрических импульсов стимулирует излучение лазерного диода *LED* и через регулятор задержки запускает развертку стробоскопического осциллографа. В световод лазерным диодом посылается оптический импульс, который по длительности меньше ожидаемого отклика, и измеряется уширение импульса при его распространении по волокну. На первом этапе измерений источник излучения подключается через смеситель мод к входу тестируемого оптического волокна. К выходу волокна подключается приемник излучения, который соединен со стробоскопическим осциллографом, определяющим длительность импульса на выходе оптоволокна.

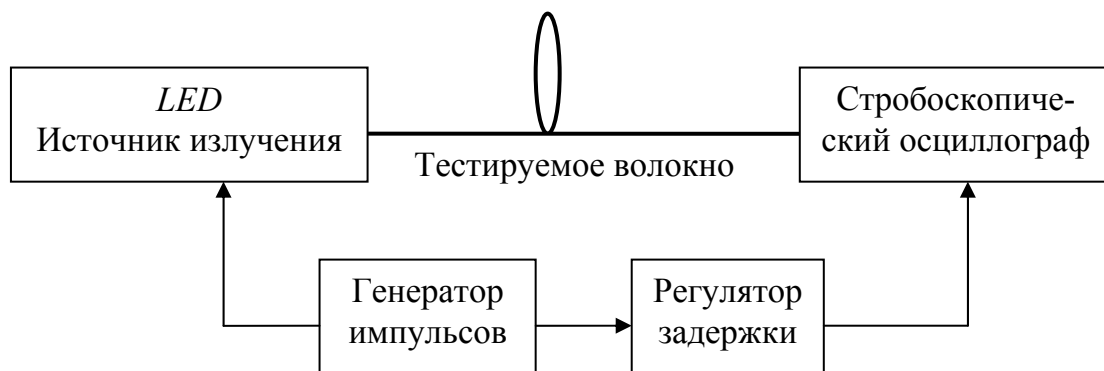


Рисунок 7.2 – Схема измерения межмодовой дисперсии многомодового волокна импульсным методом

На втором этапе измеряется длительность входного светового импульса. Для измерения входного импульса вместо тестируемого волокна используется эталонное волокно, которое представляет собой короткий, в несколько метров, отрезок тестируемого волокна. Если импульсы на выходе и входе волокна имеют гауссову форму, то дисперсию определяют согласно выражению

$$\tau = \sqrt{\tau_{\text{ВЫХ}}^2 - \tau_{\text{ВХ}}^2}, \quad (7.7)$$

где  $\tau_{\text{ВЫХ}}$  и  $\tau_{\text{ВХ}}$  – соответственно длительность импульсов на выходе и входе волокна, измеренная на уровне 0,5 максимальной интенсивности.

Для того чтобы на результаты измерений не оказывала влияние хроматическая дисперсия, спектр источника излучения *LED* должен быть достаточно узким.

По мере совершенствования технологии изготовления волоконных световодов и улучшения его характеристик световой импульс, распространяющийся в волокне, слабо искажается. Поэтому для повышения точности измерений используют более сложную обработку оптических импульсов, связанную с переходом в частотную область и нахождением передаточной функции. Известно, что если на вход линейной системы с постоянными коэффициентами подается импульс конечной формы, то отклик системы характеризуется интегральной операцией свертки:

$$P_L(t) = \int_{-\infty}^{\infty} g_f(t - \tau) P_0(\tau) d\tau,$$

где  $P_L(t)$  – мощность выходного импульса;  $P_0(\tau)$  – мощность входного импульса;  $g_f(t)$  – импульсный отклик системы.

Представление временного сигнала  $P(t)$  в частотной области, используя преобразование Фурье, можно записать в виде

$$H_L(\omega) = h(\omega) H_0(\omega), \quad (7.8)$$

где  $H_L(\omega)$ ,  $H_0(\omega)$  – Фурье-преобразования выходного  $P_L(t)$  и входного  $P_0(\tau)$  импульсов;  $h(\omega)$  – частотная функция импульсного отклика  $g_f(t)$  исследуемой системы.



Функция  $g_f(t)$  дает полное представление о системе (т. е. об оптическом волокне) во временной области, а функция  $h(\omega)$  – в частотной.

При измерениях межмодовой дисперсии оптического волокна входной и выходной импульсы поступают в персональный компьютер (ПК). При обработке импульсных сигналов в компьютере осуществляется переход в частотную область и находится передаточная функция  $h(\omega)$  из отношения входного и выходного сигналов:

$$h(\omega) = \frac{H_L(\omega)}{H_0(\omega)}. \quad (7.9)$$

Для улучшения отношения сигнал/шум компьютер считывает и усредняет большое число входных и выходных импульсов. Переход в частотную область и нахождение Фурье-спектров входного и выходного сигналов позволяет повысить точность измерения искажений светового импульса, распространяющегося в многомодовом волокне.

**Частотный метод измерения межмодовой дисперсии.** Частотный метод измерения межмодовой дисперсии связан с измерением полосы пропускания многомодового волокна. Метод основан на сравнении зависимостей изменения сигнала на выходе тестируемого волокна и на выходе короткого его отрезка от частоты модуляции оптического сигнала.

Схема измерения межмодовой дисперсии многомодового волокна частотным методом заключается в следующем. Непрерывное излучение оптического источника модулируется по амплитуде синусоидальным сигналом генератора качающейся частоты и вводится через смеситель мод в тестируемое волокно. Модулированный сигнал с выхода тестируемого волокна поступает на широкополосный оптический приемник, соединенный с регистратором (например, осциллографом), который фиксирует соответствующую оптическую мощность  $P_L(f)$  как функцию частоты модуляции. Входной сигнал  $P_0(f)$  определяется как оптическая мощность на выходе короткого эталонного волокна, что позволяет учесть влияние частотных характеристик измерительной системы.

По результатам измерений строят график отношения значений сигналов переменной составляющей на выходе короткого отрезка и тестируемого волокна от частоты модуляции, то есть амплитудно-частотную характеристику измеряемого оптического кабеля.

Значение ширины полосы пропускания оптического кабеля принимают равной частоте, на которой амплитуда сигнала амплитудно-частотной характеристики уменьшилась на 3 дБ. Коэффициент широкополосности определяют по формуле

$$K = B \cdot L^m, \quad (7.10)$$

где  $B$  – ширина полосы пропускания измеряемого оптического кабеля, МГц;  $L$  – длина измеряемого кабеля, км;  $m$  – эмпирический параметр, установленный в стандартах или технических условиях на конкретный оптический кабель.

В процессе измерений на входе в волокно средний уровень интенсивности излучения и коэффициент амплитудной модуляции должны быть постоянными во всем диапазоне частот модуляции. Поэтому для уменьшения флуктуаций оптических параметров излучателя, как правило, непрерывное излучение оптического источника модулируется по амплитуде внешним модулятором. Это избавляет от спектрального смещения и шумов источника, зависящих от условий модуляции генератором качающейся частоты.

## 7.4 Хроматическая дисперсия

Под названием «хроматическая дисперсия» объединены две составляющие дисперсии:

а) материальная дисперсия (зависимость коэффициента преломления материала световода от длины волны света);

б) волноводная (внутримодовая) дисперсия (зависимость групповой скорости моды от длины волны света).

Материальная дисперсия является фундаментальной характеристикой материала световода. Электромагнитная волна распространяется в среде с фазовой скоростью

$$V_{\phi} = \frac{\omega}{\beta},$$

где  $\omega$  – частота;  $\beta$  – постоянная распространения.

Любой сигнал, налагаемый на световую волну, распространяется не с фазовой скоростью волны, а с групповой скоростью, определяемой соотношением

$$V_{\text{гр}} = \frac{d\omega}{d\beta}.$$

В недисперсионных средах фазовая скорость не зависит от частоты световой волны, вследствие чего групповая  $V_{\text{гр}}$  и фазовая  $V_{\phi}$  скорости одинаковы. Однако в дисперсионных средах, где показатель преломления  $n$  является функцией частоты, фазовая и групповая скорости различаются. Групповая скорость в дисперсионной среде определяется выражением

$$V_{\text{гр}} = \frac{1}{d\beta/d\omega} = \frac{V_{\phi}}{1 - (\omega/V_{\phi})(dV_{\phi}/d\omega)}. \quad (7.11)$$

Для дисперсионной среды можно ввести групповой показатель преломления сердцевины  $N_{\text{гр}}$ :

$$N_{\text{гр}} = \frac{c}{V_{\text{гр}}} = c \frac{d\beta}{d\omega} = c \frac{d(\omega n / c)}{d\omega} = n + \frac{\omega}{c} \frac{dn}{d\omega}, \quad (7.12)$$

который зависит от частоты света.

Переходя от частоты  $\omega$  к длине волны света  $\lambda$  и учитывая, что

$$\frac{dn}{d\omega} = \frac{dn}{d\lambda} \frac{d\lambda}{d\omega}; \quad \omega = \frac{2\pi c}{\lambda}; \quad \frac{d\omega}{d\lambda} = -\frac{2\pi c}{\lambda^2},$$

находим:

$$N_{\text{гр}} = n + \frac{2\pi c}{\lambda} \frac{dn}{d\lambda} \left( -\frac{\lambda^2}{2\pi c} \right) = n - \lambda \frac{dn}{d\lambda}. \quad (7.13)$$

Выразим групповую скорость через показатель преломления среды  $n$  и длину волны  $\lambda$ :

$$V_{\text{гр}} = \frac{c}{N_{\text{гр}}} = \frac{c}{n - \lambda \frac{dn}{d\lambda}}.$$

Зная  $V_{\text{гр}}$ , определим время  $t$  распространения светового импульса через дисперсионную среду длиной  $L$ :

$$t = \frac{L}{V_{\text{гр}}} = \frac{NL}{c} = \frac{L}{c} \left( n - \lambda \frac{dn}{d\lambda} \right). \quad (7.14)$$

Как видно из последней формулы, время  $t$  определяется зависимостью показателя преломления среды  $n$  от длины волны света  $\lambda$ . У реальных источников света спектр излучения не бесконечно узкий, а составляет определенную ширину  $\Delta\lambda$ . Если среда дисперсионная, то скорость распространения спектральных составляющих источника излучения различна. В процессе распространения в волокне световой импульс расширяется и поступает на выход на протяжении интервала времени  $\tau_{\text{м}}$ , определяемого соотношением

$$\tau_{\text{м}} = \frac{dt}{d\lambda} \Delta\lambda = -\frac{L}{c} \lambda \frac{d^2 n_c}{d\lambda^2} \Delta\lambda. \quad (7.15)$$

Необходимо отметить, что для кварцевого оптического волокна зависимость  $d^2 n_c / d\lambda^2$  изменяет свой знак при длине волны  $\lambda = 1,28$  мкм. Эта точка носит название нулевой материальной дисперсии.

Вторая составляющая хроматической дисперсии – внутримодовая дисперсия – обусловлена направляющими свойствами сердцевины оптического волокна, а именно зависимостью групповой скорости моды от длины волны оптического излучения  $\lambda$ . Это, как и в случае материальной дисперсии, приводит к различию скоростей распространения частотных составляющих излучаемого спектра. Поэтому внутримодовая дисперсия пропорциональна ширине спектра излучения источника  $\Delta\lambda$  и зависит от профиля показателя преломления оптического волокна. Задержка частотных составляющих распространяющегося в волокне излучения за счет внутримодовой дисперсии определяется выражением

$$\tau_{\text{в}} = \Delta\lambda LM(\lambda), \quad (7.16)$$

где  $M(\lambda)$  – удельная внутримодовая дисперсия.

В нормальных условиях материальная дисперсия преобладает над волноводной, причем они могут иметь противоположные знаки и различаться характером зависимости от длины волны. Варьируя профиль показателя преломления, т. е. изменяя волноводную дисперсию, можно получить нулевую хроматическую дисперсию на заранее заданной длине волны  $\lambda$  за счет взаимной компенсации материальной и волноводной дисперсий.

## 7.5 Измерение хроматической дисперсии

**Измерение хроматической дисперсии методом сдвига фаз.** В большинстве производимых приборов для измерения хроматической дисперсии используется фазовый метод, состоящий в сравнении фаз прошедшего через измеряемый световод сигнала с опорным [7–10]. Суть фазового метода измерения хроматической дисперсии поясняет схема, приведенная на рисунке 7.3.

