

**Лекция № 9**

**Волоконно-оптические линии  
передачи**

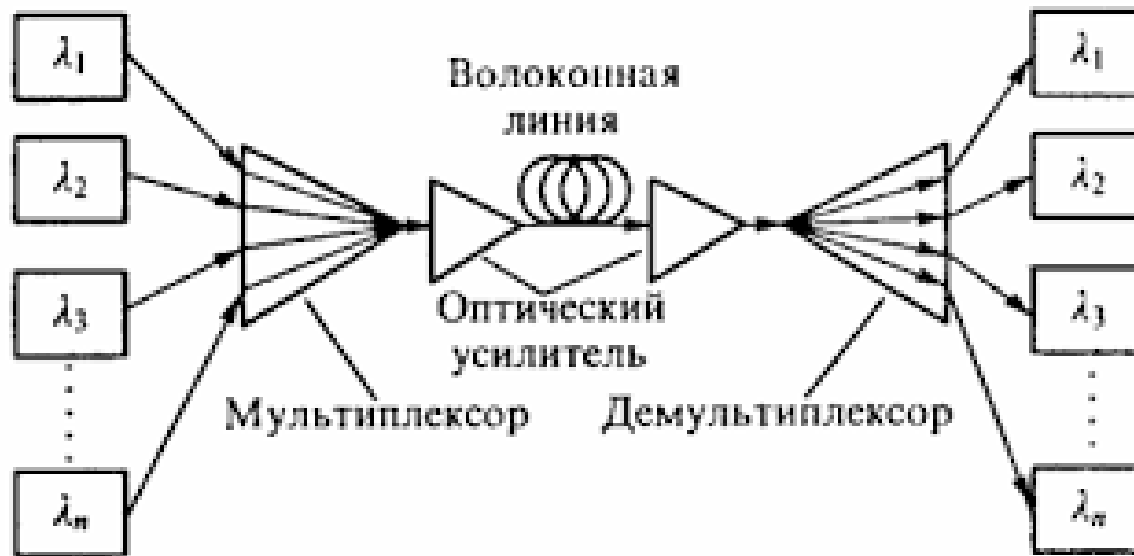
**(волоконно-оптические линия связи)**

# Рассматриваемые вопросы

- 1 Общие сведения о волоконно-оптических линиях передачи
- 2 Принцип действия и классификация световодов
- 3 Параметры и характеристики световодов
- 4 Основные материалы и конструкции волоконных световодов и кабелей
- 5 Принципы построения волоконно-оптических систем передачи

# 1 Общие сведения о волоконно-оптических линиях передачи

**Волоконно-оптическая линия передачи (ВОЛП** – официальный термин, определённый в ГОСТ 26599–85), **волоконно-оптическая линия связи (ВОЛС** – устоявшееся название) – волоконно-оптическая система, состоящая из пассивных и активных элементов, предназначенная для передачи информации в оптическом (как правило – ближнем инфракрасном) диапазоне.



# Общие сведения о волоконно-оптических линиях передачи

## Пассивные компоненты ВОЛП

- **Оптический кабель**, светонесущими элементами которого являются оптические волокна. Наружная оболочка кабеля может быть изготовлена из различных материалов: поливинилхлорида, полиэтилена, полипропилена, тефлона и других материалов. Оптический кабель может иметь бронирование различного типа и специфические защитные слои (например, мелкие стеклянные иглы для защиты от грызунов).
- **Оптическая муфта** — устройство, используемое для соединения двух и более оптических кабелей.
- **Оптический кросс** — устройство, предназначенное для оконечивания оптического кабеля и подключения к нему активного оборудования.

# Общие сведения о волоконно-оптических линиях передачи

## Активные компоненты ВОЛП

- **Мультиплексор/Демультимплексор** – широкий класс устройств предназначенных для объединения и разделения информационных каналов. Мультиплексоры и демультимплексоры могут работать как во временной, так и в частотной областях, могут быть электрическими и оптическими (для систем со спектральным уплотнением).
- **Регенератор** – устройство, осуществляющее восстановление формы оптического импульса, который, распространяясь по волокну, претерпевает искажения. Регенераторы могут быть как оптическими, так и электрическими, которые преобразуют оптический сигнал в электрический, восстанавливают его, а затем снова преобразуют в оптический.

## Общие сведения о волоконно-оптических линиях передачи

- **Усилитель** – устройство, усиливающее мощность сигнала. Усилители могут быть оптическими и электрическими, осуществляющими оптико-электронное и электронно-оптическое преобразование сигнала.
- **Лазер** – источник монохромного когерентного оптического излучения. В системах с прямой модуляцией, которые являются наиболее распространёнными, лазер одновременно является и модулятором, непосредственно преобразующим электрический сигнал в оптический.
- **Модулятор** – устройство, модулирующее оптическую волну, несущую информацию по закону электрического сигнала. В большинстве систем эту функцию выполняет лазер.
- **Фотоприёмник** (Фотодиод) – устройство, осуществляющее оптоэлектронное преобразование сигнала.

## Общие сведения о волоконно-оптических линиях передачи

**Волоконно-оптические линии передачи** обладают рядом преимуществ перед проводными и радиорелейными системами связи:

- Малое затухание сигнала ( $0,15 \text{ дБ/км}$  в третьем окне прозрачности) позволяет передавать информацию на значительно большее расстояние без использования усилителей.  
Усилители в **ВОЛП** могут ставиться через 40, 80 и 120 км, в зависимости от класса оконечного оборудования.
- Высокая пропускная способность оптического волокна позволяет передавать информацию на высокой скорости, недостижимой для других систем связи.

## Общие сведения о волоконно-оптических линиях передачи

- Высокая надёжность оптической среды: оптические волокна не окисляются, не намокают, не подвержены слабому электромагнитному воздействию.
- Информационная безопасность – информация по оптическому волокну передаётся «из точки в точку» и подслушать или изменить ее можно только путем физического вмешательства в линию передачи.
- Высокая защищённость от межволоконных влияний – уровень экранирования излучения более 100 дБ. Излучение в одном волокне совершенно не влияет на сигнал в соседнем волокне.
- Пожаро- и взрывобезопасность при изменении физических и химических параметров.
- Малые габариты и масса.



## Общие сведения о волоконно-оптических линиях передачи

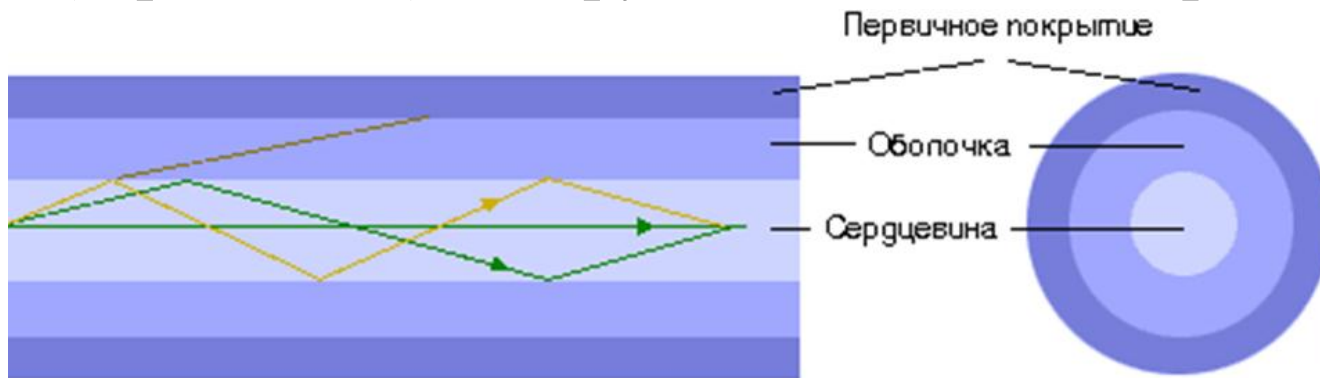
- Широкополосность оптических сигналов, обусловленная чрезвычайно высокой частотой несущей ( $f_0=10^{14}$  Гц). Это означает, что по **ВОЛП** можно передавать информацию со скоростью порядка  $10^{12}$  бит/с (по одному волокну можно передать одновременно 10 миллионов телефонных разговоров или миллион видеосигналов). Скорость передачи данных может быть увеличена за счет передачи информации сразу в двух направлениях, так как световые волны могут распространяться в одном волокне независимо друг от друга. Кроме того, в оптическом волокне могут распространяться световые сигналы двух разных поляризаций, что позволяет удвоить пропускную способность оптического канала связи. На сегодняшний день предел по плотности передаваемой информации по оптическому волокну не достигнут.

## 2 Принцип действия и классификация световодов

**Волоконно-оптические линии передачи** осуществляют передачу информации с помощью оптических сигналов по **волоконно-оптическим световодам**.

**СВЕТОВОД** (волновод оптический) – закрытое устройство предназначенное для направленной передачи оптического излучения (света).

Простейший **световод** представляет собой круглый или прямоугольный диэлектрический стержень, называемый сердечником (сердцевина), окруженный диэлектрической оболочкой.



## Принцип действия и классификация световодов

Показатели преломления материалов сердечника и оболочки определяются как

$$n_1 = \sqrt{\varepsilon_1}, \quad n_2 = \sqrt{\varepsilon_2},$$

где  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  — относительные диэлектрические проницаемости материалов стержня и оболочки.

Относительная магнитная проницаемость материалов обычно постоянна и равна единице.

Разность показателей преломления на границе “сердечник-оболочка” обычно составляет **1 %**.

Показатель преломления оболочки постоянен, а показатель преломления сердечника в общем случае является функцией поперечной координаты, называемой **профилем показателя преломления** и положенным в основу классификации волокон.

