

# Учебный курс R&Mfreeenet

Теория передачи сигналов по волоконно-оптическим каналам связи



Convincing cabling solutions

# Введение

Оптический способ передачи имеет такой же возраст, как и человечество. С незапамятных времен люди обменивались оптическими сообщениями в форме:

- языка жестов;
- сигналов, подаваемых с помощью дыма;
- оптическим телеграфом;
- Опыты Тендаля (18 век).

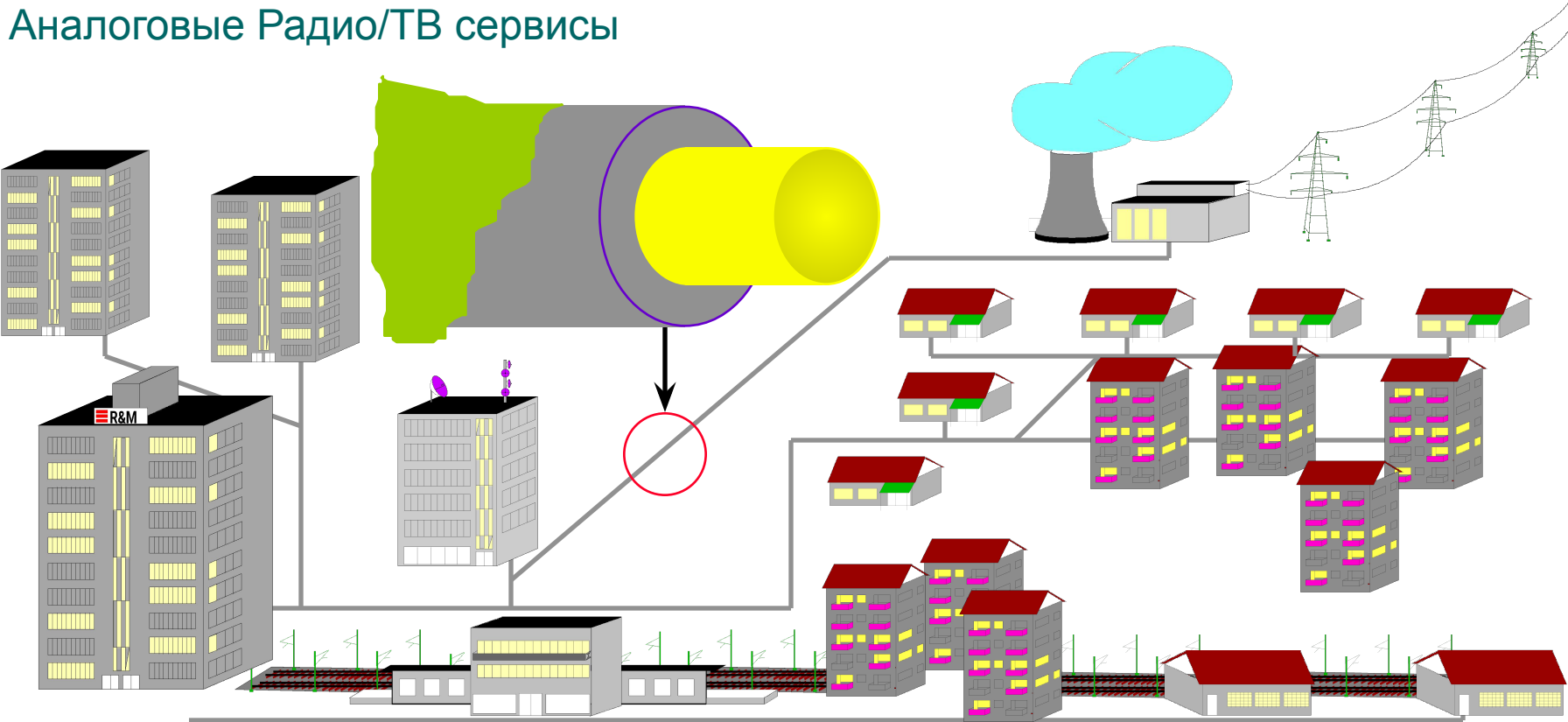


Той волоконно-оптической технологии, о которой мы знаем сегодня, предшествовали два важных научных открытия:

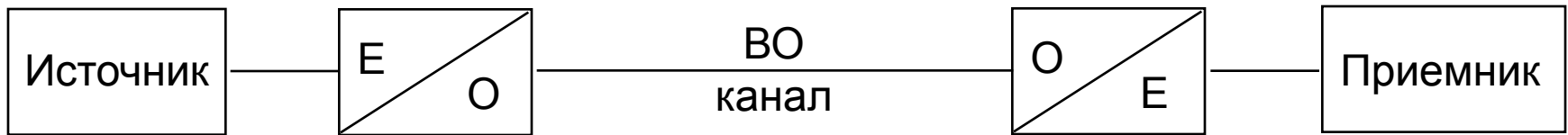
- Передача света через оптически прозрачную среду (1870 первые попытки Mister Tyndall, 1970 первое оптическое волокно Corning)
- Изобретение лазера в 1960

# Волоконно-оптическая передача

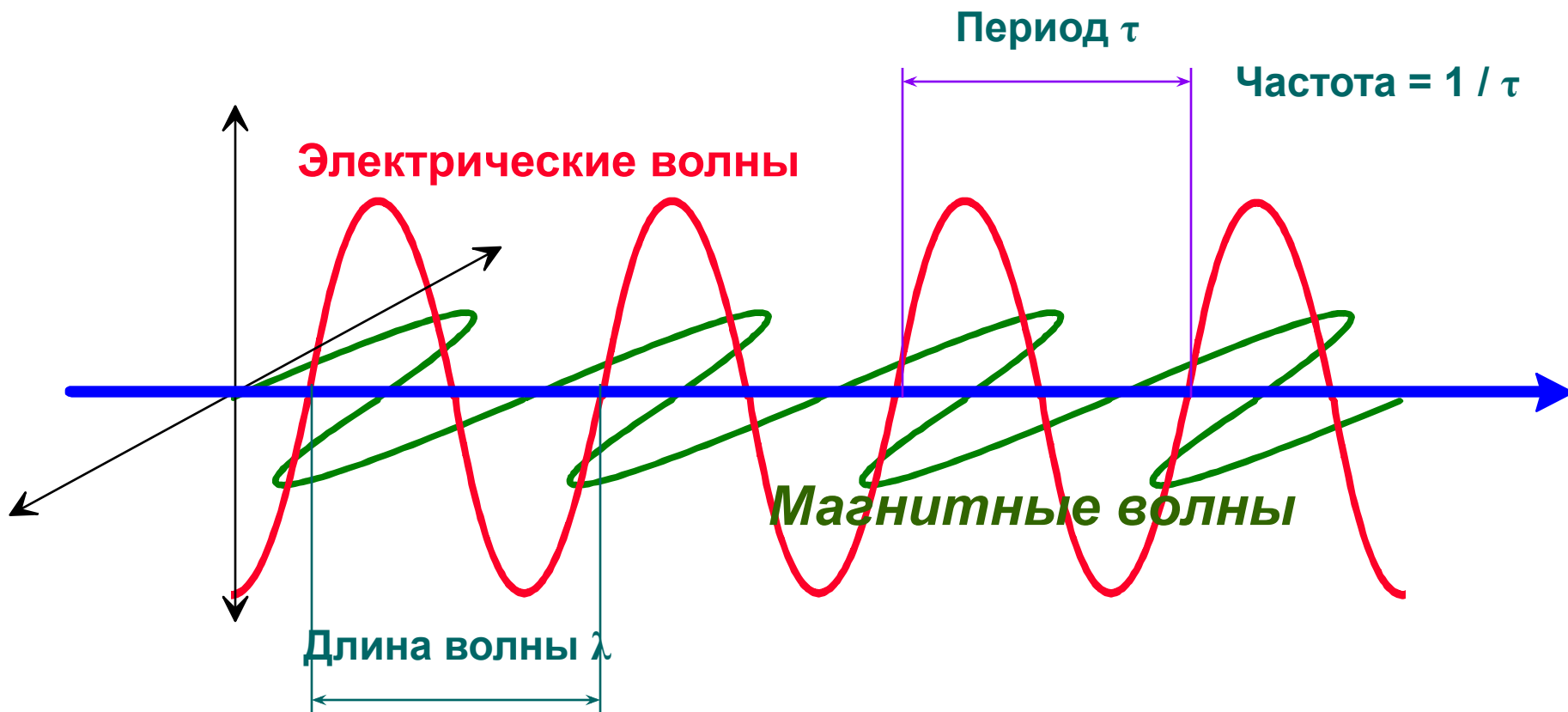
B-ISDN и Цифровой сервис  
Аналоговые Радио/ТВ сервисы



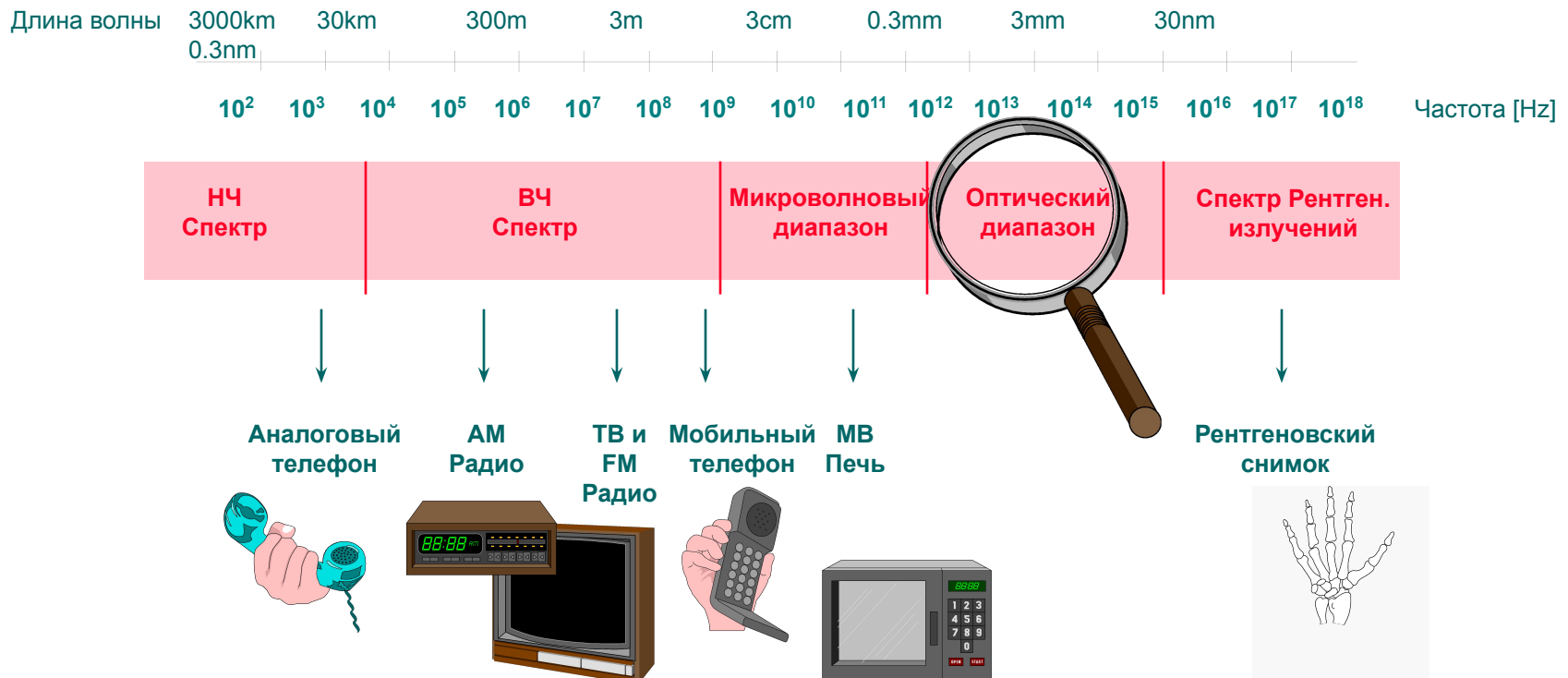
# Принцип волоконно-оптической передачи



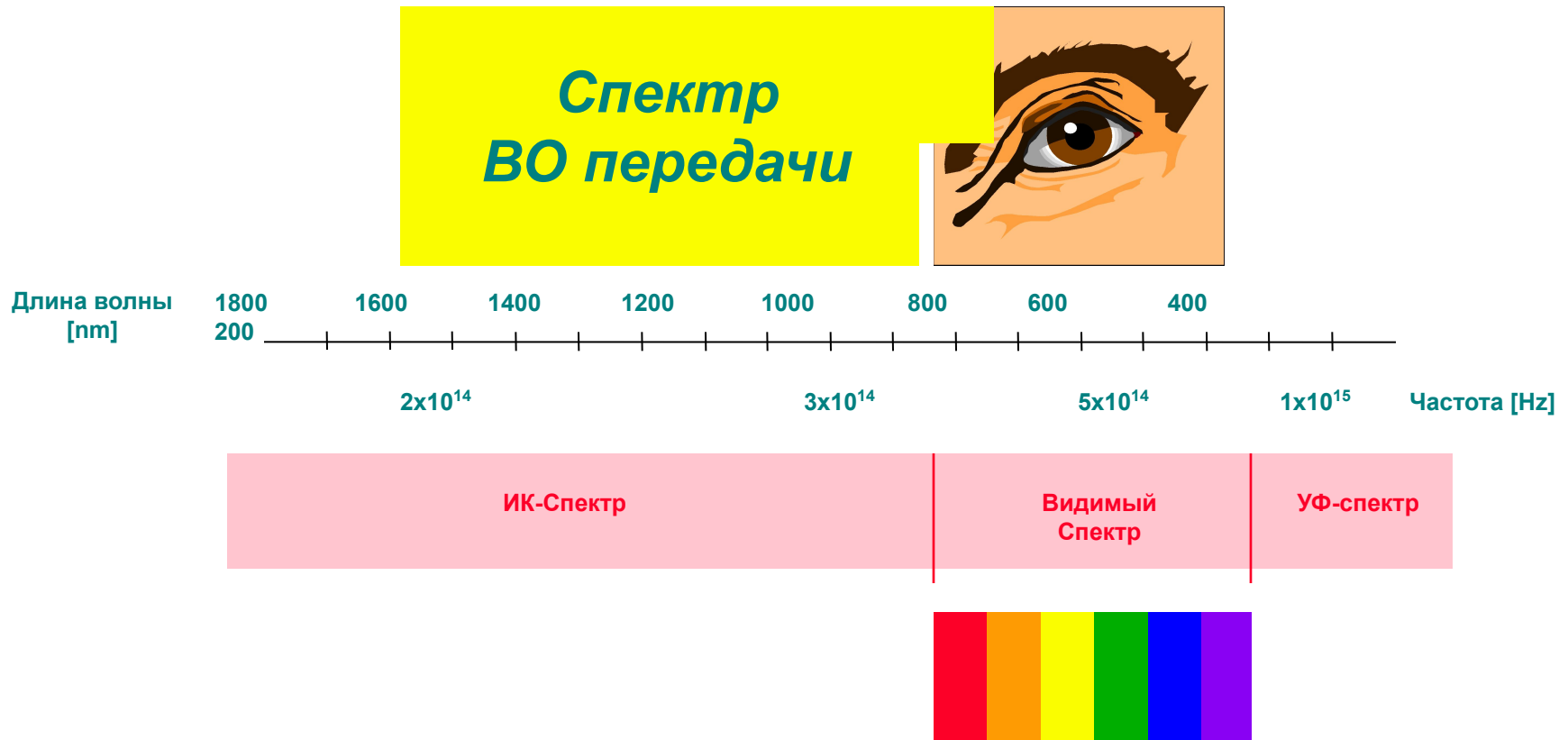
# Электромагнитные волны



# Шкала длин волн используемых в электромагнитной передаче



# Длины волн используемых в оптической передаче



# Скорость электромагнитных волн

Скорость света (электромагнитное излучение) это:

$C_0 = \text{Длина волны} \times \text{Частота}$

$C_0 = 299793 \text{ км / сек.}$

## Примечание:

Рентгеновское излучение ( $\lambda=0.3\text{nm}$ ),  
а УФ излучение ( $\lambda = 10\text{cm} \sim 3\text{GHz}$ ) или  
ИК излучение ( $\lambda = 840\text{nm}$ )

имеют одинаковую скорость распространения в вакууме



# Коэффициент преломления

Скорость света (электромагнитное излучение):

- всегда меньше чем в вакууме,  $C_n$
- $n = C_0 / C_n$
- $n$  определяется как Коэффициент преломления ( $n = 1$  в вакууме),  $n$  зависит от плотности Материала и Длины волны

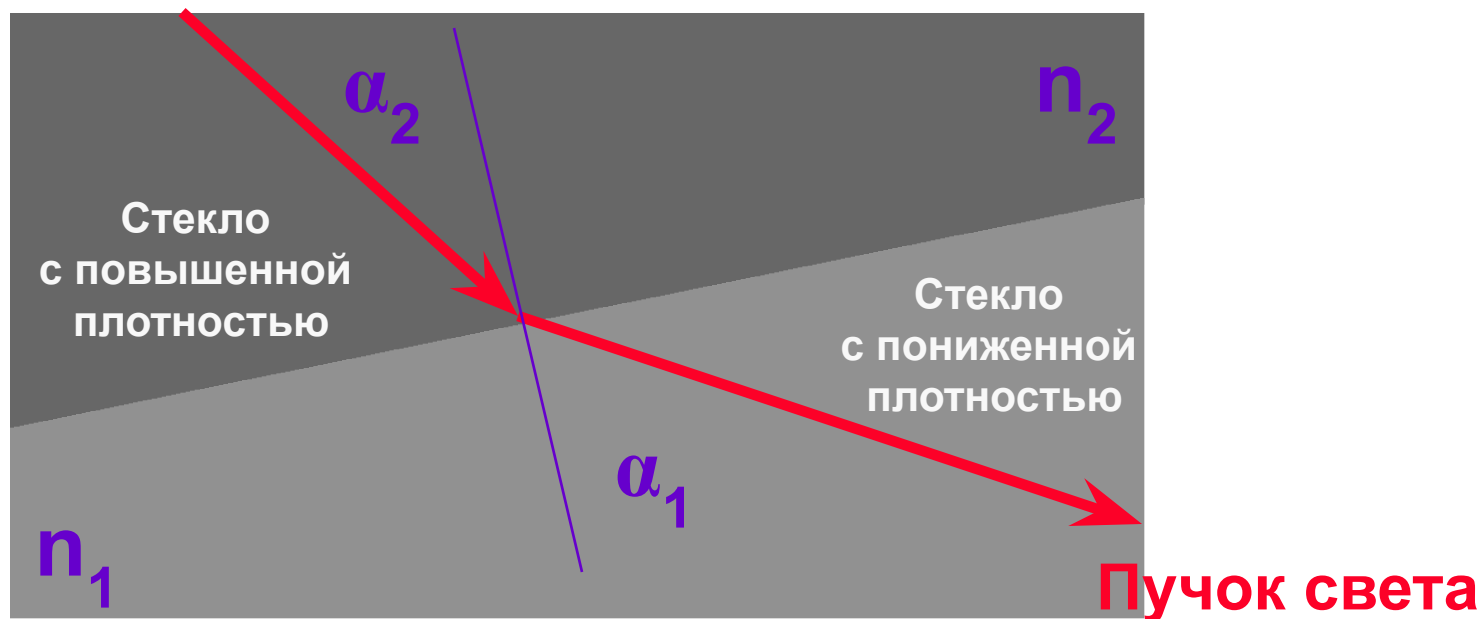
**Примечание:**

$$n_{\text{возд.}} = 1.0003,$$

$$n_{\text{стекла}} = 1.5000$$

$$n_{\text{сладкой воды}} = 1.8300$$

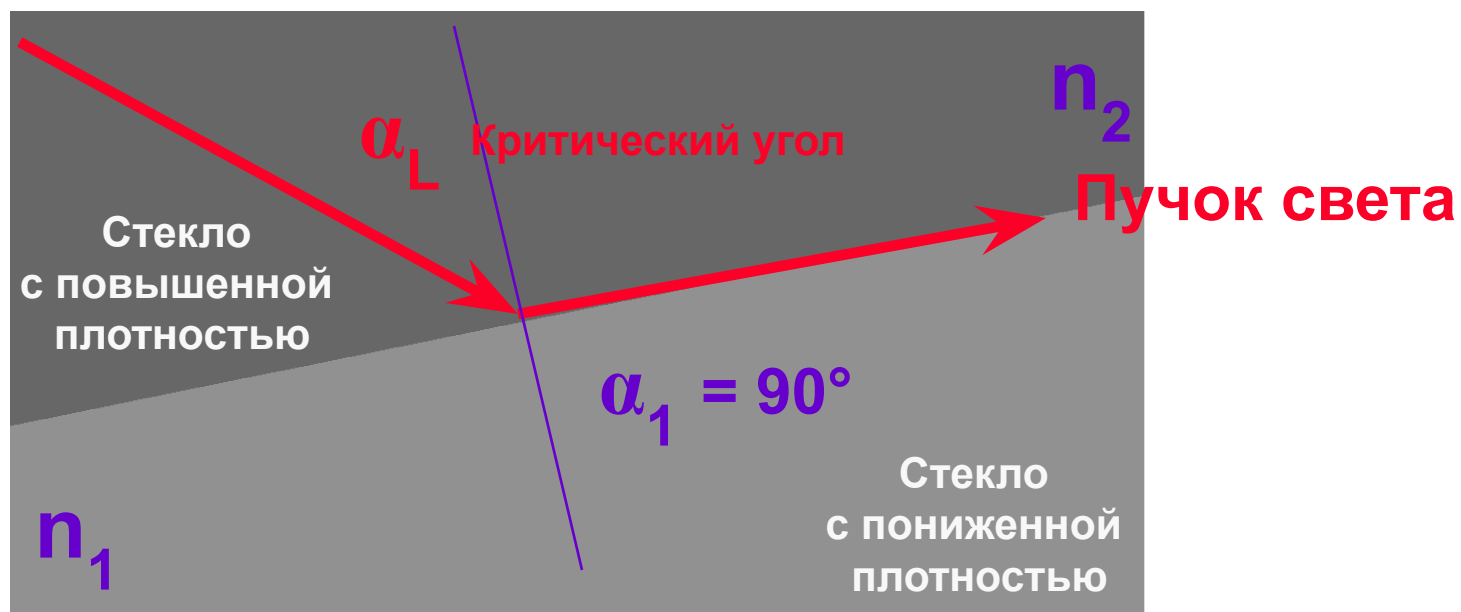
# Преломление



Примечание:  $n_1 < n_2$  и  $\alpha_1 > \alpha_2$

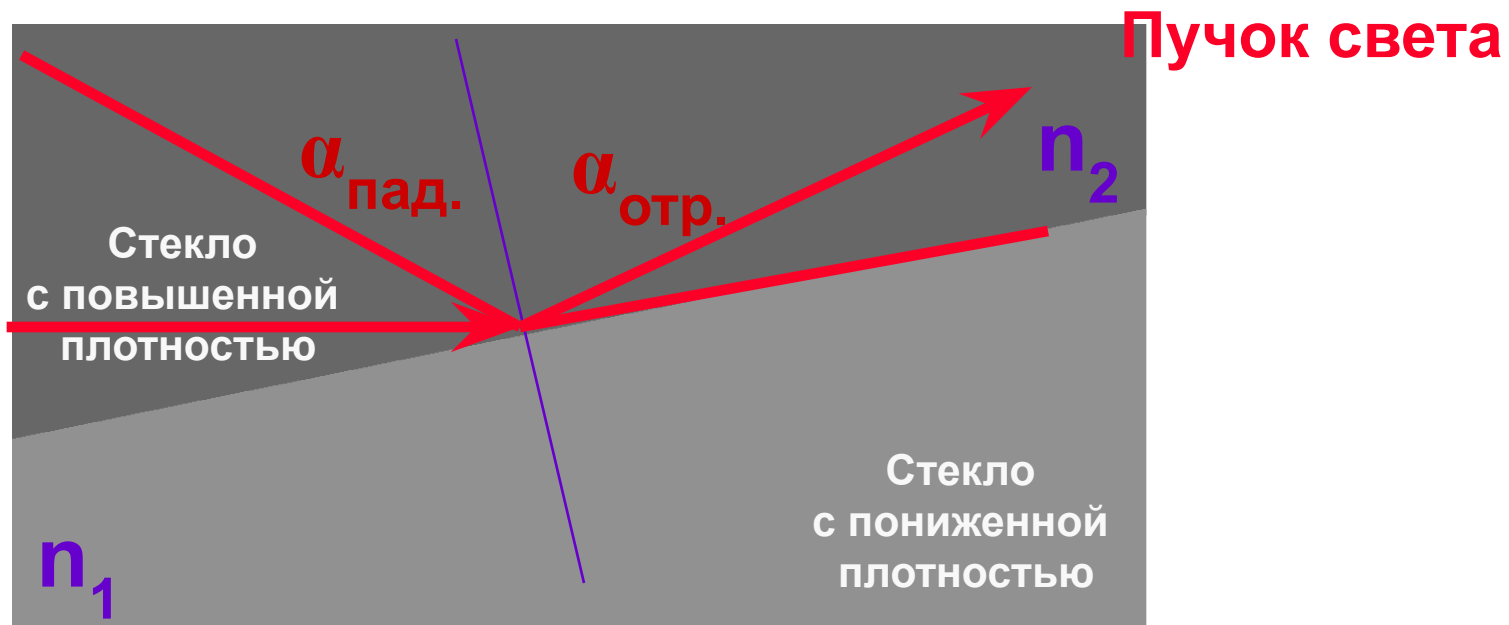
$$\sin \alpha_2 / \sin \alpha_1 = n_1 / n_2$$

# Полное преломление, Критический угол



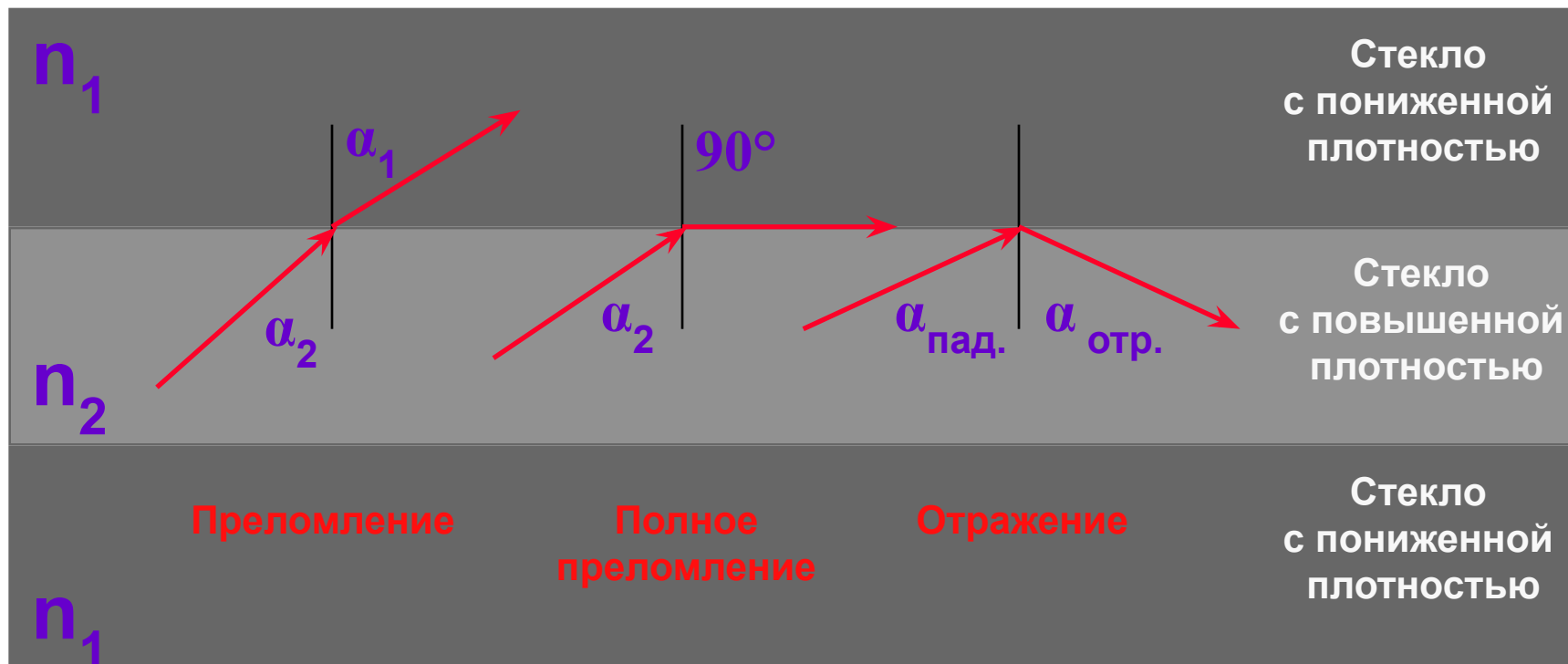
Примечание:  $n_1 < n_2$  и  $\alpha_2 = \alpha_L$      $\sin \alpha_1 = 1$      $\longrightarrow$      $\sin \alpha_L = n_1 / n_2$

