

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО**

**Волоконно-оптические кабели связи
Методы измерения затухания в волоконных световодах**

Лабораторный практикум

Санкт-Петербург – 2018

УДК 535.3

Автор:

Д.В. Кизеветтер

Волоконно-оптические кабели связи. Методы измерения затухания в волоконных световодах. Лабораторный практикум. 2018. – 69 С.

Соответствует государственному образовательному стандарту подготовки бакалавров и предназначен для студентов ВУЗов очного и заочного форм обучения, а также открытого дистанционного обучения в рамках направления 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», изучающих дисциплину Б1.В.ДВ.10.01 «Волоконно-оптические кабели связи».

Пособие знакомит студентов с физическими основами возникновения затухания излучения и классификацией потерь в волоконных световодах, проблемами метрологического обеспечения измерений и методами измерения затухания, в том числе рекомендованными государственным стандартом (ГОСТ Р МЭК 793-1-93). Лабораторный практикум проводится на основных типах волоконных световодов – с кварцевой сердцевиной и оболочкой, полимерных оптических волокнах, флуоресцирующих полимерных и кварцевых волокнах, легированных ионами редкоземельных элементов. Используются различные методы измерения затухания как в прямых, так и в изогнутых волоконных световодах. Пособие содержит справочный материал по параметрам наиболее распространенных волоконных световодов.

Пособие может быть также полезно аспирантам, инженерам и научным работникам, работающим в области волоконной оптики и волоконно-оптических систем передачи данных.

Табл. 5. Ил. 16. Библиогр. 18.

Введение

Широкое применение волоконно-оптических кабелей связи (ВОКС) в технике требует введения технических стандартов, регламентирующих различные параметры таких кабелей. Функционально необходимым элементом ВОКС является оптическое волокно (ОВ), по которому распространяется оптическое излучение. Поэтому наиболее важными характеристиками являются характеристики самого оптического волокна, в частности, коэффициент затухания оптического излучения. Для технического описания элементов ВОКС, а также процесса распространения излучения, основополагающими являются термины, введенные в ГОСТ 25462-82 [1]. Согласно ГОСТ 25462-82, оптическое волокно, используемое для передачи оптического излучения, называют волоконным световодом (ВС). В [1] дано следующее определение для волоконного световода: «Направляющий канал для передачи оптического излучения, состоящий из сердцевины, окруженной отражающей оболочкой».

В ГОСТ 26814-86 [2] используется термин «Кабели оптические». Обычно термин «Волоконно-оптический кабель» подразумевает кабель на основе волоконных световодов, предназначенный для передачи оптических сигналов в линиях связи или волоконно-оптических датчиках. Для волоконно-оптических систем передачи данных (ВОСП) в ГОСТ 26599-85 [3] используется термин «оптический волновод ВОСП», который имеет следующее значение: «Направляющая среда, структура которой обеспечивает распространение оптического излучения вдоль нее». В ГОСТ 26599-85 термину «волоконный световод» дано определение в соответствии с ГОСТ 25462-82, а термину «оптическое волокно» – «Оптический волновод ВОСП, выполненный в виде нити из диэлектрических материалов с покрытием». В ГОСТ Р МЭК 793-1-93 используется термин «оптическое волокно».

1. Общие сведения о затухании излучения в волоконных световодах

При распространении оптического излучения по волоконным световодам (ВС) мощность излучения уменьшается вследствие его рассеяния и поглощения. Мерой, характеризующей уменьшение мощности p при распространении излучения, является затухание. В первом приближении изменение мощности оптического излучения, распространяющегося по ВС, можно описать дифференциальным уравнением:

$$\frac{dp}{dL} = -\alpha p, \quad (1.1)$$

решением которого является следующая функция:

$$p(L) = p_0 \exp(-\alpha L), \quad (1.2)$$

где $p(L)$ – зависимость мощности распространяющегося излучения от длины L , p_0 – мощность, вводимая в световод (т.е. $p(L=0)$), α – коэффициент затухания. Данная модель предполагает, что коэффициент затухания не зависит от мощности излучения p и длины L .

Так как величину p_0 измерить технически сложно, затухание можно определить, используя измерения выходной мощности при двух различных длинах световода L_1 и L_2 ($L_1 < L_2$):

$$\alpha = \frac{1}{L_2 - L_1} \ln\left(\frac{p(L_1)}{p(L_2)}\right) \quad (1.3)$$

В этом случае коэффициент затухания α имеет размерность обратных метров (м^{-1}), т.е. является параметром, характеризующим погонную (удельную) величину затухания. В технике принято измерять затухание в децибелах (дБ), а погонную величину – в децибелах на единицу длины. Затухание в

волоконных световодах измеряют в децибелах на километр (дБ/км). Согласно определению, затухание в дБ задается формулой:

$$\alpha_{dB} = 10 \lg\left(\frac{P_{ex}}{P_{вых}}\right), \text{ (дБ)} \quad (1.4)$$

где P_{ex} - мощность, вводимая в световод (для предыдущего случая $P_{ex} \equiv P_0$), $P_{вых}$ - мощность выходящего излучения (для предыдущего случая это $P(L_1)$ или $P(L_2)$). Погонная величина затухания $\alpha_{p,dB}$ в децибелах на единицу длины может быть рассчитана по формуле:

$$\alpha_{p,dB} = \alpha_{dB} / L. \quad (1.5)$$

В частности, можно задать $L = L_2 - L_1$. Тогда, выполнив преобразования, можно получить:

$$\alpha_{p,dB} = \frac{10}{\ln(10)} \alpha \quad (1.6)$$

или

$$\alpha_{p,dB} \approx 4.34 \alpha \quad (1.7)$$

То есть, отношение $\alpha_{p,dB} / \alpha$ в два раза меньше, чем 1 Нп/1 дБ (1 Непер равен 8,686 дБ). Это обусловлено тем, что в волоконной оптике коэффициент затухания α характеризует изменение мощности, а не напряжения или силы тока, как это принято при рассмотрении затухания в электрических кабелях.

2. Классификация типов потерь

Наиболее распространенная классификация потерь в волоконных световодах по типам представлена на рис. 2.1. Принято разделять потери на собственные и так называемые кабельные потери. Собственные потери – это потери в материале, из которого изготовлен волоконный световод. Кабельные потери обусловлены несовершенствами изготовления волоконного световода и воздействием на световод различных факторов в процессе эксплуатации. В свою очередь, собственные потери делятся на потери на поглощение и потери на рассеяние. В первом случае энергия оптического излучения переходит в тепловую энергию, соответственно, мощность распространяющегося излучения уменьшается. Во втором случае оптическое излучение прекращает распространяться в световоде в исходном направлении без преобразования в другой вид энергии, т.е. рассеивается.

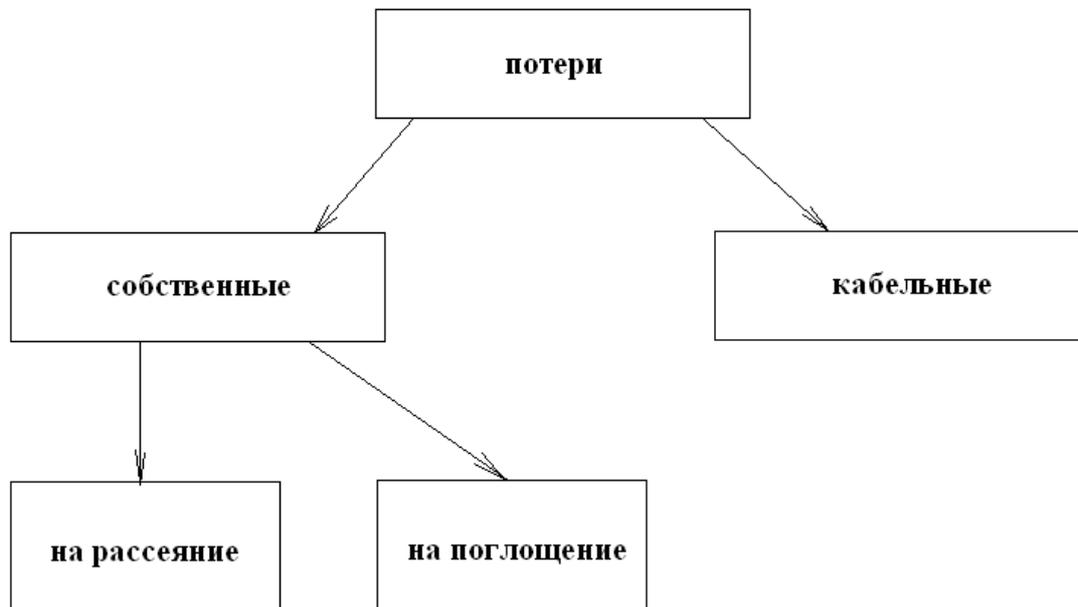


Рис. 2.1. Классификация потерь в волоконных световодах

В основном, рассеянное излучение выходит из световода через его боковую поверхность. Некоторая доля рассеянного излучения распространяется в обратном направлении, что также следует рассматривать как оптические потери при распространении.

Существует и иной подход к классификации потерь, создающих затухание излучения в световодах. Вначале разделяют потери на рассеяние и на поглощение, а затем из потерь на рассеяния выделяют собственные и кабельные потери. При таком подходе изменение поглощения в процессе эксплуатации оптического волокна рассматривается как изменение оптических свойств материала.

В связи с тем, что различные типы потерь обусловлены различными физическими явлениями, их можно полагать независимыми. Поэтому суммарный коэффициент затухания α можно представить в виде суммы:

$$\alpha = \alpha_p + \alpha_{\Pi} + \alpha_k \quad (2.1)$$

где α_p , α_{Π} , α_k – коэффициенты, обусловленные рассеянием, поглощением в материале и кабельными потерями соответственно.

Потери на поглощение подразделяют на:

1. инфракрасное поглощение ($\alpha_{ИК}$)
2. поглощение, обусловленное краем фундаментального электронного поглощения ($\alpha_{y\phi}$)
3. поглощение на примесях ($\alpha_{\Pi P}$)
4. поглощение, связанное с электропроводностью материала сердцевины ($\alpha_{эл}$)

Иногда термин «инфракрасное поглощение» (п. 1) заменяют термином «инфракрасный нагрев», а поглощение, обусловленное краем фундаментального электронного поглощения (п. 2), называют «собственным

ультрафиолетовым поглощением». Инфракрасное поглощение фактически является проявлением одного из эффектов диэлектрических потерь. Поглощение на примесях иногда называют избыточным поглощением. Поглощение, связанное с электропроводностью, для ВС, изготовленных из кварцевого стекла при комнатной температуре настолько мало по сравнению с другими видами поглощения (п. 1 – п. 3), что коэффициентом $\alpha_{эл}$ в большинстве случаев пренебрегают. Подробное рассмотрение механизма электропроводности плавленого кварца дано в материалах статьи [4]. Считается, что при рабочей температуре эксплуатации волоконно-оптических линий связи, электропроводность плавленого кварца обусловлена как ионным, так и электронным видом проводимости. В связи с высокой частотой электромагнитного излучения оптического диапазона длин волн, потери, обусловленные электропроводностью плавленого кварца, пренебрежимо малы по сравнению с другими видами потерь.

Коэффициент $\alpha_{л}$, аналогично (2.1), можно представить из трех слагаемых:

$$\alpha_{л} = \alpha_{пр} + \alpha_{ИК} + \alpha_{УФ} \quad (2.2)$$

Пример спектральной зависимости потерь [5–7] в волоконном световоде приведен на рис. 2.2. Величина оптических потерь на примесях зависит от концентрации и вида примеси. Многие виды примесей имеют явно выраженные локальные максимумы спектра поглощения, расположенные в рабочем диапазоне длин волн волоконно-оптических линий связи. Наиболее характерными потерями на примесях являются так называемые потери на гидроксильных группах или остатках воды, связанные с молекулярными резонансными явлениями. Наибольшее поглощение происходит в диапазоне 1,3 – 1,5 мкм. В материале оптических волокон могут содержаться и другие виды примесей, которые могут влиять на величину и спектр поглощения.

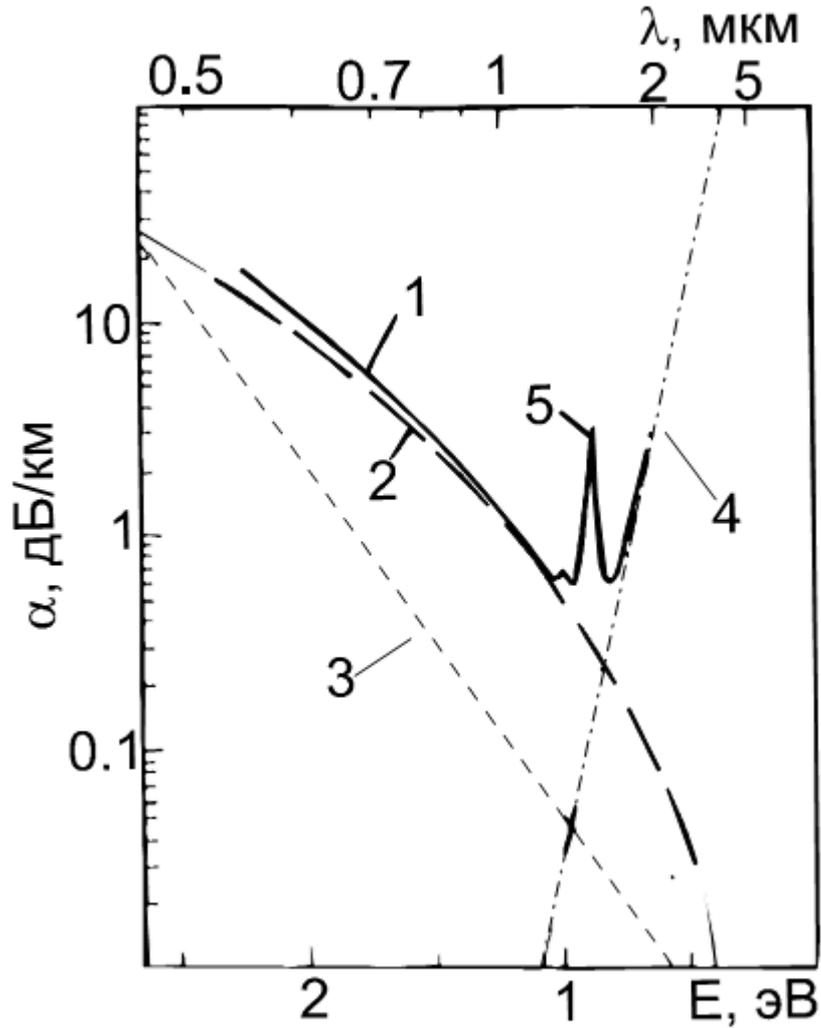


Рис. 2.2. Зависимость величины потерь от длины волны излучения и энергии кванта света [5-7]: 1 – суммарные потери, 2 – потери, обусловленные рэлеевским рассеянием, 3 – потери, обусловленные краем фундаментального электронного поглощения, 4 – потери на инфракрасный нагрев, 5 – потери на примесях

Инфракрасное поглощение (т.е. составляющая $\alpha_{ИК}$) обусловлено резонансами в инфракрасной части спектра за счет колебания атомов в кристаллической решетке, а также колебания частей молекул [6]. В кварцевом стекле величину $\alpha_{ИК}$ в дБ/км можно оценить, используя формулу:

$$\alpha_{ИК} = C \exp\left(-\frac{\rho}{\lambda}\right) \quad (\text{дБ}) \quad (2.3)$$

где C , ρ – константы для данного материала. В частности, для кварцевого стекла $\rho = (0.7...0.9) \cdot 10^{-6}$ м, $C \approx 0.9$; коэффициенты зависят, в том числе, от концентрации легирующей добавки. Край инфракрасной полосы поглощения также зависит от концентрации и вида легирующих добавок [5]. Теоретический вид зависимости $\alpha_{ИК}(\lambda)$ приведен на рис. 2.2. Из формулы (2.3) следует, что в рабочем диапазоне длин волн при увеличении длины волны возрастают потери, связанные с инфракрасным нагревом.

