

Исследование оптических потерь в телекоммуникационной линии связи.

(Описание задачи практикума фотоники и физики микроволн
физического факультета МГУ)

Введение

Волоконная оптика является относительно молодым направлением в оптической физике, бурное развитие которого пришлось на конец 80-х годов прошлого века. Однако волоконно-оптические телекоммуникационные линии связи уже прочно вошли в современную жизнь. Еще в 60-х годах было предложено передавать информацию по диэлектрическим волноводам из стекла в оптическом диапазоне в качестве альтернативы традиционной передаче электрических сигналов по проводникам. Но практическое осуществление идеи стало возможно благодаря следующим научно-техническим достижениям:

1. Разработка способов изготовления стекла с рекордно низким содержанием нежелательных примесей, поглощающих оптическое излучение (различные методы осаждения из парогазовой фазы).

2. Создание лазерных диодов, являющихся источниками излучения в волоконно-оптических линиях связи.

3. Создание эрбиевых волоконных усилителей для протяженных (более 100 км) волоконно-оптических линий связи, что позволило отказаться от технически сложных электронных ретрансляторов.

Основными параметрами линии связи являются ее длина и пропускная способность. Максимально возможную протяженность линии связи (без промежуточных усилителей сигнала) определяют оптические потери в ней. Чем меньше число ретрансляторов, тем проще дизайн линии связи и ее обслуживание, ниже ее стоимость и дешевле передача информации конечному пользователю. Кроме того, линии связи постоянно совершенствуются и появляются новые типы телекоммуникационных световодов, оптические потери в которых необходимо минимизировать. Таким образом, исследование оптических потерь в световодах и выяснение физических причин, приводящих к ним, представляет собой важную задачу как прикладной, так и фундаментальной волоконной оптики.

В данной задаче будут рассмотрены принципы работы волоконно-оптических линий связи на примере простейшей из них и определены оптические потери в ней, как наиболее важная характеристика линии связи.

Предполагается, что студент знаком с основами теории волноводов, в частности, с понятием мод волновода. С этими понятиями и рядом других, относящихся к волоконной оптике, можно ознакомиться, используя литературу, приведенную в конце описания задачи.

Волоконные световоды и линии связи (теоретическая часть описания задачи)

1. Оптические потери в волоконном световоде

Волоконный световод представляет собой диэлектрический цилиндрический волновод, как правило, выполненный из стекла и имеющий внешнее защитное полимерное покрытие. В световоде существуют две области, различающиеся составом – сердцевина (диаметр около 8 мкм для телекоммуникационных световодов) и окружающая ее оболочка (диаметр около 125 мкм для телекоммуникационных световодов). Сердцевина имеет более высокий показатель преломления по сравнению с оболочкой, что позволяет излучению распространяться по ней за счет эффекта полного внутреннего отражения на границе сердцевина-оболочка. Малый внешний диаметр телекоммуникационного световода позволяет изгибать его вплоть до радиусов порядка 1 см без разрушения, что позволяет укладывать волоконные кабели практически по любому требуемому маршруту.

Одним из важнейших параметров световода являются оптические потери в нем, определяющие максимальное расстояние, на которое может быть передан оптический сигнал по световоду. Как известно, при распространении пучка излучения умеренной интенсивности в однородной среде изменение его мощности с расстоянием описывается законом Бугера-Ламберта с характерным параметром α , называемым коэффициентом затухания и численно определяющим оптические потери в среде:

$$P = P_0 \times \exp(-\alpha x), \quad (1)$$

где P_0 – мощность пучка в некоторой точке, а P – его мощность на расстоянии x от нее.

Поскольку в световоде в общем случае может распространяться несколько мод излучения, изменение мощности излучения при распространении по световоду дается суммой подобных выражений для каждой моды:

$$P = \sum P_i \times \exp(-\alpha_i x), \quad (2)$$

где P_i – мощность излучения в i -той моде световода в точке его возбуждения (на торце световода), α_i – коэффициент затухания для i -той моды, а P – мощность излучения в световоде на расстоянии x от точки возбуждения.

Моды имеют различные распределения поля, и поэтому оптические потери будут для них разными, так как доля мощности, распространяющаяся по сердцевине и по оболочке (которые отличаются составом стекла, и, соответственно, оптическими потерями в нем), будет разной для каждой моды (сдвиг Гооса-Генхена). Получившееся уравнение (2) достаточно сложно, поскольку коэффициент P_i при каждом его члене зависит от характера возбуждения световода, а определение оптических потерь α_i для каждой моды в отдельности не всегда возможно. Однако, существуют частные, но наиболее распространенные случаи, когда уравнение может быть представлено в простой форме:

а) *Одномодовый режим.* Световод обладает единственной направляемой модой (для данной длины волны). Очевидно, в этом случае будет справедливо уравнение (1).