# Световоды

Одномодовые

Многомодовые

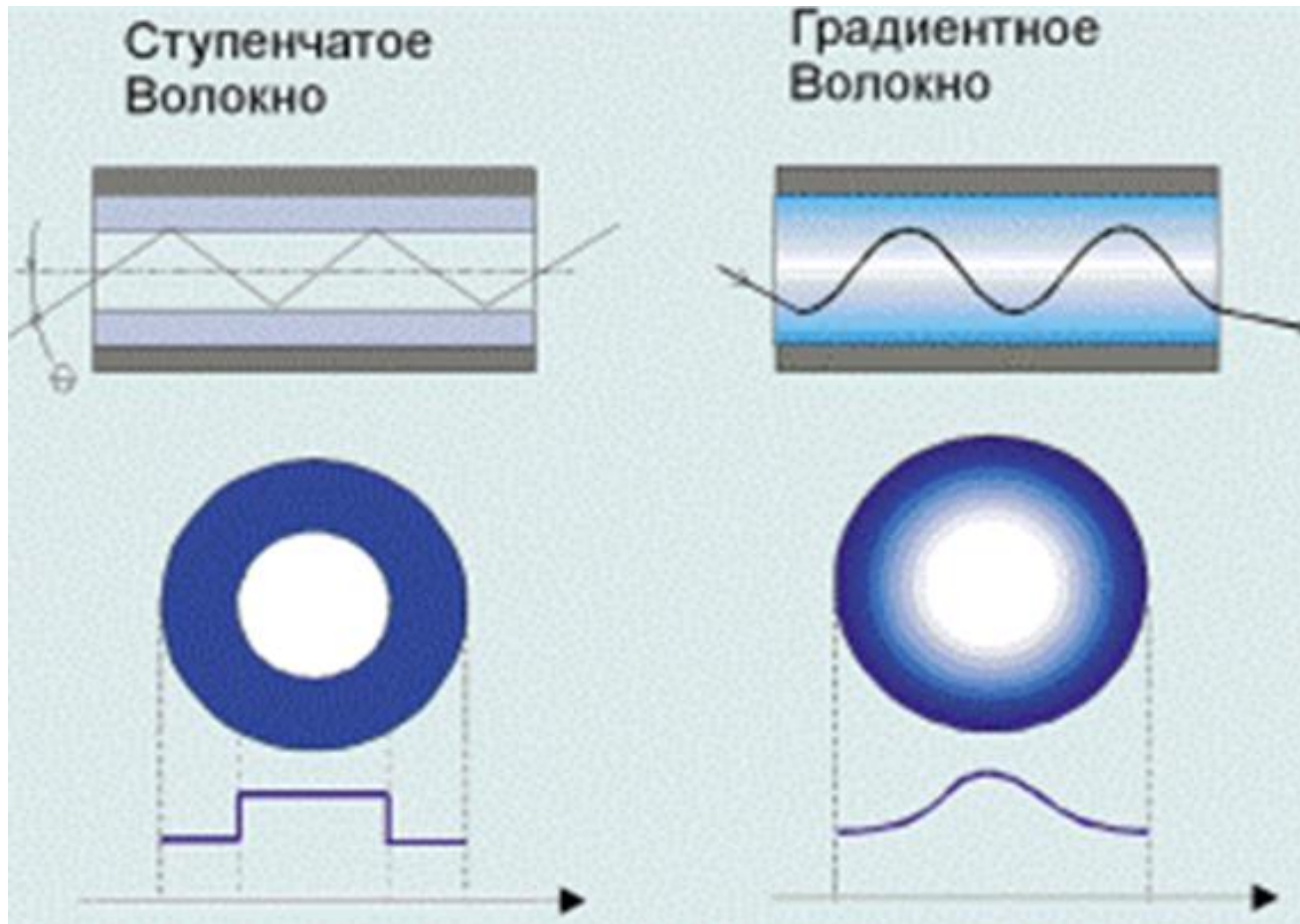
Ступенчатые

Градиентные

Ступенчатые

Градиентные

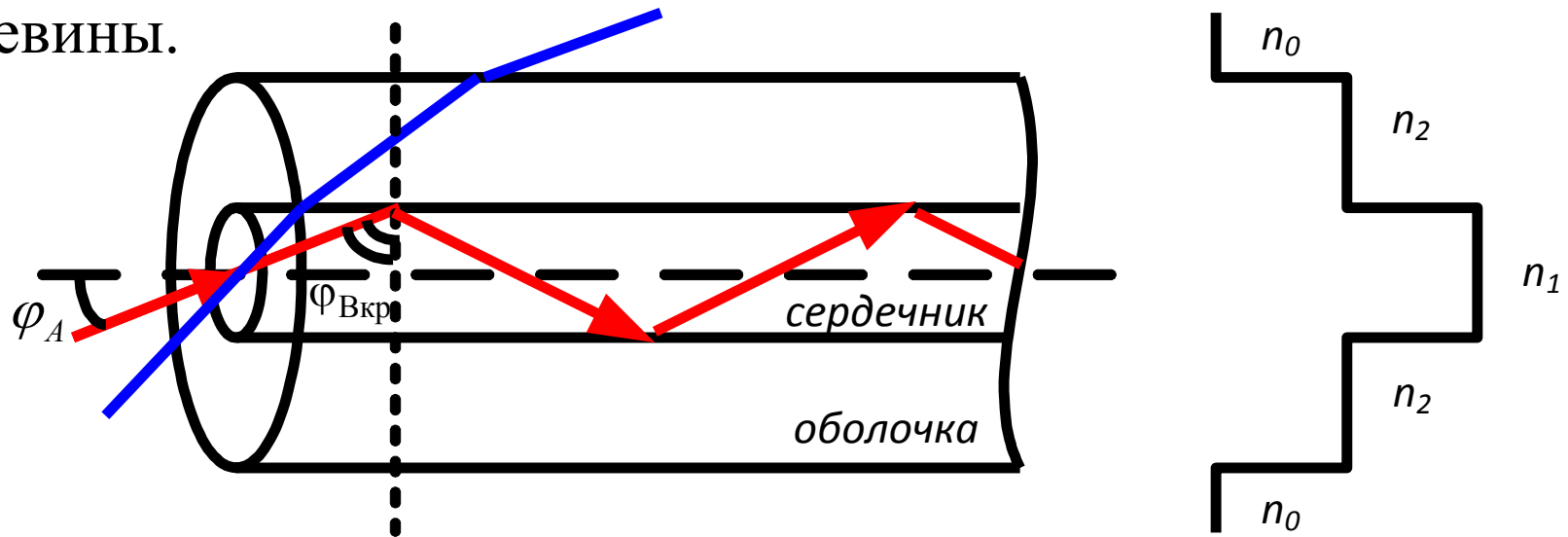
# Принцип действия и классификация световодов



Распространенные профили показателя преломления сердечника **ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СВЕТОВОДОВ**

# Принцип действия и классификация световодов

Передача оптической энергии по волоконно-оптическому световоду происходит на основе **эффекта полного внутреннего отражения**, заключающегося в том, что, при падении излучения на границу с оболочкой, вся энергия излучения отражается внутрь сердечника, то же самое происходит и при всех последующих отражениях. В результате излучение распространяется вдоль оси световода, не выходя из сердцевины.



## Принцип действия и классификация световодов

Проявление этого эффекта заключается в выполнении условия:

$$\sin(\varphi_A) = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \sqrt{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}$$

где  $\varphi_A$  — максимальный угол отклонения падающего излучения от оси сердечника  $\varphi_A$  (апертурный угол), при котором еще имеется полное внутреннее отражение, (при  $n_0 = 1$ )

$n_1 > n_2$  — коэффициенты преломления соответственно, сердечника и оболочки световода;

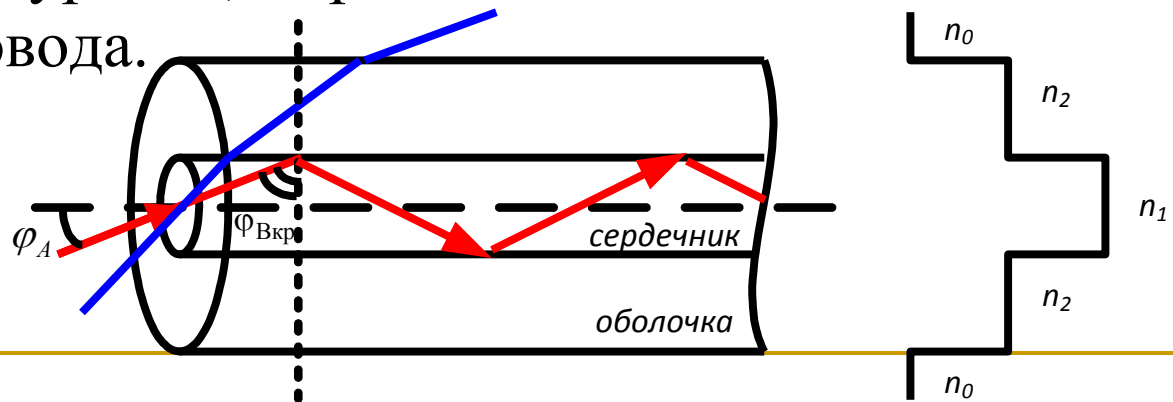
$\varepsilon_1, \varepsilon_2$  — диэлектрические проницаемости материалов из которых изготовлены сердечник и оболочка световода.

## Принцип действия и классификация световодов

Между углами полного внутреннего отражения  $\varphi_{ВКР}$  и апертурой световода имеется взаимосвязь: чем больше  $\varphi_{ВКР}$ , тем меньше апертура световода.

Угол падения луча на границу “сердечник-оболочка” должен быть больше угла полного внутреннего отражения и находился в пределах от  $\varphi_{ВКР} < \varphi_B < 90^\circ$ , а величина угла ввода луча в торец световода должна укладываться в величину апертурного угла.

Излучение, падающее на торец световода под углом, большим апертурного, при взаимодействии с оболочкой уходит из световода.



