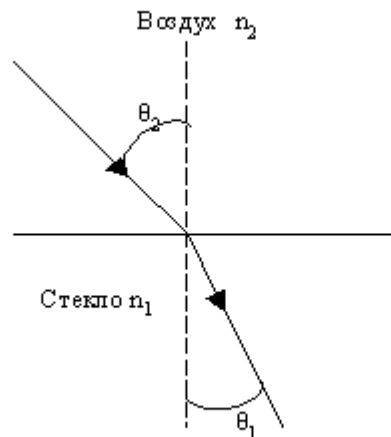


Часть 1. Основные понятия волоконной оптики.

1.1. Показатель преломления.

При переходе света через границу раздела двух сред, например из стекла в воздух, на границе раздела происходит отражение части падающего на нее света. Оставшаяся часть света переходит в другую среду, изменяя свое направление. Это явление называется *преломлением света*.



Преломление света при переходе границы “воздух-стекло”

На рисунке показан свет, перешедший из воздуха в стекло. Угол θ_2 называется углом падения, а угол θ_1 – углом преломления. Отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для данных двух сред, то есть

$$\sin \theta_2 / \sin \theta_1 = n$$

Постоянную величину « n » называют относительным показателем преломления или просто *показателем преломления*. Абсолютный показатель преломления – это показатель преломления среды относительно вакуума, то есть отношение синуса угла падения к синусу угла преломления при переходе света из вакуума в данную среду.

В общем случае показатель преломления любой среды показывает во сколько раз уменьшается фазовая скорость V световой волны, распространяющейся в данной среде, по сравнению с фазовой скоростью c в вакууме. Он обозначается буквой n и является безразмерной величиной.

$$V = c/n$$

Среда с более высоким значением показателя преломления называется оптически более плотной средой. В оптическом волокне такой средой является сердцевина, выполняющая роль среды распространения света. Показатель преломления оболочки, окружающей сердцевину, немного меньше, чем у сердцевины и за счет этого на границе "серцевина-оболочка" происходит отражение света. На этом эффекте основано прохождение света по волокну.

Показатель преломления, связанный с диэлектрической проницаемостью на высоких частотах, может быть выражен через относительную магнитную (μ_a) и относительную диэлектрическую (ϵ_a) проницаемости. Фазовая скорость электромагнитных волн, распространяющихся в диэлектрической среде, определяется следующим выражением:

$$v = 1/(\mu_0 \mu_a \epsilon_0 \epsilon_a)^{1/2} = c/(\mu_a \epsilon_a)^{1/2}$$

где μ_0 и ϵ_0 - соответственно магнитная и диэлектрическая проницаемости свободного пространства. Поскольку магнитные эффекты в диэлектриках очень малы, то принимается, что $\mu_a = 1$, а в результате для n получается следующее выражение:

$$n = (\epsilon_a)^{1/2}$$

Показатель преломления оболочки постоянен, а в сердцевине он в общем случае представляет собой функцию поперечной координаты, которая называется *профилем показателя преломления*.

1.2. Профиль показателя преломления (ППП).

Для передачи информации большое значение имеет изменение показателя преломления по диаметру поперечного сечения волокна - так называемый профиль показателя преломления. Если сердцевина световода имеет постоянное по диаметру значение показателя преломления, то такие световоды называются *световодами со ступенчатым профилем показателя преломления* (т. е. на границе "сердечник-оболочка" существует ступенька n). Если показатель преломления от центра к краю плавно уменьшается, то такие световоды называются *световодами с градиентным профилем показателя преломления (или градиентными световодами)*. Ход лучей в ступенчатом и градиентном световодах показан на Рис.1.2.1.

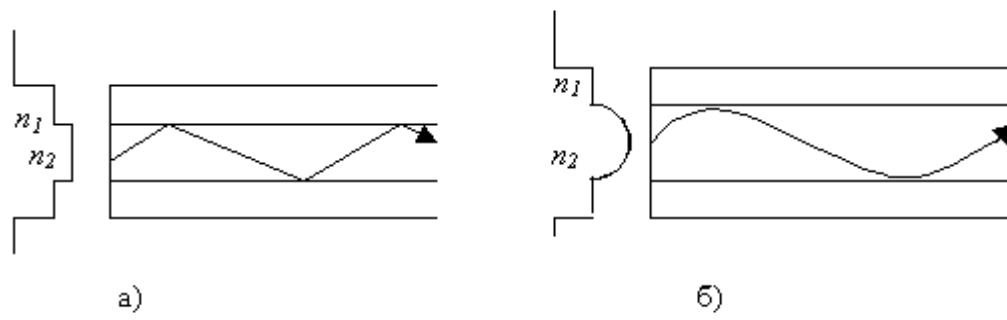


Рис.1.2.1. Ход лучей в ступенчатом (а) и градиентном (б) световоде.

