

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ЛИНИИ СВЯЗИ

Волоконно-оптическая линия связи (ВОЛС) - линия связывающая две электрические цепи путем перенесения информации с использованием светового сигнала внутри оптического волокна (тонкой стеклянной или пластиковой нити) Принцип работы оптического волокна основан на эффекте полного внутреннего отражения. Входной сигнал модулирует источник светового излучения, а для обратного преобразования света в электрический сигнал используют фотоприемники. Таким образом ВОЛС включает следующие основные компоненты:

- 1) передатчик;
- 2) кабель на базе оптического волокна;
- 3) приемник;
- 4) соединители (коннекторы).

Для более сложных линий и коммуникационных сетей используются дополнительные элементы, такие как разветвители, мультиплексоры и распределительные устройства.

Передатчик

В качестве передатчиков используют светодиоды и полупроводниковые лазеры. Для передачи информации в основном применяют излучения с длинами волн: 1550 нм, 1300 нм, 850 нм, чтобы обеспечить минимальное затухание в оптических волокнах.

Светодиоды могут излучать свет с длиной волны 850 нм и 1300 нм. Излучатели с длиной волны 850 нм существенно дешевле, чем излучатели с длиной волны 1300 нм. При этом полоса пропускания кабеля для волн 850 нм уже (200 МГц/км вместо 500 МГц/км). Принцип действия, характеристики и конструкцию светодиодов см. лекцию №7.

Лазерные излучатели работают на длинах волн 1300 нм и 1500 нм. Быстродействие современных лазеров позволяет модулировать световой поток с частотами 10 ГГц и выше. Лазерные излучатели создают когерентный поток света, за счет чего потери в оптических волокнах становятся меньше, чем при использовании некогерентного потока от светодиода. Принцип действия, характеристики и конструкцию лазеров см. лекцию №10.

Оптоволоконные кабели.

Конструкция.

Оптическое волокно состоит из центрального проводника света (ядро) и окружающей оптической оболочки, имеющей меньший показатель преломления. Распространяясь по ядру лучи света не выходят за его пределы, испытывая отражение на границе раздела ядро – оболочка. Свет, падающий на границу под углом, меньше критического, будет проникать в оптическую оболочку, и затухать по мере распространения в ней, т.к. оптическая оболочка не предназначена для переноса света. Также волокна имеют дополнительное защитное покрытие, которое предохраняет от ударов ядро и оптическую оболочку. Волокна сами по себе имеют чрезвычайно малый диаметр¹.

На Рис.1 представлена схема распространения света по волокну. Свет заводится внутрь волокна под углом, больше критического, к границе “ядро/оптическая оболочка”, и испытывает полное внутреннее отражение на этой границе. Поскольку углы падения и отражения совпадают, то свет и в дальнейшем будет отражаться от границы. Таким образом, луч света будет двигаться зигзагообразно вдоль волокна.

Характеристики оптоволоконных кабелей.

- **Дисперсия** – это зависимость фазовой скорости волны, распространяющейся в оптическом кабеле от частоты.

- **Количество мод в волокне.** Из специальных глав физики известно, что параметры оптического волокна определяют количество электромагнитных волн (мод), которые могут в нем распространяться. Для каждого волокна существует $\lambda_{кр}$, такая, что все волны, имеющие $\lambda < \lambda_{кр}$ не будут распространяться. Изменяя $\lambda_{кр}$ можно добиться распространения в волокне необходимого числа волн (мод). Для распространения излучения одной длины волны (моды) необходимо

¹ В таблице представлены следующие диаметры ядер и оптических оболочек наиболее популярных волокон:

Ядро (мкм)	Оптическая оболочка (мкм)
8	125
50	125
62.5	125
100	140

Для сравнения человеческий волос имеет диаметр около 100 микрон.

