

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М. В. Ломоносова
Научно-исследовательский институт ядерной физики
имени Д. В. Скобельцына

В.Г. Воронин, О.Е. Наний, А.Н. Туркин,
В.И. Хлыстов, В.А. Камынин

**ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ПОТЕРИ В ЭЛЕМЕНТАХ
ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ СВЯЗИ**

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М. В. Ломоносова
Научно-исследовательский институт ядерной физики
имени Д. В. Скобельцына

В.Г. Воронин, О.Е. Наний, А.Н. Туркин,
В.И. Хлыстов, В.А. Камынин

ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ПОТЕРИ В ЭЛЕМЕНТАХ
ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ СВЯЗИ

Методическое и учебное пособие

2012

Воронин В.Г. и др.

Интегральные потери в элементах волоконно-оптических линий связи./ В.Г. Воронин, О.Е.Наний, А.Н. Туркин, В.И. Хлыстов, В.А. Камынин – М.: 2012. –51 с.: ил.

Работа посвящена изучению потерь, методов их измерения и приобретению навыков практической работы с элементами волоконно-оптических линий связи

НИИЯФ МГУ, 2012

МГУ, 2012

В.Г. Воронин, О.Е.Наний,
А.Н. Туркин, В.И. Хлыстов,
В.А. Камынин, 2012.

2012.

Содержание

1. Введение	4
2. Потери в волоконно-оптических линиях связи	6
3. Устройство и принцип работы волоконных	8
световодов	
4. Потери в волоконных световодах	18
5. Потери в соединениях.....	28
6. Потери на ввод и вывод излучения	35
7. Спекл-структура.....	37
8. Методы измерения оптических потерь	38
9. Описание экспериментальной установки	42
10. Упражнения.....	45
11. Вопросы к задаче	50
12. Литература.....	51

Введение

Волоконно-оптическая линия связи предназначена для передачи информации из одной точки пространства в другую. Основными компонентами такой линии являются: передатчик с устройством ввода излучения в волоконный световод (ВС), волоконно-оптический кабель, представляющий собой один или несколько ВС в защитных оболочках, приемник сигналов, а также соединители (коннекторы), предназначенные для соединения ВС между собой.

Распространение света в ВС основано на явлении полного внутреннего отражения (ПВО). Это явление было известно еще в XIX веке. Первые стеклянные волокна без оболочки были изготовлены в 20-х годах прошлого столетия, однако фактически развитие волоконной оптики начинается только в 50-е годы, когда использование оболочечного слоя привело к значительному улучшению характеристик световодов. С тех пор как в 1970 году в США фирмой "Кернинг Гласе" было создано оптическое волокно с ослаблением около 20 дБ/км, т. е. в 100 раз на 1 км, началось развитие волоконно-оптических линий связи.

Первоначально передача информации по волоконно-оптическим кабелям использовалась только в научно-исследовательских системах, потом были проложены линии связи между АТС в городах, а затем началось строительство междугородных и международных оптических кабельных магистралей. В последнее десятилетие массово строят морские и океанские

межматериковые линии связи. С другой стороны, волоконные кабели используются также в локальных сетях связи, для объединения нескольких суперкомпьютеров в вычислительные кластерные комплексы. С развитием интерактивного видео оптические волоконные линии протянутся практически к каждому персональному компьютеру или к «интеллектуальному» телевизору.

ВС в виде жгутов и одиночных нитей применялись и раньше, однако, из-за высоких потерь (>1000 дБ/км) их использование ограничивалось некогерентной передачей света на расстояния порядка метра. Резкое снижение уровня потерь дало мощный импульс к расширению областей применений ВС, а это стимулирует, в свою очередь, совершенствование технологии изготовления и разработку ВС новых типов, имеющих нужные, специально подобранные характеристики.

Целью настоящей работы является ознакомление с механизмом и основными источниками потерь в волоконно-оптических линиях связи, изучение способов измерения этих потерь и приобретение навыков практической работы с элементами волоконно-оптических линий связи.

Потери в волоконно-оптических линиях связи.

Потери в линии связи являются одной из важнейших характеристик, определяющих ее работоспособность. Так потери в волоконных световодах являются одним из факторов, ограничивающих дальность передачи информации без использования ретрансляторов. При типичных значениях мощности источников сигнала и чувствительности приемников по отношению к слабым сигналам в волоконно-оптических линиях связи допустимыми считаются потери 99,9% мощности. Потери в волоконно-оптической линии связи характеризуются величиной затухания сигнала, которую принято измерять в децибелах (дБ). Децибел - важное понятие, которое используется не только в волоконной оптике, но и в целом в электронике для выражения усиления или затухания в системе или в ее компонентах. Выражение для затухания Z оптического сигнала в произвольной оптической системе по мощности в децибелах определяется следующим выражением:

$$Z = -10 \lg \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right)$$

где P_{in} - мощность светового излучения на входе в оптическую систему, P_{out} - на выходе из нее.

Полные потери в волоконно-оптической линии связи складываются из:

- потерь на затухание света при распространении по ВС,
- потерь на соединениях световодов и на других пассивных элементах линии связи,
- потерь на ввод излучения в ВС.

Устройство и принцип работы волоконных световодов.

Волоконный световод в простейшем варианте представляет собой длинную гибкую нить, сердцевина которой из высокопрозрачного диэлектрика с показателем преломления n_c окружена оболочкой с показателем преломления $n_o < n_c$. Показатель преломления оптической оболочки менее чем на 1% меньше показателя преломления сердцевины. Характерные величины показателей преломления для кварцевых волокон - 1,47 для сердцевины и 1,46 для оболочки. Распространение света в волоконных световодах (ВС) основано на явлении полного внутреннего отражения (ПВО) и поясняется рис.1. Основная часть световой энергии сосредоточена в сердцевине. Лучи света, падающие на поверхность раздела сердцевины и оболочки под углом, большим угла полного внутреннего отражения, полностью отражаются от границы раздела сердцевины и оболочки. Последовательно многократно отражаясь от границ, свет распространяется вдоль оси световода. Типичные размеры ВС показаны на рис.2. Первый световод – одномодовый, остальные – многомодовые.

В ВС круглого сечения различают два типа лучей: меридиональные, пересекающие после каждого отражения продольную ось Z , и косые (асимметричные) или скользящие. Траектория скользящих лучей представляет собой ломаную спираль, раскручивающуюся вокруг центральной оси.

Волокна имеют дополнительную защитную оболочку вокруг оптической оболочки. Защитная оболочка выполняется из полимерного материала и не влияет на процесс распространения света в ВС, а всего лишь предохраняет сердцевину и оболочку от неблагоприятных воздействий окружающей среды, в том числе от механических повреждений.

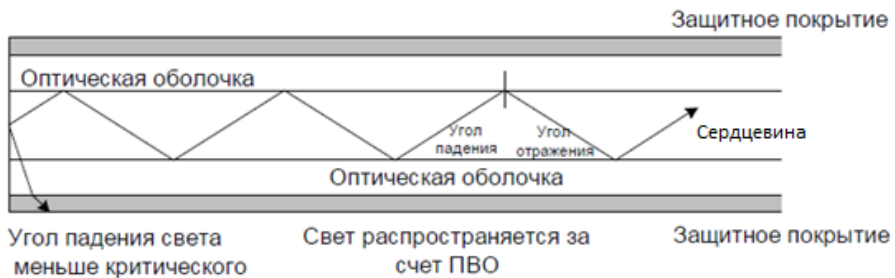


Рис. 1 Полное внутреннее отражение в оптическом волокне.

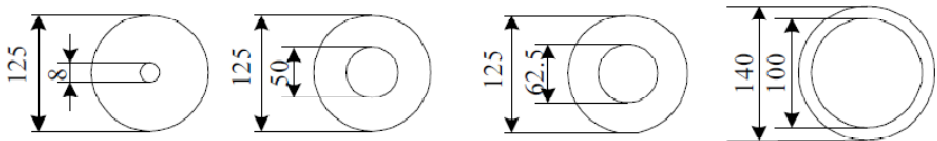


Рис. 2 Типичные диаметры сердцевины и оптической оболочки. Размеры указаны в мкм.