Электропроводность материала сердцевины ВС обусловлена ионной электропроводностью и возникновением свободных электронов. При увеличении температуры экспоненциально возрастают потери, связанные с электропроводностью. В некоторых видах волоконных световодов при температуре 500° - 1000° этот вид потерь может быть доминирующим. При большой мощности распространяющегося излучения возможно даже возникновение температурной неустойчивости с последующим разрушением оптического волокна по всей длине.

Рассеяние излучения в качественных волоконных световодах обусловлено рассеянием на микроскопических неоднородностях показателя преломления, размеры которых существенно меньше длины волны излучения. Такое рассеяние называется рэлеевским. В стеклянных световодах доминирующую роль играют микроскопические неоднородности, возникшие при застывании расплава стекла. При изготовлении волоконных световодов это происходит в процессе вытяжки волокна. Однако указанный вид потерь относится к собственным потерям, так как независимо от того, производилась вытяжка световода или нет, при застывании материала всегда будут иметь место флуктуации показателя преломления, соответствующие температуре застывания. Технология производства световодов и используемые материалы могут быть различными, но рассеяние на

флуктуациях показателя преломления в большей или меньшей степени существует всегда.

Существуют приближенные формулы для расчета коэффициента затухания, связанного с рэлеевским рассеянием (α_{pp}). Важно, что коэффициент затухания α_{pp} пропорционален обратной величине длины волны в четвертой степени:

$$\alpha_{pp} \propto \frac{1}{\lambda^4} \quad (2.4)$$

Одна из приближенных формул для расчета α_{pp} в дБ/км имеет вид [8]:

$$\alpha_{pp} = 4.34 \frac{8\pi^3 (n_1^2 - 1)}{3\lambda^4} k \hat{\beta} T_g \cdot 10^3, \quad (2.5)$$

где k – постоянная Больцмана ($1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К), T_g – температура стеклования (приблизительно соответствует температуре застывания стекла при вытяжке – $T_g \approx 1500$ К), $\hat{\beta}$ – коэффициент сжимаемости (для кварца $\hat{\beta} = 8.1 \cdot 10^{-11}$ м²/Н), n_1 – показатель преломления материала сердцевины световода, коэффициент $4.34 \cdot 10^3$ связан с переходом от единиц измерения α_{pp} в м⁻¹ к дБ/км. В некоторой литературе температуру T_g , входящую в формулу 2.5, называют фиктивной температурой (застывания). Теоретическая зависимость $\alpha_{pp}(\lambda)$ приведена на рис. 2.2.

Величина рэлеевского рассеяния зависит также от концентрации легирующей добавки [5, 7, 9]. В двухкомпонентных и многокомпонентных стеклах к флуктуациям плотности, создающим рэлеевское рассеяние с коэффициентом затухания α_{pp} , рассмотренным выше, добавляются флуктуации плотности состава стекла. В частности, для бинарного стекла $x\text{GeO}_2 - (1-x)\text{SiO}_2$ (где $0 < x < 1$) имеют место дополнительные потери (α_{p0}), описываемые выражением [7]:

$$\alpha_{p\partial} = 3,3 \cdot x(1-x)/\lambda^4, \text{ (дБ/км)} \quad (2.6)$$

где λ – длина волны в микрометрах.

Полезные формулы для приблизительного расчета затухания в волоконных световодах приводятся в учебном пособии [8]. Наименьшие суммарные потери оптического излучения при распространении по стандартному кварцевому волоконному световоду достигаются на длине волны 1,55 мкм ($\lambda_{a,\min}$). Однако в зависимости от типа и концентрации легирующей добавки, длина волны $\lambda_{a,\min}$ может находиться в пределах от 1,4 мкм до 1,6 мкм.

К кабельным потерям относят потери, обусловленные несовершенствами световода, возникающими в процессе производства или эксплуатации. В частности, к кабельным потерям приводят микроизгибы и макроизгибы оптического волокна. Под термином «макроизгибы» понимают изгибы, радиус которых существенно больше диаметра оболочки волокна. Микроизгибы – изгибы, при которых радиус изгиба сопоставим с радиусом оболочки. К макроизгибам относятся также все макроскопические отклонения оси оптического волокна от прямой. Они возникают:

1. из-за изгиба кабеля при его намотке на кабельный барабан на заводе-изготовителе
2. при прокладке и монтаже кабеля

Потери указанного вида обобщенно называют «изгибными потерями». В одномодовых волоконных световодах при увеличении длины волны излучения изгибные потери возрастают вследствие увеличения диаметра модового поля.

При вытяжке волоконного световода всегда имеют место флуктуации диаметра сердцевин, а также отклонения формы сечения сердцевин от круглой. В материале сердцевин могут возникать оптические

неоднородности с размерами, соизмеримыми с длиной волны излучения, и даже существенно больше нее. Особенно сильно данный эффект проявляет себя при высокой концентрации легирующей добавки. При сжатии, растяжении или деформации оптического волокна в материале сердцевины возникают внутренние механические напряжения, приводящие к локальному изменению показателя преломления. Этот эффект наиболее сильно влияет на поляризационно-модовую дисперсию, но может привести и к дополнительному рассеянию излучения. Указанные типы несовершенств волоконных световодов также приводят к дополнительным потерям на рассеяние. Данный тип кабельных потерь классифицируют как избыточное рассеяние. Дополнительные потери в волоконно-оптических световодах возникают также в результате старения под действием проникающей влаги и других веществ и изменения химического состава сердцевины. Наиболее сильно подвержены старению при повышенной температуре и влажности полимерные ВС.

Разделить потери, обусловленные изгибами различного типа, и потери, вызванные макроскопическими неоднородностями показателя преломления, несовершенствами формы сердцевины, внутренними механическими напряжениями в сердцевине, практически невозможно. Поэтому обычно экспериментально оценивают только суммарную величину кабельных потерь.

С точки зрения лучевой теории при рассеянии на макроскопических дефектах происходит постепенное расширение диапазона углов γ_p распространяющегося излучения в световоде. С точки зрения электромагнитной теории, т.е. модовой, при распространении излучения по ВС с макроскопическими неоднородностями происходит расширения спектра возбужденных волноводных мод. При распространении по световоду, в конце концов, углы γ_p достигают апертурного угла γ_c и при

дальнейшем распространении лучи «выходят» из световода. Это приводит к потерям на рассеяние. При описании указанного эффекта с помощью модовой теории, «выход» луча из ВС соответствует передаче энергии направляемыми модами сердцевины модам оболочки.

Рассматриваемое явление аналогично процессу диффузии, но происходит в пространстве углов. Поэтому физическая модель, описывающая рассеяние на макроскопических неоднородностях, называется диффузионной моделью, а расчеты с ее использованием – диффузионным приближением. Взаимную передачу энергии от одной группы мод к другой называют связью мод. Когда модовый состав расширяется настолько, что при дальнейшем распространении не изменяется, такое модовое распределение называют стационарным. Расстояние, на котором возникает стационарное модовое распределение L_s , называют длиной установления стационарного модового распределения. Такое распределение представляет интерес для стандартизации измерений параметров многомодовых световодов, а также необходимо при расчете межмодовой дисперсии в многомодовых волоконных световодах. В некоторых волоконных световодах, независимо от их длины, стационарное модовое распределение не устанавливается.

Величину суммарных потерь в заданном диапазоне длин волн (обычно – в рабочем диапазоне 1,3 – 1,55 мкм) указывают в спецификации на оптическое волокно. Типичное значение полных потерь для волоконных световодов хорошего качества для $\lambda=1,3$ мкм – 0,3 – 0,4 дБ/км, для $\lambda=1,55$ мкм – 0,2 – 0,3 дБ/км. Примеры параметров некоторых промышленно выпускаемых волокон приведены в таблицах 6.1, 6.2.

3. Проблемы метрологического обеспечения измерений коэффициента затухания

Для стандартизации измерений параметров волоконных световодов, в частности, коэффициента затухания излучения, существует государственный стандарт РФ [10] (ГОСТ Р МЭК 793-1-93). Аналогичные стандарты проведения измерений существуют в других странах (например, ISO-IEC-14763-3). Полезные сведения о методах измерения параметров ВС приводятся, в частности, в учебных пособиях [8, 9]. Для понимания принципиальных проблем измерения коэффициента затухания необходимо рассмотреть физические процессы распространения излучения по ВС более подробно.

При вводе излучения от источника в одномодовый волоконный световод энергия передается как основной волноводной моде, так и частично модам оболочки. Моды оболочки ВС имеют значительно больший коэффициент затухания, чем основная мода. Если при проведении измерений на выходном конце световода доля мощности мод оболочки будет сопоставима с мощностью основной моды, результат измерений коэффициента затухания окажется завышенным. То есть реальное значение коэффициента затухания основной моды будет меньше измеренной величины. Поэтому при проведении измерений необходимо принять меры для подавления мод оболочки.

При измерении коэффициента затухания излучения в многомодовых волоконных световодах наличие мод оболочки также может повлиять на точность измерений. Кроме того, в многомодовых волоконных различные моды имеют различную величину коэффициента затухания. Этот эффект называется дифференциальным модовым затуханием. Как правило, чем выше порядок моды или больше главное модовое число, тем больше коэффициент затухания. Причиной дифференциального модового затухания является,

прежде всего, наличие кабельных потерь, зависящих от типа моды. Так как модовый состав вводимого в ВС излучения зависит от условий ввода, результат измерения затухания также будет зависеть от условий ввода. Для снижения влияния данного эффекта на точность измерений либо используют специальные волоконно-оптические устройства, создающие равновесное модовое распределение, либо производят измерение при некоторых стандартных условиях ввода излучения. Параметры таких устройств и методика их использования приведены в действующем стандарте (ГОСТ Р МЭК 793-1-93) [10], краткое содержание которого представлено ниже.

4. Методы измерения затухания по ГОСТ Р МЭК 793-1-93

В ГОСТ Р МЭК 793-1-93 [10] введено следующее определение: «Затухание $A(\lambda)$ на длине волны λ между двумя плоскостями поперечного сечения 1 и 2, расстояние между которыми равно L , определяется следующим образом:

$$A(\lambda) = \left| 10 \lg \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \right| \text{ (дБ)}$$

где P_1 – оптическая мощность, проходящая через поперечное сечение 1, P_2 – оптическая мощность, проходящая через поперечное сечение 2.

Для однородного волокна в состоянии равновесия можно определить затухание на единицу длины, или коэффициент затухания:

$$a(\lambda) = \frac{A(\lambda)}{L} \text{ (дБ} \cdot \text{(ед. длины)}^{-1}\text{)}$$

который не зависит от выбранной длины волокна».

Согласно стандарту (ГОСТ Р МЭК 793-1-93), допустимы три метода измерений затухания:

1. Метод обрыва
2. Метод вносимых потерь
3. Метод обратного рассеяния

В литературе иногда используют и иные термины для обозначения данных методов, в частности: «метод укорачивания» (п. 1) и «рефлектометрический метод измерения потерь» (п. 3).

Далее приведем краткое описание методов из ГОСТ Р МЭК 793-1-93.

1. Метод обрыва. Этот метод применяется непосредственно для определения затухания, причем уровни мощности P_1 и P_2 измеряются в двух точках волокон без изменения условий ввода. P_2 является мощностью, излучаемой в конце световода, а P_1 – мощность, излучаемая у ввода в точке среза волокна. Принцип измерения не позволяет получить информацию о распределении затухания вдоль волокна. Трудно также измерить изменения затухания под действием различных условий. Но в определенных условиях этот метод обеспечивает наиболее точное измерение затухания, строго отвечающее его определению. В некоторых случаях разрушающий характер этого метода делает его неприемлемым.
2. Метод вносимых потерь. Этот метод в принципе аналогичен методу обрыва, но P_1 является мощностью, излучаемой на выходе системы ввода. Измеренное значение затухания испытываемого волокна, включающее влияние измерительной аппаратуры, должно быть скорректировано по дополнительным потерям в соединении, соответствующим потерям на эталонной длине волокна. Этот метод также не позволяет анализировать затухание по длине волокна, но по предварительно известной мощности P_1 возможно непрерывно измерять изменение затухания в зависимости от изменений условий окружающей среды, таких как температура или прикладываемая нагрузка. Этот метод применим также для измерений на кабелях, имеющих соединители.
3. Метод обратного рассеяния. Методом обратного рассеяния измеряется оптическая мощность, которая рассеивается в обратном направлении к началу волокна из различных его точек. Измерение проводится с одной стороны. На измерение влияют скорость распространения света в волокне и его поведение в режиме обратного рассеяния. Если эти два

параметра являются постоянными, что обычно наблюдается для отдельных длин волокон, то результат измерения затухания может быть достаточно точным, если соблюдаются установленные условия ввода. Измерение позволяет анализировать затухание вдоль всего волокна или на отдельных отрезках, а также на линиях, образованных соединенными волокнами, и определять затухание соединений. В некоторых случаях следует проводить измерение с обоих концов, чтобы исключить эффекты обратного рассеяния, зависящего от направления распространения. Кроме того, этим методом может быть измерена длина волокна.