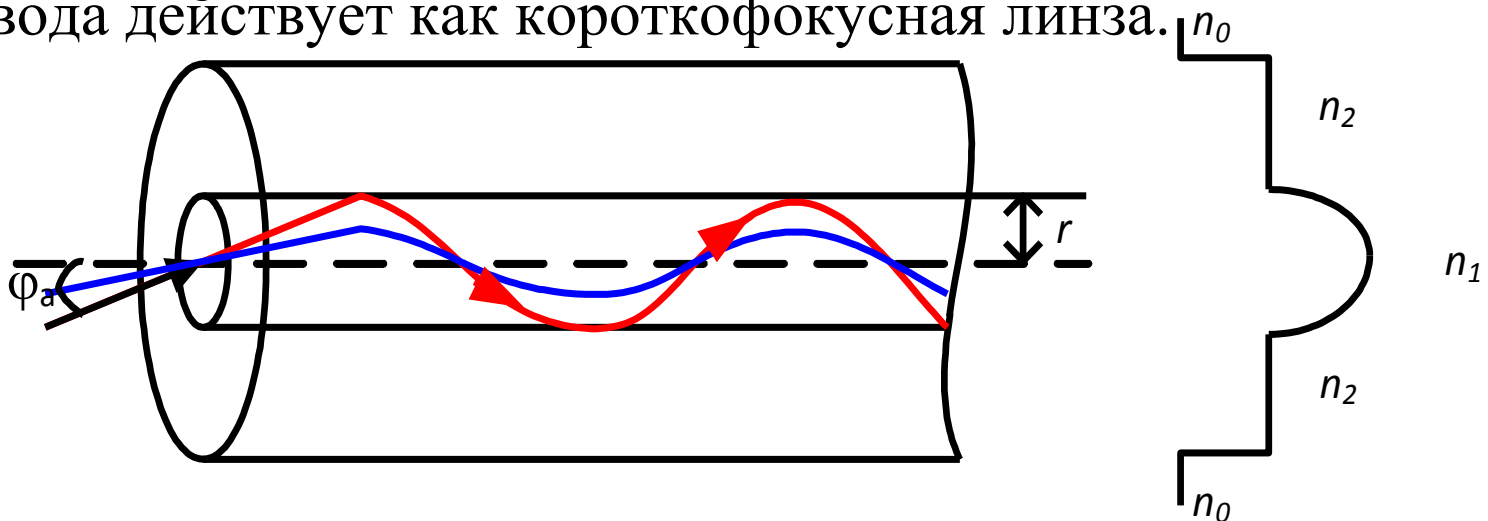


# Принцип действия и классификация световодов

Излучение распространяется вдоль световода и в том случае, если уменьшение показателя преломления сердечника от центра к периферии происходит не ступенчато, а постепенно.

Такие световоды называются **градиентными световодами**.

В градиентном световоде происходит самофокусировка лучей вдоль осевой линии. При этом их траектория представляет собой синусоиды. Любой отрезок такого световода действует как короткофокусная линза.



## Принцип действия и классификация световодов

Наиболее чаще применяются градиентные световоды, для которых профиль показателя преломления сердечника описывается функцией:

$$n(r) = n_1 \cdot \left[ 1 - 2 \cdot \Delta (r/a)^g \right]^{1/2},$$

где  $r$  – текущий радиус;

$\Delta = (n_1 - n_2)/n_1$  – относительная разность показателей преломления сердечника и оболочки;

$n_1$  – наибольшее значение показателя преломления сердечника;

$g$  – показатель степени, определяющий изменение  $n(r)$ ;

$a$  – радиус сердечника.

## Принцип действия и классификация световодов

Световоды с  $g = 2$  называются параболическими, т. к. профиль показателя преломления описывается уравнением параболы.

Используя возможности градиентных световодов изменять свои характеристики в зависимости от закона изменения диэлектрической проницаемости по поперечному сечению световода, можно для каждого конкретного применения подобрать световод с необходимыми параметрами.

Объяснение распространения оптического излучения в световоде, основанное только на законах геометрической оптики, не учитывает свойств оптического излучения как электромагнитной волны. Учет волновых свойств излучения позволяет установить, что из всей суммы световых лучей в пределах апертурного угла для данного световода только ограниченное число лучей может образовывать направляемые волны, которые называются **волноводными модами**.

## Принцип действия и классификация световодов

Эти волны характеризуются тем, что после двух последовательных переотражений от границы “сердечник-оболочка” они должны быть в фазе. Если это условие не выполняется, то волны интерферируют так, что гасят друг друга и исчезают.

**Волноводные моды**, распространяющиеся в сердцевине, называются модами сердцевины или направляемыми модами.

Часть лучей, покинувших сердцевину, начинает распространяться в оболочке за счет полного внутреннего отражения от соответствующих границ (сердцевина-оболочка, оболочка – внешняя среда), они образуют так называемые **моды оболочки**.

Другая часть лучей уходит из оболочки наружу, образуя **моды излучения**.

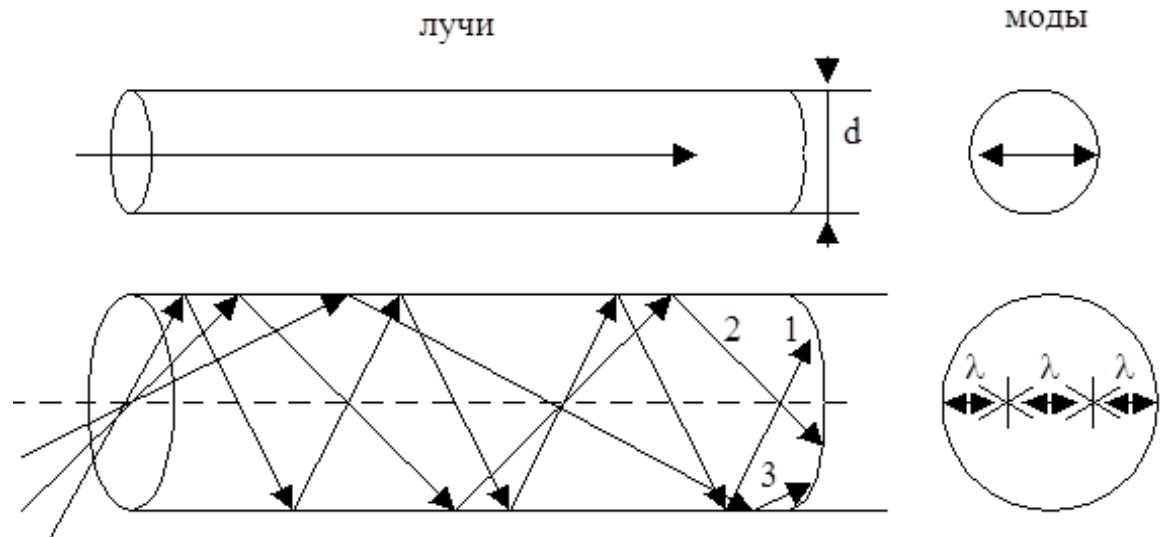
# Принцип действия и классификация световодов

Таким образом, по световоду возможна передача большого количества различных типов волн – **мод**.

Под **модой** также принято понимать единичную независимую траекторию распространения излучения.

Для устранения перекрестных помех между оптическими световодами (волокнами) в оптическом кабеле, их защитное покрытие должно быть выполнено из сильно поглощающего материала для мод излучения.

Количество мод зависит от соотношения диаметра сердечника световода  $d$  и длины волны  $\lambda$ .



## Принцип действия и классификация световодов

С увеличением  $d$  количество передаваемых **мод** возрастает.

В зависимости от количества распространяющихся на рабочей частоте **мод**, световоды подразделяются на одномодовые и многомодовые.

Для обеспечения одномодового режима передачи необходим световод с очень малым диаметром сердечника, соизмеримым с длиной волны ( $d \approx \lambda$ ).

Достоинствами одномодовых световодов являются малое искажение импульсных сигналов, высокая полоса пропускания, большая информационная способность и большая дальность передачи.

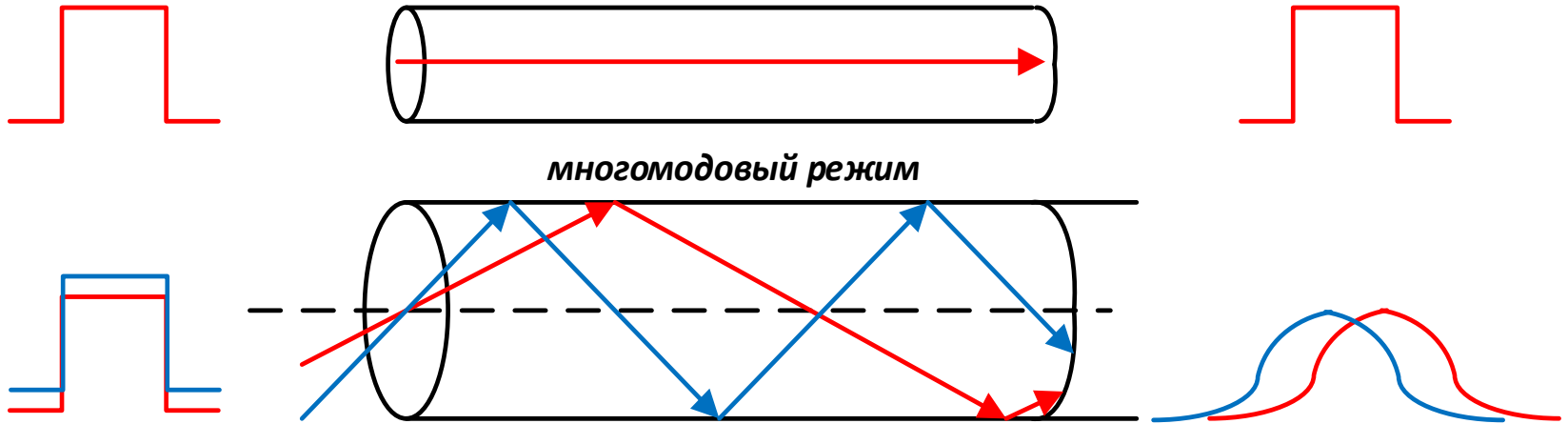
При многомодовой передаче информации за счет **дисперсии** (искажение оптического сигнала при его передаче через световод) импульс расширяется и искажается.

# Принцип действия и классификация световодов

*входной оптический импульс*

*одномодовый режим*

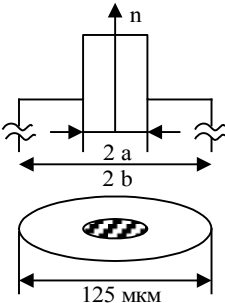
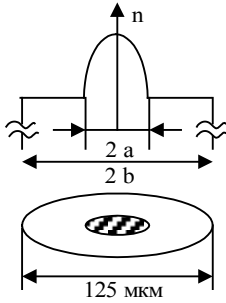
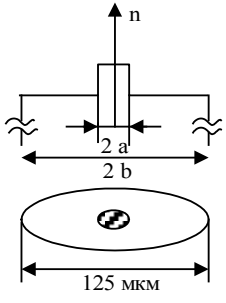
*выходной оптический импульс*



Это обусловлено тем, что различные моды (лучи) идут в световоде под разными углами, проходят различные пути и к концу линии приходят в разное время.