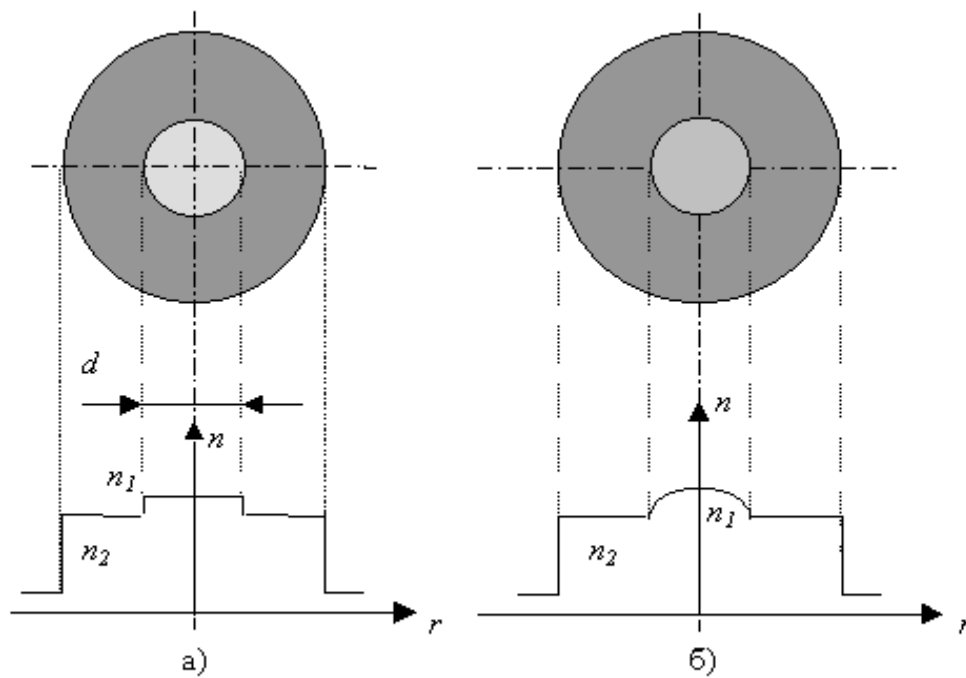


Рис. 1.2.2. Профили показателя преломления а) - ступенчатый, б) - градиентный

1.3. Мода.

Свет по своей природе является электромагнитной волной, имеющей электрическую и магнитную составляющие. Обычно электрическая составляющая электромагнитной волны представляется в виде вектора E (вектор напряженности электрического поля), а магнитная составляющая - в виде вектора H (вектор напряженности магнитного поля). Различные комбинации этих векторов представляют собой типы волн, называемые модами. Таким образом, мода - это одна из составляющих света, распространяющегося в волокне, которая соответствует определенному типу колебаний. В некоторой степени, различные моды можно ассоциировать с различными траекториями лучей света. Каждая из мод распространяется со своими собственными значениями фазовой и групповой скоростей. Число мод, распространяющихся в световоде при многомодовом источнике излучения, зависит от диаметра сердечника d и длины волны λ . С увеличением диаметра и уменьшением длины волны число мод резко возрастает. По числу распространяющихся мод принята следующая классификация волокон:

- одномодовые, число мод $N=1$ при $d \approx \lambda$, тип волны - HE_{11} ;
- маломодовые, $N \leq 20$, при $d > \lambda$;
- многомодовые, $N > 20$, при $d \gg \lambda$.

При сравнительно большой толщине сердечника ($d \gg \lambda$) световод работает в многомодовом режиме, а при $d \approx \lambda$ - в одномодовом, т. е. один и тот же световод может использоваться в зависимости от длины волны как в одномодовом, так и в многомодовом режиме.

Длина волны света, показатели преломления сердцевин и оболочек, 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 волокна

Волноводный параметр определяет количество мод, которые могут распространяться в волокне. Оно соответствует $N = 2V/\pi$, т.е.

$$N = 4r(n_1^2 - n_2^2)^{1/2} / \lambda$$

Каждая мода имеет минимальную частоту отсечки, то есть частоту, ниже которой она не может распространяться. Например, при

$$V < 2,4048$$

будет распространяться только одна мода HE_{11} .