5. Метод обрыва по ГОСТ Р МЭК 793-1-93

5.1. Условия ввода. Условия ввода являются определяющими для достижения целей, указанных в п. 29 ГОСТ Р МЭК 793-1-93. Условия ввода должны быть такими, чтобы избежать ввода мощности в переходные моды высшего порядка. При отсутствии ввода в эти переходные моды испытываемого волокна будут измерены затухания отдельных участков, суммирующиеся практически линейным образом.

Поскольку эти распределения мощности существенно не изменяются волокном, они называются распределениями в установившемся состоянии.

5.1.1. Методы ввода. Существуют два обычных метода для обеспечения условий ввода в установившемся состоянии для измерения затухания: фильтры мод и ввод с помощью систем геометрической оптики. Примеры каждого метода приведены ниже (п. 32.2 ГОСТ Р МЭК 793-1-93). При соответствующем применении этих методов могут быть получены сравнимые результаты. Типовой пример схемы ввода, использующей фильтр мод, приведен на рис. 5.1.

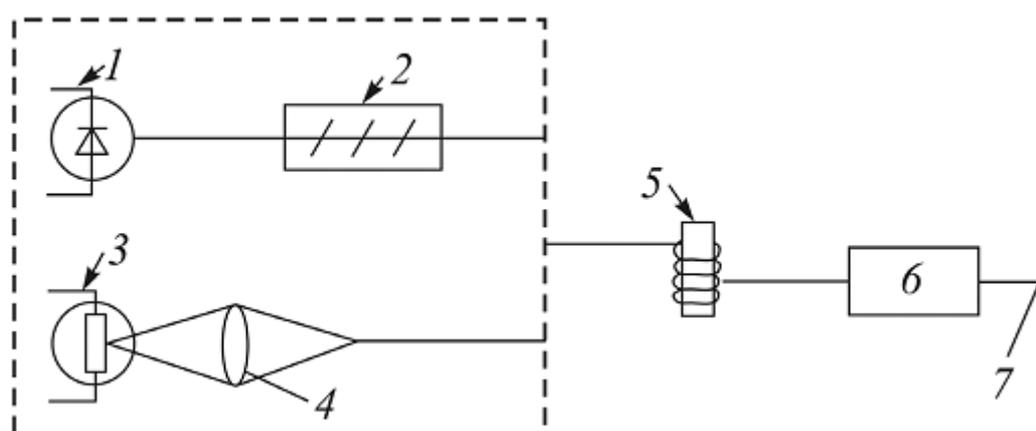


Рис. 5.1. Типовая схема измерений, использующая фильтр мод [10]: 1 – светодиод или лазер, 2 – смеситель мод, 3 – лампа накаливания, 4 – линза, 5 – фильтр мод, 6 – устройство выделения мод оболочки, 7 – ввод

5.1.2. Вывод мод оболочки. Вывод мод оболочки обеспечивает то, что ни одна из мод излучения, распространяющаяся в зоне оболочки, не может быть обнаружена после короткого расстояния по длине волокна. Часто для вывода мод оболочки применяется материал, показатель преломления которого равен или более показателя преломления оболочки волокна. Это может быть достигнуто применением жидкости для согласования показателей преломления на отрезке волокна, с которого снята оболочка, вблизи его концов; само покрытие волокна также может обеспечивать вывод мод оболочки.

5.1.3. Смеситель мод. Мощность, вводимая до фильтра мод, должна представлять существенно однородное распределение. При таком источнике как светодиод или лазер, не удовлетворяющем этому условию, необходимо использовать смеситель мод. Он должен иметь соответствующее устройство из волокна (например, цепочку профилей показателей преломления: ступенчатый – градиентный – ступенчатый).

5.2. Примеры условий ввода.

5.2.1. Фильтр мод.

5.2.1.1. Фильтр мод в виде иницирующего волокна. Волокно выбирается того же типа, что и испытываемое волокно. Его длина должна быть достаточной (обычно равной или более 1 км), чтобы распределение мощности, передаваемой по этому волокну, было стабильным при применении соответствующего источника ввода, соответствующее требованиям п. 32.1.3 ГОСТ [10].

5.2.1.2. Фильтр мод в виде намотанного на стержень волокна. Другой тип фильтра мод представляет собой стержень с несколькими витками (обычно 3–5 витков) испытываемого волокна, намотанными со слабым натяжением. Диаметр стержня выбирается таким, чтобы обеспечить затухание

переходных мод, возбуждаемых в испытываемом волокне, до достижения устойчивого состояния.

Измерение в поле дальней зоны должно проводиться для сравнения распределения мощности, излучаемой на выходе испытываемого волокна большой длины (более 1 км), когда она возбуждается источником, обеспечивающим однородное насыщение, с распределением мощности, излучаемой на выходе волокна короткой длины, намотанного на стержень. Диаметр стержня выбирается таким, чтобы получить распределение в поле дальней зоны на короткой длине, приблизительно соответствующее распределению в поле дальней зоны на большой длине волокна. Числовая апертура (измеряемая в соответствии с методом С6 ГОСТ) диаграммы излучения на конце короткой длины должна находиться в диапазоне 94–100% числовой апертуры диаграммы, соответствующей большой длине.

Диаметр стержня может быть различным в зависимости от типа волокна и покрытия. Обычно диаметр стержня составляет 15–40 мм с пятью витками волокна, при длине стержня около 20 мм.

5.2.1.3. Сочетание смесителя и фильтра мод. Сочетание функций смесителя и фильтра мод может быть реализовано с помощью устройства, содержащего определенное число металлических шариков (размером 1–5 мм), расположенных произвольно, но с выровненной общей поверхностью. Волокно такого же типа, что и испытываемое, кладется на эту поверхность шариков и прижимается сверху на длине около 0,5 м. Регулированием силы нажима можно обеспечить регулирование распределения мощности, излучаемой на конце волокна короткой длины, что идентично тому, что описано в п. 32.2.1.2 ГОСТ [10].

5.2.2. Ввод с помощью системы геометрической оптики. Ввод с пространственным ограничением (ПО) определяется как ввод, производимый

геометрической оптикой, заполняющий одинаково 70 % диаметра сердечника и 70% числовой апертуры испытываемого волокна. Это максимальное геометрическое распределение мощности, которое не вводит мощность в быстро затухающие моды. Так, в случае многомодового градиентного волокна 50/125 мкм с числовой апертурой 0,2, условия ввода ПО соответствуют диаметру однородного пятна 35 мкм и числовой апертуре 0,14.

На рис. 5.2 приведен пример оптической схемы, используемой для ввода ПО. Следует обеспечить совпадение оси вводимого пучка с осью волокна, при этом пятно и конус падающего света должны быть сцентрированы с сердечником волокна. Кроме того, оптическая система ввода должна быть рассчитана на используемые длины волн для обеспечения правильного измерения.

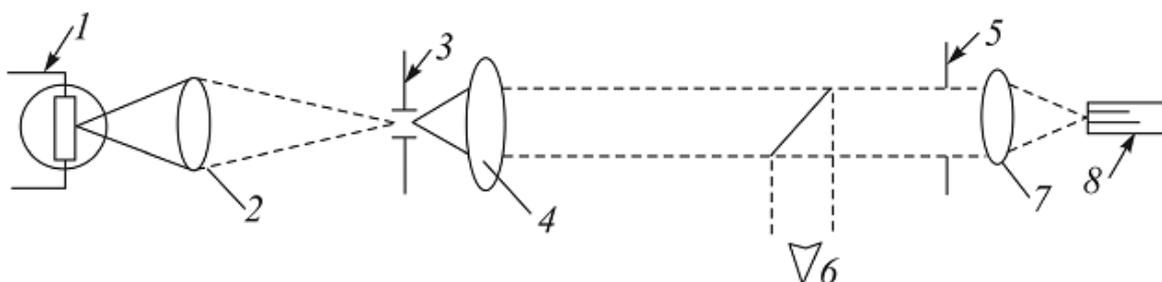


Рис. 5.2. Аппаратура для измерения спектрального затухания [10]: 1 – лампа накаливания, 2 – промежуточная линза, 3 – апертура, определяющая пятно, 4 – линза, 5 – апертура, определяющая числовую апертуру, 6 – инфракрасный визир, 7 – линза, 8 – ввод

5.3. Аппаратура. Измерения могут проводиться на одной или нескольких длинах волн. В качестве варианта может потребоваться спектральная кривая затухания для всего диапазона длин волн. На рис. 5.2 в качестве примера представлена схема монтажа испытательной аппаратуры. Обозначение элементов аппаратуры на рис. 5.2 дано из ГОСТ [10].

Оптический источник. Выбор оптического источника (лампа, лазер или светоизлучающий диод) зависит от типа измерения. Источник должен быть устойчивым по положению, интенсивности и длине волны в течение достаточно длительного периода, во время которого проводится измерение. Ширина спектральной линии (между точками при 50% оптической интенсивности используемого источника) должна быть определена таким образом, чтобы она была узкой по отношению к любой характеристике спектрального затухания волокна. Это волокно должно быть ориентировано по конусу ввода или соединено коаксиально с волокном ввода.

Аппаратура оптического детектирования. Должна использоваться большая детектирующая поверхность, чтобы захватывать любое излучение конуса или конусов на выходе. Если приемное устройство уже имеет приемный вывод, то он должен иметь диаметр сердечника и числовую апертуру, достаточные для поглощения всего света, выходящего из эталонного и испытываемого волокон. Спектральная чувствительность должна быть совместимой со спектральными характеристиками источника. Детектирование должно быть однородным и иметь линейные характеристики.

Обработка сигнала. Как правило, источник света модулирует с целью улучшения соотношения сигнала (шум при приеме). Если принимается такой метод, то детектор должен быть соединен с системой обработки сигнала, синхронизированной с модулирующей частотой источника. При этом необходимо, чтобы система обнаружения была практически линейной или имела известные характеристики.

Устройство выделения мод оболочки. Для подавления оптической мощности, распространяющейся в оболочке, должна использоваться соответствующая техника, если это оказывает заметное влияние на принимаемый сигнал.

5.4. Проведение измерений. Испытываемое волокно монтируют на измерительном устройстве, выходную мощность P_2 фиксируют.

Поскольку условия ввода сохраняются постоянными, волокно обрезают на требуемой длине (например, в двух метрах от точки ввода). Фиксируют выходную мощность P_1 для длины обрезанного волокна.

Затухание волокна между точками, в которых измерены P_1 и P_2 , может быть вычислено по известным P_1 и P_2 .

5.5. Результаты.

5.5.1. В документации должны фиксироваться следующие данные:

дата испытания

наименование испытания

идентификация волокна

длина образца

спектральное затухание, дБ, или линейное затухание дБ/км, в зависимости от длины волны или одной или нескольких заданных длин волн, в соответствии с установленным в технических условиях

5.5.2. По запросу должны предоставляться следующие данные:

тип источника

спектральная ширина источника

методика ввода

схема измерений

относительная влажность воздуха и температура окружающей среды

6. Типичные характеристики кварцевых оптических волокон

Типичные характеристики высококачественных оптических волокон фирмы Fujikura: одномодового (по стандарту G.652.B МСЭ-Т, марка “FutureGuide-SM”) приведены в таблице 6.1; многомодового (по стандарту G.651 МСЭ-Т, марка “FutureGuide-MM10G”) – в таблице 6.2.

Таблица 6.1.

Параметры	Ед изм	значение
Диаметр модового пятна на длине волны 1310 нм	мкм	9.2±0.4
Диаметр модового пятна на длине волны 1550 нм	мкм	10.4±0.8
Затухание на длине волны 1310 нм	дБ/км	0.35
Затухание на длине волны 1550 нм	дБ/км	0.21
Затухание на длине волны 1625 нм	дБ/км	0.23
Длина волны отсечки	нм	1260
Хроматическая дисперсия в диапазоне длин волн 1285-1330 нм	пс/(нм*км)	3.5
Хроматическая дисперсия на длине волны 1550 нм	пс/(нм*км)	18
Наклон кривой в точке нулевой дисперсии	пс/(нм*нм*км)	0.092
Длина волны нулевой дисперсии	нм	1300-1324
Поляризационно-модовая дисперсия	пс/км	0.2
Максимальное относительное удлинение	%	1.0

Таблица 6.2.

Параметры	Ед изм	FutureGuide-MM10G
Диаметр сердцевины	мкм	50±2.5
Числовая апертура		0.200±0.015
Затухание на длине волны 850 нм	дБ/км	2.5
Затухание на длине волны 1310 нм	дБ/км	0.7
Макс относительное удлинение	%	1

7. Работа №1

Измерение затухания в кварцевых волоконных световодах

Цель работы: ознакомление с физическими процессами в кварцевых волоконных световодах, приводящих к оптическим потерям при распространении излучения, приобретение опыта работы с волоконно-оптическими кабелями и волоконно-оптическими компонентами.

Программа измерений предусматривает измерение затухания одномодового волоконно-оптического кабеля на трех длинах волн.

7.1. Измерение затухания методом вносимых потерь по ГОСТ

Метод вносимых потерь предусмотрен государственным стандартом [10] (ГОСТ Р МЭК 793-1-93) как альтернативный метод измерения затухания. В этом методе условия ввода излучения в испытуемое оптическое волокно аналогичны условиям, описанным выше. Условия ввода в эталонное и испытываемое волокно должны быть одинаковыми. Измерения могут проводиться на одной или нескольких длинах волн; в качестве варианта спектральный отклик может быть рекомендован по всему диапазону длин волн. Схемы монтажа испытательной аппаратуры представлены в качестве примера на рис. 7.1 (калибровка) и 7.2 (измерение).

Метод вносимых потерь требует применения очень точного устройства соединения волокна с волокном, чтобы свести до минимума потери, вносимые соединением, и обеспечить надежные результаты.

