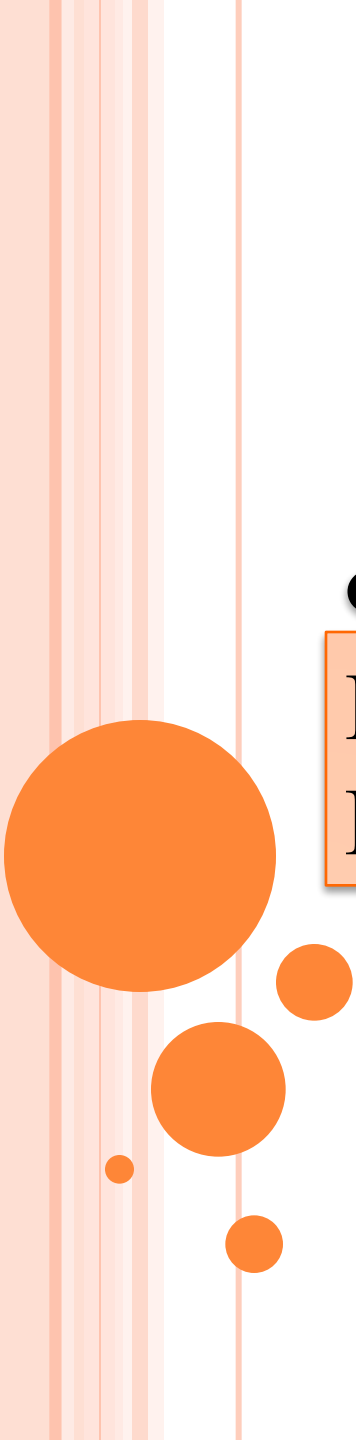




# **ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН**

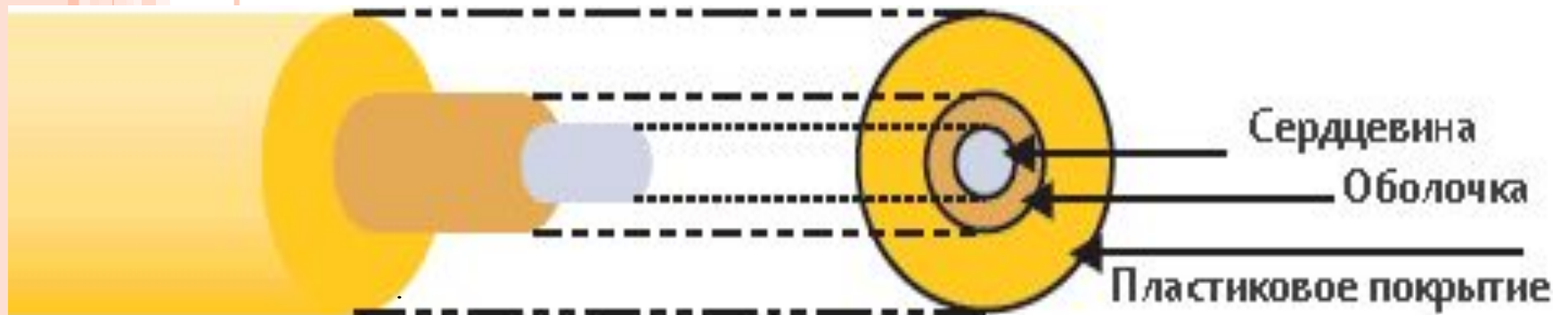
Фатхулин Т.Д., аспирант

# СОДЕРЖАНИЕ

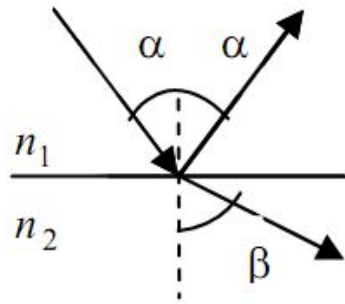
- **Физические свойства оптических волокон**
- **Типы оптических волокон**
- **Окна прозрачности**
- **Дисперсия и ее виды**
- **Решетка Брегга**
- **Оптические мультиплексоры/демультиплексоры**
- **Оптические усилители, длина и количество усилительных участков**
- **Источники оптического излучения**
- **Эффект Бриллюэна**
- **Коды в линии**
- **Модуляция**
- **Демодуляция**
- **Фотоприемники**



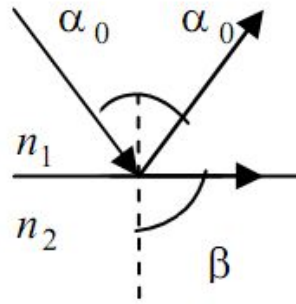
# СТРОЕНИЕ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА



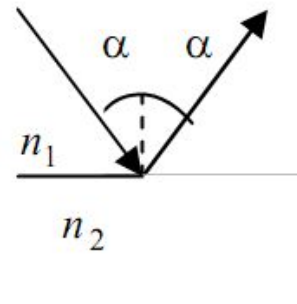
# Полное внутреннее отражение в оптическом волокне



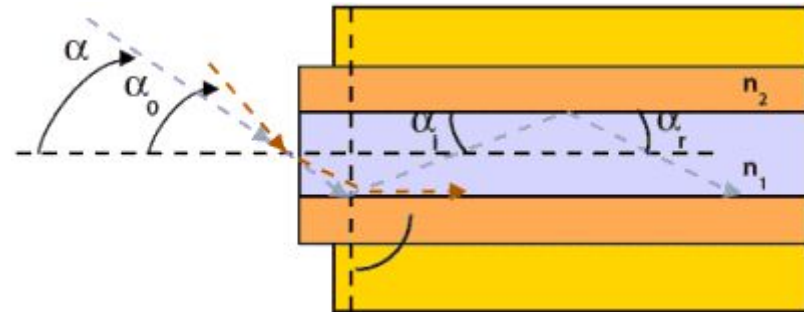
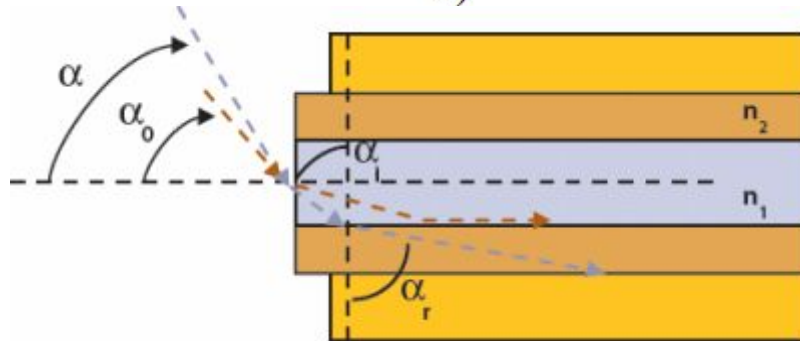
а)



б)

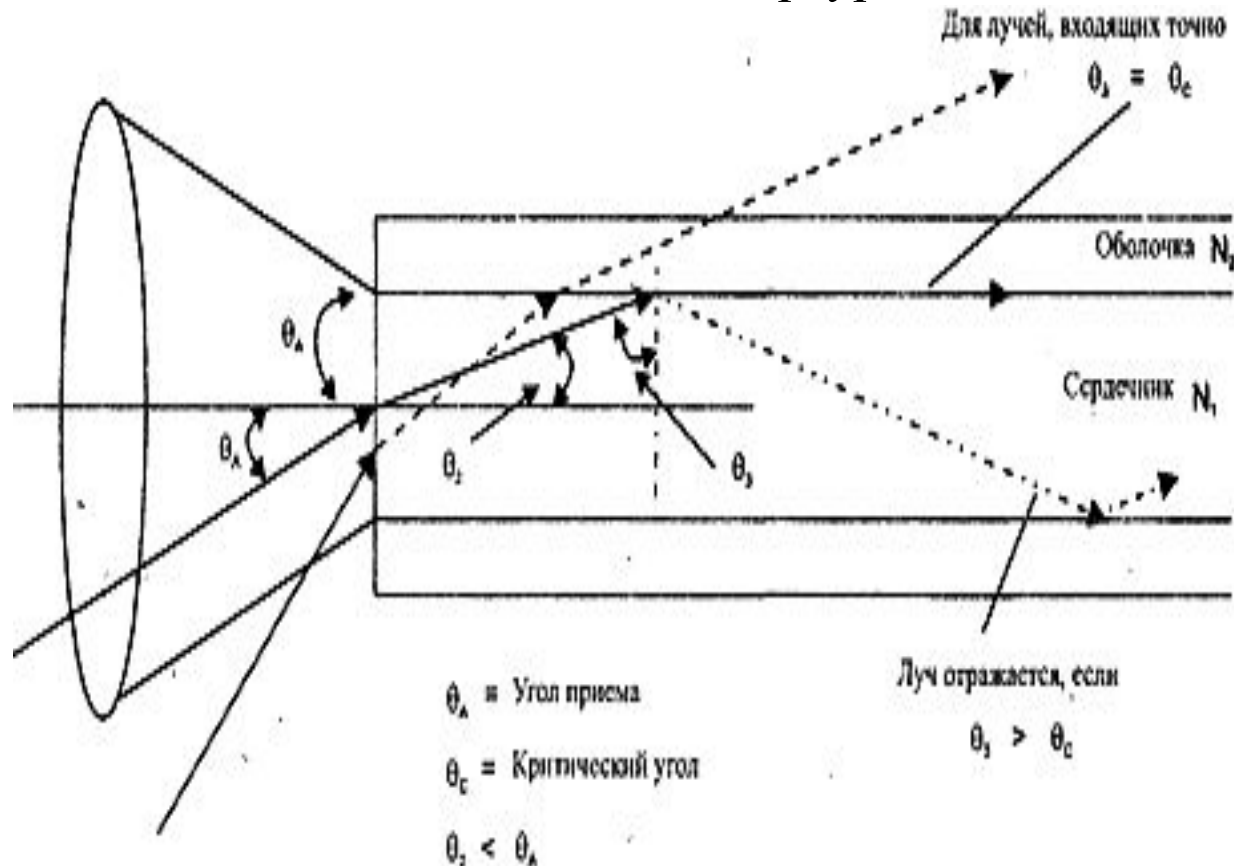


в)



Пусть абсолютный показатель преломления первой среды больше, чем абсолютный показатель преломления второй среды, то есть первая среда оптически более плотная. Тогда, если направить луч света из оптически более плотной среды в оптически менее плотную, то по мере увеличения угла падения, преломленный луч будет приближаться к границе раздела двух сред (рис. а.), затем пойдет по границе раздела (рис.б.), а при дальнейшем увеличении угла падения преломленный луч исчезнет, т.е. падающий луч будет полностью отражаться от границы раздела двух сред (рис.в.).

# Числовая апертура



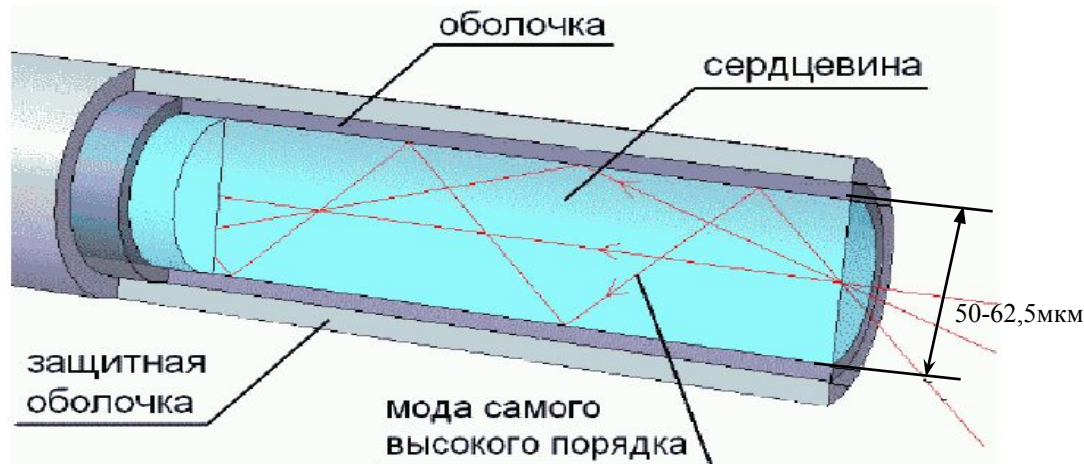
- Важным параметром, характеризующим волокно, является **числовая апертура NA**. Она связана с максимальным углом  $\theta_A$  вводимого в волокно излучения из свободного пространства ( $n_0$ ), при котором свет испытывает полное внутреннее отражение и распространяется по волокну.  $NA = n_0 \sin \theta_A$

- Фирмы – изготовители волокна, экспериментально измеряют угол  $\theta_A$  и указывают соответствующее значение числовой апертуры для каждого поставляемого типа волокна. Для волокна со ступенчатым профилем легко получить значение числовой апертуры, выраженное через показатели преломления.  $NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$

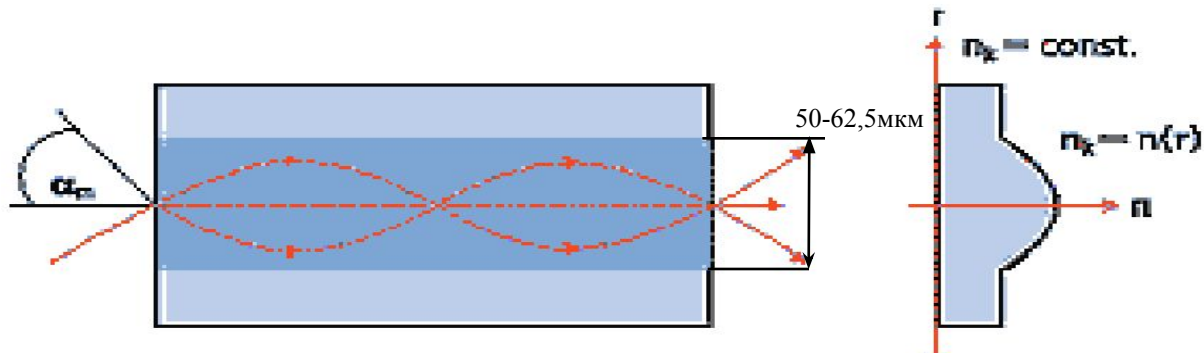
- Для градиентного волокна используется понятие локальной числовой апертуры, значение которой максимально на оси и падает до 0 на границе сердцевины и оболочки.

$$NA(r) = \sqrt{n_1^2(r) - n_2^2}$$

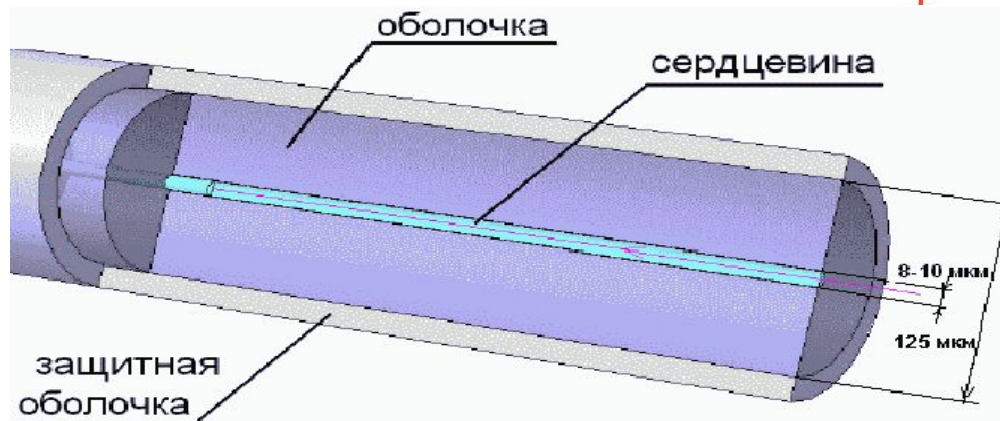
# ТИПЫ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН



Многомодовое  
ступенчатое  
оптическое волокно



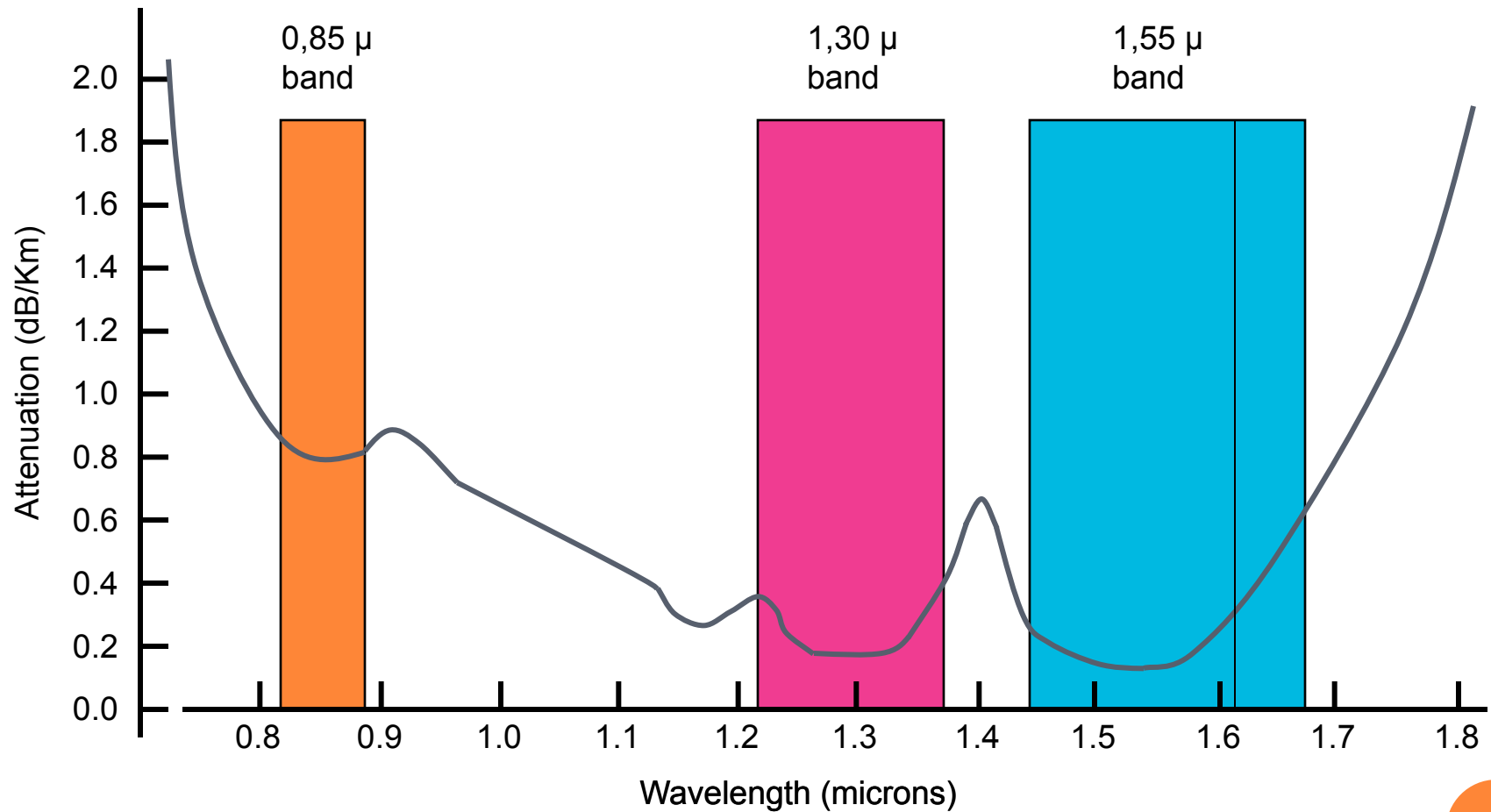
Многомодовое  
оптическое  
волокно с  
градиентным  
показателем  
преломления



Одномодовое  
оптическое  
волокно

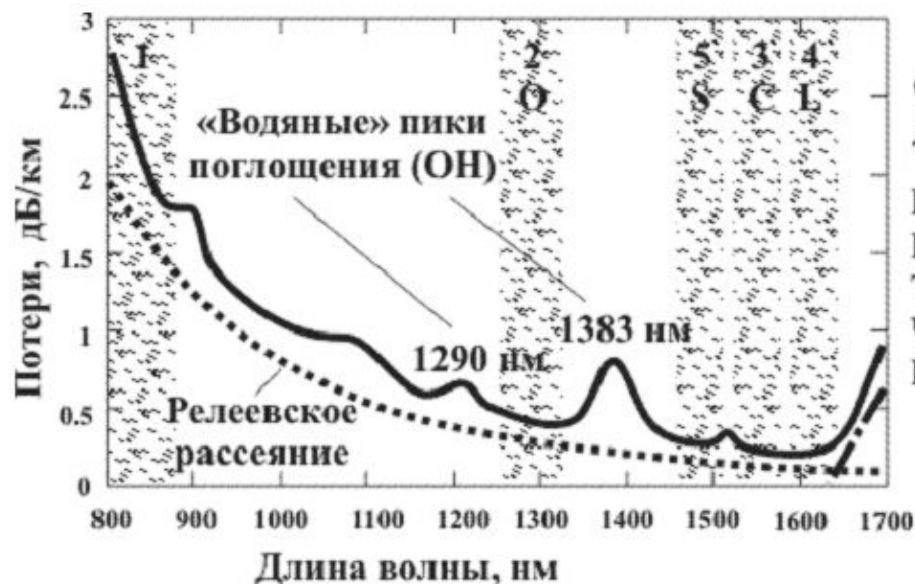


# ОКНА ПРОЗРАЧНОСТИ





# ОКНА ПРОЗРАЧНОСТИ



Окна прозрачности и диапазоны длин волн:

|                    |                |
|--------------------|----------------|
| Первое окно        | 780...860 нм   |
| Второе окно (O)    | 1260...1360 нм |
| Третье окно (C)    | 1530...1565 нм |
| Четвертое окно (L) | 1565...1625 нм |
| Пятое окно (S)     | 1460...1530 нм |

————— потери  
 ..... релеевское рассеяние  
 - - - - - инфракрасное поглощение

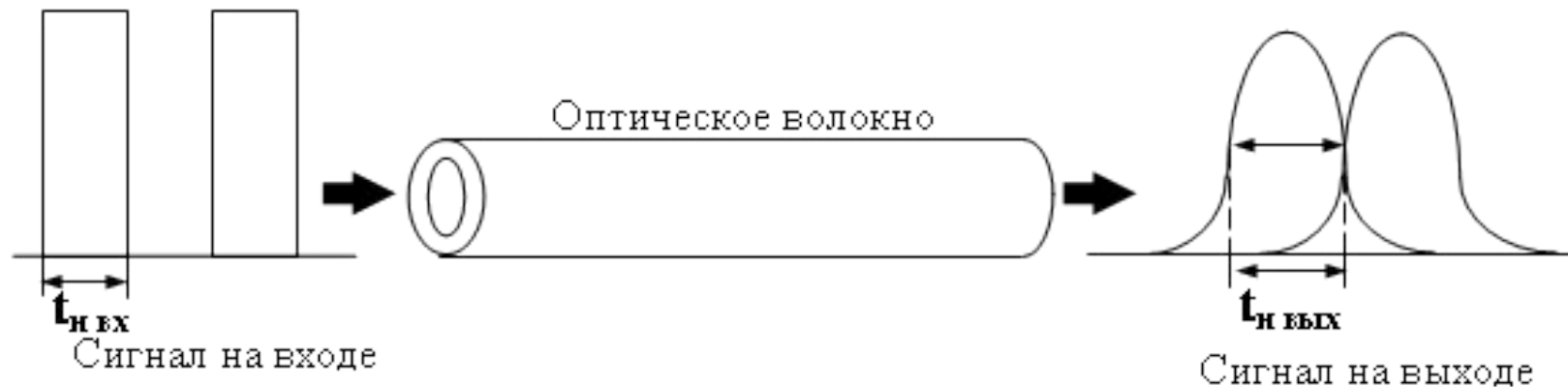
Таблица 1 Спектральные диапазоны окон прозрачности

|              |              |                                       |
|--------------|--------------|---------------------------------------|
| О – диапазон | 1260-1360 нм | Основной (Original)                   |
| Е – диапазон | 1360-1460 нм | Расширенный (Extended)                |
| S – диапазон | 1460-1530 нм | Коротковолновой (Short wavelength)    |
| C - диапазон | 1530-1565 нм | Стандартный (Conventional)            |
| L - диапазон | 1565-1625 нм | Длинноволновой (Long wavelength)      |
| U - диапазон | 1625-1675 нм | Сверхдлинный (Ultra-long wavelength ) |



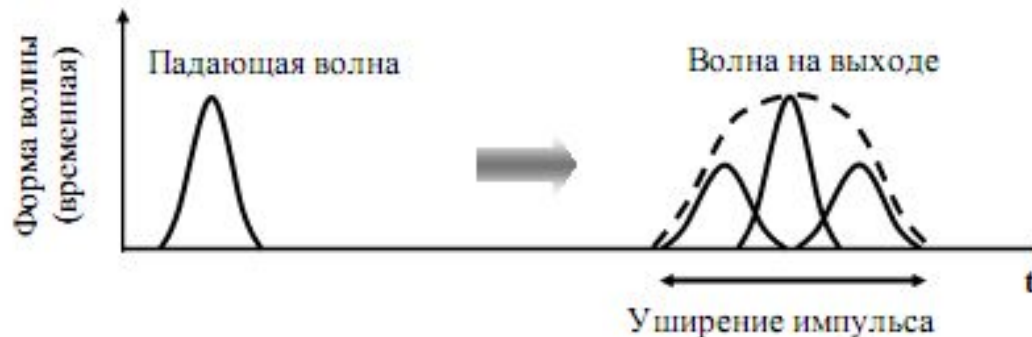
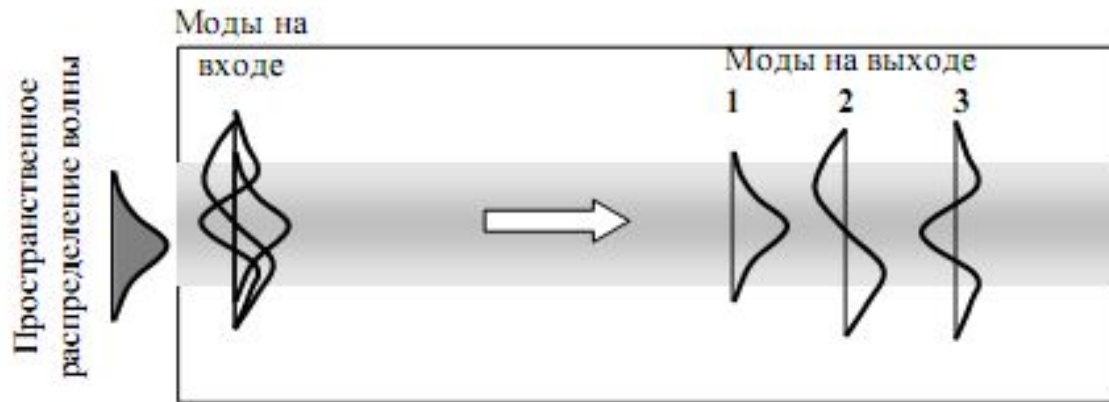
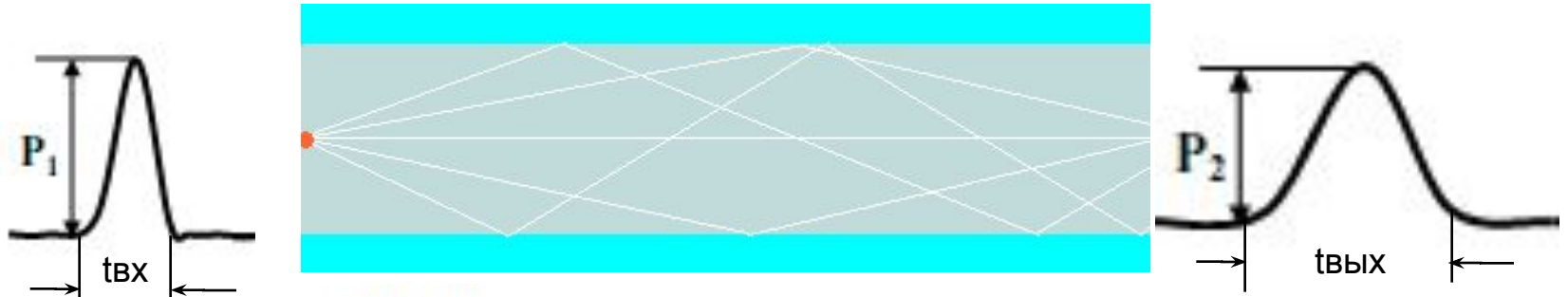
# ДИСПЕРСИЯ

Дисперсией оптического волокна называют рассеяние во времени спектральных или модовых составляющих оптического сигнала. Основная причина дисперсии – разные скорости распространения отдельных составляющих оптического сигнала. Дисперсия проявляется как уширение, увеличение длительности распространяющихся по волокну оптических импульсов.



