

Лабораторная работа №2

Исследование потерь в ВОЛС

Цель работы: исследование механизмов возникновения потерь в ВОЛС, обусловленных различными факторами:

- 1) наличием разъемных соединений;
- 2) наличием изгибов оптического волокна.

Описание оборудования и методики эксперимента: оптические кабели (ВОК), патч-корды с различными комбинациями разъемов, адаптеры типов (ST, FC, LC, SC), устройство задания радиуса кривизны, представленное на стенде, многофункциональный оптический тестер-рефлектометр ТОПАЗ-7315-AR.

Краткие теоретические сведения

Механизмы возникновения потерь в ВОЛС

Одной из характеристик оптического волокна является затухание сигнала или удельная величина – погонное затухание. **Затухание сигнала** – это потери мощности, проходящей через оптическое волокно, между источником и приёмником сигнала. Выражается в децибелах дБ. **Километрическое** или **погонное затухание** оптического кабеля – это величина затухания мощности оптического сигнала на 1 километре оптического волокна. Выражается в дБ/км.

Наличие данной величины обусловлено существованием потерь в оптическом волокне. Потери приводят к постепенному уменьшению оптической мощности по мере распространения света в ОВ. Потери подразделяются на внутренние и внешние. К внутренним потерям относятся потери на поглощение и рассеяние света в среде. К внешним – потери на соединениях, а также потери, возникающие при изгибах и деформациях оптического волокна.

Внутренние потери

Основными внутренними потерями являются потери, обусловленные поглощением света средой оптического волокна и рассеянием света. Поглощение света разделяется на собственное и примесное. Собственное поглощение света обусловлено поглощением самого кварца, а примесное поглощение связано с существованием структурно-примесных дефектов в волокне. Структурно-примесные дефекты возникают на стадии производства. Наиболее часто в качестве поглощающих примесей выступают ионы переходных металлов (Fe, Cu, V, Cr и др.) и гидроксильные ионы (ОН⁻). Ионы переходных металлов имеют не полностью заполненные внутренние электронные оболочки, где возникают электронные переходы, вызывающие дополнительное поглощение света. Согласно оценочным данным при

концентрации атомных примесей $\sim 10^{-9}$ затухание света с длиной волны менее 1000 нм будет ~ 1 дБ/км. Значительные потери в ОВ связаны с поглощением света на гидроксильных ионах. Примеси данного рода попадают в оптическое волокно как на стадии изготовления, так и по мере эксплуатации из паров воды окружающей среды. Наличие гидроксильных ионов в структуре ОВ приводит к возникновению пиков поглощения в области 900-1000 нм и 1350-1500 нм.

Рассеяние света возникает на неоднородностях структуры оптического волокна, которые присущи всем видам стекол. Количество рассеиваемой энергии зависит от плотности расположения дефектов и площади S , которая является мерой рассеиваемой мощности P_s , при единичном рассеивании падающего света интенсивностью I_0 . Из определения получим:

$$P_s = I_0 \pi r^2 g, \quad (2.1)$$

где r – средний радиус рассеивающего тела; g – безразмерный коэффициент, зависящий от соотношения r/λ .

Во всех типах стекол рассеяние света обычно происходит на примесях, размеры которых много меньше длины волны распространяющегося света ($r \ll \lambda$). Такое рассеяние называют рэлеевским. Допуская, что падающий свет линейно поляризован и вторичные волны излучаются от микроскопических центров рассеяния в форме индуцированного электрического диполя с моментом $|\mu|$, параллельным поляризации, выражение для рассеиваемой мощности можно записать как:

$$P_s = I_0 \frac{8\pi}{3\lambda^4} |\mu|^2 f(\theta), \quad (2.2)$$

где $f(\theta)$ – угловой коэффициент, описывающий диаграмму направленности излучения диполя. Так как мощность рассеиваемого излучения пропорциональна $1/\lambda^4$, то чем больше длина волны распространяющегося света, тем меньше он будет рассеиваться.

На рисунке 2.1 представлена зависимость погонного затухания кварцевого оптического волокна от длины волны распространяющегося излучения.

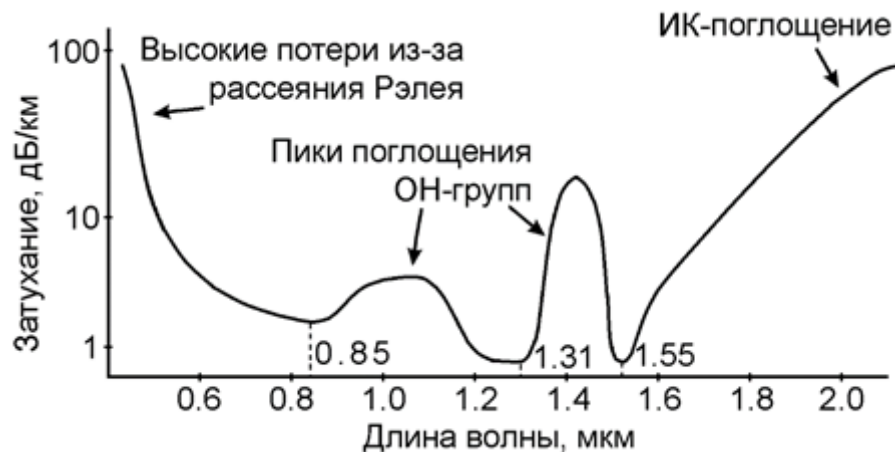


Рисунок 2.1 – Оценочная характеристика погонного затухания кварцевого оптического волокна

Совершенствование технологий производства оптических волокон позволило снизить внутренние потери до значений, представленных в таблице 2.1.

Таблица 2.1. Нормы затухания в ОВ на различных длинах волн.

Длина волны, нм	850	1300	1310	1380	1490	1550	1625
Значение погонного затухания, дБ/км	3	0.75	0.33	0.50	0.24	0.22	0.23

Внешние потери

1. Потери на соединениях

Вносимые потери определяют затухание в соединителях согласно:

$$a_{\text{вн}} = -10 \cdot \lg \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}}, \quad (2.3)$$

где $P_{\text{вх}}$ и $P_{\text{вых}}$ - мощности излучения на входе и выходе соединителя, соответственно.

Вносимые потери составляют от 0.2 до 1 дБ. Они определяются различием в параметрах соединяемых ОВ (внутренние потери) и несовершенством конструкции соединителя, технологическими допусками его изготовления, а также технологическими допусками при заделке ОВ в наконечник (внешние потери).

Внутренние потери определяются факторами, которые невозможно уменьшить при заделке ОВ в наконечник, а именно неодинаковостью диаметров сердцевин, показателей преломления, числовых апертур, а также эксцентриситетов сердцевина/оболочка ОВ с разных сторон.

Внешние потери определяются угловым, радиальным и осевым смещениями соединяемых ОВ, а также шероховатостью и загрязнением их торцевых поверхностей.

Зная номинальные значения перечисленных величин и допустимые технологические отклонения от номинала, можно определить **максимальные или среднеквадратические значения ожидаемых внутренних потерь**. В некоторых случаях потери одинаковы для любого направления распространения света, а в других потери зависят от направления распространения света.

