

Волоконно-оптические линии связи (ВОЛС)

Принципы передачи сигналов по оптическому волокну

В основе функционирования оптических волоконных сетей лежит принцип распространения световых волн по оптическим световодам на большие расстояния. При этом электрические сигналы, несущие информацию, преобразуются в световые импульсы, которые с минимальными искажениями передаются по волоконно-оптическим линиям связи (ВОЛС). Большое распространение подобные системы получили благодаря целому ряду достоинств, которые есть у ВОЛС по сравнению с системами передачи, использующими медные кабели или радиоэфир в качестве среды передачи.

Такая полоса дает возможность передавать потоки информации в несколько терабит в секунду. Важными преимуществами ВОЛС являются такие факторы, как малое затухание сигналов, позволяющее, при использовании современных технологий, строить участки оптических систем в сто и более километров без ретрансляции, высокая помехозащищенность, связанная с малой восприимчивостью оптического волокна к электромагнитным помехам, и многие другие.

Оптические волокна - один из основных компонентов ВОЛС. Они представляют собой комбинацию материалов, имеющих различные оптические и механические свойства. Внешняя часть волокна изготавливается обычно из пластмасс или эпоксидных композиций, сочетающих высокую механическую прочность и большой коэффициент преломления света. Этот слой обеспечивает механическую защиту световода и его устойчивость к воздействию внешних источников оптического излучения.

Основная часть стекловолокна состоит из сердцевины и оболочки. Материалом сердцевине служит сверхчистое кварцевое стекло, которое и является основной средой передачи оптических сигналов. Удержание светового импульса происходит вследствие того, что коэффициент преломления материала сердцевины больше чем у оболочки. Таким образом, при оптимально подобранном соотношении коэффициентов преломления материалов происходит полное отражение светового луча внутрь сердцевины. Более подробно конструкции волокон различных типов и их основные конструктивные характеристики показаны ниже.

Для передачи свет (точнее, инфракрасное излучение) вводится под небольшим углом в торец оптического волокна. Максимальный угол проникновения светового импульса в сердечник волокна α_0 называется угловой апертурой оптического волокна. Синус угловой апертуры называется числовой апертурой NA и рассчитывается по формуле:

$$NA = \sin \alpha_0 = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

Из приведенной формулы следует, что числовая апертура световода NA зависит только от показателей преломления сердцевины и оболочки - n_1 и n_2 . При этом всегда выполняется условие: $n_1 > n_2$ (рис. 1).

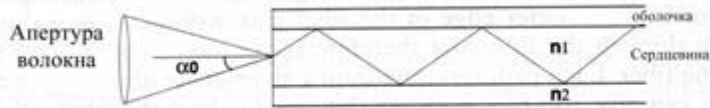


Рис. 1: Распространение света в оптическом волокне.

Если угол падения света α больше, чем α_0 , то луч света полностью преломляется и не попадает в сердечник оптического волокна. Если угол α меньше чем α_0 , то происходит отражение от границы материалов сердечника и оболочки, и световой луч распространяется внутри сердечника (рис. 2).

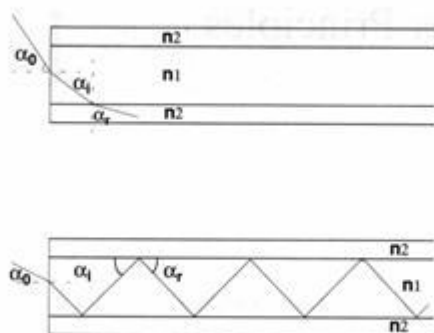


Рис.2: Условия распространения света в оптическом волокне.

Скорость распространения света в оптическом волокне зависит от коэффициента преломления сердечника волокна и определяется как:

$$V = c/n$$

где c – скорость света в вакууме, n - коэффициент преломления сердечника.

Типичные значения коэффициента преломления материала сердечника лежат в пределах от 1,45 до 1,55.