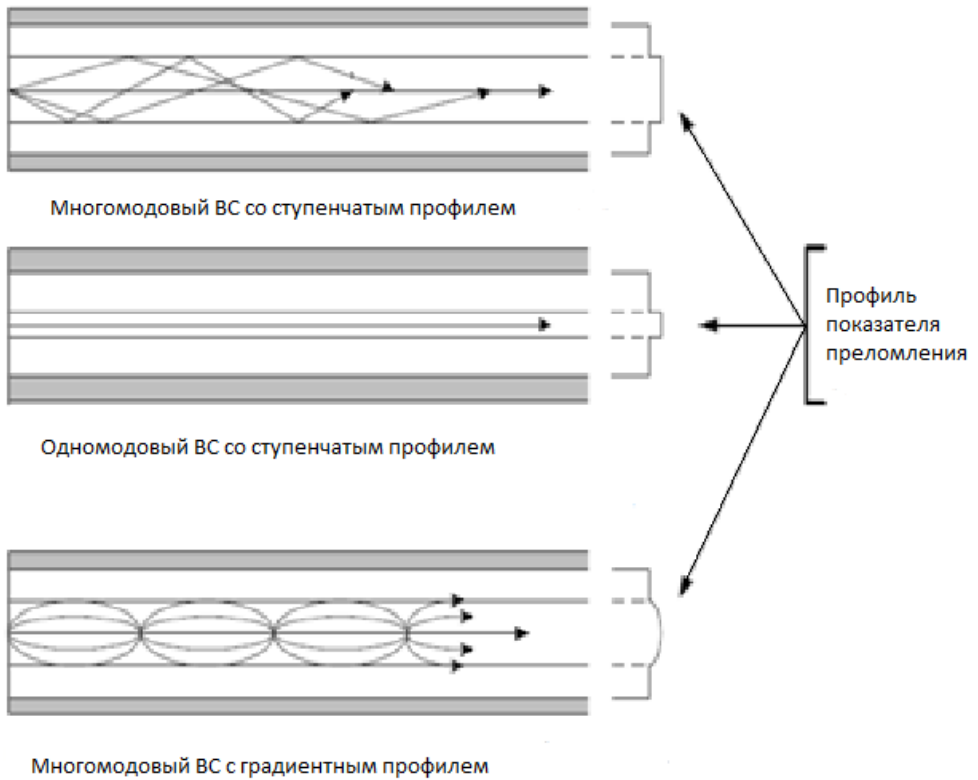


Рис. 3 Распространение света в различных волоконных световодах.

Одним из параметров, характеризующим лучевую картину распространения света в ВС, является числовая апертура NA:

$$NA = \sin(\alpha_{\max}) = \sqrt{n_c^2 - n_o^2} \cong \sqrt{2n\Delta n}$$

где $\Delta n = n_c - n_o \ll n$, α_{\max} - максимальный угол падения светового луча на торец световода, при котором

еще выполняется условие ПВО, т.е. при котором угол падения на границу θ больше угла $\theta_{\text{ПВО}}$:

$$\theta > \theta_{\text{ПВО}}, \sin \theta_{\text{ПВО}} = n_o / n_c$$

Лучевая картина (см. рис.3) дает лишь простейшее представление о процессе распространения света в волоконном световоде.

В процессе распространения световых волн по ВС существенную роль играют волновые явления интерференции и рассеяния света. На границе, в местах соединения и при вводе излучения в ВС важен учет дифракционных явлений. Поэтому при рассмотрении распространения света в волоконном световоде необходимо учитывать волновые эффекты.

С волновой точки зрения процесс распространения каналированного в ВС светового пучка в самом общем случае определяется двумя эффектами: дифракционным расплыванием в поперечном направлении и его сжатием, связанным с уменьшением показателя преломления на периферии пучка (дифракцией и рефракцией). Волновые пучки, имеющие выделенные распределения поля в поперечном сечении, называются модами распространения волоконных световодов. Моды распространения волоконных световодов или просто световодные моды характеризуются определенными, не изменяющимися во времени и пространстве распределениями амплитуд электрического и магнитного полей в поперечном сечении. Скорости распространения различных мод различны и зависят от частоты (длины волны), вида моды, размеров и

структуры световода. Структура мод низшего порядка ВС показана на рис.4.

В волноводах любого типа число мод распространения уменьшается с увеличением длины световой волны. Только одна фундаментальная мода может теоретически существовать в ВС при любой длине волны света λ . Максимальная длина волны, при которой в ВС наряду с фундаментальной модой существует еще одна мода, называется длиной волны отсечки $\lambda_{кр}$. Разработано много различных типов ВС, в которых в рабочем диапазоне длин волн поддерживается только одна фундаментальная мода. ВС, поддерживающие только одну фундаментальную моду в некотором диапазоне длин волн, называются одномодовыми для этого диапазона длин волн. С уменьшением длины световых волн до значений меньше критической длины волны ($\lambda < \lambda_{кр}$) в ВС появляются моды более высокого порядка и ВС становятся многомодовыми.

Более детальное рассмотрение распространения света в волокне основано на том, что свет – это электромагнитная волна и его распространение в световодах подчиняется системе волновых уравнений.

$$\Delta \vec{E} - \left(\frac{kn_j}{\omega} \right)^2 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0$$

(1)

$$\Delta \vec{H} - \left(\frac{kn_j}{\omega} \right)^2 \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} = 0$$

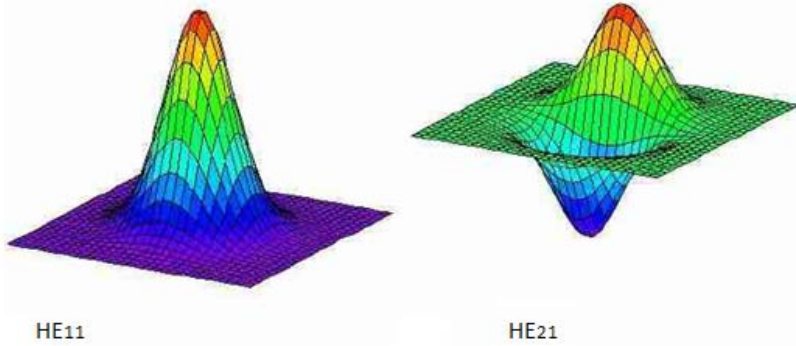


Рис. 4 Структура мод низшего порядка.

следующих из уравнений Максвелла. Фактически в системе (1) содержится 6 уравнений для декартовых компонент полей \vec{E} и \vec{H} как для сердцевина с показателем преломления $n_j = n_e$, так и для оболочки – $n_j = n_o$. Отметим, что в силу наклонного падения волн на границу сердцевина - оболочка, электрические и магнитные поля имеют отличные от нуля продольные компоненты E_z и H_z

Моды световода обозначаются EH, если магнитная продольная компонента превышает электрическую $\left(\frac{H_z}{H} > \frac{E_z}{E}\right)$, или HE, если электрическая продольная компонента превышает магнитную $\left(\frac{E_z}{E} > \frac{H_z}{H}\right)$.

Решением системы уравнений (1) являются бегущие вдоль оси Z электромагнитные волны с плоским фазовым фронтом и неоднородным распределением амплитуды в плоскости x, y , не зависящим от Z . Это моды распространения или световодные моды:

$$\vec{E}(x, y, z, t) = \vec{n}E_0(x, y)e^{i(\omega t - \beta z)}, \quad (2)$$

где β - постоянная распространения волны вдоль оси Z .

При подстановке выражения (2) в (1) для электрической продольной компоненты, которая одинакова как в декартовой, так и в цилиндрической системе координат, получаем

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} E_z + \frac{\partial^2}{\partial y^2} E_z + (k_j^2 - \beta^2) E_z = 0 \quad (3)$$

где $k_j = \omega n_j / c$

Уравнение (3) аналогично уравнению Шредингера в квантовой механике. Следовательно, аналогично тому, как в квантовой механике отлична от нуля вероятность нахождения частицы за границей потенциального барьера, в волоконной оптике на границе сердцевины и оболочки поле не равно нулю. Оно проникает в оболочку и спадает по мере удаления от границы сердцевина - оболочка.