# Полное внутреннее отражение

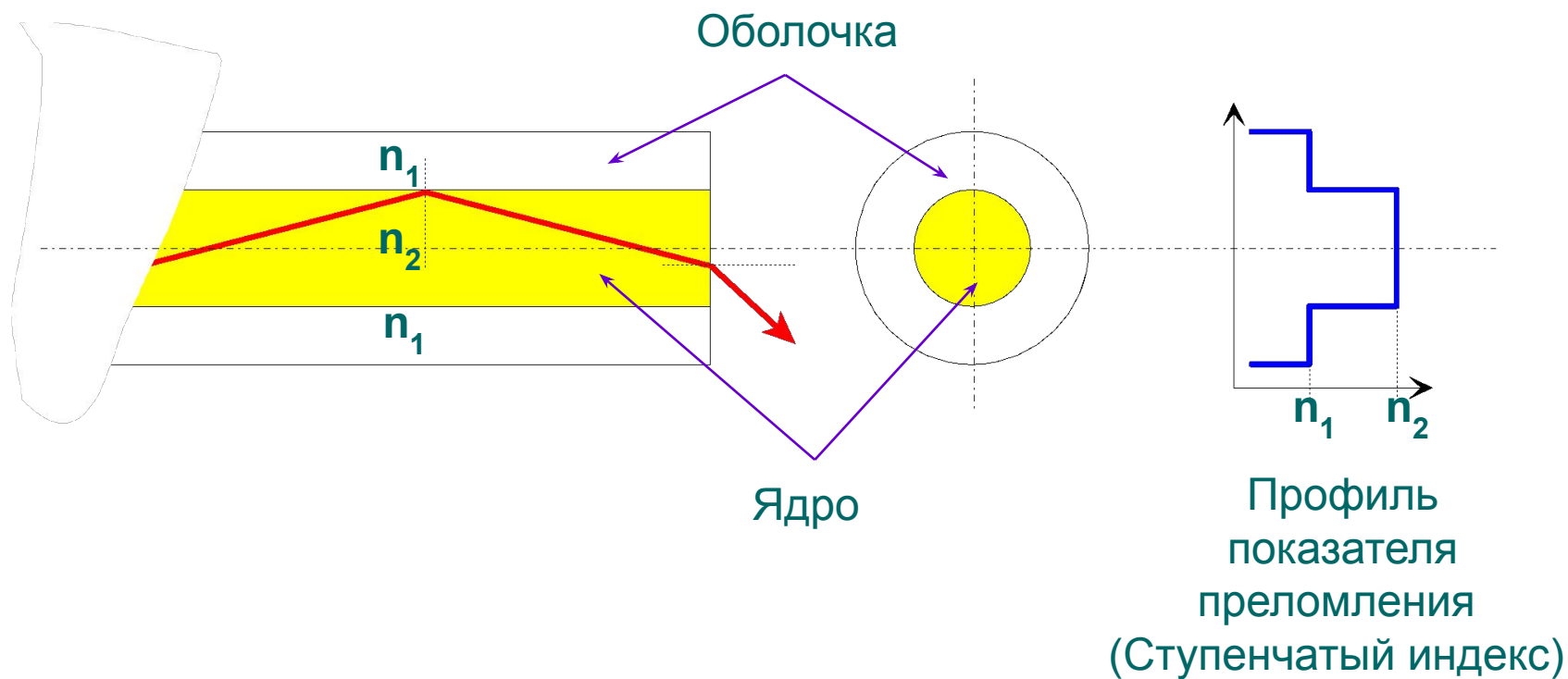


Примечание:  $n_1 < n_2$  и  $\alpha_{\text{пад.}} = \alpha_{\text{отр.}}$

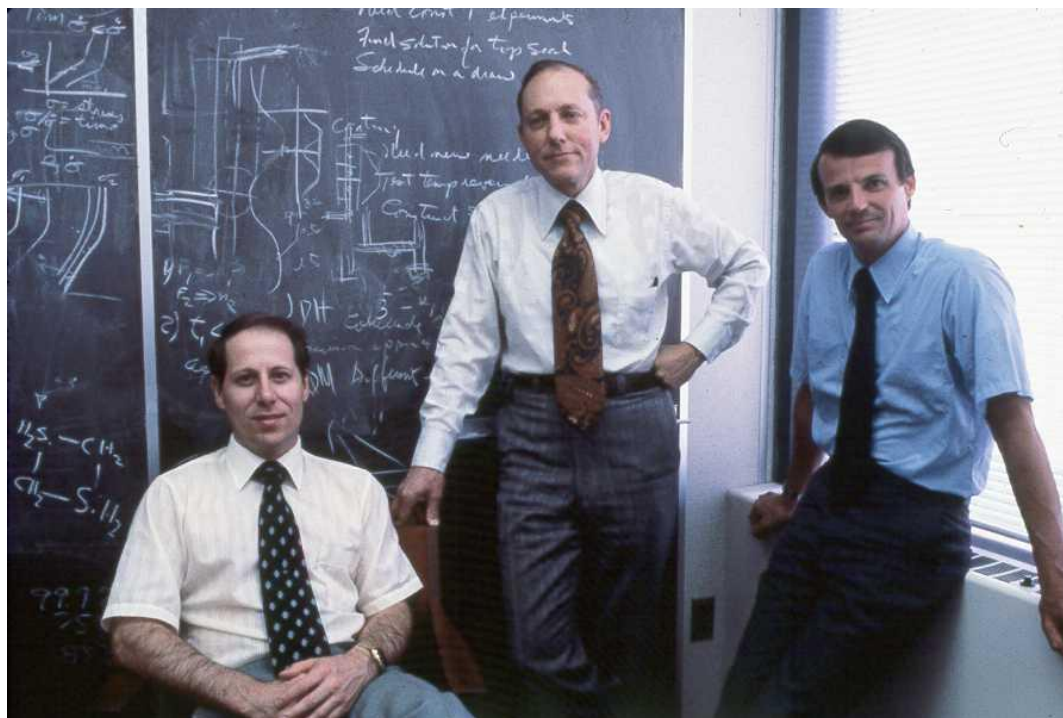
# Изменение направления света в материале



# Волоконно-оптический световод



# Где все начиналось



Три ученых лаборатории Corning (слева направо) Дональд Кек, Роберт Мауэр и Питер Шульц в 1970 году впервые в мире создали оптическое волокно, которое было возможно использовать в коммерческих целях.

# Свет в волокне распространяется только дискретными путями

Эти дискретные пути называются модами.



03



02



12



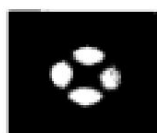
22



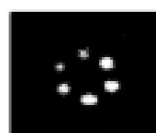
01



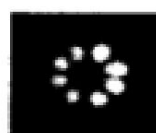
11



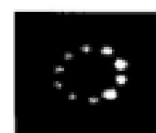
21



31



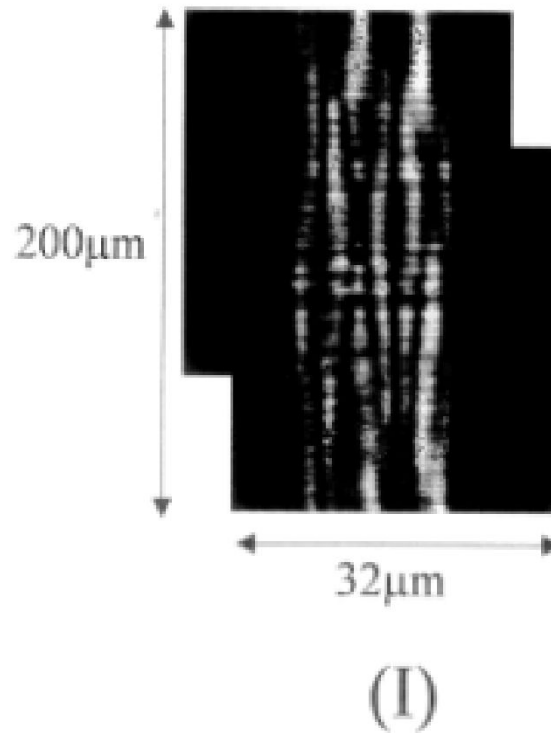
41



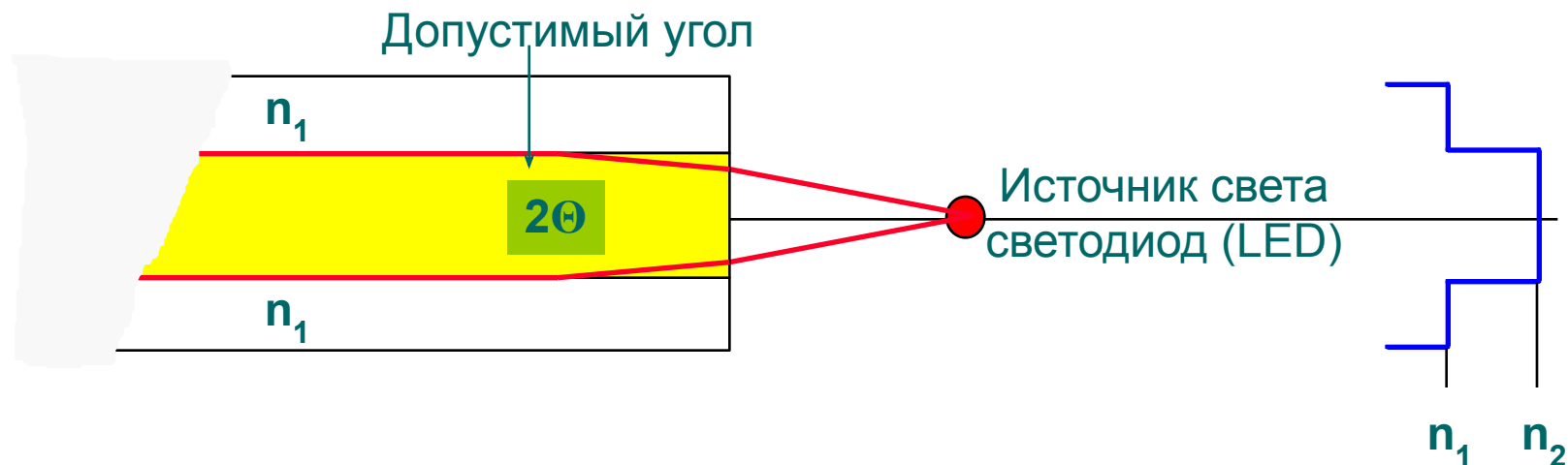
51



# Моды выглядят как разные пути (продольный срез)



# Численная апертура



$$\text{Численная Апертура } NA = \sin \Theta = (n_2^2 - n_1^2)^{0.5}$$

Примечание:  $NA = 0.3$  типичный показатель для ступенчатого индекса волокна

→  $\Theta \sim 17.5^\circ$

Профиль показателя преломления (Ступенчатый индекс)

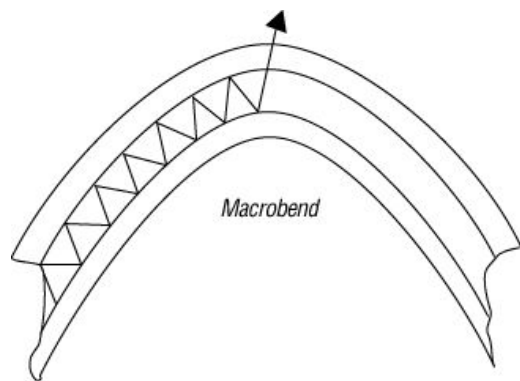
# Численная Апертура и характеристики передачи

- ✓ Большое значение **NA** означает Большое значение  $\theta$ , при этом больше **Световой энергии** будет сконцентрировано в волокне
- ✓ Большое значение **NA** означает сохранение большего к-ва **Мод** в волокне (большая модовая дисперсия)
- ✓ Чем больше значение **NA**, тем меньше затухание вызываемое изгибом волокна
- ✓ Чем больше **Мод**, тем уже полоса пропускания

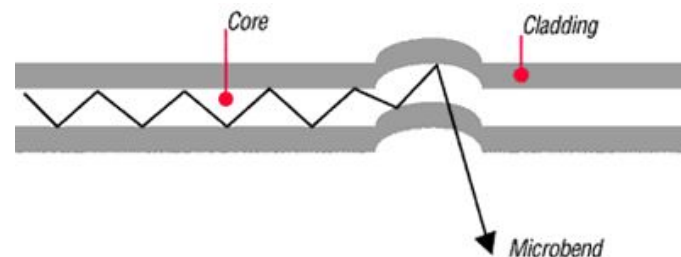
## Примечание:

Два волокна с  $NA = 0.2$  и  $0.4$  Волокно с  $NA = 0.2$  в 8 раз большее затухание при изгибе чем  $NA = 0.4$  Fibre

