

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»

Кафедра общей физики

А. Ю. Игуменов, С. Н. Лукиных, И. В. Мельников

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ОРГАНИЗАЦИИ И ДИАГНОСТИКИ
ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ
ЛИНИЙ СВЯЗИ**

Лабораторный практикум

МОСКВА
МФТИ
2022

УДК 535(075)
ББК 22.343я73
И28

Рецензент

Кандидат физико-математических наук, доцент *Г. Е. Федоров*

Игуменов, Александр Юрьевич
Лукиных, Сергей Николаевич
Мельников, Игорь Владимирович

И28 Физические основы организации и диагностики волоконно-оптических линий связи : лабораторный практикум по общей физике / А. Ю. Игуменов, С. Н. Лукиных, И. В. Мельников – Москва : МФТИ, 2022. – 72 с.

Изложены теоретические основы волоконно-оптических линий связи. Рассмотрена физика явлений, происходящих в оптическом волокне, позволяющих организовать передачу информации и открывающих возможности для различных прикладных применений волокна. Приведено описание методов измерения основных параметров оптических систем. Приведено описание 4 лабораторных работ, позволяющих получить практические навыки работы с современным волоконно-оптическим оборудованием и анализа экспериментальных результатов.

Для выполнения лабораторного практикума по оптике в курсе общей физики, для преподавателей и студентов физических специальностей.

УДК 535(075)
ББК 22.343я73

© Игуменов А. Ю., Лукиных С. Н., Мельников И. В., 2022
© Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», 2022

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	5
1. ПРИНЦИПЫ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ.....	5
ПО ОПТИЧЕСКОМУ ВОЛОКНУ	5
1.1. Эффект полного внутреннего отражения	5
1.2. Конструкция оптического волокна	6
1.3. Модуляция сигнала в оптическом волокне	6
2. СОВРЕМЕННЫЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ЛИНИИ СВЯЗИ.....	7
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1. РЕФЛЕКТОМЕТРИЯ ПРОТЯЖЕННЫХ ОПТОВОЛОКОННЫХ СЕТЕЙ	9
1. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ.....	9
1.1. Релеевское рассеяние.....	9
2. ПРИНЦИП РАБОТЫ И ОСОБЕННОСТИ АППАРАТУРЫ.....	10
2.1. Оптический рефлектометр.....	10
2.2. Измерение потерь мощности оптическим рефлектометром	13
2.3. Мертвые зоны и пространственное разрешение рефлектометра	22
2.4. Ложные сигналы	26
ХОД РАБОТЫ	27
Контрольные вопросы.....	33
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2. ОПТИЧЕСКОЕ ЗАТУХАНИЕ В ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДАХ	34
1. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ.....	34
2. ПРИНЦИП РАБОТЫ И ОСОБЕННОСТИ АППАРАТУРЫ.....	34
2.1. Оптический тестер.....	34
2.2. Методы измерения потерь с помощью оптических тестеров.....	36
2.3. Сварка оптического волокна.....	38
2.4. Потери мощности при рассогласованном соединении волокон	41
2.5. Потери мощности в оптических коннекторах.....	43
ХОД РАБОТЫ	45
Контрольные вопросы.....	49

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3. ОПТОВОЛОКОННЫЕ ДАТЧИКИ ДЕФОРМАЦИИ И ТЕМПЕРАТУРЫ	50
1. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ	50
1.1. Одномодовые и многомодовые оптические волокна.....	50
1.2. Спекл-структуры	51
2. ПРИНЦИП РАБОТЫ И ОСОБЕННОСТИ АППАРАТУРЫ	52
2.1. Экспериментальное наблюдение спекл-картин.....	52
2.2. Оптоволоконные датчики деформации и температуры.....	53
ХОД РАБОТЫ.....	54
Контрольные вопросы	56
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4.	57
ЭРБИЕВЫЙ УСИЛИТЕЛЬ	57
1. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ	57
1.1. Принцип работы эрбиевого оптического усилителя.....	58
2. ПРИНЦИП РАБОТЫ И ОСОБЕННОСТИ АППАРАТУРЫ	61
2.1. Основные характеристики эрбиевых усилителей	61
2.2. Конструкция телекомовских эрбиевых усилителей.....	64
ХОД РАБОТЫ.....	67
Контрольные вопросы	70
Заключение.....	71
Литература.....	71

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время основная доля магистральных сетей передачи данных построена по технологии волоконно-оптических линий связи (ВОЛС). Оптическое волокно представляет собой диэлектрическую направляющую среду коаксиальной конструкции, состоящую из сердцевины, оболочки и первичного акрилатного покрытия. Оптическое волокно используется для канализации электромагнитных волн оптического и инфракрасного диапазонов. Значительное внимание уделяется вопросам увеличения пропускной способности и надежности сетей передачи данных, а значит, и вопросам измерения качества систем передачи. К ВОЛС предъявляются как общие, так и специфические требования тестирования.

1. ПРИНЦИПЫ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ ПО ОПТИЧЕСКОМУ ВОЛОКНУ

1.1. Эффект полного внутреннего отражения

Полное внутреннее отражение – внутреннее отражение, при условии, что угол падения превосходит некоторый критический угол. При этом падающая волна полностью отражается. Коэффициент отражения при полном внутреннем отражении не зависит от длины волны. В оптике это явление наблюдается для широкого спектра электромагнитного излучения, включая рентгеновский диапазон.

В геометрической оптике явление объясняется в рамках закона Снеллиуса. Учитывая, что угол преломления не может превышать 90° , получаем, что при угле падения, синус которого больше отношения меньшего показателя преломления к большему показателю, электромагнитная волна должна полностью отражаться в первую среду.

Наименьший угол падения, при котором наблюдается полное внутреннее отражение, называется *предельным* или *критическим углом*. Используется также наименование *угол полного отражения*.

В соответствии с волновой теорией явления, электромагнитная волна всё же проникает во вторую среду – там распространяется так называемая *неоднородная волна*, которая экспоненциально затухает и энергию с собой не уносит. Характерная глубина проникновения неоднородной волны во вторую среду порядка длины волны.

1.2. Конструкция оптического волокна

Оптическое волокно, как правило, имеет круглое сечение и состоит из двух частей – сердцевины и оболочки. Для обеспечения полного внутреннего отражения абсолютный показатель преломления сердцевины несколько выше показателя преломления оболочки. Сердцевина изготавливается из чистого материала (стекла или пластика), оболочка состоит из материала с легирующими добавками, изменяющими показатель преломления. Например, если показатель преломления оболочки равен 1,474, то показатель преломления сердцевины – 1,479. Луч света, направленный в сердцевину, будет распространяться по ней, многократно отражаясь от оболочки.

Возможны и более сложные конструкции: в качестве сердцевины и оболочки могут применяться двумерные фотонные кристаллы, вместо ступенчатого изменения показателя преломления часто используются волокна с градиентным профилем показателя преломления, форма сердцевины может отличаться от цилиндрической. Такие конструкции обеспечивают волокнам специальные свойства: удержание поляризации распространяющегося света, снижение потерь, изменение дисперсии волокна и др.

Оптические волокна, используемые в телекоммуникациях, как правило, имеют диаметр 125 ± 1 микрон. Диаметр сердцевины может отличаться в зависимости от типа волокна и национальных стандартов [1].

1.3. Модуляция сигнала в оптическом волокне

Существуют два основных типа модуляции сигнала в оптическом волокне – амплитудная и фазовая. Амплитудная модуляция в системах оптической связи предполагает изменение мощности оптического излучения передатчика. Значение «0» соответствует минимальному уровню мощности источника, значение «1» – максимальному уровню мощности (рис. 1). Прямая модуляция возможна в передатчиках как на основе светоизлучающих диодов, так и на основе полупроводниковых лазеров любого типа.

Модуляция абсолютного значения фазы в оптических системах затруднительна, и практический интерес представляют форматы на основе дифференциальной фазовой модуляции (DPSK). В DPSK информация содержится в разности фаз между двумя последовательными импульсами, а не в мощности излучения (рис. 1) [2].

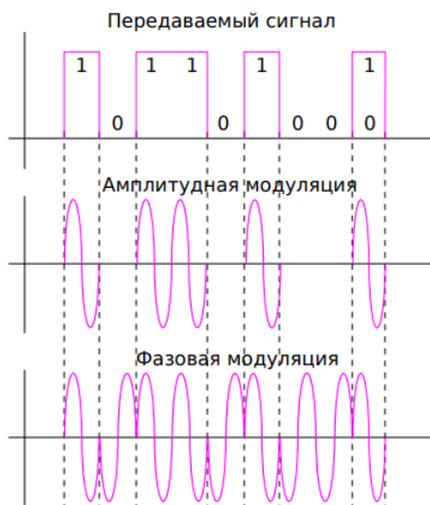


Рис. 1. Модуляция сигнала в оптическом волокне

2. СОВРЕМЕННЫЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ЛИНИИ СВЯЗИ

Для создания ВОЛС нового поколения, работающих на мультигигабитных и терабитных скоростях используется технология уплотненного волнового мультиплексирования (Dense Wave Division Multiplexing, DWDM). DWDM предполагает передачу одновременно большого количества световых волн. Каждая световая волна представляет собой отдельный спектральный канал и несет собственную информацию. Оптические каналы располагаются в диапазоне от 1530 до 1565 нм с шагом 0,4 нм (50 ГГц) или 0,8 нм (100 ГГц). DWDM-технология представляет собой основу для организации высокоскоростных ВОЛС. Технология поддерживает скорости от 150 Мбит/с до 400 Гбит/с на одну длину волны.

Предшественником DWDM является CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing) – мультиплексирование с разреженным спектральным разделением (технология грубого спектрального

уплотнения). CWDM обеспечивает передачу в широком диапазоне от 1260 до 1625 нм до 18 оптических каналов с шагом 20 нм между ними [2].

Основные компоненты DWDM-систем:

– Транспондеры/мультиплексы, формирующие сигналы на разных длинах волн. Эти компоненты совмещают в себе передающую и приемную части: преобразуют несущую длину волны сигнала, поступающего от клиентского оборудования, к установленному частотному плану WDM, а оптического сигнала, приходящего из линии, – к несущей длине волны клиентского оборудования.

– Компоненты, производящие спектральное уплотнение: мультиплексоры и демultipлексоры. Параметры этих компонентов определяют плотность расположения каналов, их количество, полосу пропускания по каждому каналу. Мультиплексоры объединяют сигналы из разных волокон на разных длинах волн в одном волокне, а демultipлексоры разделяют несколько сигналов на разных длинах волн из одного волокна по разным волокнам.

– Оптические усилители. Поскольку в оптическом волокне происходит затухание сигнала, на линии необходимо размещать устройства, восстанавливающие уровень мощности и увеличивающие дальность передачи.

Значительным шагом на пути развития DWDM-систем стало появление эрбиевых усилителей (Erbium Doped Fiber Amplifier, EDFA) в начале 1990-х гг. EDFA позволяет равномерно усилить информационные каналы на разных длинах волн в C-диапазоне (1530–1565 нм) с минимальным затуханием сигнала. Таким образом, появление эрбиевых усилителей открыло возможность построения многоканальных систем, обеспечивающих передачу данных на протяженные расстояния без электрической регенерации сигнала. В CWDM-технологии не используются оптические усилители, так как большинство каналов не входит в рабочий диапазон длин волн эрбиевого усилителя [2].

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1. РЕФЛЕКТОМЕТРИЯ ПРОТЯЖЕННЫХ ОПТОВОЛОКОННЫХ СЕТЕЙ

Цель работы: изучение физических основ оптической рефлектометрии, получение практических навыков сборки оптических схем, работы с оптическим рефлектометром и измерения потерь на сварках, коннекторах и изгибах волокна.

В работе используются: оптический рефлектометр; катушки оптоволоконна SMF, NZDSF, PSCF по 5 км; сварки оптоволоконна с коннекторами LC/UPC; оптические соединители LC/UPC; намотки оптоволоконна различного диаметра и количества витков.

1. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

1.1. Релеевское рассеяние

Рассеяние света в оптоволокне на неоднородностях, имеющих размер меньше длины волны излучения, называется *релеевским рассеянием*. В основном релеевское рассеяние происходит на флуктуациях показателя преломления, вызванного флуктуациями плотности кварца (рис. 2). Помимо флуктуаций плотности кварца, неоднородности в сердцевине волокна могут быть вызваны внесением в ее состав примесей на этапе производства.

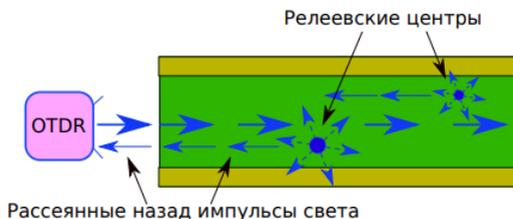


Рис. 2. Релеевское рассеяние в оптическом волокне

Одной из важных характеристик оптического волокна является апертурный угол – угол относительно оси волокна, при попадании в который излучение может туннелировать по волокну. Релеевское рассеяние происходит во всех направлениях – от 0 до 180° относительно исходного луча. Если угол между рассеянным лучом и осью волокна

меньше аппертурного, рассеянный луч распространяется вдоль волокна. Рассеянные в обратном направлении лучи регистрируются рефлектометром. Благодаря эффекту релеевского рассеяния возможно определить местоположение неотражающих событий (сварных соединений и изгибов) рефлектометрическим методом.

Релеевское рассеяние – протяженный эффект. Размер области, в которой происходит рассеяние, всегда больше длины волны. Отражение локально, поскольку граница раздела материалов с разным коэффициентом преломления резкая. При отражении сохраняются длительность импульса и фронты волн.

2. ПРИНЦИП РАБОТЫ И ОСОБЕННОСТИ АППАРАТУРЫ

2.1. Оптический рефлектометр

Единственным прибором, способным локализовывать события внутри оптического элемента, является оптический рефлектометр (OTDR, Optical Time-Domain Reflectometer). Оптический рефлектометр – это измерительный прибор, предназначенный для определения расстояния до неоднородностей показателя преломления оптического волокна и измерения потерь в них. Возможен анализ сварных соединений, макроизгибов, коннекторов, обрывов и т.д., что очень важно для протяженных волоконно-оптических линий. Работа OTDR основана на детектировании вернувшихся сигналов вследствие релеевского рассеяния и френелевского отражения.

В ходе диагностики оптического волокна оптический рефлектометр посылает в него мощный зондирующий оптический импульс определенной амплитуды и длительности и измеряет мощность и амплитуду импульсов, вернувшихся обратно в рефлектометр.

Одновременно с подачей зондирующего импульса рефлектометр начинает отсчет времени. Распространяясь по оптическому волокну, импульс сталкивается с различными препятствиями (повреждениями, неоднородностями), от которых происходит отражение части сигнала. Отраженный сигнал распространяется в обратном направлении и время его поступления на вход рефлектометра фиксируется. Те неоднородности показателя преломления, параметры которых (затухание, амплитуда) больше установленных порогов, в рефлектометрии называются *события*.

В свою очередь, события делятся на отражающие (вызванные френелевским отражением) и неотражающие (вызванные релеевским рассеянием).

В качестве зондирующего импульса используются излучения следующих длин волн.

Таблица 1
Длины волн зондирующего импульса и их погонное затухание

Длина волны, нм	Типичные значения погонного затухания, дБ/км
850	3
1300	1
1310	0,33
1380	0,50
1490	0,21
1550	0,2
1625	0,22

Ослабление излучения на единицу длины (дБ/км) называется *погонным затуханием* и зависит от длины волны зондирующего импульса. Чаще всего в рефлектометрах используются длины волн 1310 и 1550 нм с соответствующими значениями погонного затухания 0,33 дБ/км и 0,2 дБ/км. Погонное затухание вызвано релеевским рассеянием и инфракрасным поглощением, является одной из характеристик качества волокна.

В качестве примера на рис. 3 приведены рефлектограммы, записанные при длинах волн 1310 и 1550 нм.