выполнение условия, при котором все, кроме одной, излучаемые источником

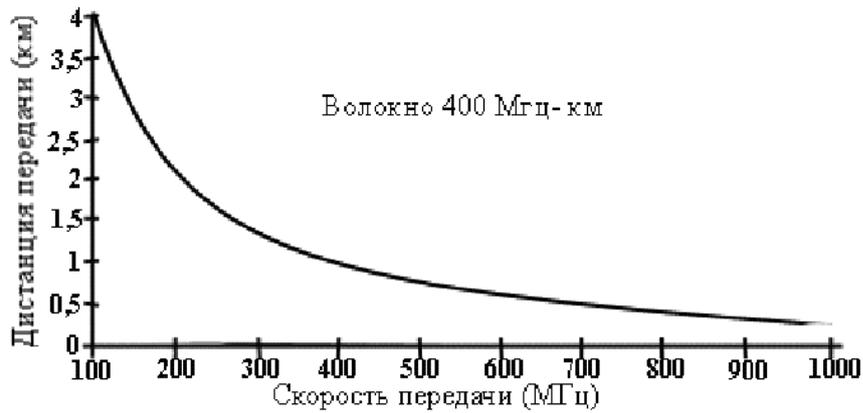


Рис.1

длины волн имеют $\lambda > \lambda_{кр}$.

- **Ширина полосы пропускания** – часто ее указывают вместо дисперсии в многомодовых волокнах, выражается в мегагерцах на километр (МГц/км). Полоса пропускания в 400 МГц/км означает возможность передачи сигнала в полосе 400 МГц на расстояние 1 км, т.е. произведение максимальной частоты сигнала на длину передачи может быть меньше или равно 400. Другими словами, можно передавать сигнал более низкой частоты на большее расстояние или более высокой частоты на меньшее расстояние, как показано на Рис.1.

Выражение полосы пропускания через одномодовую дисперсию является сложным, его приблизительная оценка может быть получена на основе следующего уравнения:

$$BW = \frac{0.187}{(Disp)(S_w)(L)}, \quad (2)$$

где: **Disp** - дисперсия на рабочей длине волны в сек на нанометр и на километр; **S_w** - ширина спектра источника в нм; **L** - длина волокна в км.

- **Затухание** – это потеря оптической энергии по мере движения света по волокну, измеряется в децибелах на километр. Затухание зависит от длины волны света. Существуют окна прозрачности, в которых свет распространяется вдоль волокна с малым затуханием. Следовательно, при работе источника света в этих диапазонах потери при передаче в волокне будут минимальны. На Рис.2а

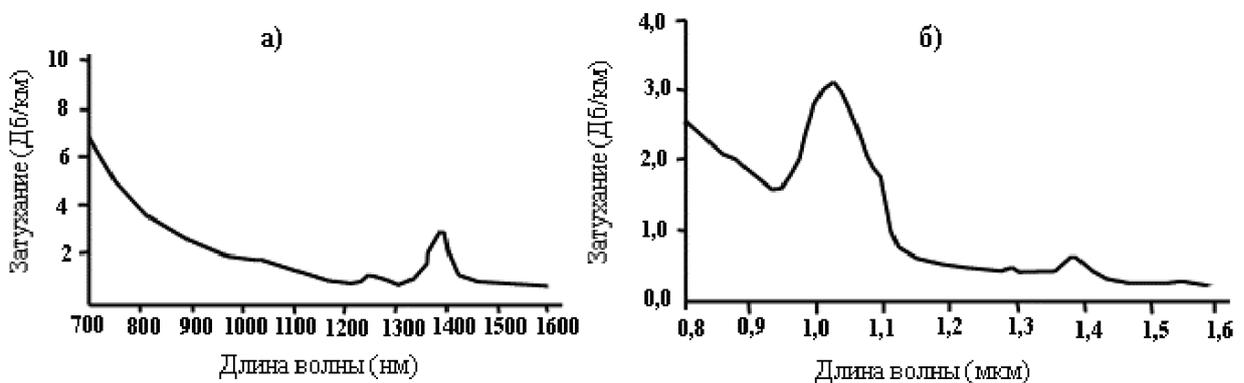


Рис.2

представлена типичная кривая затухания для многомодового волокна с низкими потерями. Рис.2б представляет ту же кривую для одномодового волокна. Важнейшей особенностью затухания в оптическом волокне является его неза-