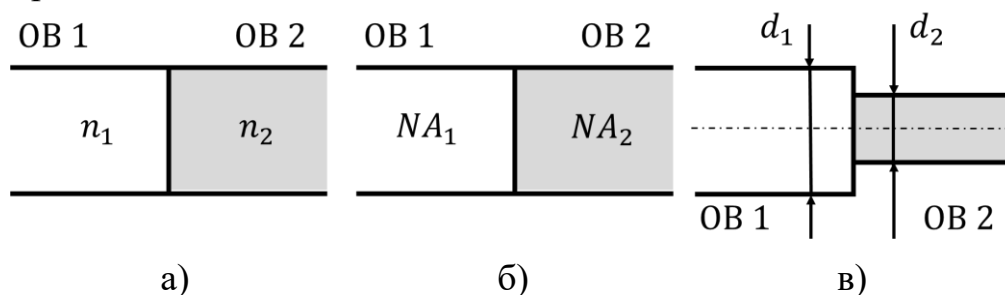


Рисунок 2.2 – Соединение ОВ а) с разными показателями преломления сердцевин, б) с разными числовыми апертурами, в) с разными диаметрами сердцевин

Потери из-за **различия показателей преломления** n_1 и n_2 сердцевин ОВ (рис. 2.2, а) являются следствием френелевского отражения на границе двух сред. Согласно формулам Френеля энергетический коэффициент отражения от границы раздела двух сред равен r^2 , где $r = (n_1 - n_2)/(n_1 + n_2)$ – коэффициент отражения по интенсивности. Значит $P_{\text{вых}} = (1 - r^2) \cdot P_{\text{вх}}$. Подставляя это в (2.3) получаем выражение (2.4). В простейшем случае при отсутствии воздушного зазора для ОВ со ступенчатым профилем показателя преломления эти потери составляют:

$$a_{\phi} = -10 \cdot \lg \frac{4n_1 n_2}{(n_1 + n_2)^2}, \quad (2.4)$$

На рисунке 2.3 видно, что френелевские потери нелинейно возрастают с увеличением разности между показателями преломления сердцевин.

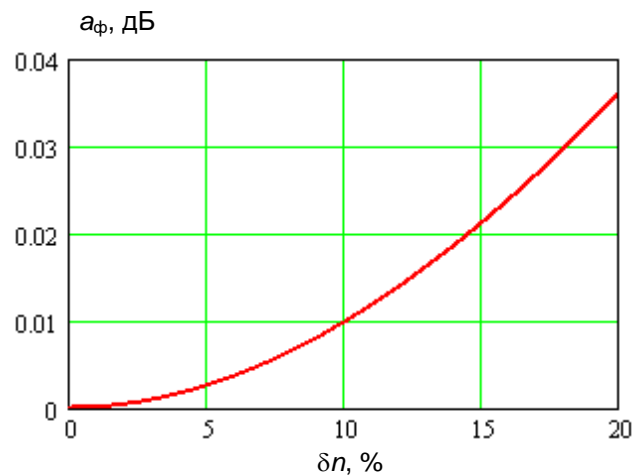


Рисунок 2.3 – Зависимость френелевских потерь от относительной разности показателя преломления сердцевин $\delta n = \frac{|n_1 - n_2|}{n_1} \cdot 100\%$

Угол θ_a между оптической осью и одной из образующих светового конуса – лучей, падающих на торец оптического волокна, для которых в дальнейшем выполняется условие полного внутреннего отражения, носит название **апертуры ОВ** (рис. 2.4).

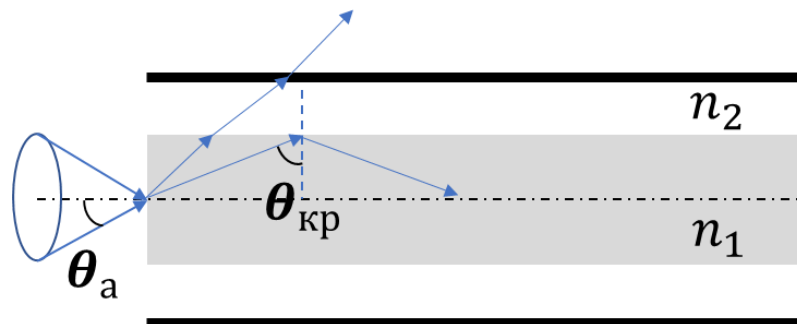


Рисунок 2.4 – Апертурный угол в оптоволокне

Только лучи, которые вводятся в волокно под углом больше критического $\theta > \theta_{кр}$, смогут распространяться вдоль него. Апертура является безразмерной величиной и зависит от свойств материалов волокна и определяется показателями преломления ядра и оптической оболочки. Физически апертура характеризует эффективность ввода оптического излучения в волокно, а для ее числовой оценки используется понятие номинальной **числовой апертуры NA** (Numerical Aperture), значение которой для ступенчатого оптического волокна определяется выражением:

$$NA = n_0 \sin \theta_a \quad (2.5)$$

Согласно закону Снеллиуса на торце ОВ для падающего и преломленного лучей справедливо выражение:

$$n_0 \sin \theta_a = n_1 \sin \left(\frac{\pi}{2} - \theta_{кр} \right) \quad (2.6)$$

Учитывая, что $\sin \theta_{кр} = \frac{n_2}{n_1}$, получим выражение для числовой апертуры:

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \approx n_1 \sqrt{2\delta n} \quad (2.7)$$

Потери при **различии числовых апертур** NA_1 и NA_2 соединяемых МОВ (рис. 2.2, б) возникают при переходе излучения из многоканального оптоволоконного (МОВ) с большей апертурой NA_1 в МОВ с меньшей апертурой NA_2 .

$$a_{ап} = \begin{cases} -20 \cdot \lg \frac{NA_2}{NA_1} & \text{при } NA_1 > NA_2 \\ 0 & \text{при } NA_1 < NA_2 \end{cases} \quad (2.8)$$

С увеличением разности между числовыми апертурами соединяемых волокон увеличивается значение апертурных потерь (рис.2.5).

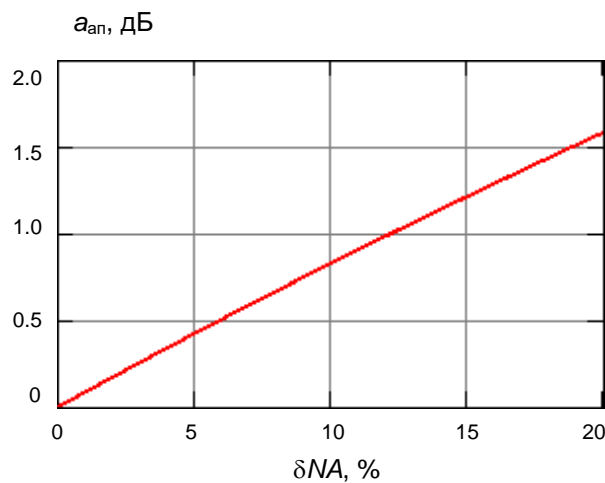


Рисунок 2.5 – Зависимость апертурных потерь $a_{ап}$ от относительной разности числовых апертур δNA соединяемых волокон

Потери при **различии диаметров сердцевин** d_1 и d_2 соединяемых МОВ (рис. 2.2, в) возникают при переходе излучения из МОВ с большим диаметром d_1 в МОВ с меньшим диаметром d_2 :

$$a_{pc} = \begin{cases} -20 \cdot \lg \frac{d_2}{d_1} & \text{при } d_1 > d_2 \\ 0 & \text{при } d_1 < d_2 \end{cases} \quad (2.9)$$

Потери при соединении ООВ выражают через эффективный радиус моды (радиус модового поля) ω :

$$a_{мп} = -20 \cdot \lg \frac{2\omega_1\omega_2}{\omega_1^2 + \omega_2^2}, \quad (2.10)$$

Потери нелинейно возрастают с увеличением различия диаметров сердцевин, как показано на рисунке 2.6.

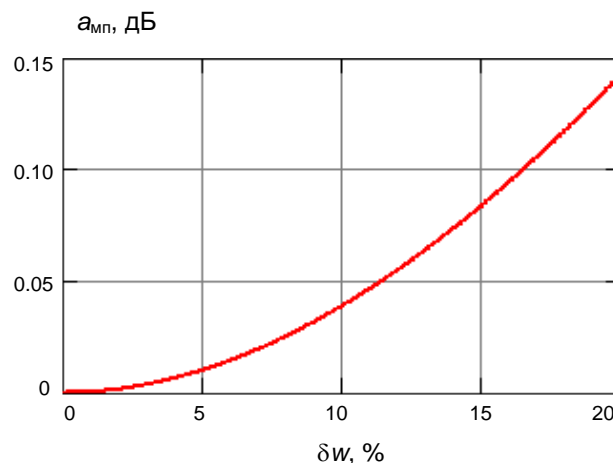


Рисунок 2.6 – Зависимость потерь при переходе излучения между сердцевинами разного диаметра a_{pc} от относительной разности радиусов модового поля $\delta\omega$ соединяемых волокон

При наличии **эксцентриситета сердцевин/оболочки** возникает радиальное смещение r центров сердцевин соединяемых ОВ (рис.2.7, а).