Для того чтобы передавать сигналы по оптическим волноводам, необходимо иметь источник строго когерентного света. Для увеличения дальности передачи ширина спектра передатчика должна быть как можно меньше. Для этой цели наиболее подходят лазеры, которые, благодаря индуцированному излучению света, позволяют поддерживать постоянную разность фаз при одинаковой длине волн. В связи с тем, что диаметр сердцевинки волокна сравним с длиной волны оптического излучения, в световоде возникает явление интерференции. Это может быть доказано тем, что свет распространяется в стекле сердцевинки только под определенными углами, а именно в направлениях, в которых введенные световые волны при их наложении усиливаются. Говорят, что возникает конструктивная интерференция. Разрешенные световые волны, которые могут распространяться в оптическом волокне, называются модами (собственными волнами). Для описания процессов распространения света в оптических волокнах существуют несколько параметров, которые необходимо учитывать.

Основные параметры оптических волокон

Затухание

В общем случае затухание – это ослабление светового потока в оптоволокне.

Природа затухания может быть различной:

Затухание света в оптическом волокне, вызванное поглощением света. Поглощение может быть определено как превращение мощности светового импульса в тепло, и связано с резонансом в материале волокна. Существуют внутренние поглощения, связанные со свойствами материала волокна и молекулярным резонансом, и внешние поглощения, определяемые наличием микропримесей в материале волокна (например ОН-ионов). Современные оптические волокна имеют очень небольшое количество микропримесей, поэтому величина внешнего поглощения минимальна и может не приниматься в расчет.

Затухание света в оптическом волокне, вызванное рассеиванием излучения. Рассеивание – один из основных факторов затухания света в оптическом волокне. Наличие этого типа затухания связано, прежде всего, с дефектами сердцевины оптического волокна, а также с наличием посторонних вкраплений и примесей в оптическом волокне. Подобные посторонние включения значительно влияют на возможность прохождения светового потока по правильной траектории, приводят к его отклонению и, как следствие, превышению угла преломления и выходу части светового луча через оболочку. Кроме того, наличие неоднородностей волокна приводит к отражению части светового потока в обратную сторону - обратное рассеивание(рис. 3).

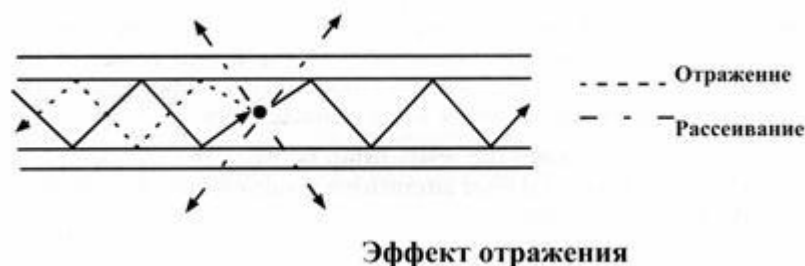


Рис. 3: Обратное рассеивание светового потока.

Затухания, связанные с изгибами оптического волокна. Различают два типа изгиба волокна: микроизгиб и макроизгиб.

Микроизгиб – это микроскопические изменения геометрии сердечника волокна, появляющиеся при производстве.

Макроизгибом называют большой изгиб оптического волокна, который превышает минимально допустимый радиус и заставляет световой поток (или часть его) покинуть сердцевину оптического волокна. Минимальный радиус изгиба одномодовых волокон составляет 10 сантиметров. При таком изгибе световой импульс распространяется без сильных искажений. Уменьшение же радиуса изгиба приводит к значительному повышению эффекта рассеивания оптического импульса через оболочку волокна. Для определения полного коэффициента затухания оптического волокна должны быть учтены все факторы, перечисленные выше (рис. 4).