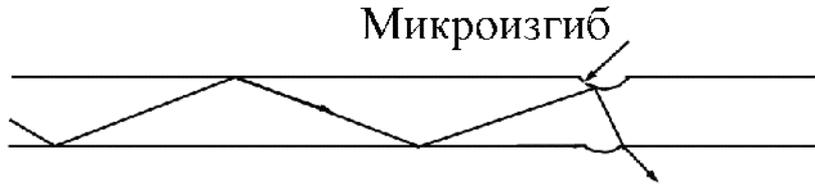


Рис.3

висимость от частоты модуляций внутри полосы пропускания. Затухание в волокне определяется тремя эффектами: рассеянием, поглощением и наличием микроизгибов. На Рис.3 показано, что вариации границы могут приводить к отражению мод высокого порядка под углами, не допускающими дальнейших отражений.

- **Численная апертура (NA)** - определяет способность волокна собирать лучи. NA зависит от свойств материалов волокна и определяется показателями преломления ядра и оптической оболочки:

$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$. NA волокна указывает на то, как свет вводится в волокно и распространяется по нему. Волокно с большим значением NA (т.е. подразумевает большее количество возможных световых траекторий) хорошо принимает свет, в то время, как в волокно с малым значением NA (волокна с широкой полосой пропускания) можно ввести только узконаправленный пучок света.

Также можно определить величину углов, при которых свет распространяется вдоль волокна. Эти углы образуют конус, называемый **входным конусом**, угловой растр которого определяет максимальный угол ввода света в волокно.

$$\theta = \arcsin(NA)$$

$$NA = \sin\theta \tag{3}$$

где θ - половина угла ввода (Рис.4).

Источник и приемник также имеют свои апертуры:

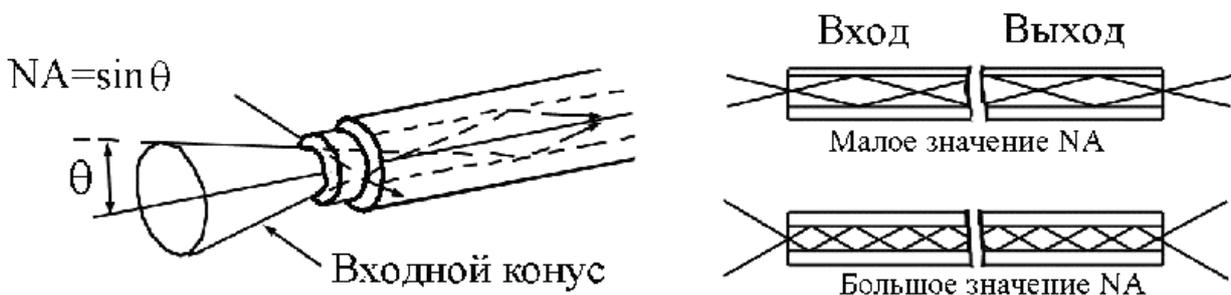


Рис.4

$NA_{ист}$ источника определяет угловую апертуру входного света.

$NA_{дет}$ детектора определяет рабочий диапазон углов для приемника.

Очень важно выполнить условие: $NA_{ист} = NA_{дет}$. Рассогласование NA приводит к дополнительным потерям при передаче света от устройства с меньшим значением NA к устройству с большим значением.

- **Прочность волокна** - характеризует способность волокна противостоять натяжению, разрыву и изгибу без повреждения. Основная причина, обуславливающая хрупкость волокна, - наличие микротрещин на поверхности и дефектов внутри волокна. Поверхностные дефекты могут возрастать под воздействием растягивающей нагрузки, возникающей во время прокладки кабеля. Температурные изменения, механические и химические воздействия, обычное старение также приводят к появлению дефектов. Стекланные волокна можно согнуть в виде окружности небольшого диаметра. При этом необходимо помнить, что минимальный радиус кривизны равен пяти диаметрам кабеля при отсутствии растягивающих напряжений и 10 диаметрам кабеля при их наличии.