б) *Многомодовый режим в случае слабого поглощения и больших длин.* Параметры реального световода (форма и размер сердцевины, ее показатель преломления) всегда испытывают вариации вдоль его длины, кроме того, световод имеет изгибы и микроизгибы. Все эти факторы приводят к связи между модами и перекачке энергии между ними. Таким образом, уравнение (2) требуется усложнить. Однако, если характерная длина перекачки много меньше характерной длины затухания и

используемой длины световода, то в световоде устанавливается равномерное распределение мощности по всем направляемым модам. Затухание излучения в этом случае также описывается уравнением (1), но в этом случае значение коэффициента затухания будет величиной, усредненной по всем направляемым модам.

2. Природа оптических потерь в световодах, собственные и избыточные оптические потери

Волоконные световоды, применяющиеся в телекоммуникационных линиях связи, изготавливаются из кварцевого стекла, причем сердцевина легируется добавками, повышающими показатель преломления. Наиболее широко используемой добавкой является диоксид германия. Добавка диоксида германия увеличивает показатель преломления кварцевого стекла в видимой и ближней ИК области на величину:

$$\Delta n = 1.443 \times 10^{-3} C, \quad (3)$$

где C – концентрация GeO_2 в мол. %.

Часто пользуются величиной Δ – относительной разницей показателей преломления сердцевины и оболочки:

$$\Delta = \Delta n / n, \quad (4)$$

где n – показатель преломления оболочки.

Оптические потери в световодах обусловлены поглощением и рассеянием распространяющегося по ним излучения. В свою очередь они могут быть разделены на собственные, определяемые фундаментальными механизмами, и избыточные, обусловленные несовершенством технологии изготовления световодов. Фундаментальные потери являются тем минимальным уровнем, к которому стремятся при совершенствовании процесса производства волоконных световодов. Характерный спектр потерь кварцевого стекла представлен на рис. 1. Видно, что минимум оптических потерь достигается в области 1,55 и 1,31 мкм, которые соответствуют первым и вторым окнам прозрачности телекоммуникационных линий связи. Далее мы рассмотрим более подробно вклад различных механизмов потерь в полные оптические потери.

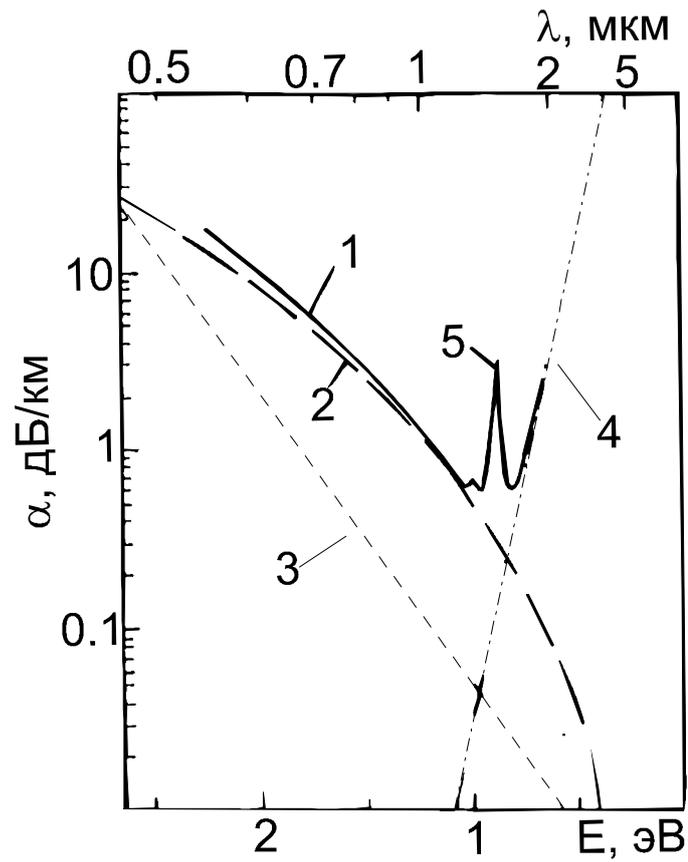


Рис. 1. Разложение оптических потерь в волоконных световодах на компоненты:

- 1 – оптические потери в световодах (11% GeO_2),
- 2 – потери, обусловленные рэлеевским рассеянием,
- 3 – краем зонного поглощения,
- 4 – краем фононного поглощения,
- 5 – поглощением ОН-групп.

Собственное ИК поглощение

Возбуждение колебаний атомов в сетке кварцевого стекла обуславливает ИК-край поглощения (Рис. 1). Максимумы полос поглощения, связанных с колебаниями Si–O, лежат в области 9-21 мкм. Край многофононного поглощения SiO₂ в ближнем ИК-диапазоне описывается эмпирической формулой:

$$\alpha_{ir}=3,4 \times 10^{11} \exp(-38,9E) \text{ [дБ/км]} \quad (5)$$

где E – энергия в эВ.