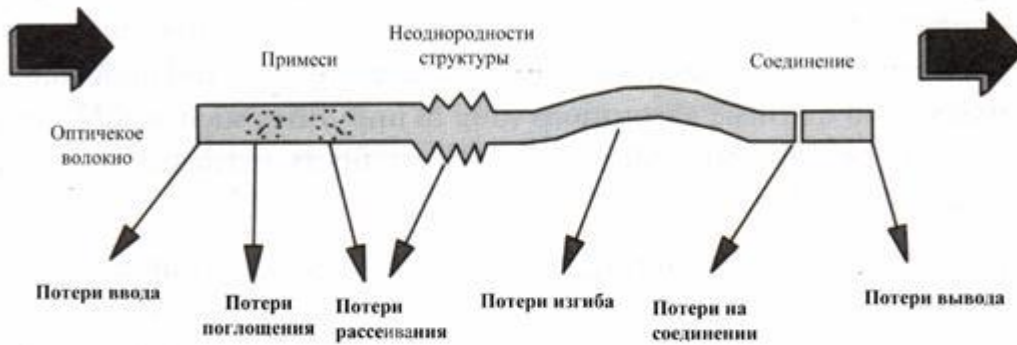


Рис. 4: Факторы, определяющие величину затухания оптического волокна.

Коэффициент затухания для заданной длины волны оптического излучения определяется как отношение вводимой в волокно оптической мощности к мощности принятого из волокна оптического сигнала. Обычно коэффициент затухания измеряется в децибелах (дБ) и зависит как от параметров оптического волокна, так и от длины волны светового потока. Последняя зависимость имеет нелинейный характер. Обобщенно она представлена на рис 5.

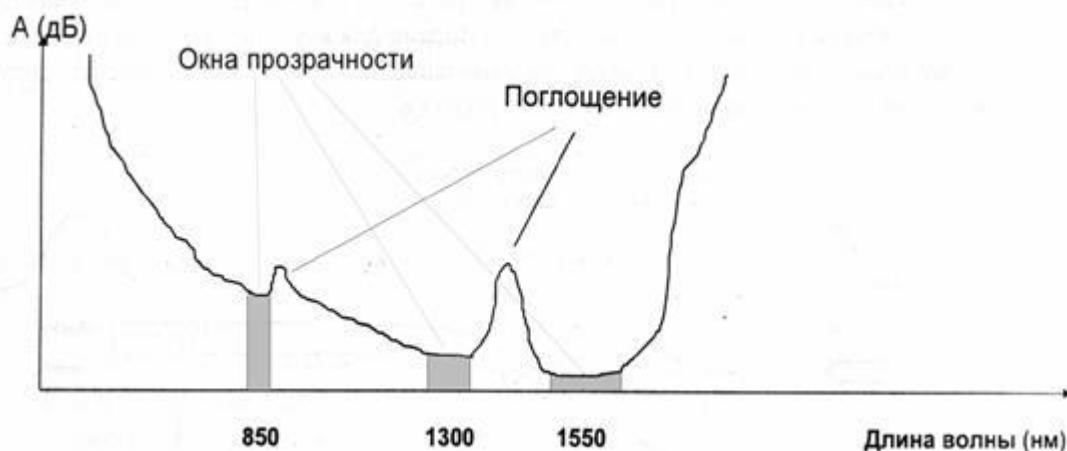


Рис. 5: Зависимость величины затухания оптического излучения от длины волны.

Представленный график имеет несколько участков, где затухание оптического сигнала минимально. Эти участки называются окнами прозрачности волокна. Первое окно прозрачности расположено на длинах волн от 820 до 880 нм и используется в основном для передачи сигналов на короткие расстояния с использованием широкополосных светодиодных источников излучения и коротковолновых лазеров. Основное достоинство такой аппаратуры – ее дешевизна. Второе окно прозрачности, от 1285 до 1330 нм, активно используется в телекоммуникациях. При относительно высоком затухании оптических сигналов, работающих в этом диапазоне, это окно прозрачности позволяет использовать оптические источники с широкой полосой излучения. Основная причина этого -

минимальная величина хроматической дисперсии кварцевого стекла, позволяющая использовать дешевые источники излучения. Третье окно прозрачности перекрывает диапазон длин волн от 1525 до 1575 нм. Основное достоинство его использования – минимальное затухание оптического сигнала. Однако передача высокоскоростных потоков данных в этом диапазоне сталкивается с обязательным условием компенсации повышенной дисперсии волокна, что ведет к повышению стоимости ВОЛС.