# Причины затуханий в волокне



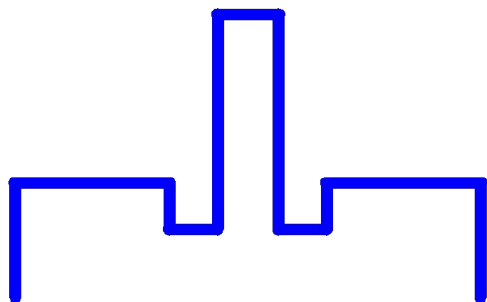
Макроизгибы



Микроизгибы

# Типы профилей коэффициента преломления

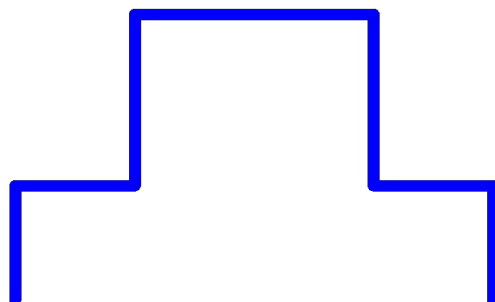
Ступенчатый индекс



Для одномодовой передачи

Размер ядра ~9 мкм

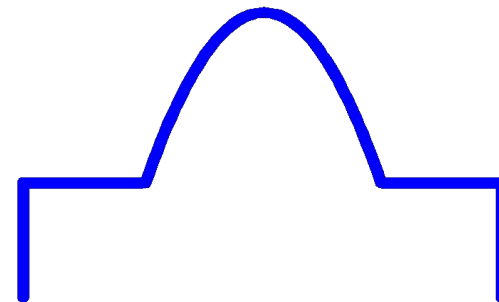
Ступенчатый индекс



Для многомодовой передачи

Размер ядра 50мкм

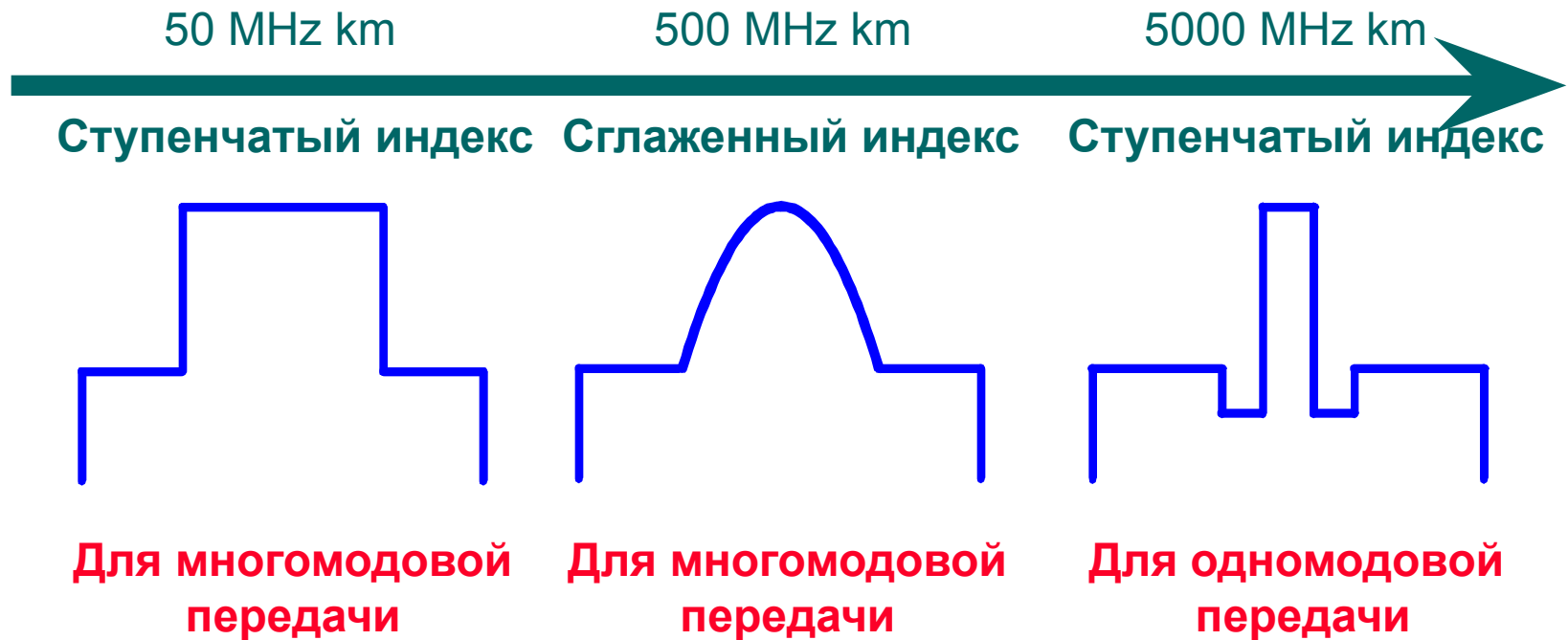
Сглаженный индекс



Для многомодовой передачи

Размер ядра 50 или 62.5мкм

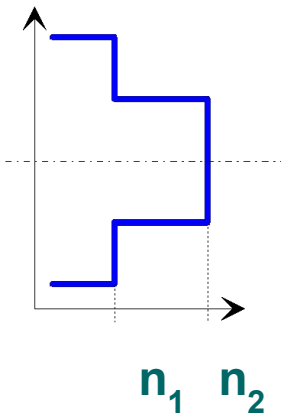
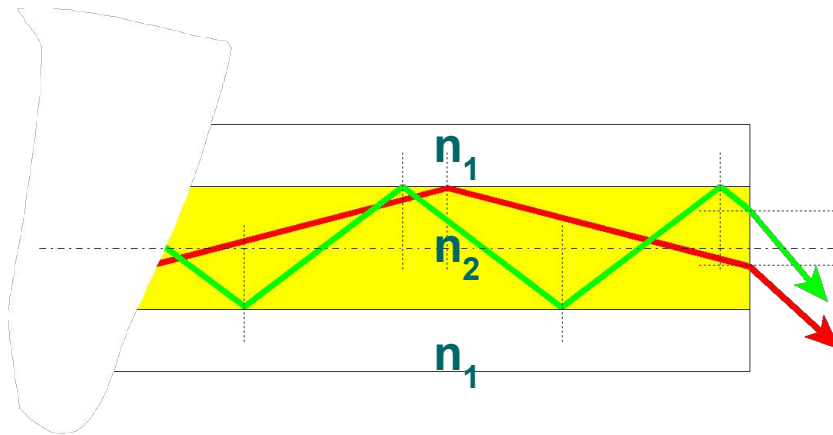
# Типы профилей коэффициента преломления



# Обзор основных характеристик

	Определение	Эффект	Ограничение
1	Затухание [dB/km]	Потери энергии по всей длине линка	Длина линка
2	Дисперсия	Расширение импульса и ослабление сигнала	Полоса пропускания & длина линка
3	Числовая апертура (NA) [-]	Потери на соединениях LED/Laser □ fiber fiber □ fiber fiber □ e.g. APD*	Характеристики соединения

# Многомодовое волокно (Ступенчатый индекс)



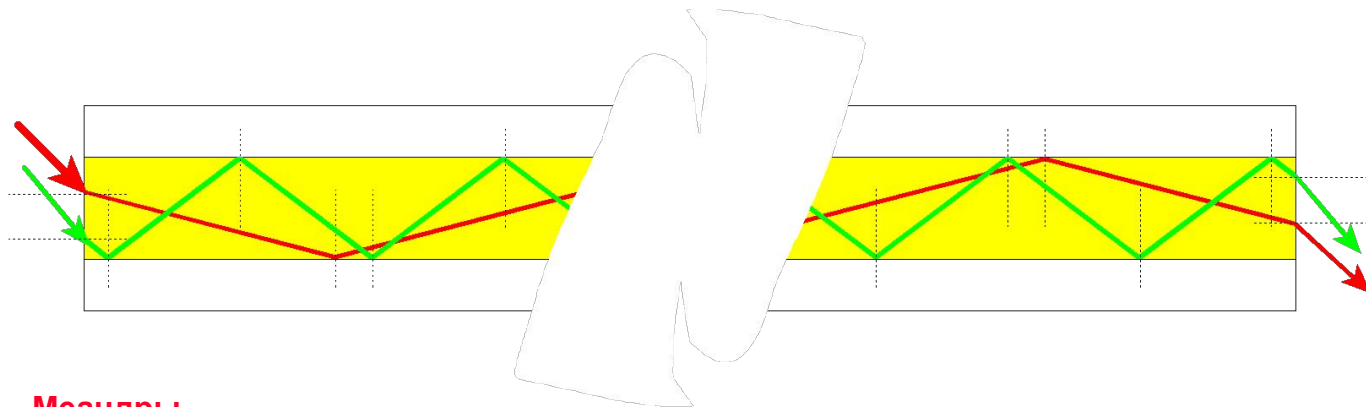
$$\text{Число Мод } M = 0.5 \times (\pi \times d \times \text{NA} / \lambda)^2$$

Профиль  
показателя  
преломления  
(Ступенчатый индекс)

Примечание: ~ 680 Мод при  $\text{NA} = 0.2$ ,  $d = 50 \mu\text{m}$  и  $\lambda = 850\text{nm}$   
~ 292 Мод при  $\text{NA} = 0.2$ ,  $d = 50 \mu\text{m}$  и  $\lambda = 1300\text{nm}$



# Модовая дисперсия (ступенчатый индекс)



Меандры



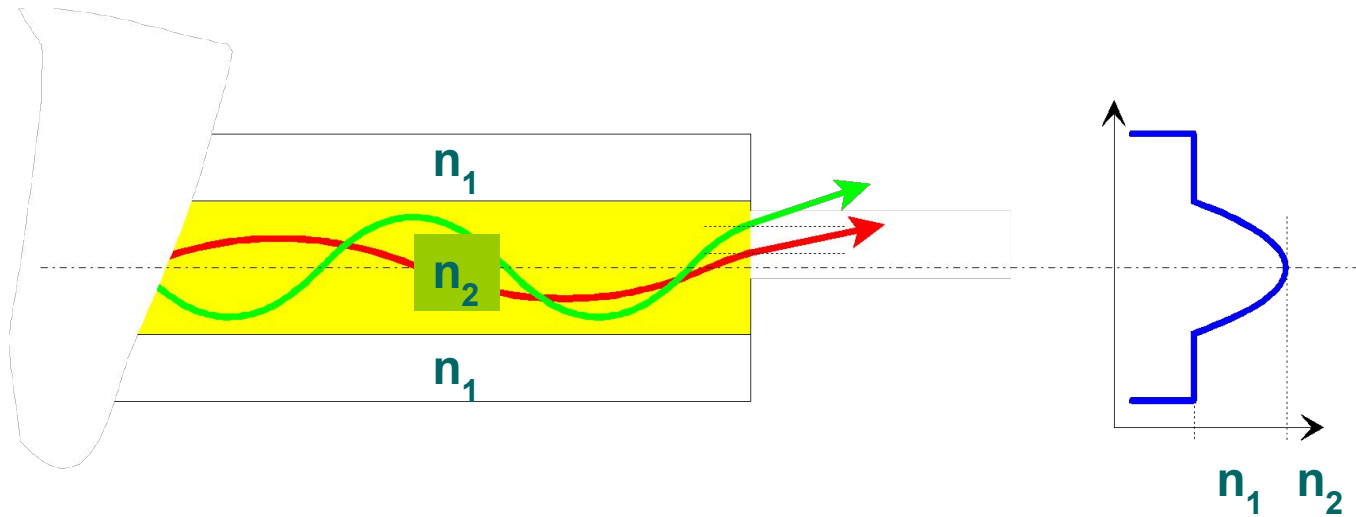
Тип импульса на  
Источнике

Деформированные Импульсы



Тип импульса на  
Приемнике

# Многомодовое волокно (Сглаженный индекс)

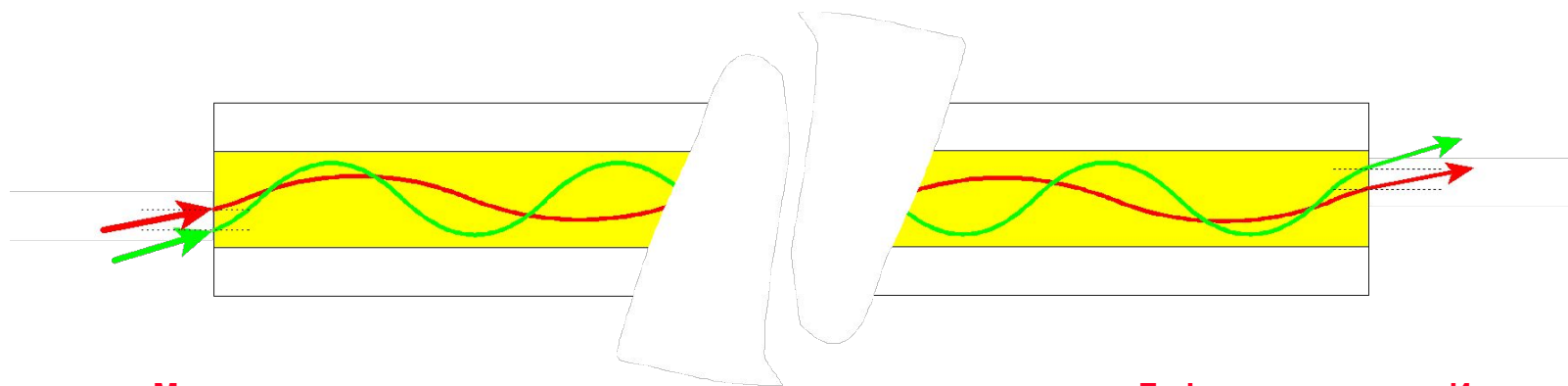


Число Мод  $M = 0.25 \times (\pi \times d \times NA / \lambda)^2$

Профиль показателя преломления (Сглаженный индекс)

Примечание: ~150 Мод при  $NA = 0.2$ ,  $d = 50 \mu\text{m}$  и  $\lambda = 1300 \text{ nm}$

# Модовая дисперсия в многомодовом волокне



Меандры



Форма импульса на передающей стороне

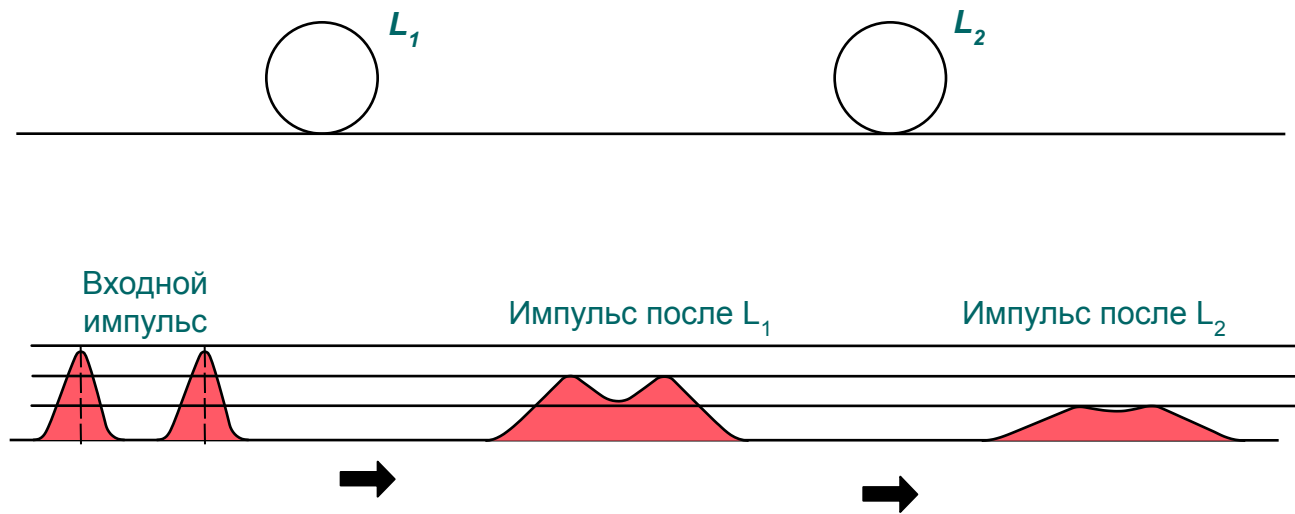
Деформированные Импульсы



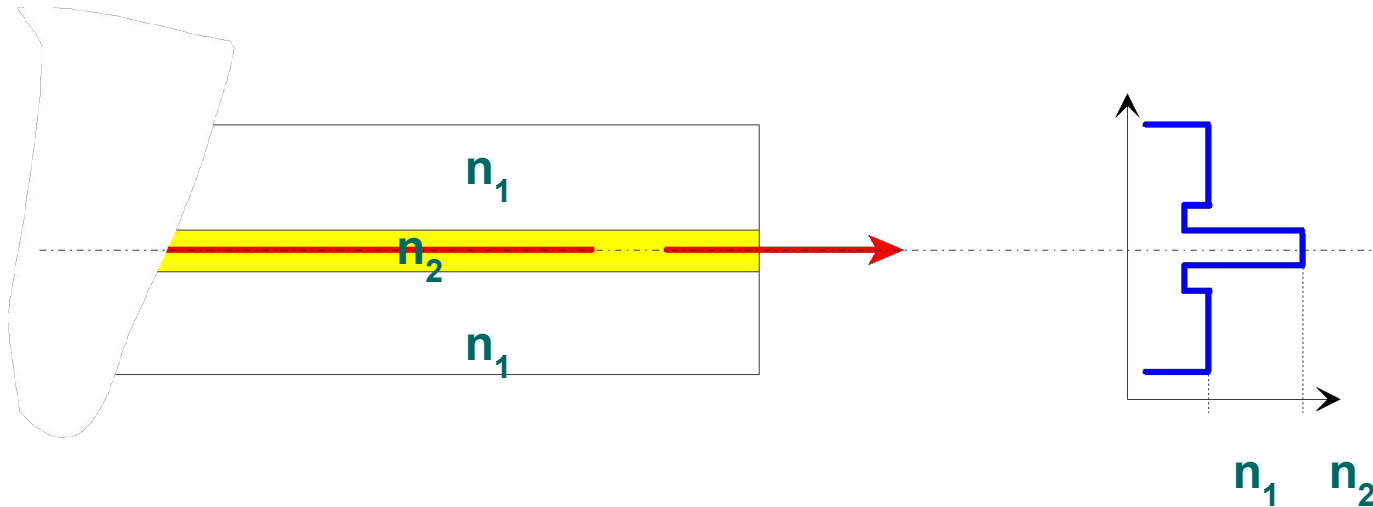
Форма импульса на приемной стороне

# Дисперсия

Результатом дисперсии является расширение узкого входного импульса, который распространяется вдоль оптического волокна.