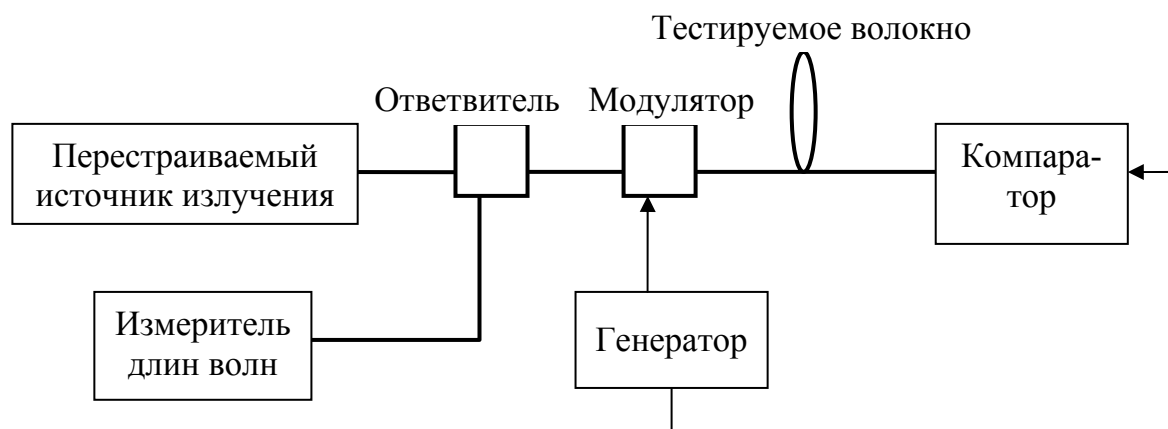


Рисунок 7.3 – Схема измерения хроматической дисперсии методом сдвига фаз

В соответствии со схемой выходной сигнал перестраиваемого оптического источника с узкой полосой частот модулируется по интенсивности внешним модулятором и подается на тестируемое волокно. Прошедший волокно оптический сигнал преобразуется в электрический с помощью фотоприемного устройства. Электрический сигнал с последнего поступает на один из входов компаратора. На другой вход компаратора поступает электрический сигнал от генератора. Компаратор измеряет разность фаз

прошедшего тестируемое волокно оптического сигнала и электрического сигнала, поступающего с генератора. Измерение разности фаз проводится на разных длинах волн по всему диапазону длин волн источника излучения. Для контроля длины волны источника излучения может быть использован анализатор оптического спектра, сигнал на который поступает от источника излучения через ответвитель.

Данная схема измерений позволяет определить временную задержку  $\tau_\lambda$ :

$$\tau_\lambda = \frac{\varphi(\lambda)}{2\pi f_0}, \quad (7.17)$$

где  $\varphi(\lambda)$  – измеренный сдвиг фазы, рад;  $f_0$  – рабочая частота модулятора, Гц.

Пример зависимости временной задержки от длины волны источника излучения представлен на рисунке 7.4.

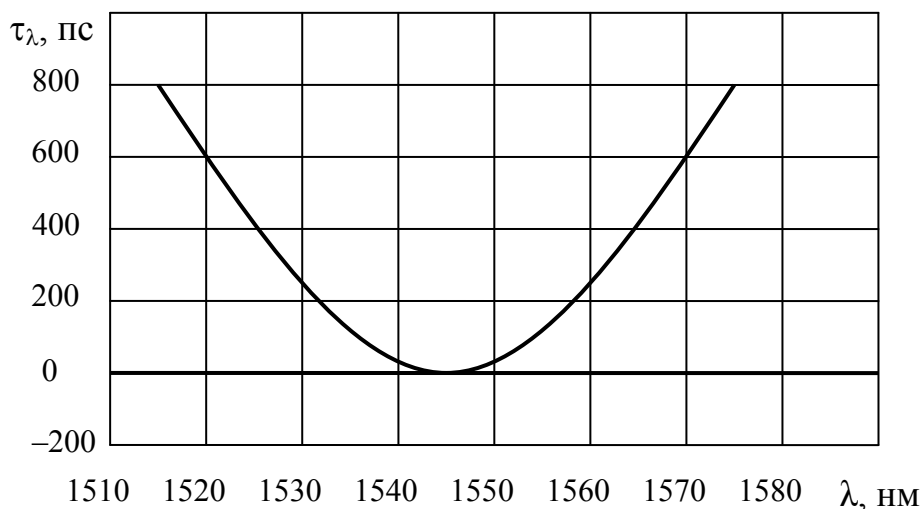


Рисунок 7.4 – Пример зависимости временной задержки  $\tau_\lambda$  от длины волны источника излучения

На основе измеренных значений временной задержки  $\tau_\lambda$  может быть рассчитан коэффициент хроматической дисперсии:

$$D_\lambda = \frac{1}{L} \frac{d\tau_\lambda}{d\lambda}, \quad (7.18)$$

где  $D_\lambda$  – коэффициент хроматической дисперсии, пс/(нм·км);  $L$  – длина оптического волокна, км;  $\tau$  – временная задержка, пс;  $\lambda$  – длина волны, нм.

Пример зависимости коэффициента хроматической дисперсии  $D_\lambda$  от длины волны источника излучения представлен на рисунке 7.5.

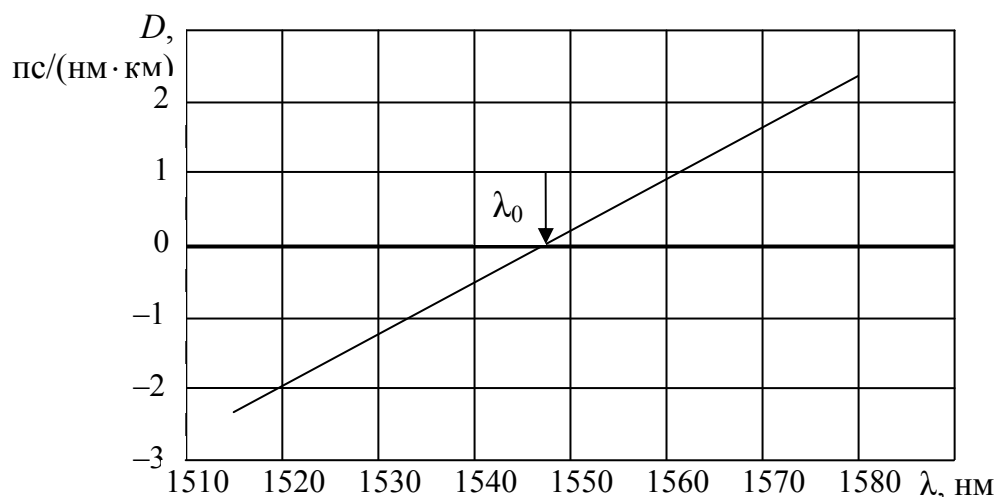


Рисунок 7.5 – Пример зависимости коэффициента хроматической дисперсии  $D_\lambda$  от длины волны источника излучения

Из формулы (7.18) можно оценить увеличение длительности импульса  $\Delta\tau$  в волокне:

$$\Delta\tau = D_\lambda \Delta\lambda L, \quad (7.19)$$

где  $\Delta\lambda$  – ширина спектра модулированного светового сигнала, нм.

Как видно, значение хроматической дисперсии возрастает при увеличении длины линии передачи и ширины спектра сигнала. В связи с этим узкополосный сигнал с центральной длиной волны  $\lambda_0$  может распространяться на большие расстояния с минимумом искажений, вызванных хроматической дисперсией.

Точность измерения хроматической дисперсии зависит от используемого оборудования. Например, нестабильность фазы зависит от частоты модуляции. Поэтому приборы, предназначенные для измерения фазы, должны однозначно измерять фазу в диапазоне  $\pm 180^\circ$  в широком частотном диапазоне. Точность измерений

длины волны также важна, так как сдвиг фазы пропорционален длине волны. В зависимости от целей измерения может оказаться достаточной точность измерения длины волны перестраиваемого источника, равная 0,1 нм, которую может обеспечить оптический фильтр. В высокоскоростных линиях требуется более высокая точность измерения длины волны.

К существенным ошибкам могут привести изменения температуры окружающей среды, которые ведут к изменению длины волокна  $L$ , изменениям длин волн излучения полупроводниковых лазеров  $\lambda_0$  и, следовательно, к изменению времени задержки при измерениях фазы. Влияние изменений температуры в процессе измерения можно минимизировать путем чередования измерения фазы тестовой длины волны и эталонной длины волны. Изменения фазы эталонной длины волны вызваны только изменением температуры, и эти данные могут быть использованы для коррекции измерений фазы на тестируемой длине волны. Использование эталонной длины волны увеличивает точность измерений, но уменьшает их скорость.

Среди измерителей хроматической дисперсии методом сдвига фаз можно выделить две группы приборов, отличающихся способом формирования измерительного сигнала.

В приборах первой группы для получения многоволнового сигнала используется перестраиваемый в широком диапазоне длин волн лазер. Во второй группе приборов используется набор источников с различными длинами волн. Оба эти метода формирования измерительного сигнала имеют достоинства и недостатки.

Достоинством использования перестраиваемых лазеров для формирования измерительного сигнала является большое количество формируемых длин волн. Это уменьшает ошибку при аппроксимации зависимости временной задержки от длины волны. Недостатком является высокая стоимость таких приборов.

При использовании набора источников с различными длинами волн (например, набора лазерных диодов) обеспечивается высокая точность измерения времени задержки за счет большой мощности вводимого излучения. Но при этом увеличивается по-



грешность аппроксимации зависимости временной задержки от длины волны за счет небольшого количества длин волн.

**Измерение хроматической дисперсии методом дифференциального сдвига фаз.** При измерениях в достаточно малом интервале длин волн  $\Delta\lambda$  значение хроматической дисперсии может быть определено методом дифференциального сдвига фаз. Суть метода заключается в измерениях временной задержки  $\tau_T$  тестируемого волокна и временной задержки  $\tau_{ЭТ}$  эталонного волокна (см. рисунок 7.3). Реперный сигнал при измерении сдвига фазы поступает от генератора. Значение хроматической дисперсии определяется как среднее значение дисперсии на интервале  $\Delta\lambda$ :

$$D_{\lambda_0} = \frac{\Delta\varphi_T - \Delta\varphi_{ЭТ}}{360 f_M L \Delta\lambda} \cdot 10^{12},$$

где  $D_{\lambda_0}$  – коэффициент хроматической дисперсии, пс/(нм·км);  $\Delta\lambda$  – интервал длин волн с центром  $\lambda_0$ , нм;  $\Delta\varphi_{ЭТ}$  и  $\Delta\varphi_T$  – измеренное изменение фазы эталонного и тестируемого волокна, градусы;  $f_M$  – частота модуляции, Гц;  $L$  – длина тестируемого волокна минус длина эталонного волокна, км.

Дисперсия как функция длины волны измеряется путем повторения процесса на различных длинах волн. На основании этих измерений строится зависимость коэффициента хроматической дисперсии  $D_\lambda$  от длины волны источника излучения.

Измерение хроматической дисперсии в волоконно-оптических системах передачи дает важную информацию при проектировании и построении высокоскоростных систем, работающих на большие расстояния. В первую очередь это связано с тем, что линия передачи состоит, как правило, из множества волокон разных производителей, причем каждое волокно имеет свой коэффициент дисперсии  $D$  и свою длину волны нулевой дисперсии. Поэтому в одноканальной системе с последовательным соединением волокон с различной дисперсией общая дисперсия может быть сведена к нулю. В другом случае дисперсия может накапливаться вдоль линии передачи, а затем компенсироваться на выходе системы специальными компенсаторами дисперсии, выполненными либо

на основе решетки Брэгга, либо на основе оптического волокна, легированного эрбием.

Измерения хроматической дисперсии проводятся в процессе испытаний при производстве оптических волокон, а также при производстве и входном контроле компонентов волоконно-оптических линий связи. В полевых условиях хроматическая дисперсия измеряется в связи с настройкой новых линий связи или модернизацией существующих.

## **7.6 Поляризационная модовая дисперсия**

В процессе ввода и эксплуатации первых высокоскоростных протяженных ВОЛС выяснилось, что, несмотря на возможность полной компенсации хроматической дисперсии, увеличение ширины оптических импульсов все же происходит. Это обусловлено фактором, который называется поляризационная модовая дисперсия (ПМД).

Поляризационная модовая дисперсия – это явление увеличения длительности импульса сигнала, связанное с различием скоростей распространения двух ортогонально поляризованных волн по оптоволокну. Распространение линейно поляризованной световой волны вдоль одномодового оптического волокна можно представить как сумму двух поперечных ортогонально поляризованных волн (для фундаментальной моды одномодового волокна величина продольной компоненты поля значительно меньше поперечной компоненты). В идеальном, совершенно симметричном волокне эти две ортогонально поляризованные волны (поляризационные моды) имеют одну и ту же постоянную распространения (рисунок 7.6).

Таким образом, хотя световая энергия в волокне распределена между двумя поляризационными модами, это не вызывает расширения светового импульса. В то же время реальное волокно не является совершенно симметричным. Идеально круглая форма оболочки на практике имеет небольшие отклонения, допускаемые нормативными документами. Ввиду этого, а также из-за возмож-

ных внешних воздействий, таких как сдвливание, кручение и изгиб, возникает явление двулучепреломления.