- **Радиационная прочность** – определяет способность оборудования противостоять ядерным эффектам. Волокна в отличие от проводников не накапливают статические заряды под воздействием радиации. Волокна также не повреждаются мгновенно после расплавления их кабельной оболочки под тепловым воздействием радиационного источника.

Волокна противостоят росту затухания в условиях постоянного радиоактивного облучения высокой интенсивности. Рост затухания зависит от величины накопленной дозы и интенсивности облучения.

Классификация оптических волокон

В зависимости от типа материала волокна делятся:

- 1) стеклянные волокна со стеклянным ядром и стеклянной оптической оболочкой;
- 2) стеклянные волокна со стеклянным ядром и пластиковой оптической оболочкой (PCS);
- 3) пластиковые волокна, имеющие пластиковое ядро и пластиковую оптическую оболочку.

В зависимости от распределения показателя преломления различают волокна со ступенчатым и сглаженным профилем (Рис.5).

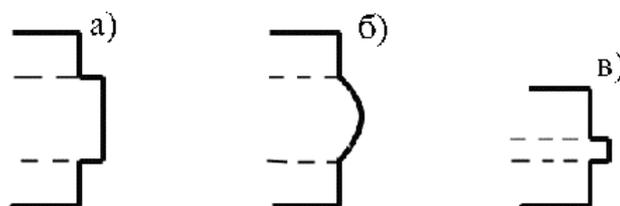


Рис. 5

По количеству распространяющихся мод выделяют:

- **Одномодовое волокно** (см Рис.5.в, 6.в, 7.в) имеет чрезвычайно малый диаметр - от 5 до 10 микрон, и ступенчатый профиль показателя преломления. Луч света в таком кабеле имеет высокую интенсивность. Поэтому одномодовые кабели пригодны для передачи на большие расстояния.

Одномодовые волокна могут изготавливаться для работы с более короткой пороговой длиной волны². Эти волокна используются в специальных телевизионных, компьютерных и управляющих системах. Однако, более высокое значение затухания, до 10 дБ/км при 633 нм в волокне ограничивает его использование на больших расстояниях.

² Известны волокна с пороговой длиной волны, равной 570 нм, и работающие на длине волны в 633 нм (что соответствует видимому красному свету). При этом диаметр ядра достаточно мал, меньше чем 4 микрона. Другие волокна имеют пороговую длину волны 1000 нм, рекомендованную рабочую длину волны 1060 нм и диаметр ядра 6 микрон.

