

1. Параметры оптических волокон

1.1. Основные источники потерь в световоде

При распространении сигнала по световоду происходит его экспоненциальное затухание, вызванное линейными и нелинейными механизмами взаимодействия световых волн со средой волокна. Основными из них являются механизмы поглощения и рассеяния. Характер общей функции потерь от длины волокна можно представить как композицию трех составляющих:

$$\alpha(\lambda) = \alpha_{\text{пл}}(\lambda) + \alpha_{\text{рр}}(\lambda) + \alpha_{\text{ми}}(n)$$

где $\alpha_{\text{пл}}(\lambda)$ – потери от поглощения примесями, $\alpha_{\text{рр}}(\lambda)$ – потери от рэлеевского рассеяния, $\alpha_{\text{ми}}(n)$ – потери от микро- и макроизгибов.

Потери в кварцевых световодах минимальны на $\lambda = 1550$ нм (0,18 ... 0,2 дБ/км в SSMF). Наименьшими потерями (0,15 ... 0,18 дБ/км) обладают волокна с сердцевиной из чистого кварца (PCSF).



Рис.1.1. Спектр потерь в одномодовом волокне.

Окна прозрачности и диапазоны длин волн

Окна прозрачности	Диапазоны длин волн, нм
Первое окно	780 ... 860
Второе окно (O)	1260 ... 1360
Третье окно (C)	1530 ... 1565
Четвертое окно (L)	1565 ... 1625
Пятое окно (S)	1460 ... 1530

1.2. Потери на примесях.

Потери от поглощения примесями носят резонансный характер. Потери самого кварца в этой области длин волн невелики. Поглощением на примеси гидроксильных групп OH^- в основном определяются пики потерь в области длин волн 1383, 1240, 1130, 950, 875, 825 и 725 нм. Формула потерь

$$\alpha_{nm} = \frac{C_{nm}}{\lambda},$$

где $C_{nm} = 27,29 n_c \text{tg} \delta$, $\text{tg} \delta$ - тангенс угла диэлектрических потерь, объясняет только тенденцию изменения уровня поглощения.

1.3. Релеевское рассеяние.

Релеевское рассеяние является одним из основных факторов, ограничивающих минимальный уровень оптических потерь в волоконных световодах на основе кварцевого стекла в ближней инфракрасной области спектра. Причиной возникновения рэлеевского рассеяния являются статистические флуктуации состава и плотности стекла, замороженные в стекле при его остывании. В однокомпонентных стеклах величина оптических потерь, обусловленных рэлеевским рассеянием за счет флуктуаций плотности стекла определяется формулой:

$$\alpha_{\text{рел.р.}} = \frac{8\pi^3}{3\lambda^4} (n^2 - 1) \beta_k T_f$$

где λ - длина волны света, n - показатель преломления стекла, k - постоянная Больцмана, β - изотермическая сжимаемость при фиктивной температуре T_f (температуре, при которой “замerзают” флуктуации в стекле). Фиктивная температура может существенно отличаться от температуры стеклования и зависит как от состава стекла, так и от его температурной предыстории. В многокомпонентных стеклах к флуктуациям плотности добавляются флуктуации концентрации оксидов, входящих в состав стекла. Спектральная зависимость оптических потерь за счет рэлеевского рассеяния остается прежней:

$$\alpha_{\text{рэл.}} \sim \frac{1}{\lambda^4}$$

Величина концентрационного рассеяния и, соответственно, коэффициент рэлеевского рассеяния зависит от термодинамических параметров стекла, которые не всегда удается рассчитать теоретически. Обычно зависимость коэффициента рэлеевского рассеяния от концентрации легирующих добавок определяют экспериментально. Примеры некоторых измеренных значений представлены в таблице.

Табл.1.2. Примеры коэффициентов рэлеевского рассеяния для некоторых световодов.

Коэффициент рэлеевского рассеяния, дБ мкм ⁴ /км	Световод	Состав легирующих добавок	Диапазон концентраций, Δ
0,7 (1+0,57 Δ)	Многомодовый	Ge O ₂ – Si O ₂	0 – 3%
0,73(1+0,61 Δ)	Одномодовый	Ge O ₂ – Si O ₂	0 – 1%
0,75(1+0,58 Δ)	Одномодовый	Ge O ₂ – Si O ₂	0,4 – 3%

Где Δ - относительный показатель преломления легированного стекла, выраженный в процентах: $\Delta = \frac{n - n_k}{n_k} 100\%$, n_k - показатель преломления нелегированного кварцевого

стекла, n - показатель преломления равномерно легированного стекла, или максимальное значение показателя в сердцевине исследуемого световода.