При одномодовой передаче распространяется лишь один луч и нет модовых искажений.

# Принцип действия и классификация световодов

	Многомодовый световод со ступенчатым профилем показателя преломления	Многомодовый градиентный световод	Одномодовый световод
Конструкция			
Диаметр сердечника $2a$ , мкм	50-100	50-100	8-10
Разница показателей преломления $\Delta$	1 %	1 %	0,3 %
Коэффициент широкополосности, МГц·км	20-30	100...1000	$>1000$ ( $\lambda = 1,3$ мкм) 200000 ( $\lambda = 1,55$ мкм)



### 3 Параметры и характеристики световодов

**1 Числовая апертура световода** – определяет синус половины угла при вершине конического пучка лучей, которые захватываются и направляются световодом.

На плоскости **числовая апертура** представляет собой синус максимального угла падения световых лучей на торец световода, при котором в световоде луч падает на границу “сердцевина-оболочка” под критическим углом полного внутреннего отражения:

$$A = \sin \varphi_A = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} / n_0 \cong \sqrt{n_1^2 - n_2^2},$$

где  $n_1, n_2, n_0$  – показатели преломления соответственно сердцевины, оболочки и среды, откуда излучение падает на торец световода (для воздуха  $n_0=1$ ).

## Параметры и характеристики световодов

Для определения **числовой апертуры** можно также использовать приближенные выражения:

$$A = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \approx n_1 \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta} \approx \sqrt{2 \cdot n_1 \cdot (n_1 - n_2)},$$

где  $\Delta = (n_1 - n_2)/n_1$  – относительная разность показателей преломления.

Для большинства световодов  $\Delta = 10^{-2} \dots 10^{-3}$ .

Приведенные соотношения учитывают только меридиональные лучи, т. е. лучи, пересекающие оптическую ось световода.

Однако в пучке света, вошедшем в световод, преобладают косые лучи, которые не пересекают ось световода, а распространяются по ломанным или плавным право- или левовинтовым спиральям.

Законы распространения этих лучей сложнее и **числовая апертура  $A$** , подсчитанная для меридиональных лучей, меньше действительной числовой апертуры  $A_d$ , учитывающей все лучи.

## Параметры и характеристики световодов

При этом отношение  $A_d/A$  увеличивается с уменьшением разности между  $n_1$  и  $n_2$ .

При расчете эффективности ввода излучения в градиентный световод, его удобно рассматривать как ступенчатый и характеризовать **эффективной числовой апертурой**.

Для световодов с параболическим профилем показателя преломления:

$$A_{эф} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{n_1^2 - n_2^2}.$$

Чем больше апертура световода, тем выше эффективность ввода излучения в световод.

Однако увеличение апертуры приводит к увеличению дисперсии импульсов и другим нежелательным явлениям.

Поэтому для ступенчатых световодов, используемых в системах связи,  $A = 0,18 \dots 0,23$ , и лишь для отдельных типов световодов апертура может достигать значений  $0,4 \dots 0,55$ .

## Параметры и характеристики световодов

**2 Число направленных мод  $N$** , которые могут распространяться в сердцевине световода, определяется из следующих выражений:

а) для двухслойного световода со ступенчатым профилем показателя преломления:

$$N \approx V^2 / 2;$$

б) для градиентного световода со степенным профилем показателя преломления:

$$N = \frac{g}{2 \cdot (g + 2)} \cdot V^2$$

в) для параболического световода:

$$N \approx V^2 / 4,$$

где  $V$  – нормированная частота,

$g$  – показатель степени, определяющий изменение показателя преломления сердечника по его радиусу.

## Параметры и характеристики световодов

**3 Нормированная частота  $V$**  – величина, которая объединяет структурные параметры световода  $a, n_1, n_2$  с длиной волны излучения  $\lambda$ . Она определяется из выражения:

$$V = \frac{2\pi \cdot a}{\lambda} \cdot \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{2\pi \cdot a}{\lambda} \cdot A,$$

где  $2\pi/\lambda$  – волновое число;  
 $a$  – радиус сердечника.

Из выражений следует, что **число распространяющихся мод** в градиентном световоде будет меньше, чем в световоде со ступенчатым показателем преломления при одних и тех же геометрических размерах и с теми же значениями коэффициентов преломления.

## Параметры и характеристики световодов

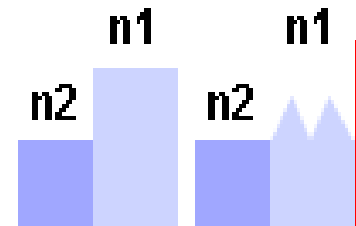
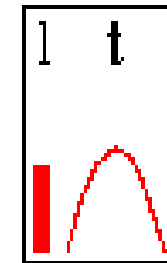
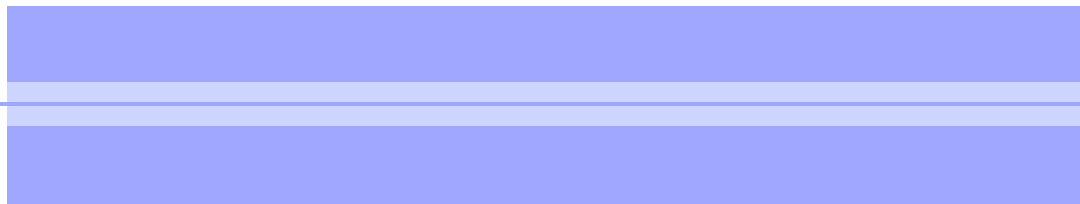
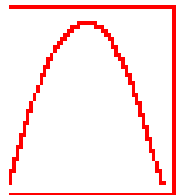
Одномодовый режим работы световода будет наблюдаться в том случае, если будет выполняться условие:

$$V = \frac{2\pi \cdot a}{\lambda} \cdot \sqrt{n_1^2 - n_2^2} < 2,405.$$

Эта формула показывает, что необходимый радиус сердечника для получения одномодового режима зависит от соотношения между  $n_1$  и  $n_2$ .

Чем меньше разность  $n_1 - n_2$ , тем больший радиус может иметь сердечник.

Одномодовое ступенчатое/градиентное волокно



## Параметры и характеристики световодов

**4 Затухание.** Важнейшим параметром световода является затухание передаваемого сигнала. Для количественной оценки потерь пропускания используется удельное затухание оптического сигнала, выраженное в  $\text{дБ/км}$ :

$$B = \frac{1}{L} \cdot 10 \cdot \lg(P_{\text{вх}} / P_{\text{вых}}),$$

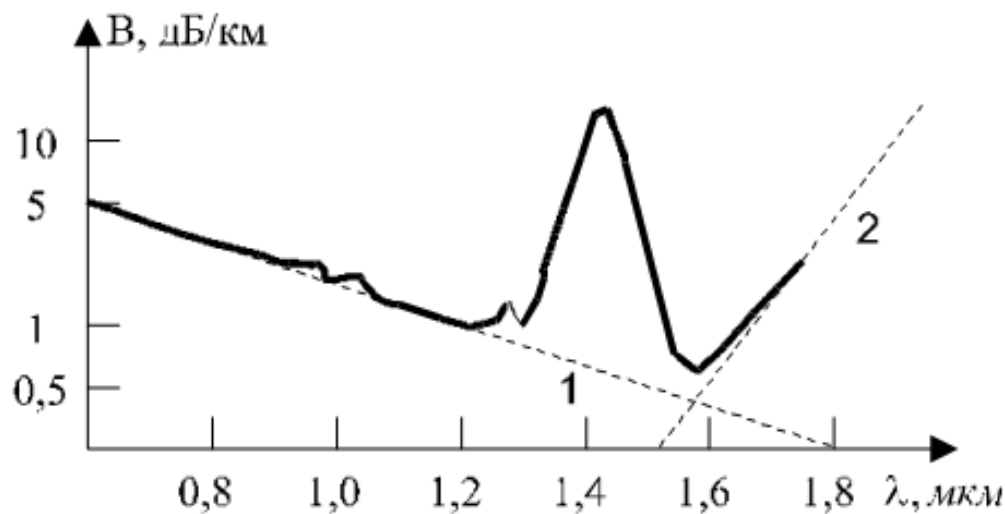
где  $L$  — длина световода (км);

$P_{\text{вх}}$ ,  $P_{\text{вых}}$  — мощность оптического сигнала на входе и выходе световода.

Существуют различные механизмы потерь в световодах, главными из которых являются поглощение и рассеяние оптической энергии. Потери на поглощение состоят в основном из собственного поглощения и примесного поглощения.

## Параметры и характеристики световодов

Типичная зависимость затухания от длины волны (спектральная характеристика световода) хорошо согласуется с теоретической, учитывающей рэлеевское рассеяние (кривая 1) и инфракрасное поглощение (кривая 2). Максимумы поглощения на длинах  $\lambda = 1,39; 1,24; 0,94$  связаны с наличием примеси гидроксильной группы  $\text{OH}^-$ .



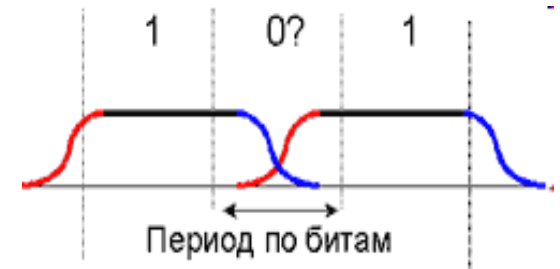
Достигнутые значения удельного затухания в световодах следующие: на длине волны  $\lambda = 0,85$  мкм —  $B = 2$  дБ/км; на длине волны  $\lambda = 1,3$  мкм —  $B = 0,5$  дБ/км; на длине волны  $\lambda = 1,55$  мкм —  $B = 0,2$  дБ/км.



# Параметры и характеристики световодов

**5. Дисперсия** — искажение оптического сигнала при его передаче через световод.

Дисперсия проявляется в изменении (расплывании) передаваемых оптических импульсов, что приводит к битовым ошибкам при передаче информации.



Чем протяженнее световод, тем больше дисперсия.

Дисперсия обусловлена различием времени распространения различных мод в световоде и наличием частотной зависимости показателя преломления и коэффициента распространения.