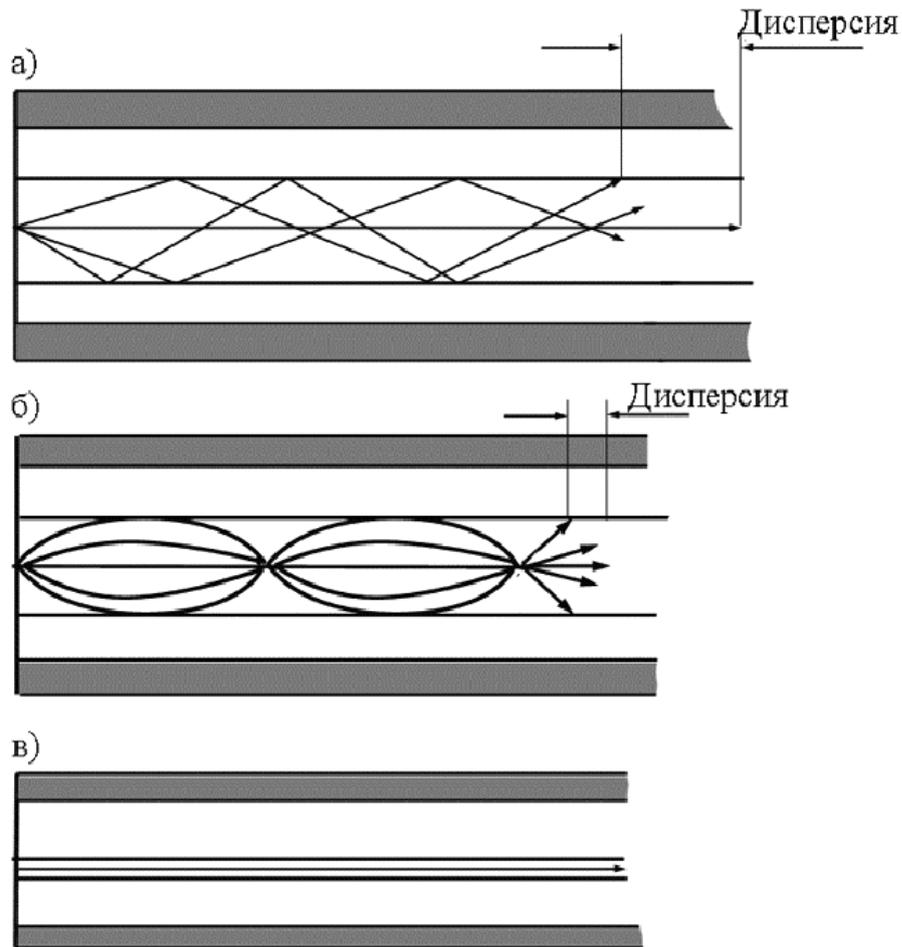


Рис. 7

- **Многомодовое волокно** имеет ядро диаметром от 100 до 970 микрон и ступенчатый или сглаженный профиль показателя преломления (Рис 5.а.б, 6.а.б, 7.а.б). Данный тип волокна является наиболее распространенным, хотя и не обеспечивает максимальную полосу пропускания и минимальные потери. При работе волокна в многомодовом режиме возникают нежелательные явления, связанные с равновесным распределением мод (РРМ). **РРМ** – это устойчивое состояние в многомодовом оптическом волокне, при котором энергия распределяется между модами независимо от длины волны. В идеальном волокне, первоначально существующая в какой-либо моде энергия сохраняется в ней. Но в действительности энергия переходит между модами, что связано с изгибами волокна, вариациями диаметра и показателя преломления ядра или неоднородностями волокна. По мере движения энергия будет переходить из одной моды в другую, пока не будет достигнуто РРМ. После этого дальнейшее распределение энергии между модами в нормальных условиях не происходит. При отсутствии РРМ волокно называется **переполненным** или **ненаполненным**. В переполненном волокне неэффективные моды участвуют в переносе оптиче-

ской энергии. В ненаполненном волокне свет распространяется только в модах низкого порядка. По мере движения часть энергии, заключенной в этих модах, перейдет в моды высокого порядка, и РРМ будет достигнуто. Расстояние, на котором достигается РРМ, зависит от вида волокна.

Конструкция волоконно-оптического кабеля

На Рис.8 представлены основные компоненты простого оптического кабеля с одним волокном. Конструкция кабелей может быть достаточно разнообразной, но общими являются следующие компоненты:

- **оптическое волокно**.
- **буферная оболочка**³ (существует два вида кабельных буферов: пустотелый и плотный), обеспечивает лучшую защиту от механических воздействий, но не так хорошо защищает волокно от изменения температуры. Поскольку пластик расширяется и сжимается в различной степени по сравнению с волокном, то сжатие, обусловленное падением температуры, может приводить к образованию микроизгибов.
- **силовой элемент** – повышают механическую прочность кабеля.
- **внешняя оболочка** – обеспечивает защиту от механического трения, масла, озона, кислот, щелочей, растворителей и т.д.

В соответствии с условиями эксплуатации волоконно-оптические кабели можно разделить на **внутренние** и **внешние**.

Сравнительные характеристики кабелей приведены в таблице.

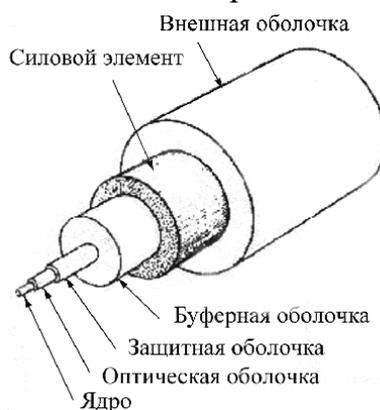


Рис. 8

³ **Буферная оболочка** – наиболее простой вид буфера представляет собой пластиковую оболочку, расположенную поверх оптической оболочки. Данный буфер является частью волокна и наносится производителями волокна.