С увеличением V появляется возможность существования других направляемых мод, которые принято называть *модами высшего порядка*.

1.4. Оптическое волокно.

Оптическое волокно - это светопроводящий стержень, изготовленный из кварцевого стекла, обычно цилиндрической формы и окруженный стеклянной оболочкой (с другим показателем преломления). Оболочка отражает свет, попавший на нее свет в сердцевину, используя эффект полного внутреннего отражения. За счет этого вдоль оптической оси волокна распространяется световое излучение. В зависимости от профиля показателя преломления существуют 2 основных типа волокон;

- волокно со ступенчатым профилем показателя преломления;
- волокно с градиентным профилем показателя преломления.

В волокне со ступенчатым ППП показатель преломления скачком меняет свою величину на границе "сердечник-оболочка". В волокне с градиентным ППП величина показателя преломления плавно уменьшается от оси к границе.

В зависимости от количества распространяемых мод, волокна делятся на одномодовые и многомодовые (такое деление принято в организациях, эксплуатирующих оптическое волокно в целях связи или передачи данных). В группу одномодовых волокон входят как собственно одномодовые, так и маломодовые волокна.

1. Одномодовое волокно. В таком световоде распространяется только одна мода, соответствующая основному типу волн. Диаметр сердечника одномодового волокна может изменяться от 4 до 10 мкм. Чаще всего одномодовое волокно изготавливается со ступенчатым ППП, но выпускаются и градиентные одномодовые волокна.
2. Многомодовые волокна. В них может одновременно распространяться множество типов волн (несколько десятков или сотен). Диаметр многомодовых волокон обычно бывает 3 размеров: 50 мкм, 62,5 мкм и 100 мкм. Иногда встречается и диаметр 85 мкм. Многомодовые волокна изготавливаются как со ступенчатым, так и с градиентным ППП.

Диаметр оболочки всех типов волокон (кроме волокна диаметром 100 мкм) составляет 125 мкм. Для волокна с диаметром сердцевины 100 мкм, диаметр оболочки составляет 140 мкм.

Оптические волокна и кабели тестируются производителями по следующим параметрам:

1. Параметры передачи:
 - А) коэффициент затухания;
 - Б) диаметр модового поля;
 - В) коэффициент поляризационной модовой дисперсии;
 - Г) длина волны отсечки в волокне;
 - Д) длина волны отсечки в кабеле.
2. Геометрические характеристики:
 - А) диаметр оболочки;
 - Б) неконцентричность сердцевины/оболочки;
 - В) некруглость оболочки;
 - Г) диаметр покрытия;
 - Д) неконцентричность покрытия;
 - Е) радиус собственной кривизны волокна.
3. Механические свойства:
 - А) параметр динамической усталости;
 - Б) параметр статической усталости;
 - В) механическая прочность, гарантированная при перематке;
 - Г) сила снятия покрытия;
4. Устойчивость волокна к воздействию окружающей среды.
 - А) диапазон рабочих температур;
 - Б) температурная зависимость затухания;
 - В) термовлагодиклирование;
 - Г) действие погружения в воду;
 - Д) старение.
5. Рабочие характеристики:
 - А) диаметр сердцевины;
 - Б) числовая апертура;
 - В) длина волны нулевой дисперсии;
 - Г) наклон нулевой дисперсии;
 - Д) разброс показателей преломления;
 - Е) эффективный показатель преломления для группы волн.

Каждый тип волокна имеет свое назначение. Ступенчатое волокно используется там, где большой размер сердечника и эффективное соединение с источником оптического излучения более важны, чем низкие потери и большая ширина полосы. Такое волокно обычно используется на коротких низкоскоростных линиях передачи данных. Кроме этого, ступенчатое волокно может использоваться там, где имеется радиация, так как на чистую кварцевую сердцевину радиация действует достаточно слабо.