Поперечные компоненты поля моды круглого световода E_x и E_y в цилиндрической системе координат выражаются следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} E_x \\ E_y \end{array} \right\} \sim J_{l \mp 1} \left(U_{lp} \frac{r}{a} \right) \left\{ \begin{array}{l} \mp \cos(l \mp 1)\varphi \\ \sin(l \mp 1)\varphi \end{array} \right\}, \quad 0 \leq r \leq a$$

(4)

$$\left\{ \begin{array}{l} E_x \\ E_y \end{array} \right\} \sim K_{l \mp 1} \left(W_{lp} \frac{r}{a} \right) \left\{ \begin{array}{l} \mp \cos(l \mp 1)\varphi \\ \sin(l \mp 1)\varphi \end{array} \right\}, \quad r > a$$

$J_{l \mp 1}$ - функция Бесселя, определяющая осциллирующую по r радиальную зависимость поля в сердцевине.

$K_{l \mp 1}$ - модифицированная цилиндрическая функция (Макдональда), определяющая поле в оболочке, быстро спадающее вдоль r .

При достаточно больших значениях аргумента функция K ведет себя как затухающая экспонента

$$K \left(W_{lp} \frac{r}{a} \right) \rightarrow \exp \left(-W_{lp} \frac{r}{a} \right) \text{ при } W_{lp} \frac{r}{a} \gg 1$$

т. е. поле, проникающее в оболочку, экспоненциально спадает по мере удаления от границы.

Верхние знаки в формулах (4) соответствуют полям мод, обозначаемым HE_{lp} , нижние знаки - модам EH_{lp} . Число $l = 0, 1, 2, \dots$ - азимутальный индекс. Величина $l \pm 1$ показывает количество радиальных направлений, вдоль которых любая из компонент E_x или E_y обращается в ноль. Число $p = 1, 2, \dots$ - радиальный индекс, показывающий

количество экстремумов в радиальном направлении поля моды.

Величины U_{lp} и W_{lp} - поперечные волновые числа сердцевин и оболочек. Из выражений (4) следует, что U_{lp} и W_{lp} - это значения аргументов функций Бесселя и Макдональда на границе сердцевин и оболочек, т.е. при $r = a$. Поперечные волновые числа сердцевин и оболочек связаны соотношением:

$$U^2 + W^2 = V^2, \quad (5)$$

где V - нормализованная частота.

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_c^2 - n_o^2} = ak\sqrt{n_c^2 - n_o^2} = akNA \quad (6)$$

где NA - числовая апертура световода.

В случае $V < 2,405$ световод одномодовый, для $V > 2,405$ - световод многомодовый. Для $V \gg 1$ полное количество мод M можно оценить по формуле $M \cong V^2/2$. Если $V \gg 1$, то для мод далёких от отсечки, для которых $V_{кр} \ll V$ ($V_{кр}$ - нормализованная частота, при которой возникает соответствующая мода), значение поперечного волнового числа сердцевин на границе сердцевина-оболочка вычисляется на основе выражения:

$$U_{lp} \approx U_{lp}^0 \cdot \exp\left(-\frac{1}{V}\right) \approx U_{lp}^0 \cdot \left(1 - \frac{1}{V}\right)$$

U_{lp}^0 - это p корень уравнения $J_{l-1}(U) = 0$ для мод HE и $J_{l+1}(U) = 0$ для мод EH .

Нумерация корней начинается с первого ненулевого корня. Определив U_{lp} , можно найти постоянную распространения β_{lp} .

$$\beta_{lp}^2 = k^2 n_c^2 - U_{lp}^2 / a^2 = k^2 n_0^2 + W_{lp}^2 / a^2 \quad (7)$$

Если в круглых световодах распределение поля определяется цилиндрическими функциями Бесселя, то в плоских световодах - гармоническими функциями.

Поле в плоском световоде $\left(-\frac{a}{2} \leq x \leq \frac{a}{2}; -\infty \leq y \leq +\infty\right)$

имеет вид

$$E(x) = \sqrt{C_0} \cos(hx), \text{ для } -\frac{a}{2} \leq x \leq \frac{a}{2} \quad (8)$$

$$E(x) = \sqrt{C_0} \cos(ha/2) \exp[-q(|x| - (a/2))], \quad \text{для } |x| > \frac{a}{2},$$

где q и h - определяются из выражений

$$q^2 = \beta^2 - k^2 n_0^2; h^2 = k^2 n_c^2 - \beta^2 \quad (9)$$

β - постоянная распространения волны вдоль оси Z . Из выражений (4) для круглого световода и (8) для плоского световода следует, что поле моды заходит в оболочку и проникает в неё в принципе бесконечно далеко.

Потери в волоконных световодах.

Потери в ВС состоят из:

1. потерь на межзонное и примесное поглощение;
2. потерь на рассеяние на неоднородностях волокна;
3. потерь на изгибах волокна.

Потери на межзонное и примесное поглощение.

Собственное поглощение кварцевого стекла определяется поглощением квантов света, при котором энергия фотона переходит либо в энергию электронной подсистемы молекулы SiO_2 , либо в ее колебательную энергию. Первый тип поглощения соответствует электронному спектру поглощения, а второй – колебательному.

Спектр собственного электронного поглощения кварцевого стекла лежит в ультрафиолетовой области ($\lambda < 0,4 \text{ мкм}$). Колебательный спектр лежит в инфракрасной области ($\lambda > 7 \text{ мкм}$). Поскольку структура кварцевого стекла аморфная, полосы поглощения имеют размытые границы, а их «хвосты» заходят в видимую и ближнюю инфракрасную область спектра. В диапазоне длин волн 1,3-1,6 мкм потери, вызванные собственным поглощением, имеют порядок 0,03 дБ/км.

Примесное поглощение вызывается поглощением фотонов примесями с возбуждением уровней частиц примеси. Примеси в виде ионов металлов переходной группы, таких как железо, медь, никель, марганец и хром вызывают сильное поглощение на длинах волн в диапазоне 0,6-1,6 мкм. Для того чтобы уровень потерь был ниже 1 дБ/км, количество примесей должно быть менее одной части на миллиард.

Основной поглощающей примесью в волокнах являются молекулы воды. При взаимодействии с матрицей кварца молекула воды диссоциирует с образованием ионов водорода и группы ОН. Центральная длина волны колебательной полосы поглощения группы ОН равна 2,73 мкм. Гармоники и комбинационные частоты с кварцевой матрицей вызывают сильное поглощение на длинах волн 1,39, 1,24 и 0,95 мкм. Как правило, для того чтобы получить волокно с низкими потерями, концентрацию ионов ОН необходимо снизить до уровня 10^{-8} .

Наибольший интерес для целей передачи информации представляет световое излучение с длинами волн 0,85, 1,31 и 1,55 мкм. Поскольку эти длины волн расположены между зонами поглощения, то затухание для них минимально. Области вокруг приведенных длин волн называются первым, вторым и третьим окнами прозрачности.

Дополнительные потери вызываются и такими легирующими примесями, как GeO_2 , P_2O_5 и B_2O_3 , которые используются при изготовлении волокна для изменения показателя преломления кварцевого стекла.

На рис. 5 приведен график зависимости затухания типичного волокна от длины волны. Из рис. 5 следует, что в кварцевом волокне минимальный уровень потерь достигается на длине волны 1,55 мкм.