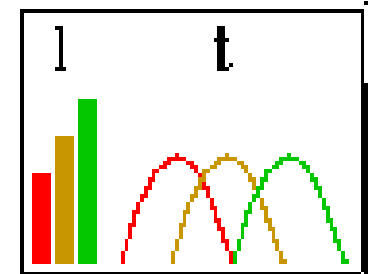
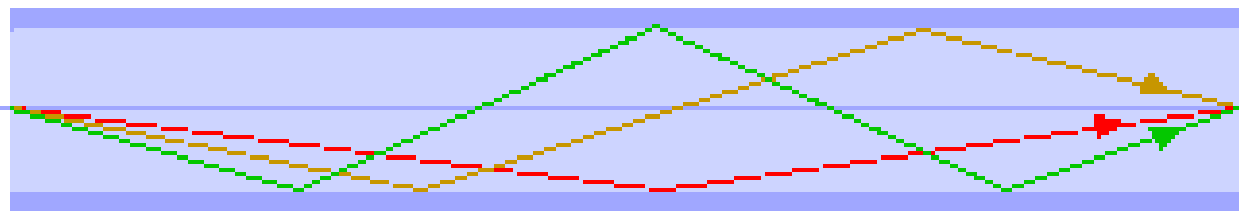
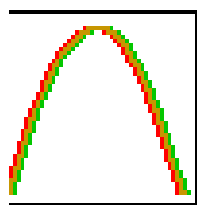
Различают несколько составляющих **дисперсии**:

- **межмодовую дисперсию**;
- **межчастотную (волновую или волноводную) дисперсию**;
- **материальную дисперсию (дисперсия материала)**.

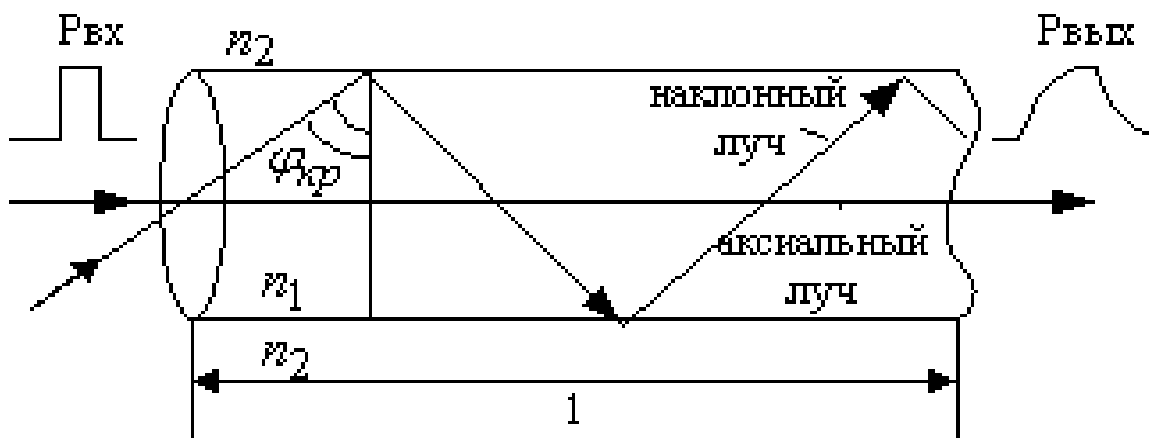
# Параметры и характеристики световодов

**Межмодовая (модовая) дисперсия** обусловлена различием путей, проходимых разными модами в световоде.

Межмодовая дисперсия



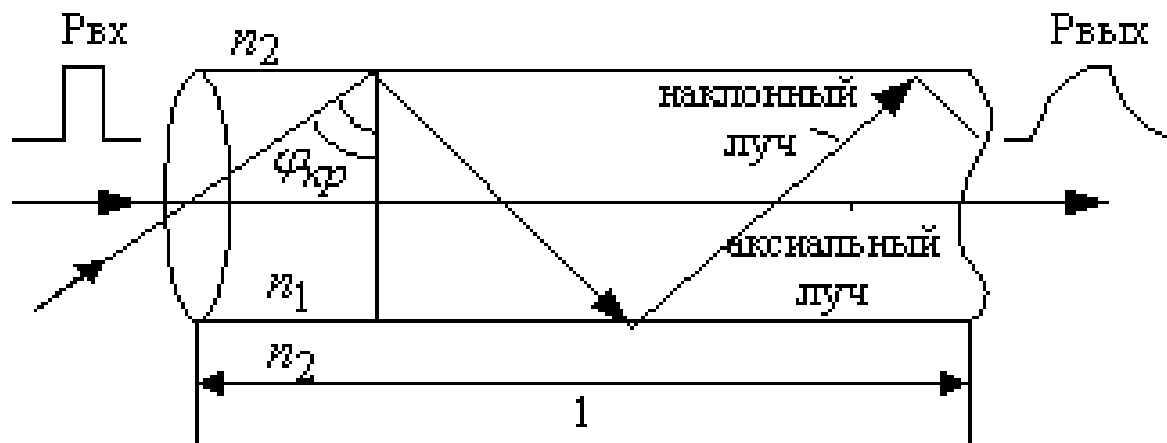
Расчетные соотношения для межмодовой дисперсии можно получить, рассматривая геометрическую модель распространения мод в ступенчатом световоде.



## Параметры и характеристики световодов

Любая мода ступенчатого световода может быть представлена световым лучом, который при движении вдоль световода многократно испытывает полное внутреннее отражение от границы раздела “сердцевина-оболочка”. Этот луч называется **наклонным**.

Исключением является основная (фундаментальная) мода, которая представлена световым лучом, движущимся без отражения строго вдоль оси световода. Этот луч называется **аксиальным**.



## Параметры и характеристики световодов

Если на вход волоконного световода подается очень короткий оптический импульс, то начало выходного оптического импульса совпадает со временем прихода луча, прошедшего самый короткий путь, а его конец – со временем прихода луча, прошедшего самый длинный путь.

Время пробега аксиальным лучом расстояния  $l$  будет равно:

$$t_a = \frac{l}{v_\phi} = \frac{l \cdot n_1}{c},$$

где  $v_\phi$  – фазовая скорость, зависящая от коэффициента преломления;  
 $c$  – скорость света в вакууме.

## Параметры и характеристики световодов

Время пробега этого же расстояния наклонным лучом с максимально возможным углом полного внутреннего отражения будет равно:

$$t_n = \frac{1 \cdot n_1}{c \cdot \sin \varphi_{кр}} = \frac{n_1^2 \cdot l}{c \cdot n_2}.$$

Временное запаздывание наклонного луча по отношению к аксиальному определяет уширение оптического импульса, вызванное межмодовой дисперсией:

$$\tau_{\text{мод}} = \Delta t = t_n - t_a = \frac{n_1 \cdot (n_1 - n_2)}{n_2 \cdot c} \cdot l \cong \left( \frac{\Delta n}{c} \right) \cdot l \cong \frac{n_1 \cdot \Delta}{c} \cdot l,$$

где  $\Delta n = n_1 - n_2$ ;  $\Delta = (n_1 - n_2)/n_1$ ;  $n_1/n_2 \approx 1$ .

## Параметры и характеристики световодов

Данное явление начинает проявляться не сразу, а при определенной длине световода  $l_y$ , которая носит название длины установившейся связи между модами. По данным измерений  $l_y = 2 \dots 5$  км, причем меньшие значения соответствуют оптическим волокнам с более высоким затуханием.

Таким образом:

$$\tau_{\text{мод}} = \begin{cases} \frac{\Delta n}{c} \cdot l = \frac{n_1 \cdot \Delta}{c} \cdot l, & \text{при } l < l_y; \\ \frac{\Delta n}{c} \cdot \sqrt{l \cdot l_y} = \frac{n_1 \cdot \Delta}{c} \cdot \sqrt{l \cdot l_y}, & \text{при } l \geq l_y. \end{cases}$$

Для типичных ступенчатых световодов из кварцевых или многокомпонентных стекол удельное уширение импульсов примерно равно  $20 \dots 50$  нс/км.

## Параметры и характеристики световодов

В результате время распространения всех лучей по световоду уравнивается, а уширение уменьшается.

При учете взаимодействия мод для параболического градиентного световода уширение импульса можно определить из выражений:

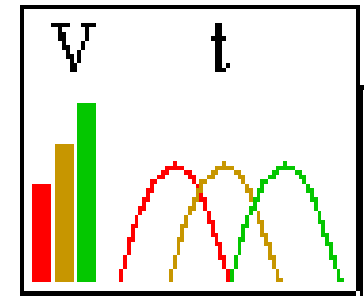
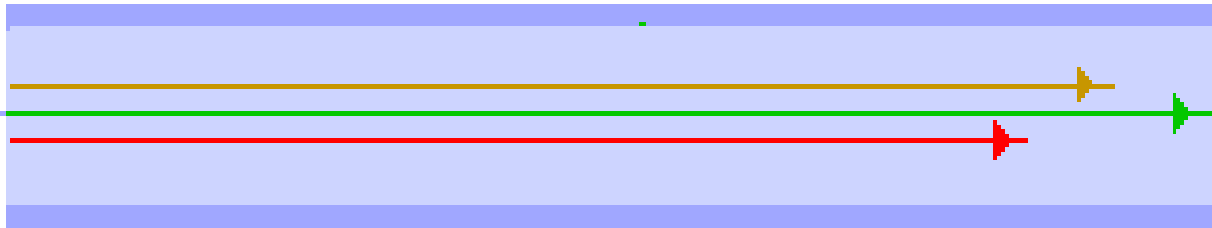
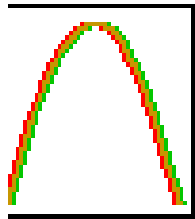
$$\tau_{\text{мод}} = \begin{cases} \frac{(\Delta n)^2}{2 \cdot c \cdot n_1} \cdot l = \frac{n_1 \cdot \Delta^2}{2 \cdot c} \cdot l, & \text{при } l < l_y; \\ \frac{(\Delta n)^2}{2 \cdot c \cdot n_1} \cdot \sqrt{l \cdot l_y} = \frac{n_1 \cdot \Delta^2}{2 \cdot c} \cdot \sqrt{l \cdot l_y}, & \text{при } l \geq l_y. \end{cases}$$

Типичное удельное уширение импульсов для параболических градиентных световодов примерно равно 0,2...4 нс/км, а  $l_y \geq 2,5$  км.