Существует четыре типа волокон со ступенчатым профилем показателя преломления, различающиеся по диаметру – 50 мкм, 62,5 мкм, 85 мкм и 100 мкм, но наиболее широко используется в настоящее

время волокно 62.5/125 (где 62,5 мкм – диаметр сердцевины, а 125 мкм – диаметр оболочки). Фактически все многомодовые сети передачи данных США и Европы используют это волокно. Прежнее широко используемое многомодовое волокно, которое в основном эксплуатировалось телефонными компаниями, имело размеры 50/125. Такие размеры были необходимы для увеличения полосы пропускания длинных телефонных линий. Однако его маленькая сердцевина и небольшая апертура (NA) создавали трудности при соединении со светодиодами, которые использовались в сетях передачи данных при использовании волокна 100/140. Такое волокно (100/140) хорошо работало с линиями передачи данных, но большая сердцевина стоила дорого в изготовлении, а диаметр оболочки требовал специальных разъемов (коннекторов). Эти причины привели к уменьшению его использования. Вместо него компанией Corning было разработано многомодовое волокно 85/125, предназначенное для обеспечения эффективной связи со светодиодными источниками. Такое волокно можно было использовать без замены разъемов, которые применялись и на других волокнах. Впоследствии компания IBM стандартизировала волокно 62.5/125 для своих волоконно-оптических изделий, и использование всех других типов волокон резко снизилось.

Другие компании, работавшие с высокоскоростными сетями, перешли на использование одномодовых волокон из-за их более низких потерь. Одномодовое волокно используется и в кабельном телевидении, поскольку в аналоговых телевизионных сетях применяются лазерные источники, предназначенные для одномодового волокна. На других высокоскоростных сетях одномодовое волокно используется для работы с гигабитными скоростями передачи или передачи данных на длинные расстояния.

1.5. Оптический кабель.

Оптический кабель - это группа оптических волокон, объединенных в одной конструкции и снабженных упрочняющими и защитными элементами. Он включает в себя следующие основные компоненты:

- оптические волокна в оболочке с защитными покрытиями;
- сердечник кабеля;
- упрочняющие элементы кабеля;

- защитные покрытия кабеля.

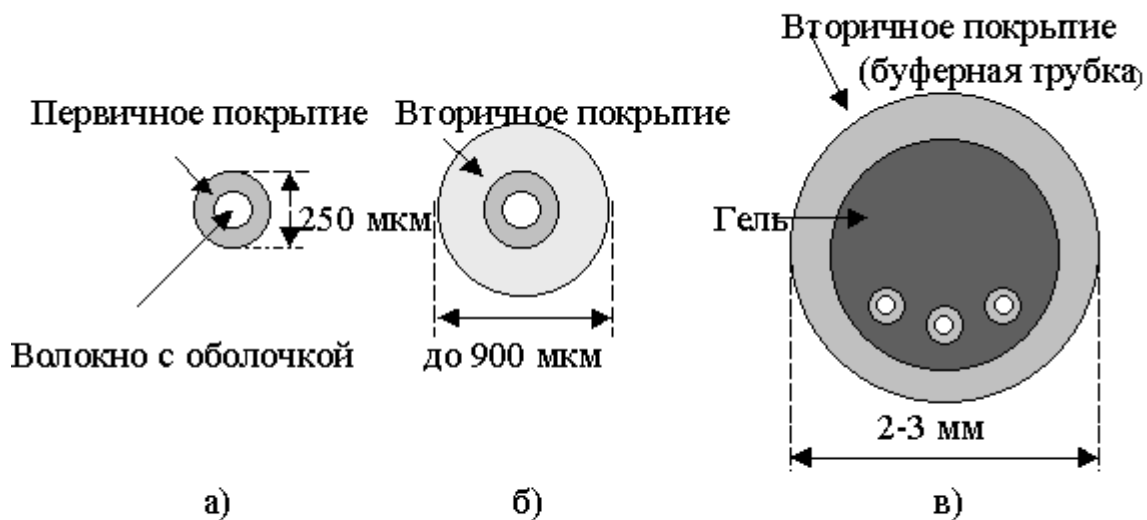


Рис.1.5.1. Волокно в первичном покрытии (а), плотно прилегающем вторичном покрытии (б) и вторичном покрытии в виде буферной трубки (в).

Поверх стеклянной оболочки волокна защищаются первичным покрытием, изготовленным чаще всего из акрила. Диаметр волокна с первичным покрытием 245 ± 10 мкм. Поверх первичного покрытия наносится вторичное покрытие, которое может, как плотно прилегать к нему, так и быть свободным.

В случае свободного вторичного покрытия оно называется свободным буферным покрытием или свободной трубкой.

Сердечники кабеля могут быть разной конструкции. Наиболее часто встречаются три вида сердечников:

- повивный;
- с использованием трубок;
- с профилированным сердечником.