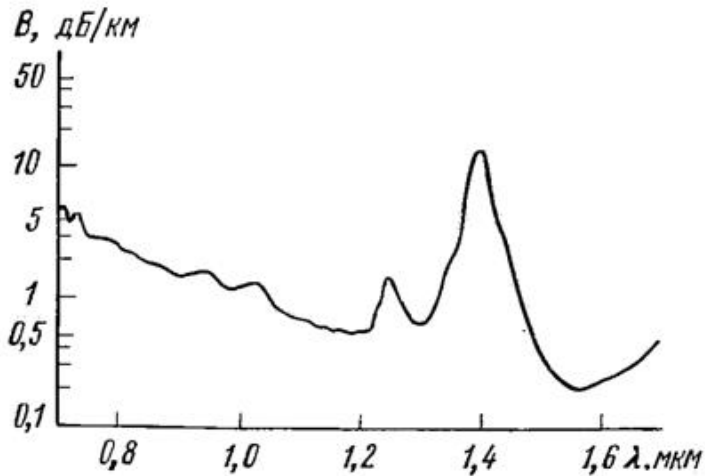


Рис. 5 Спектр потерь в оптических волокнах.

Потери из-за рассеяния

Свет, распространяясь по световоду, испытывает рассеяние на неоднородностях. В основном, размеры неоднородностей много меньше длины волны излучения, поэтому основной вклад вносит рэлеевское рассеяние, вызванное неоднородностями показателя преломления. Потери за счет рэлеевского рассеяния - один из фундаментальных механизмов потерь. Эти неоднородности возникают в расплавленном кварце из-за хаотического движения молекул в расплавленном состоянии. При затвердевании волокна неоднородности,

возникшие в расплавленной фазе, застывают на своих местах, как бы «вмораживаясь» в структуру кварцевого стекла. Колебания плотности приводят к случайным флуктуациям показателя преломления в масштабе, меньшем чем длина световой волны. Потери, обусловленные рэлеевским рассеянием, пропорциональны $\sim \frac{1}{\lambda^4}$ и, следовательно, преобладают в области коротких длин волн. Поскольку эти потери принципиально неустранимы для волоконных световодов, они определяют уровень минимальных потерь. Он оценивается как

$$\alpha_R \sim \frac{C}{\lambda^4} \text{ (дБ/км)}, \quad (10)$$

где постоянная C находится в пределах 0,7 - 0,9 $\frac{\text{дБ} \cdot \text{мкм}^4}{\text{км}}$ в зависимости от состава кварцевой сердцевины волоконного световода. На длине волны $\lambda = 1.55 \text{ мкм}$ $\alpha_R = 0.12 - 0.15 \text{ дБ/км}$. Эта величина и определяет теоретический минимальный уровень потерь.

Потери на изгибах волокна

При практическом использовании световод неизбежно приходится изгибать. Сохранение световедущих свойств волокна при изгибах и является как раз одним из важнейших и привлекательных свойств ВС. Изгибы, однако, вносят принципиально неустранимые потери, поскольку волноводная структура открыта с боков и свет излучается даже при очень толстой оболочке. Разберем механизм потерь на изгибе с помощью простейших моделей (рис. 6).

На основе геометрической оптики объяснить потери на изгибах можно с помощью рис 6 а. Из рисунка следует, что в изогнутом волокне угол падения луча на границу сердцевина оболочка уменьшается, может стать меньше угла полного внутреннего отражения и излучение выходит из сердцевины.

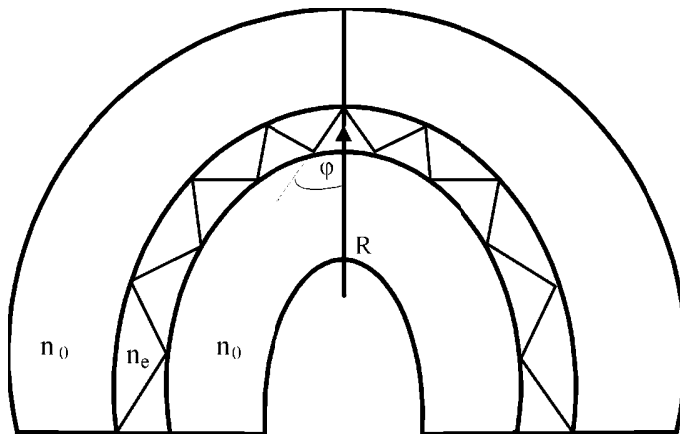


Рис. 6а. Геометро-оптическая модель потерь на изгибе волоконного световода.

Для количественного определения зависимости потерь от радиуса изгиба, параметров световода и длины волны излучения, необходимо обратиться к волновому представлению света. Как следует из выражений (4) для круглого и (8) для плоского световодов, поле моды из сердцевины проникает в оболочку. На рис. 6 б. показано распределение поля моды, заходящее в оболочку для изогнутого световода.

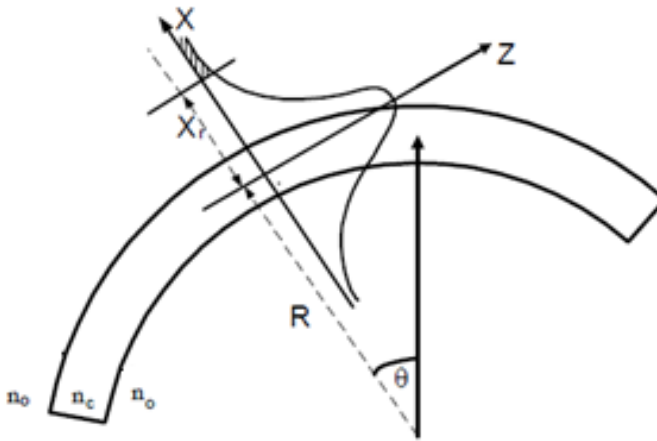


Рис. 6б. Волновая модель потерь на изгибе волоконного световода.

При изгибе световода тангенциальная составляющая фазовой скорости волн света в криволинейном участке должна быть пропорциональна расстоянию от центра кривизны, так как в противном случае фазовый фронт не будет сохраняться (рис. 6 б).

Рассмотрим волноводную моду, которая распространяется по отрезку окружности радиусом R с постоянной распространения β_C . Имеется определенный радиус $(R+X_r)$, за которым фазовая скорость должна быть больше скорости света в оболочке - c/n_0 , чтобы сохранился фазовый фронт волны. (c - скорость света в вакууме).

Так как производная $d\mathcal{G}/dt$ должна быть одинаковой для всех волн вдоль фазового фронта, то имеем два равенства

$$(R + X_r) d\mathcal{G}/dt = \omega / \beta_0 \tag{11}$$

$$R \cdot d\mathcal{G}/dt = \omega / \beta_C$$

где ω / β_0 - фазовая скорость волны в оболочке на расстоянии $R + X_r$ от центра изгиба, ω / β_C - фазовая скорость в световоде на расстоянии R от центра изгиба, $\beta_0 = c / n_0$ - постоянная распространения неканализированного излучения в оболочке, так как фазовая скорость канализированного излучения должна быть меньше c/n_0 . β_C - постоянная распространения излучения в сердцевине на расстоянии радиуса R . Из выражений (11) получаем

$$X_r = [(\beta_C - \beta_0) / \beta_0] R \tag{12}$$

Процесс выхода из сердцевины световода в пограничные области можно представить следующим образом. Фотоны оптической моды, находящиеся на расстоянии, большем $R + X_r$, не могут распространяться со столь большой скоростью, чтобы поспевать за другими фотонами данной моды. Поэтому они отделяются от пучка и уходят в оболочку. Оценка длины, на которую должны уйти фотоны, чтобы их можно было считать потерянными для световодной моды, задается выражением

$$Z_c = a^2 / 2\lambda_l \quad (13)$$

где a - ширина пучка,

λ_l - длина волны излучения в оболочке.

Выражение (13) фактически равно дифракционной длине пучка размером a .