Дисперсия

Одним из факторов, сильно влияющих на качество передачи сигналов в световодах, является дисперсия. В общем случае, дисперсия - это "размывание" или растягивание светового импульса, происходящее во время передачи его в оптическом волокне. Дисперсия сильно ограничивает скорость работы оптических систем, заметно снижая граничную полосу пропускания. Определены два основных вида дисперсии: модовая и хроматическая. Хроматическая дисперсия связана, прежде всего, с зависимостью скорости распространения светового потока от длины волны источника излучения. В отличие от идеального источника света, любой реальный источник излучает свет в некоторой полосе частот.

Составляющие светового импульса, имеющие разные длины волн, достигают конца оптического волокна с различными задержками времени, искажая, таким образом, исходный импульс. Скорость распространения света в оптическом волокне связана с коэффициентом преломления следующей зависимостью:

$$C_m = C/n, \quad (3)$$

где C_m - скорость распространения света в оптическом волокне, C - скорость света в вакууме, n - коэффициент преломления сердцевины волокна, который зависит от длины волны. Для прохождения по волокну длиной L световому импульсу требуется время t , определяемое как:

$$t = L / C_m = Ln / C \quad (4)$$

Таким образом, мы видим зависимость времени прохождения светового импульса по оптическому световоду от показателя преломления оптического волокна. Хроматическая дисперсия является мерой изменения показателя преломления материала сердечника световода и определяется, как первая производная коэффициента преломления:

$$M(l) = (1/c) \cdot dn(l)/dl = (1/L) \cdot dt(l)/dl, \quad (5)$$

где l – длина волны оптического сигнала.

Хроматическая дисперсия выражается в пс/нм·км и физически может быть выражена как разница времени прохождения оптического световода длиной один километр сигналами двух длин волн, причём эти длины волн должны лежать в заданной полосе спектра излучения оптического источника.

Поскольку коэффициент преломления кварцевого стекла минимален при длине волны, равной 1300 нм, производная для этой точки равна нулю и, соответственно, хроматическая дисперсия пренебрежимо мала. Это одна из причин активного использования второго окна прозрачности в телекоммуникационной аппаратуре. Однако, существуют способы смещения дисперсии с помощью легирования кварцевого стекла.

Такие световоды называются оптическими волокнами со смещенной дисперсией и могут иметь нулевую дисперсию на длине волны с минимальным затуханием (1550 нм). Это позволяет использовать их в оптических системах, требующих особенно большой полосы пропускания или больших пролетов кабеля с минимальным количеством пунктов переприемов, например для подводных кабельных сетей. На рисунке 6 представлены зависимости хроматической дисперсии от длины волны излучения для разных типов волокон. Здесь кривая 1 – хроматическая дисперсия чистого кварцевого стекла, кривая 2 – характеристика волокна со смещенной дисперсией.

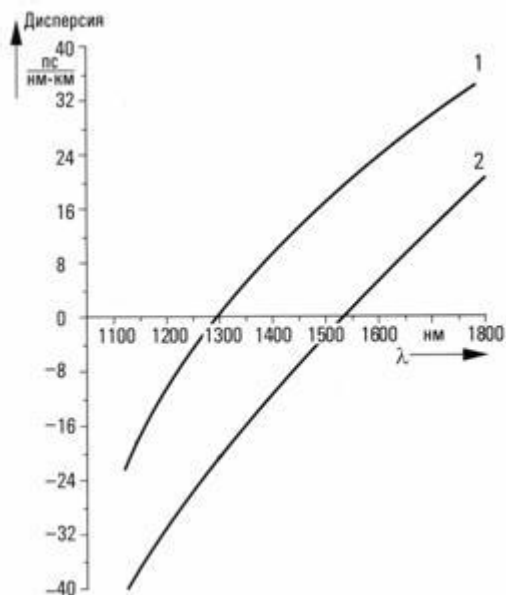


Рис. 6: Зависимость хроматической дисперсии от длины волны.

Модовая дисперсия связана с различным временем прохождения участка волокна световых мод,двигающихся по разным траекториям.