Край полного поглощения GeO₂ сдвинут по сравнению с SiO₂ в сторону больших длин волн примерно на 700 см⁻¹. Поэтому, если световод имеет сердцевину из стекла состава $x\text{GeO}_2 - (1-x)\text{SiO}_2$, его край ИК-поглощения также сдвигается в длинноволновую сторону:

$$\alpha_{ir}=(3,4-3,3x) \times 10^{11} \exp\{-38,9E\} \text{ [дБ/км]} \quad (6)$$

Это поглощение дает существенный (более 1 дБ/км) вклад в общие потери ВС только в области длин волн более 1.85 мкм и в телекоммуникационных окнах прозрачности оно несущественно.

Собственное УФ поглощение

Длинноволновое поглощение во многих диэлектриках вдали от максимума описывается экспоненциальной зависимостью коэффициента поглощения от энергии фотонов или эмпирическим законом Урбаха. Он справедлив как для края фундаментального электронного поглощения, так и для поглощения на примесях и точечных дефектах. Экстраполяция коэффициента экстинкции имеет вид:

$$\varepsilon_{uv}=\varepsilon_0 \exp(E/E_0), \quad (7)$$

где $\varepsilon_0=1.474 \times 10^{-7}$ дБ/км/вес.% Ge, $E_0=0,268$ эВ. Отсюда можно получить выражение для хвоста УФ поглощения в германосиликатном стекле:

$$\alpha_{uv}=\{1,07C/(44,6C+6000)\} \exp(4,63/\lambda) \text{ [дБ/км]}, \quad (8)$$

где λ – длина волны в мкм, C – концентрация GeO₂ в мол.%.

Вклад этого механизма в полные оптические потери в области первого и второго окон прозрачности мал.

Собственное рассеяние

Статистические флуктуации плотности и состава с размерами, много меньшими длины волны, "вмораживаются" в стекло при остывании расплава в виде неоднородности показателя преломления и являются причиной рэлеевского рассеяния в световодах. Принято считать, что стекло (исходно вязкая жидкость) замораживается в состоянии, соответствующем фиктивной температуре (T_f), называемой еще температурой стеклования. Таким образом, рэлеевское рассеяние является собственным, присущим данному веществу. По величине оптические потери этого типа доминируют в видимой и ближней ИК области спектра (Рис.1). В телекоммуникационных окнах прозрачности рэлеевское рассеяние является основным фундаментальным механизмом потерь, и, таким образом, определяет минимальные оптические потери в волоконных световодах.

Коэффициент рэлеевского рассеяния в однокомпонентном стекле дается формулой:

$$\alpha_{s,p}=(8\pi^3/3\lambda^4)(n^2-1)\beta kT_f, \quad (9)$$

где n – показатель преломления, β – изотермическая сжимаемость при фиктивной температуре T_f .

В многокомпонентных стеклах к флуктуациям плотности добавляются также флуктуации состава. Для бинарного стекла $x\text{GeO}_2 - (1-x)\text{SiO}_2$ имеет место соотношение:

$$\alpha_{sc} = 3,3x(1-x)/\lambda^4 \text{ [дБ/км]}, \quad (10)$$

где длина волны λ выражена в [мкм]. При малых концентрациях это уравнение дает возрастание потерь на 0,033 дБ/км на каждый молярный процент GeO_2 при $\lambda=1$ мкм без учета влияния диоксида германия на рассеяние за счет флуктуаций плотности.

Суммарные потери на рэлеевское рассеяние в волоконных световодах из германосиликатного стекла обычно принято выражать в виде

$$\alpha_R = A/\lambda^4 = A_o(I+z\Delta)/\lambda^4 \text{ [дБ/км]}, \quad (11)$$

где A_o – коэффициент рэлеевского рассеяния в чистом SiO_2 , z – коэффициент, отражающий влияние легирующей добавки GeO_2 , а длина волны λ выражена в [мкм]. По разным данным, A_o находится в диапазоне 0,63 - 0,75, а z – от 44 до 80.

При небольших концентрациях диоксида германия можно пренебречь его влиянием на флуктуации плотности и считать потери на рэлеевское рассеяние суммой потерь, обусловленных флуктуациями состава, и потерь, обусловленных флуктуациями плотности чистого кварцевого стекла, и принять $A \approx 0,7$.

На сегодняшний день благодаря совершенствованию технологии получен минимальный уровень оптических потерь в световодах из кварцевого стекла, предсказываемый теорией.