## Параметры и характеристики световодов

**Межчастотная (волновая или волноводная) дисперсия** обусловлена нелинейной зависимостью коэффициента фазы (постоянной распространения)  $\beta$  любой направляемой моды от длины волны оптического излучения  $\lambda$ .

Межчастотная дисперсия



Изменение групповых скоростей направляемых мод в пределах спектра излучения источника приводит к различной временной задержке частотных составляющих этих мод, т.е. уширению оптического импульса. Уширение оптического импульса за счет волноводной дисперсии определяется из выражения:

$$\tau_v \cong \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \cdot \frac{2 \cdot n_1^2 \cdot \Delta}{c} \cdot l$$



# Параметры и характеристики световодов

## Материальная дисперсия (дисперсия материала)

обусловлена зависимостью показателя преломления материала сердцевины и оболочки от длины волны оптического излучения.

Она приводит к тому, что групповые скорости распространения лучей с разными длинами волн оказываются различными.



Любой сигнал, налагаемый на световую волну (модуляция света), распространяется не с фазовой скоростью волны, равной  $v_\phi = \omega / \beta$ , а с групповой скоростью, определяемой соотношением:

## Параметры и характеристики световодов

$$V_{gp} = \frac{d\varpi}{d\beta} = \frac{1}{(d\varpi/d\beta)}.$$

В недисперсионной среде групповая и фазовая скорости одинаковы:

$$\beta = \frac{\varpi}{V_\phi}, \quad V_{gp} = \frac{1}{(d\varpi/d\beta)} = V_\phi.$$

Однако в дисперсионной среде, где фазовая скорость зависит от частоты,  $V_{gp}$  и  $V_\phi$  будут различными:

$$V_{gp} = \frac{1}{(d\varpi/d\beta)} = \frac{V_\phi}{1 - \left( \varpi / V_\phi \right) \cdot \left( dV_\phi / d\varpi \right)}.$$

## Параметры и характеристики световодов

Реальные источники излучения генерируют не одну длину волны, а спектр длин волн. Это приводит к расширению оптического импульса на выходе световода за счет временной задержки частотных составляющих сигнала.

Уширение оптического импульса за счет дисперсии материала определяется из выражения:

$$\tau_m \cong \frac{\Delta\lambda_{из}}{\lambda} \cdot \frac{\lambda^2}{c} \cdot \frac{d^2 n}{d\lambda^2} \cdot l = \frac{\Delta\lambda_{из}}{c} \cdot \lambda \cdot \frac{d^2 n}{d\lambda^2} \cdot l.$$

Из него видно, что уширение импульса определяется спектром излучения источника.

Так как для лазеров  $\Delta\lambda = 1 \dots 3$  нм, а для излучающих диодов  $\Delta\lambda = 20 \dots 40$  нм, то целесообразно в качестве излучателя использовать лазер. Для типичных световодов удельное уширение импульсов  $\tau_m = 5$  нс/км при использовании излучающих диодов и  $\tau_m = 0.5$  нс/км при использовании лазеров.

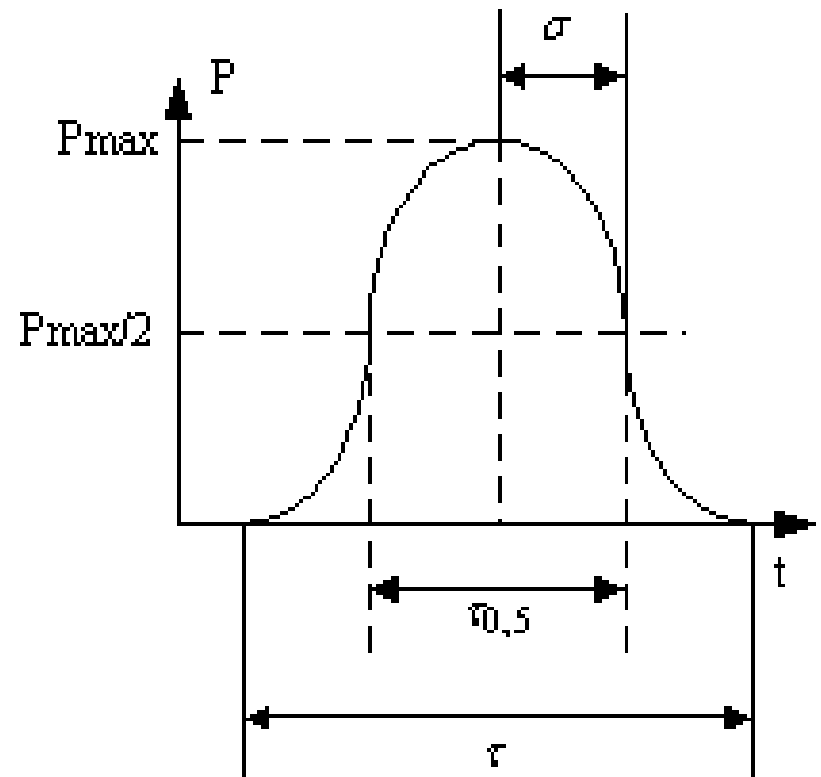
## Параметры и характеристики световодов

Подбирая параметры одномодовых волоконных световодов и длину волны излучения, можно скомпенсировать положительную волноводную дисперсию отрицательной дисперсией материала, т.е. получить нулевое значение хроматической дисперсии.

Различают:

- полное уширение оптического импульса —  $\tau$ ,
- уширение на полувывсоте импульса —  $\tau_{0,5}$
- среднеквадратичное уширение —  $\sigma$ .

Эти параметры находятся в соотношении:  $\tau = 2 \cdot \tau_{0,5} = 4 \cdot \sigma$ .



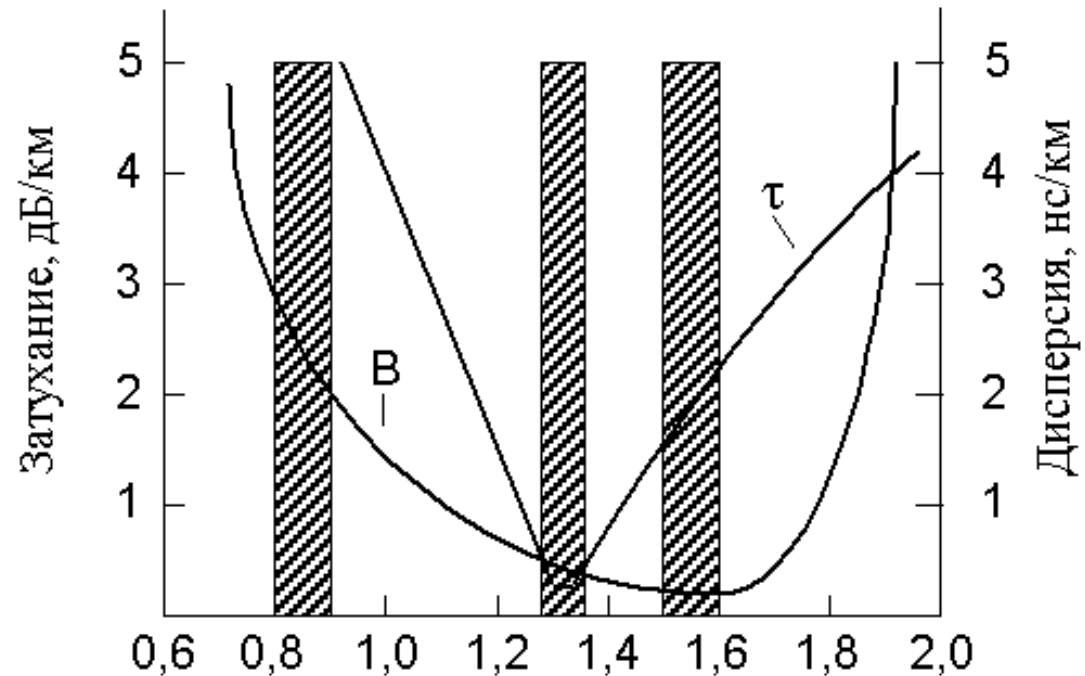
## Параметры и характеристики световодов

**Ширина полосы пропускания световода** обратно пропорциональна дисперсии световода:

$$F_{\text{пр}} = \frac{0,44}{\tau_{0,5}} = \frac{0,88}{\tau} \approx \frac{1}{\tau}$$

Идеализированная зависимость затухания и дисперсии от длины волны в кварцевом волоконном световоде.

Минимальная дисперсия наблюдается на длине волны 1,3 мкм.



## 4 Основные материалы и конструкции волоконных световодов и кабелей

### Основой волоконно-оптических передачи ВОЛП

являются световоды основных типов:

- **двухслойные кварцевые;**
- **из многокомпонентных стекол;**
- **кварц-полимерные;**
- **полимерные.**

**Двухслойные кварцевые световоды** изготавливаются способом парафазного осаждения, этот способ основан на высокотемпературной (1200...1600 °C) реакции получения чистого кварца  $\text{SiO}_2$  из газовой смеси  $\text{SiCl}_4$  и  $\text{O}_2$ .

Смесь пропускают через нагретую кварцевую трубу, и на ее внутренней поверхности оседает слой чистого кварца, образуя оболочку световода. Затем в смесь добавляют окислы бора или германия и осаждают легированный кварц (с большим  $n$ ), формируя сердцевину световода.

## Основные материалы и конструкции волоконных световодов и кабелей

**Световоды из многокомпонентных стекол** представляют собой сплавы двуокиси кремния  $\text{SiO}_2$  с несколькими составляющими:  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Li}_2\text{O}$ . Изменяя состав, можно изменять показатель преломления. Процесс изготовления световодов низкотемпературный и простой. Однако такие волокна менее прозрачны, чем кварцевые, из-за недостаточной чистоты исходных компонентов.

**Кварц-полимерные световоды** изготавливаются из особо чистого промышленного кварца, покрываемого в процессе вытяжки светоотражающим полимером. Они очень просты в изготовлении, устойчивы к радиации (из-за нелегированности сердцевины). Однако низкая температурная устойчивость и недолговечность позволяют использовать их только в простейших коротких ВОЛП.