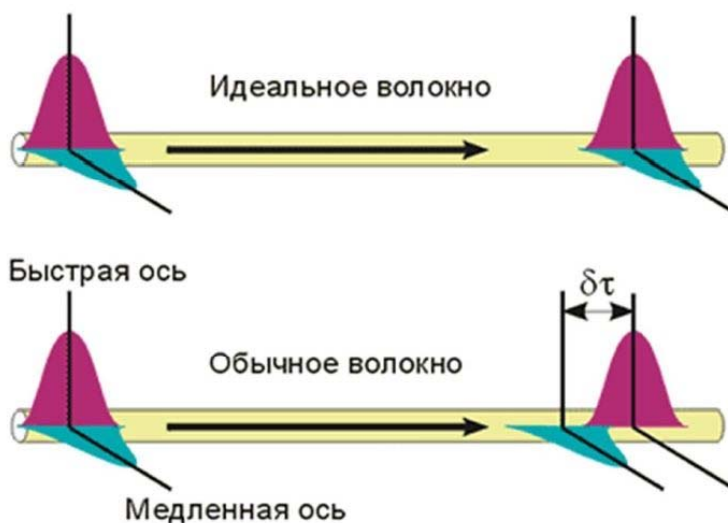


Рисунок 7.6 – Распространение линейно поляризованной световой волны вдоль одномодового оптического волокна

В результате симметрия нарушается, появляется анизотропия и, как следствие, в волокне распространяются две ортогонально поляризованные волны, обладающие разными фазовыми и групповыми скоростями (см. рисунок 7.6). Различие скоростей этих мод приводит к возникновению временной задержки  $\delta\tau$ , которую принято называть дифференциальной групповой задержкой. Среднеквадратическое значение дифференциальной групповой задержки называют поляризационно-модовой дисперсией. Поляризационно-модовая дисперсия приводит к увеличению длительности импульса на выходе волокна и определяется выражением

$$\tau_{PMD} = k_{PMD} \sqrt{L},$$

где  $k_{PMD}$  – коэффициент удельной поляризационной дисперсии, пс/ $\sqrt{\text{км}}$ .

При определенных условиях поляризационная модовая дисперсия может быть соизмерима с хроматической дисперсией. Поэтому результирующая дисперсия одномодового оптического волокна должна определяться в соответствии с выражением

$$\tau = \sqrt{(\tau_M^2 + \tau_B^2) + \tau_{PMD}^2}.$$

Влияние поляризационной модовой дисперсии на искажение информационного сигнала в одномодовом волокне сходно с влиянием хроматической дисперсии, но есть и существенное различие. Так, хроматическая дисперсия представляет собой относительно стабильное явление, позволяющее определить ее влияние на систему передачи и, как следствие, она может быть скомпенсирована соответствующим расположением компенсаторов дисперсии. В отличие от хроматической дисперсии, поляризационная модовая дисперсия на любой длине волны сигнала в одномодовом оптическом волокне не является стабильной, что не позволяет осуществить пассивную компенсацию ее влияния.

После прокладки кабеля поляризационная модовая дисперсия по ряду причин (деформации волокна, температурные изменения, натяжение и т. д.) может испытывать отклонения от паспортных данных. Кабели, установленные несколько лет назад, могут обладать высокой ПМД, что делает проблематичным для них переход к более высоким битовым скоростям. Все это требует измерений ПМД в процессе инсталляции эксплуатации и модернизации линий связи на более высокие скорости передачи информации.

Коэффициент PMD в промышленных оптических кабелях, как правило, не превышает  $0,5 \text{ пс/км}^{1/2}$ , что ограничивает полосу передачи значением 40 ГГц на 100 км.

## 7.7 Измерение поляризационной модовой дисперсии

Для оценки ПМД в волоконном кабеле и волоконно-оптических системах передачи применяется целый ряд анализаторов ПМД, построенных на базе различных методов измерений. Рассмотрим некоторые методы измерения ПМД.

**Метод, основанный на сканировании длин волн.** Данный метод является косвенным методом измерений ПМД. Он основан на сканировании длин волн с последующим подсчетом экстремумов или выполнением преобразования Фурье в зависимости от применяемой схемы. На рисунке 7.7 представлены две схемы, возможные для использования рассматриваемого метода.

Согласно схеме (рисунок 7.7, а) измерителем оптической мощности измеряется мощность сигнала на выходе из оптического волокна в зависимости от длины волны. Поляризатор задает поляризацию света на входе в оптоволокно. В случае отсутствия анизотропных свойств в волокне линейно поляризованное излучение от перестраиваемого источника всегда приходило бы на анализатор под одним и тем же углом. Поэтому при сканировании длины волны измеряемая мощность была бы постоянной.

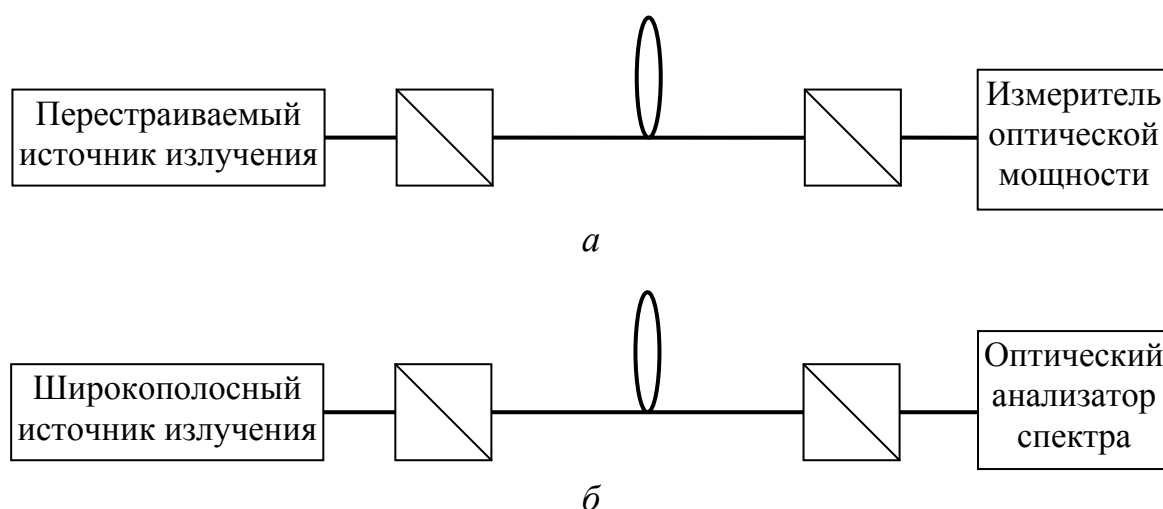


Рисунок 7.7 – Схемы измерения ПМД методом, основанным на сканировании длин волн

Но так как волокно обладает двулучепреломлением, то при перестройке длины волны мощность на измерителе будет периодически меняться вследствие разного фазового соотношения ортогонально поляризованных мод для различных длин волн. Далее производят подсчёт количества экстремумов  $N$  на полученной реализации и вычисляют среднее значение ПМД для заданного спектрального диапазона  $(\lambda_1 - \lambda_2)$ .

Среднее значение времени задержки  $\Delta\tau$  определяется в соответствии с выражением

$$\Delta\tau = \frac{kN\lambda_1\lambda_2}{2(\lambda_1 - \lambda_2)c},$$

где  $N$  – количество экстремальных значений (максимальных или минимальных);  $c$  – скорость света;  $k$  – безразмерный коэффициент, который называется коэффициентом взаимодействия мод и

равен 0,824 для волокон с произвольной связью мод. Временная задержка  $\Delta\tau$  определяется для интервала длин волн  $(\lambda_1 - \lambda_2)$ . Диапазон длин волн, в котором производятся измерения ПМД методом сканирования длины волны, должен быть достаточно большим, чтобы выдавать статистически значимое количество экстремумов.

В случае использования широкополосного источника излучения (рисунок 7.7, б) сканирование длины волны производится с помощью анализатора оптического спектра. После чего выполняют преобразование Фурье полученной реализации и извлекают значение ПМД как среднеквадратическое отклонение аппроксимирующей Гауссовой кривой разложения Фурье.

**Метод задержки импульса.** Данный метод является прямым методом измерений ПМД. Метод основан на непосредственном измерении временной задержки между двумя короткими импульсами оптического излучения, вводимыми в исследуемый объект вдоль «быстрой» и «медленной» осей. Схема измерения ПМД методом задержки импульса представлена на рисунке 7.8.

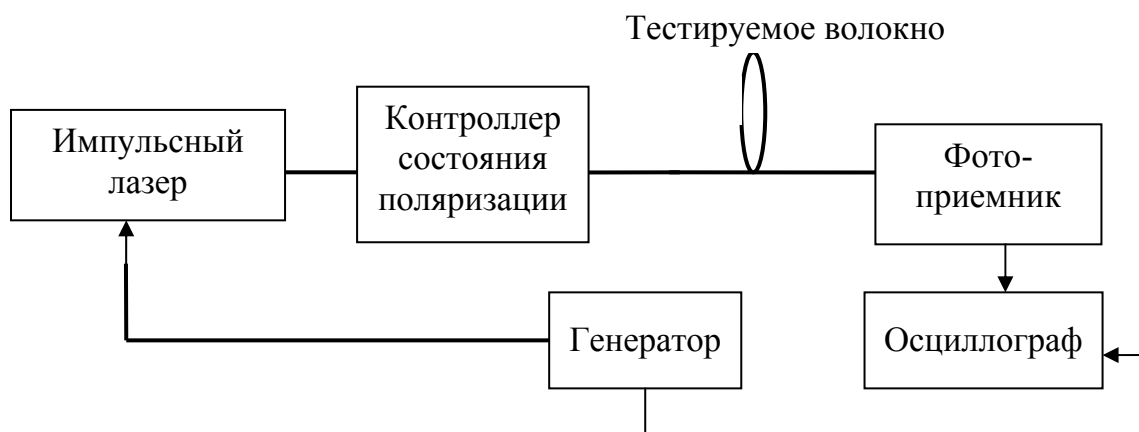


Рисунок 7.8 – Схемы измерения ПМД методом задержки импульса

В состав аппаратуры входят: импульсный лазер, контроллер состояния поляризации, тестируемое волокно, скоростной фотоприемник и осциллограф. Измерение производится следующим образом. Лазер генерирует короткий оптический импульс, который последовательно вводится в волокно в двух взаимно

ортогональных линейных состояниях поляризации. С помощью скоростного фотодетектора импульсы выводятся на экран осциллографа, позволяющего измерить временную задержку между ними. Зондирующие импульсы должны быть достаточно короткими для измерений ПМД требуемой величины. Это значит, что полуширина импульса не должна превышать значения измеряемой ПМД. Основные ограничения рассматриваемого метода заключаются в трудности получения стабильного ультракороткого оптического импульса.

## 8 МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ

---

### 8.1 Метод обратного рассеяния

Для обеспечения эффективной работы волоконно-оптических систем передачи очень важным является быстрое установление и, соответственно, устранение обрыва волокна. Обрыв в канале с высокой информационной емкостью может привести к закрытию большого количества коммуникационных каналов. Не менее важным является и вопрос определения потерь в строительных длинах оптических кабелей, а также потерь, вносимых коннекторами и другими компонентами линии при настройке и эксплуатации систем передачи. Причем проводить эти измерения приходится в полевых условиях. В настоящее время сделать это можно только с помощью оптического импульсного рефлектометра (OTDR – Optical Time Domain Reflectometer).

Импульсная рефлектометрия – метод измерения параметров ВОСП, основанный на реакции линии связи на зондирующее оптическое излучение. Реакция оптического волокна на зондирующий световой импульс может проявляться в виде потока обратного излучения, обусловленного эффектами френелевского отражения (когда размер неоднородностей много больше длины волны) или рэлеевского рассеяния (когда размер неоднородностей сравним или меньше длины волны). Распространение светового излучения в оптическом волокне приведено на рисунке 8.1.

Наиболее перспективным и разработанным методом импульсной рефлектометрии является метод, основанный на измерении мощности обратного рэлеевского рассеяния (OTDR-метод). Принцип измерений основан на введении в волокно импульса оптического излучения и последующем анализе той малой части светового потока, которая возвращается на вход волокна в результате обратного рэлеевского рассеивания и френелевских отражений. В результате математической обработки сигнала фотоприемника на экране рефлектометра формируется изображение, которое называется рефлектограммой. Рефлектограмма представ-



ляет зависимость уровня сигнала от расстояния вдоль волокна и позволяет определить затухание и разрыв волокна, потери, вносимые компонентами линии передачи, наличие механических воздействий на волокно, а также другие важные характеристики линии связи. Типичная рефлектограмма ВОЛС приведена на рисунке 8.2.