Тип волокна	Диаметр ядра (мкм) ¹	Диаметр оптической оболочки (мкм)	NA	Максимальное затухание (дБ/км)					Максимальная полоса пропускания (МГц/км)
				650	790	850	1300	1550	
Одномодовое	3.7	80или125		10					5000 при 850нм
	5.0	85или125		2.3					
	9.3	125	0.13				0.4	0.3	6 дисп./км
	8.1	125	0.17				0.5	0.25	
Сглаженный индекс	50	125	0.20	2.4	0.6	0.5	600 при 850 нм 1500 при 1300 нм		
	62.5	125	0.27	3.0	0.7	0.3	200 при 850 нм 1000 при 1300 нм		
	85	125	0.26	2.8	0.7	0.4	200 при 850 нм 400 при 1300 нм		
	100	140	0.29	3.5	1.5	0.9	300 при 850 нм 500 при 1300 нм		
Ступенчатый индекс	200	380	0.27	6.0			6 при 850 нм		
	300	440	0.27	6.0			6 при 850 нм		
PCS	200	3500	0.30	10			20 при 790 нм		
Пластик	485	500	0.5	240					5 при 680 нм
	735	750	0.5	230					
	980	1000	0.5	220					

¹Диаметр моды приведен для одномодового волокна, реальный диаметр меньше.

²Дисперсия на нанометр ширины спектра источника

³Пластиковые волокна обычно используют на расстояния до 100 м, со скоростью передачи 50 Мб/сек.

Внутренние кабели

На Рис.9а изображена конструкция простого кабеля, где: 1- оптическое волокно; 2-буфер; 3- силовой элемент; 4- внешняя оболочка. В зависимости от предназначения в этой конструкции могут появляться дополнительные защитные слои.

К кабелям, предназначенным для внутренней проводки, относятся:

1. **симплексные кабели** - (Рис.9.а)

содержат одно волокно, служит только для одноканальной передачи.

2. **дуплексные кабели** - (Рис.9.б) содержат два оптических волокна. Одно волокно передает сигнал в одном направлении, а другое - в противоположном.

3. **многожильные кабели** – содержат более двух волокон. Волокна обычно используются попарно, что позволяет передавать сигнал в обоих направлениях.

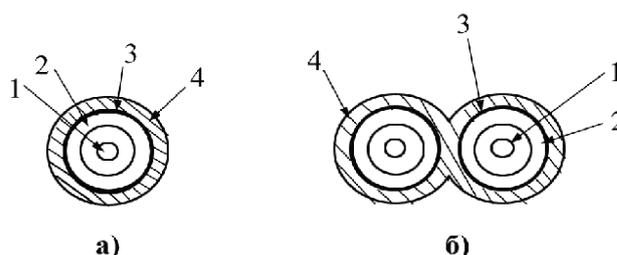


Рис.9

Многожильные кабели часто состоят из нескольких полых кабельных трубок, содержащих одно или несколько волокон. Данные трубки располагаются в кабеле вокруг центрального силового элемента из стали или стекловолокна. Такое устройство обеспечивает защиту волокон при изгибе кабеля.

4. кабели для тяжелых, легких условий эксплуатации или работы под давлением;

5. пожаробезопасные кабели.

Внешние кабели

Кабели для внешней прокладки должны быть более прочными и долговечными, так как они подвергаются различным экстремальным воздействиям, чем внутренние кабели. Монтаж внешних кабелей производится несколькими способами:

1. подвеска: кабель натягивается между телефонными столбами;

2. непосредственное закапывание: кабель укладывается в открытую траншею и засыпается землей;

3. косвенное закапывание: кабель также закапывается в землю, но в специальных кабельных каналах;

4. подводная прокладка: кабель укладывается под водой, возможно и трансокеаническое применение.