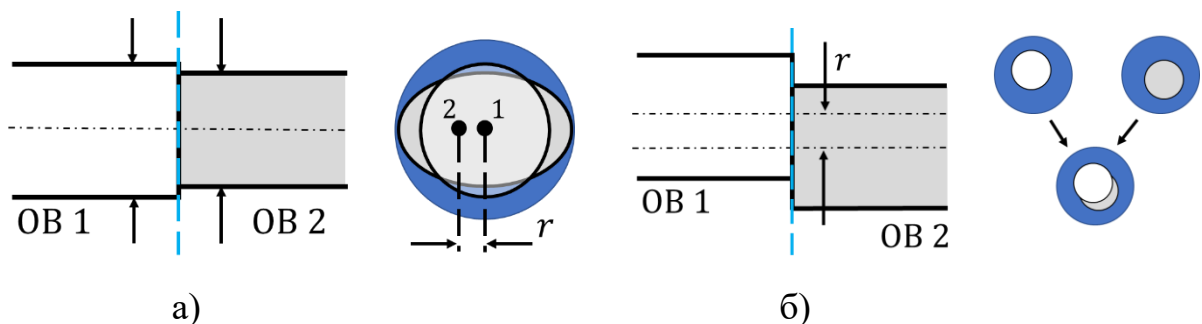


Рисунок 2.7 – Вид сбоку и вид в поперечном сечении а) соединения ОВ с эксцентриситетом сердцевин/оболочки второго волокна; б) соединения с радиальным смещением сердцевин

Радиальное смещение центров приводит к потерям $a_{\text{рад}}$, дающихся формулой (2.11) для многомодовых ОВ и (2.12) для для одномодовых ОВ:

$$a_{\text{рад МОВ}} = -10 \cdot \lg \left(1 - \frac{2r}{\pi a} \right), \quad (2.11)$$

$$a_{\text{рад ООВ}} = -10 \cdot \lg \left[\exp \left(- \left(\frac{r}{2\omega} \right)^2 \right) \right], \quad (2.12)$$

На рисунке 2.8 показаны зависимости потерь от относительного радиального смещения x соединяемых ОВ, которое для МОВ равно $x = r / a$, а для ООВ $x = r / w$.

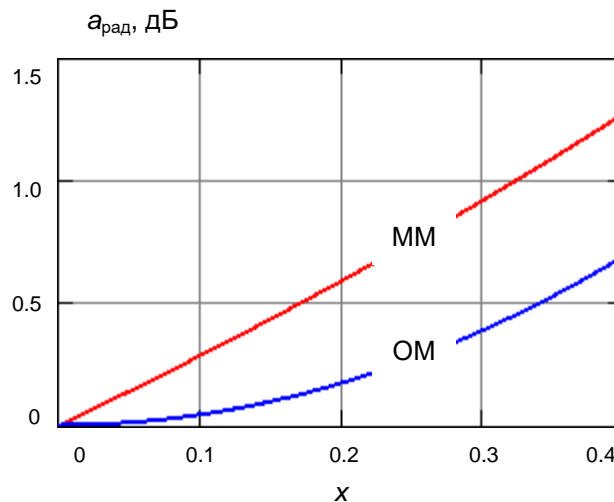


Рисунок 2.8 – Потери от радиального смещения соединяемых ОВ

Когда оптические волокна соединяются под углом, а не по абсолютно прямой линии, происходит **угловое смещение** (рис.2.9, а). По сравнению с радиальным смещением это более сложная ситуация, так как необходимо учитывать, насколько смещены сопрягаемые поверхности в любом направлении, а не только в одной параллельной плоскости.

Подобное смещение является одной из наиболее сложных проблем в волоконно-оптической связи. Если торцы волокон не сопрягаются с максимальной точностью, при передаче сигнала из передающего в приемный кабель будет происходить потеря мощности.

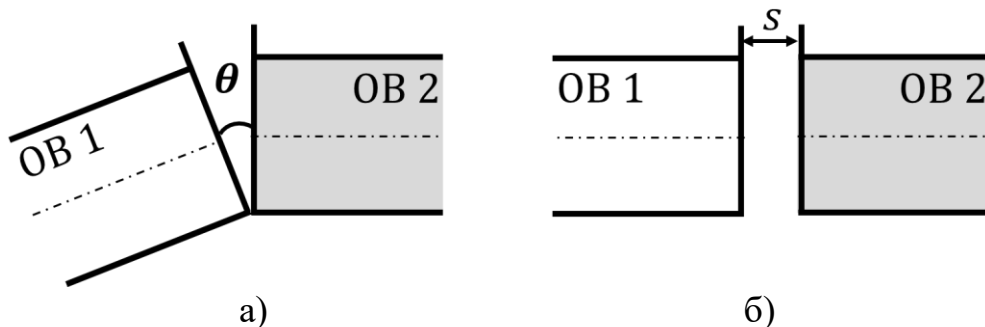


Рисунок 2.9 – Вид соединений ОВ с а) угловым и б) осевым смещениями

Внешние потери от углового смещения θ соединяемых ОВ находят для многомодовых ОВ согласно (2.13), а для одномодовых ОВ – (2.14).

$$a_{\text{угл МОВ}} = -10 \cdot \lg \left(1 - \frac{2\theta}{\pi \cdot \arcsin(NA)} \right), \quad (2.13)$$

$$a_{\text{угл ООВ}} = -10 \cdot \lg \left[\exp \left(- \left(\frac{\pi \cdot n_2 \omega \cdot \theta}{\lambda} \right)^2 \right) \right], \quad (2.14)$$

На рисунке 2.10 (а) показаны зависимости потерь от угловых смещений для ООВ и МОВ.

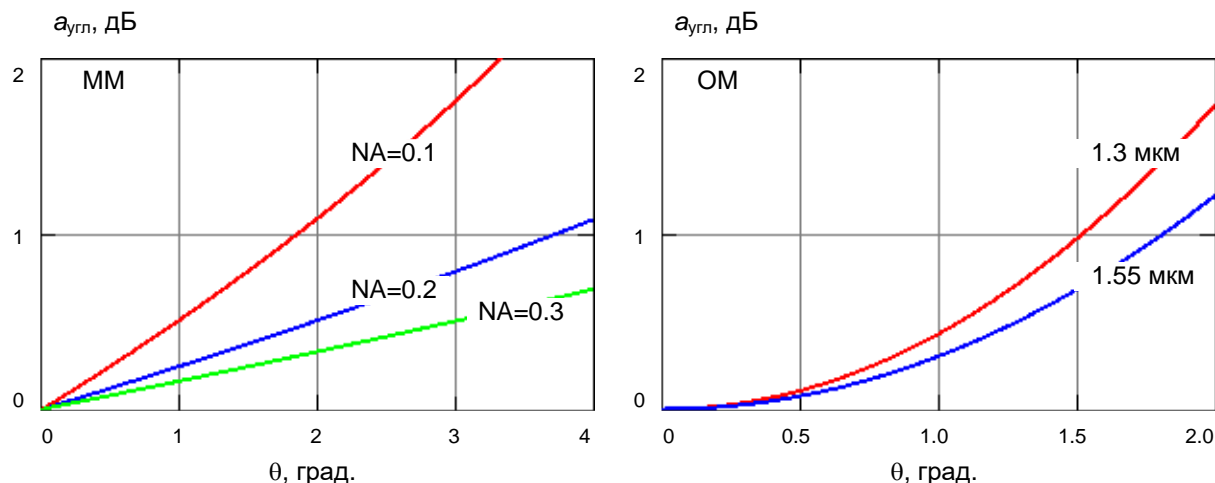


Рисунок 2.10 – Потери от углового смещения соединяемых ОВ

Внешние потери от осевого смещения s соединяемых ОВ (рис. 2.9, б) сильно зависят от показателя преломления n среды, находящейся между ОВ. Если между ОВ находится иммерсионная среда с показателем преломления $n = n_1$, то френелевскими потерями можно пренебречь и осевые потери составят для МОВ (2.15) и для ООВ (2.16).

$$a_{\text{ос МОВ}} = -10 \cdot \lg \left(1 - 0.8 \frac{s \cdot \sqrt{2\delta n}}{d/2} \right), \quad (2.15)$$

$$a_{\text{ос ООВ}} = -10 \cdot \lg \left(\frac{4\omega^4}{4\omega^4 + \lambda^2 s^2 / \pi} \right), \quad (2.16)$$

На рисунке 2.11 показаны зависимости потерь от осевых смещений ООВ и МОВ, рассчитанные по выражениям (2.15) и (2.16).