В пределах числовой апертуры в многомодовое волокно может быть введено несколько сотен разрешенных мод. Все они будут распространяться по различным траекториям, имея различное время прохождения от источника до приемника. Суммарный импульс, полученный приемником сигнала, оказывается сильно растянутым во временной области. Наличие модовой дисперсии является недостатком многомодовых систем передачи. Эффект модовой дисперсии частично нивелируется смешением мод. При прохождении по оптическому волокну моды низших порядков, имеющие малые углы траектории по отношению к оси оптического световода преобразуются в моды более высокого порядка и наоборот. Таким образом, скорость прохождения участка волокна модами несколько усредняется. Однако надо понимать, что процесс такого усреднения происходит, прежде всего, за счет неоднородностей волокна, а они, в свою очередь, заметно увеличивают общее затухание сигнала.

Модовая дисперсия может быть полностью исключена, если структурные параметры волокна подбирать таким образом, чтобы по световоду распространялась только одна основная мода. Таким свойством обладают одномодовые оптические волокна. Однако основная мода передается по одномодовому волокну в виде двух ортогонально ориентированных волновых составляющих. Вследствие неидеальности геометрических размеров сердцевин, а также различного рода механических и оптических факторов появляется некоторая асимметрия показателя преломления и, как следствие, разность

скоростей распространения двух ортогонально ориентированных мод. Суммарный световой импульс на выходе из световода, таким образом, получается несколько искаженным (рис 7).

Разность времени распространения ортогонально ориентированных мод одномодового оптического волокна, выраженная в пикосекундах, определяется через Поляризационную модовую дисперсию (ПМД). При распространении обе составляющие основной моды взаимодействуют между собой. Из-за такого обмена энергией ПМД носит статистический характер.

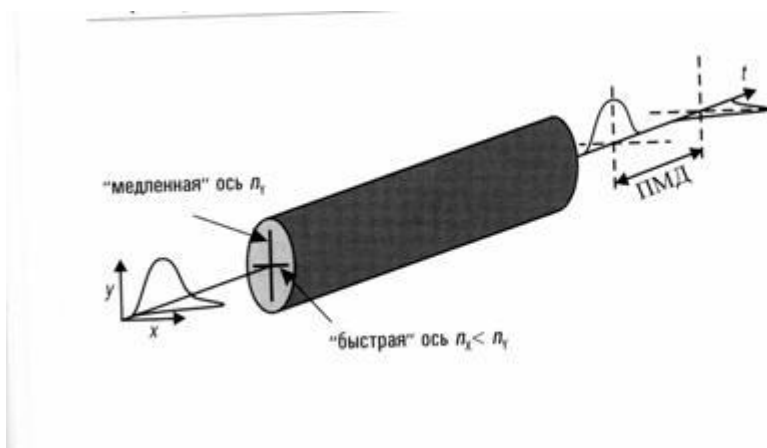


Рис. 7: Передача светового импульса по одномодовому оптическому волокну.

Существует понятие длины взаимодействия мод L_c . Если длина световода меньше L_c , то ПМД увеличивается линейно, при превышении L_c ПМД возрастает пропорционально квадратному корню длины световода L . Как уже отмечалось выше, основной причиной увеличения ПМД является асимметрия показателя преломления сердцевины волокна. Появление такой асимметрии связано, прежде всего, с неидеальностью геометрических размеров сердцевины, но на её величину ощутимо влияют также и такие факторы, как перегибы волокна, повив волокон в кабеле, поперечные и продольные напряжения волокон. Все эти факторы закладываются еще на этапе производства кабеля. Величина ПМД волокон кабеля, измеренная на кабельном барабане перед началом строительства, после прокладки кабеля изменится незначительно.

Поляризационная модовая и хроматическая дисперсии существенно ограничивают возможности передачи оптических сигналов по волокну и после затухания являются наибольшим препятствием для повышения дальности работы цифровых систем. Хроматическая дисперсия может быть компенсирована, как с помощью уменьшения полосы излучаемого спектра лазерного источника, так и смещением хроматической дисперсии кабеля в область более высоких длин волн. Компенсация ПМД невозможна и может быть понижена только с увеличением качества оптических волокон и кабелей. Величина 0,5 пс/вкм является фактически принятым международным стандартом максимально допустимого ПМД. В рекомендациях, касающихся линий дальней передачи, прослеживается тенденция устанавливать требование, ограничивающее величину ПМД не более 0,1 пс/вкм. На рис 8 приведена зависимость битовой скорости от дальности работы системы передачи.