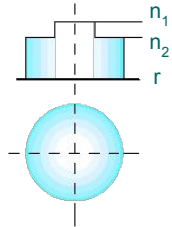
# Одномодовое волокно



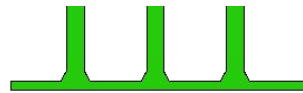
Пример:  $n_1 = 1.4570$  и  $n_2 = 1.4625$

Профиль  
показателя  
преломления  
(Ступенчатый индекс)

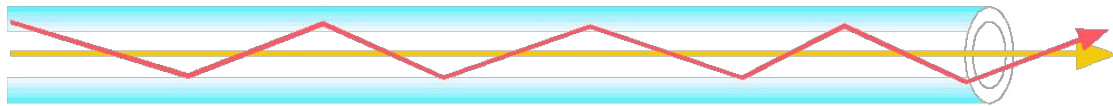
# Волоконно-оптическая теория



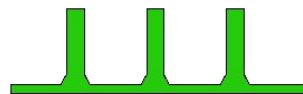
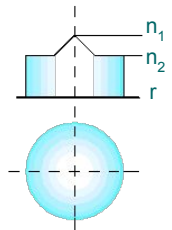
Вносимый сигнал



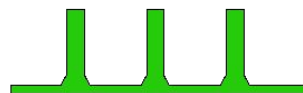
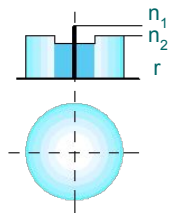
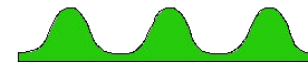
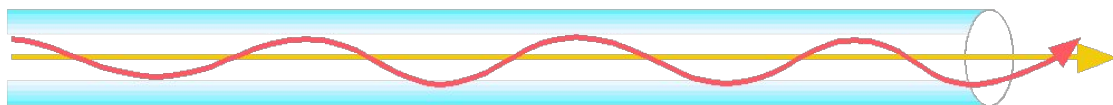
Многомод ступенчатый



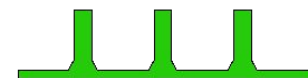
Выходной сигнал



Многомод градиентный



Одномод



# Виды дисперсии

Многомодовое  
ВОЛОКНО

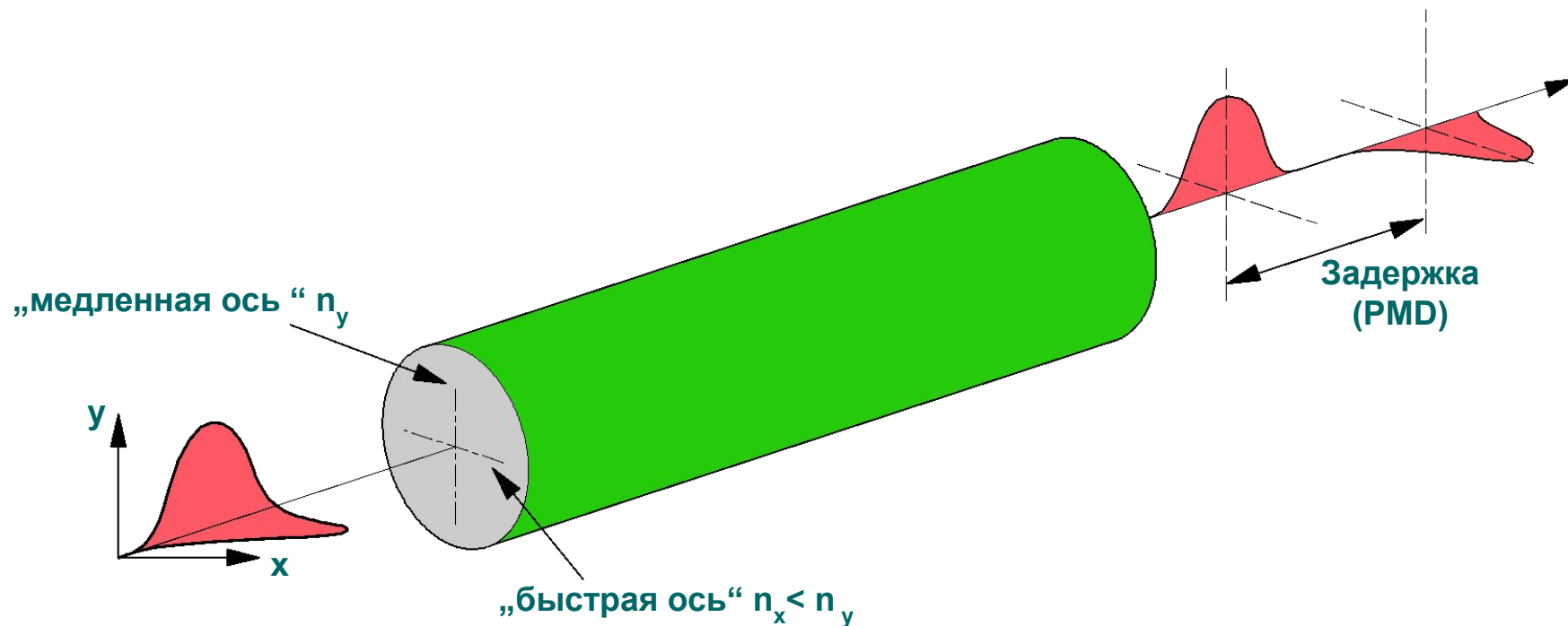
Одномодовое  
ВОЛОКНО

Модовая  
дисперсия

Хроматическая  
дисперсия  
[ps/km \* nm]

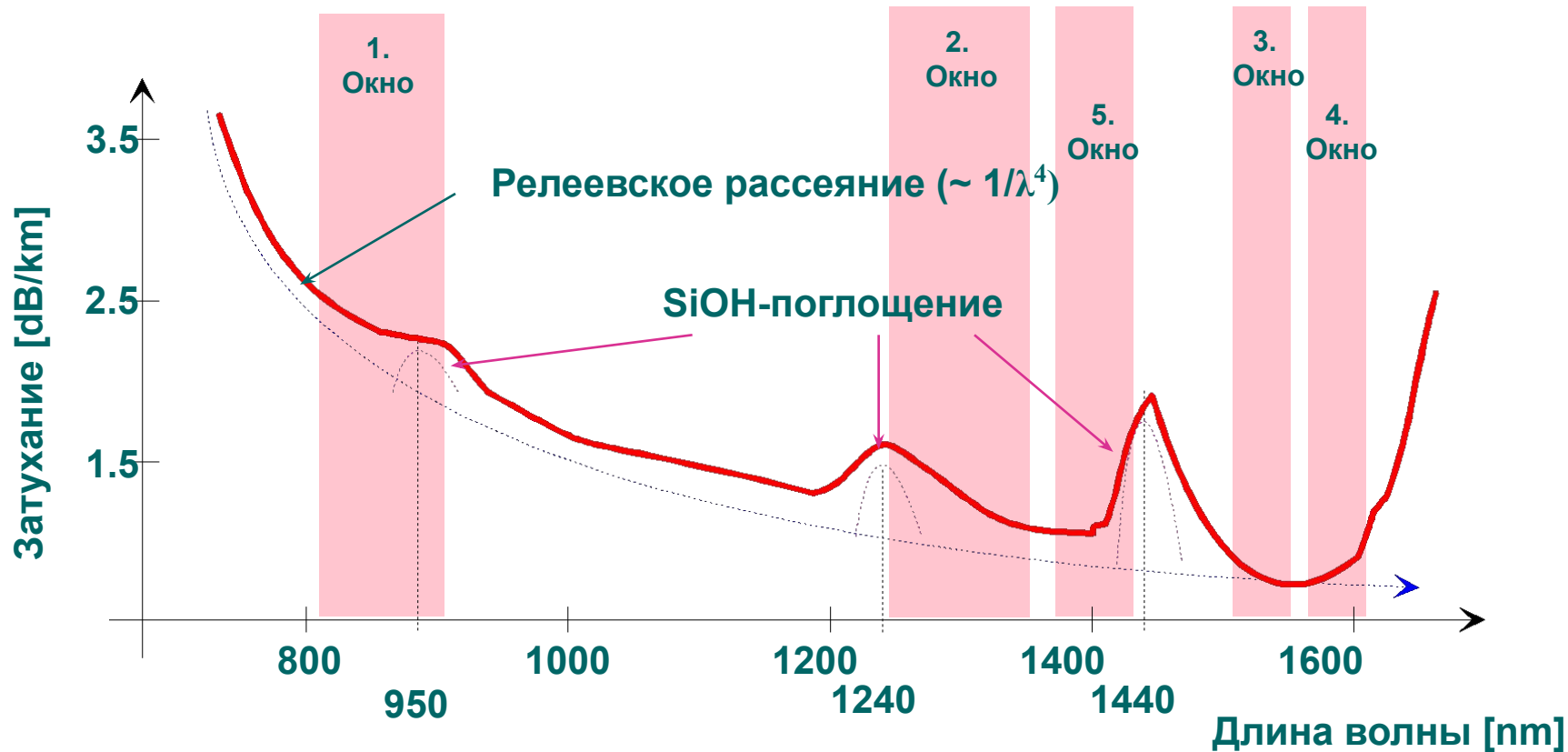
Поляризационная  
Модовая  
дисперсия  
PMD  
[ps/√(km)]

# PMD для одномодового оптического волокна

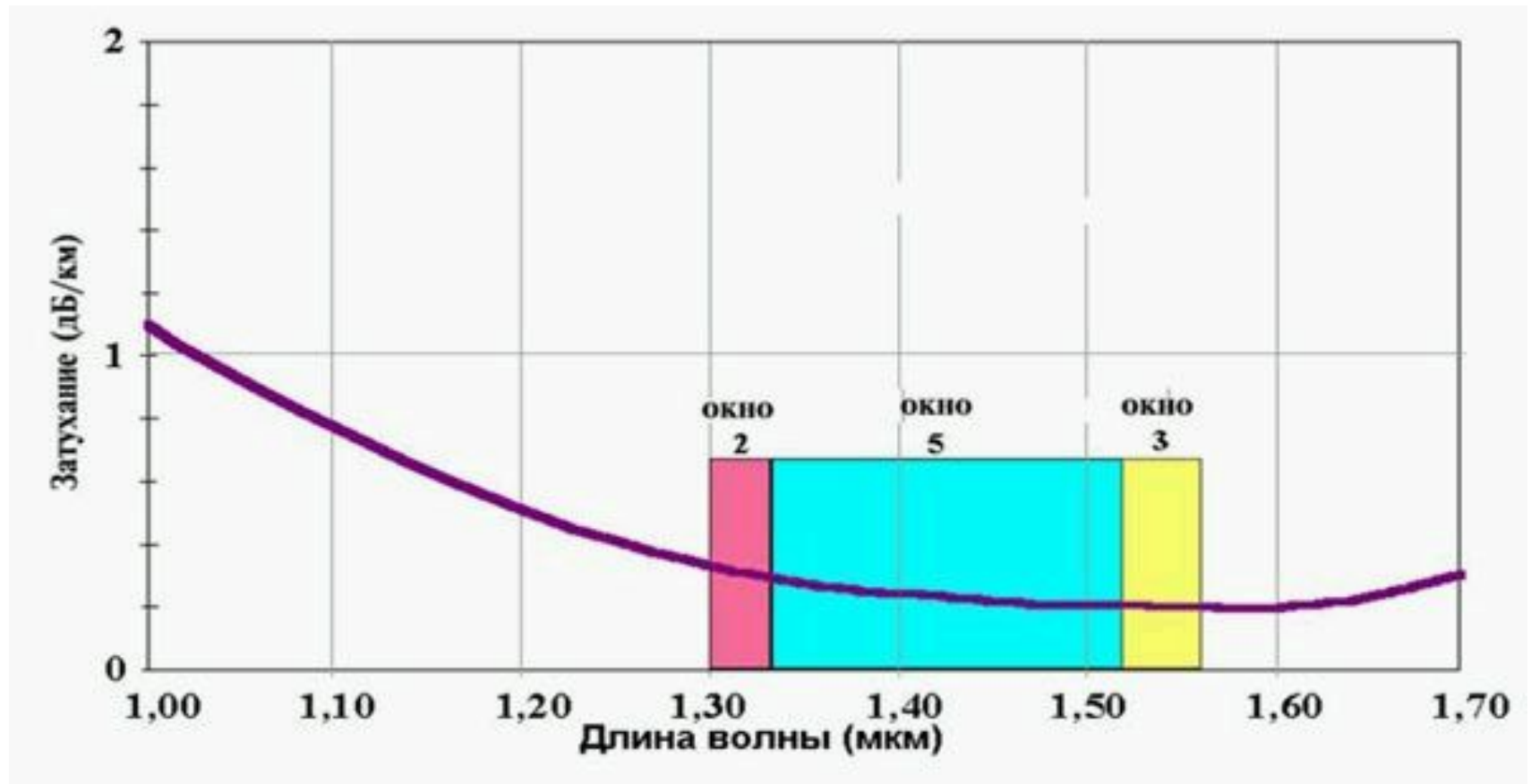




# Затухание многомодовых волокон

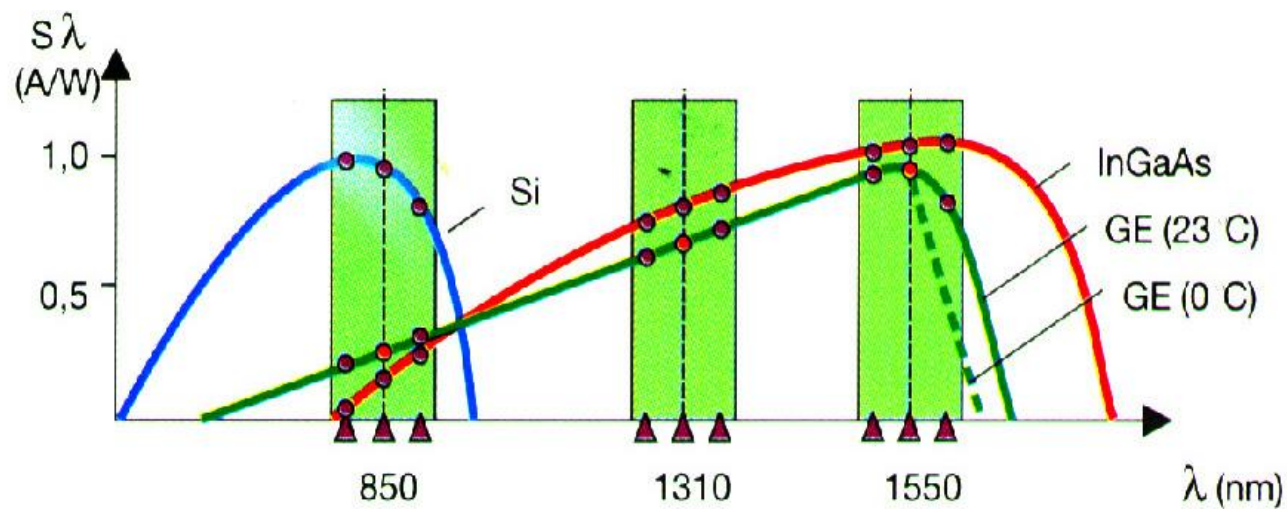


# Затухание одномодовых волокон



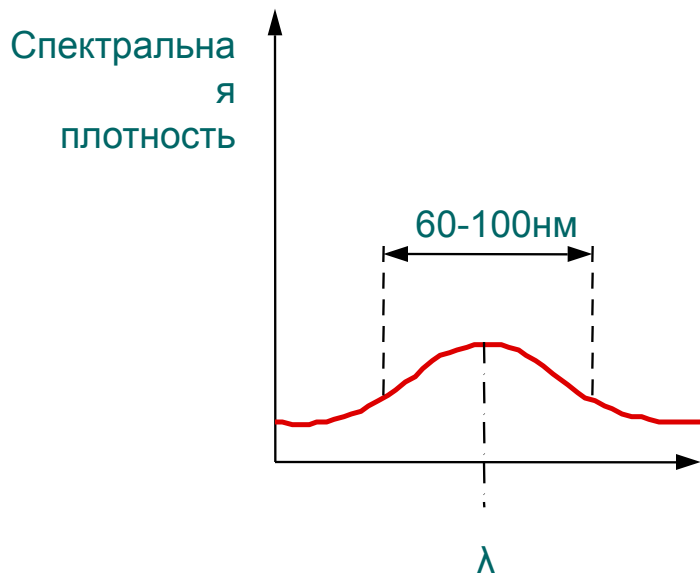
**Зависимость коэффициента затухания от длины волны одномодового оптического волокна**