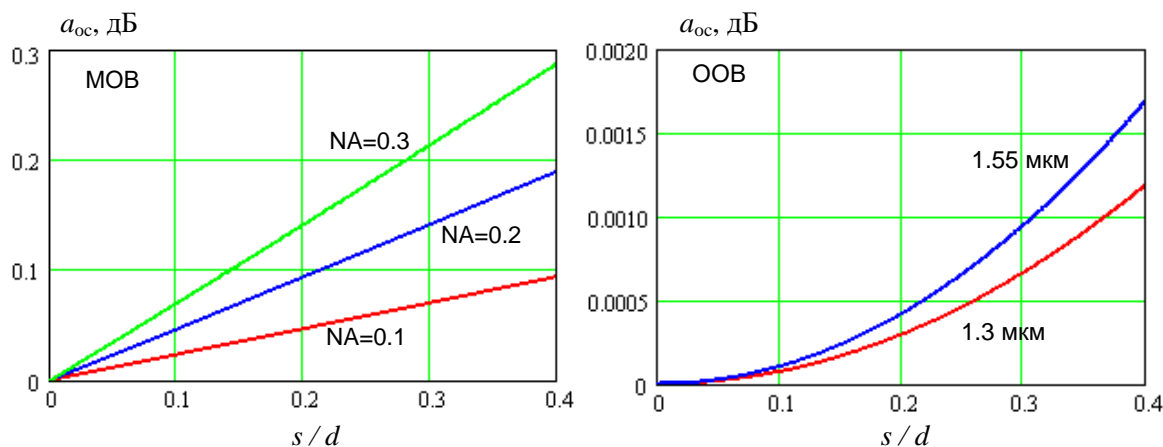


Рисунок 2.11 – Потери от осевого смещения соединяемых ОВ при наличии в зазоре иммерсионной среды

Если показатель преломления n среды, находящейся в зазоре, отличается от n_1 то в зазоре возникают многократные отражения, которые приводят к осцилляциям френелевских потерь в зазоре $a_{\text{фос}}$ в зависимости от осевого смещения s .

$$a_{\text{фос}} = -10 \cdot \lg \frac{4n_1^2 n^2}{4n_1^2 n^2 + (n^2 + n_1^2)^2 \cdot \sin^2 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot n \cdot s \right)}, \quad (2.17)$$

Средние френелевские потери составляют:

$$\bar{a}_{\text{фос}} = -10 \cdot \lg \frac{2nn_1}{n^2 + n_1^2}, \quad (2.18)$$

Для воздушного зазора между соединяемыми ОВ с $n = 1$ средние френелевские потери по (2.18) составят 0.35 дБ. Для исключения этих потерь современные оптические разъемы выполняются по технологии, практически исключающей воздушные зазоры и обеспечивающей, так называемый, физический контакт (РС - physical contact).

На рисунке 2.12 показана зависимость потерь $a_{\text{фос}}$ в зависимости от относительного осевого смещения для монохроматического источника. Из графика видно, что вносимое затухание осциллирует с постоянной амплитудой независимо от величины зазора. Это справедливо только для монохроматической волны. Если источник не является монохроматическим, происходит усреднение френелевских потерь.

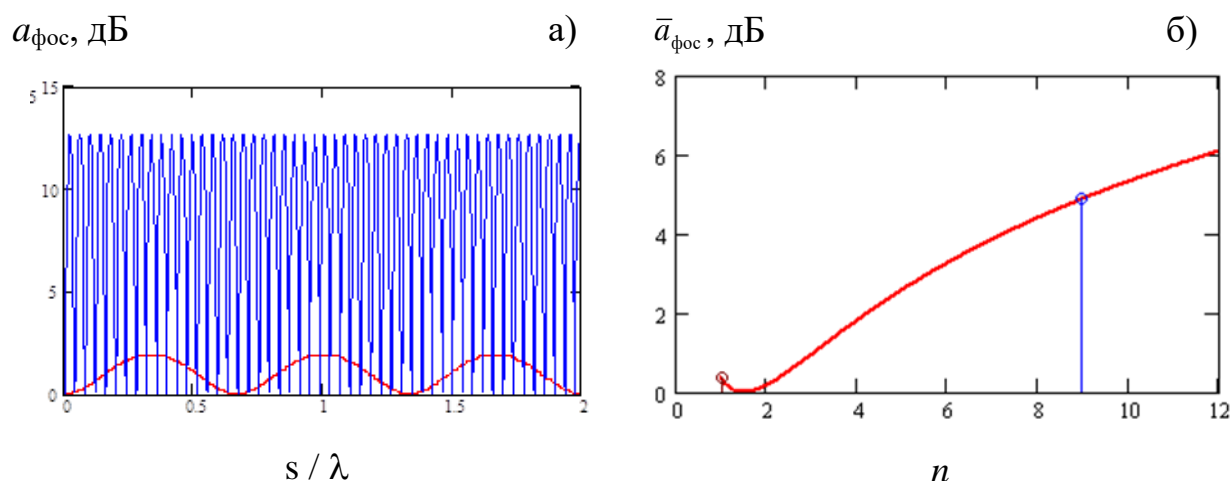


Рисунок 2.12 – а) Зависимость вносимых потерь от отношения величины зазора к длине волны (красный - воздух, синий - вода); б) зависимость средних вносимых потерь от показателя преломления среды в зазоре

На рисунке 2.13 приведены результаты расчета вносимых потерь в воздушном зазоре для различных источников излучения. Видно, что при большой ширине спектра источника (светоизлучающий диод, многомодовый лазер) происходит эффективное усреднение вносимых потерь. При узкополосном источнике (одномодовый лазер) усреднение наблюдается только при очень больших величинах зазора s . Амплитуда изменения вносимых потерь значительная – от величин, близких к 0 до 0.7 дБ.

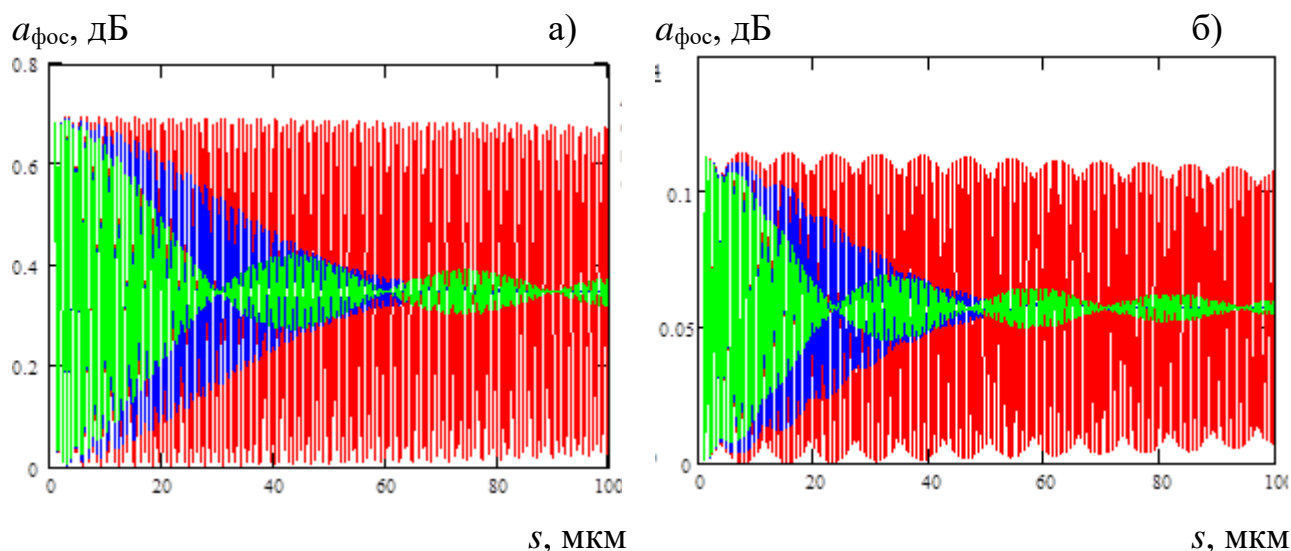


Рисунок 2.13 – Зависимость вносимых потерь от ширины воздушного зазора для источников излучения с разной шириной спектра (красная кривая - 1 нм, синяя - 10 нм, зеленая – 100 нм): а) воздушный зазор, б) 15% иммерсия