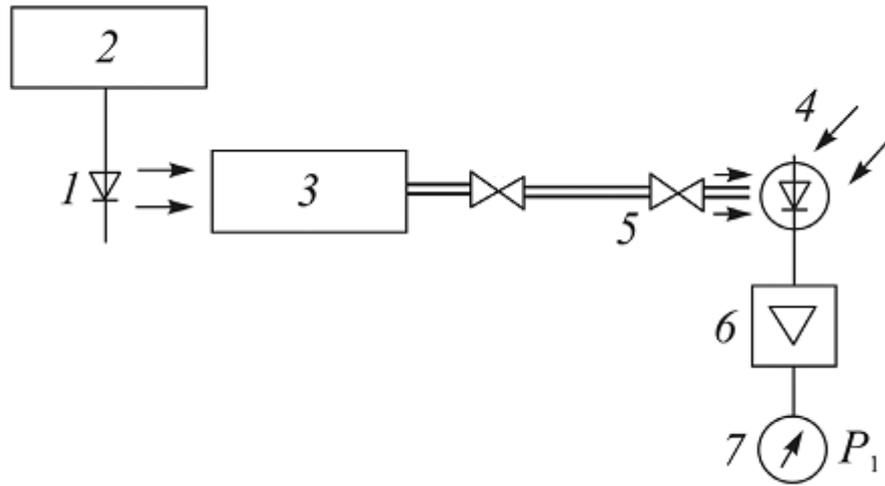


Рис.7.1. Калибровка при измерении вносимых потерь: 1 – светоизлучающий источник, 2 – цепь питания, 3 – система ввода, 4 – детектор с дополнительным подводящим волокном, 5 – эталонное волокно с волоконно-оптическими соединителями, 6 – усилитель, 7 – измеритель уровня

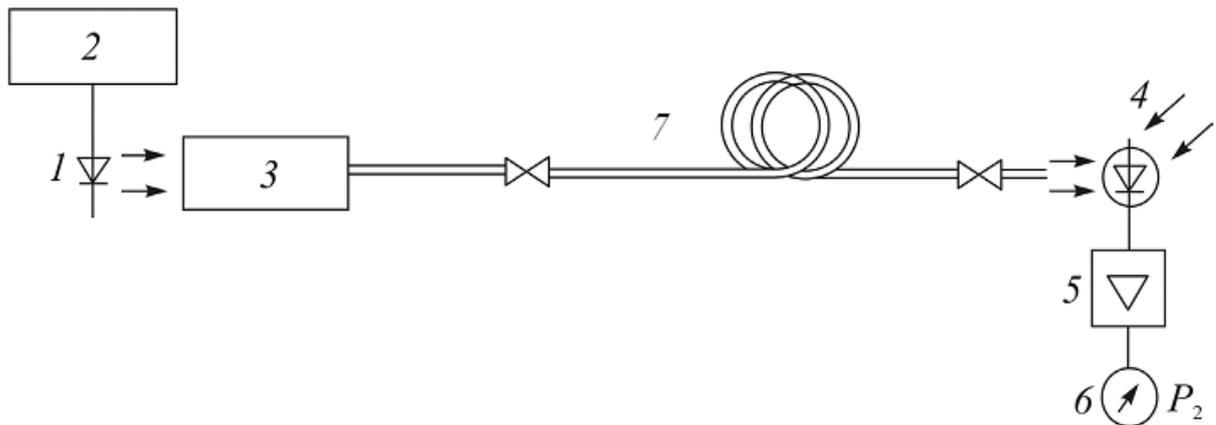


Рис. 7.2. Измерение вносимых потерь: 1 – светоизлучающий источник; 2 – цепь питания; 3 – система ввода; 4 – детектор с дополнительным подводящим волокном; 5 – усилитель; 6 – измеритель уровня, 7 – исследуемое оптическое волокно

Это соединительное устройство может быть в виде механической подвижной системы, контролируемой визуально, или в виде соединителя с

регулированием положения «сердечник–сердечник». Эталонное волокно может быть того же типа, что и испытываемое.

При проведении измерений измерительное устройство калибруют для получения эталонного уровня на входе P_1 . Для начальной калибровки используют тот же тип волокна, что и эталонное волокно. Длина эталонного волокна должна быть незначительной (например, 2 м), чтобы можно было пренебречь его затуханием. Испытываемое волокно соединяют с измерительным устройством, и соединение регулируют с целью получения максимального уровня на оптическом детекторе. Мощность на выходе P_2 фиксируют. Затухание испытываемого волокна (дБ) вычисляют по формуле (1.4).

Если затуханием эталонного волокна нельзя пренебречь, его следует прибавить к вычисленному значению. В результате испытаний фиксируют спектральное затухание, дБ, или линейное затухание, дБ/км, в зависимости от длины волны или одной или нескольких заданных длин волн, в соответствии с установленным в технических условиях.

7.2. Схема лабораторной установки и методика измерений.

Структурная схема лабораторной установки для измерения затухания в оптических волокнах приведена на рис. 7.3. В качестве источника излучения используются полупроводниковые лазеры 1 (ППЛ) с различной длиной волны λ сопряженные с волоконными световодами. Электропитание лазеров осуществляется через блоки питания 2 (БП). К выходу выбранного источника излучения подключен волоконно-оптический шнур 3 длиной 1-2 м, соединяющий источник излучения с аттенюатором 4. Аттенюатор уменьшает мощность излучения до величины, которую можно измерить используемым фотоприемником 6 (ФП). Между выходом аттенюатора 4 и входом

фотоприемника 6 поочередно подключают два отрезка исследуемого волоконного световода длиной L_1 и L_2 . Фототок, пропорциональный мощности падающего излучения, протекая по нагрузочному сопротивлению 7, создает падение напряжения $U_{\text{вых}}$, регистрируемое вольтметром 8.

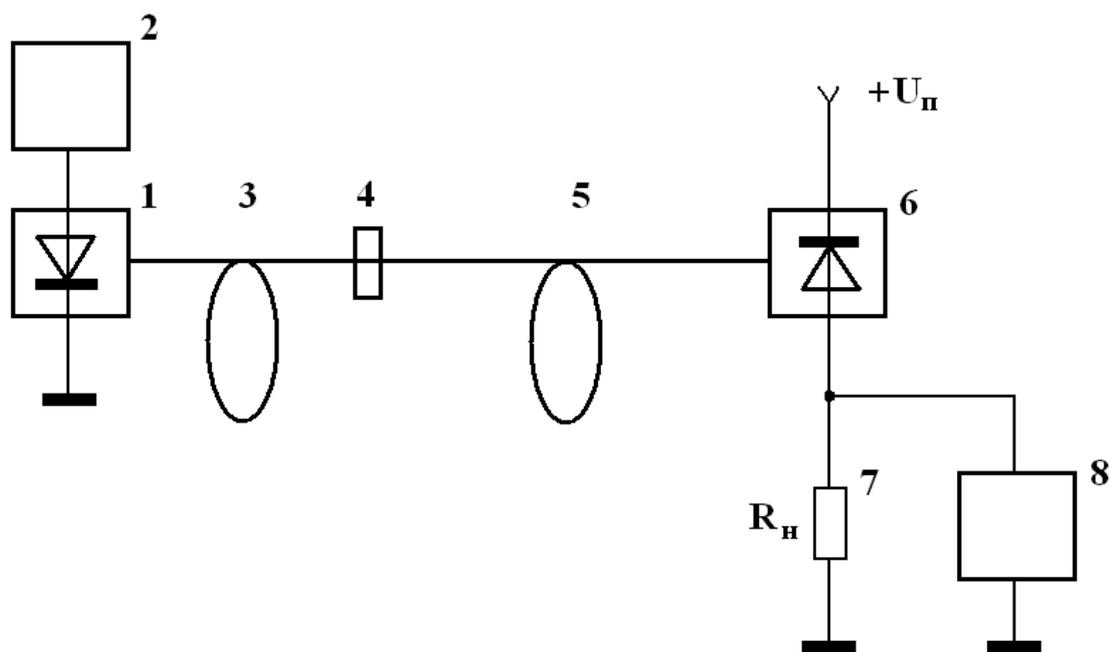


Рис. 7.3. Структурная схема лабораторной установки: 1 – полупроводниковый лазер, 2 – источник питания, 3 – волоконно-оптический выход лазера, 4 – аттенюатор (или соединитель), 5 – исследуемый волоконный световод, 6 – фотодиод, 7 – нагрузочный резистор, 8 – вольтметр

7.4. Вопросы для подготовки к работе

1. Какой доминирующий механизм потерь в высококачественном кварцевом оптическом волокне при длинах волн излучения $0,7 \dots 1,3$ мкм?

2. Какой доминирующий механизм потерь в высококачественном кварцевом оптическом волокне при длинах волн излучения более 1,6 мкм?
3. Как влияет поглощение на наиболее распространенных примесях на спектральную зависимость коэффициента затухания?
4. Какие факторы влияют на погрешность измерения затухания?

7.5. Порядок выполнения работы

Ознакомиться со структурной схемой измерений. Подключить шнур электропитания к лабораторной установке. Подождать 10-15 минут для установления стационарного теплового режима работы установки. Подключить вольтметр к выходному электрическому соединителю фотоприемника. Измерить фоновое значение напряжение, обусловленное токами утечки фотоприемника. Используя соединительные волоконно-оптические шнуры, подключить один конец короткого отрезка волоконного световода (длина 15 м) к входному соединителю фотоприемника (ФП), а другой конец – к выходному соединителю одного из источников излучения (например, ППЛ1 с длиной волны излучения 1,55 мкм). Измерить выходное напряжение на выходе фотоприемного устройства. Если выходное напряжение превышает величину 250 мВ, т.е. нарушено необходимое условие линейности измерительного тракта, то необходимо ослабить мощность оптического излучения, установив между выходом излучателя и исследуемым световодом аттенюатор. В этом случае величина выходного напряжения измеряется повторно. Далее вместо короткого отрезка световода подключить длинный отрезок (длина 1000 м). Также произвести измерения выходного напряжения. Далее, аналогично, выполнить измерения с использованием двух других источников излучения, имеющих другие длины

волн (например, 1,3 мкм и 0,85 мкм). Рассчитать коэффициент затухания излучения в исследуемом кабеле на трех длинах волн в децибелах (дБ/км).

7.4. Оформление отчета

Отчет должен содержать:

1. Цель работы
2. Структурную схему лабораторной установки
3. Паспортные характеристики исследованного волоконного световода, аттенюатора, длины волн излучения лазеров
4. Таблицу, содержащую результаты измерений и вычислений коэффициентов затухания излучения на трех длинах волн в децибелах (дБ/км)
5. Объяснение полученных результатов.

8. Работа №2

Измерение затухания в пластиковых оптических кабелях

Цель работы: ознакомление с конструкцией и характеристиками пластиковых оптических кабелей (ПОК), приобретение опыта работы с источниками излучения и соединителями, используемыми совместно с ПОК.

Программа измерений предусматривает измерение затухания пластикового волоконно-оптического кабеля на трех длинах волн.

8.1. Общие сведения о полимерных оптических волокнах

В настоящее время в технике все чаще используются волоконные световоды, сердцевина и оболочка которых изготавливается из полимерных материалов. Такие световоды называют полимерными или пластиковыми. Наиболее распространенное название – полимерное оптическое волокно (ПОВ). В англоязычной литературе используется аббревиатура “POF” – Plastic Optical Fiber. Иногда такие волокна называют «полностью пластиковые волокна» (в англоязычной литературе – “All-plastic fiber” – “APF”) для того, чтобы подчеркнуть отличие от оптических волокон с кварцевой сердцевиной и полимерной оболочкой (Plastic-clad silica fiber – “PCF”). Для полимерных оптических световодов с защитной оболочкой используется также название «пластиковый оптический кабель». Наиболее распространенными материалами для изготовления ПОВ являются полистирол (ПС) и полиметилметакрилат (ПММА). По сравнению с кварцевыми оптическими волокнами, полимерные световоды обладают меньшим весом, допускают меньший радиус изгиба. Наиболее важным преимуществом ПОВ является низкая стоимость инсталляции волоконно-

оптических систем на основе ПОВ. Это обусловлено тем, что в настоящее время наиболее распространены ПОВ с диаметром сердцевины 1 мм, числовой апертурой 0,45 и более. Это дает возможность использовать в качестве источника излучения дешевые по сравнению с полупроводниковыми лазерами светодиоды, не требует точной юстировки в соединительных устройствах и высококачественной полировки торцевых поверхностей ПОВ. Недостатками ПОВ являются: высокие потери, более высокий температурный коэффициент линейного расширения, склонность к старению, низкая абразивная устойчивость. В основном, полимерные световоды изготавливаются со ступенчатым профилем показателя преломления и используются в системах связи длиной небольшой длины (до 100 м).

Аналогично случаю кварцевых оптических волокон, потери в полимерных световодах обусловлены рассеянием излучения при распространении и поглощением в материале. Типичная спектральная зависимость потерь в полимерном световоде из ПММА приведена на рис. 8.1.

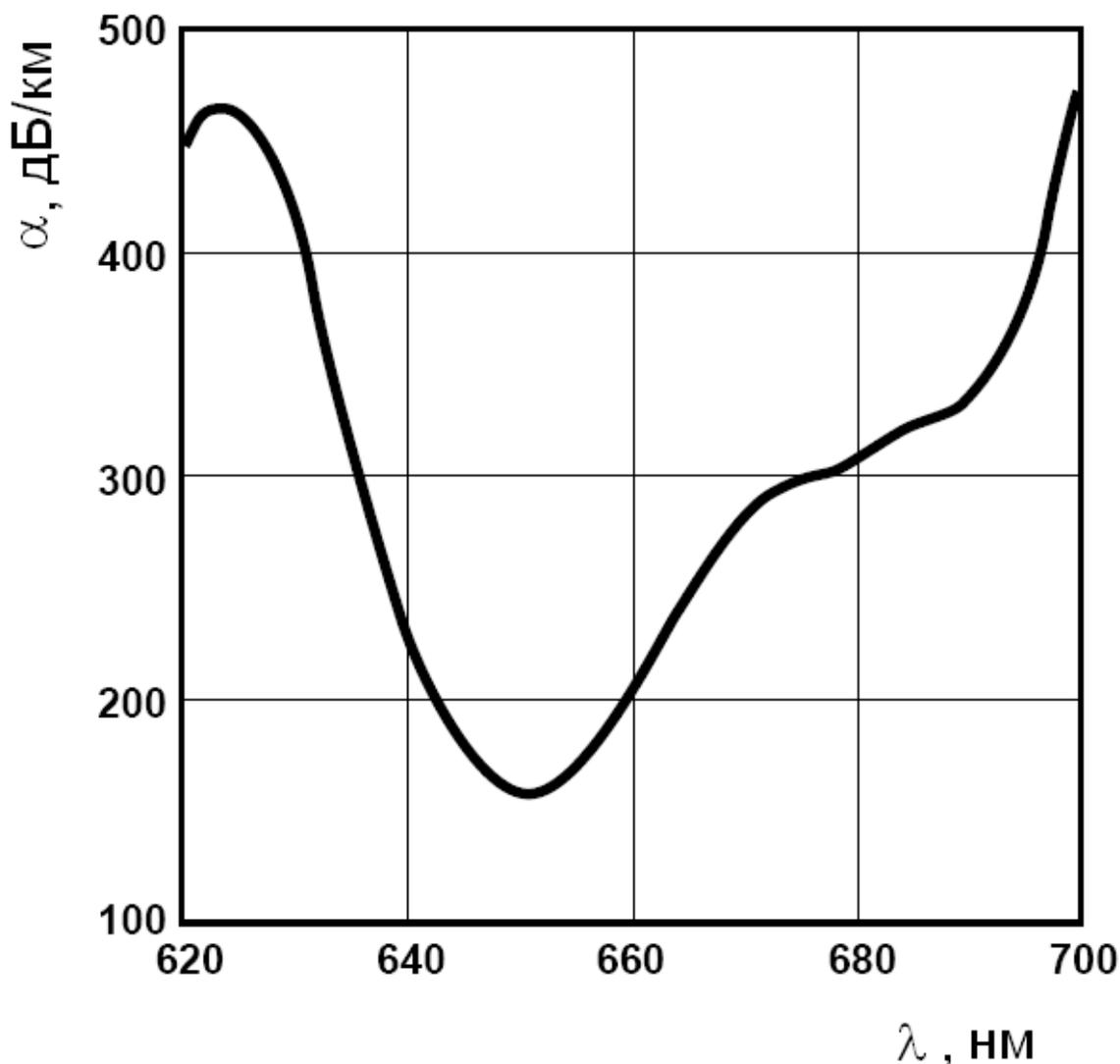


Рис. 8.1. Спектральная зависимость потерь в ПОВ

Минимальные потери достигаются при длине волны приблизительно 650 нм, т.е. в видимом диапазоне длин волн. Максимум поглощения вблизи длины волны 620 нм является локальным. В диапазоне длин волн 450 – 600 нм пластиковые волокна также обладают хорошей прозрачностью. Для пластиковых световодов кабельные потери, обусловленные флуктуацией диаметра сердцевины, составляют 10% ... 50% от суммарной величины потерь. В коротковолновой части видимого диапазона длин волн (400 – 500 нм) доминируют потери, вызванные рэлеевским рассеянием (до 97%). В длинноволновой части спектра (650 нм и менее) потери обусловлены