Коэффициент ослабления излучения α из выражения $P = P_0 \exp(-\alpha Z)$ равен

$$\alpha = \frac{\text{потери мощности на единицу длины}}{\text{прошедшая по световоду мощность}}$$

или же как

$$\alpha \cong (1/P_t) \cdot (P_l/Z_c), \quad (14)$$

где P_t - полная мощность световода, P_l - мощность в хвосте моды, заходящим за X_r (т.е. мощность, теряемая за

счёт выхода излучения из канала световода в пределах длины Z_c) Для плоского световода

$$P_l = \int_{x_r}^{\infty} E^2(x) dx \quad (15)$$

$$P_l = \int_{-\infty}^{+\infty} E^2(x) dx$$

где P_t и P_l берутся на основе выражений (8). Подставляя выражения (15) в (14) имеем

$$\alpha = C_1 \exp(-C_2 R), \quad (16)$$

где C_1 и C_2 - постоянные, зависящие от размеров световода, формы оптической моды и длины волны излучения.

Важным в выражении (16) является то, что коэффициент излучательных потерь экспоненциально зависит от радиуса кривизны. Основным фактором, определяющим потери, является соотношение глубины проникновения поля в оболочку и радиуса изгиба. Поэтому потери растут с уменьшением V , Δn и R/a . Для мод старших порядков потери увеличиваются быстрее, чем для младших.

С уменьшением R потери резко растут, но сами их величины таковы, что при не слишком крутых изгибах ими

можно пренебречь по сравнению с другими видами потерь ВС. Начиная с некоторого достаточно малого радиуса, потери на изгибе становятся доминирующими.

Чтобы получить представление о порядках величин потерь и требованиях к "плавности" изгиба, приведем численный пример. Для типичного одномодового ВС ($V = 2.4$; $\Delta n = 0.005$) дополнительные потери $Z < 1$ дБ/км, если $R > 1$ см. Изгиб того же световода по дуге $R < 0.5$ см вносит потери $Z > 100$ дБ/км. Указанные значения потерь относятся лишь к длине изогнутого участка.

Потери в соединениях

Основными источниками потерь в соединениях являются:

- Рассогласование апертур.
- Несовпадение размеров и форм сердцевин.
- Боковое смещение сердцевин.
- Зазор между сколами.
- Угловое рассогласование ориентации осей соединяемых ВС.
- Дефекты поверхностей скола.

Потери, связанные с рассогласованием апертур

Потери, связанные с рассогласованием апертур, возникают, если числовая апертура NA_r передающего волокна больше числовой апертуры NA_t принимающего. Различие числовых апертур при соединении однотипных ВС от одного производителя может быть связано с технологически неизбежными вариациями параметров ВС. Типичным значением допустимого изменения числовой апертуры с номинальным значением 0,275 считается величина $\pm 0,015$. Более существенны потери из-за различия числовых апертур при соединении разнотипных ВС, когда числовая апертура передающего волокна больше

числовой апертуры принимающего. Затухание сигнала, связанное с потерями на рассогласование числовых апертур, равно

$$Z_{NA} = 10 \log(N A_r / N A_t)^2 \quad (17)$$

Потери, связанные с несовпадением размеров и форм сердцевин

Потери, связанные с различием диаметров сердцевин, возникают, если диаметр сердцевины dc_r передающего волокна больше диаметра сердцевины dc_t принимающего. Вносимое соединением затухание, связанное с этим эффектом, равно

$$Z_{dc} = 10 \log(dc_r / dc_t)^2 \quad (18)$$

К потерям на соединение приводит также отклонение формы сечения сердцевины от круговой, т. е. ее эллиптичность. Даже при идентичных по форме эллипсах несовпадение их взаимной ориентации приводит к потерям на соединение.

Потери, связанные с боковым смещением сердцевин

Смещение оптической оси одного из волокон относительно оптической оси другого ВС неизбежно приводит к появлению потерь. На рис.7 приведена зависимость потерь от отношения абсолютной величины смещения к диаметру волокна. Очевидно, что абсолютное значение допустимого смещения уменьшается с уменьшением диаметра сердцевин. Поэтому данный вид потерь особенно значителен при соединении одномодовых ВС.

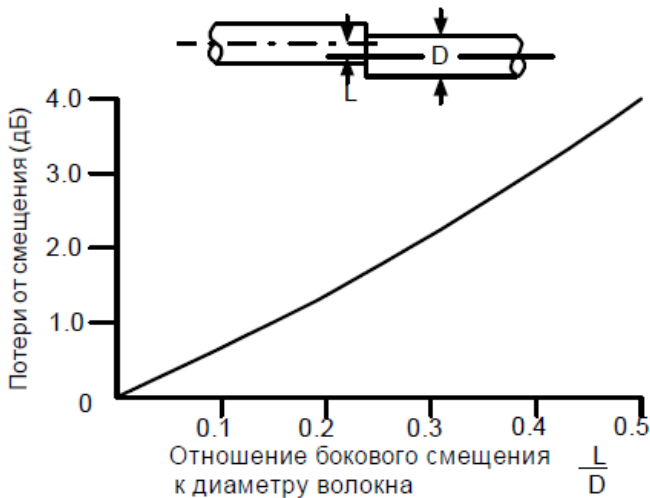


Рис. 7. Зависимость потерь в соединении от отношения абсолютной величины смещения к диаметру волокна.

Относительное смещение в 10% приводит к потерям на уровне 0,5 дБ. Для многомодового волокна с

диаметром сердцевины 50 мкм это соответствует абсолютному значению смещения в 5 мкм. В одномодовом волокне с диаметром сердцевины 8 мкм такое же относительное смещение соответствует относительному рассогласованию всего на 0,8 мкм. Источниками бокового смещения наряду с неточностью взаимного позиционирования ВС являются неконцентричность сердцевины и оболочки, эллиптичность формы сечения оболочки, вариации размеров оболочки.

Потери, связанные с зазором между сколами

При наличии небольшого зазора в соединении двух ВС возникают два вида потерь:

- потери, связанные с френелевским отражением от торцов соединяемых световодов;
- потери, обусловленные расходимостью светового пучка в зазоре.

В стеклянных волокнах, разделенных воздушным зазором, большим по сравнению с длиной волны, суммарные потери от френелевского отражения на выходной и входной гранях ВС составляют 0,34 дБ. Френелевские потери могут быть существенно снижены при уменьшении зазора до величины меньшей длины световой и волны и при заполнении зазора жидкостью с показателем преломления близким к показателю преломления волокна. Такая жидкость называется иммерсионной жидкостью.

Второй вид потерь связан с расширением светового пучка в зазоре между волокнами. Величина потерь, связанная с этим эффектом, зависит от значения числовой апертуры NA ВС. Волокна с большим значением NA более чувствительны к зазору в соединении, чем волокна с меньшим значением NA . Зависимости потерь от зазора между ВС приведены на рис.8.

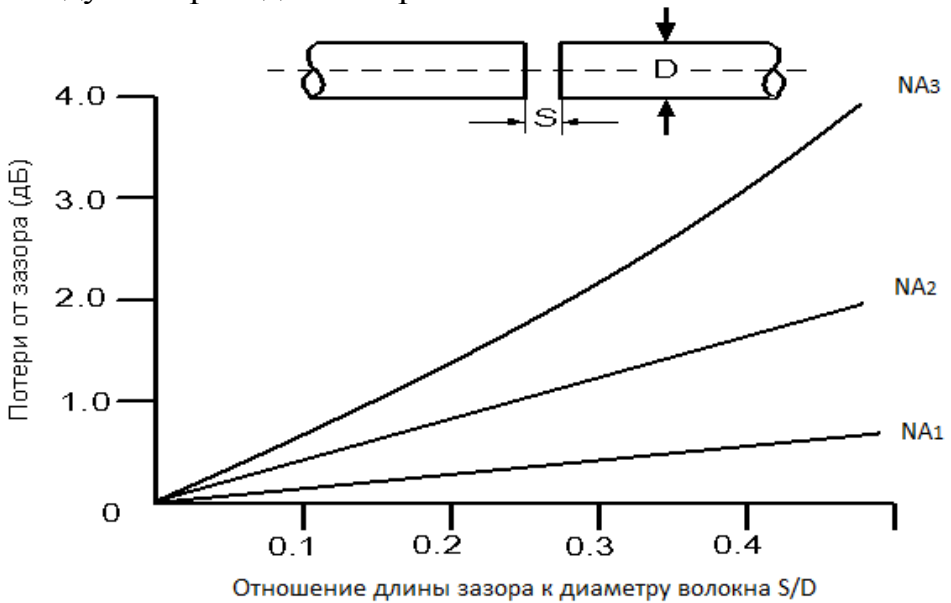


Рис. 8. Зависимость потерь в соединении от отношения абсолютной величины зазора к диаметру волокна ($NA_3 > NA_2 > NA_1$).