Уменьшить амплитуду изменения вносимых потерь можно, введя в зазор иммерсионное вещество. На рисунке 2.13(б) показаны зависимости вносимых потерь от ширины зазора, в который введена иммерсионное

вещество с показателем преломления, отличающемся от показателя преломления сердцевины ОВ на 15%. При этом максимальные потери уменьшаются до 0.1 - 0.12 дБ – вполне приемлемые для разъемного соединения потери.

2. Потери на макро- и микро- изгибах

Внешние потери вызваны отклонениями структуры ОВ от оптимальной. Главной причиной этих потерь являются искривления оси ОВ и границы раздела сердцевина-оболочка. Различают **макроизгибы**, обусловленные конструкторско-технологическими или эксплуатационными факторами и случайные, хаотически расположенные по длине ОВ, – **микроизгибы**. Микроизгибы представляют собой мелкие локальные нарушения прямолинейности волокна, характеризуемые смещениями его оси в поперечных направлениях на участке микроизгиба. Основными причинами появления микроизгибов являются локальные поперечные механические усилия различного происхождения, приложенные к очень малым участкам волокна и появляющимися в процессе вытяжки волокна, перемотки и его хранения. В данной работе будут исследованы внешние потери, обусловленные макроизгибами.

Потери на макроизгибы обусловлены изменением геометрии луча на изгибах оптического кабеля. Рассмотрим появление таких потерь на примере световода со ступенчатым профилем показателя преломления (рис.2.14).

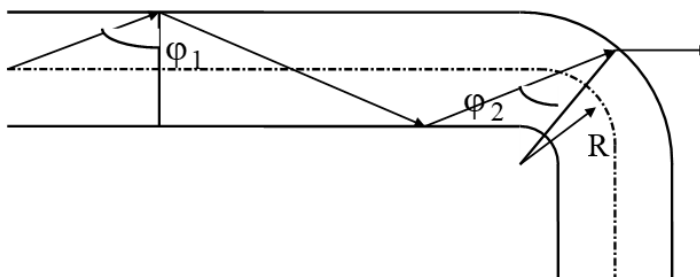


Рисунок 2.14 – Распространение волн в изогнутом оптическом волноводе

На изгибе луч образует угол падения $\varphi_2 < \varphi_1$, а, следовательно, нарушается условие полного внутреннего отражения ($\varphi_2 < \varphi_c$). Такой луч преломляется и рассеивается в окружающем пространстве (оболочке).

Потери на макроизгибах грубо могут быть рассчитаны по следующей формуле:

$$\alpha_{\text{макр}} = -10 \cdot \lg \left(\left| 1 - \frac{d \cdot n_1}{R_{\text{изг}} \cdot NA^2} \right| \right) \quad (2.19)$$

где $R_{\text{изг}}$ – радиус кривизны изгиба, n_1 – показатель преломления сердцевины волновода, d – диаметр сердцевины, NA – числовая апертура волокна.

Как видно из выражения (2.19), зависимость потерь на макроизгибах от радиуса кривизны должна быть линейной функцией в координатах $10^{\frac{\alpha_{\text{макр}}}{10}} - \frac{1}{R_{\text{изг}}}$.

3. Возвратные потери

Возвратные потери определяют долю оптической мощности, которая возвращается обратно к источнику оптического сигнала. Этот параметр особенно важен для соединителей ООВ, т.к. одномодовые излучатели очень чувствительны к обратному отражению, которое приводит к трудно предсказуемым искажениям излучаемого сигнала из-за интерференции прямого и обратного сигналов.

Возвратные или обратные потери определяются в отраженном свете согласно

$$a_{\text{в}} = -10 \cdot \lg \frac{P_{\text{отр}}}{P_{\text{вх}}}, \quad (2.20)$$

где $P_{\text{вх}}$ и $P_{\text{отр}}$ – мощности падающего и отраженного излучения, соответственно. Основным фактором, определяющим возвратные потери, являются многократные френелевские отражения в зазоре s (обычно воздушном). Возвратные потери, обусловленные зазором, можно определить по выражению

$$a_{\text{в}} = -10 \cdot \lg \frac{(n^2 - n_1^2)^2 \cdot \sin^2 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot n \cdot s \right)}{4n_1^2 n^2 + (n^2 - n_1^2)^2 \cdot \sin^2 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot n \cdot s \right)}, \quad (2.21)$$

На рисунке 2.15а показана зависимость $a_{\text{в}}$ от относительного осевого смещения для монохроматического источника.

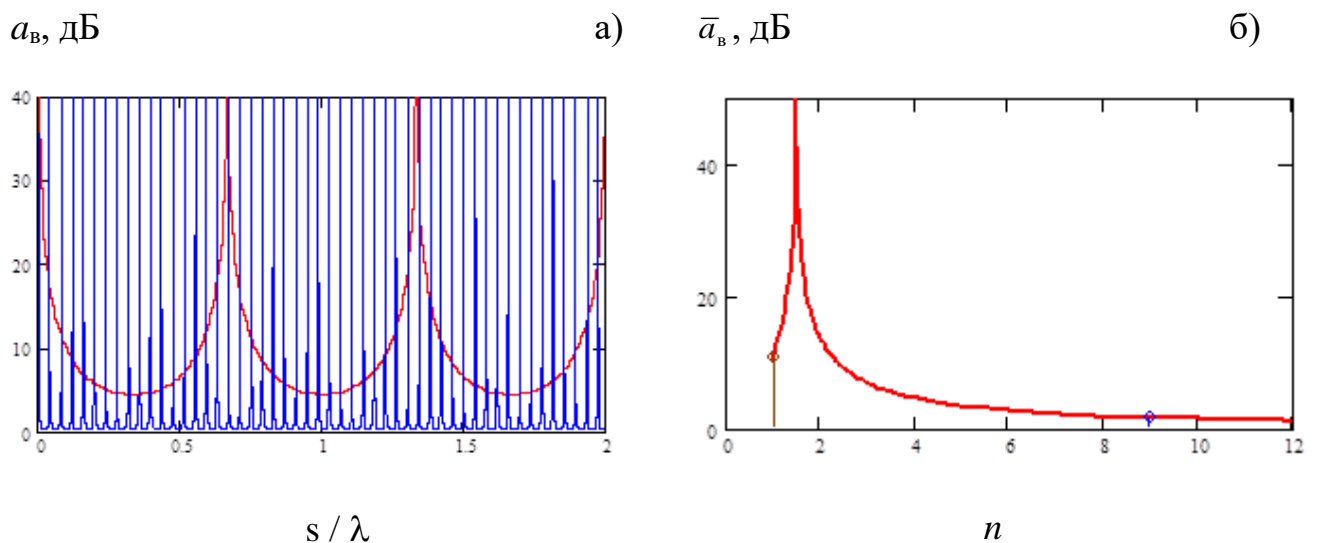


Рисунок 2.15 – Зависимость возвратных потерь от относительного осевого смещения (а) и средних возвратных потерь от показателя преломления среды в зазоре (б)

Непараллельность торцов соединяемых ОВ приводит к усреднениям осцилляций синуса и средние возвратные потери (рис. 2.15б) составят

$$\bar{a}_B = -10 \cdot \lg \frac{(n - n_1)^2}{n^2 + n_1^2}, \quad (2.22)$$

Расчет средних возвратных потерь для воздушного зазора дает значение $a_B = 11$ дБ, что является недопустимо малой величиной для большинства применений.