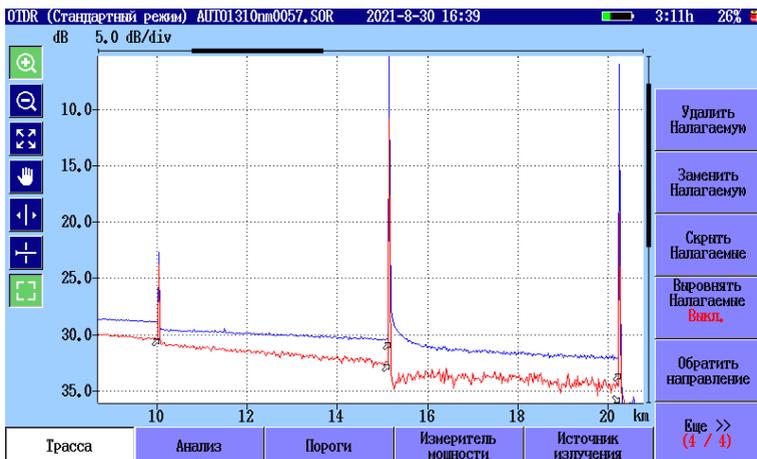


Рис. 3. Рефлектограммы линии: компенсирующая катушка 10 км, 2 катушки волокна YOFC SMF G652D по 5 км. Соединения катушек LC-UPC и FC-UPC коннекторами. Верхняя рефлектограмма записана при длине волны 1550 нм, нижняя – 1310 нм

Видно, что угол наклона рефлектограммы при длине волны 1550 нм меньше, чем при длине волны 1310 нм, что связано с меньшим погонным затуханием на длине волны 1550 нм.

Спектр потерь и положение окон прозрачности в кварцевых волокнах представлены на рис. 4.

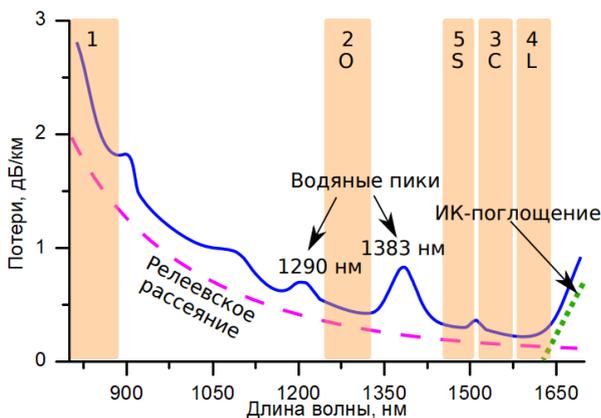


Рис. 4. Спектр потерь и положение окон прозрачности в кварцевых волокнах

На данном графике наблюдаются пики при длинах волны 1290 и 1383 нм, называемые также *водяными пиками*. Эти пики обусловлены наличием примесей и ОН-группами, колебательные уровни которых поглощают свет на этих длинах волн. В области коротких длин волн спектра потери ограничиваются релеевским рассеянием, а в области больших длин волн – инфракрасным поглощением. Релеевское рассеяние уменьшается с увеличением длины волны $\sim 1/\lambda^4$, а инфракрасное поглощение увеличивается. Абсолютный минимум потерь находится вблизи длины волны 1550 нм. В табл. 2 приведены окна прозрачности и соответствующие длины волн [3–5].

Таблица 2

Окна прозрачности

Обозначение окна	Диапазон длин волн, нм
Первое окно	780...860
Второе окно O	1260...1360
Третье окно C	1530...1565
Четвертое окно L	1565...1625
Пятое окно S	1460...1530

2.2. Измерение потерь мощности оптическим рефлектометром

Результат измерения рефлектометр представляет в виде графика, называемого *рефлектограммой*, по оси абсцисс откладывается расстояние, по оси ординат – затухание (рис. 5).

В начале рефлектограммы наблюдается пик обратного рассеяния от входного коннектора, имеющий протяженную форму – это так называемая мёртвая зона. Далее могут присутствовать пики, ступеньки вверх и вниз. Заканчивается рефлектограмма шумами прибора. Далее рассматриваются причины возникновения потерь мощности и особенности их проявления на рефлектограмме.

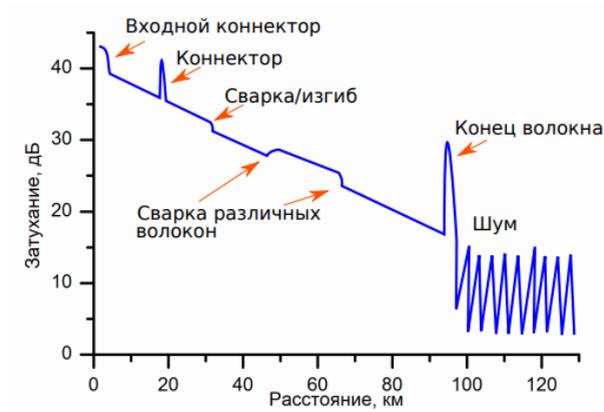


Рис. 5. Схема рефлектограммы с типичными потерями мощности

Математическая модель работы рефлектометра

Мощность сигнала обратного рассеяния в однородном оптическом волокне уменьшается во времени по двум причинам:

1. уменьшается мощность (энергия) зондирующего сигнала;
2. рассеянное излучение ослабляется во столько же раз при распространении вдоль волокна в обратном направлении.

Обозначим через $P(L)$ мощность оптического сигнала зондирующего импульса на расстоянии L , выраженную в линейных единицах (Вт). Для коротких зондирующих импульсов обозначим мощность $P_R(z_1, z_2)$ (Вт) излучения, рассеянного на некотором малом участке с координатой z_1 , измеренную в точке z_2 .

В точке рассеяния $z_2 = z_1 = L$ справедливо следующее выражение для мощности рассеянного излучения:

$$P_R(z_1, z_2) = P(L) X(\tau_0, L) (\tau / \tau_0),$$

где $X(\tau_0, L)$ – коэффициент обратного рассеяния волокна в точке L для импульса единичной длительности τ_0 , τ – длительность тестирующего импульса.

Мощность $P(L)$ зондирующего импульса в области рассеяния на расстоянии L определяется формулой

$$P(L) = P_0/A(0, L) = P_0/A(L),$$

где $P_0 = P(0)$ – мощность импульса на входе в волокно ($z = 0$), а $A(z_1, z_2)$ – затухание (потери) (в разах) на участке $[z_1, z_2]$, причем $A(z_1, z_2) = A(z_2, z_1)$, потери на участке не зависят от направления распространения сигнала.

Рассеянное излучение при распространении назад от точки L до нуля также затухает в $A(0, L)$ раз. Поэтому мощность рассеянного излучения, попадающая на фотоприемник, как функция расстояния до точки рассеяния L определяется следующим выражением:

$$P_R(L) = P_R(L, 0) = P_R(L, L) / A(0, L) = P_0 A^{-2}(0, L) X(\tau_0, L) (\tau / \tau_0). \quad (1)$$

Были введены обозначения $P_R(z_1, z_2)$ – мощность рассеянного обратного излучения в точке z_1 , пришедшая в точку z_2 , и $P_R(z) = P_R(z, 0)$.

В оптическом рефлектометре регистрируется мощность рассеянного сигнала в логарифмических единицах – децибелах на милливатт (дБм), а отношения в децибелах (дБ). Перепишем формулу (1), используя логарифмические единицы:

$$p_R(L) = p_R(L, 0) = p_0 - 2a(0, L) + \chi(\tau_0, L) + 10\lg(\tau / \tau_0),$$

где

$$p = 10\lg(P) \text{ [дБм];}$$

$$a = 10\lg(A) \text{ [дБ];}$$

$$\chi(\tau_0, L) = 10\lg(X(\tau_0, L)) \text{ [дБ]}. \quad (2)$$

Как следует из формулы (2) в общем случае регистрируемая приемником мощность $p_R(L)$ зависит от коэффициента рассеяния $\chi(\tau_0, L)$ в точке L . Если в линии связи используется волокно с постоянным значением $\chi(\tau_0)$, не зависящим от координаты (по крайней мере на некотором участке), то разность мощностей $\Delta p_R(L) = p_R(L_A) - p_R(L_B)$, где $p_R(L_A)$ и $p_R(L_B)$ измерены в моменты времени, соответствующие отражению от двух точек А и Б, будет равна удвоенному затуханию на участке от А до Б:

$$\Delta p_R(L) = p_R(L_A, 0) - p_R(L_B, 0) = 2a(0, L_B) - 2a(0, L_A) = 2a(L_B).$$

Поскольку задачей измерений является измерение затухания, а не его удвоенного значения, то для удобства работы с рефлектометром прибор пересчитывает измеренную зависимость так, что на вертикальной шкале откладывается значение затухания a_{OTDR} в дБ, которое вдвое меньше значения разности между уровнем мощности в измеряемой точке и начальным уровнем мощности рассеянного излучения:

$$a_{\text{OTDR}}(L) = 0,5 (p_R(L, 0) - p_R(0, 0)).$$

Измеренное значение затухания на некотором участке

$$a_{\text{OTDR}}(L_A, L_B) = a(L_B) - a(L_A)$$

между точками А и Б будет определяться следующим выражением:

$$a_{\text{OTDR}}(L_A, L_B) = a(L_B) - a(L_A) + [\chi(\tau_0, L_A) - \chi(\tau_0, L_B)]/2.$$

При использовании в точках А и Б волокна с одинаковым коэффициентом рассеяния $\chi(\tau_0, L_A) = \chi(\tau_0, L_B)$ получается, что измеренное по шкале рефлектометра затухание равно действительному затуханию:

$$a_{\text{OTDR}}(L_A, L_B) = a(L_B) - a(L_A) = a(L_A, L_B).$$

По горизонтальной оси рефлектометра отложено расстояние, равное половине произведения временной задержки t на групповую скорость света в волокне v_{GR} :

$$L = 0,5 t v_{GR}.$$

Расстояние до тестируемого участка ВОЛС определяется путем пересчета измеренной временной задержки соответствующего этому участку рассеянного или отраженного сигнала. Для получения высокой пространственной точности измерений необходимо: во-первых, обеспечить высокую точность измерения временных задержек, а во-вторых, установить точное значение показателя преломления n_{GR} . Групповая скорость определяется соотношением $v_{GR} = c/n_{GR}$.

Величина группового показателя преломления обычно приводится в спецификациях на оптические волокна кабеля. Если этого не сделано, то в данном случае в рефлектометре можно установить среднее значение группового показателя преломления для одномодового волокна $n_{GR} = 1,467$.

В современных рефлектометрах блок обработки данных состоит из аналогово-цифрового преобразователя и блока цифровой обработки – специализированного компьютера. Для уменьшения уровня шума и, следовательно, расширения динамического диапазона при сохранении пространственного разрешения в блоке цифровой обработки осуществляется накопление данных от большого числа отраженных сигналов. Уровень шума уменьшается пропорционально корню квадратному из числа сигналов.

Сформированная блоком обработки данных в электронном виде рефлектограмма подается на дисплей либо обрабатывается в специальных блоках автоматической обработки, и на дисплей подаются результаты обработки. Рефлектограмма может записываться в память рефлектометра либо может сравниваться с хранящимися в памяти рефлектограммами [3–5].

Динамический диапазон рефлектометра

Дальность работы рефлектометра определяется динамическим диапазоном (ДД). Динамический диапазон зависит от отношения максимальной мощности рассеянного сигнала к уровню (мощности) шума. Увеличить динамический диапазон можно, увеличивая мощность рассеянного излучения, уменьшая уровень шума, или и то, и другое одновременно. Динамический диапазон (D_R , [дБ]) рефлектометра рассчитывается по следующей формуле:

$$D_R = 5(\lg S_0 - \lg S_n),$$

где S_0 – мощность рассеянного сигнала (измеряется от начала рефлектограммы), S_n – уровень шума. Мощность сигнала S_0 однозначно определена и может быть измерена по рефлектограмме (рис. 5), уровень шума может быть определен как среднеквадратичный уровень шума или шум по уровню 98%. В первом случае S_n определяется как среднеквадратичное значение шума, поэтому его еще называют уровнем шума при SNR = 1. Этот уровень равен стандартному отклонению при гауссовой статистике шума. Шум по уровню 98% определяется так, чтобы на оцифрованной рефлектограмме в 98% случаев оцифрованное значение лежало ниже заданного уровня и только в 2% случаев – выше. 98% уровень шума лежит на 1,8 дБ выше среднеквадратичного уровня шума (рис. 6).

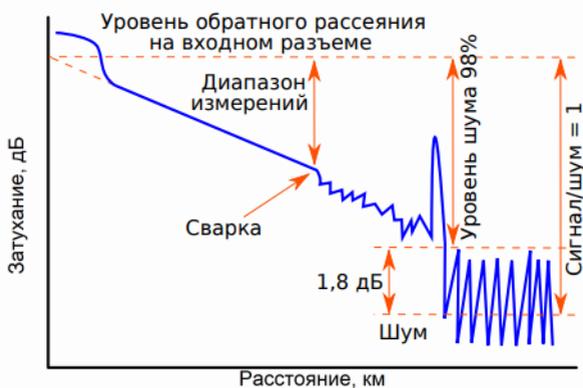


Рис. 6. Определение динамического диапазона по рефлектограмме

Наряду с динамическим диапазоном используется диапазон измерений (ДИ), определяющий диапазон изменения мощности обратного рассеяния, при которой измерения можно проводить с некоторым заданным коэффициентом сигнал/шум. С увеличением расстояния уменьшается коэффициентом сигнал/шум, и ДИ показывает расстояние, которое можно проверить с отношением сигнал/шум не хуже заданного.

Согласно [3] диапазон измерений определяется по формуле

$$5\lg[(S_0 + S_n)/(S_0 - S_n)] = 0,2 \text{ дБ.}$$

где S_n – среднеквадратичная мощность шума.

На динамический диапазон и диапазон измерений влияют следующие параметры рефлектометра:

1. Длительность импульса влияет на ДД/ДИ и на разрешающую способность рефлектометра. Чем больше длительность импульса, тем больше мощность сигнала, отраженного от различных точек, соответственно больше ДД/ДИ. В то же время увеличение длительности импульса приводит к ухудшению разрешающей способности рефлектометра (рис. 7).

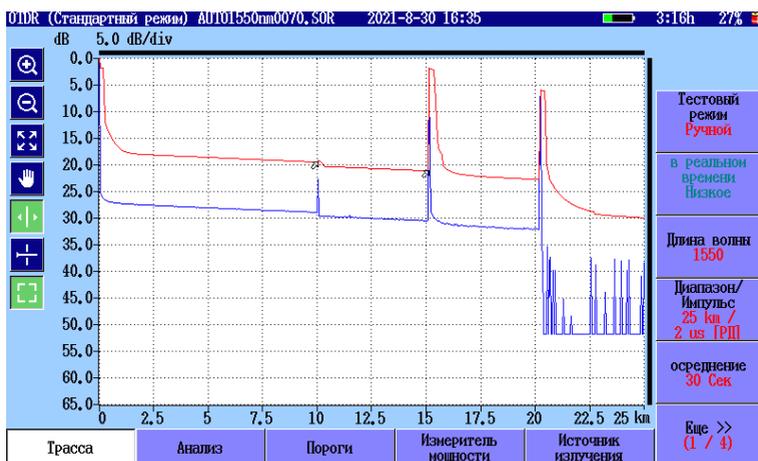


Рис. 7. Рефлектограммы линии: компенсирующая катушка 10 км, 2 катушки волокна YOFC SMF G652D по 5 км. Соединения катушек LC-UPC и FC-UPC коннекторами. Верхняя рефлектограмма записана при длительности импульса 2000 нс, нижняя – 20 нс

2. Время накопления рефлектограмм оптимизирует ДИ за счет времени проведения эксперимента. Усреднение большого количества рефлектограмм уменьшает шумовую составляющую.

3. Ширина полосы пропускания электрических фильтров на приемнике. Широкая полоса пропускания сохраняет высокочастотные компоненты спектра, при этом рефлектограмма содержит большее количество шума. Уменьшение ширины полосы пропускания повышает отношение сигнал/шум, отсекает высокие частоты, сглаживает рефлектограмму. Более точная локализация событий достигается при большой полосе пропускания и короткой длительности импульса.

4. Длина волны зондирующего сигнала может влиять на ДД/ДИ косвенно, поскольку от нее могут зависеть мощность лазера и чувствительность фотоприемника.

Величина динамического диапазона увеличивается с увеличением длительности импульсов τ и времени усреднения сигнала t . Например, при увеличении длительности импульса в 1000 раз (от $\tau_1 = 10$ нс до $\tau_2 = 10$ мкс) коэффициент обратного релеевского рассеяния увеличивается (по шкале рефлектометра) на $5\log(\tau_1/\tau_2) = 15$ дБ. Так как уровень шумов (в отсутствие сигнала) при этом не меняется, то динамический диапазон тоже увеличивается на 15 дБ.