## Основные материалы и конструкции волоконных световодов и кабелей

**Полимерные световоды** наиболее дешевы и просты в изготовлении, могут иметь практически любые значения диаметра сердцевины и числовой апертуры. Однако большое затухание и нестабильность характеристик во времени не дают возможности их широко применять.

Рассмотренные волоконные световоды обладают недостаточной механической прочностью и стойкостью к окружающей среде, поэтому при прокладке ВОЛП световоды объединяют в многожильный кабель, куда входят упрочняющие жилы и жилы для питания ретрансляторов.

Конструкция этих кабелей отличается большим разнообразием, но можно выделить три основные группы: **кабели концентрической повивной скрутки**; **кабели с профилированным сердечником**; **ленточные кабели**.



# Основные материалы и конструкции волоконных световодов и кабелей

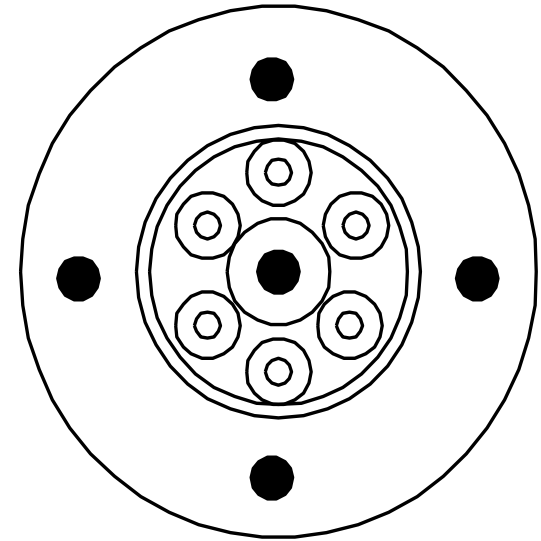
**Кабели концентрической повивной скрутки** имеют традиционную повивную скрутку по аналогии с электрическими кабелями.

Каждый последующий повив имеет на 6 световодов больше предыдущего.

Распространенные кабели содержат преимущественно 6, 12, 18 световодов.

Каждый световод покрывается индивидуальной защитной пленкой, исключающей взаимодействие между световодами, световоды помещены в эластичную оболочку, фиксирующую их положение, исключая трение между ними при изгибе кабеля.

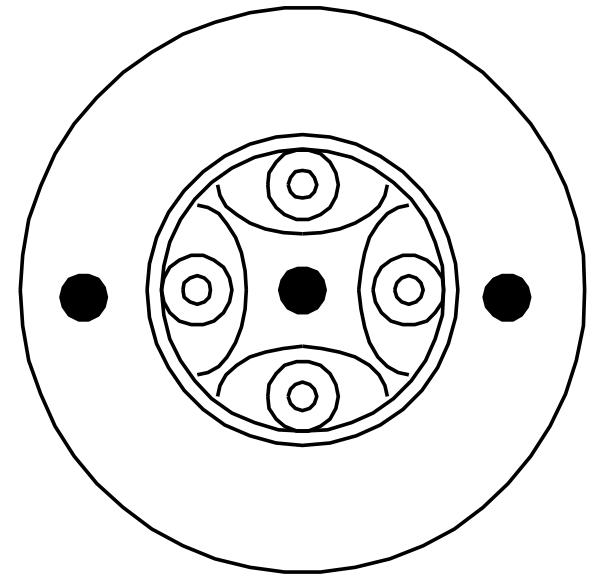
Вся конструкция, вместе с упрочняющими элементами, помещается в наружную оболочку, которая предотвращает кабель от внешних воздействий в процессе эксплуатации.



# Основные материалы и конструкции волоконных световодов и кабелей

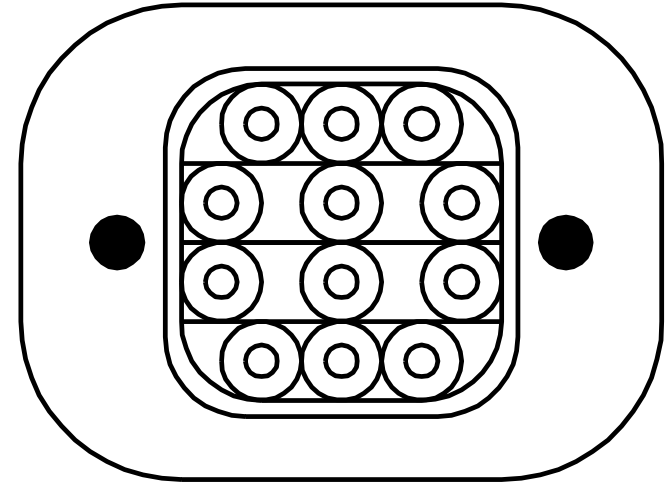
**Кабели с профилированным сердечником** имеют в центре фигурный пластмассовый сердечник с пазами, в которых размещаются оптические световоды.

Такие кабели могут содержать 4, 6, 8, 10 световодов. Количество упрочняющих элементов меньше, т. к. сердечник сам является упрочняющим элементом.



# Основные материалы и конструкции волоконных световодов и кабелей

**Ленточные кабели** состоят из стопки плоских пластмассовых лент, в которые вмонтировано несколько (чаще всего 12) световодов. Количество лент может быть 6, 8, 12. Таким образом, общее количество световодов в кабеле может достигать до 144.



Готовый кабель, в зависимости от назначения, может иметь следующие параметры:

- наружный диаметр до 30 мм;
- радиус изгиба не менее  $20d$ ;
- масса до 400 кг/км;
- прочность на разрыв до 3000 Н;
- температурный диапазон  $-40...+50^{\circ}\text{C}$ .

## Основные материалы и конструкции волоконных световодов и кабелей

Условные обозначения оптических кабелей состоит из трех групп символов, обозначающих:

*первый элемент:* две буквы **ОК** – оптический кабель;

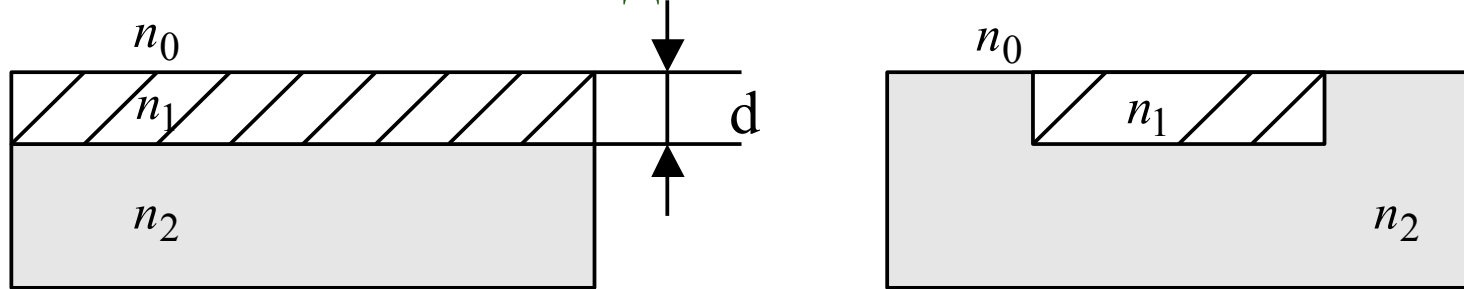
*второй элемент:* одна буква, указывающая на область использования кабеля (З – зонавые, М – магистральные).

*третий элемент:* группа цифр, указывающих количество каналов и емкость кабеля.

Например: ОКЗ 1×120, 1×480 означает, что оптический кабель используется в зонавой сети и позволяет обеспечить работу двух систем передачи емкостью 120 и 480 каждая.

В интегральной оптоэлектронике световоды изготавливаются в виде планарной пленки или полосы (полосковые световоды) с показателем преломления выше, чем у подложки.

# Основные материалы и конструкции волоконных световодов и кабелей



Планарный световод состоит из пленки с показателем преломления  $n_1$  и прилегающих к пленке сверху и снизу сред с меньшими показателями  $n_0$  и  $n_2$ , причем  $n_1 > n_2 \geq n_0$ . Световод называется несимметричным, если  $n_2 \neq n_0$ , и симметричным, если  $n_2 = n_0$ . Количество распространяющихся мод зависит от соотношения между толщиной световода и длиной волны, а также от разности между показателями преломления световода и подложки. Оно находится из соотношения:

$$N = \left( \frac{2d}{\lambda} \right) \cdot \sqrt{n_1^2 - n_2^2}.$$

## 5 Принципы построения волоконно-оптических систем передачи информации

В **волоконно-оптических системах передачи** информации применяются в основном те же принципы образования многоканальной связи, что и в обычных системах передачи по электрическим кабелям, а именно, частотного (ЧРК) и временного (ВРК) разделения каналов.

В первом случае сигналы разных каналов различаются по частоте и имеют аналоговую форму передаваемого сообщения.

Во втором случае каналы разделяются во времени, а сигналы имеют дискретный, импульсный вид.

Это соответствует цифровой передаче с импульсно-кодовой модуляцией (ИКМ). Во всех случаях оптической передачи информации электрический сигнал, создаваемый частотным или временным методом, модулирует оптическую несущую, а затем передается по оптическому кабелю.

## Принципы построения волоконно-оптических систем передачи информации

Возможны два вида модуляции: *внешняя* и *внутренняя*.

Для систем с инжекционными лазерами применяется, как правило, внутренняя модуляция.

В основном используется метод модуляции интенсивности оптической несущей, при котором от амплитуды электрического сигнала зависит мощность излучения, подаваемого в оптический кабель.

При этом закон изменения мощности оптического излучения повторяет закон изменения модулирующего сигнала.

Прием оптического сигнала осуществляется фотодиодом, который по сути представляет собой квадратичный прибор, выходной ток которого пропорционален входной мощности.

При этом оптический сигнал преобразуется в электрический, сохраняя форму.

## Принципы построения волоконно-оптических систем передачи информации

Оптический передатчик выполняет роль преобразователя электрического сигнала в оптический, а приемник обеспечивает обратное преобразование.