1.4. Потери на микроизгибах

Из-за изгиба волокна возникают дополнительные потери из-за нарушения полного внутреннего отражения на границе между сердцевиной и оболочкой. Зависимость этих потерь от радиуса изгиба R экспоненциальная:

$$\alpha = A \exp(-g(\lambda)R),$$

где коэффициенты A и g зависят от типа волокна. Для стандартного SSMF световода

$$A = \frac{7,5\lambda_c^{3/2}}{R^{1/2}\lambda^2} = \frac{C(\lambda)}{R^{1/2}}$$

$$g(\lambda) = \frac{1,65 \times 10^{-4}}{\lambda} \left(2,75 - \frac{\lambda}{\lambda_c} \right)^3$$

где λ_c – длина волны отсечки ($\lambda_c \sim 1,3 \mu\text{м}$).

Доминирующими факторами, влияющими на потери на изгибе, являются радиус изгиба и длина волны излучения. При больших длинах волн значительная часть оптической энергии распространяется за пределами световедущей жилы и потери на изгибе возрастают.

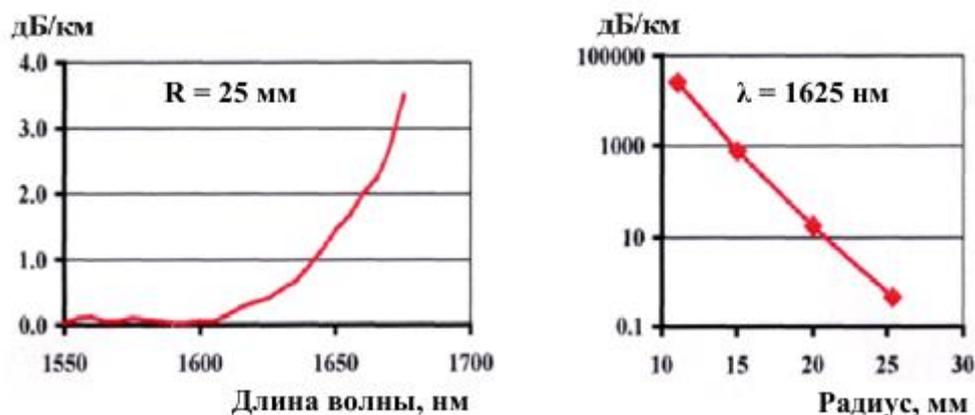


Рис.1.2. Зависимость потерь на изгибе волокна от длины волны излучения и радиуса изгиба стандартного одномодового волокна (требования G.652).

В логарифмическом масштабе потери на витке волокна зависят от радиуса изгиба линейно.

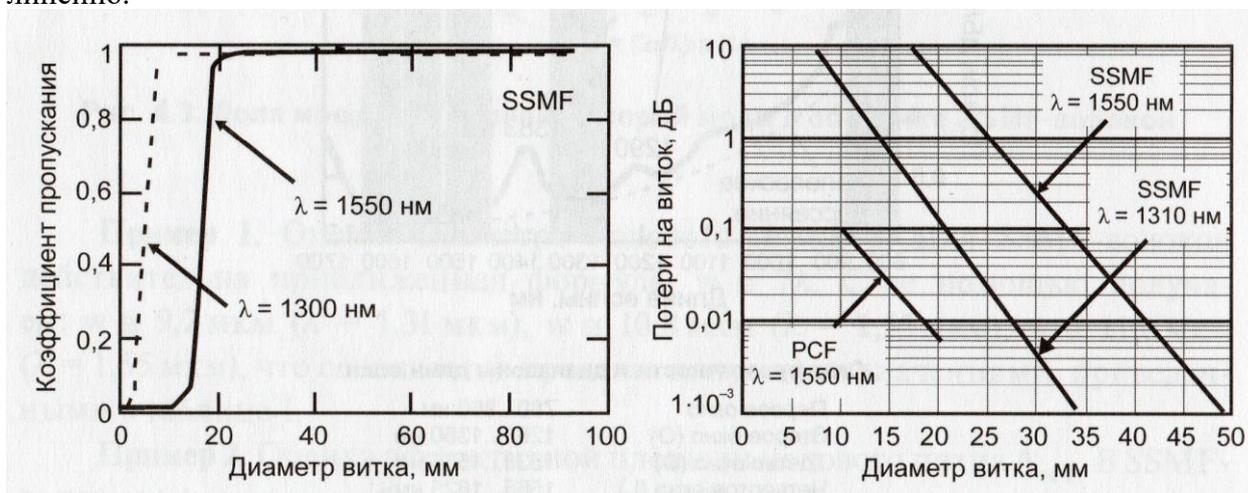


Рис.1.3. Потери при изгибе стандартных волокон (SSMF требования G.652).