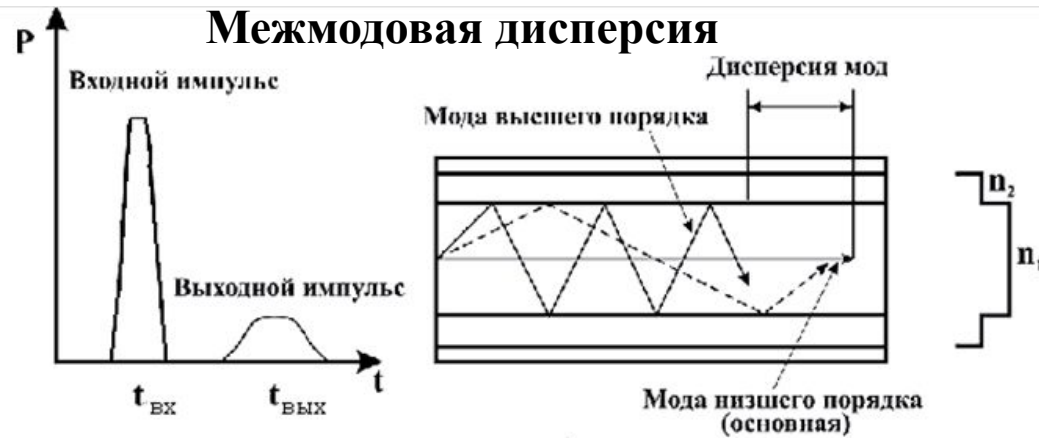
# ВИДЫ ДИСПЕРСИИ (1)

**Межмодовая дисперсия** характерна только для многомодовых оптических волокон. Она возникает в многомодовых световодах из-за наличия большого числа мод с различным временем распространения за счет различной длины пути, который отдельные моды проходят в сердцевине волокна

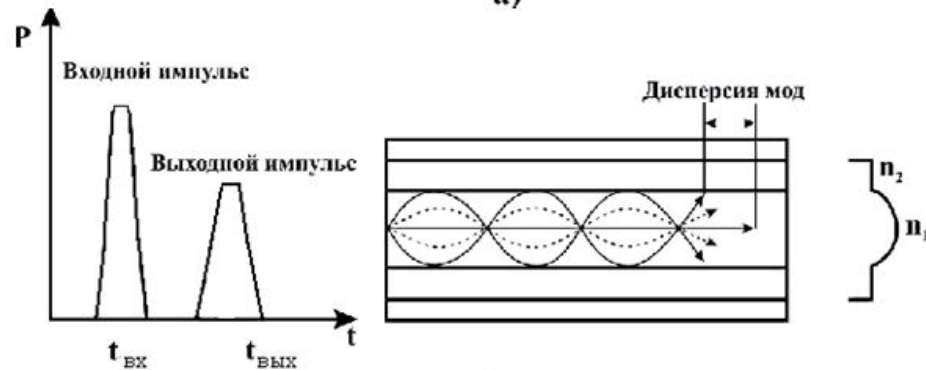


# ВИДЫ ДИСПЕРСИИ (2)

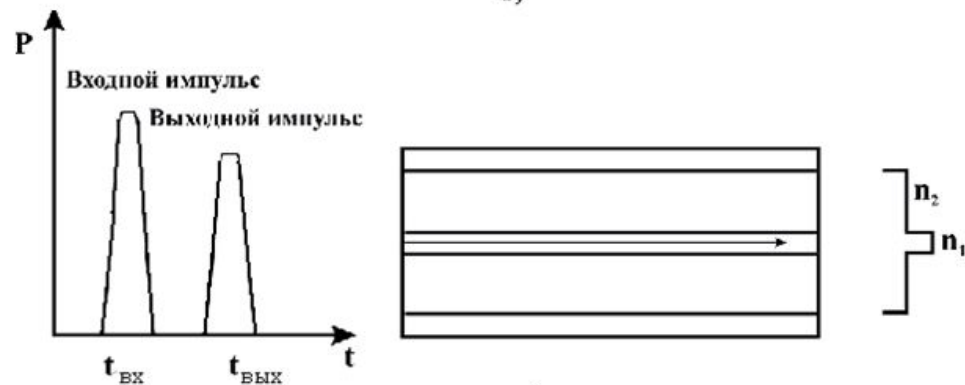
## Межмодовая дисперсия



а)



б)

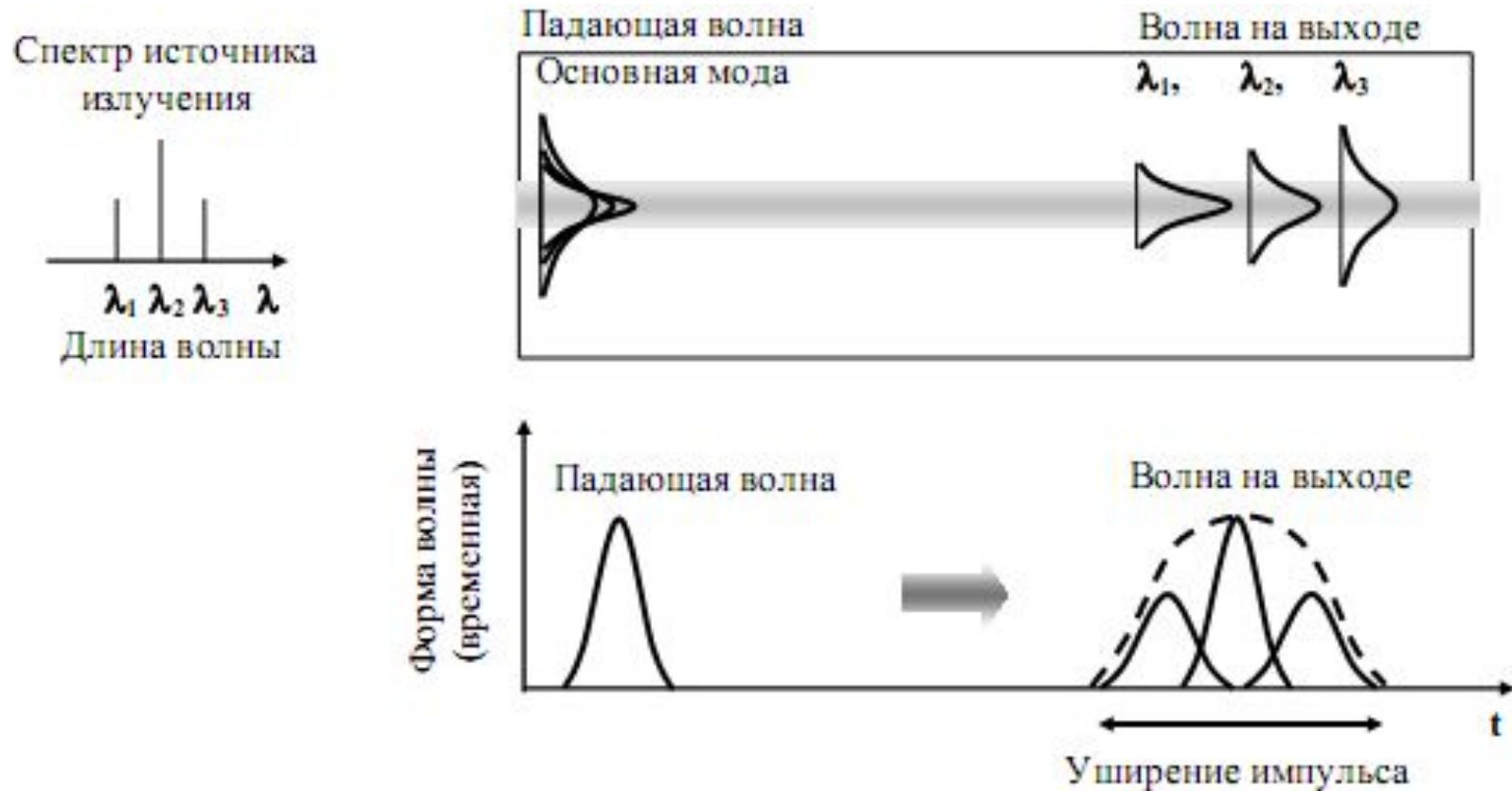


в)

а) – в ступенчатом многомодовом ОВ; б) – в градиентном многомодовом ОВ; в) – в ступенчатом одномодовом ОВ

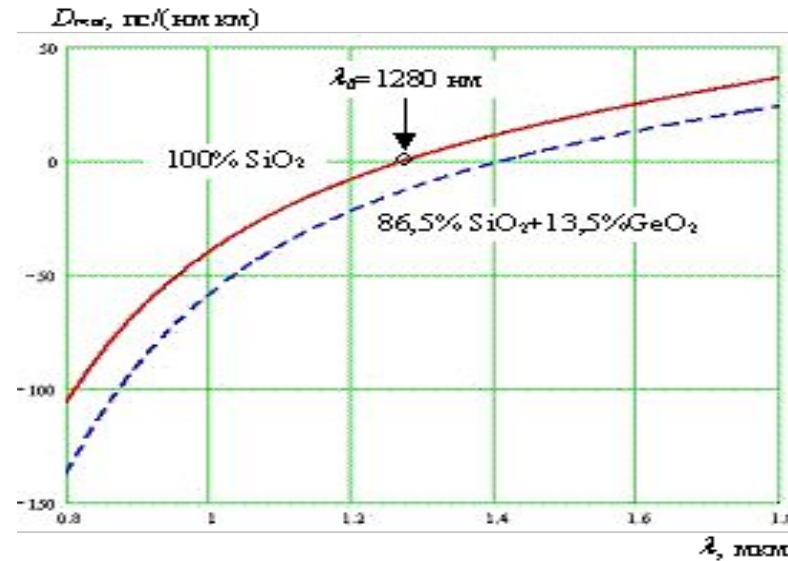
# ВИДЫ ДИСПЕРСИИ (3)

**Хроматическая дисперсия**  $D_{ch}$  обусловлена конечной шириной спектра излучения лазера и различием скоростей распространения отдельных спектральных составляющих оптического сигнала. Хроматическая дисперсия складывается из *материальной* и *волноводной* дисперсии, и проявляется как в одномодовых, так и многомодовых оптических волокнах:



# ВИДЫ ДИСПЕРСИИ (4)

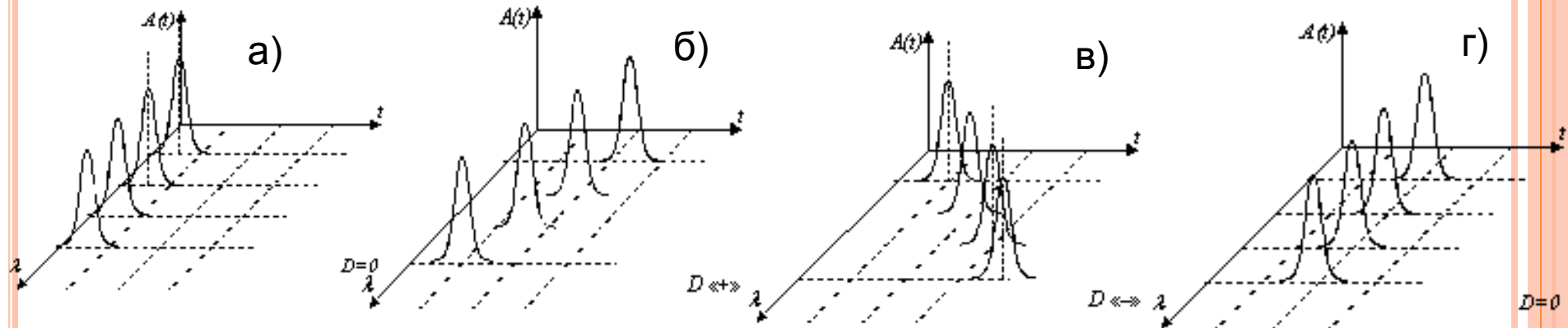
**Материальная** дисперсия  $D_{mat}$  определяется дисперсионными характеристиками материалов, из которых изготовлена сердцевина оптического волокна – кварца и легирующих добавок.



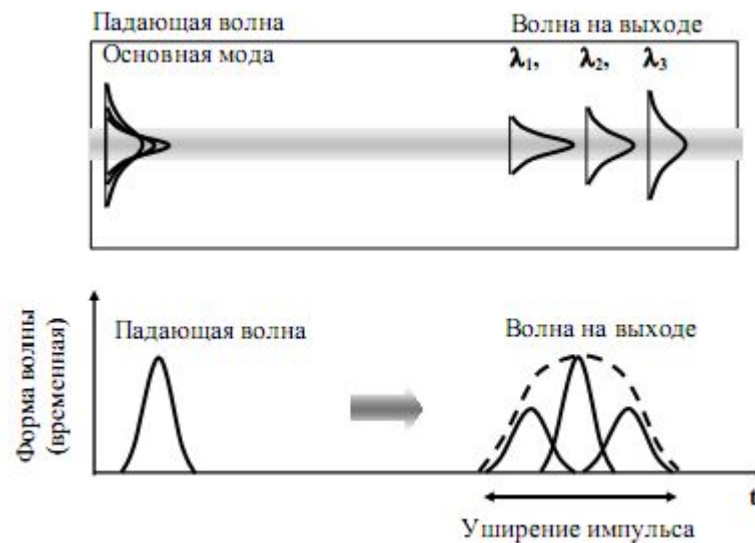
Спектральная зависимость  
коэффициента  
материальной дисперсии чистого  
кварца (сплошная кривая) и кварца,  
легированного 13,5% германия  
(штриховая кривая).



# ВИДЫ ДИСПЕРСИИ (5)



(а) импульс на входе; (б) нормальная дисперсия; (в) аномальная дисперсия; (г) область нулевой дисперсии



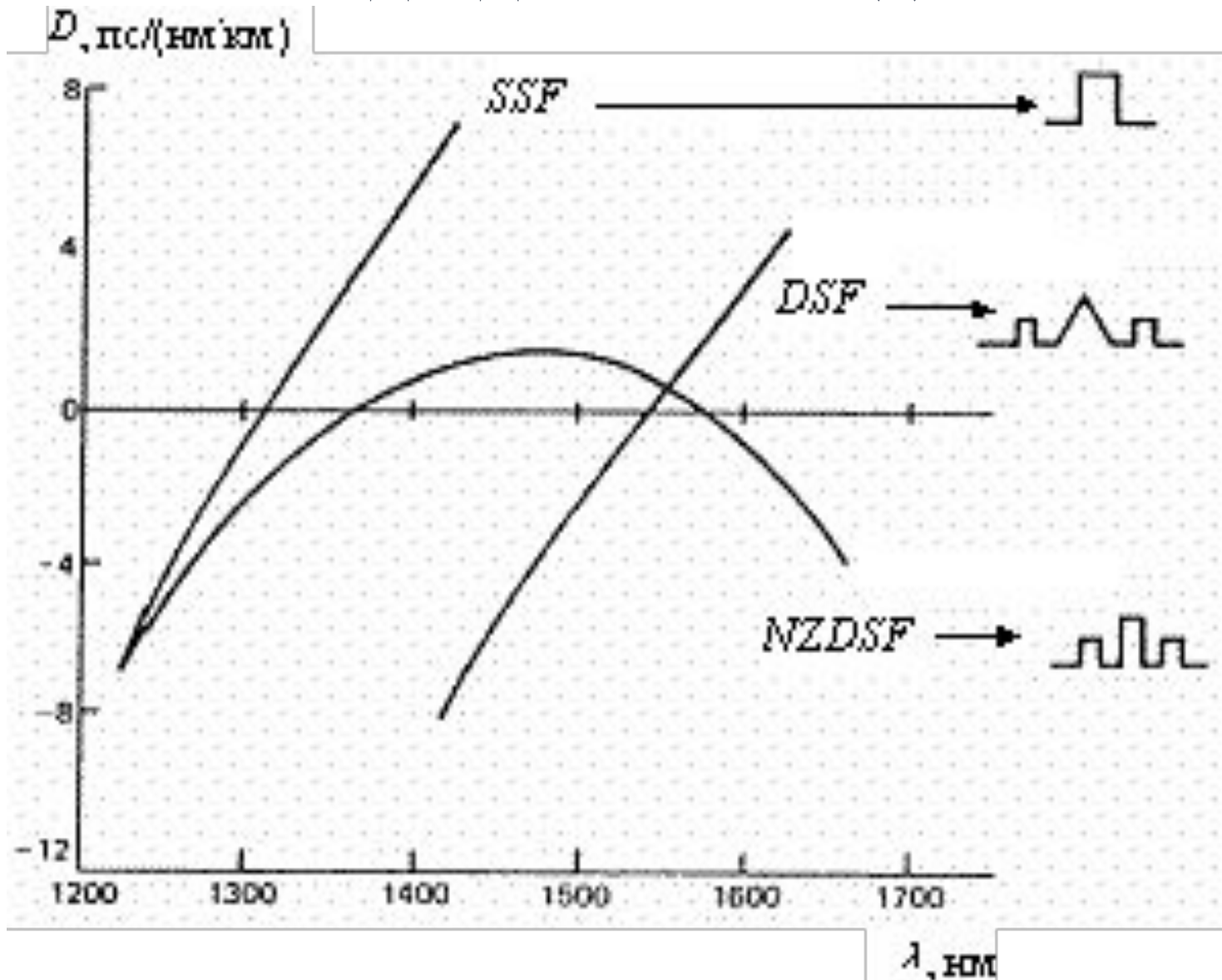
# ВИДЫ ДИСПЕРСИИ (6)

**Волноводная дисперсия**  $D_w$  обусловлена зависимостью групповой скорости распространения моды от длины волны, характер которой определяется формой профиля показателя преломления оптического волокна. Волноводная дисперсия возникает из-за того, что усредненный по диаметру моды показатель преломления изменяется при изменении длины волны.