При увеличении времени усреднения уменьшается среднеквадратичное значение шума. В приближении белого (гауссова) шума его среднеквадратичное значение изменяется обратно пропорционально квадратному корню из времени усреднения сигнала. Увеличение времени усреднения от t_1 до t_2 соответствует уменьшению уровня шума и увеличению динамического диапазона по шкале рефлектометра на $2,5\log(t_2/t_1)$. Например, при увеличении времени усреднения в 100 раз (от $t_1 = 1$ с, до $t_2 = 100$ с) динамический диапазон увеличивается на $2,5\log(t_2/t_1) = 5$ дБ (что в два раза меньше, чем при аналогичном увеличении длительности импульсов).

Сварка одинаковых волокон (ступенька вниз)

Сварное соединение вызывает потери мощности, поскольку возможно наличие центрального рассогласования концов волокон и наличие дефектов в сварном шве. На рефлектограмме сварка двух одинаковых по свойствам волокон проявляется в виде так называемой ступеньки вниз. Сварка с затуханием 0,05 дБ и менее считается хорошей. Если сварка очень хорошая и оба сваренных волокна одинаковые по свойствам, она может быть не видна вообще. Сварное соединение дает меньшее затухание при меньших длинах волн зондирующего импульса.

Механическое соединение (пик)

При механическом соединении двух концов волокна с помощью оптического коннектора возникает обратное отражение, проявляющееся на рефлектограмме в виде пика. Уровень сигнала после пика обычно несколько падает, причём сильнее, чем на сварном соединении. Разность между уровнем сигнала перед пиком и после него показывает величину потерь на этом соединении. На механическом соединении обычно падение мощности намного больше, чем на сварном – 0,1 и 0,02 дБ соответственно.

Сварка волокон с разными свойствами (ступенька вверх)

Сварка двух волокон с разными показателями преломления и разной дисперсией, (например, SMF и NZDSF/PSCF волокна) может проявляться на рефлектограмме в виде ступеньки вверх (мнимое усиление сигнала) (рис. 8).

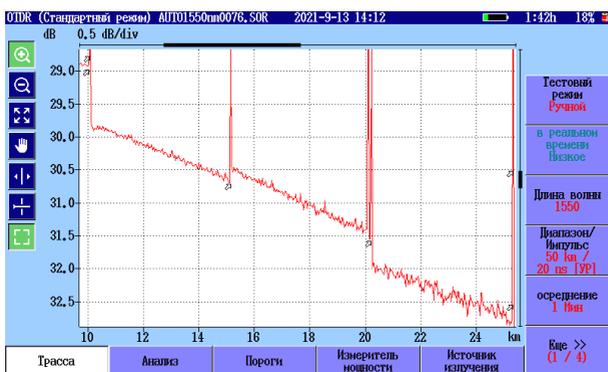


Рис. 8. Рефлектограммы линии: компенсирующая катушка 10 км, катушка волокна YOFC SMF G652D 5 км, катушка PSCF волокна YOFC из чистого кварца со сверхнизкими потерями PH1010-C (SMF ultra) 5 км, катушка волокна YOFC SMF G652D 5 км. Соединения катушек LC-UPC и FC-UPC коннекторами

На рис. 8 видно, что катушка волокна PSCF проявляется на рефлектограмме как ступенька вверх, после которой наблюдается более высокая ступенька вниз (при переходе в SMF волокно). Также на рисунке 8 видны пики, вызванные обратным отражением на LC-UPC коннекторах. Этот эффект вызван различной концентрацией релеевских центров рассеивания и соответственно различным километрическим затуханием. На входе в участок другого волокна рефлектометру кажется, что есть усиление на какую-то величину, которое больше реального затухания на

той сварке, а на выходе из участка он эту же величину добавляет к затуханию на сварке, завышая потери на сварке. Сварку волокон с разными свойствами следует измерять, подключая рефлектометр сначала с одной, потом с противоположной стороны оптической сети. С одной стороны будет наблюдаться ступенька вверх, а с другой стороны – более сильная ступенька вниз, среднее затухание будет рассчитываться как арифметическая средняя высота ступенек.

Изгиб волокна (ступенька вниз)

При изгибе волокна возникают потери, связанные с выходом модового пятна за границы оптоволокна. Чем больше длина волны, тем больше диаметр модового пятна и соответственно потери при изгибе. Поэтому на рефлектограммах одного и того же участка схемы, содержащего изгиб, потери мощности (высота ступеньки вниз) будут зависеть от длины волны излучения в рефлектометре. При измерении на 1310 нм изгиб будет проявляться слабее, чем на 1550 нм – именно так можно понять, что это изгиб волокна, а не плохая сварка. На рис. 9 приведена зависимость мощности излучения, прошедшего через волокно от диаметра изгиба и количества витков.

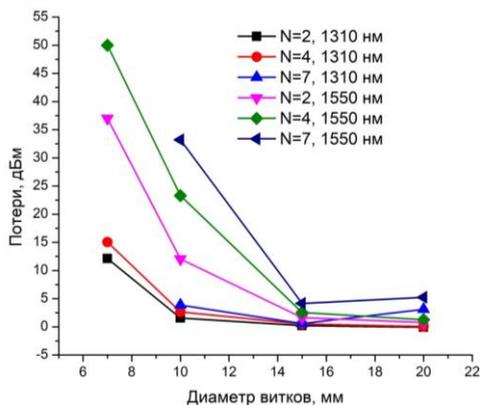


Рис. 9. Зависимость потерь мощности излучения, прошедшего через волокно, от диаметра изгиба и количества витков. Измерения проведены оптическим тестером при длинах волн 1310 и 1550 нм

Конец оптической схемы (шумы прибора)

Конец схемы на рефлектограмме имеет вид резкого падения мощности, за которым следуют собственные шумы прибора (рис. 7). Перед шумами может наблюдаться пик, в случае наличия на конце схемы отражающего элемента (например, UPC-коннектора) (рис. 10).

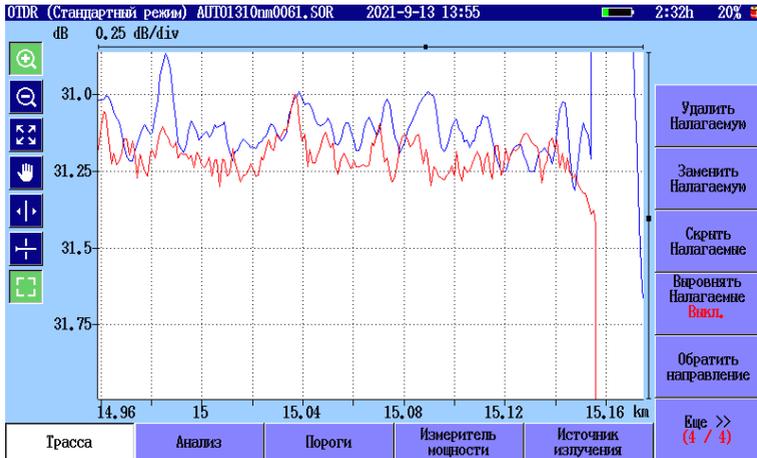


Рис. 10. Рефлектограммы линии: компенсирующая катушка 10 км, 2 катушки волокна YOFC SMF G652D по 5 км. Соединения катушек LC-UPC и FC-UPC коннекторами. Последняя катушка заканчивается LC-UPC коннектором, при записи рефлектограммы без пика в конце линии произведена намотка конца волокна на карандаш

2.3. Мертвые зоны и пространственное разрешение рефлектометра

Мертвые зоны в рефлектометрии используются для описания пространственного разрешения прибора. Выделяют два типа мертвых зон – мертвая зона для событий (EDZ – event dead zone) и мертвая зона по затуханию (ADZ – attenuation dead zone). Ширина EDZ определяется минимальным разрешимым расстоянием между двумя неоднородностями. EDZ для отражающей и неотражающей неоднородностей показаны на рисунке 11. Ширину EDZ по отражению определяют как полная ширина пика на уровне $\frac{1}{2}$ амплитуды (FWHM – full-width at half-maximum). Ширина мертвой зоны прямо пропорциональна динамическому диапазону, поскольку для обеспечения большего динамического

диапазона при тестировании длинных линий требуется более широкий световой импульс.

По шкале рефлектометра уровень $\frac{1}{2}$ амплитуды отражающей неоднородности находится на 1,5 дБ ниже максимума пика (рис. 11а). Ширину мертвой зоны для неотражающей неоднородности определяют по ширине переходного участка, наблюдаемого на рефлектограмме в месте расположения этой неоднородности (рис. 11б). При этом полагают, что величина потерь в этой неоднородности <1 дБ.

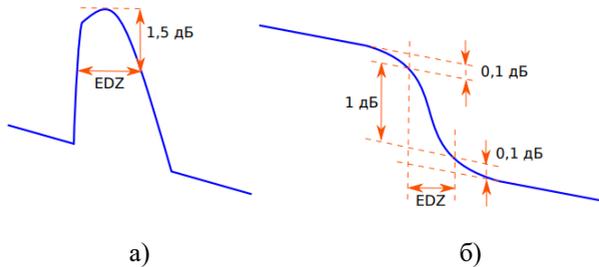


Рис. 11. Мертвые зоны для событий отражающей (а) и неотражающей (б) неоднородностей

Для более подробного анализа мертвых зон рассмотрим рис. 12. На данном участке рефлектограммы изображены две одинаковые, близко расположенные отражающие неоднородности. Передний фронт отраженного импульса изображается там же, где находится неоднородность. Задний фронт отраженного импульса приходит на фотоприемник позже, чем передний фронт и изображается дальше от начала рефлектограммы. Результирующая ширина импульса соответствует расстоянию между передним и задним фронтом. В качестве примера мертвых зон отражающих неоднородностей на рис. 7 приведены рефлектограммы, полученные при разной длительности импульса в линии с катушками, соединенными LC-UPC коннекторами.

Величина перекрытия импульсов зависит от расстояния между неоднородностями – чем оно меньше, тем сильнее перекрываются импульсы. При расстоянии между неоднородностями, равном ширине импульса, отраженные импульсы сливаются в один импульс с небольшим провалом на вершине. Этот провал неразличим, когда расстояние между этими неоднородностями меньше ширины мертвой зоны, когда коэффициенты отражения от неоднородностей различаются, когда на рефлектограмме много шумов.

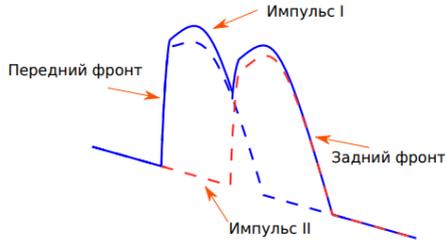


Рис. 12. Отражение импульса света от двух одинаковых неоднородностей I и II расположенных на расстоянии, равном ширине мертвой зоны

Помимо длительности импульсов света, испускаемых лазерным диодом, ширина и форма импульса на дисплее зависят от ширины полосы фотоприемника Δf .

Если длительность импульсов τ больше времени установления отклика ($0,35/\Delta f \approx 10$ нс), форма импульса близка к прямоугольной, а его ширина определяется длительностью импульса и примерно равна $\tau \cdot \frac{v_r}{2}$ (например, ~ 10 м при $\tau = 100$ нс), где $v_r = 2 \cdot 10^5$ км/с = 0,2 м/нс – групповая скорость света в волокне. При длительности импульса меньше времени установления отклика, ширина импульса ограничивается шириной полосы фотоприемника. Например, при $\tau = 1$ нс ширина импульса (~ 1 м) на порядок больше, чем если бы она определялась длительностью импульса ($\tau \cdot \frac{v_r}{2} = 0,1$ м). Длительности импульсов на входе τ и на выходе фотоприемника Δt связаны между собой соотношением:

$$\Delta t = \sqrt{\tau^2 + \left(\frac{0,35}{\Delta f}\right)^2}. \text{ Отсюда выводится выражение для ширины импульса:}$$

$$u = \Delta t \cdot \frac{v_r}{2} = \sqrt{\tau^2 + \left(\frac{0,35}{\Delta f}\right)^2} \cdot \frac{v_r}{2} \text{ (рис. 13).}$$

При $\tau > 300$ нс ширина импульса пропорциональна τ : $u = \tau \cdot 0,1$ м. При τ меньше 10 нс ширина импульса не зависит от длительности импульсов и определяется шириной полосы фотоприемника Δf . В стандартном режиме работы OTDR ($\Delta f \sim 10$ МГц и $\tau < 10$ нс) ширина импульса составляет порядка 2,5 м, а в режиме максимального разрешения ($\Delta f \sim 30$ МГц и $\tau < 10$ нс) ширина импульса чуть больше 1 м. В режиме максимального динамического диапазона ($\Delta f \sim 3$ МГц и $\tau < 10$ нс) ширина импульса порядка 10 м.

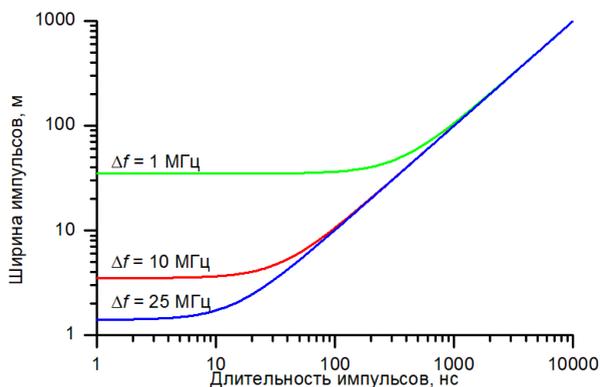


Рис. 13. Зависимость ширины импульсов на дисплее от длительности импульсов света, испускаемых лазерным диодом, и ширины полосы фотоприемника

Мертвая зона по затуханию возникает из-за конечной длительности импульса, генерируемого лазерным диодом, и конечной крутизны заднего фронта импульса на выходе фотоприемника. Ширина мертвой зоны по затуханию складывается из двух величин: $(\tau + t_x)v_r/2$, где x – длительность импульса генерируемого лазерным диодом, $t_x \cdot v_r/2$ – длина хвоста импульса, $v_r = 0,2$ м/нс – групповая скорость распространения света в волокне (рис. 14). Множитель $1/2$ учитывает, что свет проходит через волокно дважды в прямом и обратном направлении.

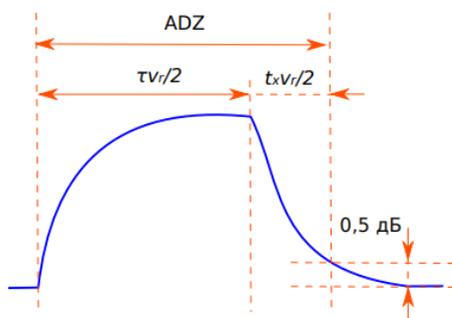


Рис. 14. Мертвая зона по затуханию

Длина хвоста импульса $t_x \cdot v_r/2$ зависит от того, насколько быстро он приблизился к пьедесталу. По определению мертвой зоны, хвост импульса должен отстоять от пьедестала на 0,5 дБ. Математически это условие записывается в виде уравнения

$$5 \log R(1 - \exp(-2\pi\tau\Delta f)) \cdot \exp(-2\pi t_x \Delta f) + 10^{q/5} - \frac{q}{2} = 0,5,$$

где R – коэффициент отражения от неоднородности, $q = -80 \text{ дБ} + 10 \log(\tau[\text{нс}]/[\text{нс}])$ – доля света рассеянная назад в моду волокна.

При $\tau > 1$ мкс ширина ADZ близка к полной ширине импульса на половине амплитуды (рис. 15) и однозначно определяется длительностью импульса. При $\tau < 20$ нс ширина ADZ зависит от ширины полосы фотоприемника и от значения коэффициента отражения от неоднородности и в 3–5 раз больше ширины импульса.

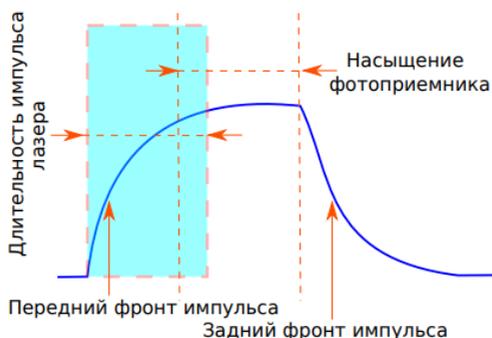


Рис. 15. Увеличение ширины мертвой зоны по затуханию (ADZ) при насыщении фотоприемника

Фотоприемник, как правило, насыщается при попадании на него мощного излучения, отраженного от оптического разъема или торца волокна. При большой мощности лазерного диода к насыщению фотоприемника может привести даже релеевское рассеяние излучения в начале волокна. Эффект насыщения проявляется в виде ограничения амплитуды импульса и увеличения ширины верхушки импульса за счет времени, необходимого для освобождения p - n перехода от накопленного заряда [3].