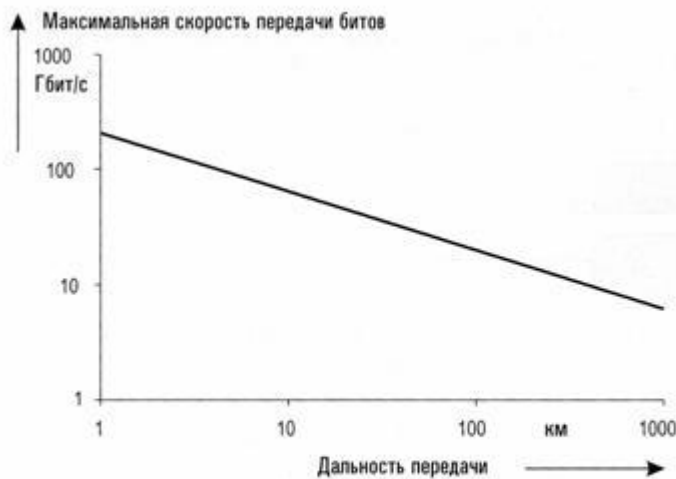


Рис. 8: Зависимость скорости передачи от длины волны оптического излучения.

Полоса пропускания

Полоса пропускания световода является одним из самых важных параметров оптического волокна при передаче высокоскоростных цифровых сигналов. Она во многом определяется его дисперсионными свойствами. Так как световой импульс во время распространения по волокну искажается как по амплитуде, так и по длительности, это заметно сказывается на возможностях передачи коротких импульсов на больших битовых скоростях. На практике световод ведёт себя как фильтр низких частот. Зависимость мощности оптического сигнала от частоты модуляции приближённо может быть описано нелинейной функцией:

$$H(f) = P_2(f)/P_1(f), \quad (6)$$

где P_1 - мощность оптического модулированного сигнала на входе в волокно, P_2 - выходная мощность модулированного оптического сигнала, f - частота модуляции.

На рис. 9 представлен график зависимости передаточной функции световода от частоты модуляции оптического сигнала. Здесь $H(f)$ - передаточная функция, $H(0)$ - передаточная функция при частоте 0 Гц. Форма кривой соответствует передаточной функции ФНЧ Гаусса. Ширина полосы пропускания оптического волокна может быть определена как частота, при которой нормированная передаточная функция равна 0,5 от величины при частоте модуляции 0 Гц. Таким образом, ширина полосы пропускания – это частота модуляции, при которой мощность сигнала падает на 50% или на 3 дБ по отношению к мощности немодулированного сигнала.

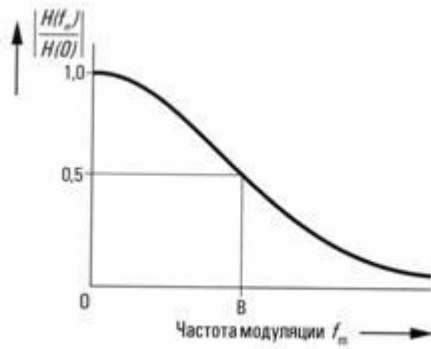


Рис. 9: Зависимость передаточной функции световода от частоты модуляции оптического сигнала.

Основные типы оптического волокна и кабелей

В зависимости от структурных параметров различают многомодовые и одномодовые оптические волокна. Многомодовые оптические волокна имеют такое соотношение диаметров оболочки и сердцевины, которое позволяет передавать одновременно несколько сотен разрешенных световых мод, вводимых в волокно под разными углами в рамках числовой апертуры волокна. Все разрешенные моды имеют разные траектории распространения и, соответственно, различное время распространения по световоду. Главный недостаток многомодовых волокон – большая величина модовой дисперсии, ограничивающая как полосу пропускания, так и дальность работы цифровой системы передачи. Однако, многомодовые оптические волокна активно применяются в коротких ВОЛС, что объясняется дешевизной производства как волокна, так и источников излучения.