Потери из-за углового рассогласования ориентации осей ВС

Сколы обработанных волокон должны быть перпендикулярны осям волокон и параллельны друг другу при соединении. Наличие углового рассогласования соединяемых волокон приводит к появлению потерь. Зависимость величины затухания от углового рассогласования показана на рис.9.

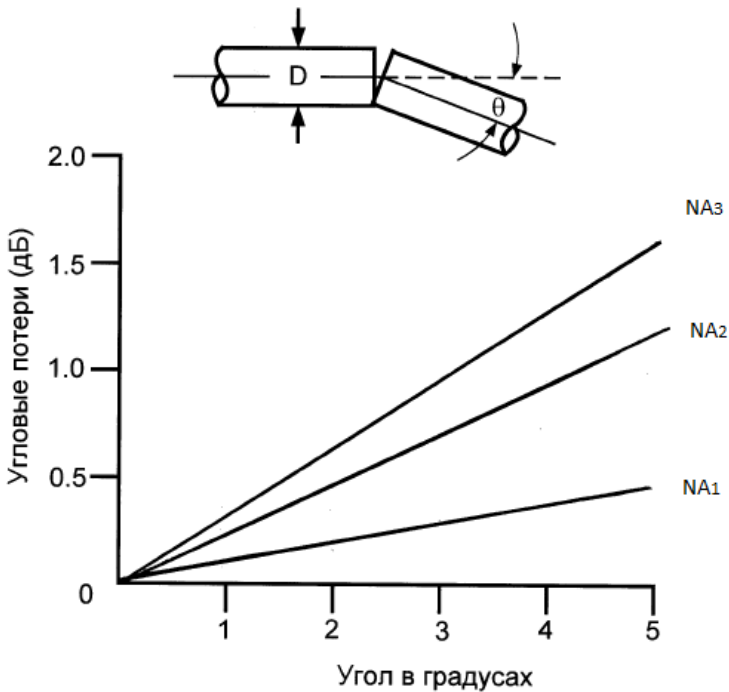


Рис. 9. Зависимость потерь от углового рассогласования осей волокон ($NA_3 < NA_2 < NA_1$).

Данный вид потерь также зависит от величины числовой апертуры соединяемых волокон, однако характер зависимости от NA , в данном случае, противоположен зависимости потерь на зазоре от NA . В случае потерь на угловое рассогласование ВС с большим значением числовой апертуры допускают большее угловое рассогласование, чем волокна с меньшим значением NA , при одинаковом уровне вносимых потерь.

При правильном использовании соединителя угловое рассогласование практически исключается, т. е. связанные с этим эффектом потери существенно меньше потерь, связанных с боковым смещением.

Потери, связанные с дефектами поверхностей скола

Идеальная поверхность скола должна быть гладкой и не содержать дефекты в виде трещин, выбоин и заусенец. Неровная поверхность приводит к потерям из-за рассеяния части падающего света в вытекающие моды и моды оболочки.

Потери на сварных соединениях

Для создания сварного соединения ВС применяется электрическая дуга, позволяющая сварить два волокна между собой. Сварные соединения позволяют добиваться очень точного расположения волокон, устранять потери на френелевское отражение от торцов соединяемых ВС, т. к.

соединение сопровождается плавлением волокон. Все это обеспечивает чрезвычайно низкие потери на уровне 0,05 дБ в современных сварочных аппаратах и практически полное устранение обратных отражений. Основным недостатком сварных соединений является высокая стоимость оборудования для контролируемой компьютером сварки и необходимость высокой квалификации специалистов, производящих сварочные работы. Минимальный уровень потерь, указанный выше, достигается только в случае использования однотипного волокна одного производителя с контролируемым в процессе производства значением диаметра светового поля в ВС, диаметром оболочки и концентричностью волокна.

Плавление и сварка кварцевых ВС осуществляется при температуре около 2000°C. Для этой цели в экспериментах использовался импульсный нагрев в плазме дугового разряда, в пламени водородной микрогорелки или лучом CO₂ лазера. В выпускаемых промышленно сварочных аппаратах в настоящее время используется практически повсеместно только дуговой разряд.

Потери на ввод и вывод излучения.

Чтобы минимизировать потери на ввод и вывод излучения необходимо согласовать апертуры источника излучения и приемника с апертурой волоконного световода. При совместном использовании объёмных элементов и волокна для обеспечения максимальной эффективности необходимо добиться максимального согласования апертур, а также размеров и

позиционирования пятна излучения и сердцевины волокна. Для этого используются специальные оптические элементы, такие как коллиматоры, микрообъективы и т.д.

Кроме согласования апертур оптические элементы обеспечивают на торце световода расположение «перетяжки» пучка. А это, в свою очередь, обеспечивает плоский фазовый фронт волны на входе световода. Из рассмотренной выше картины распространения излучения по волокну следует, что фронт распространяющейся по световоду волны является плоским. Следовательно, совпадение фронтов способствует наилучшему введению излучения в волокно.

При использовании в качестве источников полупроводниковых лазеров дополнительные трудности возникают из-за того, что расходимости излучения различны по взаимно перпендикулярным осям. Однако использование цилиндрической оптики помогает разрешить данную проблему.

Другим способом минимизировать потери является интеграция полупроводникового лазера и волокна. Подобные устройства получили широкое применение в последнее время.

Спекл-структура.

В многомодовых световодах каждая мода распространяется со своей фазовой скоростью и излучение на выходе складывается в результате интерференции многих мод, каждая из которых имеет собственную фазу и сложное распределение амплитуды по сечению. В результате получается неупорядоченная пространственная и поляризационная структура: суммарное поле имеет вид хаотически расположенных освещенных пятен, разделенных темными промежутками. Такое явление называется спекл-структура (от английского “speckle” - пятнышко).

В каждой конкретной точке выходного сечения величина суммарного поля зависит от амплитуд и фаз полей всех приходящих волн. Поэтому результат сложения оказывается весьма чувствительным к внешним воздействиям на волокно, которые изменяют соотношение фаз и амплитуд волн (при механических воздействиях спекл-картина «дышит» - пятнышки премещаются).

В пределах каждого пятнышка излучение остается пространственно когерентным и однородно поляризованным, однако фазы, амплитуды и поляризации полей в соседних пятнах некоррелированы. Поэтому в целом излучение оказывается пространственно некогерентным и деполаризованным даже при строгой монохроматичности.

Методы измерения потерь в оптических волокнах.

При эксплуатации и производстве оптического волокна необходимо вести постоянный мониторинг потерь, так как данная характеристика является одним из определяющих факторов в волоконных линиях связи, посредством которых осуществляется передача большей части информации в настоящий момент.

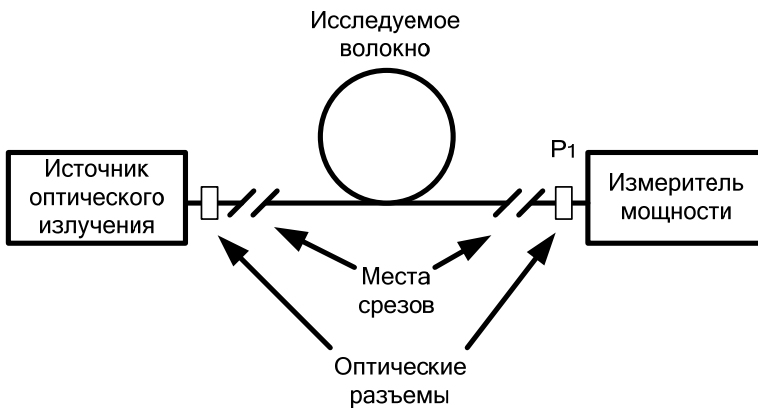
Одним из наиболее распространенных методов измерения потерь является рефлектометрия. Главной особенностью этого способа является то, что при исследовании линии связи можно получить распределение потерь по всей длине волокна. Также для исследования линий связи с помощью рефлектометра необходим всего один свободный торец волокна, что позволяет вносить минимальные изменения в оптическую линию.