преимущественно поглощением. Аналогично ИК поглощению в кварцевых световодах, в ПОВ энергия распространяющегося излучения переходит в энергию колебаний частей молекул, являющихся основным материалом, из которого изготовлен световод. Однако, в связи с тем, что существенное увеличение поглощения при увеличении длины волны возникает в видимом диапазоне длин волн, поглощение в ПОВ не называют ИК поглощением. Данный вид поглощения, имеющий место в диапазоне 400 – 700 нм, можно охарактеризовать как потери, связанные с обертонами валентных колебаний химических связей, содержащих водород (таких как СН, ОН, NH и др.), т.е. резонансными диэлектрическими потерями.

При плохой очистке исходного материала возникают дополнительные потери на примесях. В ПОВ из полистирола при длинах волн менее 600 нм существенную роль играет ультрафиолетовое поглощение.

Табл. 8.1. Типичные характеристики ПОВ

(на примере ПОВ фирмы “Agilent technologies”, кабель марки “HFBR-R”)

Параметр	Мин	Тип	Макс	Ед
Потери (на длине волны 650 нм)	0,15	0,22	0,27	дБ/м
Числовая апертура	0,46	0,47	0,5	-
Диаметр по оптической оболочке	0,94	1,0	1,06	мм
Диаметр защитной оболочки	2,13	2,2	2,27	мм
Масса кабеля на единицу длины	5,3	-	-	г/м
Показатель преломления сердцевины	-	1,492	-	-
Показатель преломления оболочки	-	1,417	-	-
Электрическая утечка по кабелю при 50 кВ, длине ПОВ 0,3 м	-	12	-	нА

Диапазон рабочих температур	-40	-	+85	⁰ С
Кратковременный минимальный радиус изгиба кабеля	25	-	-	мм
Долговременный минимальный радиус изгиба кабеля	35	-	-	мм
Максимальное кратковременное сжимающее усилие	-	-	50	Н

8.2. Схема лабораторной установки и методика измерений

Структурная схема лабораторной установки для измерения затухания в оптических волокнах приведена на рис. 2.2. В качестве источника излучения используются полупроводниковые светодиоды 1 (СД) с различной длиной волны λ , имеющие выход на пластмассовый соединитель 2. Электропитание светодиодов осуществляется через блок питания 3 (БП). Ток, протекающий через светодиод, можно изменять с помощью резистора с переменным сопротивлением. Отрезок полимерного световода подключают к выходу светодиода 1 и входу фотоприемника 5, используя пластмассовые оптические соединители 6. Аналогично методу измерения потерь в кварцевом оптическом волокне, измерения производят для двух ПОВ различной длины L_1 и L_2 . Фототок, пропорциональный мощности падающего излучения, протекая по нагрузочному сопротивлению 7, создает падение напряжения $U_{вых}$, регистрируемое вольтметром 8. При расчетах необходимо учесть темновой ток фотоприемника.

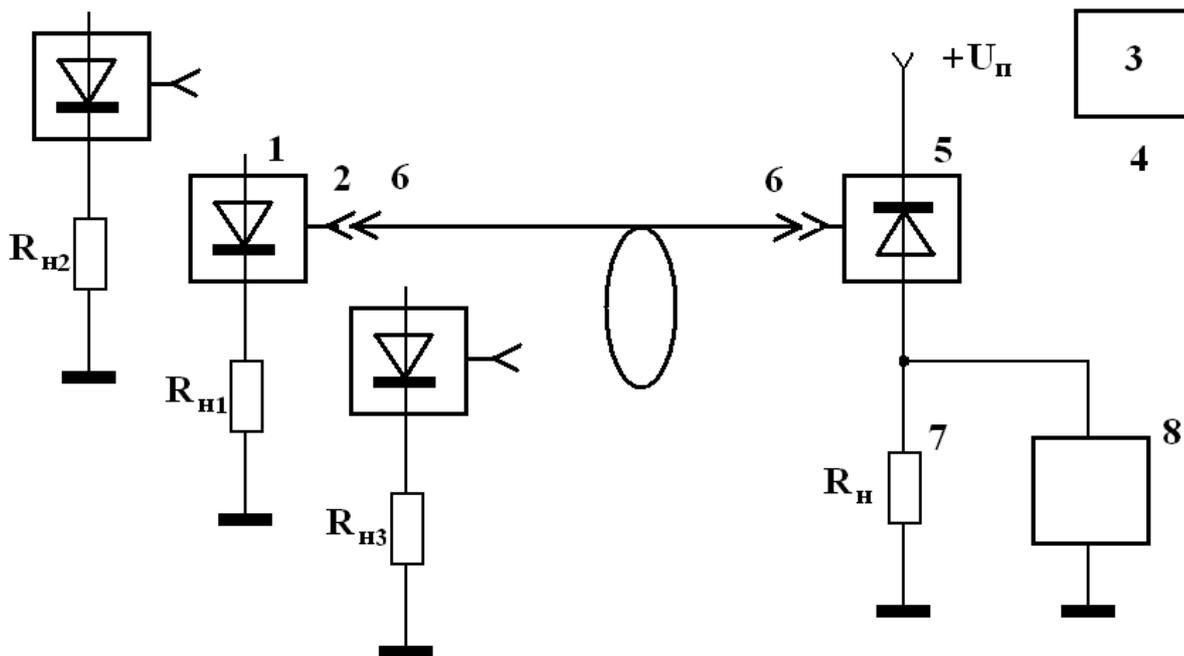


Рис. 8.2. Структурная схема измерительной установки: 1 – светодиод (СД1, СД2, СД3), 2 – пластиковый соединитель, 3, 4 – блок питания, 5 – приемный фотодиод, 6 – оптическая розетка приемного световода, 7 – нагрузочный резистор, 8 – вольтметр

8.3. Вопросы для подготовки к работе

1. Какова конструкция пластикового оптического кабеля?
2. Чем отличается многомодовый волоконный световод от одномодового?
3. Что такое «числовая апертура» световода и как числовая апертура связана с показателями преломления сердцевины и оболочки?
4. Каковы преимущества и недостатки пластиковых волоконных световодов по сравнению с кварцевыми световодами?

8.4. Порядок выполнения работы.

Ознакомиться со структурной схемой измерений. Подключить шнур электропитания к лабораторной установке. Подождать 5-10 минут для

установления стационарного теплового режима работы установки. Подключить первый вольтметр к выходному электрическому соединителю фотоприемника. Измерить фоновое значение напряжение, обусловленное токами утечки фотоприемника. Подключить один конец короткого отрезка пластикового оптического кабеля (длина 1 м) к входному соединителю фотоприемника, а другой конец – к выходному соединителю одного из источников излучения (например, СД1 с длиной волны излучения 0,65 мкм). Подключить второй вольтметр к выходному электрическому соединителю цепи контроля протекающего тока излучателя выбранного светодиода. Изменяя величину тока, протекающего через светодиод $I_{СД}$, тем самым изменяя мощность излучения, измерить зависимость напряжения на выходе фотоприемника $U_{ВЫХ}$ от $I_{СД}$. Определить максимальное значение тока $I_{МАКС}$ при котором сохраняется линейная зависимость $U_{ВЫХ}(I_{СД})$. Установить ток светодиода, равный величине $I_{МАКС}$ и измерить выходное напряжение $U_{ВЫХ}$. Далее, вместо короткого отрезка пластикового оптического кабеля подключить длинный отрезок кабеля (длина 20 м). Произвести измерения выходного напряжения. Аналогично, выполнить измерения с использованием двух других источников излучения (СД2 и СД3), имеющих другие длины волн (0,55 мкм и 0,49 мкм). Рассчитать коэффициент затухания излучения в исследуемом кабеле на трех длинах волн в децибелах (дБ/м).

8.5. Оформление отчета

1. Начертите схему лабораторной установки.
2. Запишите параметры исследованного волоконного световода: показатели преломления сердцевины и оболочки, диаметр сердцевины, длину кабеля, а также спектральные параметры излучения светодиодов: центральную длину волны и их спектральную ширину.

3. Приведите расчетные значения коэффициентов затухания излучения на трех длинах волн в децибелах (дБ/м).
4. Рассчитайте числовую апертуру и оцените полосу пропускания сигнала для пластикового оптического кабеля в предположении равномерного возбуждения волноводных мод.

9. Работа №3

Измерение затухания в оптических волокнах методом обратного рассеяния

Цель работы: ознакомление с методом обратного рассеяния, приобретение опыта работы с пассивными элементами волоконно-оптических линий связи, импульсными источниками и приемниками оптического излучения.

Программа измерений предусматривает измерение затухания кварцевого оптического волокна методом обратного рассеяния.

9.1. Общие сведения о методе обратного рассеяния

Сущность метода обратного рассеяния, называемого также рефлектометрическим методом, заключается в следующем. В оптическое волокно, параметры которого необходимо измерить, вводится импульс оптического излучения. При распространении излучения по световоду, некоторая часть излучения рассеивается во всех направлениях (рэлеевское рассеяние), в том числе, в обратном направлении. Обратное рассеянное излучение, пройдя по световоду расстояние L от точки рассеяния до входного торца, попадает на фотоприемное устройство. Задержка по времени τ_g между входящим импульсом и импульсом, обусловленным обратным рассеянным излучением, составляет величину $2L/v_{gp}$, где v_{gp} – групповая скорость распространения оптического излучения на данной длине волны. Так как рассеяние происходит по всей длине оптического волокна, импульс обратного рассеянного излучения начинается практически с нулевой задержкой относительно входного импульса излучения и имеет τ_m длительность $2L_F/v_{gp}$,

где L_F - длина волокна. Мощность излучения, распространяющегося по световоду, как в прямом направлении, так и в обратном, уменьшается вследствие оптических потерь. Поэтому чем больше расстояние до точки рассеяния, которую проходит излучение в прямом и обратном направлении, тем меньше мощность обратно рассеянного излучения, регистрируемая фотоприемным устройством.

Для оптически однородного по длине волокна, в котором изменение мощности излучения, распространяющегося в прямом направлении, может быть описана зависимостью $\exp(-\alpha L)$, где α – коэффициент затухания излучения, а зависимость мощности $P(\tau_g)$ обратно рассеянного излучения от τ_g ($0 < \tau_g < \tau_m$) пропорциональна функции $\exp(-\alpha \tau_g v_{gp}/2)$. Таким образом, измерив зависимость $P(\tau_g)$ в относительных единицах, и зная величину групповой скорости распространения v_{gp} , можно определить коэффициент затухания излучения α .

Если оптическое волокно неоднородно по длине, то зависимость $P(\tau_g)$ может иметь довольно сложный вид. В частности, зависимость $P(\tau_g)$ может иметь локальные максимумы в виде «острых» пиков, обусловленных отражением излучения от торцевых поверхностей световода в разъемных соединениях или на конце линии. Ширина пика определяется разрешающей способностью используемой аппаратуры и дисперсией импульса при распространении. Ступенчатое уменьшение $P(\tau_g)$ может быть вызвано изгибом волокна, потерями в разъемном или сварном соединении. Подробное рассмотрение зависимостей $P(\tau_g)$ для продольно неоднородных оптических волокон и кабельных линий дано в ГОСТ Р МЭК 793-1-93 [10].

Метод обратного рассеяния используется в оптических рефлектометрах – приборах для определения параметров волоконно-оптических световодов и

кабельных линий. В англоязычной литературе широко используется аббревиатура “OTDR” (Optical Time Domain Reflectometer) обозначающая приборы данного типа. Серийно выпускаемые рефлектометры позволяют не только измерять затухание в оптических волокнах, но и определять расстояние до мест соединения световодов, до конца линии или мест оптической неоднородности волокна.

9.2. Методика измерений по ГОСТ Р МЭК 793-1-93

Одним из методов измерения затухания в оптических волокнах является метод обратного рассеяния. Данная методика может быть использована для контроля оптической целостности, физических дефектов, мест сварки и обратного рассеяния в оптических волокнах, а также для определения длины волокна.

Для измерения затухания может быть использована методика, описанная в методе обрыва (п. 32.1 ГОСТ). Для контроля других параметров условия ввода излучения могут зависеть от параметров, которые подвергаются проверке. Во всех случаях, для того чтобы снизить френелевское отражение на входе волокна, могут быть использованы различные устройства, например поляризаторы или материалы с близкими показателями преломления. Вносимые потери должны быть минимальными.

Уровень оптического сигнала обратного рассеяния обычно невелик и близок к уровню шума. Для улучшения отношения сигнал–шум и динамического диапазона измерений используют мощный источник света совместно с устройством для обработки детектированного сигнала. Кроме того, для получения компромиссного значения между разрешающей способностью и энергией импульса, точная пространственная разрешающая способность может потребовать регулирования ширины импульса. Особое

внимание должно быть уделено минимизации френелевского отражения. Оптические нелинейные эффекты должны быть исключены для волокна, подвергаемого испытанию.

Пример устройства (для реализации данного метода) показан на рис. 9.1. Источник оптического излучения должен быть стабильным, мощным, с соответствующей длиной волны, таким как полупроводниковый лазер. Длина волны источника должна быть зафиксирована. Ширина импульса и частота повторения импульсов должны соответствовать требуемой пространственной разрешающей способности и длине волокна. Детектор должен обеспечивать максимальный захват мощности обратного рассеяния.