Избыточное поглощение

Поглощение различными посторонними примесями, присутствие которых в стекле обусловлено недостаточной степенью очистки исходных компонентов и загрязнениями, вносимыми во время его изготовления, называется избыточным. Современные методы производства световодов (с использованием осаждения из парогазовой фазы) позволяют практически полностью избавиться от поглощения такими примесями, за исключением поглощения ОН-группами.

Основная деформационная колебательная полоса поглощения ОН-групп в кварцевом стекле расположена вблизи 2,73 мкм, а обертоны этого колебания и его комбинации с колебаниями сетки стекла соответствуют пикам поглощения на 1,318, 1,24, 0,95, 0,72 мкм. ОН-группы трудноустраняемы, и пик в области 1,4 мкм, как правило, наблюдается в спектрах потерь световодов (0,55 дБ/км соответствует 10^{-6} вес.% ОН). Этот пик обуславливает существование двух окон прозрачности кварцевого стекла на 1,31 и 1,55 мкм, разделяя их. В тоже время в окнах прозрачности поглощение ОН-группами незначительно при их концентрациях не более 10^{-5} вес.%.

Избыточное рассеяние

Оптические неоднородности, обусловленные недостатками технологии изготовления (вариацией геометрических параметров световода по длине, пузырьками газа и т.д.), а также разделением фаз в стекле, приводят к избыточному рассеянию. Если размеры этих неоднородностей меньше длины волны излучения, то они дают дополнительный вклад в рэлеевское рассеяние. В случае более крупных возмущений рассеяние имеет более слабую спектральную зависимость, например $1/\lambda^2$ (рассеяние Ми), или вообще не зависит от длины волны.

Этот механизм избыточных потерь является, по-видимому, доминирующим, особенно в случае для световодов с большим содержанием легирующей добавки в сердцевине. Сильное различие вязкости сердцевины и оболочки ведет к нарушению формы границы их раздела при изготовлении, а также значительно увеличивается тенденция к разделению фаз в сердцевине, ведущему к образованию крупных оптических неоднородностей в ней.

Изгибные потери

Изгибы световода и его микроизгибы, являющиеся следствием несовершенства технологии изготовления, также ведут к избыточным потерям. Строгий анализ этого типа потерь достаточно сложен, однако качественно его можно объяснить следующим образом. При распространении света по дуге часть поля моды, расположенная вдали от сердцевины, проходит большее расстояние, чем излучение, распространяющиеся по сердцевине. Так как поле моды обращается в ноль в поперечном направлении только на бесконечности, то на достаточно большом расстоянии от сердцевины излучение должно двигаться со скоростью, большей, чем скорость света, чтобы "догнать" излучение, идущее по сердцевине. Поскольку это невозможно, часть излучения будет "отрываться" от моды, идущей по дуге, и высвечиваться. Когда значительная часть поля моды сосредоточена в сердцевине и радиус изгиба волокна достаточно велик, этот эффект пренебрежимо мал, что обычно и реализуется на практике. Однако когда значительная доля мощности направляемой моды распространяется вне сердцевины, или изгибы достаточно круты, эти потери начинают играть основную роль. Величина изгибных потерь растет при увеличении длины волны излучения.

3. Волоконно-оптические линии связи

Простейшая волоконно-оптическая линия связи состоит из следующих компонентов: источника оптического излучения, его модулятора, волоконно-оптического кабеля, приемника оптического излучения и анализатора сигнала. Источником излучения является диодный лазер, работающий, как правило, на длине волны 1.55 или 1.31 мкм. Электрический сигнал с модулятора поступает на вход модуляции источника излучения в необходимом для передачи формате. Модулированное лазерное излучение вводится в оптическое волокно и детектируется фотодиодным приемником после прохождения через него. Электрический сигнал, поступающий с приемника, переводится в удобный для последующей обработки вид анализатором сигнала.

Существуют два вида передачи информации: аналоговый и цифровой. Аналоговая передача технически проще, поскольку не требует оцифровки сигнала. Однако такой способ требует идеальной приемно-передаточной функции системы, что невозможно реализовать на практике. Поэтому аналоговая передача применяется, когда требования к качеству сигнала достаточно низкие. Цифровая передача сигнала характеризуется высокой помехоустойчивостью, и, кроме того, предпочтительнее при работе с компьютерами.