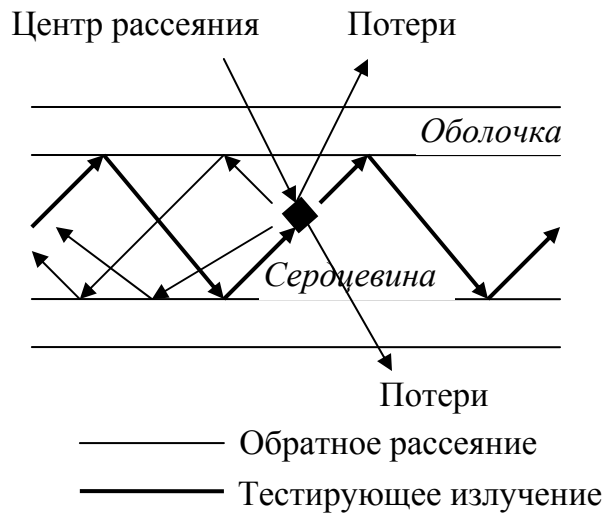


Рисунок 8.1 – Распространение светового излучения в оптическом волокне

Рассмотрим теоретические основы метода обратного рэлеевского рассеяния.

Пусть на вход оптического волокна в момент  $t_0$  подается световой импульс прямоугольной формы длительностью  $\Delta t$  и энергией  $E_0$ , а световая энергия, дошедшая до точки  $x$ , равна  $E(x)$  (рисунок 8.3).

Будем считать, что на участке длиной  $dl$  энергия светового импульса  $E(x)$  меняется незначительно. Тогда энергию, рассеянную назад участком  $dl$  волокна и поступившую на вход волокна, можно записать в виде

$$dE_p(x) = E_0 \alpha_p(x) S(x) dx, \quad (8.1)$$

где  $\alpha_p$  – эффективный коэффициент рассеяния, который учитывает рэлеевское рассеяние, определяемое рабочей длиной волны света, локальными неоднородностями (примесями, наличием микроизгибов) и дефектами волокна;  $S(x)$  – фактор обратного

рассеяния, характеризующий, какая часть общей рассеянной мощности захватывается апертурой волокна и распространяется по нему в обратном направлении.

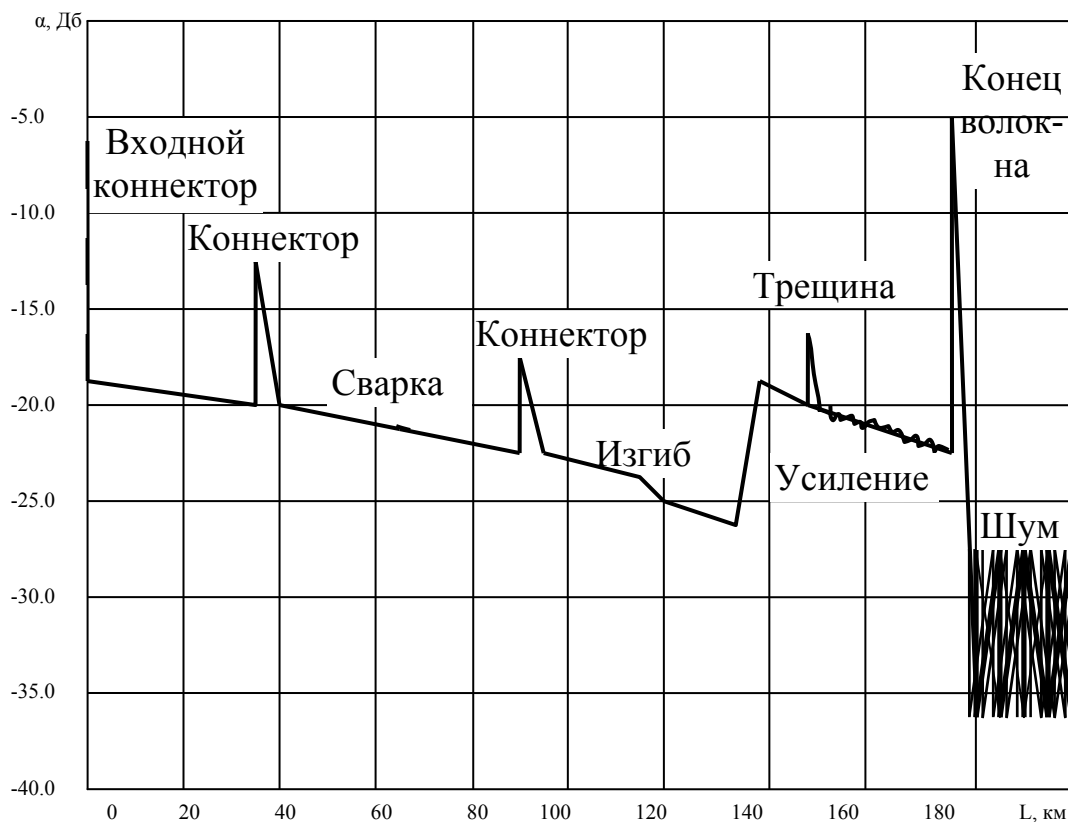


Рисунок 8.2 – Типичная рефлектограмма ВОЛС

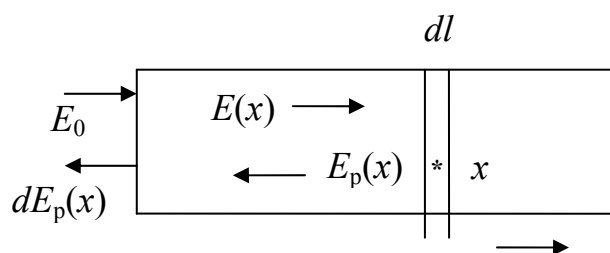


Рисунок 8.3 – Прямая и обратная световые волны в оптическом волокне

Фактор обратного рассеяния  $S(x)$ :

$$S(x) = \left( \frac{NA}{n_0} \right)^2 \frac{1}{q}, \quad (8.2)$$

где  $n_0$  – показатель преломления на оси сердцевины волокна;  $q$  – параметр, определяющий профиль показателя преломления во-

локна, типичное значение которого для одномодового волокна равно 4,55.

Энергия света в точке рассеяния  $E(x)$  связана с входной энергией  $E_0$  соотношением

$$E(x) = E_0 e^{-\alpha^+(x)x}, \quad (8.3)$$

где  $\alpha^+(x)$  – среднее значение коэффициента затухания световой волны при прямом распространении света на участке  $(0, x)$  от входной плоскости волокна до точки рассеяния.

Энергия, поступившая на вход волокна за счет обратного рассеяния от участка  $dl$ , составляет:

$$dE_p(x) = E_0 \alpha_p(x) S(x) e^{-\{\alpha^+(x) + \alpha^-(x)\}x} dx, \quad (8.4)$$

где  $\alpha^-(x)$  – среднее значение коэффициента затухания на участке  $(x, 0)$  от точки рассеяния света до входной плоскости волокна.

Коэффициенты  $\alpha^+(x)$  и  $\alpha^-(x)$  определяются по формуле

$$\alpha^\pm(x) = \frac{1}{x} \int_0^x \alpha_{\text{тек}}^\pm(x) dx, \quad (8.5)$$

где  $\alpha_{\text{тек}}^\pm$  – текущее значение коэффициента затухания волокна, зависящее от модового состава излучения для многомодовых волокон, и в общем случае может быть, что  $\alpha_{\text{тек}}^\pm \neq \alpha_{\text{тек}}^\mp$ .

В случае симметричного оптического волокна  $\alpha_{\text{тек}}^+ = \alpha_{\text{тек}}^-$  и уравнение (8.4) примет вид

$$dE_p(x) = E_0 \alpha_p(x) S(x) e^{-2\alpha(x)x} dx. \quad (8.6)$$

Здесь мы считаем, что  $\alpha = \alpha^+ = \alpha^-$  – среднее значение коэффициента затухания при распространении прямой и обратной волны.

Формула (8.6) связывает интенсивность обратно рассеянного излучения, пришедшего на вход волокна с параметрами волокна. Однако экспериментально определяется временная форма обратно рассеянного сигнала, поэтому необходимо установить связь между пространственной координатой  $x$  и временной  $t$ . Это задача о распространении светового импульса в неоднородном

световоде, и при строгом подходе ее решение сложно. Задачу можно упростить, если сделать следующие предположения:

1) световой импульс движется по волокну со средней групповой скоростью  $V_{гр}$ ;

2) за величину уширения оптического импульса примем среднеквадратичное уширение  $\Delta\tau(x)$  при распространении света по волокну на расстояние  $x$  и будем считать, что  $\Delta\tau(x) \ll \Delta t$ , где  $\Delta t$  – длительность импульса по уровню 0,5 максимальной интенсивности на входной грани волокна.

Тогда, переходя от переменных энергии  $E$  и координаты  $x$  к мощности  $P$  и времени  $t$  и учитывая, что  $E_0 = P_0 \Delta t$ ,

$2x = V_{гр}t$ ,  $dx = \frac{1}{2}V_{гр}dt$ , уравнение мощности обратно рассеянной световой волны запишем в виде

$$P_p(t) = 0,5P_0 \cdot \Delta t \cdot S \cdot \alpha_p \cdot V_{гр} \cdot e^{-\alpha V_{гр}t}, \quad (8.7)$$

где  $P_0$  – значение мощности оптического излучения на входной плоскости волокна.

Запишем последнюю формулу через расстояние (координату  $x$ ):

$$P_p(z) = 0,5P_0 \cdot \Delta t \cdot S \cdot \alpha_p \cdot V_{гр} \cdot e^{-2\alpha x}. \quad (8.8)$$

Из уравнений (8.7) и (8.8) следует, что мощность обратно рассеянного сигнала зависит от входной мощности  $P_0$ , длительности импульса  $\Delta t$  оптического излучения, параметров  $S$  и  $\alpha_p$  оптического волокна, а также от среднего коэффициента затухания и групповой скорости  $V_{гр}$ .

Две последние формулы являются основными в методе импульсной рефлектометрии. Они позволяют по величине сигнала обратного рассеяния  $P_p(t)$  изучать распределение параметров волокна по его длине. Ценную информацию могут дать и спектральные измерения. Например, сравнение распределений коэффициента затухания волокна на разных длинах волн позволяет исследовать распределение по длине волокна различных поглощающих примесей (Fe, радикалов ОН и других), даже если содержание этих примесей низкое.

При резком изменении показателя преломления сердцевины волокна имеет место френелевское отражение. Законы френелевского отражения хорошо изучены и многократно описаны в литературе. Отражение Френеля определяется коэффициентом отражения  $R$ :

$$R = \frac{P_{\text{отр}}}{P_0}, \quad (8.9)$$

где  $P_{\text{отр}}$ ,  $P_0$  – величина мощности отраженного и падающего сигналов соответственно.

Как правило, первое резкое изменение показателя преломления имеет место на входном участке при вводе излучения в волокно. В этом случае в сигнале обратного рассеяния получим локальный пик (см. рисунок 8.2).

Доля мощности света, рассеиваемая назад неоднородностями волокна и поступающая на вход волокна, крайне мала. Например, при длительности импульса 10 нс коэффициент обратного релеевского рассеяния  $\alpha_p$  составляет величину около  $-70$  дБ. Поэтому в рефлектометрах в волокно посылаются импульсы большой мощности и большой длительности, а для детектирования рассеянных назад импульсов света применяются высокочувствительные фотоприемники.

Мощность отраженного от входного торца волокна сигнала  $P_{\text{фр}}$ , как правило, на 3–4 порядка больше мощности света, поступающего на вход волокна, за счет релеевского рассеяния  $P_p$ . Отраженный от входного торца волокна импульс перегружает приемник рефлектометра, а на его восстановление требуется время. Этот интервал времени, при котором рефлектометр нечувствителен к другим сигналам отражения, называется «мертвой зоной». «Мертвая зона» главным образом зависит от длительности импульса светового излучения, проходящего по волокну. Чем больше длительность импульса в секундах, тем больше «мертвая зона» в метрах. «Мертвые зоны» могут возникнуть и при отражении сигналов от элементов линии связи (например, коннекторов) с высокой отражательной способностью.

## 8.2 Устройство и основные характеристики импульсных оптических рефлектометров

Структурная схема рефлектометра приведена на рисунке 8.4. Схема содержит источник оптического излучения (лазерный диод), фотоприемник (лавинный фотодиод), волоконно-оптический направленный ответвитель с оптическим соединителем, блоки усиления, обработки информационного сигнала и блок отображения результатов измерений (дисплей).

Рассеянные в волокне импульсы света передаются с помощью ответвителя на фотоприемник, где они преобразуются в электрический сигнал. Этот сигнал усиливается, накапливается, обрабатывается и отображается на дисплее в графической форме в виде рефлектограммы.