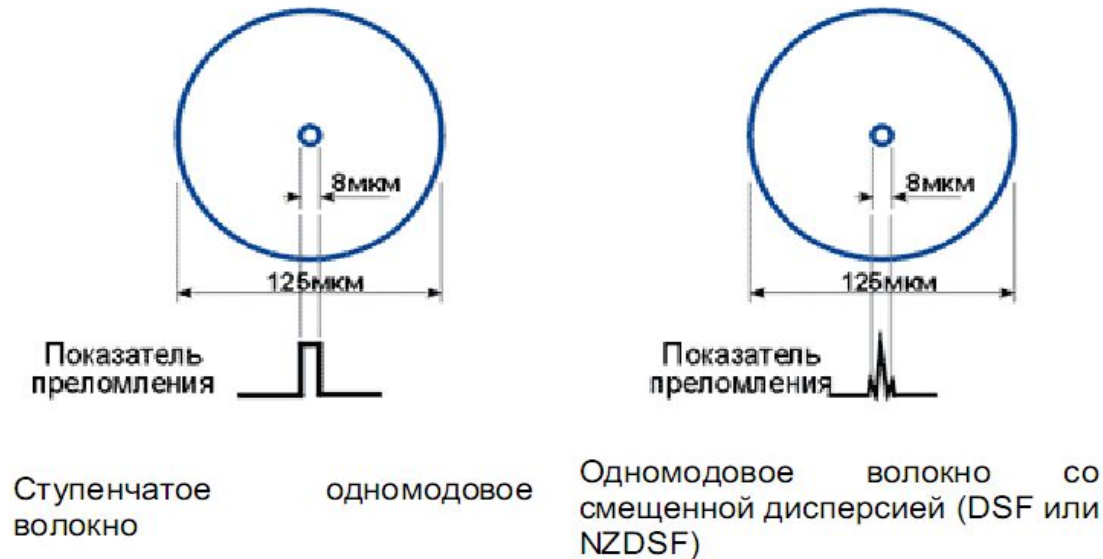


# ВИДЫ ДИСПЕРСИИ (7)



В волокнах  $SSF$  преобладает положительная материальная дисперсия (минимум хроматической дисперсии в области длины волны 1300 нм). Профили показателя преломления волокон  $DSF$  и  $NZDSF$  сформированы таким образом, чтобы компенсировать материальную дисперсию отрицательной волноводной.

# ВИДЫ ДИСПЕРСИИ (8)

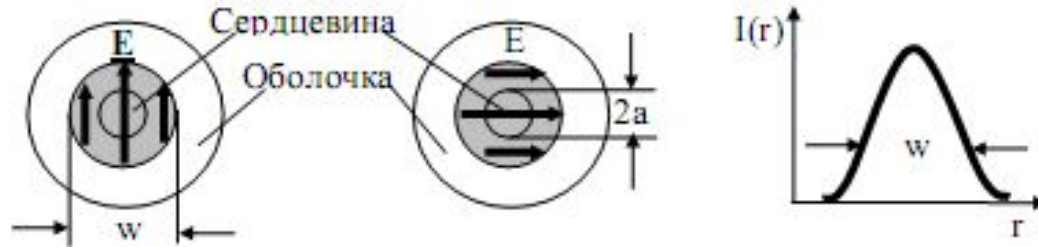


Одномодовые волокна подразделяются на ступенчатые одномодовые волокна (step index single mode fiber) или стандартные волокна **SF** (standard fiber), на волокна со смещенной дисперсией **DSF** (dispersion-shifted single mode fiber), и на волокна с ненулевой смещенной дисперсией **NZDSF** (non-zero dispersion-shifted single mode fiber). В **SF** распространение только одной моды устраняет межмодовую дисперсию и обеспечивает очень высокую пропускную способность. Наилучший режим распространения с точки зрения дисперсии достигается в окрестности длины волны 1310 нм, когда хроматическая дисперсия обращается в ноль. В этом окне потери составляют 0,3-0,4 дБ/км, в то время как наименьшее затухание 0,2 дБ/км достигается в окне 1550 нм. В **DSF** длина волны нулевой дисперсии смещена в окно 1550 нм. Такое смещение достигается благодаря специальному профилю показателя преломления волокна. Таким образом, в волокне со смещенной дисперсией реализуются наилучшие характеристики как по минимуму дисперсии, так и по минимуму потерь. Поэтому такое волокно лучше подходит для строительства протяженных сегментов с расстоянием между ретрансляторами до 200 км и более. **NZDSF** оптимизировано для передачи сразу нескольких длин волн. Это волокно в пределах рабочего диапазона ВОСП-СП имеет небольшую, хорошо контролируемую хроматическую дисперсию от 3 пс/нм·км на длине волны 1530 нм до 7 пс/нм·км на длине волны 1560 нм.

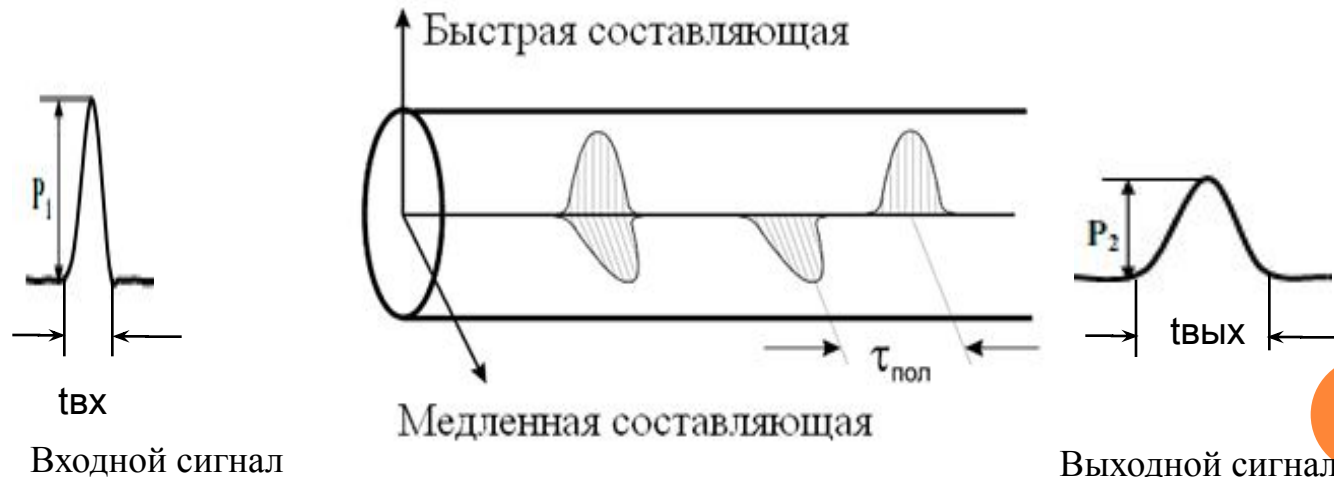
# ВИДЫ ДИСПЕРСИИ (9)

## Поляризационная модовая дисперсия

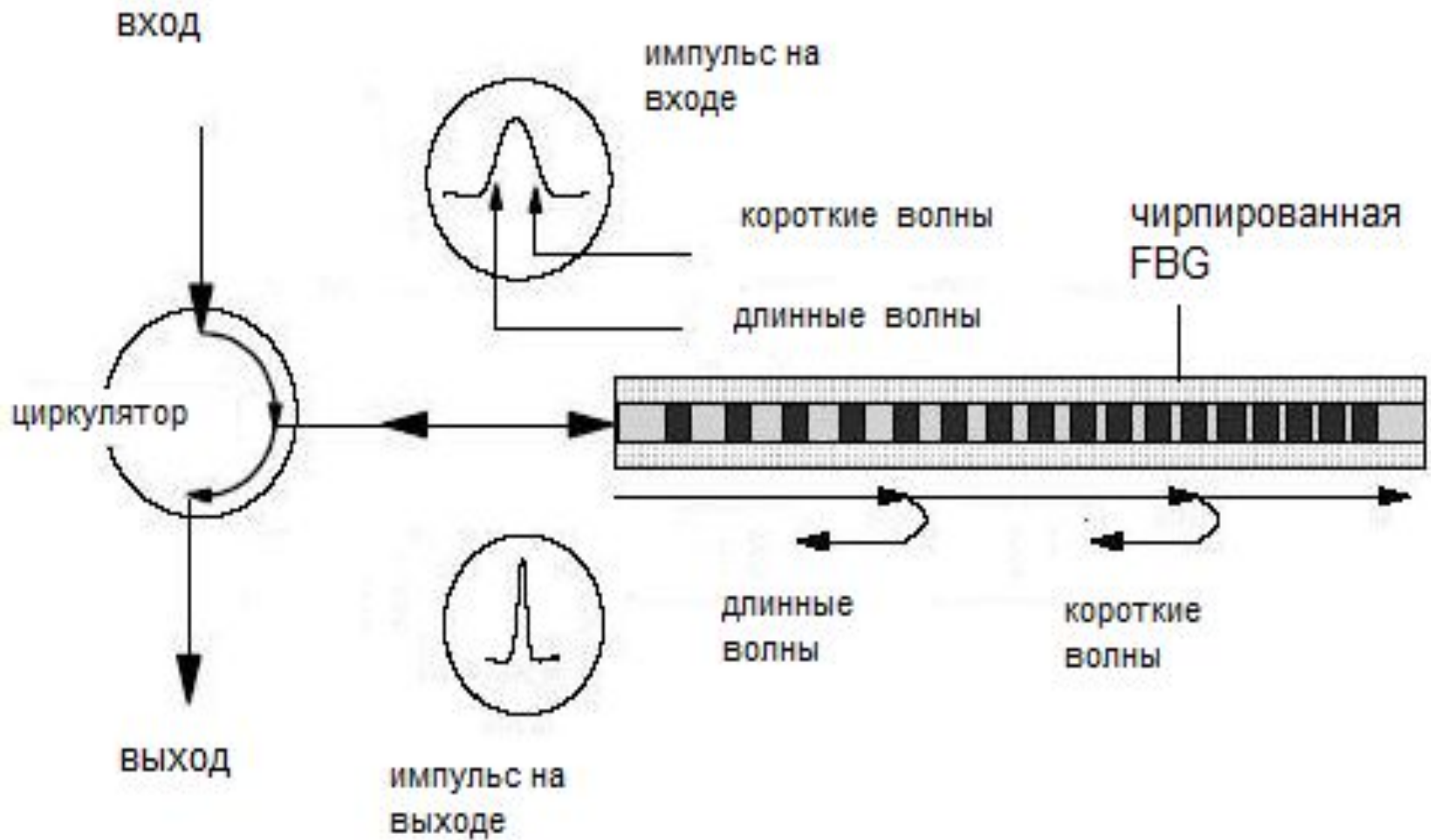
Главная физическая причина появления – некруглость профиля сердцевины одномодового волокна. Электрическое поле световой волны всегда можно представить в виде суперпозиции двух ортогональных векторов или состояний поляризации. В волокне с анизотропным профилем появляется два различных эффективных показателя преломления для, соответствующих двум определенным перпендикулярным линейным поляризациям. Это приводит к разным групповым скоростям распространения сигналов или мод с такими поляризациями и появлению задержки приходящих сигналов на приемной стороне.



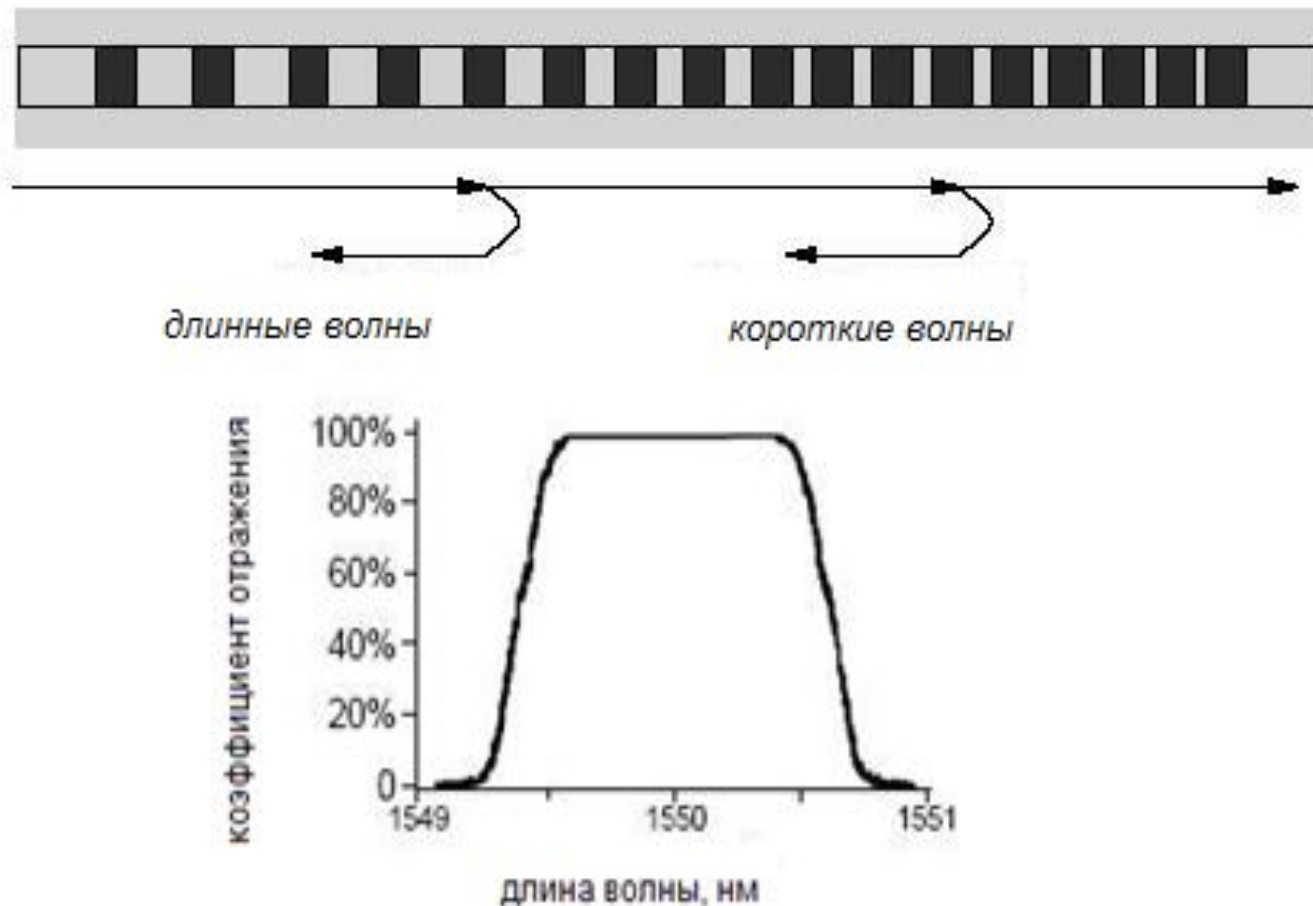
Распределение интенсивности и направление электрического поля  $E$  в поляризационных модах волокна.  $w$  – диаметр моды,  $2a$  – диаметр сердцевины