На рис. 2.15 величина возвратных потерь (и вносимых потерь, как было показано ранее) осциллирует с одной и той же амплитудой, и периодом независимо от ширины зазора. Это справедливо для монохроматической волны. Для немонохроматического источника происходит усреднение возвратных потерь (рис. 2.16):

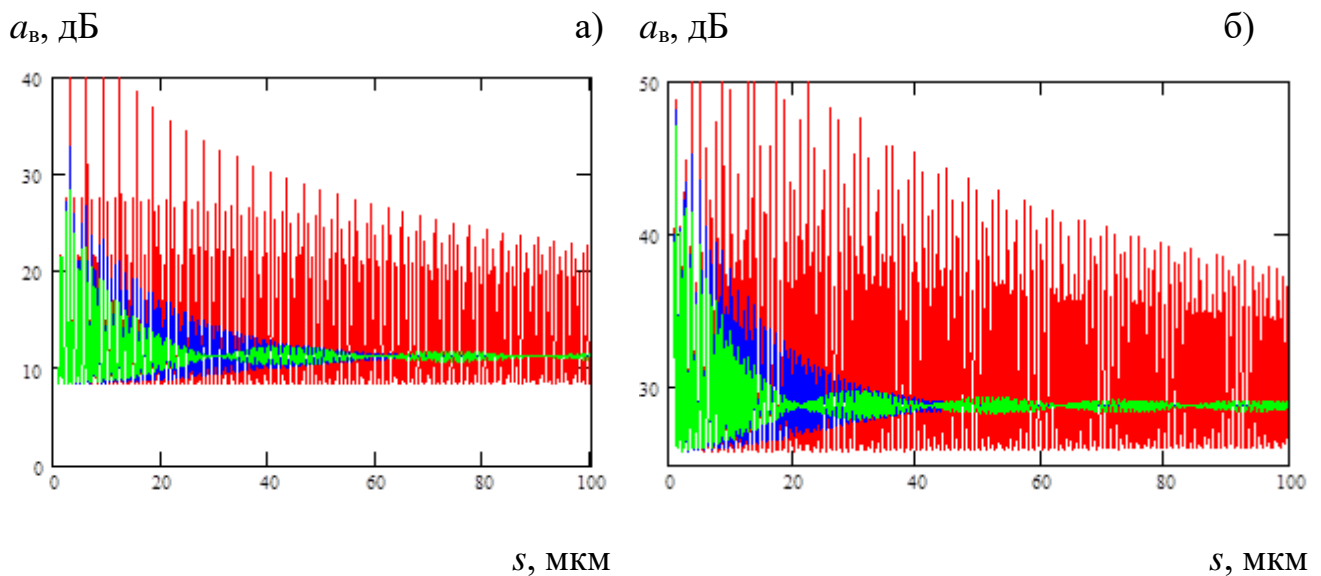


Рисунок 2.16 – Зависимость возвратных потерь от ширины воздушного зазора для источников с разной шириной спектра (красный - 1 нм, синий - 10 нм, зеленый – 100 нм): а) –воздушный зазор, б) – 5% иммерсия.

Из рис. 2.16 видно, что для выполнения требований МСЭ необходимо использовать очень качественную иммерсию. 5% иммерсия дает средние возвратные потери около 27 дБ, что соответствует требованиям к STM-16. Это позволяет обосновать необходимость обеспечения физического контакта торцов соединяемых ОВ и требования к качеству полировки торцов ОВ.

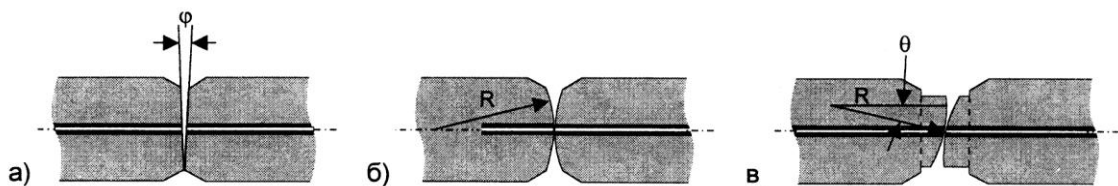


Рисунок 2.17 – Типы контактов соединителей: а) плоская поверхность, б) сферическая поверхность – физический контакт (РС), в) наклонная сферическая поверхность – угловой физический контакт (АРС)

Доказано, что обеспечить физический контакт двух плоских торцов соединяемых ОВ практически невозможно (рис. 2.17, а). Поэтому во всех современных соединителях используют сферическую форму торцов наконечников (рис. 2.17, б). При этом заделанные в них ОВ соприкасаются своими сердцевинами. Существуют три градации физического контакта, отличающихся возвратными потерями: PC >30 дБ, Super PC >40 дБ, Ultra PC >50 дБ. Из графика 2.12 можно оценить допустимые зазоры между соединяемыми ОВ и требования к качеству полировки наконечников. Радиус кривизны для наконечников выбирается в диапазоне 15-25 мм. Возвратные потери можно дополнительно увеличить при использовании углового физического контакта (angled PC, APC). При наклонном торце (рис. 2.17, в) даже при несовершенном физическом контакте отраженный сигнал не распространяется обратно по сердцевине ОВ, а отражается в оболочку. Возвратные потери для APC соединителя превышают 60 дБ.

Рабочее задание

Задание 1. Потери, вносимые разъемными соединениями.

1. Соедините разъем рефлектометра и вход измерителя мощности одним оптическим патч-кордом.
2. Подготовьте прибор к работе в режиме тестера. Произведите установку опорного уровня на измерителе мощности на длинах волн оптического излучения 1310 и 1550 нм (**см. Правила работы на лабораторном оборудовании**).
3. При помощи оптических патч-кордов подключите источник оптического излучения и измеритель оптической мощности через проходную розетку, например, типа FC-FC.
4. Установите длину волны измерителя равной длине волны источника.
5. Показания измерителя мощности будут равны затуханию линии при условии установки единиц измерения: «дБ». Полученные результаты запишите в таблицу 2.2.
6. Повторите измерения потерь на проходной розетке FC-FC для другой длины волны оптического излучения.
7. Повторите измерения в автоматическом режиме
8. Повторите действия, указанные в п.п. 1-7 для других типов проходных и переходных адаптеров.
9. По окончании работы выключите оборудование и приведите стенд в первоначальное состояние. Сделайте выводы по полученным результатам.

Таблица 2.2 Потери, вносимые адаптерами различных типов в ВОЛС.

Тип адаптера	Длина волны оптического излучения, нм	Результат измерения, дБ	Результат измерения в режиме дБм	Результат измерения в режиме мВт
FC-FC SM	1310			
FC-FC SM	1550			
LC-LC SM	1310			
LC-LC SM	1550			
...				

Задание 2. Потери, вносимые изгибами.

1. Подготовьте необходимое оборудование для проведения лабораторной работы (прибор «ТОПА3-7315-AR» в режиме тестера; оптические патч-корды в соответствии с имеющимися разъемами на концах ВОЛС)

2. Соберите схему, в соответствии с рисунком 2.18.



Рисунок 2.18 – Схема измерений

3. Подключите измерительный патч-корд на устройство задания радиуса кривизны (на шкив максимального диаметра).

4. Измерьте затухание, создаваемое ВОЛС на различных длинах волн. Результат запишите в таблицу 2.3.

Таблица 2.3. Результаты измерений оптической мощности в зависимости от радиуса изгиба оптического волокна.

Радиус кривизны, $R_{изг}$ (мм)	Оптическая мощность					
	$\lambda=1310$ нм			$\lambda=1550$ нм		
	дБм	mW	дБ	дБм	mW	дБ
40						
35						
30						
25						
20						
15						
12.5						
10						
7.5						
5						

5. Сместите измерительный патч-корд на шкив с меньшим радиусом. Повторите действия, указанные в п.4.

6. Повторите измерения на шкивах разного диаметра. Результат запишите в таблицу 2.3.