Большинство кабелей имеют дополнительные защитные экраны. Например, стальная оболочка используется для предохранения от грызунов. В других конструкциях в качестве наполнителя полых кабельных трубок используется гель для вытеснения воздуха и предохранения от просачивания воды внутрь кабеля, если вода попадет внутрь кабеля, то при замерзании расширится и повредит кабель.



Рис. 10

На Рис.10 представлено поперечное сечения распространенной кабельной конструкции.

Другое направление в кабельном конструировании представляют ленточные кабели (Рис.11). В ленточной конструкции 12 параллельных волокон располагаются в виде сэндвича между полиэстерными лентами, имеющими двустороннее клеящее покрытие. Каждая кабельная лента может быть склеена с другими, образуя тем самым прямоугольный массив. Этот массив размещается в полый трубке, которая в свою очередь окружается двумя слоями полиэтилена. Каждый слой полиэтилена содержит 14 стальных нитей, играющих роль силовых элементов. В зависимости от назначения возможны дополнительные защитные слои, например, стальные рукава, охватывающие полиэтилен.

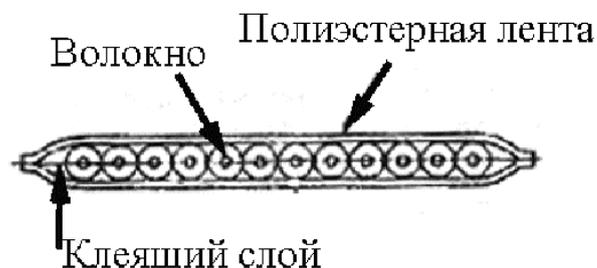


Рис.11

Волоконно-оптические кабели в последнее время находят все большее применение т.к. они обеспечивают высокую скорость передачи данных, широкополосность. По многим параметрам превосходят обычные кабели, кроме того они устойчивы к коррозии и исключают несанкционированный доступ к данным передаваемым по ним.

Приемник.

Для преобразования оптических сигналов в электрические используют фотоприемники. В волоконно-оптической связи в качестве фотоприемников используются фотодиоды (р-і-п и ЛФД).

Область спектральной чувствительности зависит от того, из какого материала изготовлен фотодиод. В области видимой части и ближней инфракрасной (0.75...1,1 мкм) наилучшей чувствительностью обладают фотодиоды, выполненные на основе кремния. Для работы в диапазоне $\lambda = 1,7$ мкм разработаны фотодиоды на основе Ge (Германий) и так называемых четверных структур In-GaAs/ InP.

Если в оптическом кабеле распространяется сигнал состоящий из нескольких частот, то на приемной стороне для выделения необходимого сигнала используют селективные⁴ по длине волны фотоприемники.

Фотодиоды, применяемые в ВОЛС, должны обладать достаточной квантовой эффективностью (η) и быстродействием, остальные параметры см. лекцию “фотоприемники”.

Соединители.

В оптоволоконных кабелях используются стандартные разъемы типов МС и ST.

Серьезным недостатком ВОЛС является сложность соединения волокон с разъемами. Так присоединение оптического волокна к разъему требует проведения высокоточной обрезки волокна в плоскости строго перпендикулярной оси волокна, а также выполнения соединения путем сложной операции склеивания. Выполнение некачественных соединений резко сужает полосу пропускания волоконно-оптических кабелей и линий.

⁴ **Селективные фотоприемники** были разработаны в Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе (г. Санкт-Петербург). В таком фотоприемнике на поверхности полупроводника методом интерференционного травления сформирована рельефная дифракционная решетка с синусоидальным профилем.

Шаг решетки выбирается в зависимости от длины волны принимаемого света его величина лежит в пределах 0,33...0,9 мкм.. На полученную таким методом дифракционную решетку нанесена пленка металла (серебро или золото). Толщина пленки d выбирается равной $200...100 \text{ \AA}$. Характерные размеры структур составляли от 2x2 до 5x5 мм, толщина - 0,3 мм. На основе таких структур были созданы опытные образцы высокоизбирательных по длине волны фотодиодов. Использование в качестве периодической структуры дифракционных решеток Брэгга позволяет создавать фотоприемники с очень узкой спектральной полосой чувствительности – $\Delta \leq 1 \text{ нм}$.