Одним из способов компенсации модовой дисперсии является применение оптических волокон с переменным профилем показателя преломления сердцевины кабеля. Наиболее распространены градиентные оптические волокна. В отличие от стандартных многомодовых световодов, имеющих постоянный профиль преломления материала сердцевины, такие световоды имеют, показатель преломления, плавно уменьшающийся от центра к оболочке. Вследствие изменения скорости распространения света происходит компенсация задержки распространения разных световых мод. В результате, такое оптическое волокно имеет во много раз меньшую дисперсию, и, как следствие, большую полосу пропускания. Главный недостаток градиентных оптических волокон, ограничивающий их применение – большая цена и сложность производства.

Одномодовое оптическое волокно сконструировано таким образом, что в сердцевине может распространяться только одна, основная мода. Именно поэтому подобные волокна имеют наилучшие характеристики, и наиболее активно используются в строительстве ВОЛС. Основные преимущества одномодовых оптических волокон – малое затухание, минимальная величина модовой дисперсии, широкая полоса пропускания (рис 10).

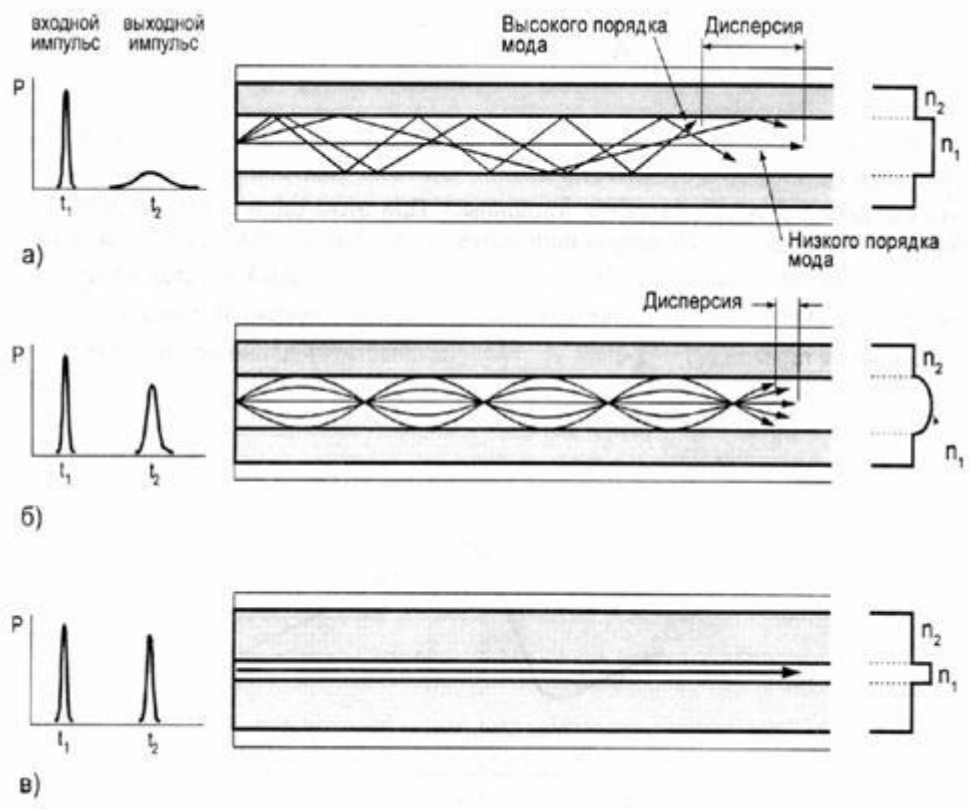


Рис. 10: Многомодовое (а), градиентное (б) и одномодовое оптические волокна.

Основные характеристики оптических волокон приведены в таблице 1.