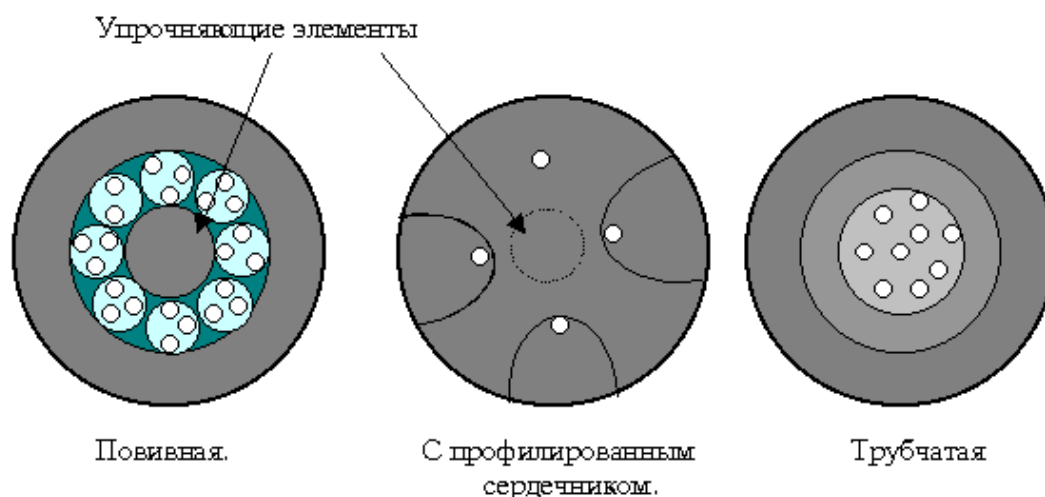


Рис. 1.5.2. Конструкции сердечников волоконно-оптических кабелей.

В роли упрочняющих элементов обычно выступают покрытые медью стальные провода или стержни из пластмассы повышенной прочности. При необходимости кабель дополнительно упрочняется с помощью повива из кевларовых нитей или стекловолоконных лент.

Задачей упрочняющих элементов является защита волокна от больших продольных механических напряжений, возникающих при прокладке и эксплуатации кабеля и вызывающих растяжение волокна более чем на 0,3%.

Защитные оболочки служат для сохранения формы кабеля при больших поперечных напряжениях и защиты от внешней среды. Обычно они выполняются из полиэтилена. Поверх полиэтилена на кабель может накладываться алюминиевая (стальная) лента или гофрированная стальная трубка. На нее наносится еще один слой полиэтилена.

Подробных параметров на конструкции кабелей в международных (IEC) и в европейских (CENELEC) стандартах не существует. Обычно определяются функциональные требования, соответствие которым проверяется посредством механических тестов и тестов на устойчивость к воздействиям окружающей среды.

Существующие в настоящее время оптические кабели по своему назначению разделяются на 3 основные группы: магистральные, зонные и городские кабели. Кроме того, существуют подводные, объектовые и монтажные ОК.

Магистральные оптические кабели применяются для связи на протяженных расстояниях при большом числе каналов. Для хорошей работы на магистралях они должны иметь малое затухание и небольшую дисперсию и обладать большой пропускной способностью. Для обеспечения таких требований в таких кабелях применяется одномодовое

волокно с размерами сердцевины 8...10мкм и оболочки 125 мкм. Рабочие длины волн при этом располагаются в окнах прозрачности 1,3 и 1,55 мкм.

Зоновые оптические кабели предназначены для организации многоканальной связи между областным центром и отдельными районами. При этом расстояния, на которые передается информация, обычно не превышают 250 км. В таких кабелях обычно применяются градиентные волокна с диаметром сердцевины 50 мкм (диаметр оболочки при этом по-прежнему составляет 125 мкм). Рабочие длины волн обычно располагаются в диапазоне 1,3 мкм.

Городские оптические кабели применяются в составе соединительных линий между городскими АТС и узлами связи. Они предназначены для работы на коротких расстояниях до 10 км при большом количестве каналов. В таких кабелях обычно применяются градиентные волокна 50/125 мкм с рабочими длинами волн 0,85 и 1,3 мкм.

Подводные оптические кабели предназначены для обмена информацией между узлами связи, разделенными большими водными преградами.

Объектовые кабели используются для связи внутри различных объектов. Их применяют во внутренних сетях кабельного телевидения, в учрежденческой и видеотелефонной связи, а также в бортовых информационных системах подвижных объектов, таких как самолет или корабль.

Монтажные кабели, выполняемые в виде жгутов или плоских лент, используются для внутреннего и межблочного монтажа аппаратуры.