2.4. Ложные сигналы

При наличии в ВОЛС двух и более сильно отражающих близко расположенных элементов возможны многократные отражения от каждой пары сильно отражающих элементов. Вследствие таких отражений на рефлектограмме наблюдаются ложные сигналы («духи»).

Рассмотрим прохождение зондирующего импульса через участок оптического волокна с двумя сильно отражающими стыками ОС-1 и ОС-2 (рис. 16).

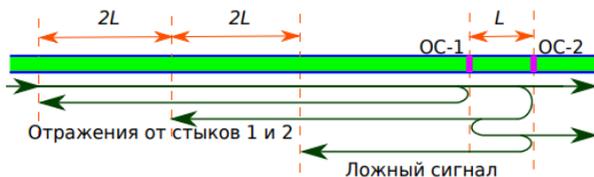


Рис. 16. Формирование ложного сигнала рефлектометра при наличии двух отражающих элементов ВОЛС

Происходит три последовательных отражения – от стыка 2, стыка 1 и снова от стыка 2. Амплитуда ложного сигнала значительно меньше амплитуд сигналов от реальных отражающих стыков.

Наблюдение ложных сигналов также возможно при установке на рефлектометре значения длин меньше, чем длина измеряемого волокна. В данном случае появление ложных сигналов связано с тем, что прибор посылает первоначальный импульс раньше, чем успевает возвратиться предыдущий. В результате на приемник одновременно поступят два импульса, отраженные от разных участков волокна. При этом ложный импульс отображается ближе к началу рефлектограммы [3].

ХОД РАБОТЫ

Для выполнения заданий используется следующее оборудование:

1. Рефлектометр Anritsu MT9085A-063-010-037-ES210, MMF 0.85/1.3 мкм, SMF 1.31/1.55 мкм, FC коннектор.
2. Нормализующая катушка НК-Групп, 10 км., SM, оконцованная FC/UPC-FC/APC.
3. Три катушки волокна YOFC SMF G652D по 5 км.
4. Две катушки волокна YOFC из чистого кварца со сверхнизкими потерями PH1010-C (SMF ultra).
5. Катушка волокна YOFC со смещенной ненулевой дисперсией G655 (Non-zero dispersion-shifted fiber), длин 5 км.
6. Оптические соединители FC/UPC, FC/APC.
7. Намотки оптического волокна диаметрами 7, 10, 15, 20 мм.

Описание рефлектометра Anritsu MT9085A-063-010-037-ES210.

На рис. 17 представлен внешний вид рефлектометра Anritsu MT9085A-063-010-037-ES210.



Рис. 17. Внешний вид рефлектометра Anritsu MT9085A-063-010-037-ES210

Для включения прибора нажмите кнопку [⏻]. Для перехода в главное меню используется кнопка **Top Menu**.

Измерения проводятся с использованием нормализующей катушки в начале линии, она подключается к одномодовому выходу 1 (рис. 18).

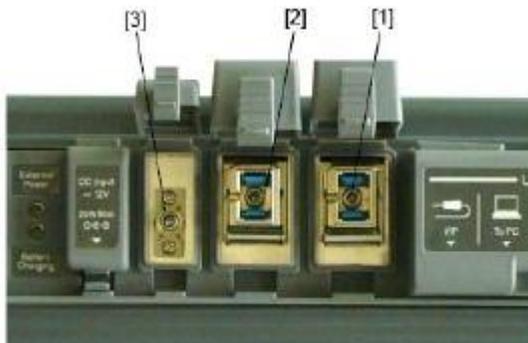


Рис. 18. Оптические коннекторы рефлектометра: 1 – одномодовое волокно, 2 – многомодовое волокно, 3 – визуальный дефектоскоп

Предполагается выполнение измерений в режиме OTDR (Standard), который нужно выбрать в главном меню программы управления рефлектометром (рис. 19). Результаты измерений отображаются в виде рефлектограммы, то есть графика зависимости затухания от расстояния. ACCESS Master выполняет анализ рефлектограммы с целью обнаружения событий и перечисления их в таблице событий.

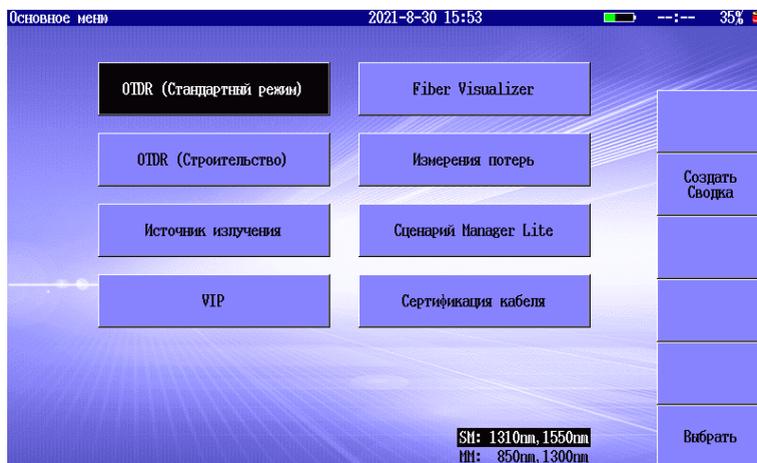


Рис. 19. Главное меню программы управления рефлектометром

Экран режима OTDR (стандарт) приведен на рис. 20. При нажатии вкладки **Анализ** в верхней части экрана выводится таблица анализа событий: расстояния до событий, потери на событиях, величина обратного отражения и т.д. Скрыть таблицу можно переходом на вкладку **Трасса**.

При нажатии клавиши **Start** отображается рефлектограмма, которая усредняется за число раз (или период), заранее установленные. При нажатии клавиши **Realtime** рефлектограмма каждый раз обновляется, что позволяет наблюдать изменение оптических потерь в зависимости от времени.

Для настройки длины волны, диапазона, длительности импульса используются соответствующие кнопки в правой части экрана (рис. 20, 21).



Рис. 20. Экран режима OTDR (стандарт) – Анализ

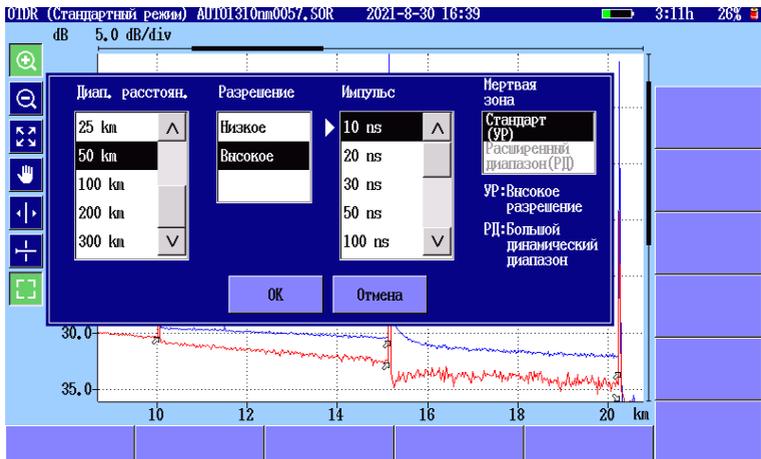


Рис. 21. Экран настройки параметров записи рефлектограмм

Задание 1. Определение динамического диапазона

1. Собрать оптическую схему, состоящую из рефлектометра, нормализующей катушки и 1 катушки оптоволокна известной длины.
2. Снять рефлектограммы на длинах волн 1310 и 1550 нм.
3. Определить динамический диапазон рефлектометра.
4. Сравнить полученное значение с паспортным значением динамического диапазона для данного рефлектометра.

Задание 2. Потери мощности на коннекторах и погонное затухание

1. Собрать оптическую схему, состоящую из рефлектометра, нормализующей катушки, катушки оптоволокна SMF, катушки оптоволокна PSCF, катушки оптоволокна SMF.
2. Снять рефлектограммы на длинах волн 1310 и 1550 нм.
3. Определить расстояния, на которых наблюдаются потери мощности и сопоставить его с длиной катушек.
4. Количественно измерить потери на коннекторах и сравнить между собой значения для рефлектограмм, полученных на 1310 и 1550 нм.
5. Подключить рефлектометр с другой стороны к катушкам и повторить пункты 2–4.
6. Оценить, наблюдается ли «ступенька вверх» на катушке PSCF, объяснить этот эффект.
7. Провести сравнительный анализ рефлектограмм, полученных с обеих сторон оптической схемы и вычислить потери мощности.
8. Определить погонное затухание в используемых волокнах на разных длинах волн.

Задание 3. Потери мощности на изгибах оптоволокна

1. Собрать оптическую схему, состоящую из рефлектометра, нормализующей катушки и 2 одинаковых катушек оптоволокна SMF, сваренных между собой.
2. Снять рефлектограммы на длинах волн 1310 и 1550 нм.
3. Определить расстояния, на которых наблюдаются потери мощности и сопоставить их с длиной катушек.

4. Количественно измерить потери на коннекторах и сварках между катушками и сравнить между собой значения для рефлектограмм, полученных на 1310 и 1550 нм.

5. Поместить между катушками SMF намотки оптоволокна с различным диаметром и количеством витков.

6. Провести измерение рефлектограмм на длинах волн 1310 и 1550 нм и количественно оценить потери мощности в намотках.

7. Исследовать зависимости потерь мощности от длины волны источника, диаметра и количества витков.

Задание 4. Мертвые зоны и их зависимость от настройки

1. Собрать оптическую схему, состоящую из рефлектометра, нормализующей катушки и 2 одинаковых катушек оптоволокна.

2. Снять рефлектограмму на длине волны 1550 нм.

3. Определить расстояния, на которых наблюдаются потери мощности и сопоставить их с длиной катушек.

4. Провести измерения рефлектограмм с различной длительностью импульса.

5. Оценить для каждой рефлектограммы ширину мертвой зоны на событии EDZ (коннектор между катушками) и ширину мертвой зоны по затуханию ADZ.

6. Оценить влияние длительности импульса на EDZ и ADZ.

Задание 5. Ложные сигналы

1. Собрать оптическую схему, состоящую из рефлектометра, нормализующей катушки, 2 одинаковых катушек оптоволокна SMF по 5 км и катушки многомодового волокна 2 км, соединенных специально подготовленными UPC-коннекторами.

2. Снять рефлектограмму на длине волны 1550 нм.

3. Определить расстояния, на которых наблюдаются потери мощности и сопоставить их с длиной катушек.

4. Подключить рефлектометр с противоположной стороны оптической схемы, повторить пункты 2, 3.

5. Исследовать полученные рефлектограммы на наличие ложных сигналов.

Задание 6*. Измерение потерь мощности на просвет оптоволокна

1. Собрать оптическую схему, состоящую из рефлектометра, патчкорда, оптического тестера.
2. Перевести рефлектометр в режим источника излучения и измерить мощность сигнала с помощью оптического тестера.
3. Собрать оптическую схему, состоящую из рефлектометра, 1 катушки оптоволокна, оптического тестера.
4. Измерить мощность сигнала с помощью оптического тестера.
5. Определить потери мощности в сети как разность между мощностью при соединении рефлектометра с тестером без катушки и с катушкой.

Контрольные вопросы

1. Дать определение эффекта полного внутреннего отражения.
2. Описать принцип работы и конструкцию оптического волокна.
3. Дать определение релеевского рассеяния и погонного затухания.
4. Описать принцип работы оптического рефлектометра.
5. Дать определение и привести способы расчета динамического диапазона.
6. Привести классификацию потерь мощности в волоконно-оптических линиях связи и описать их проявление на рефлектограмме.
7. Объяснить зависимость величины потерь мощности от длины волны зондирующего импульса.
8. Определение, причины возникновения, классификация и способы измерения мертвых зон в оптической рефлектометрии.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2. ОПТИЧЕСКОЕ ЗАТУХАНИЕ В ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДАХ

Цель работы: изучение физических основ возникновения потерь мощности в волоконно-оптических схемах; получение практических навыков сборки и юстировки оптических схем, работы с оптическим тестером и измерения потерь на сварках, коннекторах и изгибах волокна.

В работе используются: оптический тестер; волоконный соединитель с возможностью позиционирования соединяемых концов; патчкорды LC/UPC, содержащие различные количества сварных соединений; оптические соединители LC/UPC; намотки оптоволокна различного диаметра и количества витков.

1. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Оптический тестер основан на измерении мощности светового сигнала, проходящего через исследуемый участок сети, путем запуска в эту цепь сигнала с известными параметрами и измерения его мощности на выходе. Этот прибор используется для измерения оптической мощности и затухания в волоконно-оптических линиях связи и в отдельных элементах волоконно-оптической техники. Помимо этого, оптические тестеры используются для стабилизации оптического излучения, диагностики и ремонта волоконно-оптических линий связи. Это могут быть как магистральные линии, так и локальные компьютерные сети.

Области применения оптических тестеров:

1. Входной контроль параметров оптического волокна.
2. Приемо-сдаточные испытания кабельной системы.
3. Монтаж оптического кабеля.
4. Обслуживание действующих линий.

2. ПРИНЦИП РАБОТЫ И ОСОБЕННОСТИ АППАРАТУРЫ

2.1. Оптический тестер

Существуют два типа оптических тестеров:

1. Комплект из двух приборов – источника и измерителя.
2. Один прибор, совмещающий в одном корпусе источник и измеритель.

В качестве источников для тестеров используются полупроводниковые лазерные диоды преимущественно для одномодовых применений и светодиоды для многомодовых линий. Источник должен обеспечивать требуемый уровень мощности в волоконном световоде и высокую временную стабильность параметров излучения. Лазерные диоды мощнее и угловая апертура их излучения меньше, поэтому мощность, вводимая в волоконный световод, выше, чем в случае использования светодиода.

Основным элементом измерителя является фотодиод. Ключевой характеристикой фотодиода является чувствительность R , определяемая как отношение выходного фототока к падающей оптической мощности (измеряется в А/Вт): $R \sim h/l$, где h – квантовая эффективность (соответствие количества электронов на выходе фотодиода количеству падающих на его фоточувствительную площадку квантов света), l – длина волны оптического излучения. Для идеального фотодиода $h = 1$.

Наиболее важным параметром оптического тестера является динамический диапазон измерений, представляющий собой интервал между мощностью источника и порогом чувствительности измерителя. Динамический диапазон определяет максимальное затухание оптического сигнала, которое может быть измерено данным комплектом приборов. Входящие в состав тестера измерители должны обеспечивать широкий спектральный диапазон измерений, хорошую и равномерную чувствительность в заданном спектральном диапазоне или на длинах волн калибровки.

В качестве примера в табл. 3 приведены основные характеристики распространенного тестера EXFO FOT 600.

Таблица 3

Характеристики оптического тестера EXFO FOT 600

Характеристика	Значение
Источник излучения (нм)	1310/1550
Диапазон длин волн	от 850 до 1650
Диапазон мощностей (дБм)	от 26 до –55
Погрешность	$\pm 5\% \pm 3$ нВт

Разрешение (дБ)	0,01
Единицы измерения	дБ/дБм/Вт
Спектральная ширина (нм)	≤ 5
Выходная мощность (дБм)	1/1

2.2. Методы измерения потерь с помощью оптических тестеров

Существуют два эталонных метода измерения потерь с помощью оптических тестеров – метод обрыва волокна и метод вносимых потерь. Метод обрыва волокна предполагает измерение мощности p_1 (в дБм), прошедшей через волокно. Затем волокно обламывается на небольшом расстоянии (около двух метров) от места ввода излучения и измеряется мощность p_2 (в дБм), прошедшая через оставшийся короткий участок волокна (рис. 22). Величина потерь в волокне определяется как разность $a(\text{дБ}) = p_1(\text{дБм}) - p_2(\text{дБм})$.