Несмотря на гигантскую пропускную способность оптического волокна, объемы передаваемой информации постоянно растут, поэтому уже сейчас по одному волокну передают одновременно несколько потоков информации. Для этой цели применяется различного рода уплотнение каналов, в частности спектральное уплотнение (Wavelength Division Multiplexing – WDM), заключающееся в том, что по одному световоду одновременно распространяются несколько сигналов на разных длинах волн. Для реализации этого необходимы устройства, позволяющие вводить в одно волокно излучение от разных источников, а затем "рассортировывать" переданные сигналы в зависимости от длины волны несущего излучения. В задаче студенты знакомятся с одним из типов подобных устройств – волоконным ответвителем. В данном устройстве

сердцевины двух волокон располагаются достаточно близко друг к другу за счет уменьшения размера оболочки. При этом поле излучения, распространяющееся в одном из световодов, достаточно сильно пересекается с сердцевиной другого, что позволяет осуществить эффективную перекачку энергии из одного световода в другой. Ситуация аналогична колебательным контурам со связью, при этом расстояние между сердцевинами световодов определяет величину этой связи. Коэффициент деления излучения между выходными портами зависит от длины волны излучения.

Описание экспериментальной части задачи.

Задача посвящена изучению простейшей волоконно-оптической линии связи и определению оптических потерь в ней. Исследуемая линия связи состоит из компонентов, расположенных на стенде (см. рис. 2), а именно:

- 1, 2 – двух диодных лазеров, работающих на длинах волн 1,31 и 1,55 мкм, маркированных как "Передающий модуль" с указанием длины волны;
- 3 – оптического ответвителя;
- 4, 5 – двух приемников излучения, маркированных как "Приёмный модуль";
- 6 – генератора прямоугольных импульсов, модулирующего излучение лазеров;
- 7 – осциллографа, предназначенного для анализа сигнала, поступающего с приемника оптического излучения;
- 8 – катушки с одномодовым волоконным световодом большой длины, выходные концы которого вклеены в адаптеры, снабженные защитными колпачками. Волоконный световод имеет ступенчатый профиль показателя преломления, сформированный путем добавки диоксида германия в его сердцевину. Длина световода указана на катушке;
- 9 – короткого отрезка такого же волоконного световода малой длины, выходные концы которого вклеены в адаптеры, снабженные защитными колпачками. Длина световода составляет 1 м;
- 10 – Блока управления питанием передающих и приёмных модулей.