1.6. Затухание.

При распространении по волокну оптические сигналы теряют свою мощность. Это происходит из-за действия двух причин:

- поглощения света;
- рассеяния света.

Поглощение света связано со свойствами материала и с рабочей длиной волны. Поглощение света происходит при возбуждении в материале электронных переходов и резонансов, которые преобразуют часть энергии света в теплоту. Поскольку такие явления связаны с частотой (или длиной волны) света, то и поглощение также зависит от длины волны света. В зависимости от длины волны различают поглощение в ультрафиолетовом диапазоне и поглощение в инфракрасном диапазоне. Инфракрасное поглощение становится значительным на длинах волн свыше 1,5 мкм, а ультрафиолетовое - на длинах волн до 1,4 мкм. Кроме них в оптическом волокне существует также поглощение, определяемое примесями в материале волокна. Наибольший вклад в величину затухания дают примеси гидроксильной группы ОН.

Рассеяние света частично происходит из-за свойств материала, но в основном определяется нарушениями геометрической формы оптического волокна. Оно происходит тогда, когда мода распространения света изменится таким образом, что часть оптической энергии покинет волокно. При этом не происходит никаких преобразований энергии излучения в другие виды энергии. Рассеянию также способствуют дефекты в сердцевине волокна и микроскопические неоднородности в материале.

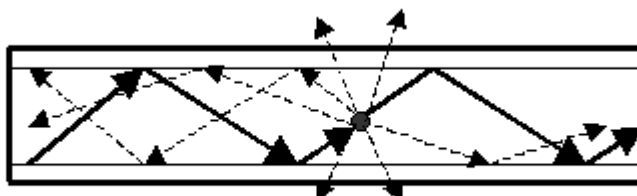


Рис.1.6.1. Рассеяние света от неоднородности

Распространение света от неоднородностей показателя преломления во всех направлениях называется рассеянием Рэлея. Часть света, отраженная от неоднородности в направлении источника излучения называется обратным рассеянием Рэлея, на исследовании которого основана работа оптических импульсных рефлектометров.

Поглощение и рассеяние особенно сильно влияют на сигнал при прохождении его по длинным линиям. На коротких отрезках волокна большой вклад в общие потери оптической энергии вносят потери в пассивных устройствах и потери на соединениях. Кроме них, существенны и потери на изгибах.

Любое волокно можно изгибать без увеличения потерь до некоторого минимального радиуса изгиба. Критический радиус изгиба зависит от конструкции волокна и рабочей длины волны. Ниже приведена зависимость потерь в волокне от длины волны.

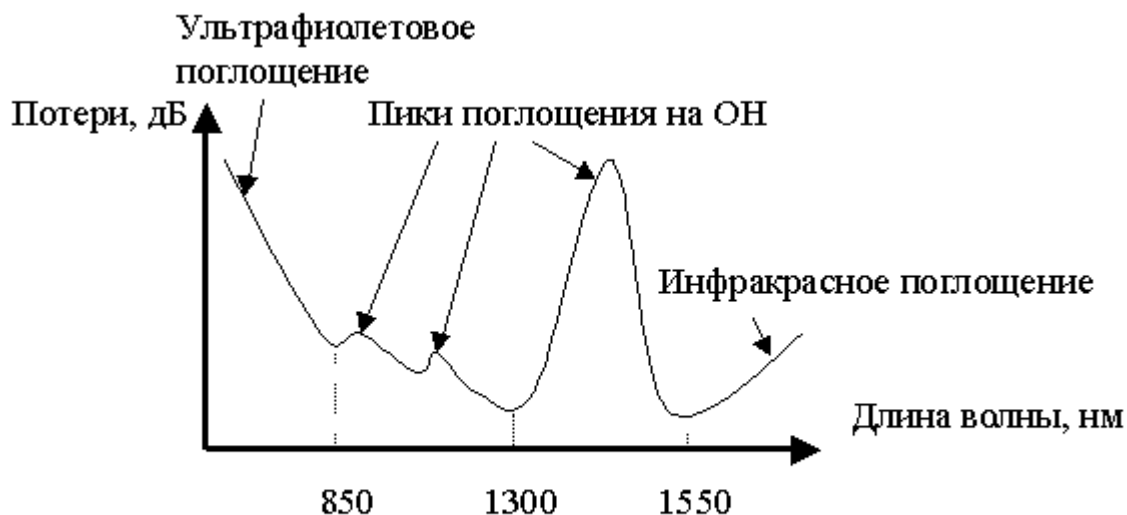


Рис.1.6.2. Зависимость потерь в волокне от длины волны

На Рис.1.6.2. изображены 3 диапазона длин волн, которые используются в телекоммуникациях. Эти диапазоны получили название "окон прозрачности" из-за минимального в них затухания:

- ◆ 1 окно от 820 нм до 880 нм;
- ◆ 2 окно от 1280 нм до 1330 нм;
- ◆ 3 окно от 1520 нм до 1580 нм.