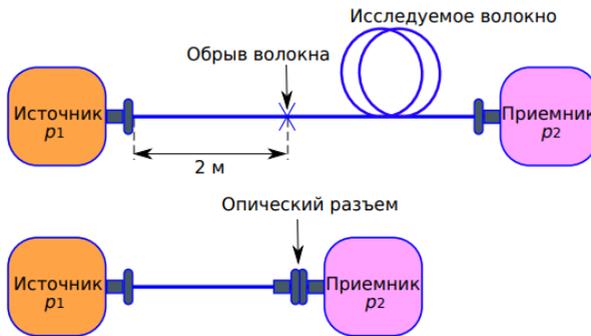


Рис. 22. Метод обрыва волокна

Метод обрыва волокна наиболее точный, поскольку доля мощности, введенная в волокно, остается постоянной. Недостаток этого метода в том, что нарушается целостность волокна и его нельзя использовать в процессе монтажа линии передачи. Вследствие чего, более

распространенным является метод вносимых потерь (рис. 23), в котором сначала измеряется величина опорной мощности p_1 (в дБм).

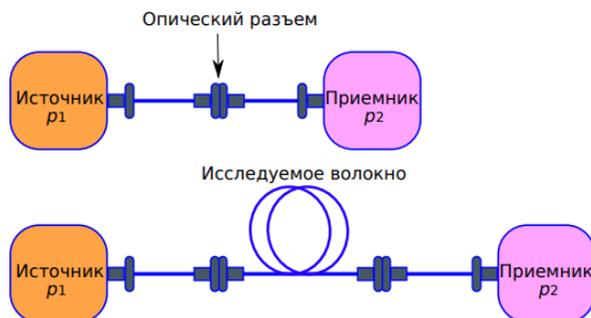


Рис. 23. Метод вносимых потерь

Далее между измерителем оптической мощности и источником оптического излучения вставляется тестируемое волокно или линия передачи и измеряется величина прошедшей мощности p_2 (в дБм). Величина потерь определяется как разность $a(\text{дБ}) = p_1(\text{дБм}) - p_2(\text{дБм})$. Метод вносимых потерь используется при измерении полных потерь в линии передачи.

Причины возникновения погрешности при такой схеме измерений:

1. нестабильность источника излучения;
2. нелинейность шкалы мультиметра;
3. разная чувствительность фотоприемных блоков на разных концах линии;
4. отклонения величины потерь в разъёмах от их номинального значения.

Проведение измерений потерь в линии в обоих направлениях позволяет исключить некоторые систематические погрешности. В частности, если к одномодовому волокну (в оптическом кабеле) был приварен пигтейл из многомодового волокна, потери в линии будут зависеть от направления распространения света, поскольку коэффициент передачи со стороны одномодового волокна больше, чем со стороны многомодового волокна. Помимо этого, можно исключить систематическую ошибку, возникающую из-за разной чувствительности фотоприемных блоков мультиметров, размещенных на разных концах линии, усреднив результаты измерений в обоих направлениях.

Для измерения обратных потерь используется схема, изображенная на рис. 24.

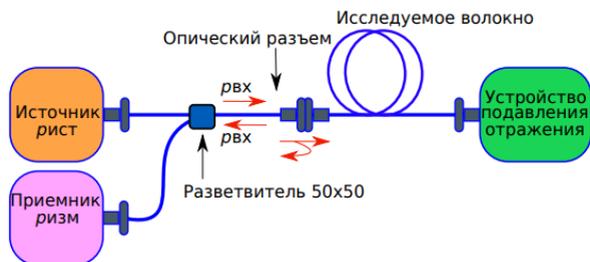


Рис. 24. Схема измерения обратных потерь

Обратные потери рассчитываются следующим образом:

$$A_{\text{обр}} = p_{\text{ист}} - p_{\text{изм}} - 7 \text{ дБ},$$

где $p_{\text{ист}}$ – мощность источника излучения, где $p_{\text{изм}}$ – измеренная мощность. Для UPC-коннекторов с выпуклой прямой полировкой $A_{\text{обрUPC}} > 50$ дБ (типичное значение 55 дБ); для APC-коннекторов с выпуклой косой полировкой $A_{\text{обрAPC}} > 60$ дБ (типичное значение 65 дБ). Величина динамического диапазона, требуемого для измерения обратных потерь, составляет 30...80 дБ, поэтому для таких измерений необходим лазерный источник с большой мощностью излучения. При этом излучение лазера должно быть достаточно стабильным для обеспечения измерений в течение продолжительного времени.

Точность измерения обратных потерь зависит от вносимых потерь и отражений компонентов. Для повышения точности должно быть выполнено два условия:

- 1) прибор должен быть откалиброван по известному отражению;
- 2) должны быть измерены фоновые излучения (фоновые обратные потери – уровни мощности, отраженные от устройств, не подлежащих измерению, которые потом необходимо вычесть из результатов измерения). С целью калибровки измерителя обратных потерь (мультиметра) для точных измерений к выходу источника подключают калибровочный кабель. Затем измеряют уровень вернувшейся мощности, с которым сравнивают все последующие измерения [1].

2.3. Сварка оптического волокна

Сварка оптического волокна – процесс соединения двух волокон при помощи высокотемпературного воздействия дугового разряда (вольтовой дуги). Температура дуги может достигать 4800 °С, чего более чем

достаточно для плавления кварцевого стекла (температура плавления 1665 °С). Для получения качественного сварного соединения необходимо точное позиционирование сердцевин сращиваемых волокон.

Выравнивание (юстировка) – самая главная характеристика и главное отличие разных моделей сварочных аппаратов. В настоящее время актуальными являются четыре типа систем юстировки:

1. Юстировка по активной V-образной канавке (Active V-groove). Положение волокон регистрируется встроенной в сварочный аппарат видеокамерой. Когда местоположение сердцевин максимально точно определено, приводы зажимов перемещают волокна в точку их наилучшего совпадения.

2. Юстировка по профилю показателя преломления (PAS, Profile Alignment System). Имеет более сложную, по сравнению с предыдущим типом, конструкцию механизма сведения, видеокамеру с управляемым переменным фокусным расстоянием и сложные алгоритмы анализа получаемых изображений.

3. Юстировка по тепловой люминесценции (CDS, Core Detection System). Такие аппараты анализируют изображение, получаемое не проходящим светом, а излучением самого волокна, которое разогревается отдельной, предварительной дугой. Этот метод дает более точную информацию о координатах сердцевины, а также уменьшение прочностных характеристик ОВ за счет дополнительного нагрева.

4. Юстировка по анализу проходящего света (LID, Light Injection and Detection). В основе данного метода лежит принцип введения и регистрации излучения на изогнутом волокне. Волокна закрепляются в прижимах, формирующих их изгиб. В волокно вводится тестовое излучение, проходящее из одного волокна в другое. На изгибе принимающего волокна, рядом с прижимом, установлен фотодетектор, регистрирующий это излучение. Процессор управляет перемещением прижимов относительно друг друга и отслеживает момент, когда мощность переданного излучения максимальна, что соответствует наиболее точной юстировке.

Распределение интенсивности первой моды в поперечном сечении волокна хорошо описывается функцией Гаусса:

$$I = I_0 \exp\left(-\frac{8r^2}{w^2}\right),$$

где w – диаметр модового пятна. Таким образом, расчет потерь в месте соединения волокон сводится к известной задаче об эффективности согласования двух гауссовых пучков. Основной вклад в потери дает

смещение сердцевин волокон друг относительно друга (d) и неравенство диаметров модовых пятен (Δw):

$$\alpha(\text{дБ}) \cong 4,34 \left(\left(\frac{2d}{w} \right)^2 + \left(\frac{\Delta w}{w} \right)^2 \right). \quad (3)$$

Сварки одномодовых волокон отличаются низкими потерями мощности (около 0,02 дБ) и высокой прочностью. Для достижения столь малых потерь в месте соединения волокон смещение сердцевин друг относительно друга (d) не должно превышать десятых долей длины волны. Так, например, при $d \cong 0,3\lambda$, $w \cong 7\lambda$ и $\Delta w = 0$ с помощью формулы (3) получаем оценку: $\alpha_d(\text{дБ}) = 0,01$ дБ.

Помимо этого, существуют потери, возникающие из-за отражения света от торца волокна, эллиптичности модовых пятен и непараллельности осей соединяемых волокон. Потери, обусловленные френелевским отражением, пренебрежимо малы, так как волокна стремятся соединять так, чтобы между ними возник оптический контакт. Например, френелевские потери в оптическом разъеме с коэффициентом отражения $R = 10^{-4}$ (-40 дБ) равны [1]:

$$\alpha_f(\text{дБ}) = -10\log T = -10\log(1-R) \approx -4,34\ln(1-R) \approx 4,34R \approx 0,0004 \text{ дБ.}$$

Потери, вызванные эллиптичностью модовых пятен, малы, поскольку современные волокна обладают малой эллиптичностью (табл. 4).

Таблица 4

Геометрические параметры волокон стандарта G. 652

Параметры	Alcate	Cornin	YOF
	1	g	C
w_{1310}	9,0 ±	9,2 ±	9,3 ±
w_{1550}	0,5 10,2 ± 0,5	0,4 10,4 ± 0,8	0,4
Диаметр оболочки, мкм	125 ± 1	125 ± 0,7	125 ± 1
Эллиптичность оболочки	≤ 1%	≤ 1%	≤ 1%
Эксцентриситет сердцевин/оболочки, мкм	≤ 0,6	≤ 0,5	≤ 0,6
Радиус собственного изгиба волокна, м	> 4	> 4	> 4

Для волокон с эллиптичностью 1% доля неперекрывшейся площади модовых пятен соединяемых волокон будет порядка 10^{-4} , а потери соответственно меньше 0,001 дБ. Потери, обусловленные

непараллельностью осей соединяемых волокон, прямо пропорциональны квадрату угла θ между осями волокон:

$$\alpha_{\theta}(\text{дБ}) \cong 4,34 \left(\frac{\pi n w \theta}{2\lambda} \right)^2,$$

где $n = 1,46$ – показатель преломления кварцевого стекла. Волокна соединяют так, чтобы угол между их осями θ составлял менее десятых долей градуса. Учитывая, что $w = 7\lambda$, потери α_{θ} (дБ) получаются меньше 0,01 дБ.

Создание сростков волокон с малыми потерями сильно осложняется из-за наличия эксцентриситета между сердцевинной и кварцевой оболочкой. Как видно из табл. 4, оси сердцевины волокон могут быть смещены относительно осей кварцевой оболочки примерно на 0,5 мкм. При сварке волокон силы поверхностного натяжения стремятся совместить оси оболочек и развести (при наличии эксцентриситета) оси сердцевины волокон. Поэтому если не производить коррекцию эксцентриситета, то сердцевинные волокна в сростках могут быть смещены друг относительно друга на величину порядка 1 мкм. Потери при таком смещении получаются очень большими: $\alpha_d(\text{дБ}) \cong 0,16$ дБ (при $d = 1$ мкм, $w = 10$ мкм и $\Delta w = 0$) [1].

2.4. Потери мощности при рассогласованном соединении волокон

Соединение волоконных световодов торцами приводит к потерям оптической мощности, обусловленным действием следующих факторов:

1. взаимное расположение световодов;
2. неидентичность параметров световодов;
3. отражение излучения от торцов световодов.

Для исследования потерь мощности в контакте двух световодов используется схема, включающая в себя два световода, закрепленных в микропозиционере. Оптическое излучение от источника вводится во входной световод через один конец, а другой конец световода закреплен в неподвижном держателе. Приемный (выходной) волоконный световод одним концом закреплен в микропозиционере, обеспечивающем линейные и угловые перемещения, а другим концом присоединен к измерителю оптической мощности. Изменение взаимного положения световодов, реализуемое с помощью микропозиционера, приводит к изменению коэффициента передачи мощности, т.е. к изменению потерь соединения волоконных световодов.

Лабораторная установка (рис. 25) для изучения оптических потерь, связанных со взаимным расположением световодов, включает в себя: источник оптического излучения, входной (передающий) волоконный световод, выходной (приемный) световод, закрепленный в микропозиционере с линейными и угловыми перемещениями и оптический тестер (измеритель оптической мощности).

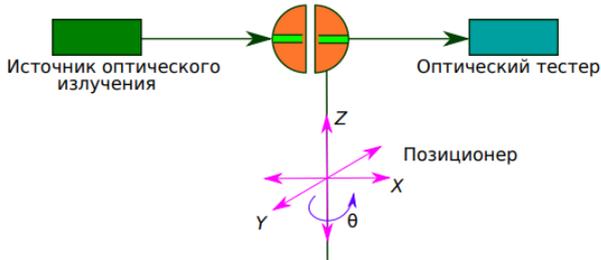


Рис. 25. Схема установки по измерению потерь при рассогласовании контактов волокон

Основной задачей при соединении волоконных световодов является достижение точной взаимной юстировки световодов по трем наиболее важным параметрам:

1. смещение сердцевин световодов в плоскости, перпендикулярной к их оси (поперечное смещение);
2. угол между осями световодов (угловое рассогласование);
3. зазор между торцами световодов (продольное смещение).

Потери соединения определяются по формуле

$$A = -10 \lg T(x, y, z, \theta) \text{ [дБ]}, \quad (4)$$

где $T(x, y, z, \theta)$ – коэффициент передачи по мощности, зависящий от линейного и углового рассогласования соединяемых световодов, а также от типа световода. Для многомодовых световодов с параболическим профилем показателя преломления имеем (в случае малых смещений):

$$T(x) \approx 1 - 0,85(x/a), \quad (5)$$

$$T(z) \approx 1 - zNA / (4a), \quad (6)$$

$$T(\theta) \approx 1 - \theta / NA, \quad (7)$$

где x, z, θ – поперечное, продольное и угловое смещение световодов соответственно; a – радиус сердцевины световода; NA – числовая апертура. При этом предполагается, что соединяемые световоды являются идентичными и торцы световодов перпендикулярны их продольной оси.

Для одномодовых световодов коэффициенты передачи рассчитываются по следующим формулам:

$$T(x) \approx \exp(-x^2/w^2), \quad (8)$$

$$T(z) \approx \frac{1+4z_1^2}{z_1^2+(1+2z_1^2)^2}, \quad (9)$$

$$T(\theta) \approx \exp[-(\pi\theta w/\lambda^2)], \quad (10)$$

где w – радиус модового поля в световоде; $z_1 = z/(kw^2)$ – нормированное продольное рассогласование; λ , k – длина волны излучения и волновое число ($k = 2\pi/\lambda$).

Следует отметить, что формулы (4–10) описывают изменение коэффициента передачи при изменении только одного параметра рассогласования. В общем случае

$$T_{\Sigma} = T(x)T(z)T(\theta).$$

2.5. Потери мощности в оптических коннекторах

Как было показано в п. 2.4, для уменьшения потерь при механическом соединении двух световодов необходимо точно и плотно совместить оба световода. Неотъемлемым компонентом любой волоконно-оптической сети являются коннекторные соединения, состоящие из двух оптических разъемов и розетки (адаптера) для их соединения. Для обеспечения сохранности оптического волокна при многократном совмещении их оконечные отрезки помещают в керамические, пластмассовые или стальные наконечники (ферулы). В потери мощности на коннекторах основной вклад вносят осевое рассогласование и загрязнение наконечников.

Большинство наконечников имеют цилиндрическую форму с диаметром 2,5 мм, также встречаются конические конструкции, а LC-коннекторы имеют наконечник диаметром 1,25 мм. Очищенное от оболочки волокно вводится в канал внутри наконечников и фиксируется химическим или механическим способом. Торец наконечника шлифуется, выступающий излишек волокна удаляется специальными инструментами. Используется различная форма торцов наконечников, в простейшем случае – плоская. При плоской шлифовке наблюдаются значительные возвратные потери, поскольку вероятность возникновения воздушного зазора в окрестности световодов велика. Чаще применяются выпуклые торцы (с радиусом скругления порядка 10–15 мм) (рис. 26). При хорошем центрировании плотное соприкосновение световодов гарантируется,

соответственно более вероятно отсутствие воздушного зазора. Еще более совершенным решением является применение скругления торца под углом в несколько градусов. Скругленные торцы меньше зависят от деформаций, образуемых при соединении коннекторов, поэтому подобные наконечники выдерживают большее количество подключений (от 100 до 1000). Подавляющее число коннекторов строится на основе керамических наконечников, как более стойких. Анализ качества и чистоты поверхности наконечника выполняется с помощью микроскопов с кратностью увеличения в сотни раз.