# Спектральная чувствительность детекторов

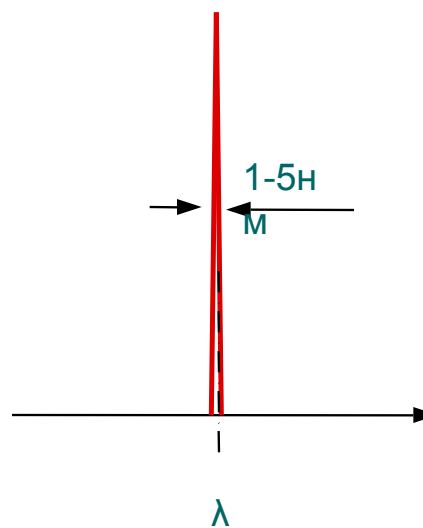


# Спектр излучения лазера и LED

**LED**  
**(светодиод)**  
от -15 до -25дБмВт

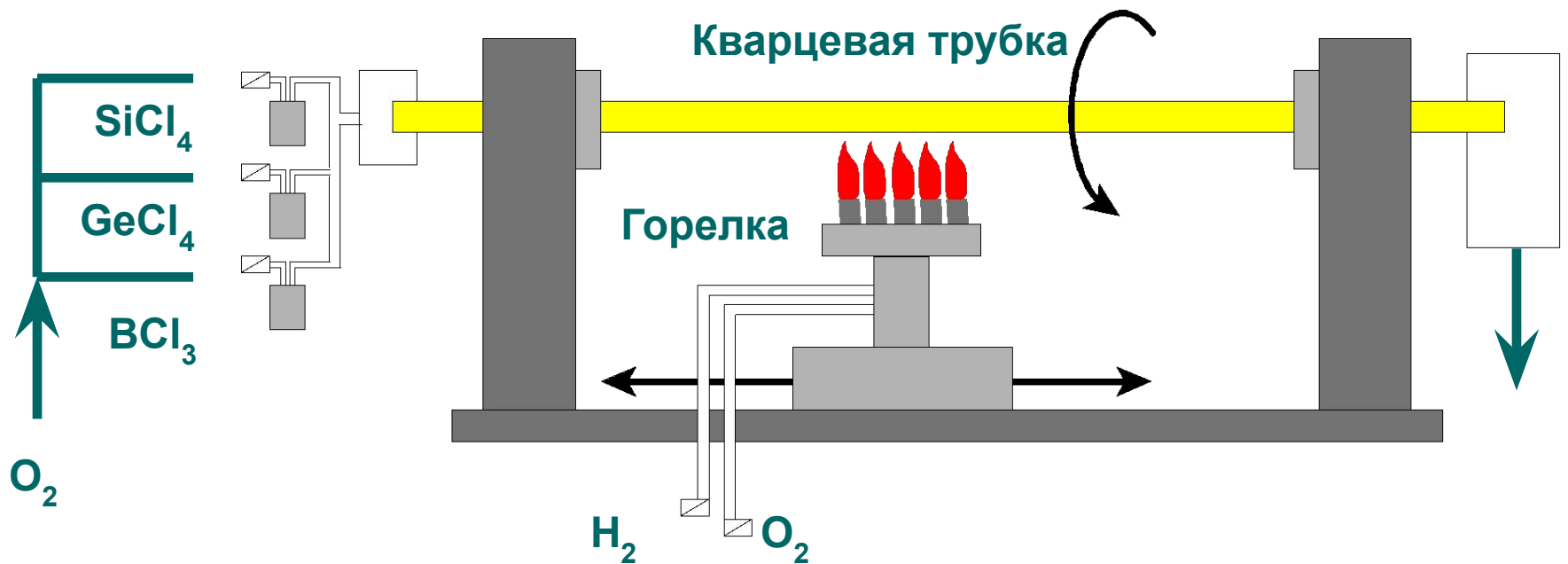


**LASE**  
+5 до -10  
дБмВт

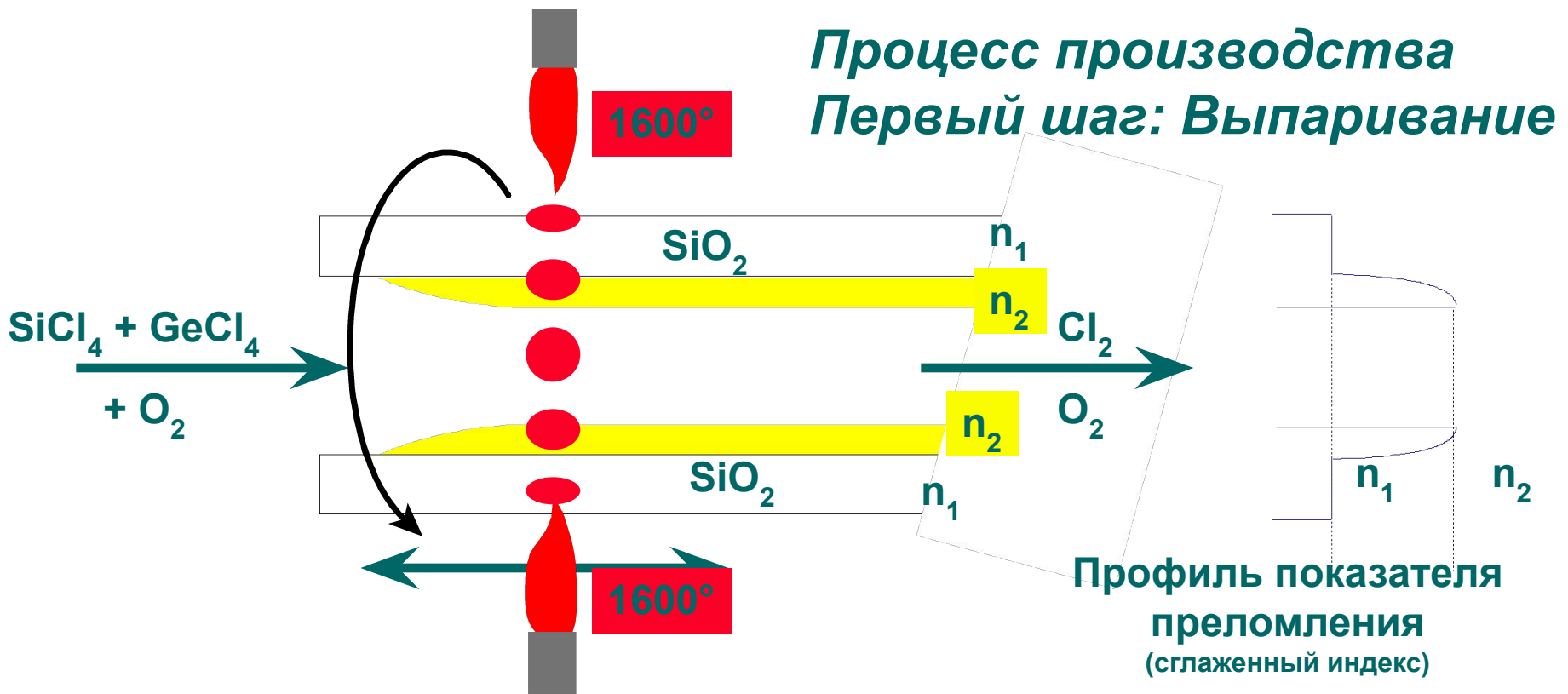


# Производство ММ волокон

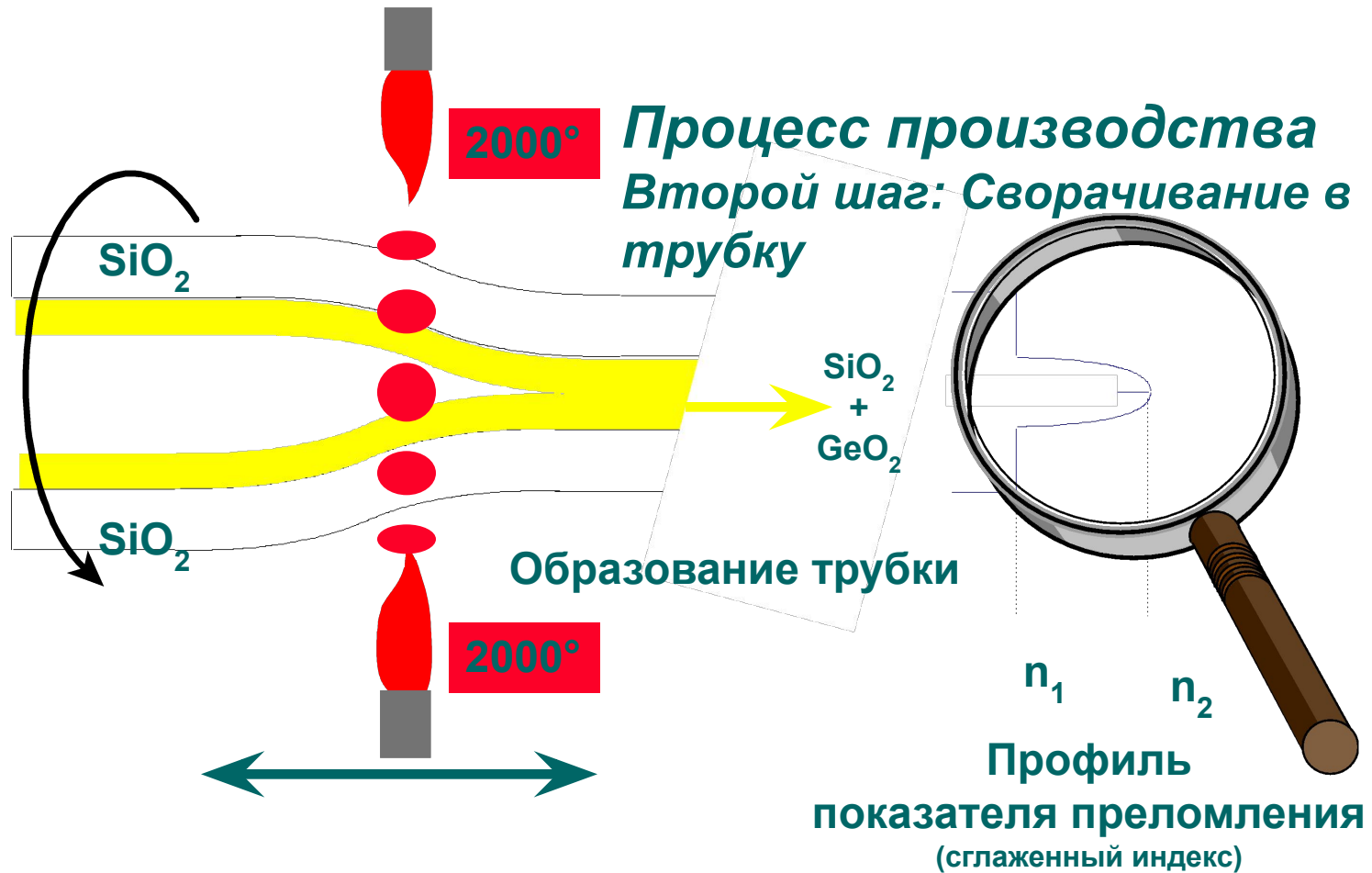
Метод модифицированного химического осаждения путем выпаривания (MCVD-Process)



# MCVD-процесс



# «Схлопка»



# Протяжка

## Установка для вытягивания волокна





# И вот, что выходит в результате



# Режимы передачи

Существует два способа ввести свет в ММ волокно. Их называют режимами передачи.

- **Полный режим**

- Сердцевина волокна полностью освещена (=> все теоретически возможные моды возбуждены).
- Обычно при использовании LED.
- Ширина полосы пропускания для волокна измеряется обычно при условии полного режима передачи.



- **Ограниченный режим (напр. Gigabit Ethernet)**

- Сердцевина волокна освещена не полностью (=> **не** все теоретически возможные моды возбуждены).
- Обычно при использовании лазерных источников.
- Обычно полоса пропускания шире при использовании



# Цветовое кодирование волокон

Все оптические волокна окрашиваются по определенной цветовой схеме:

											
rot	grün	gelb	blau	weiss	violett	orange	schwarz	grau	braun	rosa	türkis
											
rot/ 1 Ring	grün/ 1 Ring	gelb/ 1 Ring	blau/ 1 Ring	weiss/ 1 Ring	violett/ 1 Ring	orange/ 1 Ring	nature/ 1 Ring	grau/ 1 Ring	braun/ 1 Ring	rosa/ 1 Ring	türkis/ 1 Ring



# Обзор различных покрытий для волокна

## Плотный буфер

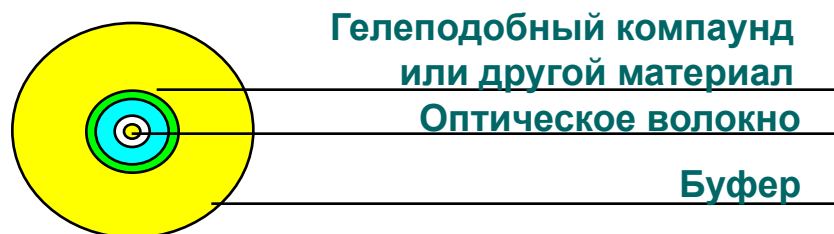
Плотно прилегает; из термопластика.



## Полу-плотный буфер

Воздушная прослойка в несколько сотых долей миллиметра.

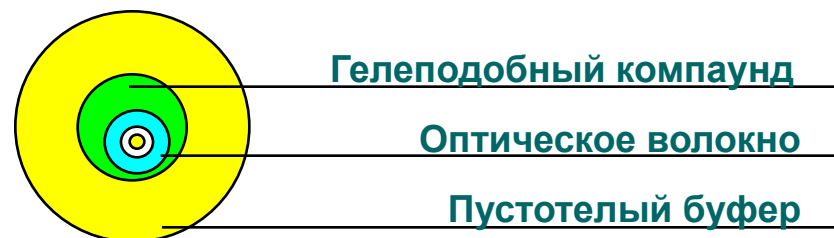
- легче снимается вторичное покрытие
- минимальные потери из-за микроизгибов



## Пустотельный буфер

Воздушная прослойка в несколько десятых долей миллиметра.