# КОМПЕНСАТОР ДИСПЕРСИИ

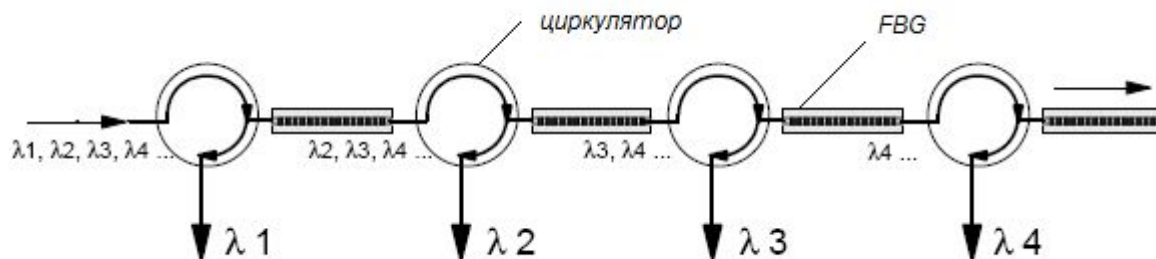


# РЕШЕТКА БРЕГГА



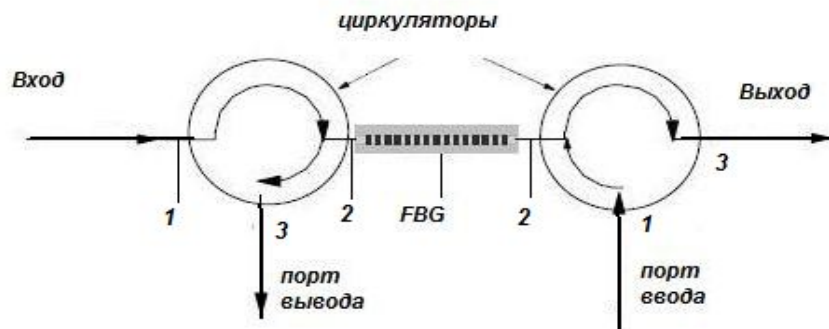
**Волоконная решетка Брэгга** (FBG – Fibre Bragg Grating) представляет собой отрезок оптического волокна с периодически изменяющимся вдоль длины волокна показателем преломления. В зависимости от периода решетки (расстояния  $d$ ) будет наблюдаться отражение одной или нескольких длин волн. Отраженный сигнал выходит также с левой стороны, тогда как остальная группа длин волн сигнала выйдет с правой стороны. На рисунке приведена брэгговская решетка с изменяющимся периодом  $d$  (так называемая FBG с чирпом).

# ОПТИЧЕСКИЕ МУЛЬТИПЛЕКСОРЫ/ДЕМУЛЬТИПЛЕКСОРЫ



## Оптический демультиплексор

В оптическом демультиплексоре используется каскадное включение пар (циркулятор плюс FBG) и осуществляется последовательное разделение каналов по длинам волн. В первом слева каскаде происходит выделение канала с рабочей длиной волны  $\lambda_1$ . Для этого каскада решетка выполняется с периодом  $d = \lambda_1$ . Решетка следующего каскада имеет период  $d = \lambda_2$  и т.д.



## Оптический мультиплексор ввода/вывода

Приведенный оптический мультиплексор ввода/вывода состоит из двух 3-х портовых (порты обозначены цифрами) циркуляторов, соединенных волоконной решеткой Брэгга. Решетка спроектирована так, что условие Брэгга выполняется для несущей волны канала, который необходимо выделить в пункте ввода/вывода.

# ОПТИЧЕСКИЕ УСИЛИТЕЛИ (1)

Оптические усилители (ОУ) делятся на два класса: полупроводниковые (ПОУ) и волоконно-оптические (ВОУ). В настоящее время в основном применяются вторые. ОУ обеспечивают усиление оптических сигналов без преобразования в электрическую форму. В ВОСП используются два типа ВОУ:

- Волоконно-оптические усилители на основе активных волокон.
- Волоконно-оптические усилители на основе эффекта вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР).

Эффект ВКР относится к классу нелинейных и его часто называют стимулированным рамановским рассеянием (SRS). Отсюда и название - «рамановский усилитель». Отметим, что наиболее значимыми для оптических систем передачи являются усилители первого типа, позволяющие получить наибольшее усиление.

Optical transmitter

- produces and encodes the light signal

Optical amplifier

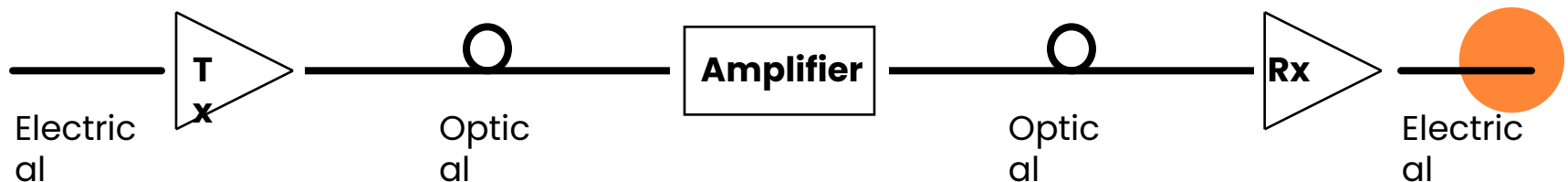
- may be necessary to boost the light signal (for long distances)

Optical receiver

- receives and decodes the light signal

Optical fiber

- conducts the light signals over a distance



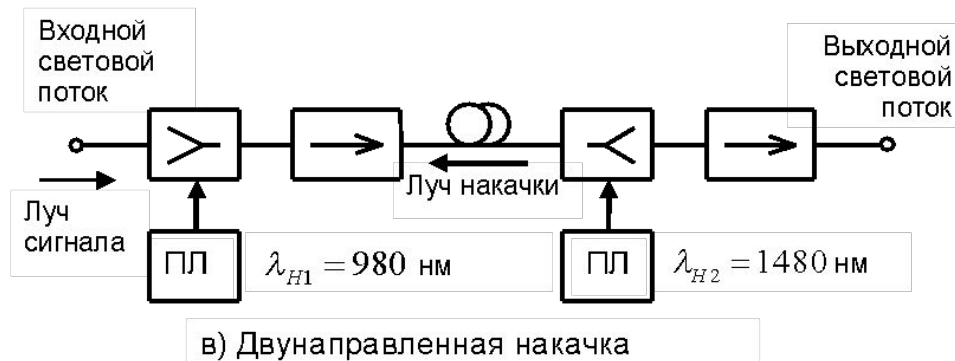
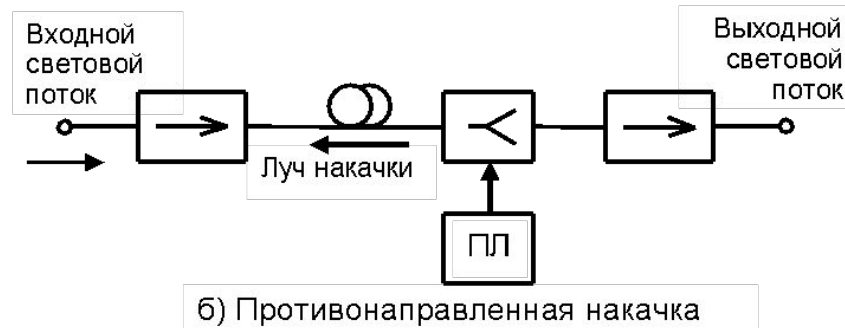
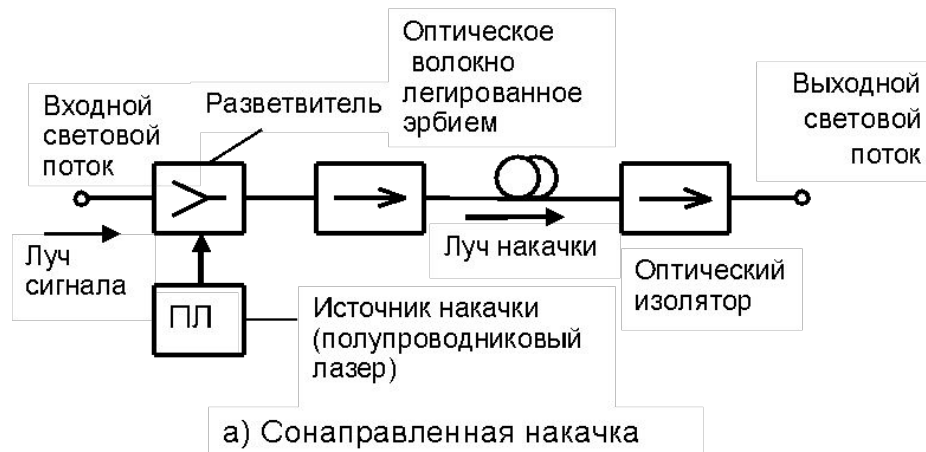


# ОПТИЧЕСКИЕ УСИЛИТЕЛИ (2)

**Волоконно-оптические усилители на основе активных волокон.** Кратко рассмотрим принципы работы. Если в чистый кварц добавить дополнительно атомы или молекулы какого-либо вещества, то среда из нейтральной может превратиться в поглощающую. Чаще всего поглощение происходит на той частоте (или длине волны), которая совпадает с частотой резонанса энергетического уровня атомов добавленного вещества, при этом электроны с основного (устойчивого) энергетического уровня переводятся на более высокий энергетический уровень. При некоторой пороговой величине оптической мощности возбуждающего излучения (накачки) количество электронов на верхнем энергетическом уровне становится больше, чем на основном уровне. Такая среда становится обратной по отношению к первоначальному устойчивому состоянию и называется инверсной средой. Если в инверсную среду, полученную путем накачки, ввести когерентное излучение (сигнал), то каждый фотон этого сигнала будет стимулировать переход электрона на основной уровень, сопровождающийся излучением фотона с такой же частотой, поляризацией и направлением распространения, что и исходный. Распространяясь дальше и встречаясь со следующим возбужденным атомом, два этих фотона (исходный и рожденный), порождают каждый также по одному фотону и т.д. Таким образом, происходит усиление оптического излучения. Подбирая определенные вещества в качестве химических добавок в кварц, можно создавать инверсную среду для заданного диапазона длин волн. В частности, для третьего окна прозрачности кварцевого волокна наиболее подходит редкоземельный элемент эрбий. В таких усилителях рабочей средой усиления является сердцевина кварцевого одномодового волокна, легированная ионами эрбия ( $\text{Er}^{3+}$ ), поэтому они часто называются эрбиевыми BOY (ЭБОУ) или EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier). ЭБОУ(EDFA) в окне прозрачности 1550 нм обеспечивает полосу усиления порядка 40 нм. Данную полосу можно расширить, если использовать оптические усилители на фтористом волокне, легированном тулием (TDFFA) или празеодимом (PDFFA). Например, используя усилитель типа TDFFA можно получить полосу усилителя от 1470 до 1650 нм. Существуют три основных конфигураций накачки ЭБОУ: сонаправленная, противонаправленная (встречная) и двунаправленная.

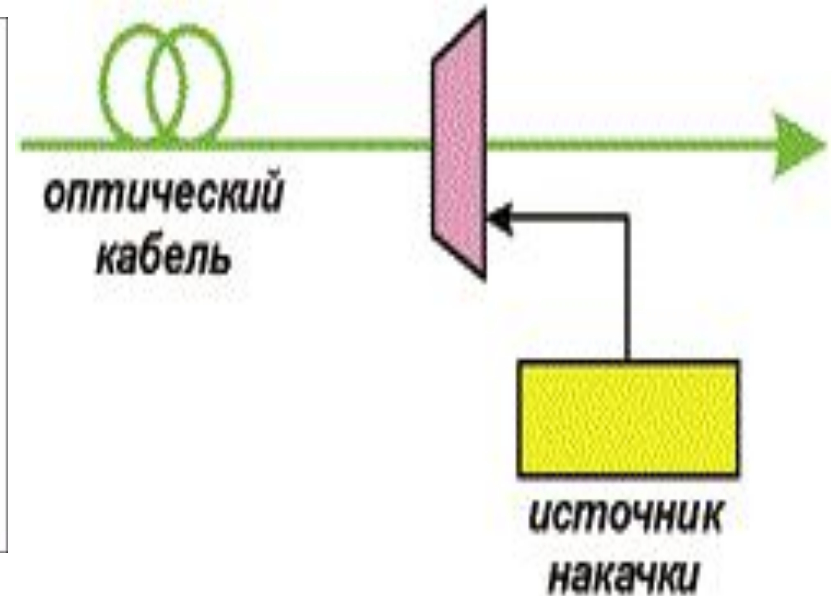
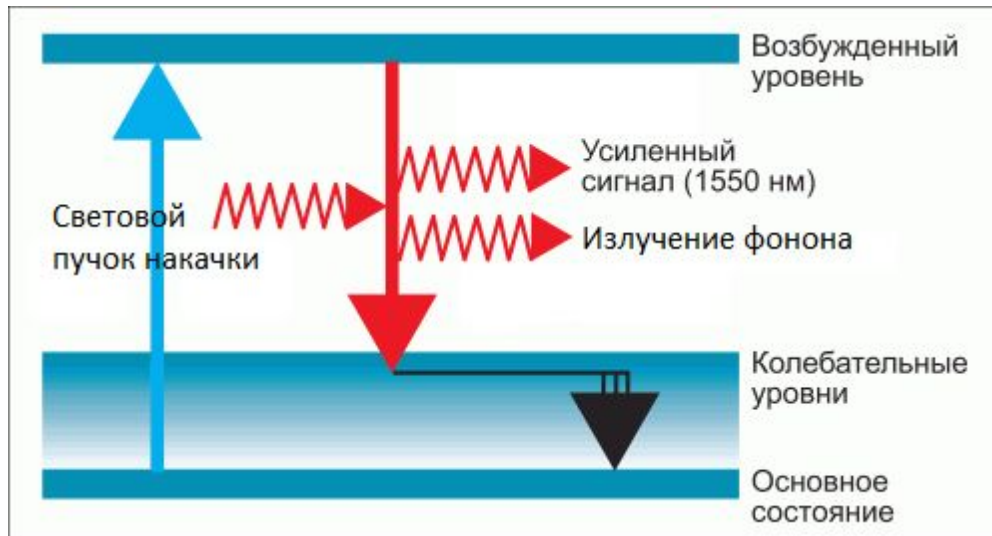