Рис. 26. Типы полировки оптических наконечников

Ферула с оптическим волокном устанавливается в специальный разъем – оптический коннектор. Оптический коннектор – это кабельное окончание, используемое для надежного и удобного соединения волокон между собой и с различным оборудованием. Существует множество различных типов оптических разъемов, отличающихся по конструктивному исполнению, способу фиксации, диаметру ферулы типу полировки и т.д. (рис. 27).

Для соединения двух волокон, оконцованных коннекторами, применяется оптическая розетка (адаптер) – приспособление со сквозным продольным отверстием и крепежными элементами для коннекторов определенного типа с обеих сторон. Назначением оптической розетки является точное сведение ферул двух коннекторов и фиксация их в таком положении для обеспечения передачи данных [1].



Рис. 27. Конструкция оптического коннектора

ХОД РАБОТЫ

Для выполнения задания используется следующее оборудование:

1. Оптический тестер EXFO FOT 600.
2. Волоконный соединитель Newport Components F-916.
3. Атенюатор перестраиваемый VOA-C-1-1550-1-000-FC/APC*2-26x18x8-1M, винтовой тип управления, длина волны 1550 нм, буфер 900мкм, волокно Corning-SMF-28e+- 100KPSI, коннекторы FC/APC, корпус 26x18x8 мм, длина волокна 1м, LightComm.
4. Настольный микроскоп Fibretool HW-400TD.

Описание оптического тестера EXFO FOT 600.

Данное устройство является лазерным изделием класса 3R. Опасно прямо смотреть на внутренний луч.

Схема прибора приведена на рис. 28.

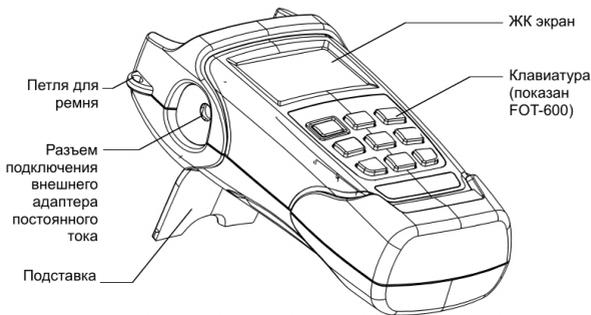


Рис. 28. Схема оптического тестера EXFO FOT 600

Для выключения прибора: в нормальном режиме работы нажмите и удерживайте кнопку [⏻] несколько секунд.

Патчкорды присоединяются к источнику излучения (Source) и измерителю мощности (Power Meter) в верхней части тестера. Для обеспечения безопасного использования переключение патчкордов проводить только при выключенном приборе. Не включать прибор при наличии открытых оптических разъемов.

На рис. 29 приведен экран оптического тестера с обозначением отображаемых показателей.

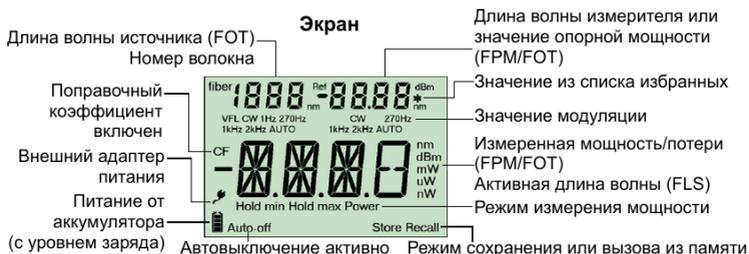


Рис. 29. Экран оптического тестера EXFO FOT 600

Включение и выключение источника излучения

В один момент только один источник может быть активным. Когда все источники выключены, на экране отображается OFF. Для активации источника излучения и изменения длины волны нажмите кнопку [Source] для поочередного включения каждой доступной длины волны. Прибор показывает длину волны и модуляцию. Для отключения источника

излучения нажимайте кнопку [Source] до тех пор, пока не пройдете последнюю длину волны (рис. 30).



Рис. 30. Включение и выключение источника излучения или VFL

Для измерения опорного значения вручную:

1. Используя подходящий адаптер, подключите источник излучения (такой как FLS-600 или FOT-600) к порту детектора вашего измерителя мощности.

2. Включите источник на желаемой длине волны.

3. Установите одинаковые длины волн на источнике и измерителе: нажмите кнопку [λ] для переключения между предустановленными длинами волн.



Рис. 31. Длины волн на источнике (слева) и измерителе (справа)

4. Нажмите и удерживайте кнопку несколько секунд. Измеритель запоминает текущее значение входящей мощности в качестве опорного значения. Опорная мощность отображается в правом верхнем углу (в дБм), а текущие показания потерь автоматически переключаются в дБ (рис. 32).



Рис. 32. Отображение опорной мощности в правом верхнем углу (в дБм) и текущих показания потерь по центру

5. Повторите процедуру для каждой длины волны, для которой вы желаете измерить опорное значение (если вы используете режим автоматического переключения, то измеритель мощности автоматически замеряет опорные значения для каждой длины волны по одному значению за одно переключение).

При использовании единиц измерения дБ нажмите кнопку [λ] для кратковременного отображения текущей длины волны. Для изменения этой длины волны нажмите кнопку [λ] еще раз, когда длина волны отображается на экране. После того как на всех желаемых длинах волн было проведено измерение опорных значений, не отключайте от порта источника патчкорд, использовавшийся в качестве опорного.

Измерение мощности или потерь. Измерение абсолютной мощности или потерь линии выполняется одинаково, кроме шага измерения опорного значения.

Для выполнения измерений мощности или потерь:

1. Для получения оптимального результата проверьте и очистите ваши волокна.
2. Для измерений потерь выполните измерение опорного значения мощности.
3. Используя соответствующий адаптер и коммутационные шнуры подключите тестируемое волокно к источнику излучения (такому, как FLS-600 или FOT-600) и к порту детектора вашего измерителя мощности.
4. Приведите в соответствие длину волны источника и измерителя мощности.

Задание 1. Потери мощности на изгибах оптоволокна

1. Собрать оптическую схему, состоящую из оптического тестера и катушек намотки оптоволокна с различным диаметром и количеством витков.

2. Провести измерение потерь мощности на длинах волн 1310 и 1550 нм.

3. Исследовать зависимости потерь мощности от длины волны источника, диаметра и количества витков. Пример зависимости приведен на рис. 9.

Задание 2. Потери мощности на коннекторах и сварных соединениях

1. Собрать оптическую схему, состоящую из оптического тестера, оптической линии, содержащей различное количество коннекторов, сварных соединений.

2. Провести измерение потерь мощности на длинах волн 1310 и 1550 нм.

3. Исследовать зависимости потерь мощности от длины волны источника, количества коннекторов, качества и количества сварных соединений.

Контрольные вопросы

1. Опишите принцип работы и назначение оптического тестера.
2. Дать определение динамического диапазона оптического тестера.
3. Каковы причины возникновения потерь при соединении волоконных световодов?
4. Какие рассогласования наиболее сильно влияют на потери соединения световодов?
5. Каковы основные вклады в потери мощности на коннекторах?
6. Объяснить зависимость величины потерь мощности от длины волны зондирующего импульса.
7. Описать зависимости потерь мощности от диаметра и количества витков в намотках оптического волокна.
8. В чем заключается метод обрыва волокна и метод вносимых потерь?
9. Каковы причины возникновения погрешности при измерении потерь методом вносимых потерь?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3. ОПТОВОЛОКОННЫЕ ДАТЧИКИ ДЕФОРМАЦИИ И ТЕМПЕРАТУРЫ

Цель работы: изучение принципа работы оптоволоконных датчиков деформации и температуры на основе комбинаций многомодовых и одномодовых волокон.

В работе используются: многомодовое волокно; волоконный датчик многомод-одномод; волоконный датчик одномод-многомод-одномод; оптический тестер; цифровой мультиметр; нагреватель; микрометрические подвижки; лазерный диод, обзорный экран.

1. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

1.1. Одномодовые и многомодовые оптические волокна

Понятие *мода* используется для идентификации типов стабильных состояний электромагнитных колебаний, распространяющихся в оптоволокне. Каждая мода имеет свою групповую и фазовую скорость. Групповая скорость подразумевает скорость переноса энергии, а фазовая – скорость перемещения фазы волны. В оптическом волокне эти скорости зависят от частоты колебаний волн, диаметра и материала волокна. Эти свойства кабеля вызывают модовую дисперсию.

Многомодовое (MultiMode, MM) оптоволокно позволяет подавать несколько мод в то время, как одномодовое (SingleMode, SM) – только одну. Стоит отметить, что понятие *одномодовости* носит несколько условный характер, т.к. при уменьшении длины волны излучения одномодовый световод становится многомодовым. При этом у многомодового волокна есть важный недостаток – высокая модовая дисперсия. Диаметр сердечника многомодового волокна составляет 50 мкм и более. Такая ширина позволяет подавать несколько мод в одно волокно, но увеличивает вероятность отражения света от внешней поверхности сердечника, что приводит к затуханию сигнала. Следовательно, для подачи сигнала на дальние расстояния использование подобного кабеля возможно, только если увеличивать количество ретрансляторов [1, 2].

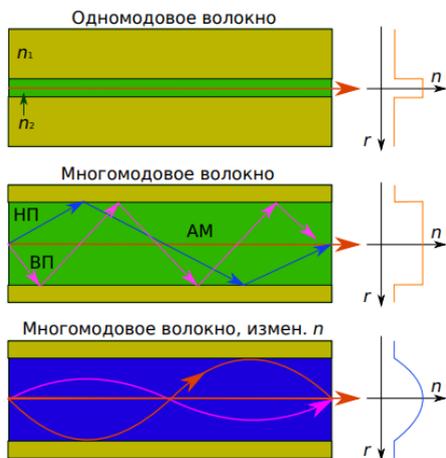


Рис. 33. Распространение излучения в одномодовых и многомодовых волокнах

У одномодового волокна диаметр сердечника составляет 10 мкм и меньше. В волокне с таким диаметром вероятность дисперсии значительно снижается, что позволяет передавать данные на большие расстояния. Одномодовое оптоволокно позволяет передавать данные со скоростью 10 Гб/с, против 2,5 Гб/с для многомодового.

На практике многомодовое оптоволокно используется для организации локально-вычислительных сетей (ЛВС) и структурированных кабельных сетей (СКС) небольших размеров в рамках одного здания или прилегающих строений (около 500 метров). Волоконно-оптические линии связи с одномодовыми волокнами используют для подключения удаленных зданий, например для организации системы видеонаблюдения в рамках района, города или даже магистрали (1000 м и более).

1.2. Спекл-структуры

Спекл-структуры возникают как следствие интерференции волн от отдельных неоднородностей среды, в которой распространяется излучение. Отражающие и пропускающие объекты, вызывающие возникновение спекл-картин, называются *диффузными объектами* (микронеровности, существующие в пределах допуска на изготовление оптического волокна), или *диффузорами*.

Причина появления спекл-картин при пропускании когерентного света через многомодовые волоконные световоды в том, что на выходе многомодовых волоконных световодов интерферируют поля большого числа направляемых мод со сложным пространственным распределением амплитуды по поперечному сечению световода и практически произвольными фазами. Такие спекл-картины могут служить носителем полезной измерительной информации, что создает предпосылки для их широкого применения в решении научно-технических задач в области высокоточных исследований и при контроле вибрации и деформации оптического кабеля. Внешние механические воздействия на многомодовое оптическое волокно приводят к изменению пространственного расположения формируемых ими спеклов. Анализ этих изменений позволяет получить информацию о величине и параметрах внешних воздействий на оптическое волокно.

2. ПРИНЦИП РАБОТЫ И ОСОБЕННОСТИ АППАРАТУРЫ

2.1. Экспериментальное наблюдение спекл-картин

Для наблюдения спекл-картин используется схема, состоящая из лазерного диода, многомодового оптического волокна и обзорного экрана (рис. 34).

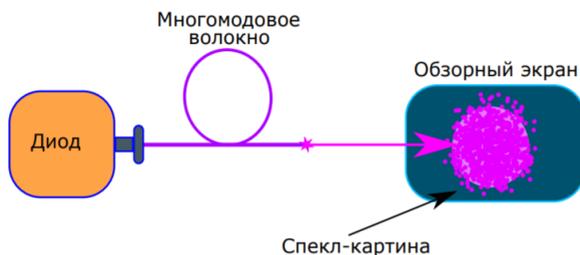


Рис. 34. Схема установки для наблюдения спекл-картин

Излучение лазерного диода вводится в многомодовое оптическое волокно, проецируется на обзорный экран. Полученная спекл-картина регистрируется с помощью веб-камеры.

2.2. Оптоволоконные датчики деформации и температуры

Площадь модового пятна в многомодовом волокне больше, чем в одномодовом, поскольку диаметр сердцевины в многомодовом волокне составляет 50/62,5 мкм, а в одномодовом – 7..9 мкм [1]. При сварке многомодового волокна с одномодовым и распространении излучения из первого во второе возникают потери мощности, вызванные разной площадью модового пятна.

Сварка волокон с разным диаметром сердцевины приводит к образованию напряженного интерфейса многомод-одномод, при воздействии на который изменяется доля излучения, проходящего через сварное соединение. Соответственно такую структуру можно использовать для регистрации малых деформаций и изменения температуры. На рис. 35 приведены зависимости мощности излучения, проходящей через датчик многомод-одномод от продольного растяжения и температуры.

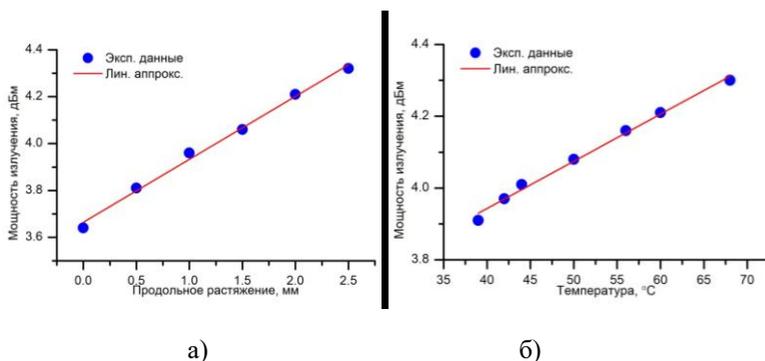


Рис. 35. Зависимости мощности излучения на $\lambda=1550$ нм, проходящей через датчик многомод-одномод от продольного растяжения (а) и температуры (б)

Оптоволоконный датчик одномод-многомод-одномод (SMS) представляет собой отрезок многомодового волокна, сваренный между двумя одномодовыми волокнами. Помимо чувствительности к деформации и температуре при использовании многомодового волокна со ступенчатым профилем показателя преломления, этот датчик может служить спектральным фильтром (рис. 36).

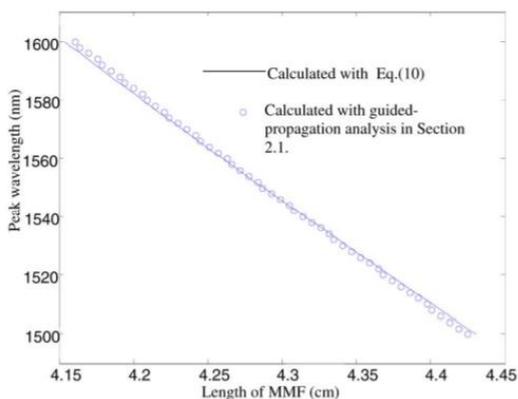


Рис. 36. Зависимость длины волны максимума коэффициента пропускания SMS-структуры от длины отрезка многомодового волокна [6]

Как видно из графика, линейная зависимость длины волны максимума коэффициента пропускания SMS-структуры от длины отрезка многомодового волокна позволяет подобрать датчик для разных диапазонов излучения. Длина волны максимума коэффициента пропускания SMS-структуры также чувствительна к деформации и температуре. В работах [6, 7] проводится подробное исследование SMS-структур различных конфигураций.

ХОД РАБОТЫ

Для выполнения заданий используется следующее оборудование:

1. Многомодовое волокно YOFC50/125 (multimode OM2 50/125).
2. Обзорный экран THORLABS EDU-VS1/M.
3. Источник оптического излучения EXFO FLS 600-23BL.
4. Волоконный датчик многомод-одномод.
5. Волоконный датчик одномод-многомод-одномод.
6. Цифровой мультиметр.
7. Нагреватель.
8. Микрометрические подвижки.