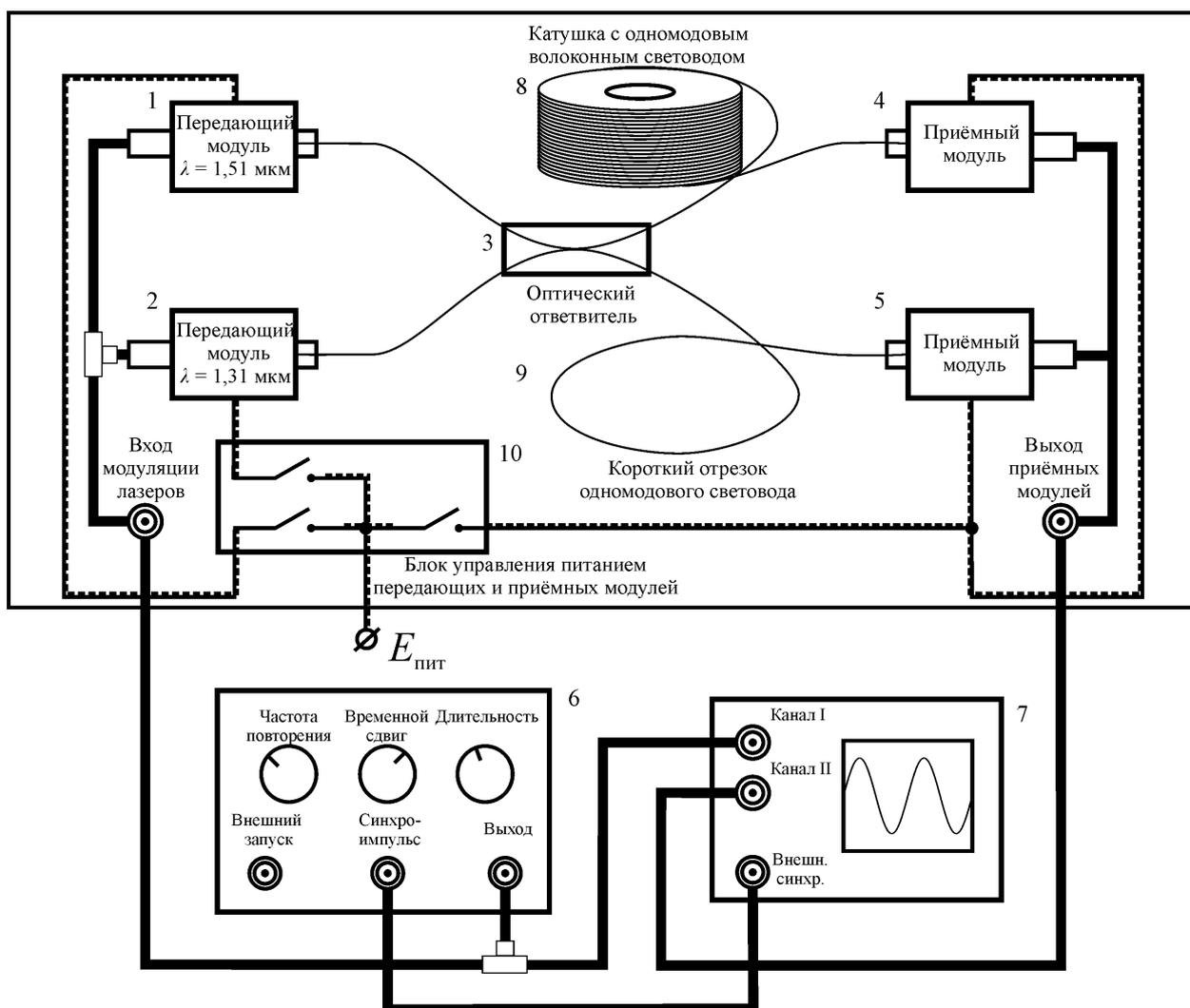


Рис. 2. Схема экспериментальной установки.

Порядок выполнения задачи.

Перед началом работы необходимо внимательно изучить правила использования и технику безопасности задачи!

После сдачи допуска задачи следует узнать у преподавателя концентрацию диоксида германия в сердцевине исследуемого световода, спектр его оптических потерь в относительных (логарифмических) единицах и коэффициент деления ответвителя для двух длин волн 1,31 и 1,55 мкм. Затем подготовить волоконную линию связи для работы. Для этого необходимо выполнить следующее:

1) Включить питание осциллографа и генератора импульсов.

2) Кабель, идущий от выхода генератора импульсов, соединяется с входом I осциллографа. Используя осциллограф необходимо убедиться, что амплитуда импульсов первого и второго генераторов не превышает 1 В. **Напряжение амплитудой более 1 В может привести к повреждению лазеров и выходу их из строя.** Только после этого можно подключить генератор импульсов к входу модуляции излучения диодных лазеров. Сигнал модуляции подается одновременно на оба лазера, выбор длины волны производится путем включения питания лазера.

3) Кабель, соединенный с входом II осциллографа, соединяется другим концом с выходами оптических приемников. При выполнении задачи к осциллографу подключены всегда оба приемника. Сигналы с первого и второго приемника можно различить по задержке во времени относительно импульсов, подаваемых на вход модуляции лазеров с генератора.

4) Включить питание фотоприемников. Затем включить питание одного из лазеров (лазер №1 с длиной волны 1,31 мкм для выполнения упражнений 1, 2 и 3 и лазер №2 с длиной волны 1,55 мкм для выполнения упражнений 4 и 5). Убедиться, что с выхода фотоприемников на осциллограф поступают импульсы, соответствующие импульсам на входе модуляции излучения лазеров.

При возникновении каких-либо проблем или неполадок при подготовке установки к работе следует немедленно обратиться к преподавателю или лаборанту. Предполагается, что студент знаком с навыками работы с осциллографом и генератором прямоугольных импульсов.

Упражнение 1. Измерение длины большого отрезка оптоволокна.

В задаче проводится измерение длины оптоволоконного кабеля путем измерения задержки в прохождении сигнала по длинному и короткому отрезкам оптоволокна. Необходимо наблюдать два импульса на экране осциллографа (синхронизация производится от генератора импульсов, подаваемых на вход модуляции излучения лазеров). По измеренным значениям задержки между импульсами, прошедшими через короткий и длинный отрезок волокна и известным значениям показателя преломления ($n = 1,47$) определяется длина волокна (так как длина короткого волокна пренебрежимо мала по сравнению с размерами длинного волокна, время прохождения сигнала по короткому волокну в пределах точности измерения можно не учитывать).

При выполнении упражнения измерение длины волокна проводится дважды с использованием излучения каждого из лазеров по очереди.

Упражнение 2. Измерение оптических потерь в линии связи на длине волны 1,31 мкм.

На генераторе импульсов установить длительность импульса равную 1 мкс и период следования импульсов не менее 40 мкс.

Измерить амплитуду импульсов на экране осциллографа соответствующих сигналам, прошедшим через длинный и через короткий оптический волновод. За тем, используя полученные результаты, по известным значениям коэффициента деления и длины оптоволокна определить коэффициент оптических потерь в оптоволокне.

Упражнение 3. Измерение оптических потерь в линии связи на длине волны 1,55 мкм.

Выполняется аналогично Заданию 2.

По завершении последнего упражнения (Упражнения 3) следует сдать рабочее место лаборанту или преподавателю.