7. По результатам проведенных измерений постройте график зависимости потерь от радиуса кривизны волновода в координатах

$$10^{\frac{\alpha_{\text{макр}}}{10}} - \frac{1}{R_{\text{изг}}}$$

8. Сделайте выводы по полученным результатам.

9. Приведите измерительное оборудование в исходное состояние. Наведите порядок на рабочем месте.

Контрольные вопросы.

1. Какие виды потерь существуют в оптических волокнах?
2. Что является главной причиной внешних потерь?
3. Какие виды оптических разъемов вам известны?
4. Для чего служат соединительные розетки и проходные розетки?
5. Какие типы оптических коннекторов вы знаете? В чем их отличие друг от друга?
6. Какими параметрами характеризуются оптические разъемные соединения?
7. Что является основной причиной появления микроизгибов?
8. Как могут быть рассчитаны потери на макроизгибах?
9. Как зависят потери на макроизгибах от радиуса кривизны изогнутого волокна.

Современные разъемные соединения ВОЛС

Разъемные соединители предназначены для соединения различных компонентов волоконно-оптического линейного тракта (ВОЛТ) с оптическими волокнами (ОВ) оптических кабелей (ОК), а также для соединения ОВ между собой.

По конструкции соединения могут быть симметричными и несимметричными. При **несимметричной конструкции** (рис. П.2.1, а) используются два основных элемента: соединитель гнездовой и соединитель штекерный. ОВ в капиллярной трубке штекера не доходит до торца капилляра, а ОВ в гнезде выступает наружу. При организации соединения физический контакт происходит внутри наконечника капилляра, который обеспечивает соосность соединяемых ОВ. Открытое ОВ снижает надежность этой конструкции при большом количестве подключений.

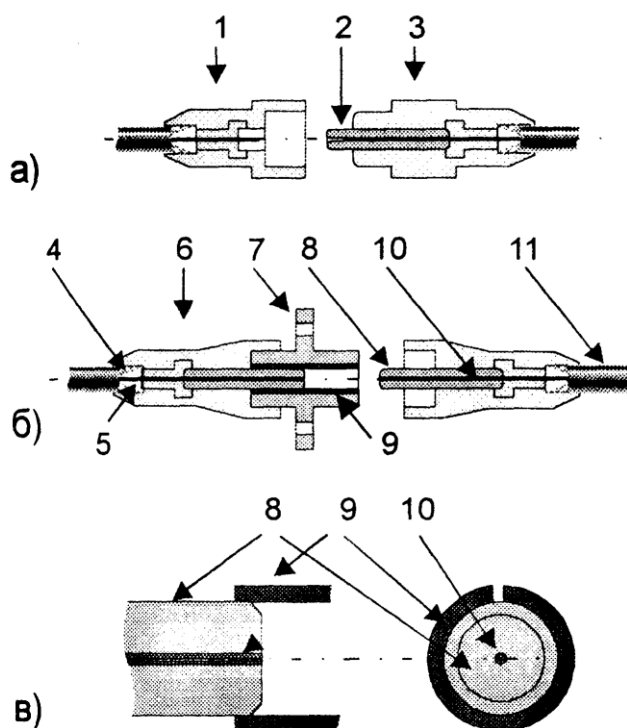


Рисунок П.2.1 – Конструкции соединителей: а) – несимметричная, б) – симметричная, в) – наконечник и центратор розетки симметричного соединителя: 1 – соединитель гнездовой; 2 – наконечник-капилляр; 3 – соединитель штекерный; 4 – кевларовые нити; 5 – эпоксидный наполнитель; 6 – соединитель; 7 – переходная соединительная розетка (адаптер); 8 – оптический наконечник; 9 – центрирующий элемент розетки; 10 – оптическое волокно; 11 – миникабель

При **симметричной конструкции** (рис. П.2.1, б), которая получила наибольшее распространение, для соединения ОВ необходимы три основных элемента: два штекера и переходная розетка. Главным элементом штекера является наконечник наружным диаметром 2.5 мм с отверстием для ввода ОВ,

которое предварительно освобождается от защитных покрытий. Наиболее жесткие требования предъявляются к параметрам отверстия (капилляра) наконечника, которое должно обеспечить минимальный люфт введенного в него ОВ. Наконечники изготавливают из нержавеющей стали или из керамики на основе циркония или оксида алюминия. Переходная розетка снабжается центрирующим элементом, выполненным в виде упругой трубки с продольным разрезом. Центрирующий элемент плотно охватывает наконечники, обеспечивая их строгую соосность.

К соединителям предъявляются следующие требования: малые вносимые потери, малое обратное отражение, устойчивость к внешним механическим, климатическим и другим воздействиям, высокая надежность и простота конструкции, незначительное ухудшение параметров после многократных повторных соединений. На рисунке П.2.2 представлены распространенные виды соединителей.



Рисунок П.2.2 – Виды современных соединителей

Оптические адаптеры (розетки) используются в патч-панелях (от англ. patching – соединительный) оптических кроссов, распределительных боксах, абонентских оптических розетках и других элементах волоконно-оптических сетей и служат для соединения оптических шнуров, оконцованных коннекторами одного типа (рис. П.2.3).

- Адаптеры SM: стандартный цвет исполнения - синий. Предназначены для соединения одномодовых коннекторов стандартной полировки (PC, UPC).
- Адаптеры MM: стандартный цвет исполнения - серый. Предназначены для соединения многомодовых коннекторов. От SM оптических адаптеров отличаются только цветом и могут быть без последствий заменены на последние.

— Адаптеры APC: стандартный цвет исполнения - зелёный. Предназначены для соединения одномодовых коннекторов с угловой полировкой (APC).

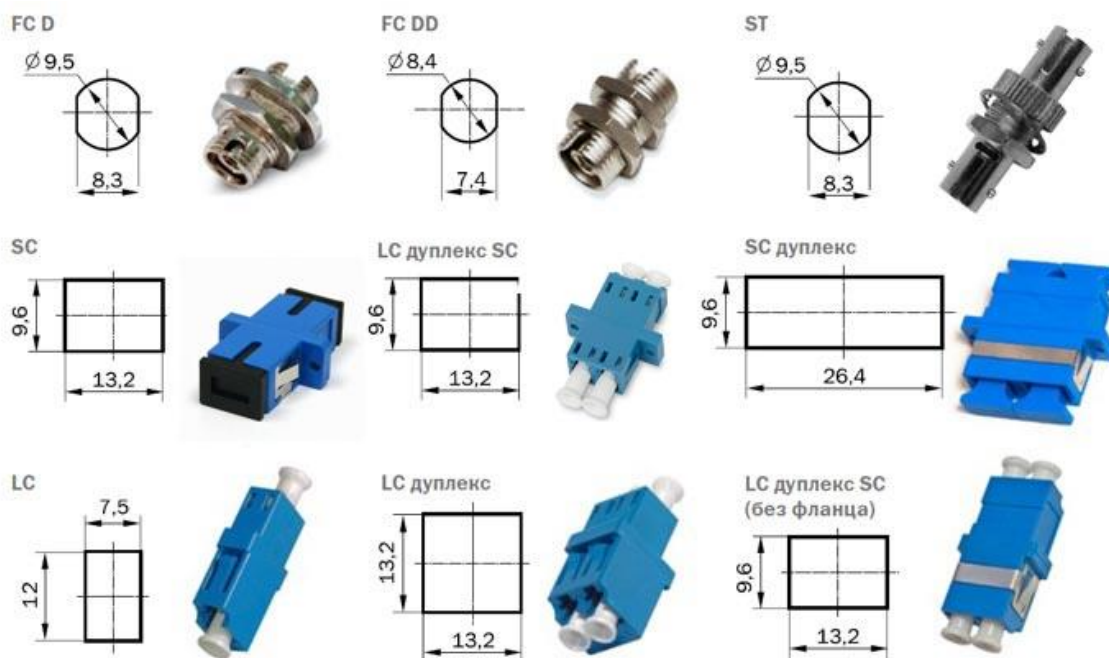


Рисунок П.2.3 – Вид оптических адаптеров, предназначенных для соединения коннекторов одного типа: FC-FC, SC-SC, ST-ST и LC-LC

В свою очередь, оптические адаптеры могут быть и переходными. **Переходные оптические адаптеры** применяются для соединения оптических разъёмов разных типов (рис. П.2.4).