Другим не менее важным методом является метод измерения пропускания света волокном, который возможно реализовать двумя способами: методом среза и методом вносимых потерь.

При измерении коэффициента затухания волокна наибольшую точность измерений дает метод среза. В этом методе тестируемый длинный отрезок волокна подключается к источнику излучения, а выходной конец волокна подключается к специальному входу приемника для неоконцованного волокна. Проводятся измерения мощности на приемнике, затем на небольшом расстоянии от передатчика осуществляется срез волокна, свободный конец короткого волокна подключается к приемнику и измеряется мощность. В этом случае условия ввода не

изменяются. Кроме того, вся мощность, выходящая из свободного конца волокна, попадает на приемник. Это обеспечивает устранение погрешностей на ввод и вывод излучения. Недостатком метода среза является необходимость работы со свободным неоконцованным волокном, а также то, что нарушается целостность линии.

А - Начальная схема измерения мощности



Б - Схема определения вводимой в волокно мощности

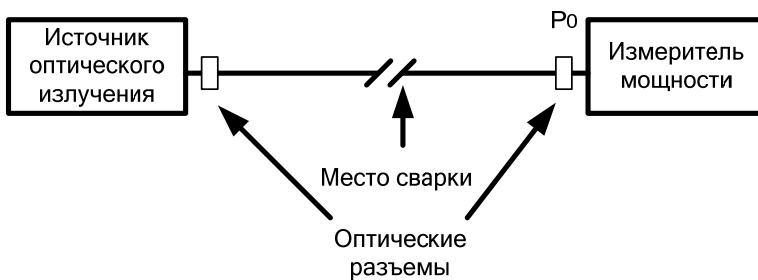


Рис. 10. Модифицированный метод обрыва с использованием сварки

Избежать неудобств работы с неоконцованным волокном позволяет модифицированный метод среза, схема которого приведена на рис.10. В соответствии с модифицированным методом среза, измеряемое устройство соединяют с источником оптического излучения и измерителем мощности (см. рис.10 а). Измеряют мощность излучения p_1 . Затем осуществляют срез соединительных волокон на расстоянии порядка 1 м от источника оптического излучения и от измерителя оптической мощности. Свободные концы волокон от источника и измерителя сваривают между собой. Измеряют мощность излучения p_0 . Величина потерь, вносимых тестируемым устройством, вычисляется по формуле:

$$z = p_1 - p_0 \quad (19)$$

Как было описано выше, метод среза требует изменения длины волокна, поэтому используется в основном при измерении потерь в опытных образцах волокон и в случаях, где нарушение целостности линии допустимо. Поэтому более привлекательным с практической точки зрения является более простой метод измерения потерь – метод вносимых потерь. В этом методе вначале измеряется величина опорной мощности. Затем между измерителем оптической мощности и источником оптического излучения вставляется тестируемое волокно и измеряется величина прошедшей мощности. Величина потерь определяется по формуле:

$$\partial = -\frac{10 \lg P_{out} / P_{in}}{L_2 - L_1} \quad (20)$$

Погрешность измерений этим методом связана с трудностью контроля потерь в местах подключения источника излучения и приемника к тестируемому устройству. Особенно большая погрешность (до 0,3 дБ) возникает при подключении с использованием разъемных соединений (коннекторов). Использование сварных соединений для подключения источника и приемника позволяет существенно (более чем на порядок) снизить погрешность измерений.

В настоящей работе используется метод вносимых потерь. Вначале короткий отрезок волокна подсоединяется к розеткам 1 и 2 (см. рис. 11) и определяется мощность оптической системы (точка Б). Затем на место короткого отрезка подключается катушка волокна и также измеряется мощность на выходе из системы. Удельные потери в волокне измеряются по формуле 20.

Описание экспериментальной установки

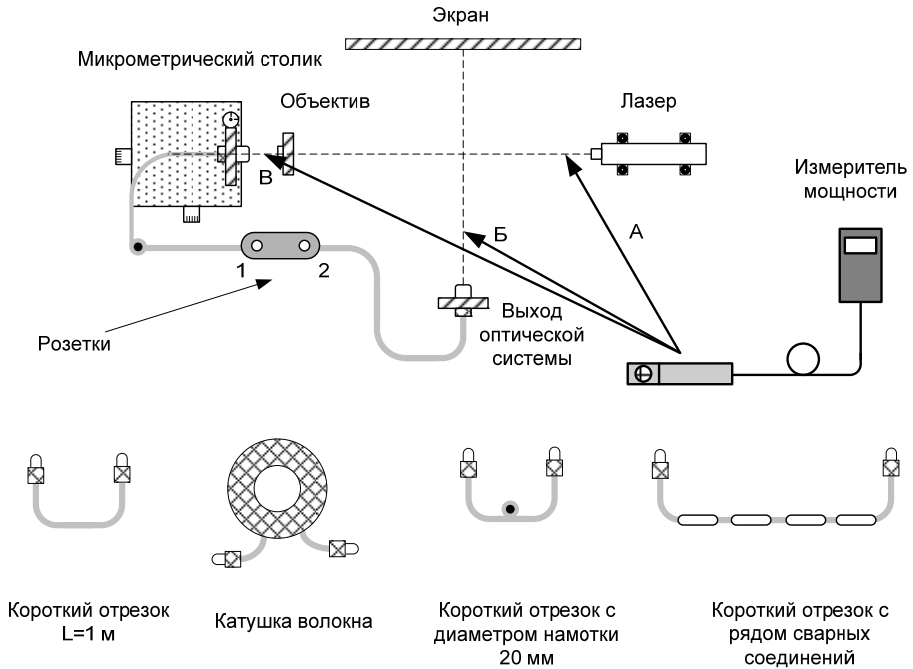


Рис. 11 Экспериментальная установка.

Экспериментальная установка для измерения потерь в волоконно-оптической линии связи показана на рис.11. Установка позволяет производить измерения потерь как в многомодовых, так и в одномодовых световодах. Излучение лазера фокусируется короткофокусным микрообъективом на торец ВС. Юстировочное устройство с микрометрическим столиком позволяет юстировать положение входных торцов ВС по

трем координатам относительно микрообъектива. Установка позволяет измерять мощность световой волны, как падающей на входной торец световода, так и выходящей из световодов различной длины.

Для того, чтобы измерения потерь не зависели от длины измеряемого волокна, на входе устройства устанавливаются: смеситель мод, фильтр мод и съемник мод оболочки. Смеситель мод призван установить стационарное распределение энергии по модам, не зависящее от длины световода, что повышает точность измерений.

Фильтр мод обеспечивает отсежку мод высокого порядка. Фильтр мод имеет форму стержня, на котором намотано испытываемое волокно с небольшим натяжением на расстоянии 20 мм. Диаметр стержня имеет величину в пределах от 18 до 22 мм и имеет пять витков волокна.

Съемник мод оболочки представляет собой устройство, которое обеспечивает преобразование мод оболочки в моды излучения. В результате, моды оболочки удаляются из волокна. Съемник мод оболочки может быть выполнен в виде кюветы, через которую проходит участок волокна (несколько сантиметров) со снятой защитной оболочкой. Кювета заполнена жидкостью, показатель преломления которой больше показателя преломления оболочки волокна (например, глицерин), для того, чтобы исключить условия полного внутреннего отражения для оболочечных мод.