Изгибные потери тем больше, чем меньше разница показателей преломления сердцевина-оболочка. При увеличении длины рабочей волны потери при изгибе волокон

увеличиваются. Например, в витке SSMF-волокна диаметром 20 мм вносимые потери на $\lambda=1310$ нм малы ($\sim 0,1$ дБ), а на $\lambda=1550$ нм увеличиваются до 3 дБ. Это факт используется в рефлектометрии для поиска мест изгиба волокон.

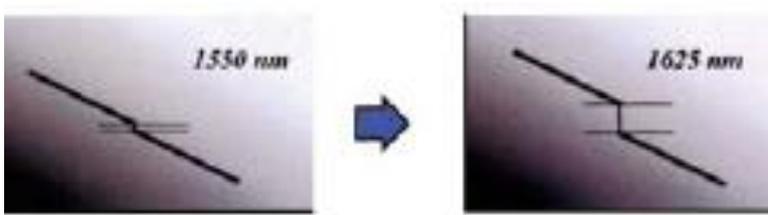


Рис.1.4. Проверка с помощью рефлектометра участка с изгибом малого радиуса.

Изгибные потери характеризуют критическим радиусом изгиба R_o . При $R > R_o$ свет проходит через изогнутый участок волокна без потерь. При $R < R_o$ свет практически полностью гасится. Для SSMF-волокна $R_o \approx 10$ мм ($\lambda=1550$ нм).

При прокладке абонентских кабелей внутри помещений, в кроссовом оборудовании и т.д. желательно иметь возможность изгибать волокна. Практически не внося дополнительных потерь. Для этих применений были разработаны волокна с уменьшенной чувствительностью к изгибу (G.657).

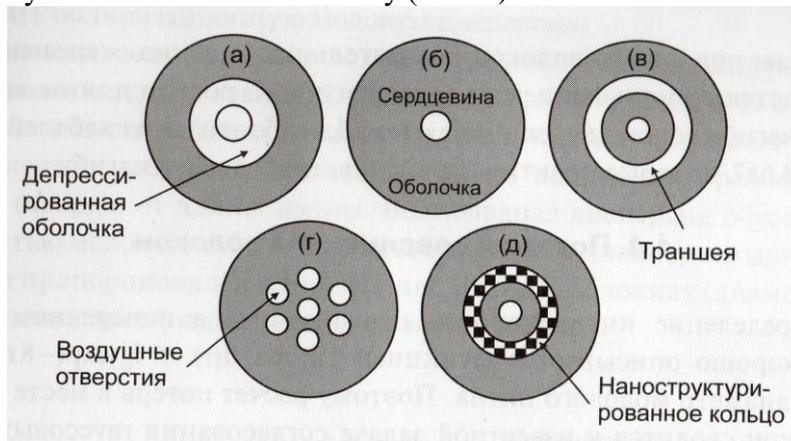


Рис.1.5. Конструкция волокон с малыми потерями на изгибе: (а) – депрессированная оболочка; (б) – малый диаметр модового пятна; (в) – траншея в ППП; (г) – дырочное волокно; (д) – наноструктурированное кольцо.

В этих конструкциях потери на изгибе уменьшаются как за счет уменьшения диаметра модового пятна, так и за счет ограничения поля волны кольцами с сильно уменьшенным показателем преломления. Волокна G.657 практически нечувствительны к изгибу.