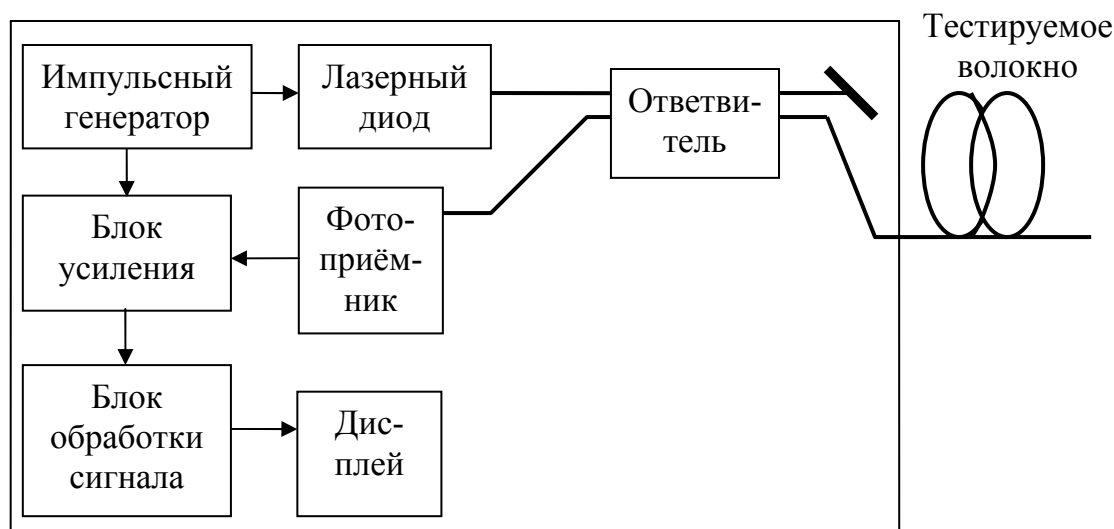


Рисунок 8.4 – Структурная схема рефлектометра

Вертикальная ось дисплея градуируется в децибелах, а положение луча по горизонтальной оси изменяется в зависимости от времени запаздывания оптического сигнала при его распространении по волокну. Горизонтальная ось градуируется в единицах длины конкретного типа волокна, определяемого его коэффициентом преломления. Устройство обработки информационного сигнала осуществляет регистрацию и занесение в память временных характеристик мощности обратного рассеяния и преобразо-

вания данных для соответствующего представления устройством отображения.

Мощность рассеянных назад импульсов на 80–50 дБ (в зависимости от их длительности) меньше мощности импульсов, вводимых в волокно. Поэтому для улучшения отношения сигнал/шум используется многократное усреднение результатов измерений. Причем для их эффективного усреднения достаточно нескольких секунд, так как время, затрачиваемое на прохождении линии, мало (100 км свет проходит за 1 мс).

Современные рефлектометры включают базовый и ряд сменных блоков, которые отличаются рабочей длиной волны и динамическим диапазоном. Кроме того, рефлектометр может быть объединен с принтером, а также блоком дистанционного управления и коммутатором оптических волокон, что позволяет его использовать в качестве устройства удаленного оптического тестирования.

Основными характеристиками рефлектометров, позволяющими сравнивать их между собой, являются: динамический диапазон; диапазон измерения; мертвая зона; разрешающая способность.

**Динамический диапазон** является основным параметром, представляющим интерес для пользователя, поскольку именно он определяет максимальную длину контролируемого прибором волокна и является наиболее надежным способом сравнения различных рефлектометров.

В соответствии с рекомендацией Международной Электротехнической Комиссии (IEC – International Electrotechnical Commission) динамический диапазон рефлектометра  $D$  определяется как разность в децибелах между уровнем сигнала обратного релеевского рассеяния в начале рефлектограммы  $P_c$  и пиковым значением шумов в отсутствие сигнала  $P_{\text{шум}}$ :

$$D = -10 \lg(P_c / P_{\text{шум}}).$$

В современных рефлектометрах динамический диапазон достигает 50 дБ. Трудность в достижении более высокого динамического диапазона связана с методикой измерений. Волокно

вносит потери, которые возрастают с увеличением длины волокна и в конечном счете световой поток, возвращаемый к фотоприемнику рефлектометра, становится настолько малым, что его невозможно интерпретировать. Максимальное расстояние, с которым мог бы работать рефлектометр с динамическим диапазоном  $D = 40$  дБ, составляет 200–240 км. Длину в 300 км может обеспечить прибор с  $D = 46$  дБ.

**Диапазон измерения** рефлектометра определяется как максимальное ослабление, которое прибор в состоянии измерить. В качестве события, которое должно быть идентифицировано, обычно выбирают сращивание волокон, создающее потери порядка 0,1–0,2 дБ.

**Пространственная разрешающая способность** рефлектометра  $\Delta l$  характеризует способность прибора обнаружить два соседних события и определить возможность выделения близко расположенных неоднородностей. Разрешающая способность  $\Delta l$  зависит от длительности импульса  $\Delta t$ , излучаемого лазером, ширины полосы пропускания усилителя  $\Delta f$  и определяется выражением

$$\Delta l = \frac{c}{2n} \sqrt{\Delta t^2 + \left( \frac{1}{\Delta f} \right)^2}. \quad (8.10)$$

Для повышения разрешающей способности необходимо уменьшать длительность зондирующих импульсов и расширять полосу пропускания усилителя.

Увеличение длительности оптических импульсов или расширение полосы пропускания усилителя приводит к увеличению дальности обнаружения неоднородности  $l$ , но одновременно снижает пространственную разрешающую способность  $\Delta l$ . Таким образом, всегда должен быть компромисс между дальностью и пространственной разрешающей способностью. Данный компромисс достигается снижением динамического диапазона на малых расстояниях тестирования, что позволяет расширить полосу пропускания усилителя и тем самым повысить разрешающую способность и точность измерения расстояния, а на больших рас-



стояниях тестирования используется меньшая полоса пропускания.

**Виды оптических импульсных рефлектометров.** На практике находят применение рефлектометры, которые работают во всех основных окнах прозрачности волоконных световодов.

**Стационарные рефлектометры** применяются в основном в лабораториях, так как имеют большой вес, габариты и широкие функциональные возможности. Они могут измерять общую длину линии и расстояние до отдельных неоднородностей; оценивать общее затухание трассы и отдельных ее участков, потери на неоднородностях; представлять результаты измерения в графическом и табличном видах; записывать их в память. Стационарные рефлектометры имеют функцию маски для устранения всплеска сигнала в начале рефлектограммы, возникающего при отражении сигнала от разъема рефлектометра.

**Мини-рефлектометры** применяются в полевых условиях для проведения всех необходимых видов измерений: определения местоположения обрывов волокна, участков линии с большими значениями потерь, коэффициентов отражения и т. д. Новые модели мини-рефлектометров могут комплектоваться оптическими модулями с большим динамическим диапазоном (до 50 дБ) и находят все большее применение не только в полевых, но и в лабораторных условиях, где до этого применялись преимущественно стационарные рефлектометры.

Мини-рефлектометры первого поколения обычно выпускались в виде законченных приборов. В современных конструкциях наметилась тенденция к модульным решениям. Сменные блоки позволяют производить измерения на длинах волн  $\lambda = 0,850; 1,3; 1,55$  мкм.

Классический рефлектометр даже в варианте мини-рефлектометра является сложным и дорогим прибором. Одно из направлений развития современной рефлектометрии – реализация прибора в виде стандартной карты (платы) персонального компьютера, что позволяет использовать вычислительные мощности компьютера для управления процессом измерений и обработки результатов измерений. Плата вставляется в ПК и несет на себе

электронные компоненты формирования зондирующего импульса, приема отраженного сигнала, его преобразования в электрический сигнал. Процедуры дальнейшей обработки и формирования рефлектограммы выполняет процессор компьютера при соответствующем программном обеспечении.

## 9 ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ОШИБОК В ЦИФРОВЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ

---

### 9.1 Нормы на параметры ошибок систем передачи

Функционирование цифровой системы передачи (ЦСП) оценивается коэффициентом битовых ошибок ( $BER$ ) – числом ошибок на заданное количество переданных битов информации. Определим причины появления битовых ошибок в реальных системах связи. Пусть  $P_{1,0}$  и  $P_{0,1}$  – оптическая мощность для переданного бита 1 и бита 0 соответственно. Фотоприемник в системе линии связи принимает решение, какой бит (0 или 1) был передан в каждом битовом интервале путем стробирования фототока. В цифровых трактах передачи действует ряд помех, влияющих на вероятность ошибок цифровой системы передачи. Во-первых, время передачи бита информации не остается постоянным (эффект фазового дрожания цифрового сигнала); во-вторых, излучаемая оптическая энергия не остается одной и той же при передаче как каждой единицы, так и каждого нуля вследствие шумов передатчика, приводящих к случайным изменениям амплитуды сигнала от импульса к импульсу; в третьих, конечная длительность излучаемых импульсов и временная дисперсия в процессе их распространения приводят к тому, что часть энергии, относящаяся к периоду передачи определенного бита, поступает во время передачи соседних битов (межсимвольные помехи), в четвертых, на величину фототока приемника влияют тепловые шумы самого приемника и т. п.

Из-за действия различного рода помех фототок для битов 1 и 0 является случайной величиной со средним значением фототока  $I_1$  и  $I_0$ .

Можно считать, что под действием различных шумов разброс значений фототока приемника имеет нормальное распределение и дисперсию  $\sigma_1^2$  и  $\sigma_0^2$  для битов 1 и 0 соответственно. Функции

плотности вероятности фототоков принятых сигналов приведены на рисунке 9.1.

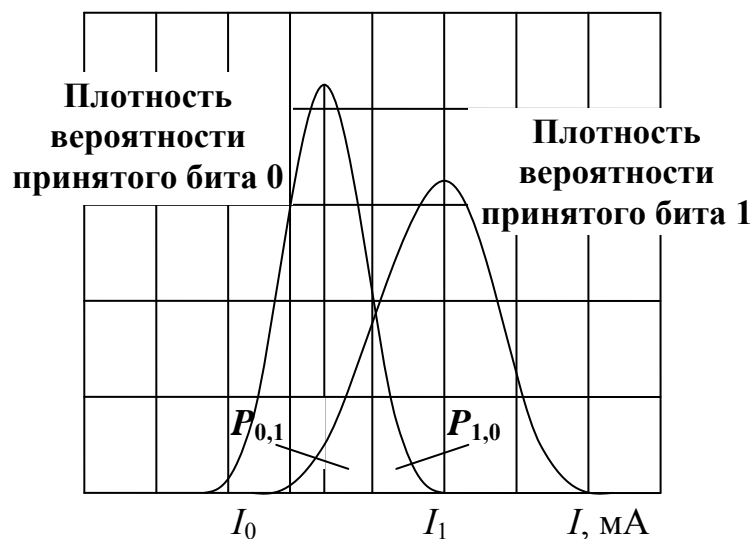


Рисунок 9.1 – Функция плотности вероятности фототока принятых сигналов

Приемник, отслеживая сигнал, должен решить, является ли переданный бит 0 или 1. При этом существует много возможных правил принятия решения, которые могут быть реализованы в приемнике с целью минимизации коэффициента битовых ошибок. Оптимальным решением является наиболее вероятное значение переданного бита, которое определяется путем сравнения текущего значения фототока с некоторым пороговым значением тока  $I_{\text{п}}$ . Например, при  $I \geq I_{\text{п}}$  принимается решение, что был передан бит 1, в противном случае – бит 0. Геометрически  $I_{\text{п}}$  представляет собой значение тока, для которого две кривые плотности вероятностей (см. рисунок 9.1) пересекаются.

Таким образом, появление ошибок является следствием совокупности всех текущих условий передачи цифровых сигналов, имеющих случайный характер, и они могут быть найдены с определенной степенью достоверности только по результатам продолжительных измерений.

Значение коэффициента битовых ошибок ( $BER$ ) в режиме счета ошибок определяется формулой

$$BER = \frac{N_{\text{ош}}}{T_{\text{изм}} \cdot B}, \quad (9.1)$$

где  $N_{\text{ош}}$  – число ошибок, зафиксированное за время измерения;  $T_{\text{изм}}$  – время измерения;  $B$  – скорость передачи цифровой последовательности сигнала.

Число ошибок  $N_{\text{ош}}$ , следовательно, и коэффициент ошибок  $BER$  являются случайными величинами, поэтому в приборах – измерителях коэффициента ошибок (ИКО) – измеряется среднее значение коэффициента ошибок за длительный интервал времени:

$$BER = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{N_{\text{оши}}}{T_{\text{изм}} \cdot B},$$

где  $n$  – число сеансов измерения;  $N_{\text{оши}}$  – число ошибок, зафиксированных в  $i$ -м сеансе.

Из приведенных выражений можно оценить требуемое время измерений:

$$T_{\text{изм}} = \frac{N_{\text{ош}}}{BER \cdot B}. \quad (9.2)$$

Например, при скорости передачи  $B = 64$  кбит/с, числе ошибок  $N_{\text{ош}} = 10$  для коэффициента ошибок  $BER = 10^{-6}$  получим время измерения  $T_{\text{изм}} \approx 2.5$  мин. При коэффициенте ошибок  $BER = 10^{-9}$  время измерения будет составлять несколько секунд при больших скоростях передачи ( $B=155020$  кбит/с) и может достигать нескольких часов при скорости передачи  $B = 64$  кбит/с. При проведении измерений коэффициента ошибок  $BER$  с усреднением время измерений умножается на степень усреднения  $n$ , которая может составлять величину от 10 до 100 в зависимости от требуемой точности измерений.