Контрольные вопросы к задаче (допуск):

1. Что такое световод?
2. Что такое мода излучения? Что такое отсечка моды?
3. Выведите формулу для вычисления оптических потерь в [дБ/м] путем сравнения величины сигналов на выходе из длинного и короткого отрезков световода и в предположении одномодового характера распространения излучения. В каком еще случае полученная формула справедлива? Чем отличаются фундаментальные оптические потери от избыточных?
4. Назовите физические причины фундаментальных потерь.
5. Назовите физические причины избыточных потерь.
6. Чем определяется максимальная длина оптоволоконных линий связи? Приведите характерный пример.
7. Чем определяется пропускная способность линии связи? Назовите виды дисперсии в световодах и дайте их определение.
8. Можно ли по форме сигнала отличить дисперсионное уширение оптического импульса от уширения электрического импульса, обусловленного прохождением через интегрирующую цепочку?

При сдаче задачи необходимо:

1. Представить величину оптических потерь в световоде на длинах волн 1,31 и 1,55 мкм, определенных по формуле: $\alpha = 10 \times (1/(L-l)) \times \log(I_1/I_0)$ [дБ/км], где L – длина световода на катушке в [км], l – длина короткого отрезка световода в [км]. При расчете необходимо принять во внимание коэффициент деления ответвителя для данной длины волны (1,3 или 1,55 мкм), который для длины волны света 1.5 мкм равен 1/2 (1 идет в короткий кусок, 2 в длинный) и для длины волны света 1.3 мкм равен 2/3 (2 идет в короткий кусок, 3 в длинный).
2. Вычислить по формулам из описания вклад каждого из фундаментальных механизмов оптических потерь. При малой концентрации диоксида германия в сердцевине световода (< 5 мол.%) потери на рэлеевское рассеяние считать по упрощенной формуле, не принимая во внимание флуктуации плотности, обусловленные наличием добавки. При больших концентрациях диоксида германия привести максимальное и минимальное значения потерь на рэлеевское рассеяние, рассчитанных по более общей формуле.
3. Пользуясь спектром оптических потерь в исследуемом световоде и измеренными потерями на длинах волн 1,31 и 1,55 мкм, оценить концентрацию ОН-групп в сердцевине световода.
4. Сравнить зависимости от длины волны измеренных оптических потерь и рэлеевского рассеяния.
5. На основании представленных выше данных сделать заключение о присутствии/отсутствии избыточных потерь. В случае присутствия указать их величину. В предположении отсутствия посторонних поглощающих примесей в световоде, за исключением ОН-групп, рассмотреть возможные причины избыточных потерь, сделать вывод о механизме, дающем наибольший вклад и обосновать его. (Если это рассеяние, то указать его тип – рэлеевское или нерэлеевское.)
6. Определить максимальную длину линии связи на основе исследованного световода по уровню 30 дБ для длин волн 1,31 и 1,55 мкм.