Таблица 1

Тип оптического волокна	Диаметр оболочки волокна(мкм)	Диаметр сердцевины волокна(мкм)	Числовая апертура волокна	Номинальное затухание (дБ/км)	Ширина полосы пропускания (МГц/км)
Многомодовое со ступенчатым показателем преломления	125	50 62,5	0,242	2,5/0,81 2,8/0,6	До 400
Многомодовое градиентное	125	50 62,5	0,206	2,5/0,81 2,8/0,6	До 1000
Одномодовое	125	9 10	0,113	0,2/0,152 0,2/0,15	До 106

1. - значения затухания на двух длинах волн: 850 нм и 1300 нм
2. - значения затухания на двух длинах волн: 1330 нм и 1510 нм

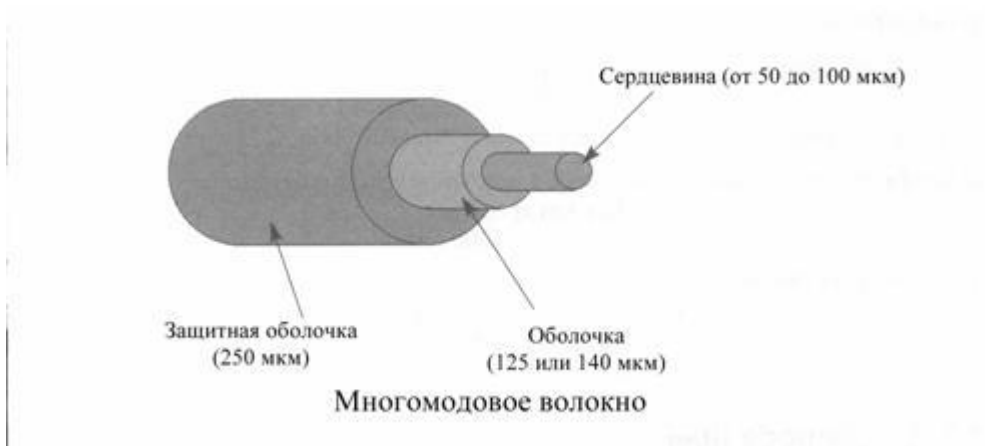


Рис. 11: Конструкция многомодового оптического волокна.

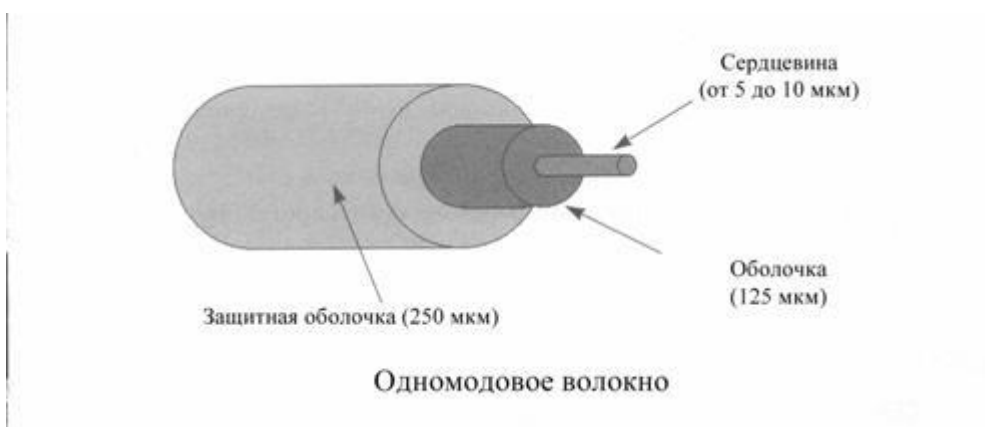


Рис. 12: Конструкция одномодового оптического волокна.

Стандарты и рекомендации, предназначенные для оптических волокон.

Существует несколько основных международных стандартов, регламентирующих характеристики оптического кабеля.

Документы европейского комитета стандартов:

- IEC 793 Оптические волокна.
- IEC 794-1 Оптические волоконные кабели IEC.
- IEC 61350 Измерители мощности и их калибровка.
- IEC 61746 Калибровка оптических рефлектометров.

Стандарты международного союза электросвязи:

G.651 Характеристики 50/125 многомодового волокна с градиентным индексом.

G.652 Характеристики одномодового волоконнооптического кабеля.

G.653 Характеристики одномодового волоконнооптического кабеля с дисперсионным смещением.

G.654 Характеристики потерь для передачи сигнала 1550нм по одномодовому волоконнооптическому кабелю.