# ОПТИЧЕСКИЕ УСИЛИТЕЛИ (3)



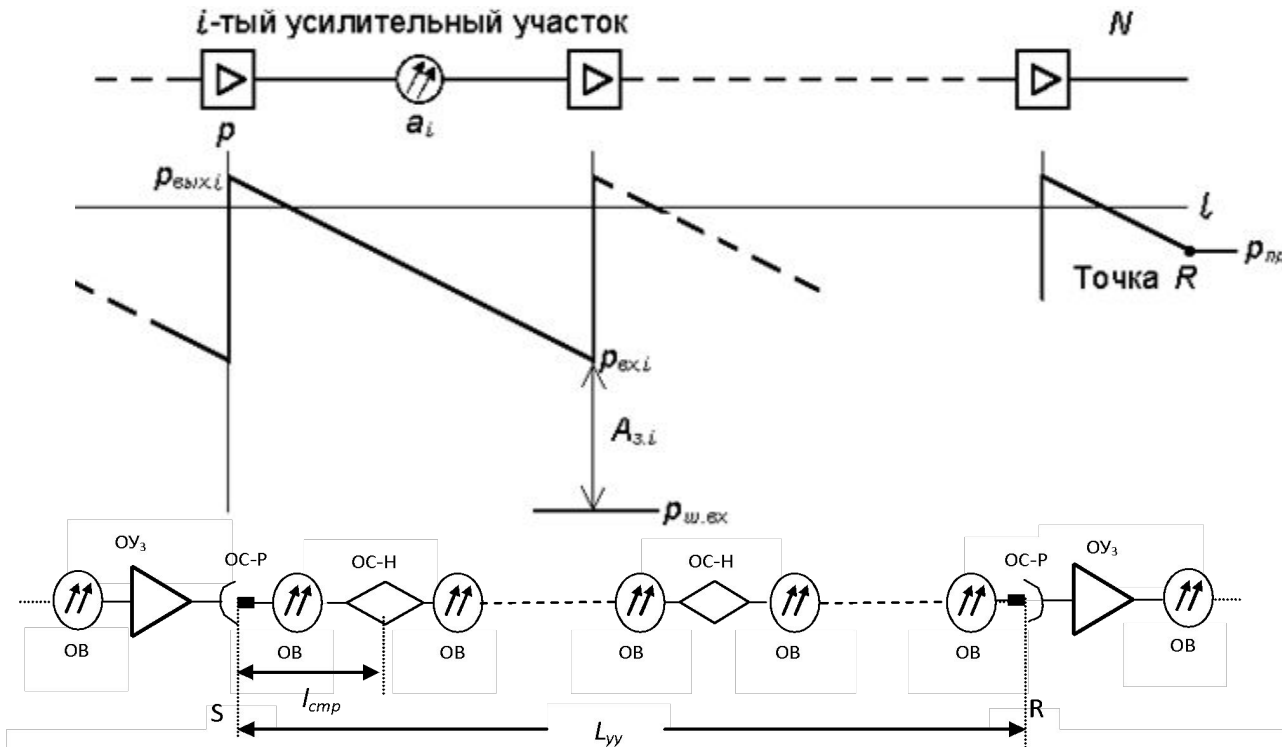
# ОПТИЧЕСКИЕ УСИЛИТЕЛИ (4)

**Волоконно-оптические усилители на основе эффекта ВКР (рамановские усилители).** Рáмановское усиление возникает, когда фотоны накачки высокой энергии (коротких длин волн) рассеивают колебательные моды матричной решётки материала (оптические фононы) и когерентно добавляют их к сигнальным фотонам низкой энергии (больших длин волн). Излучение накачки вводится непосредственно в рабочее волокно в направлении, противоположном направлению распространения сигнала, т.е. используется противонаправленная накачка. Использование рабочего волокна в качестве среды усиления является несомненным достоинством. При этом рамановский усилитель работает как малошумящий предусилитель, что также весьма положительно. Применение рамановских усилителей совместно с ЭВОУ позволяет повысить оптическое отношение сигнал-шум и удлинить усилительный участок. Известно также совместное использование рамановских усилителей с ЭВОУ для расширения результирующей полосы усиления.



# УЧАСТКОВ (1)

Определение количества усилительных участков производится по критерию перекрываемого затухания  $A_{yy}$ , которое численно равно усилению линейного усилителя – ОУ<sub>3</sub>. Расчетная схема для нахождения длины усилительного участка  $L_{yy}$  показана на рис. 1 и рис. 2. Здесь ОС-Р – оптическое соединение разъемное, ОС-Н – оптическое соединение неразъемное. Рекомендации МСЭ-Т определяют точку S, как точку ОВ сразу за оптическим разъемом ОС-Р, а точку R, как точку ОВ перед оптическим разъемом ОС-Р.



Согласно этой схеме затухание усилительного участка

$$A_{yy} = \alpha \cdot L_{yy} + A_n \cdot (L_{yy} / l_{стр}),$$

где:  $A_n$  – затухание неразъемного соединения – ОС-Н, дБ;  $l_{стр}$  – строительная длина оптического кабеля, км;  $\alpha$  – коэффициент затухания ОК, дБ/км.

## УЧАСТКОВ (2)

Длина усилительного участка  $L_{yy} = \frac{A_{yy}}{\alpha + A_H / l_{cmp}}$

Для уменьшения числа оптических усилителей целесообразно использовать усилительные участки максимальной длины  $L_{yy \text{ макс}}$ , когда перекрываемое затухания максимально, т.е.  $A_{yy} = A_{yy \text{ макс}}$ .

Защищённость в точке с уровнем приема  $p_R$   $A_{zR} = p_R - p_{и\Sigma} = A_z - 10\lg N$

Результирующая защищенность по сравнению с защищенностью на одном участке снижается на величину  $\Delta A_z = 10\lg N$ . При этом она не зависит от уровня  $p_R$ . Число усилительных участков  $N$  может быть только целым. Поэтому их максимальное число  $N_{\text{макс}} = [\text{dec}(0,1(A_z - A_{zR}))]$ , где квадратные скобки означают округление до ближайшего целого числа в сторону уменьшения.

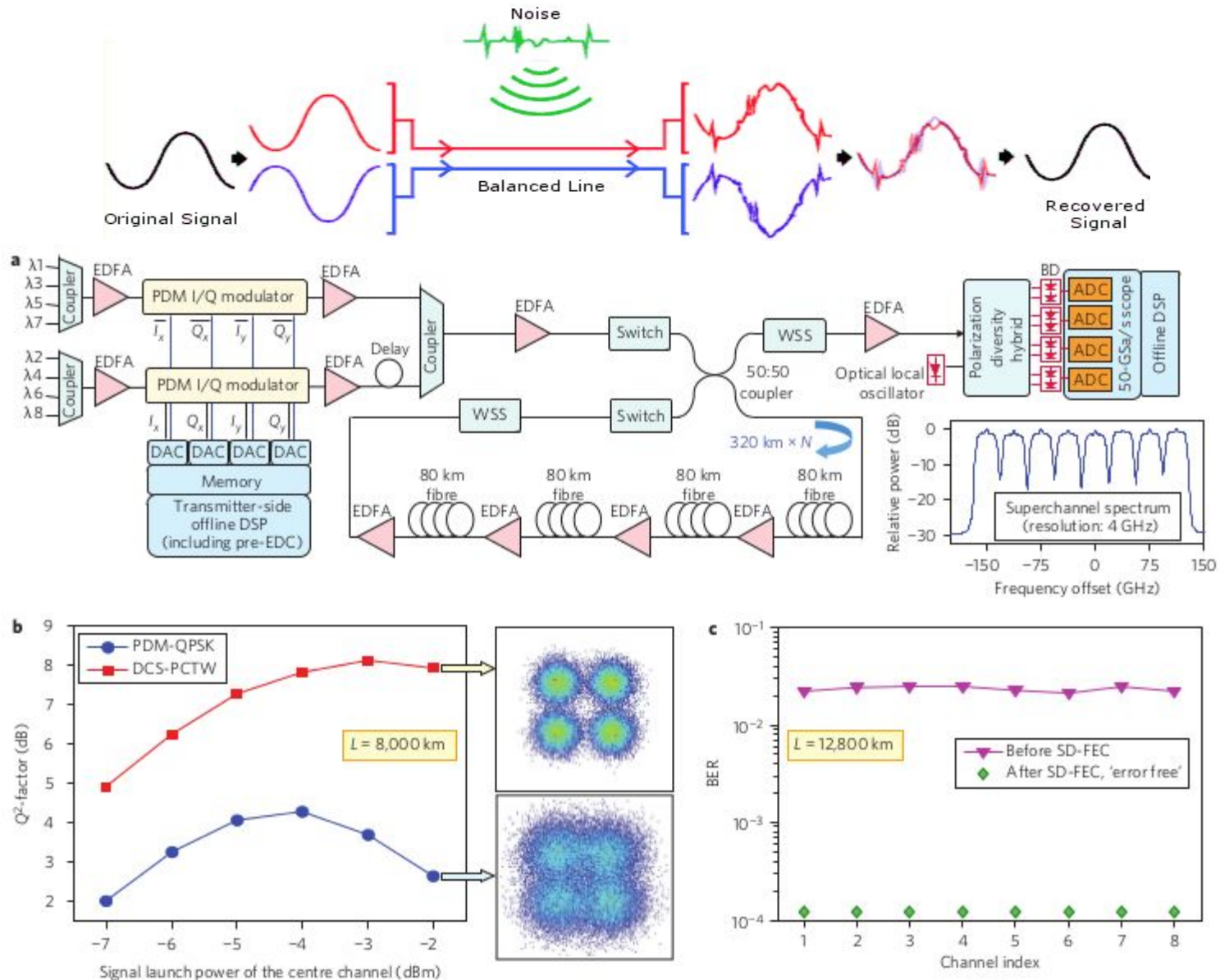
Так как  $A_z = p_{\text{пер}} - A_{yy} - p_{и\text{вх}}$ , то  $N_{\text{макс}} = \left[ \text{dec}\left(0,1(A_{\text{пер}} - A_{yy} - p_{и\text{вх}} - A_{zR})\right) \right]$  (3)

Отсюда можно найти  $N_{\text{макс}}$  и определить предельную протяженность регенерационной секции

$$L_{\text{рс пред}} = N_{\text{макс}} \cdot L_{\text{уу макс}}$$



# УЧАСТКОВ (3)

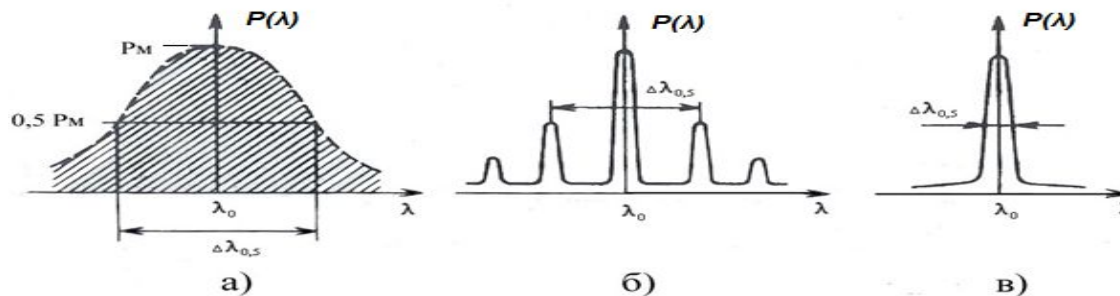


**a.** Схема экспериментальной установки. **b.** Сравнение качества сигнала с использованием новой схемы шумоподавления и без неё. **c.** Количество ошибок в сигнале, прошедшем 12800 км до и после коррекции ошибок

# ИСТОЧНИКИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В качестве источников оптического излучения в ВОСП применяют полупроводниковые лазерные диоды (ЛД) и светоизлучающие диоды (СИД),

Излучение светодиодов возникает в результате спонтанной излучательной рекомбинации носителей заряда и поэтому является некогерентным, а, следовательно, относительно широкополосным и слабонаправленным. Принципиальным отличием лазерного диода от светодиода является наличие в нем встроенного оптического резонатора. Это позволяет при условии превышения током инжекции некоторого порогового значения получить режим индуцированного излучения, которое характеризуется высокой степенью когерентности. Наиболее часто в качестве оптического резонатора в полупроводниковых лазерных диодах используют: плоский резонатор Фабри–Перо и его модификации, включая составные и внешние резонаторы, резонаторы с распределенной обратной связью (РОС-резонатор) и с распределенным брэгговским отражателем (РБО-резонатор).

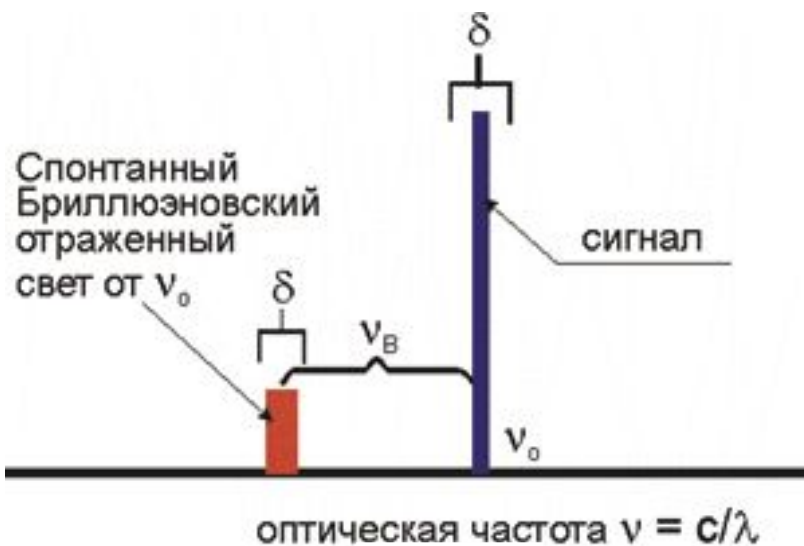
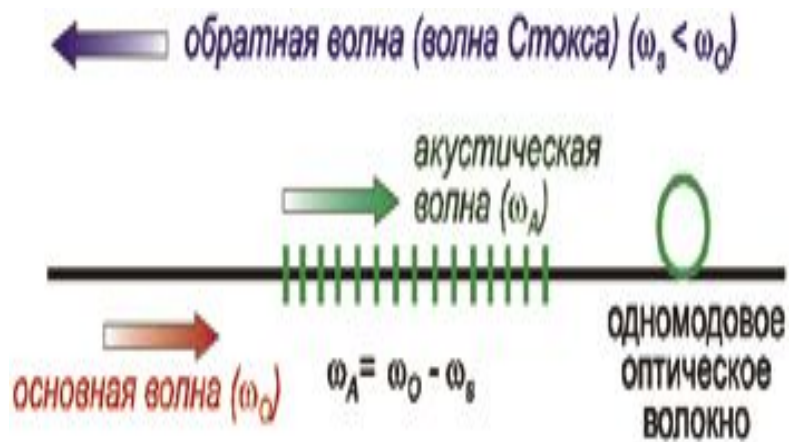


Спектральное распределение мощности: а — светодиода; б — многомодового лазерного диода; в — одномодового лазерного диода





# ЭФФЕКТ БРИЛЛЮЭНА





# КОДЫ В ЛИНИИ (1)

Под кодом в линии понимают вид цифрового кода (сигнала), используемого для передачи информации по линейному тракту. Код в линии выбирается с учетом среды распространения цифрового сигнала и вытекающей из этого специфики построения линейного тракта. В любом случае он должен обеспечивать возможность однозначного восстановления последовательности символов исходного цифрового сигнала, поступающего на вход оконечной аппаратуры линейного тракта.