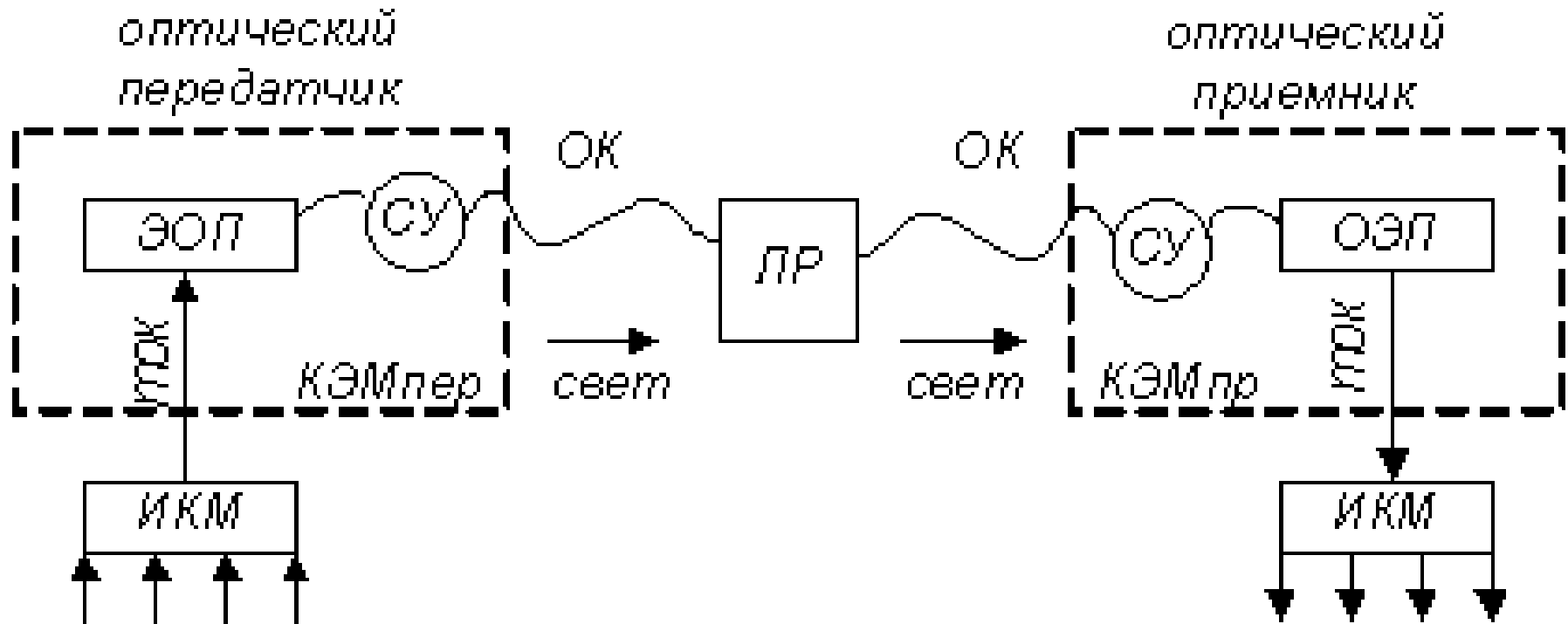
Передающие и приемные согласующие устройства СУ формируют и согласовывают диаграммы направленности и апертуру между приемопередающими устройствами и оптическим кабелем.

Преобразователи (ЭОП, ОЭП) формируют требуемую последовательность импульсов и осуществляют согласование уровней по мощности между электрическими (ИКМ) и оптическими элементами схемы.

Через определенные расстояния ( $L_p = 10...50$  км), обусловленные дисперсией и затуханием в кабеле, вдоль оптической линии располагаются линейные регенераторы (ЛР).

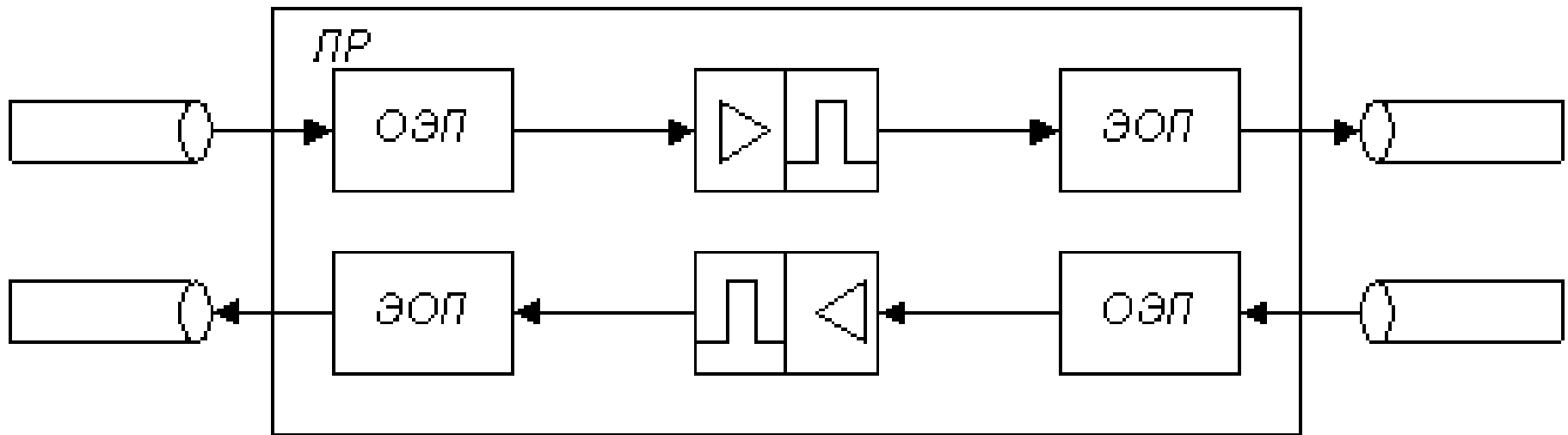


# Принципы построения волоконно-оптических систем передачи информации



Структурная схема ВОСП с ИКМ

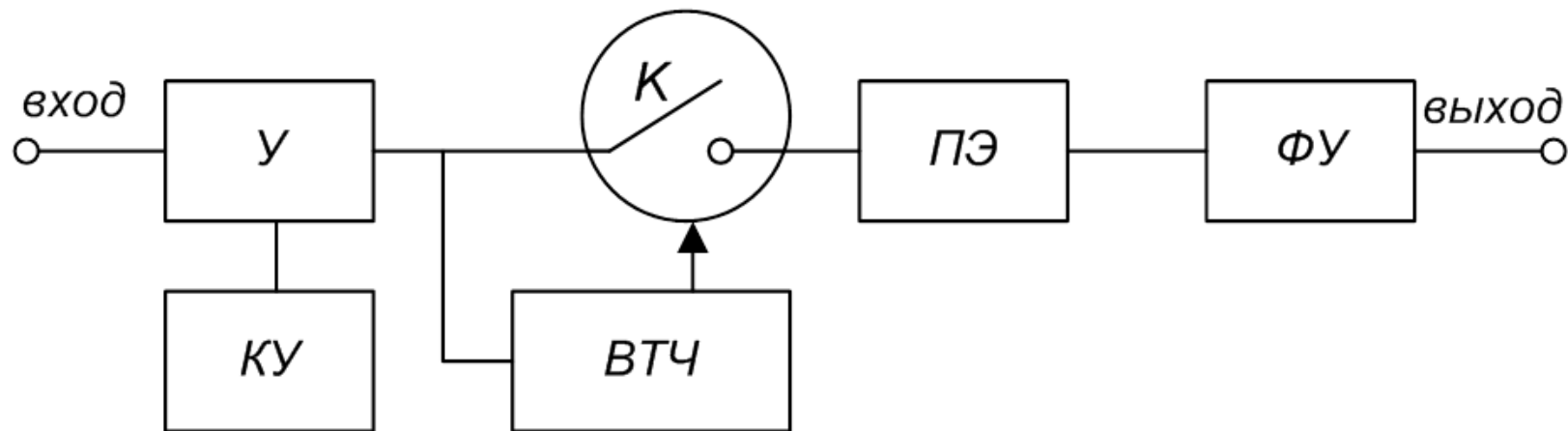
# Принципы построения волоконно-оптических систем передачи информации



В регенераторе, содержащем два полукомплекта (отдельно для прямого и обратного направлений передачи), оптический сигнал преобразуется в электрический.

В таком виде он регенерируется, усиливается, а затем снова преобразуется в оптический сигнал, который далее передается по оптическому кабелю. Таким образом, линейные регенераторы ВОСПИ строятся по схеме преобразования “свет-ток-свет”.

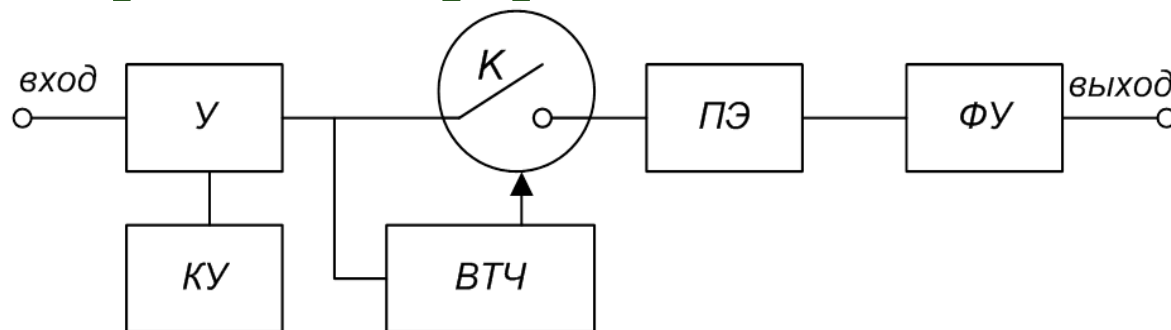
# Принципы построения волоконно-оптических систем передачи информации



Упрощенная структурная схема электронной части регенератора

Регенератор содержит усилитель (У) с корректирующим устройством (КУ), электронный ключ (К), пороговый элемент (ПЭ) и формирующее устройство (ФУ). В состав схемы входит выделитель тактовой частоты (ВТЧ) из линейного цифрового сигнала и обеспечивается синхронизация работы регенератора с частотой поступающей импульсной последовательности.

# Принципы построения волоконно-оптических систем передачи информации



Работа регенератора иллюстрируется временными диаграммами, представленными на рисунке.

