

Затухание и потери в ОВ

Оптические волокна используют кварцевое стекло с различными примесями. Затухание в этом материале имеет минимальные значения (окна прозрачности) на частотах 700...1700 нм и складывается из потерь на поглощение в материале (ультрафиолетовое и инфракрасное поглощение) и потерь на поглощение примесями. Для расчетов коэффициентов затухания, связанных с инфракрасным и ультрафиолетовым поглощением можно использовать следующие аппроксимирующие выражения

$$\alpha_{ик} = 10^{\left(\frac{21,9}{\lambda_{[мкм]}^2} + 12,4 \right)}, \quad \alpha_{уф} = \frac{10^{\frac{2}{\lambda_{[мкм]}}}}{2154}.$$

Примеси поглощают свет на определенных длинах волн, причем даже крайне малая концентрация примесей приводит к увеличению потерь на определенных частотах. Наиболее заметное поглощение соответствует примесям ОН (ионам гидроксильных групп) – так называемый водный пик в районе $\lambda=1383$ нм присутствует у большей части оптических волокон. В таких волокнах область спектра в районе водного пика практически не используется из-за больших потерь. Потери на поглощение как сумма потерь на поглощение материалом и потерь на примеси могут быть найдены по формуле

$$\alpha_n = 8,69 \frac{\pi n_1 \operatorname{tg} \delta}{\lambda_{[км]}},$$

где $\operatorname{tg} \delta$ относится к сердцевине ОВ.

Современные технологии позволяют получить кварцевые волокна с подавленным водным пиком (LWP, Low Water Peak), причем доля применения LWP-волокон еще в 2010 году составила более 90% от общего мирового объема применения оптических волокон, а все известные на российском рынке производители в настоящее время выпускают только LWP-волокна. Применение LWP-волокон привело к пересмотру значений спектральных диапазонов в интервале длин волн 1280...1675 нм. Международным союзом электросвязи (МСЭ, ITU-T) утверждены новые спектральные диапазоны в интервале длин волн 1280...1675 нм, приведенные в таблице

Спектральные диапазоны для одномодовых волокон

Диапазон	Интервал длин волн, нм	Наименование диапазона
Первый	780...860	Первый
O-диапазон	1280...1360	Основной (<i>Original</i>)
E-диапазон	1360...1460	Расширенный (<i>Extended</i>)
S-диапазон	1460...1530	Коротковолновый (<i>Short wavelength</i>)
C-диапазон	1530...1565	Стандартный (<i>Conventional</i>)
L-диапазон	1565...1625	Длинноволновый (<i>Long wavelength</i>)
U-диапазон	1625...1675	Сверхдлинный (<i>Ultra-long wavelength</i>)

На начальном этапе развития оптические волокна работали в трех окнах прозрачности:

- первое использовалось в 1970х годах в первых линиях связи на многомодовых волокнах. Тогда полупроводниковые источники излучения выпускались только на длину волны 850 нм. В настоящее время из-за

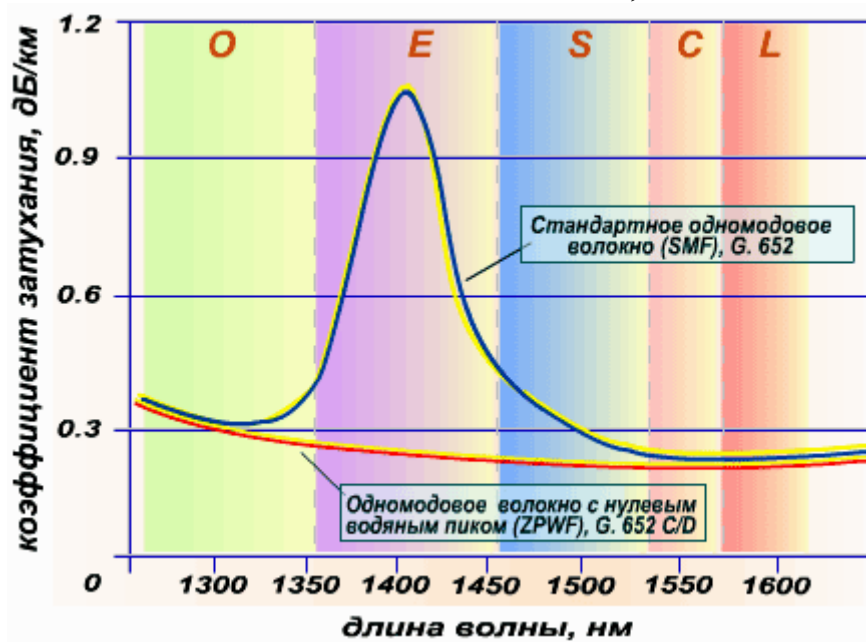
большой величины потерь в волокнах этот диапазон используется только в локальных вычислительных сетях;