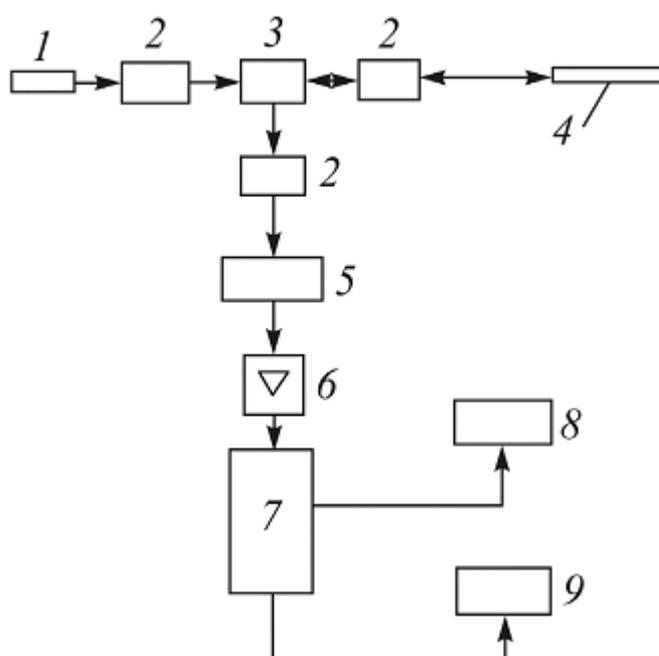


Рис. 9.1. Схема устройства обратного рассеяния [10]: 1 – источник света; 2 – оптическая система; 3 – устройство соединения; 4 – испытываемое волокно; 5 – оптический детектор; 6 – усилитель; 7 – устройство обработки сигналов; 8 – осциллограф; 9 – система сбора данных

Чувствительность детектора должна соответствовать уровню и длине волны детектируемых сигналов. При изменении затухания чувствительность детектора должна быть, в основном, линейной.

ГОСТ требует выполнения следующих условий. «Для улучшения соотношения сигнал–шум необходима обработка сигнала и желательно иметь в системе детектирования логарифмическую чувствительность. За оптическим детектором должен быть установлен соответствующий усилитель, что делает уровень сигнала достаточным для его обработки. Ширина полосы пропускания усилителя выбирается как среднее между временной разрешающей способностью и требованиями по снижению уровня шума.

При проведении измерений испытываемое волокно устанавливают на одном уровне с устройством соединения. Мощность, рассеянную в обратном направлении, анализируют с помощью устройства для обработки сигналов и регистрируют на логарифмической шкале».

На рис. 9.2 представлена типичная кривая. Детальная интерпретация результатов дана в п. 34.6 ГОСТ [10].

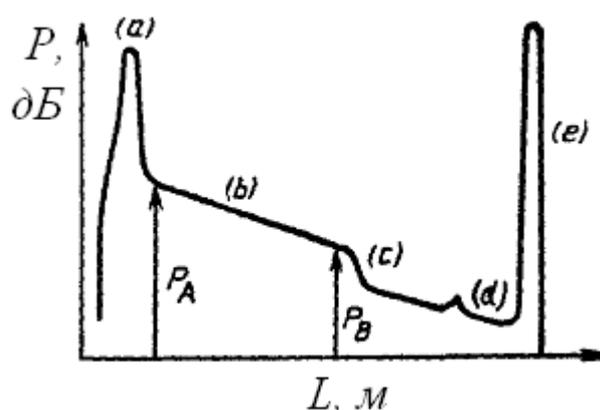


Рис. 9.2. Кривая мощности, рассеянной в обратном направлении [10]

Согласно ГОСТ, «если зарегистрированная кривая имеет приблизительно постоянный наклон (зона b), затухание (дБ) между двумя точками А и В кривой, соответствующими двум площадям поперечного сечения волокна, можно выразить следующим образом:

$$A(\lambda)_{A-B} = \frac{1}{2}(P_A - P_B) \text{ (дБ)}$$

где P_A и P_B – соответствующие уровни мощности, представленные на логарифмической шкале. В приведенном уравнении в точках А и В использованы одни и те же коэффициенты обратного рассеяния. При необходимости могут быть проведены двунаправленные измерения совместно с числовыми расчетами с целью повышения точности результата и учета влияния на затухание дефектов волокна».

9.3. Экспериментальная установка

Структурная схема лабораторной установки представлена на рис. 9.3.

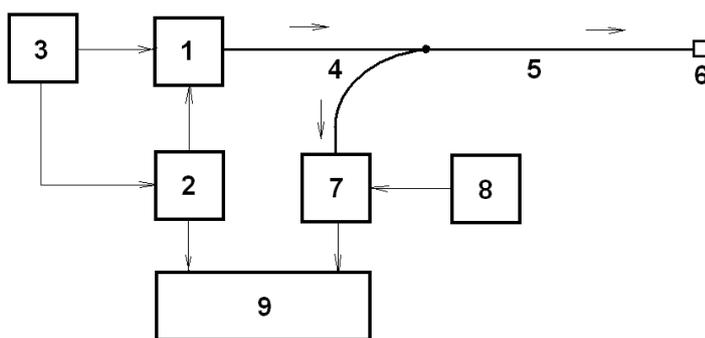


Рис. 9.3. Схема экспериментальной установки для измерения затухания в волоконных световодах методом обратного рассеяния: 1 – импульсный полупроводниковый лазер, 2 – генератор импульсов, 3 – блок питания, 4 – волоконно-оптический разветвитель, 5 – исследуемый волоконный световод, 6 – волоконно-оптический терминатор, 7 – фотоприемный модуль, 8 – блок питания, 9 – осциллограф

Источником оптического излучения служит импульсный полупроводниковый лазер 1 (рис. 9.3) с длиной волны излучения 1,3 мкм. Управление током лазера производится с использованием специального электронного устройства. Длительность и период повторения импульсов задается генератором 2. Электропитание полупроводникового лазера и генератора осуществляется от выносного малогабаритного блока питания 3. К волоконно-оптическому выходу лазера 1 подсоединяется ВО разветвитель 4, к выходу которого подключается исследуемый волоконный световод 5. Выходной конец исследуемого ВС подключен к ВО терминатору 6. Обратное рассеянное излучение преобразуется в электрический сигнал в фотоприемном модуле 7. Электропитание модуля 7 осуществляется от специализированного блока питания 8. Выход генератора импульсов 2 подключен к входу синхронизации осциллографа 9, выход фотоприемного модуля – к аналоговому входу осциллографа.

Импульс оптического излучения, созданный полупроводниковым лазером 1, проходит волоконно-оптический разветвитель 4 и попадает в исследуемое оптическое волокно 5. При распространении по световоду 5 часть излучения рассеивается во всех направлениях (рэлеевское рассеяние), в том числе и в обратном направлении. Некоторая часть обратного рассеянного излучения распространяется от места, в котором произошло рассеяние, в сторону волоконно-оптического разветвителя. Часть излучения, пройдя разветвитель, попадает на лавинный фотоприемник модуля 7 в котором формируется электрический импульс, параметры которого используются для определения затухания в исследуемом волоконном световоде.

9.4. Вопросы для подготовки к работе

1. Объясните принцип работы рефлектометра для измерения затухания в волоконно-оптических кабелях.
2. В чем преимущество метода обратного рассеяния по сравнению с методом обрыва?
3. Назовите факторы, влияющие на точность измерений затухания при использовании метода обратного рассеяния.
4. По каким причинам логарифмическая зависимость мощности, рассеянной в обратном направлении от расстояния до точки рассеяния, может отклоняться от прямой?
5. В каких случаях измерение затухания в оптически неоднородных по длине световодах с помощью рефлектометра может привести к существенной ошибке?
6. Почему в лабораторной установке используются волоконно-оптические соединители с наклонной полировкой торца (APC)?

9.5. Порядок выполнения работы

Ознакомиться со структурной схемой измерений. Подключить шнур электропитания к лабораторной установке. Подождать 5-10 минут для установления стационарного теплового режима работы установки. Подключить источник излучения, фотоприемное устройство, а также исследуемый волоконный световод к волоконно-оптическому разветвителю. Задать длительность импульса генератора 0,25 мкс. Записать измеренную зависимость ($P(L)$) мощности, рассеянной в обратном направлении от расстояния L до точки рассеяния, в файл. К выходному торцу исследуемого световода подключить дополнительный отрезок волоконного световода в виде шнура, выходной торец которого имеет соединитель с обычной (не

наклонной) полировкой (РС, АРС или UРС). Записать измеренную зависимость $P(L)$ в файл. Объяснить причину изменения зависимости $P(L)$.

9.6. Оформление отчета

1. Начертите схему лабораторной установки.
2. На основании полученных данных, рассчитайте длину исследуемого световода.
3. Приведите расчетное значение коэффициента затухания в децибелах на километр (дБ/км) и исходные данные для расчета.

10. Работа №4

Измерение затухания во флуоресцирующих оптических волокнах методом бокового освещения

Цель работы: изучение свойств флуоресцирующих полимерных оптических волокон, ознакомление с методом бокового освещения для измерения коэффициента затухания, приобретение опыта работы со спектрометром, а также с элементами волоконно-оптических систем.

Программа предусматривает измерение затухания полимерных оптических волокон, активированных органическими красителями (Родамин 6Ж и Родамин С), методом бокового освещения, а также измерение спектра флуоресценции красителей.

10.1. Общие сведения о методе бокового освещения

Метод бокового освещения используется для измерения затухания оптических световодов, материал сердцевины которых обладает флуоресцирующими свойствами. В англоязычной литературе метод обозначают аббревиатурой “SIF” (Side-Illumination Fluorescence). Сущность метода заключается в том, что оптическое излучение от источника вводят в световод через боковую поверхность. Как правило, ось падающего (вводимого) пучка излучения перпендикулярна оси световода. В материале сердцевины происходит частичное поглощение падающего излучения с последующим переизлучением с меньшей энергией фотона. В лазерной технике излучение, возбуждающее флуоресценцию, называют излучением накачки. Возникающее излучение флуоресценции имеет равномерное распределение во всех направлениях, в частности, часть энергии излучения

далее распространяется внутри сердцевины световода. Пройдя некоторое расстояние L_p от точки возникновения до торца световода, распространяющееся излучение испытывает затухание. Изменяя расстояние L_p , т.е. перемещая область воздействия излучения накачки вдоль волокна, можно получить зависимость мощности, выходящей из световода от расстояния L_p . Угол наклона логарифмической зависимости мощности от расстояния L_p будет характеризовать коэффициент затухания излучения на заданной длине волны. В предельном случае можно производить измерения только при двух значениях L_p . Расчет величины затухания в этом случае осуществляется аналогично методу обрыва, рассмотренному выше. При малом диаметре сердцевины оптического волокна ввод излучения накачки осуществляется через фокусирующий объектив.

Метод бокового освещения позволяет измерять затухания во флуоресцирующих оптических волокнах, имеющих очень большую величину коэффициента затухания по сравнению с обычными кварцевыми волокнами. В некоторых флуоресцирующих оптических волокнах характерная длина затухания излучения $(1/\alpha)$ соизмерима или меньше величины пространственного разрешения серийно выпускаемых рефлектометров, что приводит к невозможности их использования. Преимуществом метода бокового освещения по сравнению с рефлектометрическим методом является возможность измерить зависимость коэффициента затухания излучения от длины волны, используя источник излучения накачки с единственной длиной волны. Однако измерение затухания возможно только в диапазоне длин волн флуоресценции материала сердцевины оптического волокна.

Принципиальным отличием метода бокового освещения от рефлектометрического метода является то, что для измерения затухания в световодах рефлектометрическим методом используется получаемая

зависимость мощности рассеянного излучения от времени и импульсный источник излучения, а для измерения методом бокового освещения – непосредственно зависимость мощности от расстояния и непрерывный источник излучения.

10.1. Люминесценция. Фотолюминесценция. Флуоресценция.

Люминесцирующие световоды

Люминесценция – нетепловое свечение вещества, происходящее после поглощения им энергии возбуждения. С.И. Вавиловым было дано следующее определение люминесценции: «Будем называть люминесценцией избыток над температурным излучением тела в том случае, если это избыточное излучение обладает конечной длительностью примерно 10^{-10} секунд и больше». Люминесценция может возникать под действием множества факторов. Наиболее изученный из них – фотолюминесценция – свечение вещества под действием оптического излучения.

Флуоресценция — физический процесс, являющийся частным случаем фотолюминесценции. Флуоресценцией обычно называют излучательный переход возбужденного состояния с самого нижнего синглетного колебательного уровня S_1 в основное состояние S_0 . В более общем случае флуоресценцией называют разрешенный по спину излучательный переход между двумя состояниями одинаковой мультиплетности: между синглетными уровнями $S_1 \rightarrow S_0$ или триплетными $T_1 \rightarrow T_0$. Типичное время жизни такого возбужденного состояния составляет 10^{-11} – 10^{-6} с.