Между 2 и 3 окнами располагается участок с увеличенным затуханием, вызванным ионами гидроксильной группы ОН.

1.7. Ширина полосы пропускания.

Волоконно-оптическую систему связи можно рассматривать как линейную систему с ограниченной полосой пропускания.

Информационная емкость оптического волокна характеризуется его полосой пропускания и коэффициентом широкополосности. Полоса пропускания представляет собой область частот, в которой значение амплитудно-частотной характеристики волокна составляет не менее половины ее максимального значения, что соответствует снижению уровня оптической мощности на 3 дБ. Оптическое волокно характеризуется коэффициентом широкополосности, который определяется по формуле:

$$K = B \cdot L,$$

Где B – ширина полосы пропускания, МГц, а L – длина измеряемого волокна. Коэффициент широкополосности равен полосе пропускания

волокна длиной 1 км и выражается в мегаГерцах, умноженных на километр.

Полоса пропускания ограничивает максимальную верхнюю частоту сигналов, передаваемых по волокну ограниченной длины. Так, если ширина полосы пропускания 100 МГц*км, то это означает, что сигналы с частотой 100 МГц можно передать и без ошибок принять на другом конце участка длиной 1 км. Тогда сигнал с верхней частотой 200 МГц можно передать на расстояние лишь 0,5 км, а сигнал с верхней частотой 50 МГц - на расстояние 2 км. Ширина полосы пропускания определяется следующим выражением:

$$B = 0,44/\tau$$

где B - ширина полосы пропускания; τ – величина уширения импульсов: $\tau = (t_{\text{вых}}^2 - t_{\text{вх}}^2)^{1/2}$, где $t_{\text{вых}}$, $t_{\text{вх}}$ (нс) – длительность входного и выходного импульсов по уровню 0,5.

Самой большой полосой пропускания обладают одномодовые волокна. В области 1300...1600нм их коэффициент широкополосности составляет 50 ГГц*км. Коэффициент широкополосности многомодовых волокон не превышает 50 МГц*км.

1.8. Числовая апертура.

Числовая апертура - это параметр многомодового волокна, определяющий способность оптического волокна собирать свет, попадающий на его торец.

Все лучи, попадающие на торец волокна, входят в него под разными углами к оптической оси. Часть этих лучей, вошедшая под очень большим углом, сразу же выходит из сердцевины и поглощается в оболочке. Другая часть распространяется до противоположного конца волокна. Поэтому существует некий критический угол, при котором луч распространяется в сердцевине. Значению этого угла соответствует величина,

которая носит название *номинальной числовой апертуры* (или *эффективной числовой апертуры*):

$$NA = n_0 \sin\theta_{\text{max}}$$

где n_0 – показатель преломления окружающей среды.

Кроме эффективной числовой апертуры существует *расчетная числовая апертура* - безразмерная величина, численно равная квадратному корню из разности квадратов показателей преломления сердцевины и оболочки:

$$NA = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$$

Величина числовой апертуры колеблется от 0,1 до 0,5 в зависимости от диаметра волокна (меньшему диаметру соответствует и меньшая величина числовой апертуры).

1.9. Дисперсия.

Наряду с затуханием, другим фактором, воздействующим на сигнал, является дисперсия, проявляющаяся в размывании импульсов, то есть увеличении его фронтов при прохождении по волокну.

Существует 3 вида дисперсии:

- модовая дисперсия (или межмодовая дисперсия);
- хроматическая дисперсия;
- поляризационная (внутри)модовая дисперсия (ПМД).

Модовая дисперсия является основным видом дисперсии в многомодовых волокнах со ступенчатым профилем показателя преломления. Она появляется из-за того, что различные моды излучения распространяются по волокну с одинаковой скоростью, но по разным траекториям и поэтому приходят к выходному концу волокна в разное время.