Рисунок П.2.4 – Переходные розетки

Параметры современных соединителей

Существующая номенклатура стандартных соединителей достаточно велика. Однако наибольшее распространение получили соединители ST, SC, FC и LC. Все они имеют диаметр наконечника 2.5 мм, сферическую форму торца наконечника и выпускаются с различными типами физического контакта.

Соединитель ST (от англ. Straight Tip Connector – прямой разъем) был стандартизован для физического уровня Ethernet на MOB (10 BASE-FL) и до появления разъема SC был наиболее распространенным в оптических системах (рис. П.2.2). Он имеет круглое поперечное сечение, байонетный тип фиксации с ключом и подпружиненный наконечник.

Керамический наконечник имеет цилиндрическую форму диаметром 2.5 мм со скругленным торцом. Фиксация производится за счет поворота оправы – байонетного элемента – вокруг оси коннектора (на четверть оборота – 90°). Направляющие оправы сцепляясь с упорами ST-розетки при вращении вдавливают конструкцию в гнездо. Пружинный элемент обеспечивает необходимое прижатие. Конструктивные особенности вилки разъемов данного типа позволяют терминировать ими волокна без применения обжимного инструмента. Еще одним преимуществом ST-коннектора является его низкая стоимость.

Однако, перечисленные преимущества не в состоянии компенсировать значительные недостатки разъемов типа ST. Основными недостатками таких разъемов являются громоздкость и невозможность объединения двух вилок в одну дуплексную, что значительно уменьшает плотность их монтажа на коммутационном и активном сетевом оборудовании. Вращательное движение оправы при подключении и отключении коннектора приводит к повреждению полировки наконечников, что вызывает увеличение затухания оптического сигнала. Наконечник выступает из основы конструкции на 5-7 мм, что увеличивает вероятность его загрязнения.

Материал **розетки типа ST** – цинковый сплав (рис. П.2.3).

Соединитель FC (Fiber Connector) (рис. П.2.2) используется для соединения ООВ в сетях связи и кабельного телевидения. Он имеет круглое поперечное сечение, резьбовой тип фиксации с ключом и плавающий наконечник. Конструкция коннектора типа FC характеризуется отличными геометрическими характеристиками и высокой защитой наконечника. Рекомендован для одномодовых соединений в системах дальней радиосвязи и специализированных системах. Используемое в разъемах резьбовое соединение обеспечивает надежную защиту от случайного разъединения.

Соединительные розетки FC выпускаются с квадратным фланцем и D-типа для компактного монтажа. Полимерные заглушки защищают розетки от попадания пыли (рис. П.2.3).

Соединитель SC (от англ. Subscriber Connector – абонентский разъем) считается наиболее перспективным на сегодняшний день, пригоден для соединения ООВ и МОВ для любых приложений (рис. П.2.2). Сечение корпуса имеет прямоугольную форму. Подключение/отключение коннектора осуществляется поступательным движением по направляющим и фиксируется защелками. Керамический наконечник также имеет цилиндрическую форму диаметром 2.5 мм со скругленным торцом (некоторые модели имеют скос поверхности). Наконечник почти полностью покрывается корпусом и потому менее подвержен загрязнению, нежели в ST-конструкции. Отсутствие вращательных движений обуславливает более осторожное прижатие наконечников. Во избежание неправильного подключения в адаптер в верхней части корпуса вилки имеется специальный ключ в виде выступа.

Розетка SC (рис. П.2.3) принадлежит к числу адаптеров с плавным подключением и отключением линейным движением (push/pull). Имеют

пластмассовый корпус с фланцем или без, центратор для юстировки волокон выполнен из циркониевой керамики или бронзы.

С целью уплотнения оптических портов рядом производителей были предложены конструкции малогабаритных оптических разъемов. Все они объединены в один класс - SFF (Small Form Factor). Иногда данный класс оптических разъемов также называют мини-разъемами или малоразмерными соединителями. Основные типы исполнений розеток: симплекс и дуплекс.

Увеличение плотности портов достигается четырьмя основными способами:

- применение наконечников уменьшенного диаметра (1,25 мм);
- миниатюризация отдельных компонентов разъема;
- применение групповых (многоканальных) коннекторов;
- конструкции без центрирующих наконечников.

Разъем LC (Link Control) (рис. П.2.2) является наиболее распространенным на данное время малогабаритным разъемом. Данный тип разъема, является компактным вариантом разъема типа SC. За счет применения наконечника диаметром 1,25 мм удалось приблизительно вдвое по сравнению с SC-разъемом уменьшить размер коннектора. Пластмассовый корпус вилки разъема типа LC имеет прямоугольное сечение и оснащен внешней защелкой рычажного типа.

LC-коннектор вносит самое низкое затухание оптического сигнала среди малогабаритных разъемов (0,1 дБ), что дает возможность его использования в сетях Gigabit Ethernet и высокоскоростных магистральных приложениях SONET/SDH. Обычно вилки разъемов LC устанавливаются на кабель с помощью эпоксидных смол, хотя существуют варианты для обжимки, а также вилки разъемов с предустановленным отрезком оптоволокну для создания иммерсионных соединений. Хотя разъем данного типа был спроектирован для применения в основном в одномодовых системах, но в последнее время развивается тенденция использования и многомодовых вариантов этих разъемов.

Основные типы **розетки типа LC** (рис. П.2.3): симплекс, дуплекс, дуплекс под посадочное место SC, а также под 4 места.

Разъем MT-RJ (Mass Termination) (рис. П.2.2) является одним из самых распространенных малогабаритных разъемов. Он является дуплексным – предназначен для подключения сразу двух волокон. Конструктивной особенностью разъема является наличие в литом корпусе коннектора двух металлических направляющих, которые при стыковке двух коннекторов устанавливаются в соответствующие гнезда. Таким образом осуществляется позиционирование коннекторов и центрирование осей волокон.

При сборке разъема типа MT-RJ эпоксидный клей для вклейки волокна не используется и не требуется полировка наконечника с ОВ, так как в его конструкции применяется не одноволоконный, а двухволоконный MT-наконечник с механически закрепляемым по технологии CoreLink (предварительно отполированным) ОВ. Использование единого наконечника

для обоих волокон позволяет не только уменьшить габариты разъема, но и снизить его стоимость, поскольку изготовление наконечника является прецизионным и дорогостоящим процессом. Разъем MT-RJ позволяет одновременно сращивать два многомодовых или одномодовых волокна.

Оптический разъем E-2000 (Европа 2000, SECC-LSH) (рис. П.2.2) получил достаточно широкое распространение в Европе. Отличительной особенностью коннектора является использование мельхиорового наконечника, который позволяет добиться максимально высокой точности центрирования волокна. Дуплексный вариант разъема данного типа вписывается в форм-фактор разъема RJ-45 и производится в трех вариантах: duplex (расстояние между осями наконечников 12,7 мм), compact duplex (6,4 мм) и low profile duplex (вертикальное расположение вилок с разворотом на 180°). Интегрированная в конструкцию разъема защитная металлическая шторка надежно защищает наконечник от загрязнения.

Для установки разъема в "полевых" условиях применяется технология "E-2000 Fusion" – приваривание оптоволоконного кабеля к предустановленному в разъеме отрезку волокна. Разъем E-2000 является продуктом высочайшего качества, но его более широкому распространению препятствует его дороговизна.

Таблица П.2.1. Среднее затухание оптического сигнала в распространенных типах оптических разъемов

Тип коннектора	Материал наконечника	Среднее значение потерь на длине волны 1300 нм, дБ	
		Многомодовый	Одномодовый
ST	Керамика	0,25	0,3
SC	Керамика	0,2	0,25
FC	Керамика	0,2	0,3
E-2000	Мельхиор	0,2	0,25
LC	Керамика	0,1	0,1
MT-RJ	Керамика	0,2	0,3