Техника безопасности

При выполнении данной работы часто приходится разъединять волокна и тогда возникает **опасность повредить глаза излучением**. Обусловлено это следующими свойствами излучения:

1. Относительно высокая мощность: до 15 мВт
2. Когерентность лазера и как следствие большая интенсивность света

Для лазерного излучения диаметр пятна на сетчатке не зависит от размеров источника и получается примерно таким, как и диаметр модового пятна в волокне $w = 7\lambda \sim 10$ мкм (рис. 12). Из-за малого диаметра пятна на сетчатке интенсивность света может оказаться слишком большой.

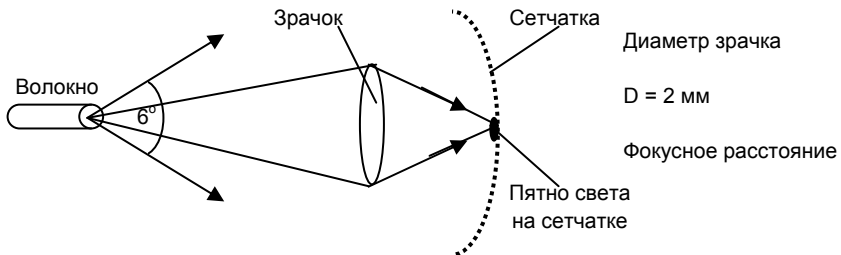


Рис. 12. Схема фокусировки лазерного излучения глазом

Таким образом, смотреть на торец волокна, если нет уверенности, что в волокне нет излучения, нельзя. **Необходимо убедиться в отсутствии излучения.**

Упражнения

Перед выполнением работы необходимо провести расчет нормализованной частоты для приведенных выше волокон на длинах волн:

625 нм, 1310 нм, 1550 нм.

I.Измерение параметров входного сигнала.

1. Установить измеритель мощности в положение «А». Добиться попадания луча лазера на приемник измерителя мощности (ИМ). Провести 5 измерений с периодом 1 мин. Записать полученные значения в таблицу. Найти среднее значение выходной мощности лазера.
2. Установить измеритель мощности в положение «В». Добиться попадания луча лазера на приемник ИМ (не ставя приемник в фокус объектива). Провести 5 измерений с периодом 1 мин. Записать полученные значения в таблицу. Найти среднее значение выходной мощности после микрообъектива.
3. По измерениям из п.1 и п.2 оценить потери на микрообъективе.
4. Для определения апертуры микрообъектива NA_1 измеряется расходимость светового пучка по размеру пятна на измерительном экране, расположенном на известном расстоянии от фокальной плоскости микрообъектива.

$$NA_1 = \frac{D}{2L}$$

где D - диаметр пятна, L - расстояние от фокальной плоскости микрообъектива.

Диаметр фокального пятна микрообъективов оценить по формуле:

$$d \approx \frac{2\lambda}{\pi NA_1}$$

Сравнить полученную величину с диаметром сердцевины измеряемого волокна.

II. Определение коэффициента ввода излучения в волокно.

1. Настройка и юстировка установки для ввода излучения в волокно.

- Подсоединить к оптическим розеткам 1 и 2 короткий прямой отрезок волокна.

- С помощью 3-х координатного микрометрического столика добиться попадания излучения после микрообъектива в торец волокна. На первом этапе в качестве индикатора попадания излучения лазера в волокно рекомендуется использовать визуальное наблюдение на экране света (листочке бумаги около выходного торца), выходящего из торца волокна (положение Б). На втором этапе экран следует заменить на измеритель мощности (ИМ) и при помощи

микрометрического столика добиться максимального значения мощности (более $0,5P_{\text{лазера}}$). Далее необходимо зафиксировать полученный результат аналогично п. I.1.

2. Найдя отношение средних значений в пунктах II.1 и I.2, определить коэффициент ввода излучения после микрообъектива в волокно в линейной и логарифмической шкалах.

III. Определение удельных потерь в оптическом волокне.

1. Перекрыть лазерный луч приемником ИМ.

2. Отсоединить короткий прямой отрезок, подсоединить катушку к оптическим розеткам 1 и 2.

3. Измерить мощность на выходе из оптической системы (положение приемника «Б»). Данные записать в таблицу аналогично п. 1 упр. I. Найти среднее значение выходной мощности.

4. Определить удельные потери в оптическом волокне по формуле 20.

IV. Определение удельных потерь на сварном соединении.

1. Перекрыть лазерный луч приемником ИМ.

2. К розеткам 1 и 2 подсоединить кабель с несколькими сварными соединениями.

3. Провести измерения аналогично предыдущим, поместив приемник ИМ в т. Б

4. Записать полученные результаты в таблицу. Вычислить среднее значение мощности прошедшего излучения.

5. Сравнить полученный результат с мощностью, полученной в упр. II.1. Определив разницу в выходных мощностях, найти значение средней потери мощности на одной сварке.

V. Оценка потерь за счет изгибов волокна.

1. Перекрыть лазерный луч приемником ИМ.

2. Подсоединить к оптическим розетка 1 и 2 волокно, намотанное на цилиндр диаметром 20 мм.

3. Измерить мощность на выходе «Б».

4. Сравнить с мощностью на выходе при присоединении к розеткам 1 и 2 короткого прямого отрезка (пункт II.1). Результат пояснить.

VI. Спекл-структура

Наблюдать спекл-структуру на экране на выходе катушки волокна. Объяснить спекл-картину. Наблюдать изменение спекл-структуры при механическом воздействии на волокно. Оценить средний размер спеклов.

VII. Измерение выходной апертуры волокна.

1. Измеряя диаметр спекл-структуры на экране и расстояние от торца волокна до экрана, определить величину выходной апертуры волокна.

$$NA_2 = \frac{D}{2L}$$

D – диаметр спекл-структуры.

L – расстояние до экрана.

2. Оценить потери из-за разницы апертур микрообъектива и волокна по формуле

$$\partial_T = 20 \lg \frac{NA_1}{NA_2}$$

при $NA_1 > NA_2$, а при $NA_1 \leq NA_2$ $\partial_T = 0$.

3. Дополнительные потери возникают за счет отражением от границы раздела двух сред, их можно оценить по формуле:

$$\partial_d = -10 \lg \frac{4n_1n_2}{(n_1 + n_2)^2}$$

4. Провести анализ коэффициента ввода излучения в волокно в упр. II, используя полученные выше данные.

Вопросы к задаче

1. Конструкция и принцип работы ВС. Числовая апертура.
2. Моды ВС в лучевом и волновом представлении.
3. Основные виды потерь в ВС.
4. Чем определяются потери в фиолетовой и инфракрасной областях спектра в кварцевых световодах?
5. Область наименьших потерь.
6. Причины волноводных потерь (при изгибе).
7. Смеситель мод, фильтр мод, съемник мод - их назначение в установке по определению потерь.
8. Выражение, определяющее потери в ВС.
9. Наименьшее значение потерь в кварцевых световодах (фундаментальные потери) = 0,2дБ/км на $\lambda = 1,55$ мкм. Произвести пересчет этой величины: в потери на 1 км (выразить ответ в процентах %), в коэффициент потерь в см-1 (используя соотношение $P = P_0 \exp(-\alpha Z)$)

Литература

1. А.В. Листвин, В.Н. Листвин, Д.В. Швырков, Оптические волокна для линий связи, М.: ЛЕСАРарт, 2003.
2. О.Е. Наний, А.Н. Туркин “ Оптические методы в информатике”, М., Университетская книга, 2010.
3. В.Г. Воронин, О.Е. Наний “Основы нелинейной волоконной оптики”, М., Университетская книга, 2011.
4. А. Козанне, Ж. Флере, Г.Мэтр, М.Руссо, "Оптика и связь", Москва, Мир, 1984.
5. Р.Хансперджер, "Интегральная оптика", Москва, Мир, 1985.
6. Волоконная оптика, сборник статей. М., ВиКо, 2002.
7. В.Н. Листвин, О.Е. Наний. “Волокно, оптическое”, В сб. «Словарь нанотехнологических и связанных с нанотехнологиями терминов», М., 2010, с.54-55.