Задание 1. Получение и анализ спекл-картин

1. Собрать оптическую схему, состоящую из лазерного диода, многомодового оптического волокна и обзорного экрана.
2. Получить изображение спекл-картины на обзорном экране.
3. Оценить влияние механического воздействия на волокно на спекл-картины.
4. Сделать цифровые фото полученных спекл-картин и провести их описание.
5. Повторить пункты 1–4 для одномодового волокна.

Задание 2. Оптоволоконный датчик продольной деформации

1. Собрать оптическую схему: оптоволоконный датчик MM-SM подключить к оптическому тестеру; датчик разместить между микрометрическими подвижками, обеспечивающими продольное растяжение датчика.
2. Провести измерение зависимости мощности излучения, проходящей через датчик, от растяжения. Величина растяжения не должна превышать 2 мм.
3. Провести измерения в пункте 2 для длин волн источника и приемника 1310 и 1550 нм.
4. Повторить пункты 1–3 для датчика SMS.

Задание 3. Оптоволоконный датчик изгиба

1. Собрать оптическую схему: оптоволоконный датчик MM-SM подключить к оптическому тестеру; датчик разместить между микрометрическими подвижками, обеспечивающими изгиб датчика.
2. Провести измерение зависимости мощности излучения, проходящей через датчик, от изгиба. Изгиб не должен превышать 45°.
3. Провести измерения в пункте 2 для длин волн источника и приемника 1310 и 1550 нм.
4. Повторить пункты 1–3 для датчика SMS.

Задание 4. Оптоволоконный датчик температуры

1. Собрать оптическую схему: оптоволоконный датчик MM-SM подключить к оптическому тестеру; закрепить датчик, обеспечив отсутствие его деформации. Рядом с датчиком разместить термощуп мультиметра и нагреватель.

2. Провести измерение зависимости мощности излучения, проходящей через датчик, от температуры.
3. Провести измерения в пункте 2 для длин волн источника и приемника 1310 и 1550 нм.
4. Повторить пункты 1–3 для датчика SMS.

Контрольные вопросы

1. Что такое «мода» в волоконной оптике?
2. Дать определения групповой и фазовой скоростей, от чего они зависят?
3. В чем различие одномодового и многомодового оптического волокна?
4. Для каких практических целей наиболее часто используются одномодовые и многомодовые оптические волокна?
5. Описать физический принцип работы оптоволоконных датчиков MM-SM и SMS.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4.

ЭРБИЕВЫЙ УСИЛИТЕЛЬ

Цель работы: изучение принципа работы эрбиевого оптического усилителя; измерение коэффициента усиления; измерение спектра усиления эрбиевого усилителя; измерение шум-фактора.

В работе используются: эрбиевый усилитель для С-диапазона; анализатор оптического спектра; источник оптического излучения; оптический тестер, переменный аттенюатор.

1. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Поскольку сигнал, распространяющийся по волокну, испытывает затухание, в волоконно-оптической линии необходимо размещать специальные устройства, восстанавливающие уровень оптического излучения, увеличивая тем самым дальность передачи. Восстановление уровня оптического сигнала возможно с применением трех типов усилителей: рамановский, полупроводниковый, эрбиевый. Наиболее широко используется эрбиевый усилитель (EDFA, Erbium Doped Fiber Amplifier), основой которого служит оптическое волокно, легированное ионами эрбия. Эрбиевый усилитель эффективно усиливает сигналы в С-диапазоне, спектральной области наименьшего поглощения кварцевого стекла 1535...1565 нм. Установка EDFA производится в начале или в конце волоконно-оптической сети.

Эрбиевые усилители имеют следующие преимущества по сравнению с электрической регенерацией: отсутствие преобразования в электрический сигнал, возможность одновременного усиления сигналов с разными длинами волн (что обуславливает возможность усиления спектрально-мультиплексированного сигнала), практически точное соответствие рабочего диапазона эрбиевых усилителей области минимальных оптических потерь световодов на основе кварцевого стекла, сравнительно низкий уровень шума и простота включения в волоконно-оптическую систему.

1.1. Принцип работы эрбиевого оптического усилителя

Основой эрбиевого усилителя служит система оптической накачки. Мощный пучок света (луч накачки), имеющий длину волны существенно отличающуюся от длины волны входного сигнала, смешивается с входным сигналом, используя ответвитель с селекцией по длине волн (рис. 37). Накачка современных эрбиевых усилителей осуществляется светом с длинами волн 980 нм или 1480 нм. Поскольку усилитель не должен зависеть от поляризации; нужна деполяризованная накачка (круговая, лучше случайная).

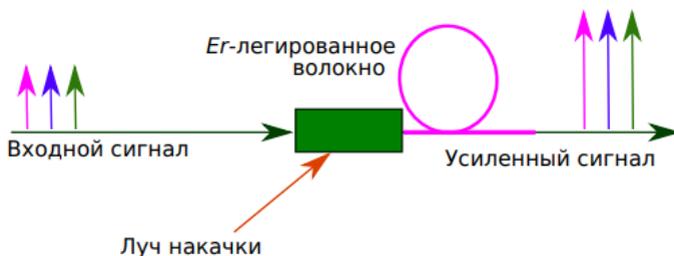


Рис. 37. Схема волоконно-оптического усилителя

Смешанный свет попадает в область волокна, легированную ионами эрбия. Луч накачки передает свою энергию ионам эрбия, переводя их внешние (оптические) электроны в возбуждённые состояния, создается инверсная заселённость энергетических уровней эрбия. При поступлении в систему фотона полезного (усиливаемого) сигнала, он, взаимодействуя с возбуждённым атомом эрбия, вынуждает его излучить запасённую энергию в виде дополнительного кванта излучения, свойства которого идентичны свойствам изначального кванта полезного сигнала. Таким образом, на каждый влетевший фотон полезного сигнала на выходе образуется дополнительный когерентный фотон с такой же энергией, фазой, поляризацией и направлением распространения – в этом и заключается процесс увеличения интенсивности (усиления) входного сигнала.

Среда с инверсной заселенностью является одной из главных составных частей лазера, другой необходимой частью является система оптической обратной связи, которая за счёт отражения возвращает часть излучения обратно и тем самым создает непрерывную лазерную

генерацию. Процесс непрерывной лазерной генерации превращает усилитель в лазер и полностью нарушает структуру входного сигнала, что препятствует передаче информации, поэтому от обратной оптической связи стараются избавиться путём введения в систему оптических «изоляторов» в тех местах, где обратная связь, обусловленная отражением, может появляться: например на выходе из усилителя, в месте присоединения к усилителю оптического волокна, которое представляет собой границу раздела, на которой, ввиду механической неоднородности, возникает отражение.

На рис. 38 показана схема энергетических уровней ионов Er^{3+} в кварцевом стекле.

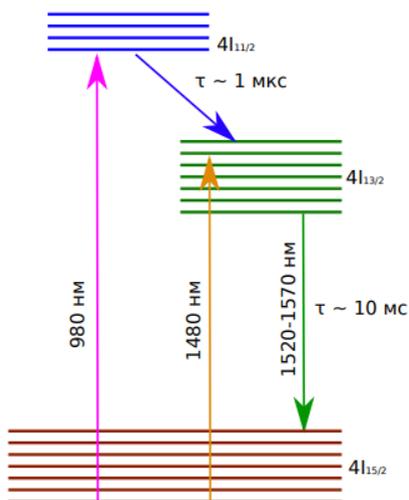


Рис. 38. Схема энергетических уровней ионов Er^{3+} в кварцевом стекле

В процессе усиления в EDFA принимают участие уровни $4I_{13/2}$, $4I_{15/2}$ и $4I_{11/2}$. Поглощение накачки на длине волны 980 нм переводит ионы Er^{3+} из основного состояния $4I_{15/2}$ на короткоживущий уровень $4I_{11/2}$, с которого в процессе релаксации переходят на метастабильный уровень $4I_{13/2}$. Уровень $4I_{13/2}$ называется метастабильным, поскольку время жизни частиц в этом состоянии относительно велико (10 мс). Таким образом, даже умеренный уровень мощности накачки позволяет перевести значительное количество ионов эрбия в возбужденное состояние.

Усиление света в усилителе EDFA происходит благодаря переходу между уровнями $4I_{13/2}$ и $4I_{15/2}$. Наряду с усилением происходит поглощение света, сопровождающееся обратным переходом частиц с

уровня $4I_{15/2}$ на уровень $4I_{13/2}$. Величины усиления и поглощения пропорциональны населенности N_2 и N_1 верхнего лазерного уровня $4I_{13/2}$ и нижнего лазерного уровня $4I_{15/2}$, а также сечениям вынужденного излучения $\sigma_{21}(\lambda)$ и поглощения $\sigma_{12}(\lambda)$ соответственно. И населенности, и сечения зависят от длины волны λ входного излучения. Инкремент усиления $\gamma(\lambda)$ – коэффициент, характеризующий усиление сигнала по мощности на коротком участке, – определяется следующим выражением:

$$\gamma(\lambda) = N_2 \sigma_{21}(\lambda) - N_1 \sigma_{12}(\lambda). \quad (11)$$

Термодинамическое равновесие подразумевает, что населенность верхнего уровня N_2 пренебрежимо мала, а коэффициент усиления отрицательный, эрбиевое волокно поглощает свет всех длин волн. Увеличение населенности N_2 достигается посредством оптической накачки. Для измерения мощности P светового сигнала в оптическом волокне используется следующее дифференциальное уравнение:

$$\frac{dP(z,\lambda)}{dz} = \gamma(z,\lambda)P(z,\lambda) - \alpha_e P(z,\lambda), \quad (12)$$

где α_e – показатель затухания волокна, связанный с нерезонансным поглощением и рассеянием света. Коэффициент усиления активного эрбиевого волокна длины L находится путем интегрирования выражения (12):

$$G_{EF} = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \int_0^L (\gamma(z,\lambda) - \alpha_e) dz. \quad (13)$$

Различие в сечениях вынужденного излучения и поглощения играет важную роль при накачке на длине волны 1480 нм, которая приводит к квазидвухуровневой системе усиления (рис. 38). Квазидвухуровневая система усиления более энергетически эффективна, чем трехуровневая (накачка на длине волны 980 нм), обладает большим КПД, но вносит большее количество шумов. Для перехода 1–2 на $\lambda = 1480$ нм выполняется условие $\eta = \sigma_{21}(\lambda)/\sigma_{12}(\lambda) < 1$, что и позволяет осуществлять накачку на этой длине, добиваясь величины населенности верхнего уровня порядка 80%. Уровни $4I_{13/2}$, $4I_{15/2}$ и $4I_{11/2}$ расщеплены на ряд подуровней из-за взаимодействия ионов Er^{3+} с внутрикристаллическим полем кварцевого стекла вследствие эффекта Штарка. Поскольку населенности этих подуровней описываются распределением Больцмана, спектральные распределения сечений поглощения $\sigma_{12}(\lambda)$ и усиления $\sigma_{21}(\lambda)$ света не совпадают [2].

2. ПРИНЦИП РАБОТЫ И ОСОБЕННОСТИ АППАРАТУРЫ

2.1. Основные характеристики эрбиевых усилителей

Основным техническим параметром эрбиевого усилителя является коэффициент усиления. Коэффициент усиления G рассчитывается как отношение выходной мощности P_{out} к входной P_{in} :

$$G = \frac{P_{out}}{P_{in}}.$$

Для выражения коэффициента усиления в децибелах используется соотношение $g = 10 \lg G$. Результирующий коэффициент усиления EDFA меньше коэффициента усиления эрбиевого волокна g_{EF} на величину потерь A_{GFF} , вносимых выравнивающим фильтром, мультиплексором и оптическим изолятором.

Коэффициент усиления эрбиевого оптического усилителя зависит от мощности входного сигнала. В результате взаимодействия с усиливаемым излучением населенность N_2 уменьшается с ростом мощности сигнала, следовательно, с ростом мощности входного сигнала уменьшается интегральный коэффициент усиления усилителя G .

Коэффициент усиления G при насыщении, входная мощность P_{in} и выходная мощность P_{out} связаны соотношениями

$$G = G_0 \exp\left(-\frac{G-1}{G} \frac{P_{out}}{P_{sat}}\right),$$

$$G = G_0 \exp\left(-(G-1) \frac{P_{in}}{P_{sat}}\right),$$

где G_0 – коэффициент усиления, когда усилитель работает в режиме, далеком от насыщения (G_0 также называют коэффициентом усиления слабого сигнала), P_{sat} – мощность насыщения [2].

Помимо коэффициента усиления важной характеристикой оптического усилителя является шум-фактор, оценивающий степень ухудшения оптического отношения сигнал-шум (Optical Signal-to-Noise-Ratio, OSNR) идеального оптического сигнала (оптический сигнал, который не содержит шумов) вследствие прохождения через усилитель. Шум-фактор может выражаться как в линейных (F), так и в

логарифмических единицах ($NF = 10\log_{10}F$) и определяется соотношениями

$$F = \frac{OSNR_{in}^Q}{OSNR_{out}}$$

$$NF = 10 \log_{10} \left(\frac{OSNR_{in}^Q}{OSNR_{out}} \right) = osnr_{in}^Q - osnr_{out},$$

$$osnr_{out} = 10 \log_{10}(OSNR_{out}) = p_{\Sigma} - p_{сп}, \quad (14)$$

где p_{Σ} и $p_{сп}$ – суммарная мощность сигнала и спонтанного излучения и мощность спонтанного излучения в логарифмических единицах, соответственно (рис. 39).

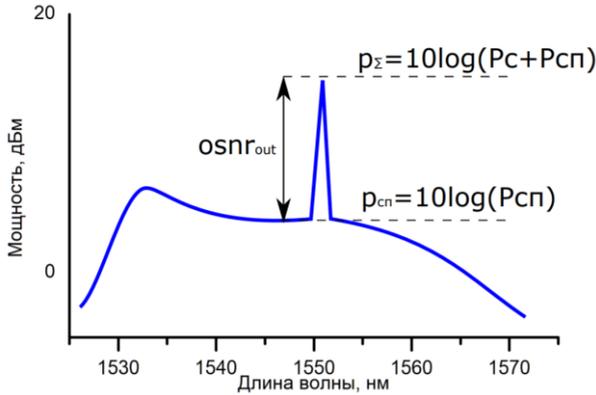


Рис. 39. Определение OSNR по спектру сигнала на выходе EDFA

Оптическое отношение сигнал-шум принимает максимально возможное, так называемое квантово-ограниченное, значение отношения сигнал-шум:

$$OSNR_{in}^Q = \frac{P_{S,in}}{h\nu\Delta\nu}.$$

Таким образом, выражение для отношения сигнал-шум в линейных единицах принимает следующий вид:

$$F = \frac{OSNR_{in}^Q}{OSNR_{out}} = \frac{P_{S,in}}{h\nu\Delta\nu} \cdot \frac{1}{OSNR_{out}}$$

Переход в логарифмические единицы дает выражение:

$$NF = 10 \log_{10}(F) = -10 \log_{10}(h\nu\Delta\nu) + P_{S,in} - osnr_{out}.$$

В частном случае на длине волны 1550 нм и в полосе 0,1 нм $10\log_{10}(h\nu\Delta\nu) = -58$ дБм шум-фактор приобретает вид

$$NF = 58 + p_{S,in} - osnr_{out}. \quad (15)$$

Эта формула позволяет измерить шум-фактор наиболее простым способом. При таком подходе измеряют мощность входного сигнала и отношение сигнал-шум на выходе усилителя. Данная методика имеет ограничение – она применима только к лазерным сигналам, не содержащим шума усиленного спонтанного излучения.

Для измерения шум-фактора может быть использован оптический анализатор спектра (Optical Spectrum Analyzer, OSA). Стандартная методика измерения мощности сигнала оптическим анализатором спектра дает завышенное значение мощности P_{OSA} , равное сумме мощности сигнала и мощности шума усиленного спонтанного излучения в полосе OSA: $P_{S,OSA} = P_{S,out} + 2\rho_{ASE} \nu_{OSA}$. Стандартная методика измерения мощности шума оптическим анализатором спектра дает заниженное значение, которое меньше полной мощности шума на величину «квантового шума», равного $h\nu \Delta\nu_{OSA}$, т.е. $P_{N,OSA} = P_{N,out} - h\nu \Delta\nu_{OSA}$.