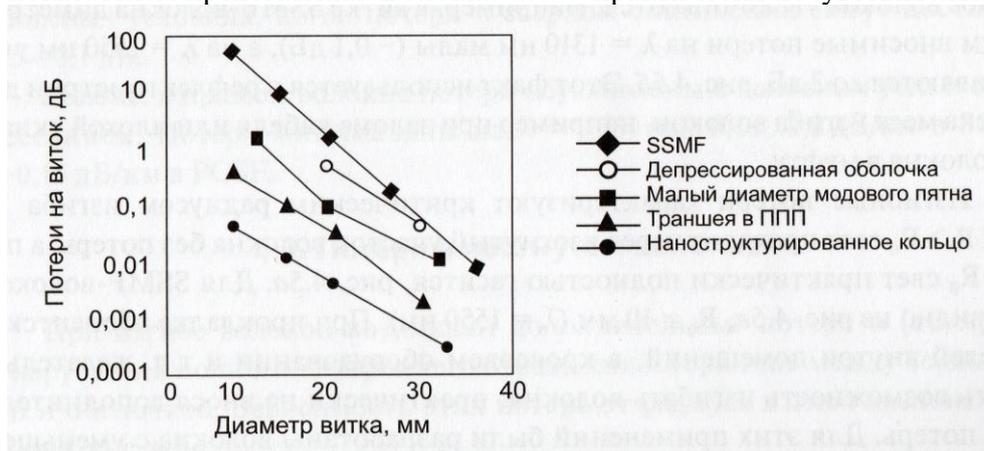


Рис.1.6. Потери на виток при изгибе одномодовых волокон ($\lambda=1550$ нм).

1.5. Потери, вносимые соединителями

Коэффициент передачи оптической мощности (коэффициент пропускания) B при торцевом соединении определяется как $B = P_{out} / P_{in}$, а вносимые потери α исходя из соотношения $\alpha = -10 \lg B = -10 \lg P_{out} / P_{in}$ [дБ], где P_{in} и P_{out} соответственно интенсивности излучения на входе и выходе соединения. Точный замер этих параметров на практике соответствует следующей процедуре. Сначала находят интенсивность на непрерывном участке волокна, что соответствует градуировке приемника (P_{in}). Затем разрезают волокно и после оконцевания соединителями мест разрыва вновь соединяют. Вторичный замер интенсивности соответствует P_{out} . Обычно вносимые потери зависят от типа волокна (многомодовое или одномодовое), типов и качества соединителей и составляют от 0,3 до 0,5 децибела. Вносимые потери можно разбить на две категории: внутренние и внешние потери.

Внутренние потери определяются факторами, которые невозможно контролировать (достичь их улучшения при заделке волокна в соединитель), а именно парной вариацией диаметров сердцевин, показателей преломления, числовых апертур, эксцентриситетов сердцевина/оболочка и концентричности сердцевины у волокон с разных сторон. Причем следует аддитивно учитывать все эти потери. Можно ожидать случайное изменение этих факторов даже в том случае, когда волокна одинакового стандарта или с одной и той же катушки. Эти факторы проявляются меньше на непрерывном сегменте оптического кабеля, так как они плавно меняются с длиной. На внутренние потери влияет технология производства волокна и соответствующие критерии контроля качества, а не конструктор соединителя. Зная разброс значений перечисленных выше параметров, можно определить максимальное значение внутренних потерь.

Потери из-за вариации показателей преломления являются следствием чисто Френелевского отражения и определяются в простейшем случае для волокна со ступенчатым профилем как $\alpha_F = -10 \lg(4n_1 n_2 / (n_1 + n_2)^2)$ [дБ], где n_1 и n_2 - показатели преломления волокон (зазора между волокнами нет). Эти потери пропадают только при равенстве показателей преломления. Потери при вариации апертур возникают в том случае, если апертура волокна, передающего сигнал NA_1 , больше апертуры волокна, принимающего сигнал NA_2 . Потери при вариации диаметров возникают, когда диаметр передающего волокна меньше диаметра принимающего, и определяются соотношением $\alpha_D = -10 \lg D_2 / D_1$ [дБ], где D_1 и D_2 - диаметры передающего и принимающего волокон, соответственно. При $D_1 < D_2$ потери не возникают.

Соединение волокон 62,5/125 и 50/125. Факт наличия двух основных широко распространенных стандартов многомодового градиентного волокна 50 мкм и 62,5 мкм нужно принять как свершившийся. Многомодовое волокно наибольшее применение имеет при строительстве локальных сетей. Российские заводы по производству волоконно-оптического кабеля более широко используют стандарт многомодового волокна с диаметром светонесущей жилы 50 мкм отечественного производства. Если свет распространяется из волокна 50/125 в волокно 62,5/125, то потери интенсивности света не происходит (мы пренебрегаем другими потерями). Если же свет переходит из волокна 62,5/125 в волокно 50/125, то вносимые потери около 1,94 дБ.

Внешние потери – это потери, которые являются следствием несовершенства как самой конструкции соединителя, так и процесса сборки. Внешние потери зависят от S радиального смещения L (Рис.4.8), зазора между поверхностями соединяемых световодов (Рис.4.9), углового рассогласования (Рис.4.10).