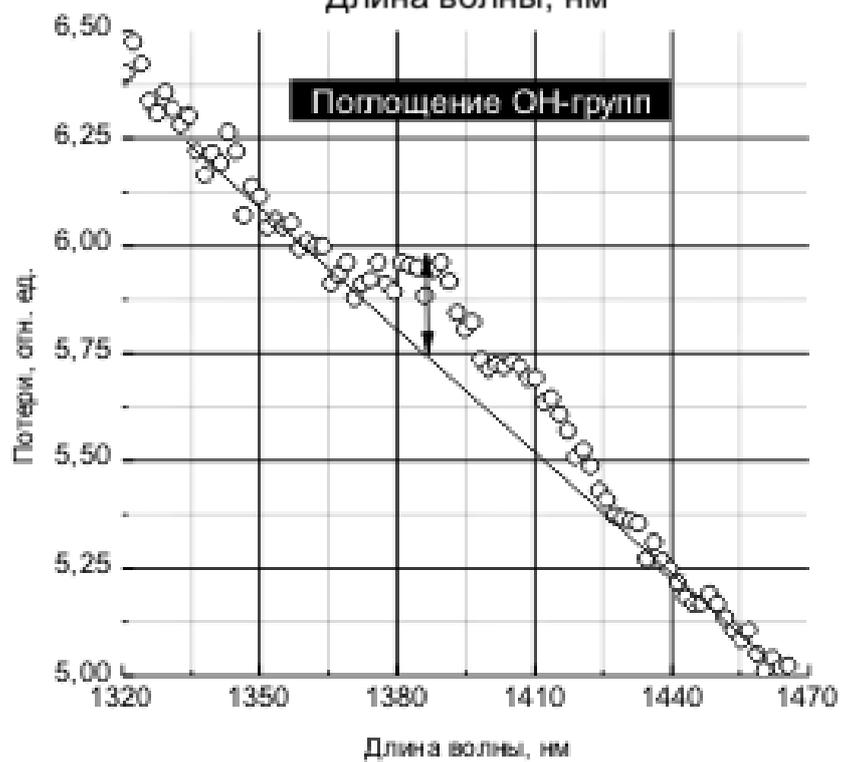
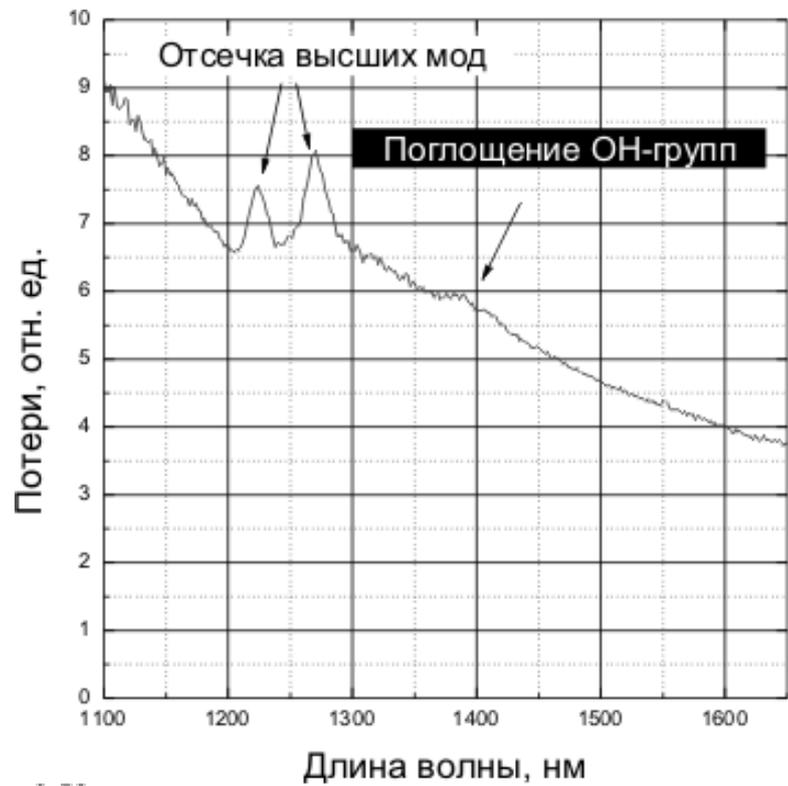


Рис. 3. Спектр оптических потерь в световоде. Концентрация GeO_2 в сердцевине световода составляет 28 мол.%.

Список рекомендуемой литературы:

Унгер Х.-Г., Планарные и волоконные оптические волноводы. – М., "Мир", 1980.

Мидвинтер Дж.Э., Волоконные световоды для передачи информации (под редакцией Е.М. Дианова). – М., "Радио и связь", 1983.

Агравал Г., Нелинейная волоконная оптика. – М., "Мир", 1995.

А. Снайдер, Дж. Лав, Теория оптических волноводов. – М., "Радио и связь", 1987.

Правила использования и техника безопасности задачи

Запрещается:

1. Трогать торец адаптера и касаться им различных поверхностей!!!
(Риск загрязнения и оцарапывания рабочих поверхностей.)
2. Дергать или изгибать световод с радиусом изгиба менее 5 см!!!
(Риск обрыва световода! В месте облома световода оптическое волокно не имеет полимерного покрытия. Оно легко ранит кожу и проникает вглубь кожных покровов. При этом волокно легко ломается. Оставшийся под кожей участок практически невозможно извлечь даже специалисту из-за того, что он прозрачен (т.е. не виден). В месте занозы остаются постоянные болевые ощущения.)
3. Оставлять адаптер и выходы/входы лазеров/приемников без защитных колпачков/крышек по окончании работы с ними.
(Риск загрязнения и оцарапывания рабочих поверхностей.)
4. Самостоятельно включать или выключать питание приборов, трогать какие-либо переключатели и ручки на генераторе импульсов за исключением имеющей маркировку "Длительность импульса"!!!
(Включение или выключение приборов в неправильной последовательности, подача слишком высокого напряжения на модуляционный вход лазера ведут к неисправному выходу приборов из строя.)
5. Смотреть непосредственно на торец световода или в выходное отверстие для оптического излучения у лазера во время его работы.
(Это вредно для зрения, хотя и мощность на выходе источника излучения достаточно мала.)
6. При повреждении световода запрещается брать в руки световод и прикасаться к сломанным участкам, а также к волоконно-оптическим кабелям, представленным на стенде.
(В месте облома световода оптическое волокно не имеет полимерного покрытия. Оно легко ранит кожу и проникает вглубь кожных покровов. При этом волокно легко ломается. Оставшийся под кожей участок практически невозможно извлечь даже специалисту из-за того, что он прозрачен (т.е. не виден). В месте занозы остаются постоянные болевые ощущения.)