- второе (O) стало использоваться в 1980х годах в линиях дальней связи после того, как были разработаны источники излучения на длину волны 1310 нм. В настоящее время используется преимущественно в городских и зонавых линиях;

- третье (C) было освоено в начале 1990х годов. Оно характеризуется минимальными потерями на длине волны 1550 нм. Наиболее широко используется

в магистральных линиях;

- четвертое (L) и пятое (S) были реализованы благодаря успехам в технологии производства оптоволокна, при которой потери в водном пике на длине волны 1390 нм были снижены до 0,31 дБ/км.



Микроскопические изменения в составе стекла приводят к флуктуациям показателя преломления на расстояниях, сопоставимых с длиной волны излучения. Наличие таких пространственных флуктуаций вызывает рассеяние света, известное как рэлеевское, которое приводит к выводу части энергии излучения из сердцевины в оболочку, а следовательно, к потерям. Потери вследствие рэлеевского рассеяния пропорциональны λ^{-4} и могут

быть найдены по формуле:

$$\alpha_p = \frac{K}{\lambda_{\text{мкм}}^4}.$$

Дополнительное затухание, обусловленное кабельными потерями, состоит из суммы следующих парциальных коэффициентов затухания:

- затухание вследствие приложения к оптическому волокну термомеханических воздействий в процессе изготовления кабеля;
- затухание вследствие температурной зависимости коэффициента преломления материала оптоволокна;
- затухание вследствие микроизгибов оптоволокна;

- затухание вследствие нарушения прямолинейности оптического волокна (скрутка);
- затухание вследствие кручения оптического волокна относительно его оси (осевые напряжения скручивания);
- затухание вследствие неравномерности покрытия оптического волокна;
- затухание вследствие потерь в защитной оболочке оптоволокна.

При строительстве и эксплуатации оптических кабельных линий возможно появление так называемых эксплуатационных потерь. Прежде всего, они связаны с макроизгибами оптического волокна (радиус кривизны изгиба $R \gg 1$ мм), которые неизбежно возникают при прокладке оптического волокна. Другая причина эксплуатационных потерь – постепенное увеличение собственных потерь оптического волокна. Потери на макроизгибах обусловлены преобразованием направляемых мод в моды излучения.

Основной причиной постепенного увеличения собственных потерь оптического волокна является влага, проникающая в оптический кабель. Под ее воздействием происходит помутнение стекла и образование микротрещин. Для защиты от влаги применяются влагозащитные оболочки и гидрофобное заполнение.

На участке соединения отдельных оптических волокон при монтаже линии связи затухание может достигать величин больших, чем в самом оптическом кабеле. На величину затухания в сростке большое влияние оказывает поперечное смещение и смещение осей соединяемых волокон.