К цифровым кодам, передаваемым по линейным трактам ЦВОСП, предъявляются следующие основные требования:

1. Энергетический спектр должен иметь ограничение как сверху, так и снизу. Чем уже спектр сигнала, тем меньше мощность шума и его влияние.
2. Код в линии должен обеспечивать возможность выделения колебания тактовой частоты.
3. По причине нелинейной зависимости модуляционной характеристики лазерного диода от управляющего сигнала и от температуры код в линии должен быть двухуровневым.
4. Должна обеспечиваться возможность контроля качества передачи информации в процессе эксплуатации без перерыва связи, а также возможность передачи сервисных сигналов (телеконтроля и служебной связи).

Реализация всех указанных требований достигается введением при линейном кодировании избыточности. Избыточность линейного кода придает ему заданные свойства и для двухуровневых кодов сопровождается увеличением тактовой частоты.

В линейных трактах ЦВОСП широко применяются блочные алфавитные коды  $mBnB$ . В таких кодах последовательности из  $m$  двоичных символов исходного цифрового сигнала заменяются последовательностями из  $n$  ( $n > m$ ) двоичных символов кода в линии. Увеличение тактовой частоты сигнала, передаваемого по линии, по сравнению с тактовой частотой исходного сигнала (коэффициент изменения тактовой частоты) равно  $n/m$ .



# КОДЫ В ЛИНИИ (2)

| Исходная двоичная последовательность                    | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 |
|---------------------------------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Код без возвращения к нулю – «NRZ – код»                | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| Код с возвращением к нулю – «RZ – код»                  | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| Абсолютный бимпульсный код «BI-L – код»                 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| Код с «обращением» (coded mark inversion) – «CMI – код» | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| Электронно-фотонный код – «EP-1 – код»                  | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| Электронно-фотонный код – «EP-2 – код»                  | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| Код Миллера                                             | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 |

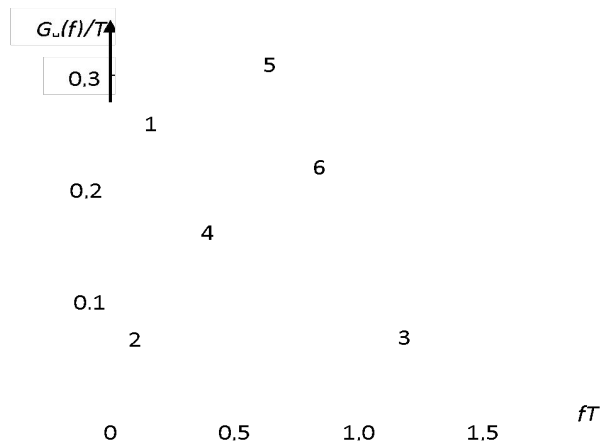
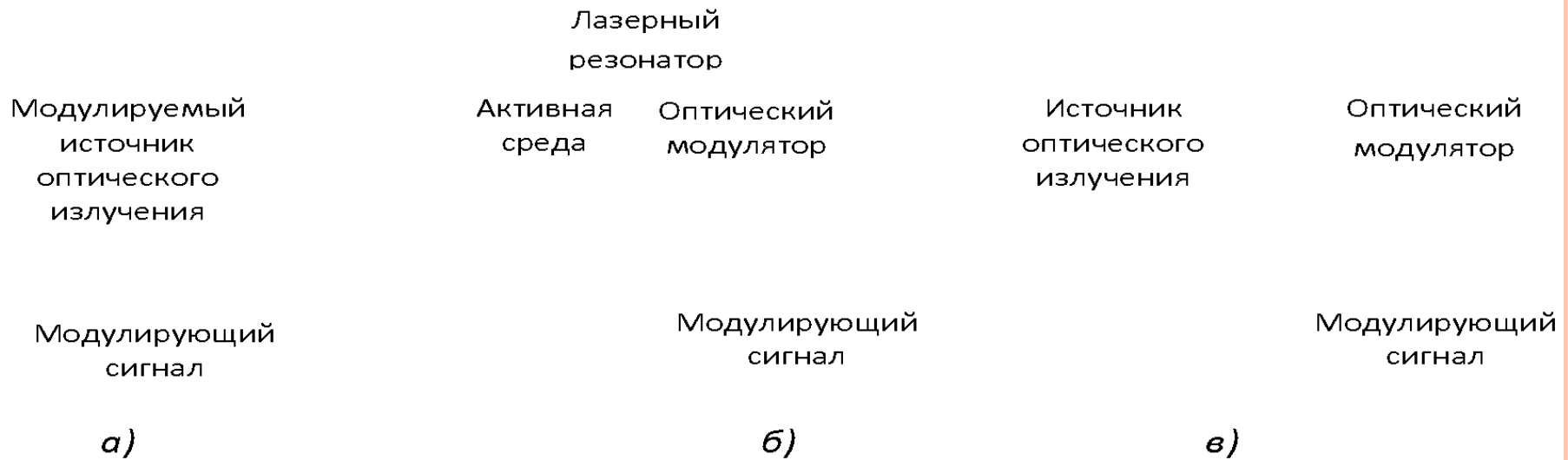


Рис. 4. Непрерывная часть энергетического спектра линейных кодов: 1 – NRZ; 2 – RZ; 3 – BI-L, BI-S; 4 – CMI; 5 – EP-1 и код Миллера; 6 – EP-2

# МОДУЛЯЦИЯ (1)

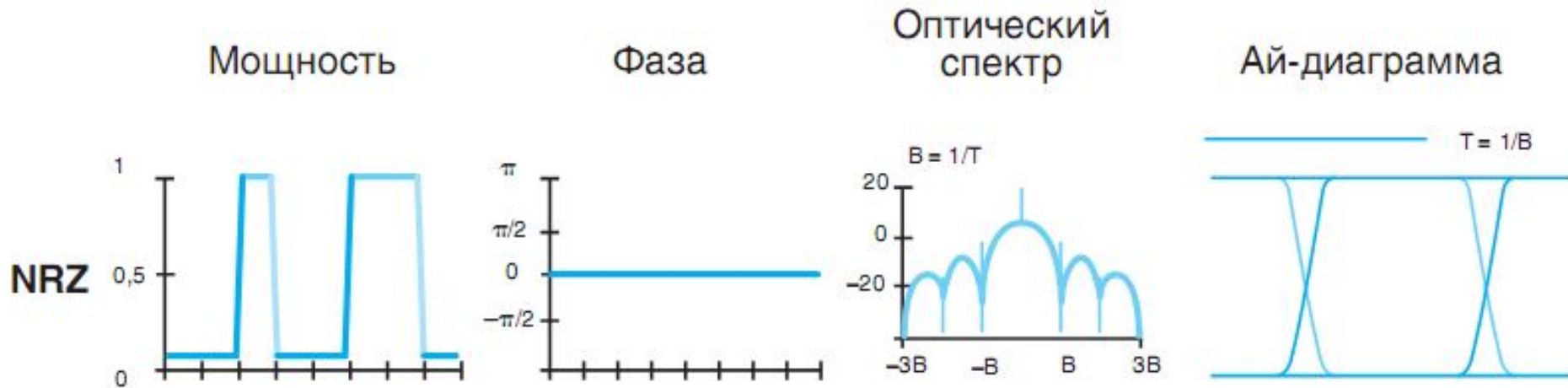
При амплитудной модуляции в системах оптической связи осуществляется изменение мощности оптического излучения передатчика. Условно модуляция оптического излучения по интенсивности делится на две группы:

- 1) *внутренняя модуляция*, при которой модуляция излучения происходит в процессе его формирования непосредственно в источнике оптического излучения (низкоскоростные системы до 2.5 Гбит/с);
- 2) *внешняя модуляция*, осуществляемая воздействием на оптическое излучение вне его источника на оптический модулятор;

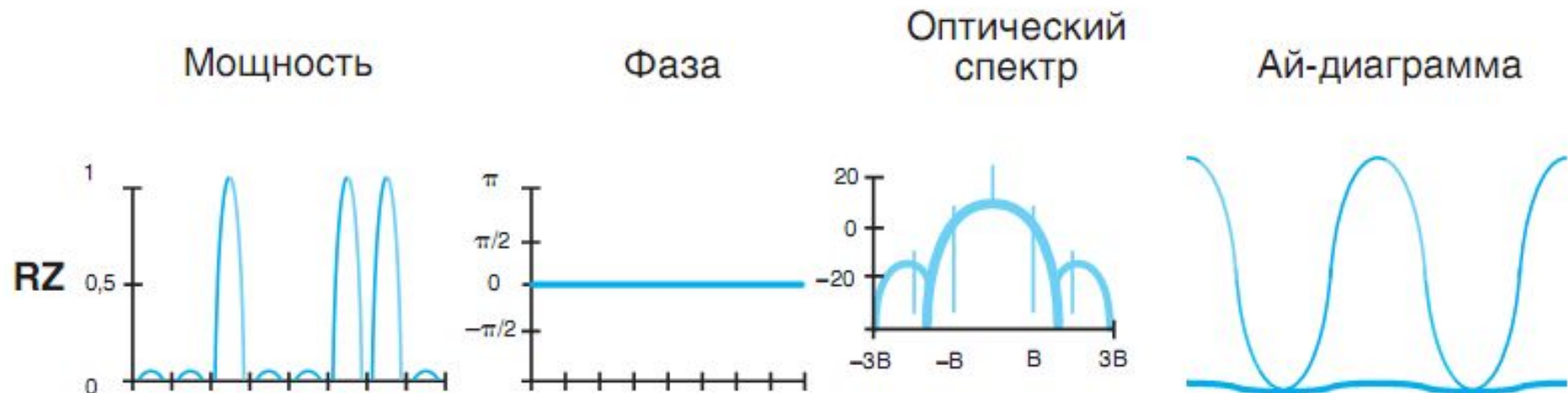


# МОДУЛЯЦИЯ (2)

Наиболее популярным среди амплитудных форматов остается формат без возвращения к нулю (**NRZ**, Non Return to Zero)

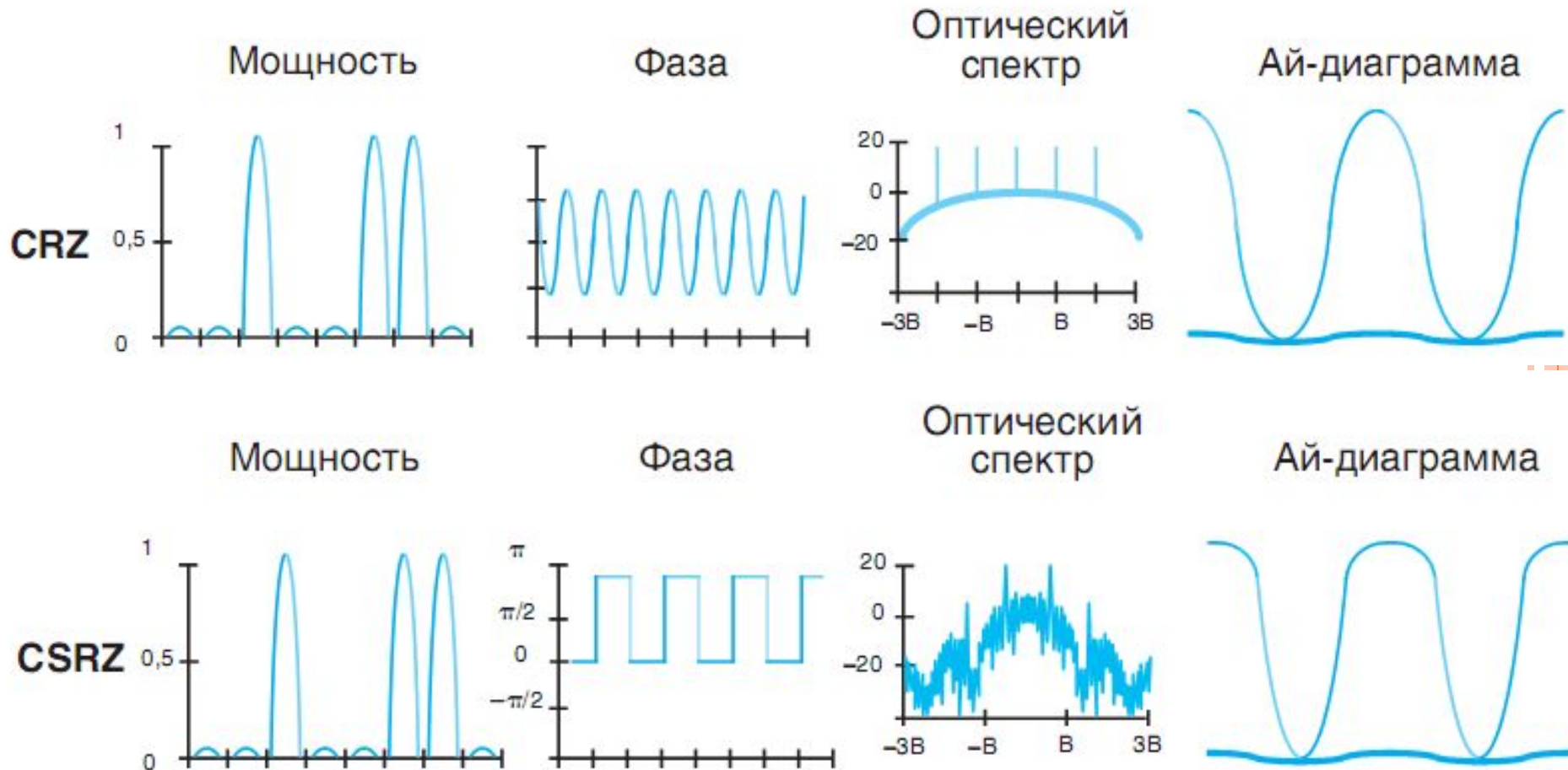


В 10 Гбит/с сетях формат RZ получил широкое распространение из-за его более высокой устойчивости к нелинейности волокна. Помимо «стойкости» к нелинейным искажениям при распространении, у сигналов RZ есть дополнительное преимущество – они более устойчивы к ПМД, чем NRZ-сигналы.