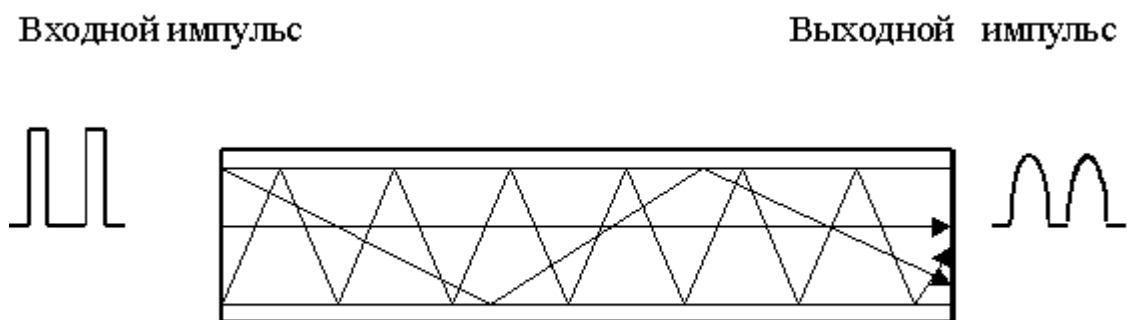


Рис.1.9.1. Механизм возникновения модовой дисперсии.

При передаче импульсов, расположенных близко друг к другу, они начинают накладываться друг на друга, что приводит к ошибкам при их приеме.

Хроматическая дисперсия преобладает в одномодовых волокнах и состоит из:

- материальной дисперсии;
- внутримодовой дисперсии.

Материальная дисперсия возникает из-за взаимодействия света с молекулами среды. Так как такое взаимодействие зависит от частоты, то и скорость распространения электромагнитных волн (а свет есть электромагнитная волна) также зависит от частоты, т.е. от частотного спектра электромагнитных волн передаваемого импульса.

Электрическая составляющая электромагнитной волны поляризует молекулы диэлектрика (в данном случае стекла), в результате чего они начинают колебаться с частотой волны. Колеблющиеся заряды излучают новые волны той же частоты, которые интерферируют с породившей их волной таким образом, что результирующая волна получает суммарный фазовый сдвиг относительно исходной волны. Таким образом, общий фазовый сдвиг оказывается пропорциональным пройденному волной расстоянию и для разных частот оказывается неодинаковым.

Внутримодовая дисперсия является основным видом дисперсии для одномодовых световодов. Основная причина ее возникновения - зависимость скорости распространения волны от показателя преломления и длины самой волны. Так как световой импульс состоит из определенного спектра длин волн, то каждая из них имеет разную скорость, и все они приходят к концу волокна в разное время.

Поляризационная модовая дисперсия проявляется в одномодовом волокне из-за неидеальности его геометрических размеров и присутствия механических напряжений. Из-за эллиптичности волокна поляризованные световые волны, отличающиеся типом поляризации, распространяются с разными групповыми скоростями, что приводит к дисперсии и вызывает ошибки при приеме информации. Максимальное влияние ПМД оказывает на высокоскоростные системы.

Поляризационная модовая дисперсия в основном появляется из-за нарушения цилиндрической (круговой) симметрии сердцевинки и оболочки. В идеале эта симметрия делает волокно совершенно изотропным. Поэтому, если с помощью нарушения круговой симметрии ввести некоторую анизотропию волокна, то ПМД можно изменять, то есть появляется возможность управления ею в процессе изготовления. Также можно изменять ПМД в развертываемом волокне путем создания несимметрично распределенного механического напряжения.

1.10. Диаметр модового поля.

Диаметр модового поля - это параметр, который определяет сечение волокна, где сосредоточена основная часть энергии света. Основная часть светового потока, распространяющегося по волокну, передается через сердцевину. Другая, меньшая часть передаваемого по волокну света распространяется по стеклянной оболочке, поэтому диаметр модового поля больше, чем физический диаметр сердечника.

Например, сердечник диаметром 50 мкм создает модовое поле с диаметром 55-60 мкм, то есть примерно 10% оптической энергии передается по оболочке.

Диаметр модового пятна в одномодовых волокнах определяется соотношением:

$$d_{\text{мод}} = d (0.65 + 1.619 V^{-1.5} + 0.87 V^{-6}),$$

где $V \approx \pi d \lambda^{-1} \text{NA}$,
NA - числовая апертура волокна.

В стандартном одномодовом волокне $d = 8.3$ мкм, $\text{NA} = 0.13$, так что на рабочей длине волны $\lambda = 1.55$ мкм диаметр модового пятна ω оказывается равным 9.5 мкм.