Шум-фактор оптической системы из нескольких оптических усилителей с шум-факторами F_i , $1 \leq i \leq N$, рассчитывается по формуле Фрииса:

$$F = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} + \dots + \frac{F_N - 1}{G_1 G_2 \dots G_{N-1}}.$$

Как видно из формулы Фрииса, при $G \gg 1$ основной вклад в результирующие шумы дают шумы первого усилителя, поскольку они усиливаются в следующих усилителях. Формула Фрииса выведена для каскада оптических усилителей, но между усилителями могут располагаться пассивные элементы с потерями. Формально пассивный элемент с потерями A^{Lun} (в разгах) можно рассматривать как оптический усилитель с усилением $G = 1/A^{Lun}$ и шум-фактором $F = A^{Lun}$ [2]. Для трех типовых конфигураций усилителя с пассивными элементами можно получить следующие выражения.

Шум-фактор для различных конфигураций усилителя с пассивными элементами

Конфигурация	Шум-фактор
Усилитель с пассивным элементом на входе усилителя	$F = A^{Лин} F_1$
Усилитель с пассивным элементом на выходе усилителя	$F = F_1 + \frac{A^{Лин} - 1}{G_1}$
Двухкаскадный усилитель с пассивным элементом между каскадами усилителя	$F = F_1 + \frac{F_2 A^{Лин} - 1}{G_1}$

2.2. Конструкция телекомовских эрбиевых усилителей

В принципе, легированного эрбием оптического волокна (EDF – Erbium Doped Fiber – активное волокно, среда усиления (1)), лазера накачки с длиной волны 980 нм или 1480 нм (2) и мультиплексора, объединяющего длины волн накачки и сигнала (1530–1565 нм) в одно волокно (3), минимально достаточно для получения принципиально работоспособного усилителя. Но для удобного использования усилителей в составе DWDM-систем к усилителям предъявляются дополнительные требования (рис. 40).

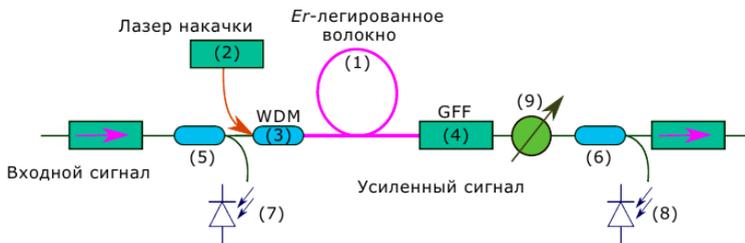


Рис. 40. Конструкция телекомовских эрбиевых усилителей

Во-первых, требуется усилитель с плоским спектром коэффициента усиления, т.е. его коэффициент усиления не должен зависеть от длины волны (в рабочем диапазоне). Это необходимо для одинакового усиления разных DWDM-каналов.

Покажем важность этого требования. Разность между максимальным и минимальным значением коэффициента усиления для DWDM-каналов называется *неравномерностью коэффициента усиления*. Пусть неравномерность $\sim 0,5$ дБ и обусловлена конструкцией усилителя (т.е. не является случайной). Тогда при передаче сигнала через 10 усилителей (что соответствует $\sim 10 \times 100 = 1000$ км длины линии) максимальная разность мощностей между каналами будет порядка $0,5 \times 10 = 5$ дБ (при отсутствии иных эффектов, перераспределяющих мощность между каналами). Характерный запас по OSNR в DWDM линиях связи 3 дБ, так что часть каналов утратит работоспособность.

Для выравнивания спектра усиления в современных усилителях применяют сглаживающий фильтр (GFF – Gain Flattering Filter) (4) – тонкопленочный фильтр, вносящий потери, зависящие от длины волны таким образом, что одна, заранее выбранная, кривая усиления выравнивается до плоской в рабочем диапазоне, хотя бы и ценой некоторого уменьшения абсолютного значения коэффициента усиления. Без GFF характерный диапазон плоского спектра – узкая полочка (5–10 нм), с GFF – 30–40 нм.

Для того чтобы GFF корректно сглаживал кривую усиления до плоской, фактическая инверсия должна соответствовать расчетной. Поскольку общее усиление однозначно определяется инверсией, то и коэффициент усиления получится постоянным (и заранее известным). Инверсия определяется соотношением мощности накачки (управляемый параметр) и входной мощности (внешний параметр). Для корректной работы необходимо для каждого значения входной мощности устанавливать мощность накачки, обеспечивающую заранее заданное значение инверсии и коэффициента усиления. Отсюда вытекает второе требование к реальному усилителю – наличие системы управления. Реальный усилитель оборудован ответвителями (5,6) и мониторными фотодиодами (7,8) на входе и на выходе. С их помощью измеряется входная и выходная оптические мощности, рассчитывается коэффициент усиления и подбирается и устанавливается необходимая мощность накачки. Для защиты элементов усилителя от возможных обратных отражений на выходе усилитель оборудован выходным изолятором (9). Для блокирования шума усиленного спонтанного излучения (ASE), распространяющегося в противоположенную сторону, усилитель оборудован входным изолятором (10).

Такой усилитель способен автоматически обеспечивать плоский спектр коэффициента усиления для любого значения входной мощности из допустимого диапазона, при этом усилитель все время развивает одно и то же, заранее известное значение коэффициента усиления. Такой

усилитель называется FGA – Fixed Gain Amplifier и обычно применяется в качестве усилителя мощности (бустера).

Если вмешаться в алгоритм подбора мощности накачки в зависимости от входной мощности, можно получить иное значение коэффициента усиления (больше при увеличении мощности накачки относительно «правильного» значения, и меньше – при уменьшении). Одновременно с этим спектр коэффициента усиления усилителя перестанет быть плоским. При небольших отклонениях коэффициента усиления от паспортного значения перекося можно считать линейным по длине волны (положительным – при завышении коэффициента усиления). Иногда это используется специально, для создания необходимого предперекося спектра каналов (например, с тем, чтобы спектр каналов выровнялся в линии вследствие рамановского перекося). Но изменение коэффициента усиления в широких пределах для усилителей, рассчитанных на работу с большим числом каналов, невозможно.

Усилитель, способный существенно (7–10 дБ) менять свой коэффициент усиления с сохранением плоского спектра усиления, называется VGA – Variable Gain Amplifier и устроен иначе. Он представляет собой последовательно включенные обычный FGA и переменный аттенюатор – VOA (11). Изменяя потери на аттенюаторе, можно уменьшать общий коэффициент усиления на величину внесенных потерь. Для одновременной оптимизации шумовых свойств усилителя и потребной мощности элементы, вносящие заметные потери, GFF и VOA, часто размещают между каскадами усиления.

Реальный усилитель работает в одном из режимов стабилизации – при изменении входной мощности поддерживает постоянным: а) или ток (мощность) лазеров накачки – режим ILD, б) или мощность на выходе – Pout, в) или коэффициент усиления – Gain. Очевидно, что корректно работать в режиме Pout могут только VGA усилители.

На практике устройство реальных усилителей еще более сложно – остались нерассмотренными вопросы устойчивости и скорости работы системы управления (ПИД-регуляторов), учета собственных шумов, автоматического определения целостности линий и отключения/включения накачки в зависимости от наличия входного сигнала, инженерной оптимизации усилителей к разным задачам (предусилитель/бустер/линейный усилитель/усилитель с удаленной доставкой накачки) и многое другое.

ХОД РАБОТЫ

Для выполнения заданий используется следующее оборудование:

1. MFAS-Er-C-B-23-BA Эрбиевый усилитель для C-диапазона, Connet Laser Technology.
2. Анализатор оптического спектра AQ 6370 C-2-F\FC\RFC.
3. Источник оптического излучения EXFO FLS 600-23BL.
4. Оптический тестер EXFO FOT 600.
5. Атенюатор перестраиваемый VOA-C-1-1550-1-000-FC/APC*2-26x18x8-1M, винтовой тип управления, длина волны 1550 нм, буфер 900мкм, волокно Corning-SMF-28e+- 100KPSI, коннекторы FC/APC, корпус 26x18x8 мм, длина волокна 1 м, LightComm.
6. Волоконно-оптический медиаконвертер.
7. SFP-модуль на длину волны 1550 нм.

Задание 1. Запись спектра источника излучения с помощью анализатора оптического спектра (OSA)

1. Убедиться, что источник излучения имеет выходную мощность не более 15 дБм.
2. Подключить к анализатору оптического спектра источник излучения, используя FC-UPC коннектор.
3. Включить источник излучения.
4. Используя кнопку SPAN на лицевой панели OSA, установить диапазон измерений 200–500 нм, для ввода использовать кнопку nm/ENTER.
5. Перейти в меню записи спектра, кнопкой SWEEP.
6. Для однократного измерения спектра использовать кнопку SINGLE, для многократного – REPEAT (назначение кнопок указано на экране OSA).
7. В случае линейчатого спектра уменьшить SPAN и выбрать отдельный пик. Для изменения расположения области сканирования (диапазона длин волн) использовать кнопку CENTER.
8. Установить горизонтальные маркеры на уровне максимальной амплитуды пика и на уровне шума. Перейти в меню работы с маркерами, используя MARKER. Для сброса ранее установленных маркеров использовать ALL MARKER CLEAR. LINE MARKER 1, 2 – вертикальные маркеры (измеряют расстояние по оси длин волн), 3, 4 – горизонтальные маркеры (измеряют расстояние по оси мощности). Для установления

положения маркера используется ввод точного значения на панели OSA или вращающийся регулятор.

9. Для сохранения спектра:

- вставить USB-карту в разъем OSA;
- перейти в раздел работы с файлами FILE;
- выбрать ITEM SELECT/GRAPHICS, нажать WRITE для перехода к сохранению файла;
- выбрать USB-накопитель для сохранения спектра MEMORY/EXT;
- ввести имя файла, используя вращающийся регулятор, панель цифр, кнопку ENTER;
- нажать DONE – файл будет сохранен на USB-носитель.

Задание 2. Исследование спектра спонтанного усиленного излучения

1. Подключить источник излучения к входу EDFA, используя FC-APC коннектор.
2. Включить EDFA в режиме стабилизации выходной мощности APC.
3. Включить источник излучения на длине волны 1310 нм, измерить мощность входного излучения в EDFA (Input Power на дисплее).
4. Включить лазер накачки кнопкой Laser.
5. Измерить мощность выходного излучения EDFA (Output Power на дисплее).
6. Если мощность выходного излучения EDFA не превышает 15 дБм, подключить выходной коннектор EDFA к входу OSA.
7. Выключить лазер накачки кнопкой Laser.
8. Измерить мощность сигнала с помощью OSA.
9. Включить лазер накачки кнопкой Laser.
10. Для изменения выходной мощности нажать Enter, вращающимся регулятором выбрать необходимое значение (следить, чтобы Output Power не превышала 15 дБм), снова нажать Enter.
11. Измерить спектр спонтанного усиленного излучения для 3–4 значений выходной мощности EDFA.

Задание 3. Измерение коэффициента усиления EDFA

1. Подключить источник излучения к входу EDFA, используя FC-APC коннектор. В качестве источника излучения для данного задания использовать медиаконвертер с SFP-модулем на длину волны в С-диапазоне.

2. Включить EDFA.

3. Включить источник излучения на длине волны в С-диапазоне, измерить мощность входного излучения в EDFA (Input Power на дисплее);

4. Включить лазер накачки кнопкой Laser.

5. Измерить мощность выходного излучения EDFA (Output Power на дисплее).

6. Если мощность выходного излучения EDFA не превышает 15 дБм, подключить выходной коннектор EDFA последовательно к аттенуатору и входу OSA.

7. Выключить лазер накачки кнопкой Laser.

8. Измерить мощность сигнала с помощью OSA.

9. Включить лазер накачки кнопкой Laser.

10. Для изменения усиления нажать Enter, вращающимся регулятором выбрать необходимое значение (следить, чтобы Output Power не превышала 15 дБм), снова нажать Enter.

11. Измерить спектры для 5–8 значений выходной мощности EDFA.

12. Рассчитать OSNR и NF усилителя по формулам 14 и 15.

13. Измерить спектр сигнала на входе в усилитель.

14. Измерить спектр сигнала на выходе из усилителя.

15. Построить спектр коэффициента усиления как разность между спектрами сигнала на выходе и на входе в усилитель.

16. Определить длины волн наиболее эффективного усиления сигнала.

Задание 4. Зависимость выходной мощности EDFA от тока накачки и входной мощности

1. Подключить источник излучения последовательно к переменному аттенуатору и входу EDFA, используя FC-APC коннектор.

2. Включить EDFA в режим стабилизации тока накачки ACC.

3. Включить источник излучения на длине волны в С-диапазоне, измерить мощность входного излучения в EDFA (Input Power на дисплее);

4. Включить лазер накачки кнопкой Laser.

5. Измерить мощность выходного излучения EDFA (Output Power на дисплее).

6. Если мощность выходного излучения EDFA не превышает 15 дБм, подключить выходной коннектор EDFA последовательно к аттенюатору и входу OSA. Если мощность выходного излучения EDFA не превышает 10 дБм, подключить выходной коннектор EDFA к измерителю оптической мощности EXFO FOT-600.

7. Выключить лазер накачки кнопкой Laser.

8. Измерить мощность сигнала с помощью OSA или EXFO FOT-600.

9. Включить лазер накачки кнопкой Laser.

10. Для изменения тока накачки нажать Enter, вращающимся регулятором выбрать необходимое значение (следить, чтобы Output Power не превышала 10/15 дБм), снова нажать Enter.

11. Записать зависимость выходной мощности EDFA от тока накачки.

12. При фиксированном значении тока накачки (не более 1 мВт) записать зависимость выходной мощности EDFA от входной мощности, используя переменный аттенюатор.

Контрольные вопросы

1. Описать принцип работы и конструкцию эрбиевого оптического усилителя.

2. Описать процесс оптической накачки и энергетические переходы в легированном ионами эрбия оптическом волокне.

3. В чем конструктивное отличие эрбиевого усилителя от лазера?

4. Дать определение коэффициента усиления эрбиевого усилителя.

5. Описать зависимость коэффициента усиления эрбиевого оптического усилителя от мощности входного сигнала.

6. Какие требования предъявляются к телекоммуникационным усилителям?

Заключение

Изложены теоретические основы волоконно-оптических линий связи. Рассмотрена физика явлений, происходящих в оптическом волокне, позволяющих организовать передачу информации и открывающих возможности для различных прикладных применений волокна. Приведено описание методов измерения основных параметров оптических систем. Лабораторные работы позволяют получить практические навыки работы с современным волоконно-оптическим оборудованием и анализа экспериментальных результатов.

Литература

1. *Листвин А.В., Листвин В.Н., Швырков Д.В.* Оптические волокна для линий связи. Москва : ЛЕСАР арт, 2003. 288 с.
2. *Трещиков В.Н., Листвин В.Н.* DWDM-системы. Москва : Техносфера, 2021. 420с.
3. *Листвин А.В., Листвин В.Н.* Рефлектометрия оптических волокон. Москва : ЛЕСАР арт, 2005.
4. *Листвин В.Н., Наний О.Е., Плоцкий А.Ю., Трещиков В.Н.* Оптический рефлектометр : методические указания к лабораторным работам по курсу «Эксплуатация DWDM систем». Москва : Т8, 2011. 36 с.
5. *Anderson D.R., Jonson L., Bell F.G.* Troubleshooting optical-fiber networks. Understanding and using your optical time-domain reflectometer. Elsevier, Inc., London, 2004.
6. *Wang Q., Farrell G., Yan W.* Investigation on singlemode-multimodesinglemode fiber structure // Journal of Lightwave Technology. 2008. 26(5). P. 512–519.
7. *Mohammed W.S., Smith P. W. E., Gu X.* All-fiber multimode interference bandpass filter // Optics Letters. 2006. V. 31, N 17. P. 2547–2549.

Учебное издание

Игуменов Александр Юрьевич
Лукиных Сергей Николаевич
Мельников Игорь Владимирович

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ОРГАНИЗАЦИИ И ДИАГНОСТИКИ
ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ
ЛИНИЙ СВЯЗИ**

Лабораторный практикум

Редактор *И. А. Волкова*. Корректор *О. П. Котова*
Компьютерная верстка *П. В. Попов*

Подписано в печать 17.07.2022. Формат 60 × 84 ¹/₁₆. Усл. печ. л. 4,5.
Уч.-изд. л. 3,9. Тираж 20 экз. Заказ №
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Московский физико-технический
институт (национальный исследовательский университет)»
141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
Тел. (495) 408-58-22, e-mail: gio@mipt.ru

Отдел оперативной полиграфии «Физтех-полиграф»
141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
Тел. (495) 408 84 30, e-mail: polygraph@mipt.ru