Битовые ошибки являются основным источником ухудшения качества связи, ведущего к искажению речи в телефонных каналах, недостоверности передачи данных, и характеризуются статистическими параметрами и нормами. Последние делятся на долговременные и оперативные нормы. Долговременные нормы определяются рекомендациями международного союза

электросвязи ITU-T G.821 и G.826, а оперативные – M.2100, M.2110 и M.2120. Согласно M.2100 качество цифрового тракта по уровню ошибок делят на три категории:

- 1) нормальное –  $BER < 10^{-6}$ ;
- 2) пониженное –  $10^{-6} < BER < 10^{-3}$  (предаварийное состояние);
- 3) неприемлемое –  $BER > 10^{-3}$  (аварийное состояние).

Так как появление ошибок является следствием совокупности причин, имеющих случайный характер, то при отсутствии данных о законе распределения ошибок его отдельные элементы могут быть определены с достаточной степенью достоверности только по результатам продолжительных измерений. На практике же необходимо, чтобы значения параметров ошибок для ввода в эксплуатацию и технического обслуживания ВОСП основывались на достаточно коротких интервалах времени измерения. Исходя из этого были определены следующие параметры ошибок:

1) секунда с ошибками – односекундный интервал, содержащий хотя бы один ошибочный бит;

2) секунда, пораженная ошибками, – односекундные интервалы с коэффициентом ошибок  $BER \geq 10^{-3}$ .

Данные параметры ошибок оцениваются в течение времени готовности, отсчет которого начинается с первой секунды из 10 следующих друг за другом секунд, в каждой из которых  $BER < 10^{-3}$ .

Критерием полного отказа цифровой системы передачи является промежуток времени, когда коэффициент ошибок в каждую секунду в течение 10 последовательных секунд более чем  $10^{-3}$ .

Измерение коэффициента ошибок связано с обнаружением и счетом числа ошибок, а также измерением определенных временных интервалов. Для измерения коэффициента ошибок разработан ряд специальных приборов – анализаторов коэффициента ошибок. В зависимости от скорости передачи в контролируемом тракте в анализаторах коэффициента ошибок используются различные схемотехнические решения.

## 9.2 Анализаторы коэффициента ошибок

Рассмотрим принцип действия анализаторов коэффициента ошибок, основанных на методе обнаружения ошибок путем сравнения единичных элементов принимаемого псевдослучайного сигнала с переданным. Используемый в телекоммуникациях *BER*-анализатор состоит из генератора тестовых кодов (рисунок 9.2, *а*) и собственно анализатора ошибок (рисунок 9.2, *б*).

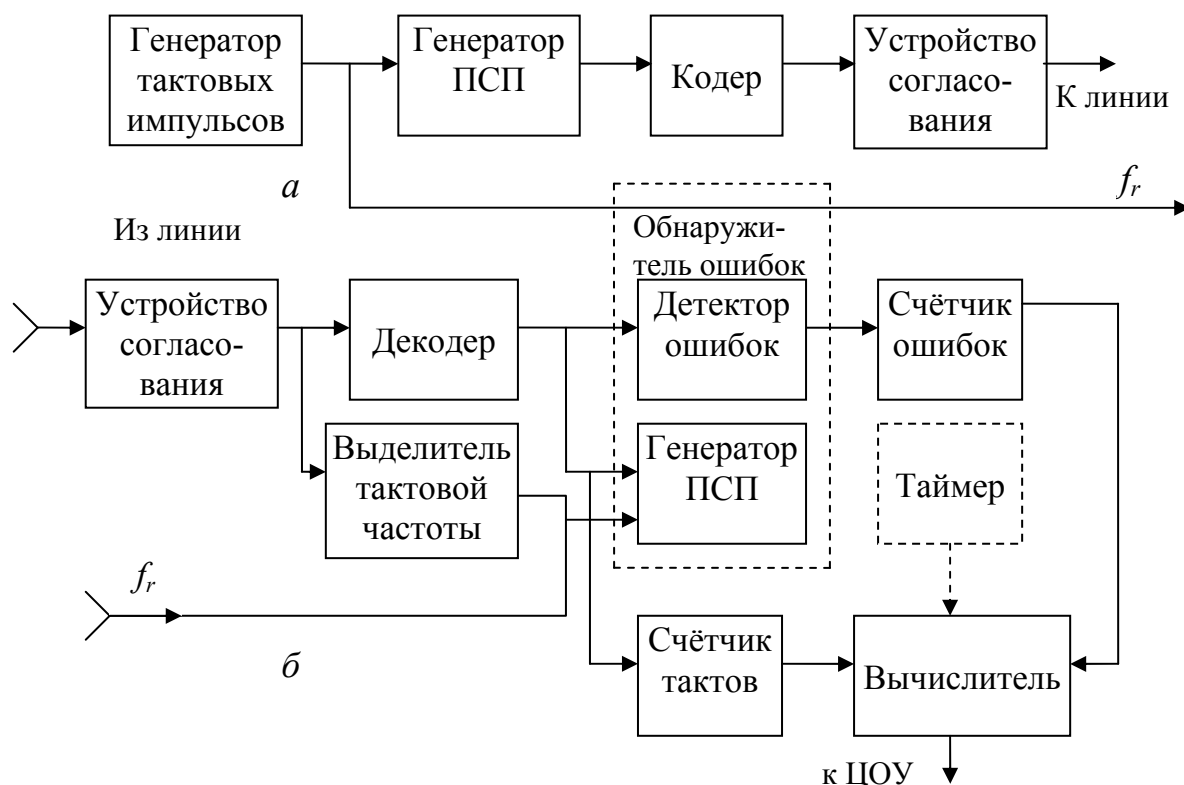


Рисунок 9.2 – Схема измерителя коэффициента ошибок

Генератор тестовых кодов содержит генератор тактовых импульсов, который обеспечивает требуемую в цифровой системе передачи (ЦСП) скорость передачи; генератор псевдослучайной бинарной последовательности (ПСП); кодер, осуществляющий кодирование сигнала ПСП в соответствии с кодом, используемым в ЦСП; устройство согласования с линией связи. В генераторе предусмотрен выход тактовой частоты для синхронизации работы анализатора ошибок.

Анализатор ошибок содержит устройство согласования с линией связи; декодер, осуществляющий операцию обратного

преобразования кодированного сигнала в исходный псевдослучайный сигнал; обнаружитель ошибок (показан пунктиром), включающий собственный генератор ПСП, идентичный с генератором ПСП на передающем конце; детектор ошибок, который осуществляет обнаружение ошибки путем сравнения принятого сигнала и сигнала собственного генератора ПСП (например, путем посимвольного сравнения) и счетчика ошибок.

Кроме того, в анализатор ошибок входит выделитель тактовой частоты для осуществления тактовой синхронизации, когда генератор и анализатор разнесены в пространстве. Счетчик тактов подсчитывает число тактов, за которое осуществляется счет ошибок. Вычислитель определяет коэффициент ошибок как отношение числа сосчитанных ошибок к числу сосчитанных тактов и подает его на цифровое отсчетное устройство. Показанный на схеме таймер позволяет измерять время счета ошибок (если есть таймер и известна скорость передачи, то можно обойтись и без счетчика тактов).

С помощью приведенной структурной схемы измеряется коэффициент ошибок в системах передачи с невысокой битовой скоростью (до 200 Мбит/с).

Схема высокоскоростного измерителя коэффициента ошибок приведена на рисунке 9.3. Она предназначена для измерений в системах передачи с битовой скоростью до 4 Гбит/с. При использовании высокоскоростного генератора тестовых кодов, например на скорости 4 Гбит/с, генерация последовательных псевдослучайных сигналов и кодовых групп ввиду высокой скорости нецелесообразна. Поэтому тестовые коды генерируются как параллельные 16-битные кодовые группы при максимальной скорости 200 Мбит/с.

Схемы для таких генераторов выполняются на основе GaAs-логических схем, преобразующих параллельные данные в последовательный поток до 4 Гбит/с.

Детектор ошибок имеет простое параллельное соединение, в связи с чем входы синхросигнала и данных, проходя через схемы дискретной и плавной задержки, обеспечивают оптимальную настройку для любой фазы синхросигнала/данных.



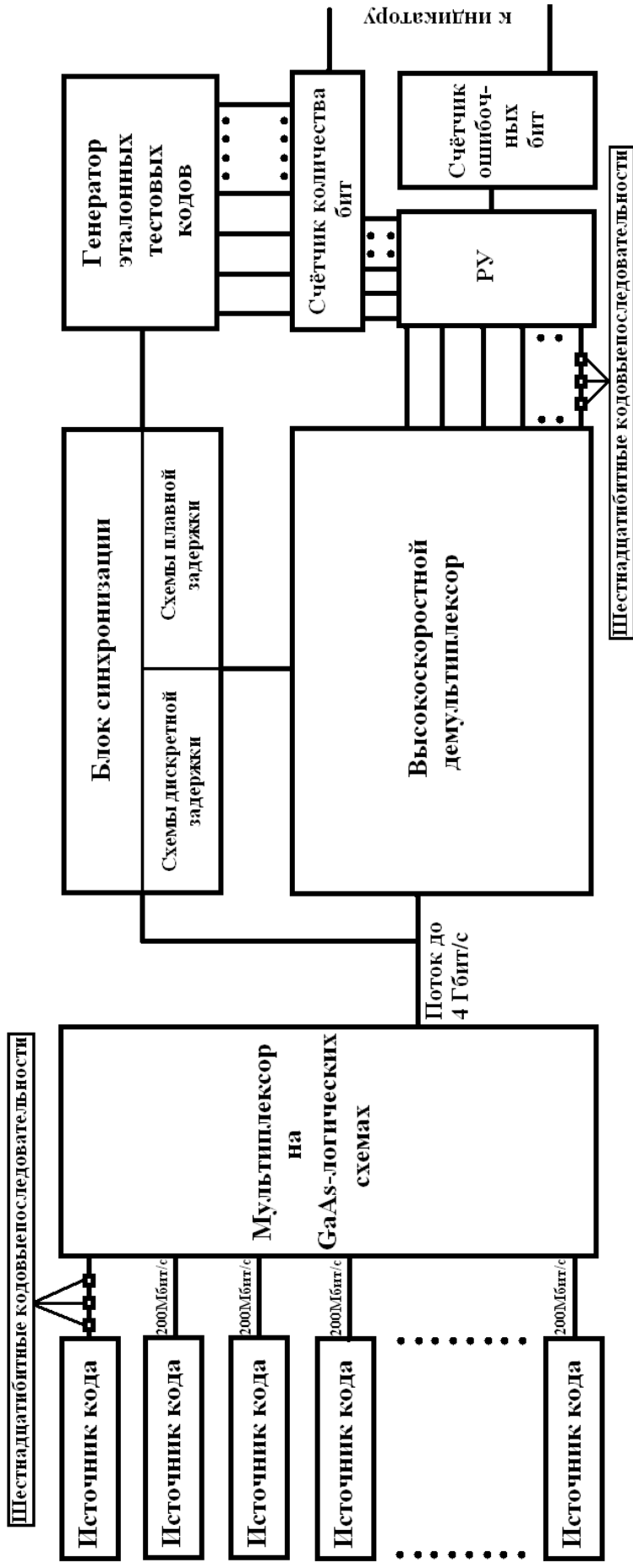


Рисунок 9.3 – Схема высокоскоростного измерителя коэффициента ошибок

Высокоскоростной демультиплексор преобразует последовательный поток данных в 16-битные параллельные кодовые группы. Параллельно соединенный генератор эталонных тестовых кодов синхронизируется с входными данными и осуществляет сравнение битов, поэтому любая ошибка фиксируется одним из двух счетчиков, первый из них подсчитывает число ошибок, а второй – общее число битов.

Измерения коэффициента ошибок проводятся с помощью измерителей коэффициента ошибок в контрольных точках волоконно-оптических систем передачи.

### **9.3 Примеры измерений с использованием анализатора коэффициента ошибок**

**Измерение энергетического потенциала линии связи.** Энергетический потенциал представляет собой разность между измеренными уровнями средней мощности оптического излучения на выходе передающего и входе приемного устройства при вносимом затухании, обеспечивающим допустимое значение коэффициента ошибок. Поэтому измерение энергетического потенциала осуществляется путем изменения ослабления аттенюатора, включенного в линию связи, с одновременным контролем коэффициента ошибок. Применение калиброванного аттенюатора позволяет определить значение энергетического потенциала непосредственно по его показаниям и не требует дополнительных расчетов.