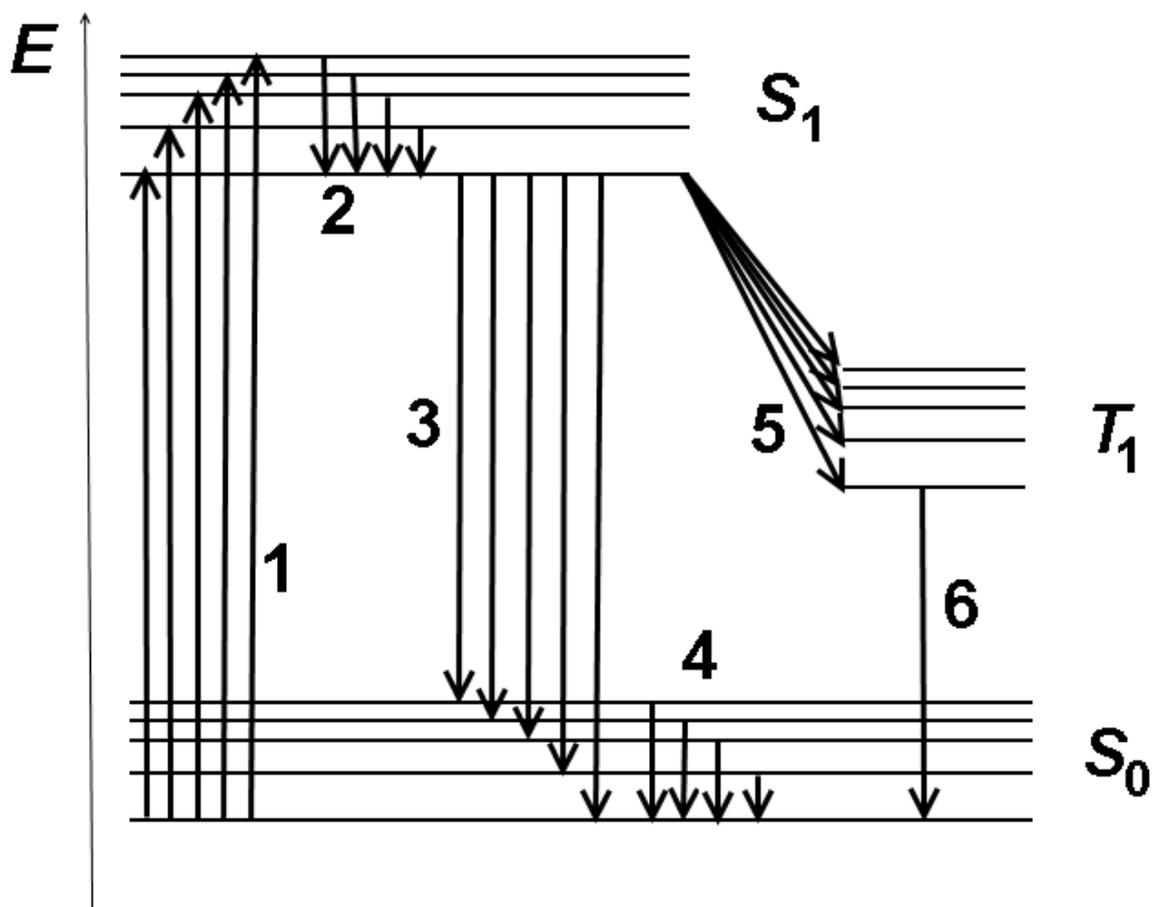


Рис. 10.1. Упрощенная диаграмма Яблонского: 1 – поглощение, 2, 4 – колебательная релаксация, 3 – флуоресценция, 5 – внутренняя конверсия, 6 – фосфоресценция

Процесс испускания и поглощения света можно пояснить с помощью диаграммы Яблонского (рис. 10.1). При нормальных условиях большинство молекул находятся в основном электронном состоянии S_0 . При поглощении света молекула переходит в возбужденное состояние S_1 . При возбуждении с переходом на высшие электронные и колебательные уровни избыток энергии быстро расходуется, переводя флуорофор на самый нижний колебательный подуровень состояния S_1 . Однако флуоресценция может происходить и при излучательных переходах с более высоких уровней. Запрещенные по спину излучательные переходы между двумя состояниями разной мультиплетности называют фосфоресценцией. Например, излучательный переход

возбужденного триплетного состояния T_1 в основное состояние S_0 . Синглет-триплетные переходы имеют квантово-механический запрет, поэтому время жизни возбужденного состояния при фосфоресценции значительно больше, чем при флуоресценции и составляет порядка 10^{-3} – 10^{-2} с.

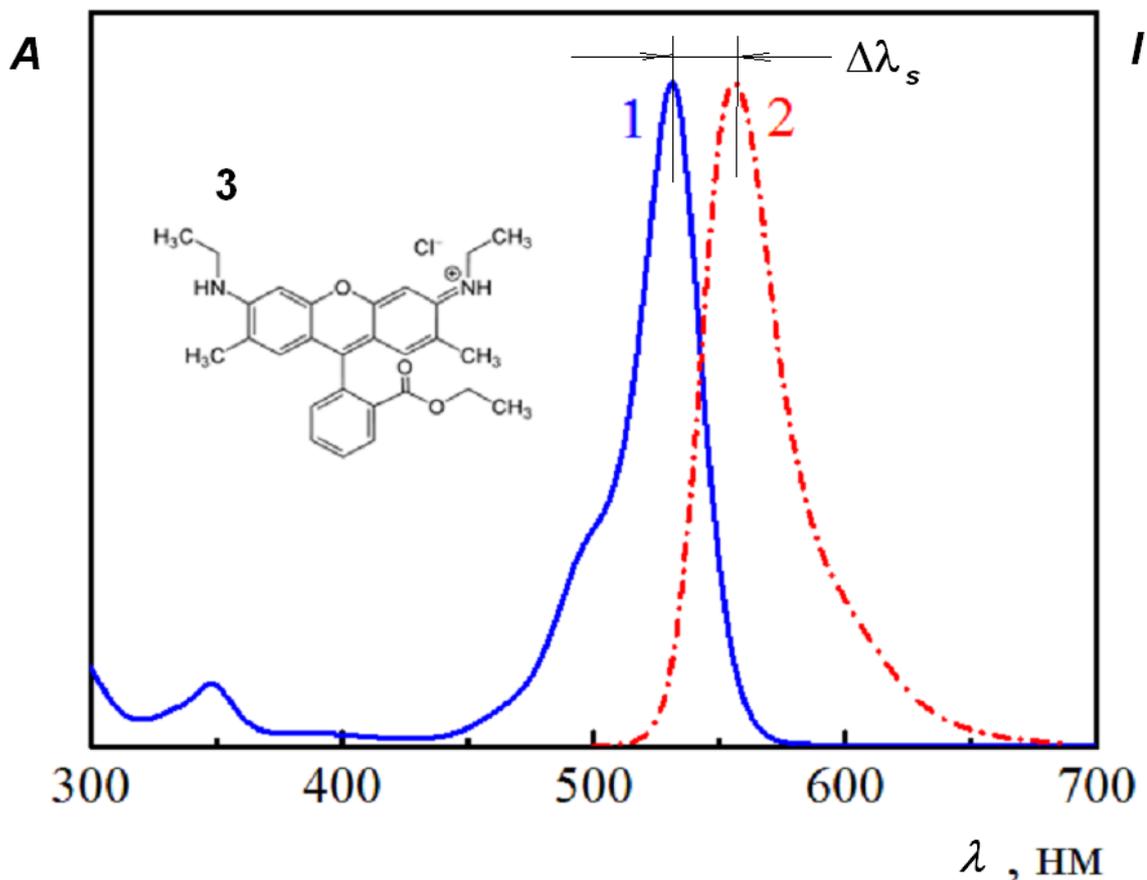


Рис. 10.2. Нормированный спектр поглощения A (1) и флуоресценции I (2) раствора Родамина 6Ж в этаноле [12], 3 – структурная формула Родамина 6Ж, $\Delta\lambda_s$ – стоксов сдвиг

Вследствие безызлучательных релаксационных процессов в возбужденном состоянии (рис. 10.2), энергия излучаемых фотонов меньше энергии поглощаемых, соответственно имеет большую длину волны. Поэтому спектр поглощения сдвинут относительно спектра флуоресценции в сторону длинных волн. Величина смещения, а также само явление получили название «Стоксов сдвиг». Типичный спектр поглощения и излучения флуоресценции приведен на рис. 10.2 (на примере раствора Родамина 6Ж).

Более подробное описание явления флуоресценции можно найти, например, в учебных пособиях [12, 13].

Свойством флуоресценции обладают многие органические вещества. Наиболее известными являются хинин, флуоресцеин, эозин, акридиновые красители, родамины и другие. Спектральных характеристики наиболее распространенных красителей приведены в таблице 10.1. Флуоресцирующие красители используются в технике для создания так называемых лазеров на красителях, а также при производстве флуоресцирующих полимерных световодов. Более подробные сведения об использовании флуоресцирующих красителей для создания импульсных лазеров приведены, в частности, в [13].

Таблица 10.1.

Краситель	Центр линии люминесценции, нм	Диапазон флуоресценции, нм	Диапазон поглощения накачки, нм
Карбостирил 165	445	419—485	350—365
Кумарин 2	450	435—485	340—365
Кумарин 1	470	450—495	350—365
Кумарин 102	495	470—515	400—420
Кумарин 30	515	495—545	400—420
Кумарин 7	535	505—565	400—420
Кумарин 6	538	521—551	458—514
Флуоресцин	552	538—573	458—514
Родамин 110	570	540—600	458—514

Родамин 6Ж	590	570—650	458—514
DCM	620	550—675	475—525
Родамин Б	630	601—675	458—514
LD703	650	625—725	550—650
Оксазин 1(4)	750	695—801	647—672
DEOTC-P(4)	795	765—875	647—672
НІТС-P(4)	875	840—940	647—672

10.2. Люминесцирующие световоды

Широкое использование в технике получили люминесцирующие оптические волокна, представляющие собой кварцевые световоды, легированные ионами редкоземельных металлов. Такие волокна называют активными. Указанные волокна используются в качестве усилителя оптического сигнала волоконно-оптических линиях связи, а также для создания волоконно-оптических лазеров.

Возможность усиления света в световодах, легированных ионами эрбия, обуславливается схемой уровней энергии данного редкоземельного элемента, представленной в упрощенном виде на рис.10.3. Усиление света в эрбиевом усилителе происходит благодаря переходу между уровнями $2 \rightarrow 1$ (${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$). Каждый из этих уровней расщеплен на ряд подуровней из-за взаимодействия ионов эрбия с внутрикристаллическим полем кварцевого стекла (эффект Штарка). После поглощения фотонов накачки ионы эрбия переходят из основного состояния (уровень 1) в верхнее возбужденное состояние (уровень 3), время пребывания на котором (время жизни) сравнительно мало (время жизни $\tau_3=1$ мкс). За счет процессов релаксации

происходит переход на метастабильный уровень, время пребывания иона эрбия на котором относительно велико ($\tau_2=10$ мс, т.е $\tau_2=10\ 000\tau_3$). Поэтому число ионов, находящихся на уровне 2, при соответствующей мощности накачки может превышать число ионов на уровне 1. Уровень 1 называется основным состоянием, т.к. в отсутствие накачки практически все ионы эрбия находятся на этом энергетическом уровне. Доля частиц, находящихся на остальных уровнях, в отсутствие накачки мала.

Если в среду с инверсией населенности попадает излучение с энергией фотона, совпадающей с энергией перехода из метастабильного состояния в основное, то с большой вероятностью происходит переход иона с метастабильного уровня 2 на основной уровень 1 с одновременным рождением еще одного фотона, то есть происходит вынужденное излучение света. Такое излучение называют также стимулированным. Таким образом, количество фотонов увеличивается, что означает усиление оптического сигнала, распространяющегося в среде с инверсией населенности.

Для создания волоконно-оптических лазеров, помимо волокон, легированных эрбием, используются световоды, легированные неодимом, гольмием, тулием, иттербием и ионами других элементов. Параметры наиболее распространенных материалов приведены в таблице 10.2.

Для создания возбужденного состояния ионов используется оптическая накачка, длину волны излучения которой выбирают исходя из полосы поглощения данного материала. Необходимо отметить, что коэффициент затухания излучения в активных оптических волокнах зависит от величины инверсной заселенности энергетических уровней, а соответственно и от мощности излучения накачки. В режиме усиления сигнала коэффициент затухания является отрицательной величиной, так как мощность сигнала при прохождении такого световода возрастает.

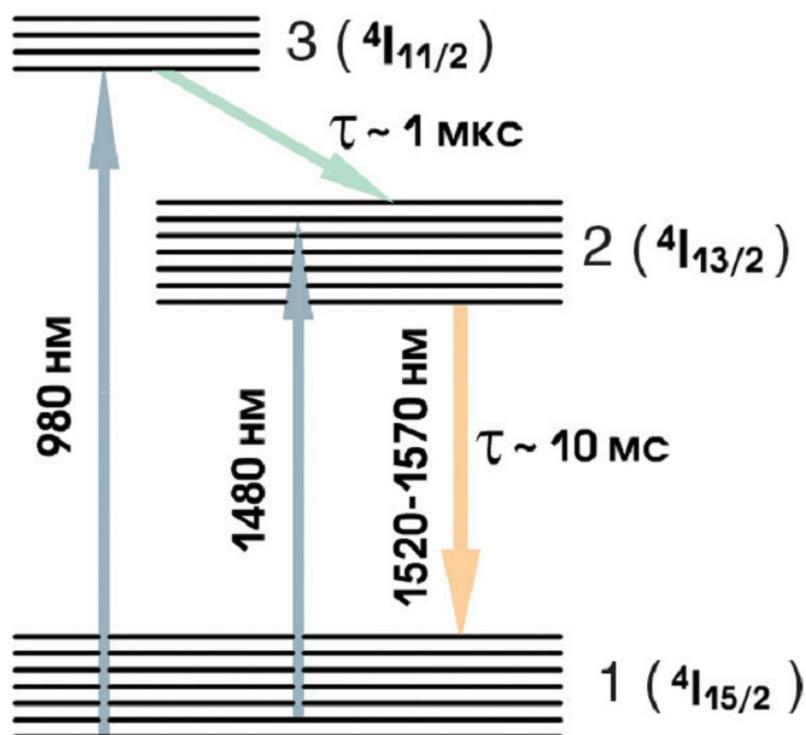


Рис. 10.3. Упрощенная схема энергетических уровней ионов эрбия (Er^{3+}) в кварцевом стекле [14]

Табл. 10.2

п/п	Активный ион		Спектральная область люминесценции, нм	Лазерный переход
	Обозначение	Наименование		
1	Nd^{3+}	Неодим	920-940	${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{9/2}$
			1050-1100	${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{11/2}$
			1340	${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{13/2}$
2	Ho^{3+}	Гольмий	1900-2100	${}^5\text{J}_7 \rightarrow {}^5\text{J}_8$
3	Er^{3+}	Эрбий	1500-1600	${}^4\text{I}_{13/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$
4	Tm^{3+}	Тулий	1700-2100	${}^3\text{H}_4 \rightarrow {}^3\text{H}_6$
5	Yb^{3+}	Иттербий	980-1200	${}^2\text{F}_{5/2} \rightarrow {}^2\text{F}_{5/2}$

Таким образом для измерения затухания излучения в люминесцирующих оптических волокнах методом бокового освещения, параметры экспериментальной установки (длину волны излучения накачки, размер области облучения световода, расстояние до выходного торца L_p и другие) выбирают исходя из основных свойств исследуемого световода.

10.3. Вопросы для подготовки к работе

1. Объясните принцип измерения затухания излучения во флуоресцирующих оптических волокнах с использованием метода бокового освещения.
2. В чем преимущество и недостатки метода бокового освещения по сравнению с другими методами?
3. Назовите факторы, влияющие на точность измерений затухания при использовании метода бокового освещения.
4. Что такое люминесценция и флуоресценция?
5. Что такое стоксов сдвиг?
6. В чем отличия оптических характеристик кварцевых волокон, легированных ионами редкоземельных элементов, в частности эрбия, от характеристик волокон, активированных органическими красителями?