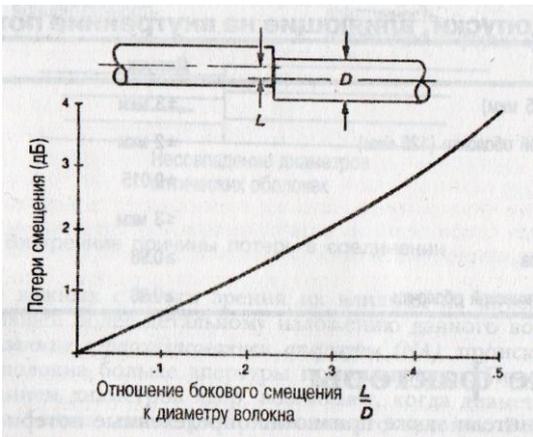


Рис.1.7. Потери от бокового смещения световодов.

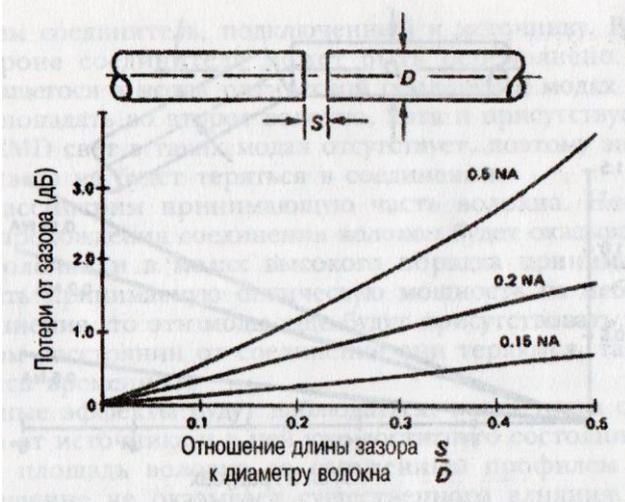


Рис.1.8. Потери от зазора между световодами.

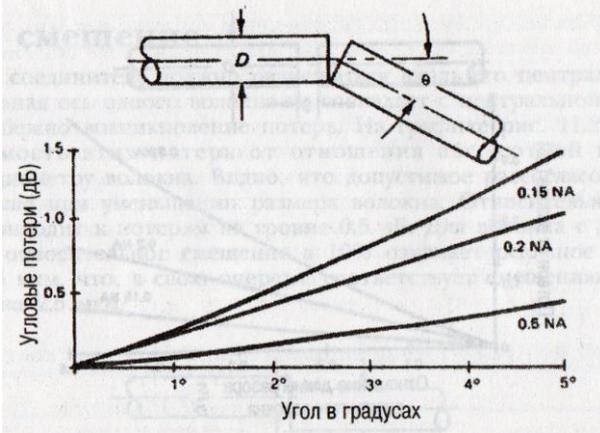


Рис.1.9. Потери вследствие углового рассогласования световодов.

1.6. Нормированная частота волоконного световода.

Для характеристики волокна используется соотношение, называемое относительной разностью показателей преломления: $\Delta = (n_1^2 - n_2^2) / 2n_1^2$.

Длина волны света, показатели преломления сердцевины и оболочки, и геометрические размеры световодов объединяет волноводный параметр (встречается в литературе под следующими наименованиями: нормированная рабочая частота или волноводная частота или частота отсечки или нормализованный параметр частоты) V :

$$V = 2\pi r(n_1^2 - n_2^2)^{1/2} / \lambda,$$

где r - радиус сердцевины волокна.

Каждый световод характеризуется своим значением V -параметра, величина которого определяет, в частности, число мод, поддерживаемых световодом. Так, при

$$V < 2,405$$

в световоде будет распространяться только одна мода HE_{11} , то есть световод переходит в одномодовый (по-другому - мономодовый) режим.

С ростом V -параметра увеличивается число мод, поддерживаемых световодом.

При $V \gg 1$ число M мод, поддерживаемых световодом:

$$M = \frac{V^2}{2}$$

для ступенчатого световода и

$$M = \frac{V^2}{4}$$

для световода с градиентным профилем показателя преломления.

1.7. Радиус модового пятна одномодового световода.

Радиус модового пятна w основной моды одномодового световода можно рассчитать по эмпирическому соотношению:

$$\frac{w}{a} = 0,65 + \frac{1,619}{V^{3/2}} + \frac{2,879}{V^6}.$$

Для стандартных одномодовых волоконных световодов действительна приближенная оценка: $2w \approx 7\lambda$.