**Измерение чувствительности приемного устройства** проводят аналогичным образом, устанавливая калиброванный аттенюатор на входе приемного устройства и измеряя минимальное значение средней мощности оптического излучения, при котором коэффициент ошибок не превышает требуемого значения.

**Измерение запаса мощности, обусловленного дисперсией волокна.** Как известно, показатель преломления оптоволокна изменяется в зависимости от длины волны, что является причиной хроматической дисперсии. Хроматическая дисперсия проявляется в неодинаковой скорости распространения света на разных

длинах волн и, поскольку все лазеры имеют конечную ширину спектра излучения, приводит к увеличению длительности передаваемых импульсов и межсимвольной интерференции. Таким образом, необходимо обеспечить запас мощности, минимальный уровень которой позволяет передать сигнал вдоль всей длины волокна без ошибок.

Схема измерения запаса мощности, обусловленного хроматической дисперсией, приведена на рисунке 9.4.

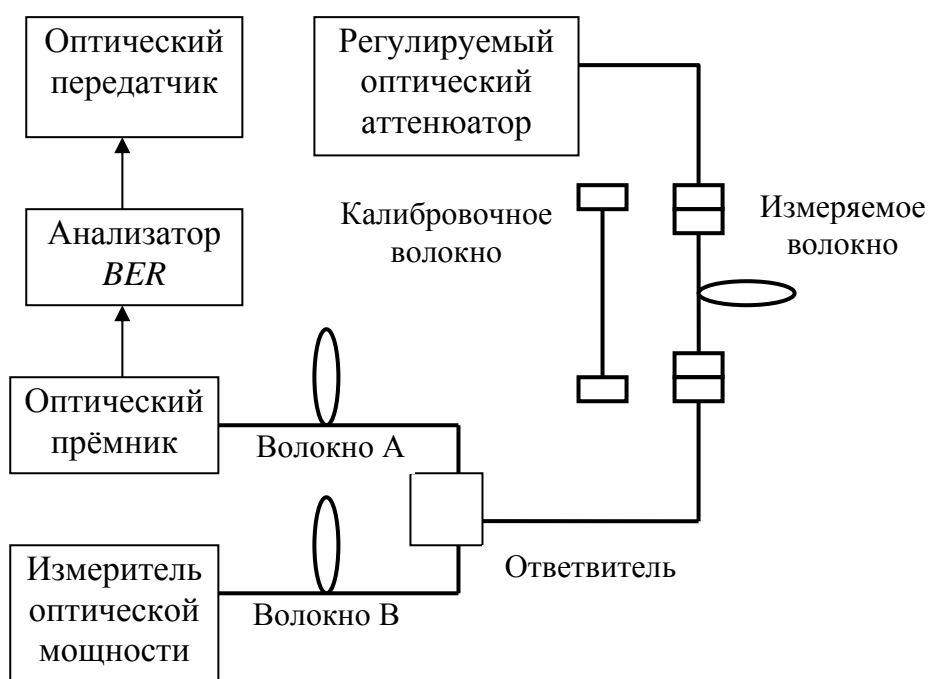


Рисунок 9.4 – Схема измерения запаса мощности, обусловленной хроматической дисперсией

Основные компоненты схемы включают анализатор коэффициента ошибок, лазерный источник, регулируемый оптический аттенюатор, приемник оптического излучения и измеритель оптической мощности.

Генератор тестовых кодов анализатора BER создает тестовую последовательность, соответствующую скорости передачи данных в реальной системе. При подключенном калибровочном волокне оптический аттенюатор настраивается на уровень, необходимый для достижения заданного коэффициента ошибок, и определяется минимальное значение мощности, поступающей на

приемник  $P_1$ . Оптический аттенуатор должен обладать низким значением собственной хроматической дисперсии. Коэффициент передачи оптического ответвителя должен составлять приблизительно 50:50. Затем подключается реальное волокно и определяется минимальный уровень оптической мощности  $P_2$  при заданном коэффициенте ошибок. Необходимый запас оптической мощности  $P$ , обусловленный дисперсией, будет определяться разностью  $P = P_2 - P_1$ .

## 10 КОНТРОЛЬ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СЕТЕЙ СВЯЗИ

---

Интенсивное развитие современных сетей телекоммуникаций выдвигает на первый план задачу обеспечения их безотказной работы. Существует ряд причин ухудшения или прерывания связи по волоконно-оптическим линиям. Одной из основных причин прерывания связи являются обрывы волокна. Поиск и локализация этой неисправности связаны с потерей времени и необходимостью проведения измерений на месте повреждения. Это в свою очередь требует увеличения числа бригад по обслуживанию кабельного хозяйства. Помимо данного вида неисправностей в линиях связи имеют место нарушения, вызванные изменением параметров оптических кабелей. Так, например, намокание кабеля, механические напряжения, вызванные его провисанием, приводят к временным изменениям параметров волокна, следствием чего является непредвиденное изменение качества связи. Старение кабеля также ведет к ухудшению качества связи. Необратимые процессы деградации волокна определить достаточно сложно. Для этого необходимо располагать статистическими данными, требующими большого числа измерений. Кроме того, развитие сетей телекоммуникаций приводит к периодически возникающим требованиям увеличения пропускной способности каналов связи. Решение этой задачи невозможно без наличия информации о значениях потерь и отражений в любой точке оптической сети, а также энергетическом бюджете ее отдельных участков.

Наиболее эффективно перечисленные задачи могут быть решены с помощью систем удаленного контроля оптических волокон (Remote Fiber Test System – RFTS). В таких системах контроль оптических волокон выполняется оптическим импульсным рефлектометром, диагностирующим состояние волокна с одного его конца по обратному рассеянию световой волны при введении в волокно зондирующих импульсов. Доступ к тестируемым оптическим волокнам обеспечивают оптические переключатели, управлять которыми можно дистанционно. При размещении переключателей в узлах дерева сети одно устройство удаленного

тестирования оптических волокон может обеспечить мониторинг сотен оптических кабелей.

Контроль оптических кабелей может быть проведен как по пассивному, так и по активному волокну. Контроль по пассивному оптическому волокну основан на тестировании резервного волокна оптического кабеля на длине волны, независимой от оптического луча трафика (рисунок 10.1).

Применение этого метода простое в реализации, не требует дополнительного оптического оборудования, но обуславливает необходимость дополнительного дублирующего волокна, которое отражает свойства волокон кабеля.



Рисунок 10.1 – Метод контроля оптического кабеля по пассивному волокну

Обычно в ВОЛС применяется оптическое излучение с длинами волн  $\lambda = 1310$  и  $\lambda = 1550$  нм. Для контроля по активному волокну целесообразно использовать  $\lambda = 1550$  нм при передачи данных на длине волны  $\lambda = 1310$  нм и наоборот. В то же время для увеличения емкости каналов передачи данных часто используют обе длины волн. Поэтому для контроля в активной линии связи необходимо использовать длину волны, отличную от указанных длин волн (рисунок 10.2).

Как правило, используется длина волны  $\lambda = 1625$  нм, которая отличается от используемых для передачи данных и может быть эффективно выделена на приемной стороне линии связи. Для этого в ВОЛС вводят мультиплексоры М, объединяющие длину волны тестирования с длиной волны трафика. Для исключения взаимного влияния двух процессов – передачи данных и контроля волокна – в схему вводят фильтры Ф, которые предотвращают

попадание тестируемого излучения на вход сетевого оборудования, а излучения передачи данных – на вход рефлектометра. Применение  $\lambda = 1310, 1550$  и  $1625$  нм вызвано тем, что в этом случае оптические компоненты, используемые в волоконно-оптической технике, имеют наиболее низкие потери.

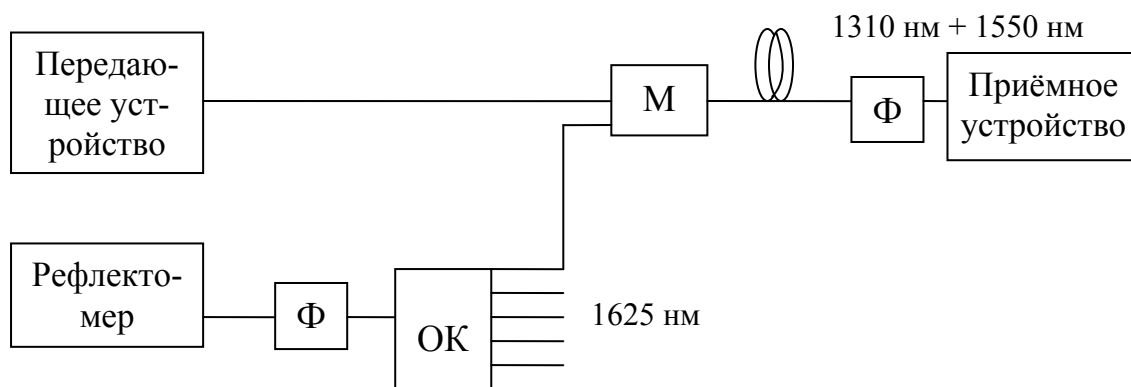


Рисунок 10.2 – Метод контроля оптического кабеля по активному волокну

При наличии в линии связи регенерационных участков, а также при необходимости исключения телекоммуникационного оборудования (СО) на этапе контроля предусматривается обход этих участков с использованием элементов М разделения длин волн трафика  $\lambda_{\text{траф}}$  и длины волны тестирования  $\lambda_{\text{тест}}$  (рисунок 10.3).

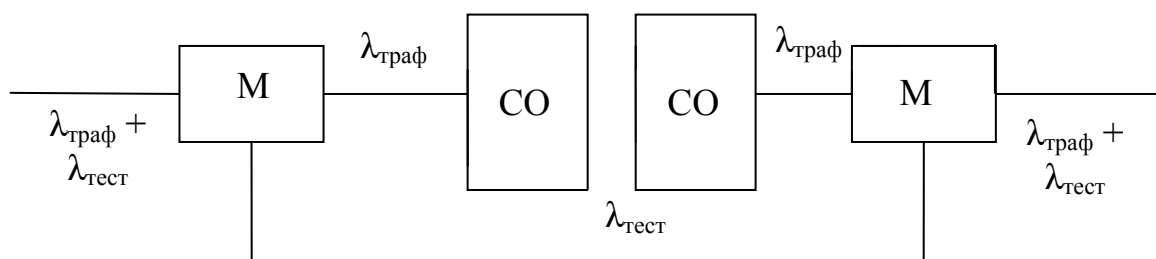


Рисунок 10.3 – Схема организации обхода телекоммуникационного оборудования по активному волокну

Метод контроля по активному волокну дает 100-процентную гарантию обнаружения неисправностей, но отличается от предыдущего более высокой стоимостью из-за необходимости использования мультиплексоров и фильтров. Этот метод целесо-

образно применять для тестирования ответственных волокон, когда все волокна оптического кабеля заняты для передачи данных.

Важнейшей функцией системы дистанционного контроля оптических волокон является постоянный автоматический сбор и статистический анализ результатов тестирования оптических волокон сети. Статистический анализ с использованием корреляционных, многофакторных методов дает возможность обнаруживать и прогнозировать неполадки волокна задолго до того, как они приведут к серьезным проблемам в сети.

На основе мониторинга сети при помощи системы дистанционного контроля можно проводить плановый и профилактический ремонт оптических кабелей в сети, не дожидаясь появления серьезных повреждений и аварий в кабельной системе.

Система дистанционного контроля значительно повышает безопасность сети – любое несанкционированное подключение к волокну неизбежно приводит к дополнительным потерям в оптическом канале, а значит, будет обнаружено и зафиксировано системой в реальном масштабе времени.

Другое не менее важное качество системы дистанционного контроля оптических волокон – графическое представление информации о состоянии сети. На центральном сервере системы может быть установлена точная электронная карта волоконно-оптической сети на местности. Вся информация о состоянии сети и оптических кабелей сети хранится в базе данных и может быть графически представлена на карте. Также на карту выводится полная информация о неисправностях волокон в оптических кабелях, включая их точное физическое местоположение.

Таким образом, система дистанционного контроля оптических волокон позволяет обслуживающему персоналу в реальном масштабе времени узнавать, где произошел сбой и каков уровень потерь в любом из волокон линии связи. Это намного сокращает время поиска неисправностей и упрощает проведение профилактического обслуживания волоконно-оптических линий связи. Учитывая размеры современных волоконно-оптических сетей и объемы передаваемой по ним информации, применение системы дистанционного контроля становится экономически эффективным.



## 11 ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ

---

Предлагаемые тестовые задания позволят выявить уровень освоения материала, приведенного в данном учебном пособии.

**1.** Когда производятся настроечные (инсталляционные) измерения в ВОЛС:

а) в процессе эксплуатации ВОЛС на соответствие эксплуатационным нормам;

б) в процессе эксплуатации ВОЛС на соответствие настроечным нормам;

в) при первоначальной настройке каналов и трактов ВОЛС на соответствие настроечным нормам?