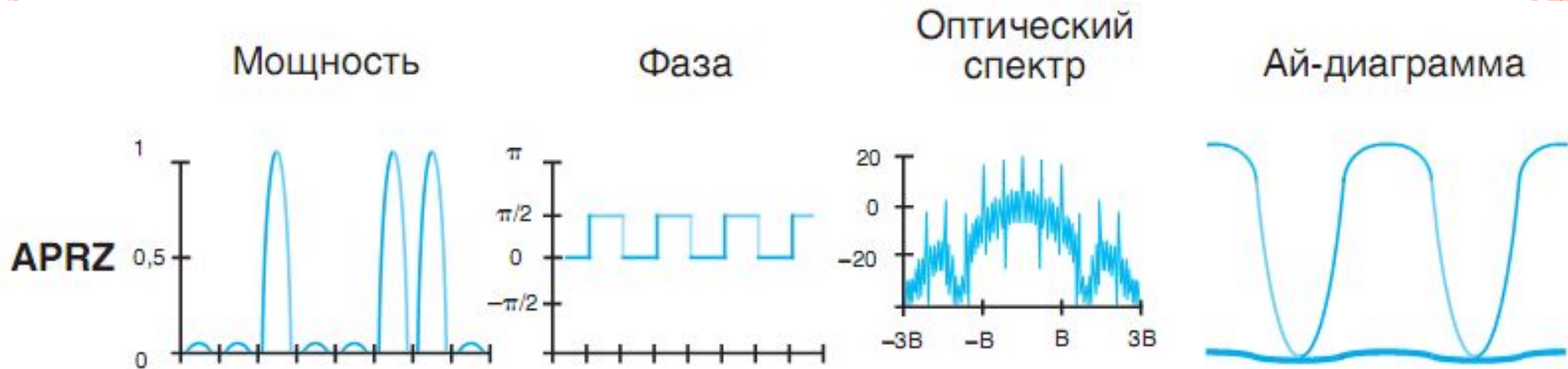
# МОДУЛЯЦИЯ (3)

Чирпированный (содержащий частотную модуляцию) RZ (**CRZ**, Chirped RZ) является одним из самых успешных форматов, он получил широкое распространение в 10 Гбит/с подводных системах, потому что он значительно более устойчив к нелинейным эффектам. CRZ особенно хорошо противостоит внутрисимвольным нелинейным искажениям (т.е. искажениям, влияющим на форму отдельного изолированного импульса). Позже было установлено, что в 40 Гбит/с системах преобладают межсимвольные нелинейные эффекты. Формат RZ с подавленной несущей (**CSRZ**, Carrier Suppressed RZ,) первоначально использовался в континентальных линиях связи со скоростью 40 Гбит/с по одному каналу. В этом формате дополнительный сдвиг фазы на  $\pi$  разделяет последовательные битовые такты путем дополнительной фазовой модуляции на частоте, равной половине частоты следования импульсов.



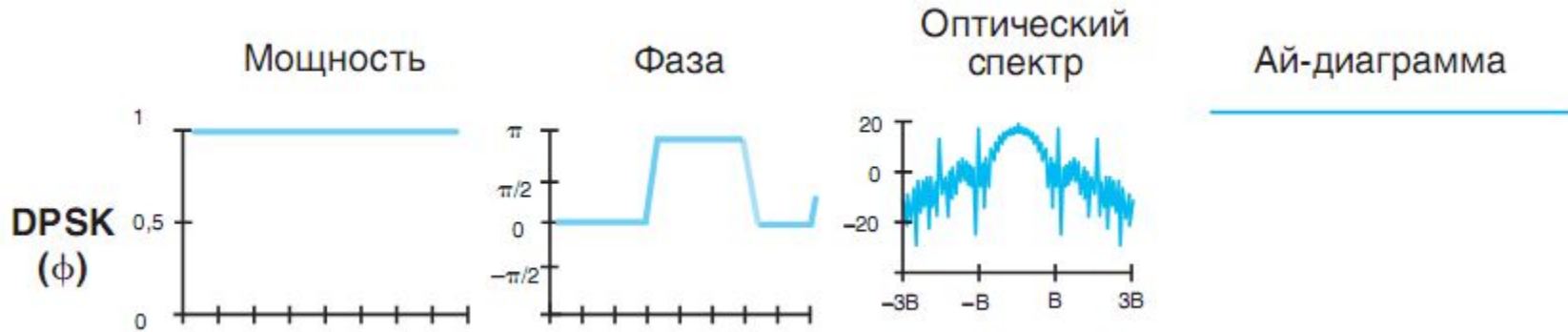
# МОДУЛЯЦИЯ (4)

Формат CSRZ не очень эффективен против внутриканальных нелинейных эффектов. Применяя дополнительный сдвиг фазы на  $\pi/2$  к последовательным битовым тактам вместо  $\pi$ , чтобы получить так называемый «RZ с дополнительным сдвигом фазы на  $\pi/2$ » (**APRZ**, Alternate Phase RZ, рис. 8) формат, можно добиться более существенного снижения внутриканальных искажений.



# МОДУЛЯЦИЯ (5)

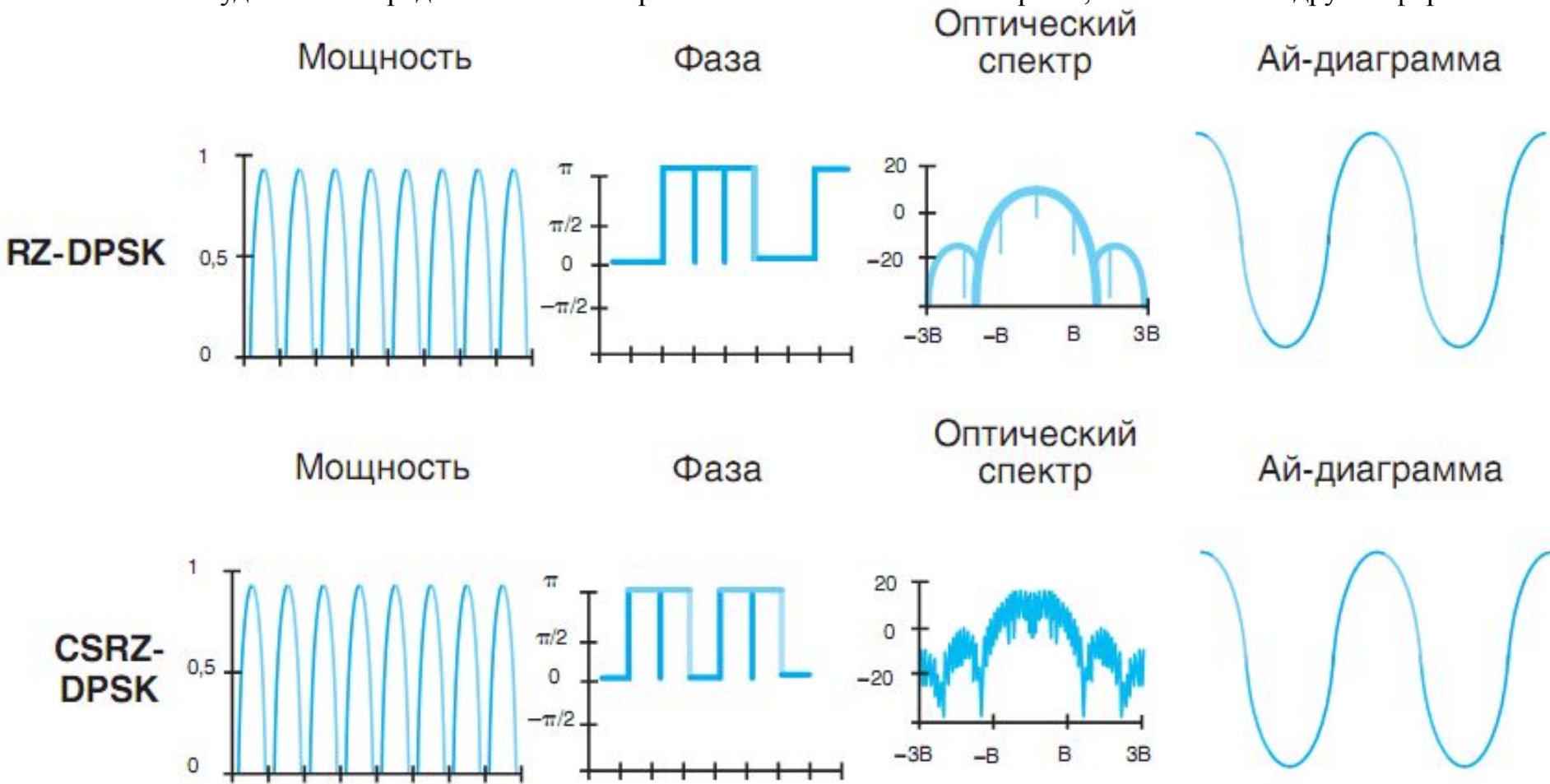
В отличие от рассмотренных выше форматов, в DPSK информация содержится в разности фаз между двумя последовательными импульсами, при этом мощность излучения информации не несет





# МОДУЛЯЦИЯ (6)

В RZDPSK- и CSRZDPSK-форматах амплитудная модуляция является дополнительной и не несет никакой информации. Фаза сигнала при модуляции RZDPSK не отличается от соответствующей фазы при DPSK-кодировании. При модуляции CSRZDPSK, как и при обычном CSRZ-кодировании, фаза в начале каждого такта скачкообразно изменяется на  $\pi$ . Получается, что фаза любого CSRZDPSK-сигнала дополняет фазу аналогичного RZDPSK (или DPSK) сигнала до  $\pi$ . Экспериментальные исследования показали, что при скорости передачи 40 Гбит/с DPSK-сигналы удавалось передать на большие расстояния с меньшими потерями, чем сигналы в других форматах.

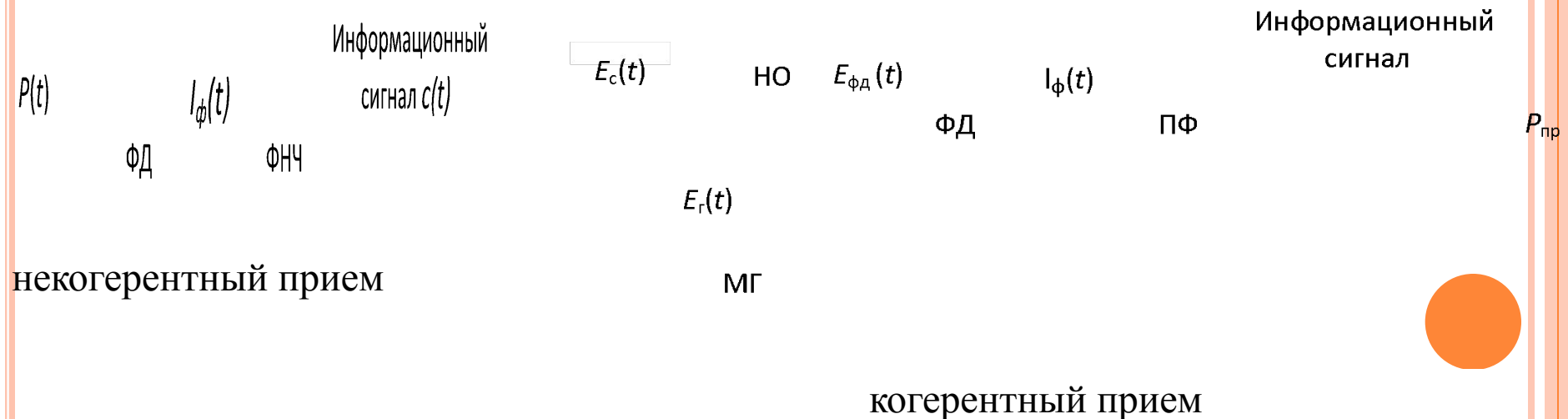


# ДЕМОДУЛЯЦИЯ

Существуют два метода демодуляции сигналов:

- прямое фотодетектирование (некогерентный прием);
- Фотосмещение (когерентный прием)

Практической реализацией фотосмещения являются гетеродинный и гомодинный прием. С помощью направленного ответвителя (НО) осуществляется суммирование (фотосмещение) поля принимаемого сигнала  $E_c(t)$  с полем гетеродинного излучения  $E_r(t)$  – местного генератора (МГ) оптического излучения. В результате на вход фотодетектора поступает поле  $E_{fd}(t) = E_c(t) + E_r(t)$ . После детектирования квадратичным фотодетектором ФД суммарного поля при гетеродинном приеме на выходе ФД образуется сигнал промежуточной (разностной) частоты, который выделяется полосовым фильтром ПФ. При этом амплитуда, фаза и частота сигнала промежуточной частоты соответствуют модулируемым параметрам принимаемого оптического сигнала. Требуется очень высокая точность совмещения волнового фронта поля гетеродинного излучения с волновым фронтом поля принимаемого сигнала. В противном случае сигнал промежуточной частоты будет иметь сильное ослабление. Гомодинный прием отличается от гетеродинного тем, что частоты излучения гетеродина – местного генератора, и генератора оптического излучения сигнала совпадают. В этом случае вместо полосового фильтра устанавливается фильтр нижних частот, который должен иметь полосу пропускания, равную полосе модулирующего сигнала. Гомодинный метод приема по сравнению с гетеродинным обеспечивает более высокое отношение сигнал/шум.



# ФОТОПРИЕМНИКИ

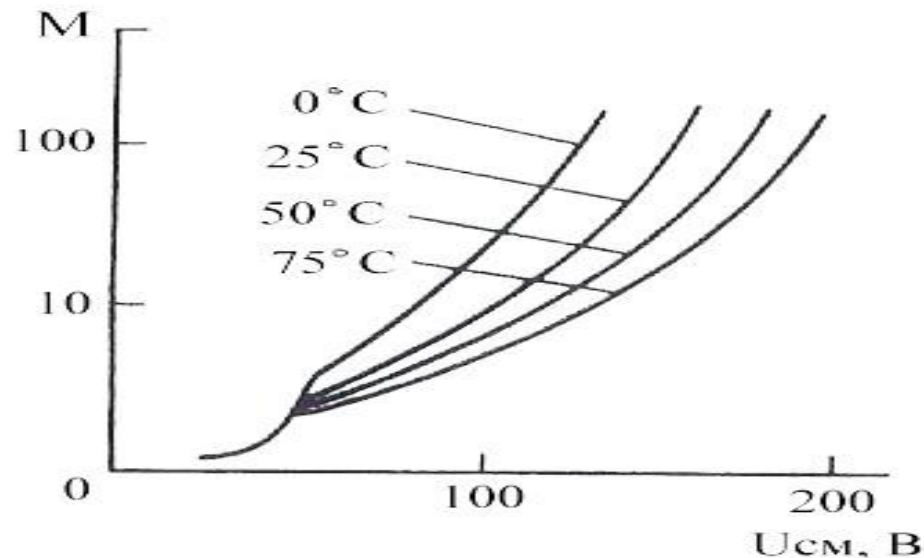
Фотоприемники обеспечивают преобразование оптического излучения в электрический ток или напряжение, что позволяет осуществлять обработку сигналов (усиление, фильтрацию и т. д.) электронными схемами. Из большого числа различных типов фотоприемников в ВОСП применяются только фотодиоды: *p-i-n* и лавинные фотодиоды (ЛФД), работающие в фотодиодном режиме, т. е. при обратном смещении.

В основе работы фотодиодов лежит явление внутреннего фотоэффекта в полупроводниковом материале, связанное с поглощением фотона, энергия которого больше или равна ширине запрещенной зоны. При таком поглощении происходит переход электрона из валентной зоны в зону проводимости (генерация электронно-дырочной пары).

Усиление первичного фототока обеспечивается механизмом лавинного умножения, который используется в структуре ЛФД. Лавинное умножение (усиление) первичного фототока является случайным процессом, и поэтому оно вносит дополнительные шумы.

Коэффициент умножения ЛФД составляет несколько десятков, так что токовая чувствительность лавинных фотодиодов значительно превышает токовую чувствительность *p-i-n* - фотодиодов.

Одним из главных недостатков ЛФД является сильная температурная зависимость коэффициента умножения. Другими недостатками являются требование более высокого напряжения питания, меньшая надежность и высокая стоимость.



Зависимость коэффициента умножения ЛФД от напряжения.