Дисперсия в ОВ

Поскольку по оптоволокну передается полезные сигналы, необходимо уметь оценить, насколько они изменили свою форму в процессе распространения. Дисперсия представляет собой сдвиг во времени спектральных и модовых составляющих оптического сигнала, которое приводит к увеличению длительности (уширению) импульса. При достаточно большом увеличении ширины импульсы начинают перекрываться, так что становится невозможным их выделение при приеме. Количественно дисперсия имеет размерность времени и определяется по формуле

$$\tau(L) = \sqrt{t_{\text{вых}}^2 - t_{\text{вх}}^2},$$

где L – длина кабеля; $t_{\text{вх}}$ – длительность импульса на входе кабеля; $t_{\text{вых}}$ – длительность импульса на выходе кабеля.

Обычно дисперсия исчисляется в расчете на $L=1$ км и измеряется в пс/км. Дисперсия не только ограничивает частотный диапазон использования световодов, но и существенно снижает дальность передачи по оптическому кабелю, так как чем длиннее линия, тем больше проявляется дисперсия и больше уширение импульсов.

Различают следующие механизмы возникновения дисперсии:

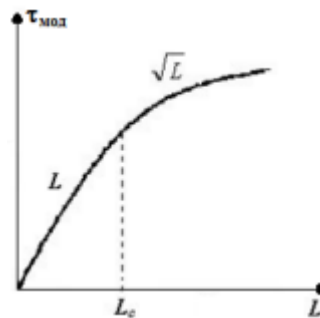
- наличие большого числа мод, время распространения которых различно (межмодовая дисперсия $\tau_{\text{мод}}$). Данный вид дисперсии характерен только для многомодового волокна;
- некогерентность источников излучения и появление спектра (хроматическая дисперсия $\tau_{\text{хром}}$).

Хроматическая дисперсия в свою очередь делится на материальную дисперсию $\tau_{\text{мат}}$, которая обусловлена зависимостью показателя преломления от длины волны, волноводную дисперсию $\tau_{\text{вв}}$, обусловленную процессами внутри моды и характеризующуюся зависимостью коэффициента распространения моды от длины волны, профильную дисперсию $\tau_{\text{пр}}$, обусловленную отклонениями в форме сечения реального оптического волокна от идеальной.

Результирующая дисперсия определяется следующим образом

$$\tau^2 = \tau_{\text{мод}}^2 + \tau_{\text{хром}}^2 = \tau_{\text{мод}}^2 + (\tau_{\text{мат}} + \tau_{\text{вв}} + \tau_{\text{пр}})^2.$$

Причиной возникновения межмодовой дисперсии в многомодовых волокнах в лучевой модели является разница во времени распространения лучей по самому короткому и самому длинному пути в волокне. График изменения межмодовой дисперсии от длины волокна показан на рисунке



Межмодовая дисперсия возрастает с увеличением длины волокна. Однако, это имеет место только для идеального волокна, в котором взаимодействие между модами отсутствует. В реальных условиях наличие неоднородностей, кручение и изгиб оптоволокна приводят к постоянным переходам энергии из одних мод в другие, в связи с чем дисперсия становится пропорциональной \sqrt{L} . Это проявляется не сразу, а после прохождения световой волной определенного расстояния — длины установившейся связи мод, которое принимается равным 5-7 км для ступенчатого оптоволокна и 10-15 км для градиентного. Межмодовая дисперсия может быть уменьшена за счет выбора профиля показателя преломления оптоволокна. При оптимальном профиле показателя степени околоосевые лучи проходят меньший геометрический путь, но распространяются в среде с большим значением показателя преломления (т.е. с меньшей скоростью), а периферийные лучи проходят более длинный путь, но в основном в среде с меньшим показателем преломления. В результате время распространения лучей по оптоволокну выравнивается. Существует оптимальный профиль показателя преломления, при котором межмодовая дисперсия минимальна, при этом

$$n(r) = n_1 \sqrt{1 - \Delta \left(\frac{r}{a}\right)^{2(1-\Delta)}}$$

Хроматическая дисперсия вызвана зависимостью групповой скорости моды от длины волны и ширины спектра частот источника излучения. Данный вид дисперсии имеет место при распространении сигналов как в одномодовом, так и в многомодовом волокне.