**2.** Когда производятся профилактические измерения в ВОЛС:

а) в процессе эксплуатации ВОЛС на соответствие эксплуатационным нормам;

б) в процессе эксплуатации ВОЛС на соответствие настроечным нормам;

в) при первоначальной настройке каналов и трактов ВОЛС на соответствие настроечным нормам?

**3.** Какие из приведенных параметров являются измеряемыми параметрами многомодового оптического волокна:

а) затухание, дисперсия, диаметр модового пятна;

б) затухание, дисперсия, числовая апертура;

в) дисперсия, числовая апертура, длина волны отсечки?

**4.** Какие из приведенных параметров являются измеряемыми параметрами одномодового оптического волокна:

а) затухание, дисперсия, длина волны отсечки, диаметр модового пятна;

б) затухание, дисперсия, диаметр модового пятна, удельная проводимость;

в) затухание, дисперсия, диаметр модового пятна, коэффициент фазы?

**5.** Назовите источники излучения, используемые в волоконной оптике:

а) светодиоды, твердотельные лазеры;

- б) светодиоды, полупроводниковые лазеры;
- в) полупроводниковые лазеры, газовые лазеры.

**6.** Назовите приемники оптического излучения, используемые в волоконной оптике:

- а) фоторезистор, фотодиод с *p-n*-переходом;
- б) *p-i-n*-фотодиод, лавинный фотодиод (ЛФД);
- в) фототранзистор, *p-i-n*-фотодиод.

**7.** Какими приборами измеряется затухание в ВОЛС:

- а) оптический тестер, рефлектометр;
- б) измеритель абсолютной оптической мощности, рефлектометр;
- в) оптический тестер, анализатор спектра излучения?

**8.** Назовите границы оптического диапазона волн, используемого для передачи световых сигналов по оптическим кабелям:

- а) 870–1765 нм;
- б) 780–1575 нм;
- в) 780–1675 нм.

**9.** Как влияет затухание в оптическом волокне на длину участка регенерации:

- а) уменьшает длину участка регенерации;
- б) увеличивает длину участка регенерации;
- в) не влияет?

**10.** Основными параметрами измерителей абсолютной оптической мощности являются:

- а) диапазон рабочих длин волн, абсолютная погрешность измерения уровня мощности;
- б) диапазон рабочих длин волн, динамический диапазон измерений средней мощности, относительная погрешность измерения уровня мощности;
- в) динамический диапазон измерений средней мощности, относительная погрешность измерения уровня мощности.

**11.** Какими методами измеряется длина волны отсечки одномодовых волокон:

- а) методом передаваемой мощности, методом вносимых потерь;

б) методом передаваемой мощности, методом контроля диаметра модового пятна;

в) методом контроля диаметра модового пятна, методом обламывания оптического волокна?

**12.** В чем заключается анализ оптического спектра:

а) измерение оптической мощности в зависимости от длины волны света;

б) измерение затухания оптического сигнала в зависимости от длины волны света;

в) измерение дисперсии оптического сигнала в зависимости от длины волны света?

**13.** Какими методами можно измерить хроматическую дисперсию:

а) методом обламывания оптического волокна, методом поперечного смещения волокон;

б) методом вносимых потерь, методом дифференциального сдвига фаз;

в) методом сдвига фаз, методом дифференциального сдвига фаз?

**14.** В каких оптических волокнах измеряется межмодовая дисперсия:

а) в многомодовом;

б) в одномодовом;

в) в одномодовом со смещенной дисперсией?

**15.** Назовите основные характеристики импульсного оптического рефлектометра, по которым приборы сравниваются друг с другом:

а) пространственная разрешающая способность, мертвая зона, чувствительность приемного устройства;

б) динамический диапазон, диапазон измерения, пространственная разрешающая способность, мертвая зона;

в) динамический диапазон, мертвая зона, частотная характеристика приемного устройства.

**16.** Каким прибором измеряется коэффициент ошибок в ВОЛС:

а) анализатор коэффициента ошибок;

- б) тестер коэффициента ошибок;
- в) импульсный оптический рефлектометр?

**17.** На каких физических явлениях основана работа импульсного оптического рефлектометра при измерениях характеристик оптического волокна:

- а) на рэлеевском рассеянии и френелевском отражении;
- б) на рэлеевском рассеянии и мертвой зоне;
- в) на френелевском отражении и мертвой зоне?

**18.** Как называется способность импульсного оптического рефлектометра различать две близко расположенные неоднородности:

- а) пространственная разрешающая способность;
- б) динамический диапазон;
- в) диапазон измерения?

**19.** Как влияет дисперсия в оптическом волокне на длину участка регенерации:

- а) уменьшает длину участка регенерации;
- б) увеличивает длину участка регенерации;
- в) не влияет?

**20.** Каким параметром оценивается качество передачи цифрового сигнала по линиям связи:

- а) длительность сигнала  $T_c$ ;
- б) коэффициент битовых ошибок;
- в) отношение сигнал/шум?

## Литература

1. Введение в технику измерений оптико-физических параметров световодных систем / под ред. А. Ф. Котюка. – М.: Радио и связь, 1987. – 224 с.
2. Гроднев, И. И. Волоконно-оптические линии связи: учеб. пособие для вузов / И. И. Гроднев. – М.: Радио и связь, 1990. – 222 с.
3. Волоконно-оптические системы передачи: учеб. пособие для вузов / М. М. Бутусов [и др.]. – М.: Радио и связь, 1992. – 414 с.
4. Волоконно-оптические системы передачи и кабели: справ. / И. И. Гроднев [и др.]. – М.: Радио и связь, 1993. – 264 с.
5. Андреев, В. А. Строительство и техническая эксплуатация волоконно-оптических линий связи: учеб. для вузов / В. А. Андреев, В. А. Бурдин, Б. В. Попова. – М.: Радио и связь, 1995. – 200 с.
6. Семенов, А. Б. Волоконная оптика в локальных и корпоративных сетях связи / А. Б. Семенов. – М.: Компьютер пресс, 1998. – 304 с.
7. Иванов, А. Б. Волоконная оптика: Компоненты, системы передачи, измерения / А. Б. Иванов. – М.: Компания Сайрус Системс, 1999. – 672 с.
8. Бакланов, И. Г. Методы измерений в системах связи / И. Г. Бакланов. – М.: ЭКО-Трендз, 1999. – 196 с.
9. Слепов, Н. Н. Современные технологии цифровых оптоволоконных сетей связи / Н. Н. Слепов. – М.: Радио и связь, 2000. – 468 с.
10. Убайдулаев, Р. Р. Волоконно-оптические сети / Р. Р. Убайдулаев. – М.: Эко-Тренз, 2000. – 270 с.
11. Бакланов, И. Г. Технология измерений в современных телекоммуникациях / И. Г. Бакланов. – М.: ЭКО-Трендз, 2001. – 139 с.
12. Бакланов, И. Г. Тестирование и диагностика систем связи / И. Г. Бакланов. – М.: Эко-Тренз, 2001. – 268 с.

13. Контроль качества в телекоммуникационных системах / под ред. А. Б. Иванова. – М.: Компания САЙРУС СИСТЕМС, 2001. – 336 с.

14. Иванов, В. С. Состояние и проблемы метрологического обеспечения измерений в области ВОСП / В. С. Иванов, В. Е. Кравцов, С. В. Тихомиров // Фотон экспресс. – 2004. – № 5. – С. 5–9.

15. Измерение характеристик компонентов ВОСП / М. Я. Яковлев [и др.] // Фотон экспресс. – 2004. – № 5. – С. 24–26.

16. Попович Касерес М. В. Автоматизированные системы контроля состояния волоконно-оптических систем передачи информации / М. В. Касерес Попович, П. С. Ржевский, С. П. Ржевский // Фотон экспресс. – 2004. – № 5. – С. 32–35.

17. Тихомиров, С. В. Измерение параметров ВОСП методами оптической рефлектометрии / С. В. Тихомиров, В. Е. Кравцов // Фотон экспресс. – 2004. – № 5. – С. 36–38.

18. Листвин, А. В. Рефлектометрия оптических волокон / А. В. Листвин, В. Н. Листвин. – М.: ЛЕСАРарт, 2005. – 150 с.

19. Горлов, Н. И. Методы и аппаратура измерения параметров систем и устройств связи оптического диапазона: учеб. пособие для вузов / Н. И. Горлов, Е. А. Минина. – Новосибирск: Сиб-ГУТИ, 2005. – 311 с.

20. Методы измерений хроматической дисперсии в волоконно-оптических системах передачи информации / В. В. Григорьев [и др.] // Фотон экспресс. – 2011. – № 5(93). – С. 18–21.

21. Методы измерений поляризационной модовой дисперсии в волоконно-оптических системах передачи информации / В. В. Григорьев [и др.] // Фотон экспресс. – 2011. – № 5(93). – С. 22–27.

22. Субботин, Е. А. Методы и средства измерения параметров оптических телекоммуникационных систем: учеб. пособие для вузов / Е. А. Субботин. – М.: Горячая линия – Телеком, 2013. – 224 с.

23. Семенов, А. Б. Волоконно-оптические подсистемы современных СКС / А. Б. Семенов. – М.: ДМК-Пресс, 2017. – 632 с.

24. Портнов, Э. Л. Метрология в оптических телекоммуникационных системах: учеб. пособие для вузов / Э. Л. Портнов, Б. П. Хромой, А. Л. Сенявский. – М.: Горячая Линия – Телеком, 2019. – 272 с.

25. Портнов, Э. Л. Волоконная оптика: параметры передачи и влияния: учеб. пособие для вузов / Э. Л. Портнов. – М.: Горячая Линия – Телеком, 2019. – 344 с.

## Оглавление

Предисловие.....	3
1 КЛАССИФИКАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЙ ВОЛОКОННОЙ ОПТИКИ .....	4
1.1 Основные понятия и определения.....	4
1.2 Виды контроля физических величин волоконно-оптических систем передачи .....	7
1.3 Основные контрольно-измерительные операции волоконно-оптических систем передачи .....	8
1.4 Основные виды измерений волоконной оптики .....	9
2 ИЗМЕРЕНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ .....	24
2.1 Измерение абсолютной оптической мощности .....	24
2.2 Измерители оптической мощности на основе термофотодиодов.....	26
2.3 Измерители оптической мощности на основе фотодиодов ....	28
2.4 Устройство измерителей оптической мощности на основе фотодиодов .....	31
2.5 Измерение затухания.....	34
3 ИЗМЕРЕНИЕ ЧИСЛОВОЙ АПЕРТУРЫ.....	41
4 ИЗМЕРЕНИЕ ДИАМЕТРА МОДОВОГО ПОЛЯ.....	46
5 ИЗМЕРЕНИЕ ДЛИНЫ ВОЛНЫ ОТСЕЧКИ ОДНОМODOVЫХ ВОЛОКОН .....	48
6 ИЗМЕРЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК.....	53
6.1 Анализ оптического спектра.....	53
6.2 Анализаторы оптического спектра на основе интерферометра Фабри – Перо.....	54
6.3 Анализаторы оптического спектра на основе дифракционной решетки.....	59
6.4 Дифракционная решетка анализатора оптического спектра ..	61
6.5 Конструкции анализаторов оптического спектра на основе дифракционных решеток .....	68
6.6 Методы калибровки анализаторов оптического спектра по длине волны .....	70
6.7 Измерение спектральных характеристик с высоким разрешением .....	71
7 ИЗМЕРЕНИЕ ДИСПЕРСИИ .....	76
7.1 Виды дисперсии оптических волокон .....	76
7.2 Межмодовая дисперсия.....	76



7.3	Измерение межмодовой дисперсии .....	78
7.4	Хроматическая дисперсия.....	82
7.5	Измерение хроматической дисперсии .....	85
7.6	Поляризационная модовая дисперсия .....	90
7.7	Измерение поляризационной модовой дисперсии .....	92
8	<b>МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ.....</b>	<b>96</b>
8.1	Метод обратного рассеяния.....	96
8.2	Устройство и основные характеристики импульсных оптических рефлектометров .....	102
9	<b>ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ОШИБОК В ЦИФРОВЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ.....</b>	<b>107</b>
9.1	Нормы на параметры ошибок систем передачи.....	107
9.2	Анализаторы коэффициента ошибок.....	111
9.3	Примеры измерений с использованием анализатора коэффициента ошибок .....	114
10	<b>КОНТРОЛЬ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СЕТЕЙ СВЯЗИ .....</b>	<b>117</b>
11	<b>ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ.....</b>	<b>121</b>
	Литература .....	125

Учебное издание  
**Мандель** Аркадий Евсеевич  
МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ  
В ОПТИЧЕСКИХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ  
СИСТЕМАХ  
Учебное пособие

Подписано в печать 26.11.20. Формат 60x84/16.  
Усл. печ. л. 7,67. Тираж 100 экз. Заказ № 286.

Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники.  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40.  
Тел. (3822) 533018.