10.4. Порядок выполнения работы

Ознакомиться со структурной схемой измерений. Подключить шнур электропитания к лабораторной установке. Выбрать одно из имеющихся оптических волокон, активированных родамином – либо с красителем «Родамин 6Ж», либо «Родамин С» с концентрацией красителя 5 – 25 мг/кг. Подключить спектрометр к блоку электропитания и персональному

компьютеру, через переходной соединитель подключить входной волоконно-оптический световод спектрометра к отрезку исследуемого полимерного волокна. Включить лазерную указку, направить лазерный луч на выбранное родаминовое волокно перпендикулярно его оси на заданном расстоянии L_p от торца, подключенного к спектрометру. Перемещая луч перпендикулярно оси световода, не изменяя расстояния L_p и наблюдая за изменением спектральной зависимости на экране компьютера, найти такое положение луча, при котором интенсивность излучения флуоресценции будет максимальной. Сохранить измеренную спектральную плотность излучения флуоресценции в файл в формате “Excel” (*.xls или *.xlsx). Произвести аналогичные измерения при пяти различных расстояниях L_p . Заменить исследуемое оптическое волокно на волокно, активированное другим красителем. Повторить измерения также для пяти расстояний L_p .

10.5. Оформление отчета

1. Начертите схему лабораторной установки.
2. Постройте графики спектров флуоресценции красителей «Родамин 6Ж» и «Родами С» в полиметилметакрилате, измеренные при минимальном значении расстояния L_p .
3. Приведите в таблице значения интенсивности флуоресценции в относительных единицах как функции расстояния L_p для трех длин волн.
4. На основании полученных данных рассчитайте коэффициент затухания на трех выбранных длинах волн в децибелах на километр (дБ/км).

11. Работа №5

Измерение затухания в волоконных световодах на изгибах

Цель работы: ознакомление с физическими процессами, происходящими при изгибах кварцевых волоконных световодов, приобретение опыта работы с волоконно-оптическими кабелями, пассивными компонентами волоконно-оптических линий связи, источниками и приемниками оптического излучения, а также измерительными приборами.

Программа измерений предусматривает измерение затухания в изогнутых одномодовом и многомодовом волоконных световодах при различных радиусах изгиба.

11.1. Затухание в изогнутых световодах

Известно, что при распространении излучения по изогнутому участку волоконного световода, часть излучения покидает волоконный световод через боковую поверхность, то есть возникают дополнительные оптические потери. Затухание в изогнутых ВС следует классифицировать как разновидность кабельных потерь – потери на макроизгибах.

При укладке волоконно-оптического кабеля в грунт радиус изгиба кабеля R_c , как правило, сравнительно большой. Поэтому потери в волоконном световоде, обусловленные изгибом кабеля с радиусом R_c , пренебрежимо малы. Указанные потери также малы при намотке ВС на специальный барабан. Однако как в кабеле, а тем более при намотке ВС на катушку, могут возникать микроизгибы оптического волокна, а также участки с высокими внутренними механическими напряжениями, приводящие к кабельным потерям. Поэтому в данном случае подразумевается пренебрежимо малая

величина потерь, обусловленная рассматриваемым макроизгибом, то есть данный вид потерь рассматривается отдельно от возможных потерь другого типа.

Строгая физическая модель распространения излучения в изогнутых световодах довольно сложная, как в лучевом приближении, так и с использованием волновой теории. Уменьшение мощности распространяющегося излучения в многомодовых ВС со ступенчатым профилем показателя преломления, для которых можно использовать лучевую теорию, можно объяснить изменением угла распространения луча относительно оси ВС при отражении от границ раздела сердцевины и оболочки изогнутого ВС. Поэтому описание изменения мощности распространяющегося излучения аналогично описанию возникновения потерь в ВС на неоднородностях и несовершенствах геометрии сердцевины. Аналогично случаю кабельных потерь, рассмотренного выше, потери в изогнутых многомодовых световодах зависят от модового состава излучения, распространяющегося по оптическому волокну.

В многомодовых ВС, в лучевом приближении, лучи, соответствующие излучению, распространяющемуся в сердцевине ВС (так называемые «направляемые сердцевиной»), имеют точку поворота луча внутри сердцевины. Такие лучи не испытывают отражения от границы раздела сердцевины и оболочки. Однако при прохождении изогнутого участка световода, угол между осью ВС и направлением распространения луча при пересечении оси изменяется. Таким образом, имеет место эффект, аналогичный эффекту в световодах со ступенчатым профилем показателя преломления.

В качестве примера на рис. 11.1 приведены зависимости отношения прошедшей $P(z)$ (как функции длины пройденного изогнутого участка ВС) и вводимой P_0 (до изогнутого участка) мощностей от относительной длины

изогнутого участка z/r_0 , где r_0 – радиус сердцевины ВС. Зависимости рассчитаны для ВС со ступенчатым (рис. 11.1а) и усеченным параболическим (рис. 11.1б) профилем показателя преломления. Нормированная частота в обоих случаях задана $V=50$, числовая апертура – 0,1. Более подробное описание методики расчета можно найти в первоисточнике [15, 16], а также в монографии [17].

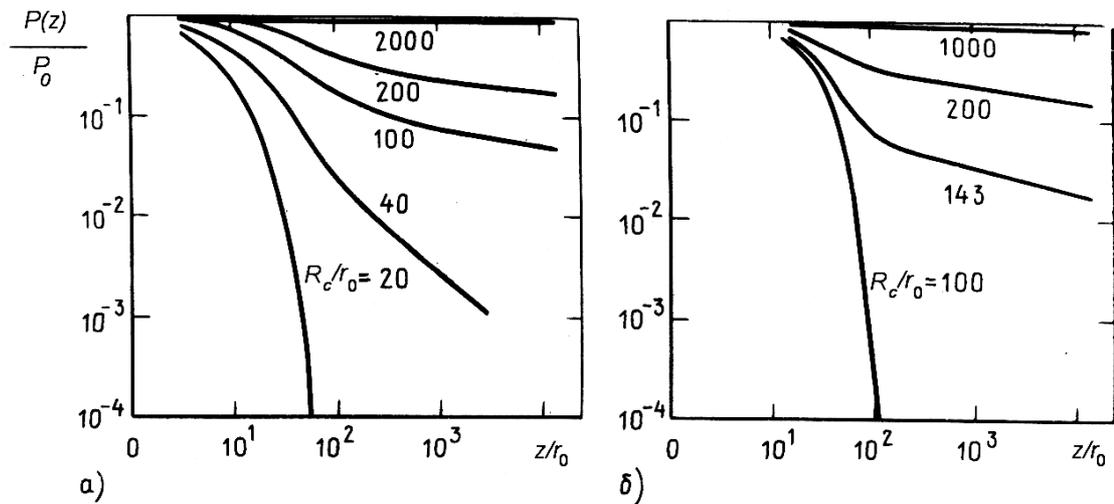


Рис. 11.1. Относительная величина мощности излучения [17], прошедшего изогнутый участок световода: а – ступенчатый профиль показателя преломления, б – усеченный параболический

Распространение излучения в одномодовых световодах нельзя описать с помощью лучевой теории. Для расчета затухания излучения в одномодовых ВС на изогнутом участке обычно используется теория излучения изогнутой антенны, хорошо разработанная в настоящее время. Теоретическое рассмотрение данной задачи представлено, в частности, в [16, 17]. Для ВС со ступенчатым профилем показателя преломления получена следующая формула для расчета коэффициента затухания:

$$\alpha = \frac{\pi^{1/2}}{2r_0} \left(\frac{r_0}{R_c}\right)^{1/2} \frac{U^2}{V^2 W^{3/2}} \frac{1}{K_1^2(W)} \exp\left(-\frac{4R_c W^3 \Delta}{3r_0 V^2}\right) \quad (11.1)$$

где r_0 – радиус сердцевины ВС, R_c – радиус изгиба, V – нормированная частота, U – собственное число волноводной моды, $W=(V^2-U^2)^{1/2}$ – параметр, связанный с собственным числом, Δ – относительная разность показателей преломления сердцевины и оболочки ВС, $K_1(W)$ – функция Макдональда первого порядка [18]. Как частный случай для основной волноводной моды одномодового ВС получена формула [17]:

$$\alpha = \frac{\pi^{1/2}}{2r_0} \left(\frac{r_0}{R_c}\right)^{1/2} \frac{V^4}{(V+1)^2(V-1)^{1/2}} \exp\left(\frac{(V-1)^2}{V+1} - \frac{4R_c(V-1)^3\Delta}{3r_0V^2}\right) \quad (11.2)$$

11.2. Вопросы для подготовки к работе

1. Как можно объяснить затухание оптического излучения при распространении по изогнутому участку световода?
2. Как объяснить увеличение затухания на изогнутом участке одномодового световода при увеличении длины волны распространяющегося излучения?
3. Какие волоконные световоды более чувствительны к изгибам, одномодовые или многомодовые?
4. В каком случае затухание на изогнутом участке волоконного световода будет больше: при селективном возбуждении низших модовых групп, включая основную моду, или при стационарном модовом распределении?

11.3. Порядок выполнения работы

Ознакомиться со структурной схемой измерений. Подключить шнур электропитания к лабораторной установке. Включить блок электропитания,

подождать 10-15 минут для установления стационарного теплового режима работы установки. Подключить вход исследуемого волоконного световода к волоконно-оптическому выходу лазерного модуля лабораторной установки. Подобрать аттенюатор, обеспечивающий отсутствие насыщения фотоприемника при подключении выхода исследуемого световода к фотоприемнику. Измерить мощность на выходе волоконного световода P_0 . Последовательно наматывать световод на цилиндр с заданным диаметром D_c с шагом по азимутальному углу не более 45° , что соответствует $1/8$ длины периметра и измерять мощность излучения, прошедшего световод с созданным изогнутым участком P_p . Произвести измерения при различных диаметрах цилиндра D_c . Измерения выполнить как для одномодового, так и многомодового волоконных световодов.

11.4. Оформление отчета.

1. Начертите схему лабораторной установки.
2. Постройте графики зависимости относительной мощности выходящего излучения от количества витков и длины изогнутого участка ВС при различных диаметрах цилиндра D_c .
3. Для одного из диаметров D_c постройте зависимость относительной мощности выходящего излучения от длины изогнутого участка в логарифмическом масштабе для одномодового и многомодового ВС.
4. Постройте графики зависимости относительной мощности выходящего излучения от радиуса изгиба при фиксированной величине длины изогнутого участка световода для одномодового и многомодового ВС.

5. На основании полученных данных рассчитайте коэффициент затухания излучения для всех диаметров D_c . Постройте графики зависимости коэффициента затухания от радиуса изгиба световода ($R_c=D_c/2$).
6. Объясните полученные результаты.

Библиографический список

1. ГОСТ 25462-82. Волоконная оптика. Термины и определения. 1982. 3 С.
2. ГОСТ 26814-86. Кабели оптические. Методы измерения параметров. 1987. 32 С.
3. ГОСТ 26599-85. Системы передачи волоконно-оптические. Термины и определения. 1985. 15 С.
4. Ворожцов, Б.И. Электрические свойства плавленого кварца / Б.И. Ворожцов // Известия Томского политехнического института, 1958, Т. 95, С. 314-324.
5. Гауэр, Дж. Оптические системы связи / Дж. Гауэр. М.: Радио и связь. 1989. – 504 С.
6. Miya, T. Ultimate low-loss single-mode fiber at 1.55 μ m / T.Miya, Y.Terunuma, T.Nosaka, T.Miyashita // Electron. Lett., 1979, v.15, p.106-108.
7. Арбузов, В.И. Основы радиационного оптического материаловедения / В.И. Арбузов. Учебное пособие. СПб: СПбГУИТМО. 2008. – 284 С.
8. Портнов, Э.П. Оптические кабели связи и пассивные компоненты волоконно-оптических линий связи / Э.П. Портнов. – М.: Изд-во «Горячая линия - Телеком», 2007, 464 С.
9. Лихачев, М.Е. Коэффициенты рэлеевского рассеяния в высоколегированных одномодовых германо- и фосфоро-силикатных световодах / М.Е. Лихачев, В.Ф. Хопин, М.Ю. Салганский, Г.В. Зеньковский, М.М. Бубнов // Электронный журнал «Исследовано в России», 2005, С. 67-77

- 10.ГОСТ Р МЭК 793-1-93. Волокна оптические. Общие технические требования. 1994. 108 С.
- 11.Цаплин, А.И. Методы измерений в волоконной оптике: учеб. пособие / А.И. Цаплин, М.Е. Лихачев; под общ. ред. д-ра техн. наук., проф. А.И. Цаплина. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2011. – 227 с.
- 12.Вишератина, А.К. Введение в спектроскопию наноструктур. Лабораторный практикум / А.К. Вишератина, А.П.Литвин, А.О. Орлова // СПб: Университет ИТМО, 2016. – 57 С.
- 13.Земский В.И., Колесников Ю. Л., Мешковский И. К. Физика и техника импульсных лазеров на красителях. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2005.–176 с.
- 14.Курков, А.С. Эрбиевые волоконно-оптические усилители / А.С. Курков, О.Е. Наний / Lightwave Russian Edition, 2003, №1, С. 14-19.
- 15.Winkler, C. Loss calculation in bent multimode optical waveguides / C. Winkler, J.D. Love, A.K. Ghatak // Opt. Quant. Elect., 1979, V. 11, p. 173-183.
- 16.Love, J.D. Power attenuation in bent multimode step-index slab and fibre waveguides / J.D. Love, C. Winkler // Electron. Lett., 1978, V. 14, p. 32-34.
- 17.Снайдер А. Теория оптических волноводов / А. Снайдер, Дж. Лав. М.: Радио и связь, 1987. – 656 С.
- 18.Янке, Е. Специальные функции. Формулы, графики, таблицы / Е. Янке, Ф. Эмде, Ф. Леш. М.: Наука, 1977.- 344 С.

Оглавление

	Введение	3
1	Общие сведения о затухании излучения в волоконных световодах	4
2	Классификация типов потерь	6
3	Проблемы метрологического обеспечения измерений коэффициента затухания	15
4	Методы измерения затухания по ГОСТ Р МЭК 793-1-93	17
5	Метод обрыва по ГОСТ Р МЭК 793-1-93	20
6	Типичные характеристики кварцевых оптических волокон	26
7	Работа №1. Измерение затухания в кварцевых волоконных световодах	27
8	Работа №2. Измерение затухания в пластиковых оптических кабелях	33
9	Работа №3. Измерение затухания в оптических волокнах методом обратного рассеяния	41
10	Работа №4. Измерение затухания во флуоресцирующих оптических волокнах методом бокового освещения	50
11	Работа №5. Измерение затухания в волоконных световодах на изгибах	61
12	Библиографический список	68