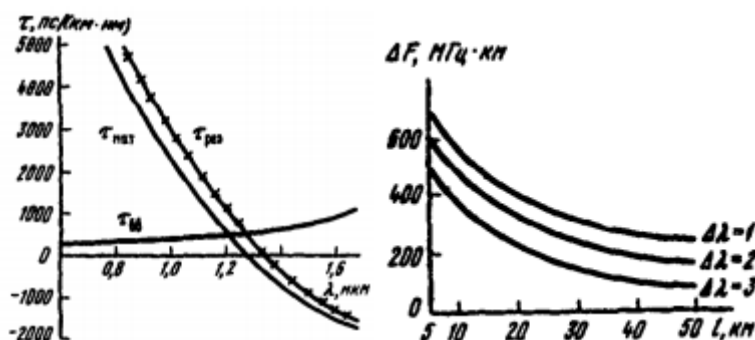
Под материальной дисперсией понимается зависимость показателя преломления сердцевины оптоволокон от длины волны, которая существует для всех видов материалов. При этом, различные спектральные компоненты импульса распространяются с разными фазовыми скоростями и приходят на выход точку в разное время. Это приводит при суммировании спектральных составляющих к уширению импульса на выходе и к искажению его формы. Уширение импульса при материальной дисперсии можно рассчитать по формуле:

$$\tau_{\text{мат}} = \Delta\lambda L M(\lambda),$$

где $\Delta\lambda$ - ширина спектра излучения источника (1-3 нм для лазера и 20-40 нм для светоизлучающих диодов); $M(\lambda)$ – удельная материальная дисперсия.

Профильная дисперсия проявляется в реальных оптических волокнах, как одномодовых, так и многомодовых. К основным причинам возникновения этого вида дисперсии относятся поперечные и продольные малые отклонения геометрических размеров и формы волокна, например небольшая эллиптичность поперечного сечения волокна. В ряде случаев профильная дисперсия может оказать существенное влияние на общую дисперсию.

На следующем рисунке показан ход изменения волноводной, материальной и результирующей дисперсий в зависимости от длин волн излучателя.



Как видно из рисунка, с увеличением длины волны $\tau_{\text{мат}}$ уменьшается и проходит через нуль, после чего принимает отрицательные значения. В диапазоне 1300...1600 нм волноводная и материальная дисперсия находятся в противофазе и взаимно компенсируют друг друга, поэтому в области 1300...1400 нм обеспечивается наибольшая пропускная способность волновода. При этом вблизи $\lambda=1350$ нм происходит взаимная компенсация материальной и волноводной дисперсий, и результирующая дисперсия приближается к нулевому значению. Поэтому волна 1350 нм получила широкое применение в одномодовых системах передачи. Однако

лучшими характеристиками затухания обладает волна длиной 1550 нм, и для достижения минимума дисперсии в этом случае приходится варьировать профилем показателя преломления и диаметром сердцевины.

Явление дисперсии приводит как к ограничению пропускной способности оптических кабелей, так и к снижению дальности передачи по ним.

Сравнивая дисперсионные характеристики различных световодов, можно отметить, что лучшими являются одномодовые световоды, где присутствует только хроматическая дисперсия, величина которой не превышает нескольких пикосекунд в диапазоне длин волн 1200-1600 нм.

Из многомодовых световодов наилучшими характеристиками обладают градиентные световоды с плавным параболическим законом изменения профиля показателя преломления. В них происходит выравнивание времени распространения различных мод и определяющей является материальная дисперсия. По абсолютной величине дисперсия в таких волокнах уменьшается с увеличением длины волны и колеблется в пределах 1...2 нс/км. Наиболее сильно дисперсия проявляется в ступенчатых многомодовых световодах, что приводит к уменьшению использования их в цифровых высокоскоростных линиях связи.