Прослойка обычно заполнена водоотталкивающим гелем.



# Соединения волокон

Существуют три 3 способа соединения оптических волокон:

- Разъемное соединение           напр. разъем
- Квази-разъемное соединение   напр. mechanical splice
- Не разъемное соединение       напр. сварное соединение

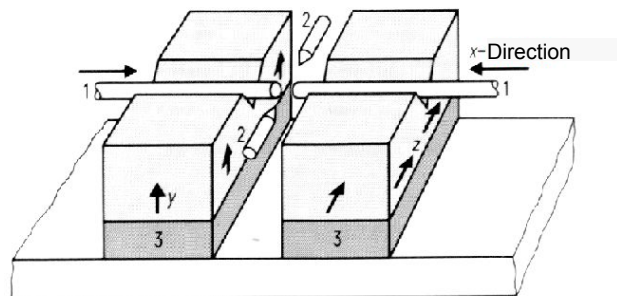
Какой способ использовать зависит от:

- надежности или требований к соединению
- требуемой или необходимой гибкости
- СТОИМОСТИ

# Неразъемное соединение

## Принцип работы

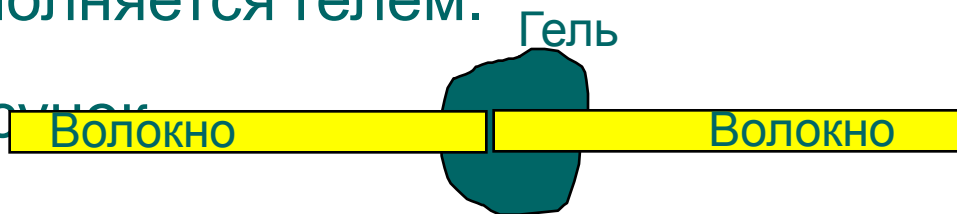
- Очищенные и сколотые волокна совмещаются друг с другом торцами как можно плотнее в сварочном аппарате (по возможности без горизонтальных или вертикальных смещений). Свариваются. Затем, сварное соединение защищается так называемой гильзой защиты сварного соединения.



# Квази-разъемное соединение

- Принцип работы
  - Два качественно сколотых волокна совмещаются торцами.
  - Для улучшения характеристик место соединения между двумя волокнами заполняется гелем.

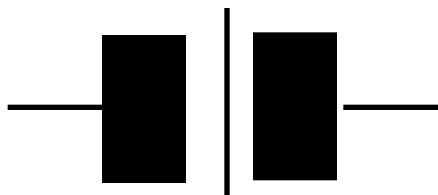
• Рис. 1



# Разъемное соединение

## Принцип работы

- Коннектор / адаптер / коннектор



Существует несколько типов соединений, отличающихся способом полировки наконечника и своими параметрами (RL, IL). Это:

- Плоский контакт
- Physical Contact (PC)
- Angled Physical Contact (APC)



# Обзор

<b>Criteria's</b>	<b>Detachable<sup>2</sup></b>	<b>Quasi – Detachable</b>	<b>Not – Detachable</b>
Insertion loss $\alpha_s$ in [dB]	$0,05 < \alpha_s < 0,75$	$0,1 < \alpha_s < 0,5$	$0,05 < \alpha_s < 0,2$
Return loss $\alpha_R$ in [dB]	$15 < \alpha_R < 80$	$\alpha_R < 40$	$\alpha_R < 80$
Mounting on field	Appropriate	Appropriate	Appropriate
Repeated disconnect and connect	Very simple, without equipment and without the need of qualified personnel	Simple, simple equipment and qualified personnel needed.	expensive, high-quality equipment and need of very high qualified personnel.
Reliability / Lifespan	ca. 500 - 2000 Pcs. Cycles	Not	Very high
Costs <ul style="list-style-type: none"> <li>• Equipment</li> <li>• Initial Installation</li> <li>• Repeated disconnect and connect</li> </ul>	medium high very low	low high low	high low high
Alignment principle	Pins / sleeve (mech.)	V – groove (mech.)	Substance conclusive
Fiber contact	As usually a Physical Contact	Immersion between separation-surfaces	Substance conclusive

2

Dependent on the Connector Type and polishing (PC, SPC, UPC, APV = HRL)

- PC** Physical Contact, Return loss of approximately 30 dB, can be reached by manual polishing
- SPC** Super Physical Contact, Return loss of approximately 40dB, can be reached by machine polishing
- UPC** Ultra Physical Contact, Return loss of approximately 50 dB, can be reached by machine polishing and optical testing of the fiber positioning
- APC (HRL)** Angle Physical Contact (High Return Loss), Return loss of approximately 60 dB, can be reached by machine polishing (usuallyl R. 8° Angle Polished)



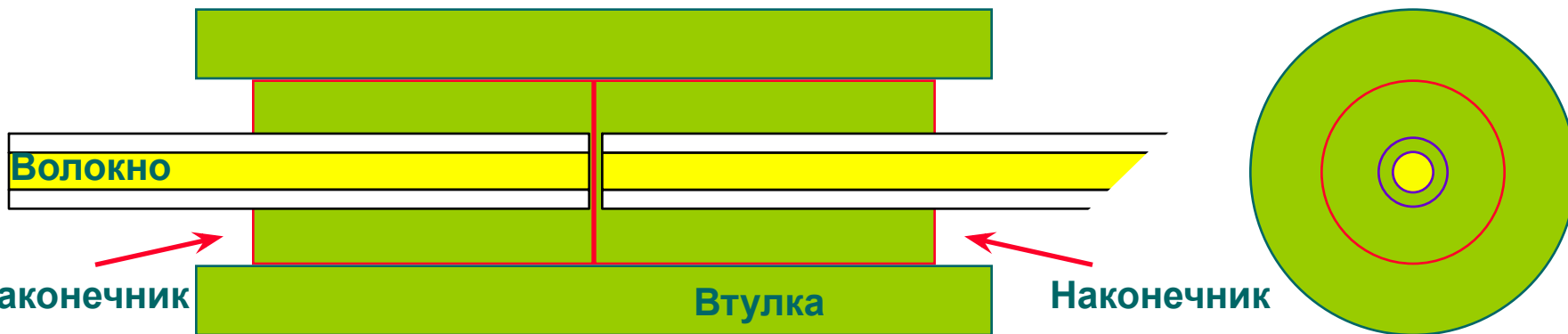
# Технология совмещения – Цилиндрическая гильза

## Допустимое отклонение

Наконечник 2.4990 - 2.4995  
Втулка 2.4995 - 2.5000

## Материалы

Наконечник железо, карбид вольфрама  
Втулка железо, карбид вольфрама



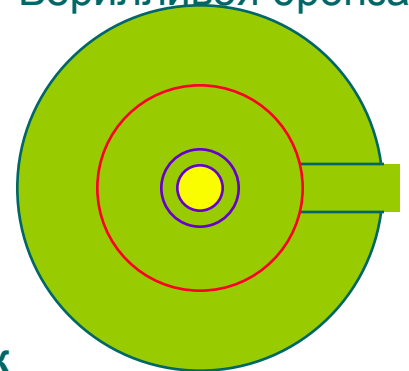
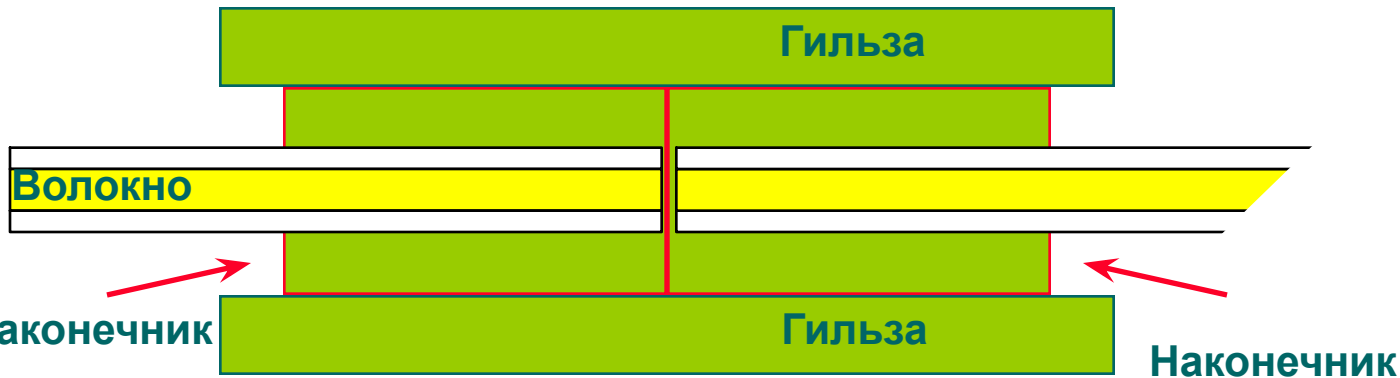
# Технология совмещения - Эластичная гильза

## Допустимое отклонение

Наконечник 2.4985 - 2.4995 мм  
Гильза Gauge Retention Force 2.9 - 5.9 N

## Материалы

Наконечник Керамика (Circonia)  
Карбид Вольфрама  
Гильза Керамика (Circonia)  
Берилливая бронза

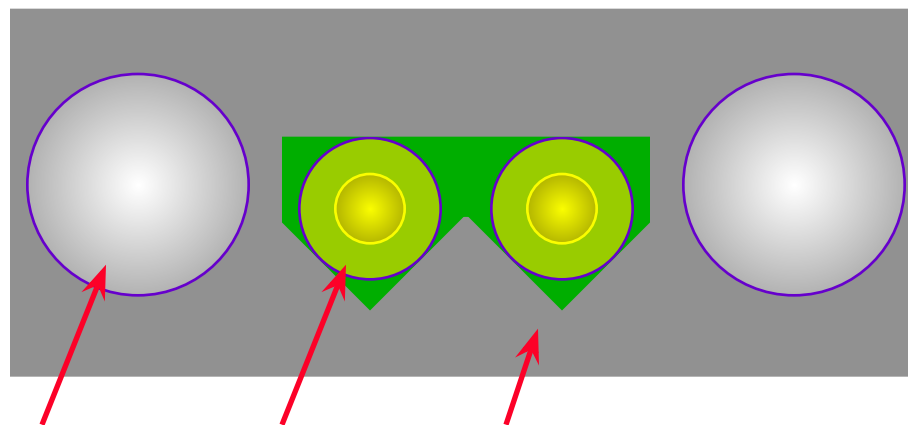


# Новые технологии совмещения – V-образный канал

## Материалы

V-обр. желоб      Силиконовая подложка

Центровщик      Карбид вольфрама



Центровщик

Волокно

V - обр. желоб

# Вносимые потери - внутренние

Разницей в:



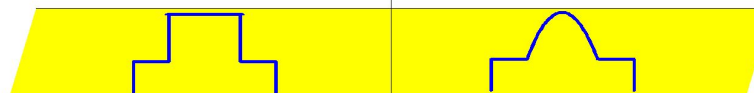
Диаметра ядер



Численных  
Апертура



Профилей  
показателя  
преломления



# Вносимые потери - Внешние

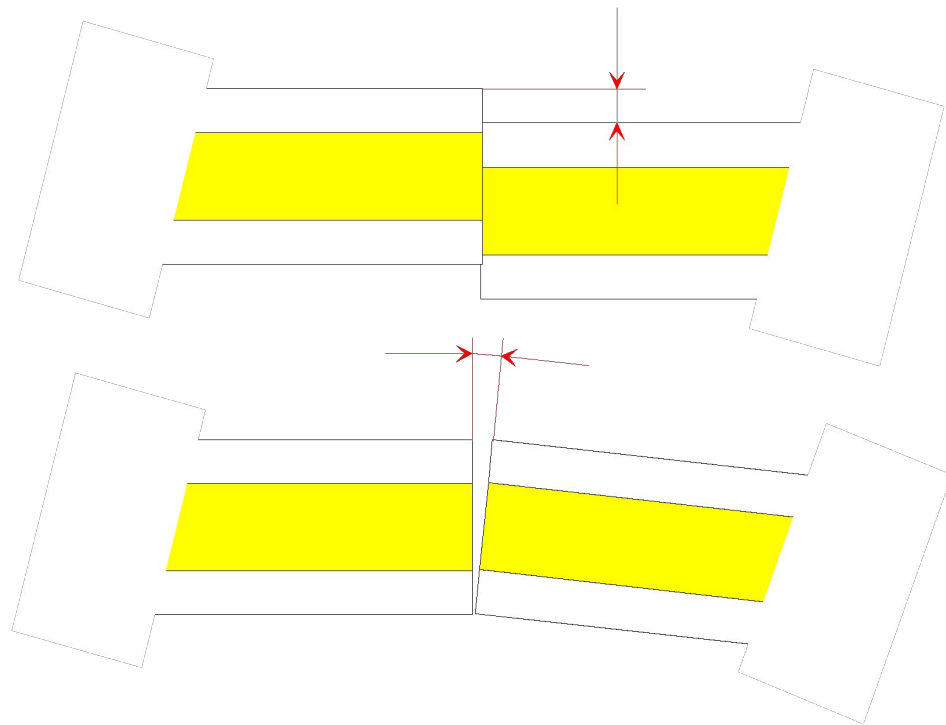
Относительное  
позиционирование:



Горизонтальное  
несовпадение  
волокон



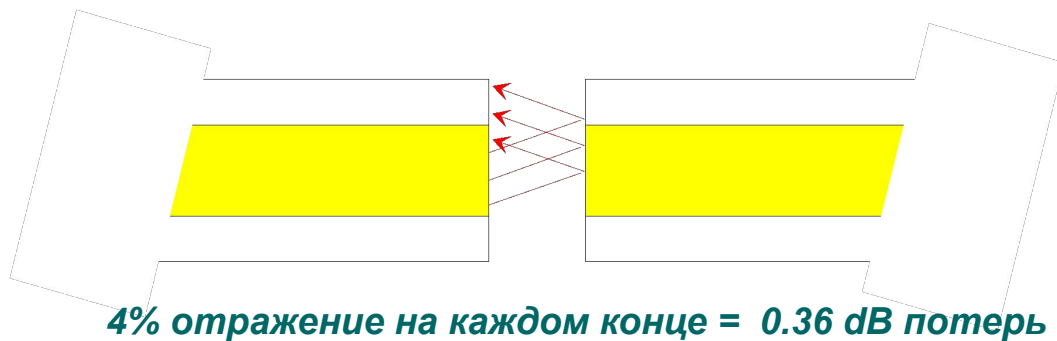
Осевой наклон



# Вносимые потери - внешние



Неплотное прилегание



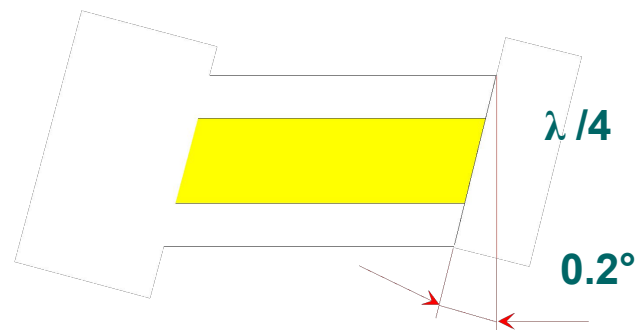
## Подготовка поверхности волокна:



Шероховатость поверхности



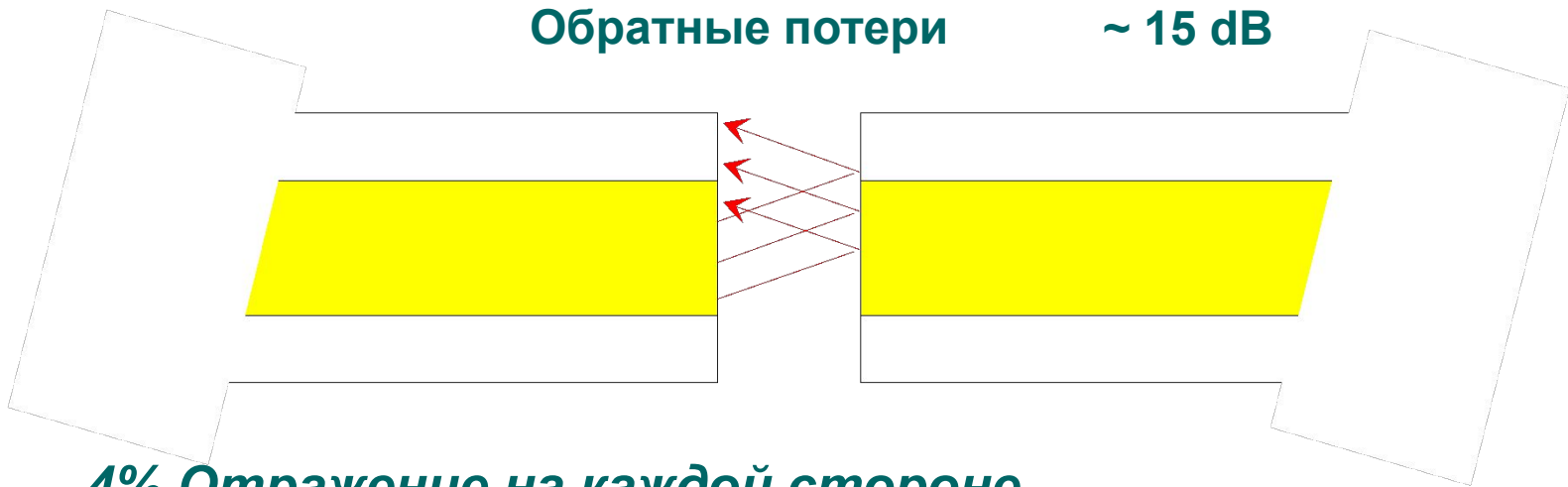
Угол



# Зазор между сердцевинами – нет физического контакта

Параметры передачи

Вносимые потери < 1.0 dB  
Обратные потери ~ 15 dB



*4% Отражение на каждой стороне  
приводит к потерям в 0.36 dB*

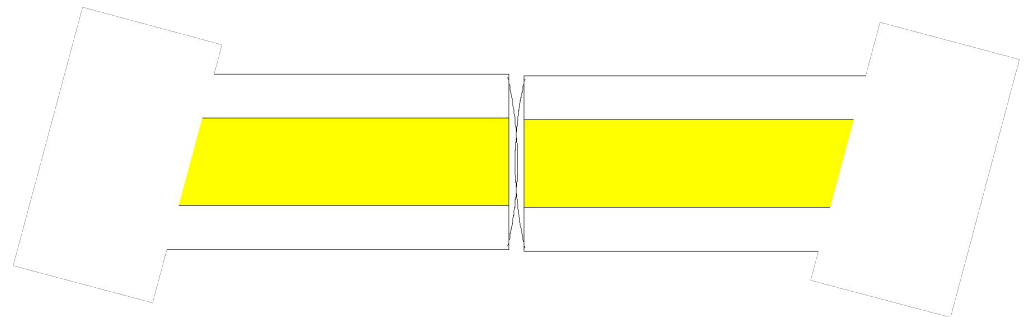


# Торцы наконечников – Сферический контакт

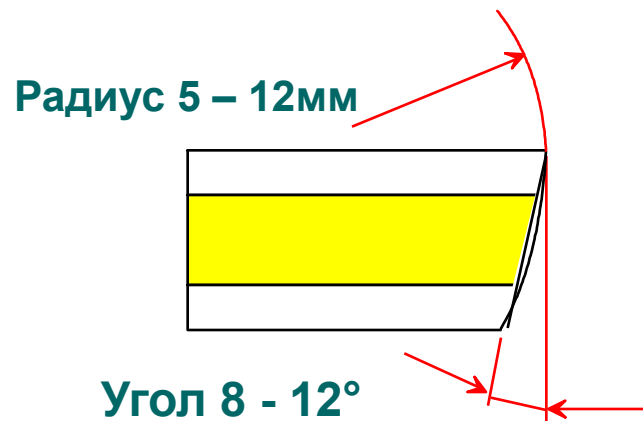


## Параметры передачи

Вносимые потери < 0.5 dB  
Обратные потери > 35 dB



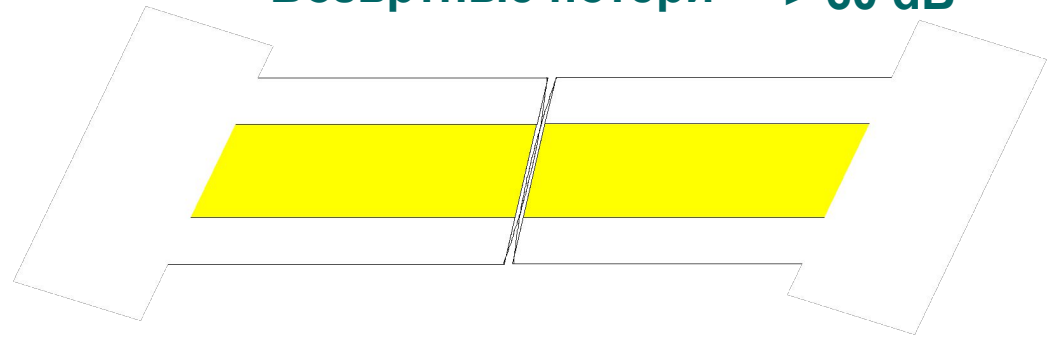
# Угловой сферический физический контакт



## Передаточные характеристики

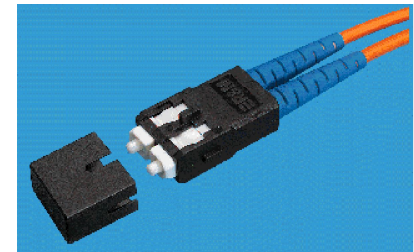
Вносимое затухание < 0.3 dB

Возвртные потери > 60 dB

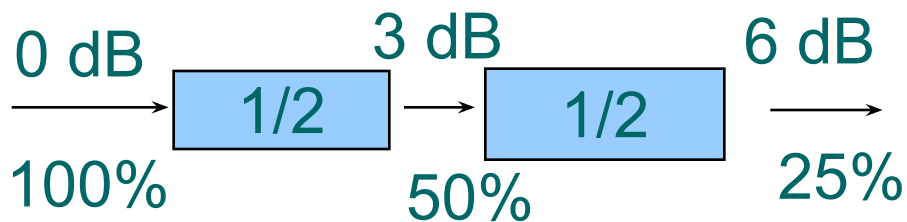


# SC-RJ коннектор

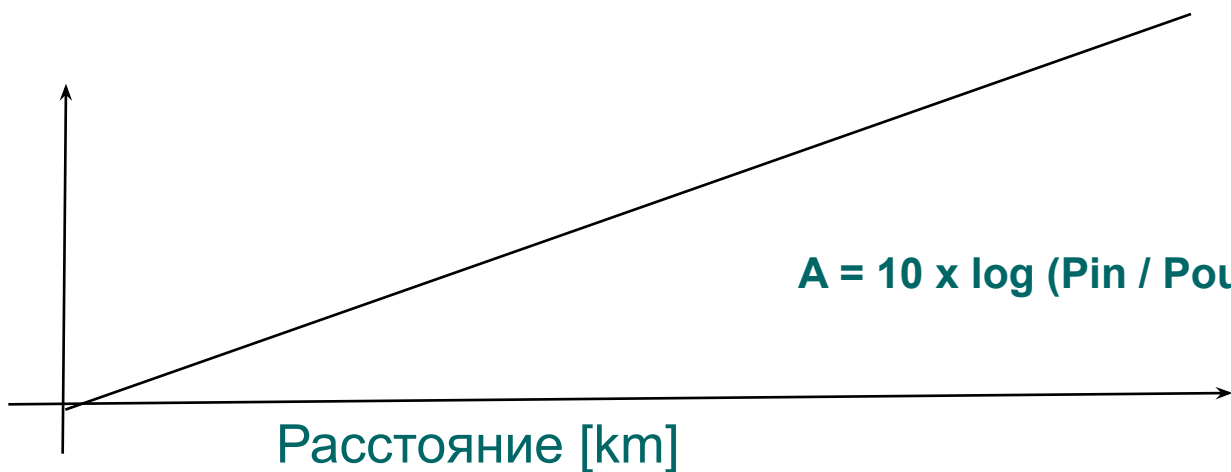
- SFF коннектор с размерами как у RJ45
- Керамический наконечник -> Хорошо известный на рынке
- Высокая плотность портов, примерно в 2 раза с Duplex SC
- Многомодовые и одномодовые
- Обратная совместимость с SC
- Один тип коннектора + адаптер
- Соответствие спецификациям ISO/IEC 11801 и TIA/EIA 568A
- *SCcompact* (or SC-RJ) основан на SC коннекторе
- (согласно с CECC 86265-xxx, IEC 60874-14)  
Возможно соединение с SC Simplex
- Типичное вносимое затухание : < 0.2dB.



# Затухание и мощность



Затухание  
[dB]



# Затухание канала связи

Предполагаемое затухание ВО канала связи

$$ATT = \alpha \times L + A_S \times N_S + A_C \times N_C$$

$\alpha$  : Затухание кабеля [dB/km]

$L$  : Длина кабеля [km]

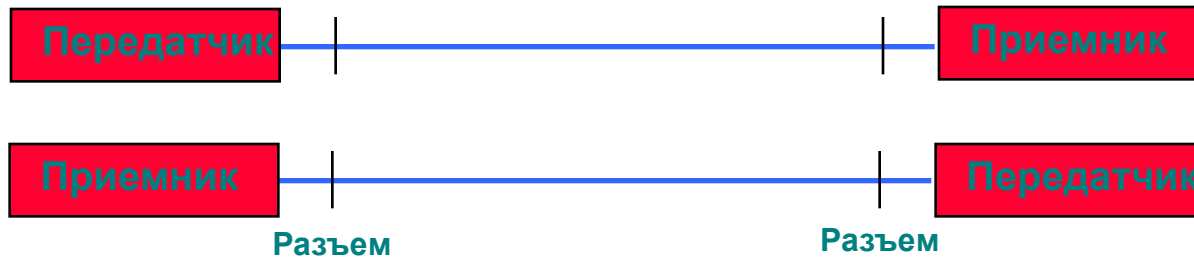
$A_S$  : Затухание на соединении [dB]

$N_S$  : Число соединений

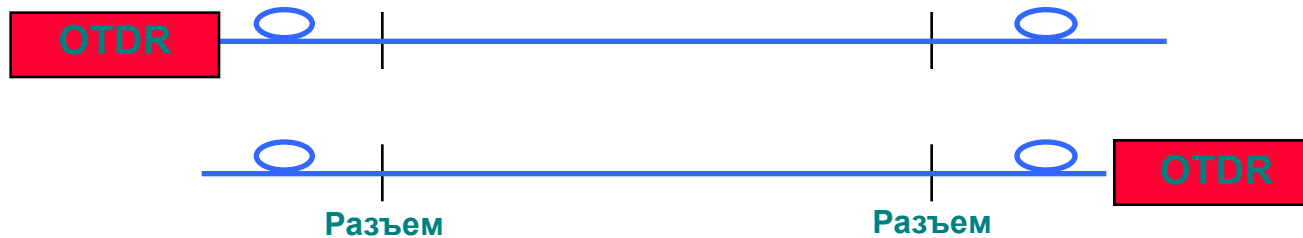
$A_C$  : Вносимые потери коннектора [dB]

$N_C$  : К-во коннекторов

# Измерение затухания / принципы



## Измерение обратных отражений (OTDR)



# Какой метод использовать?

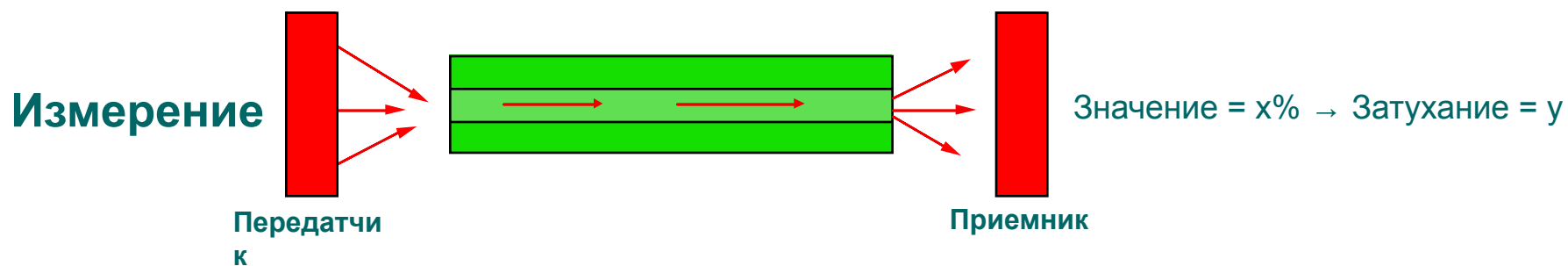
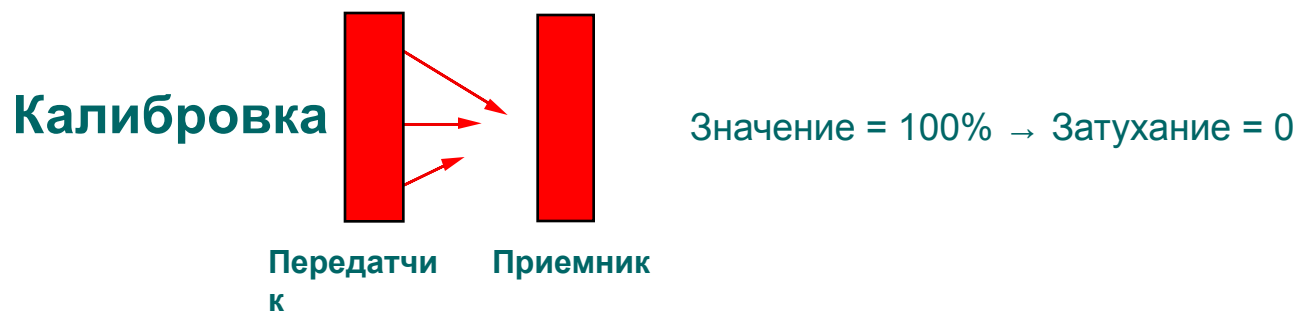
## Измерение затухания:

- всегда при оконечивании кабелей
- для измерения затухания линка

## Измерение обратных отражений:

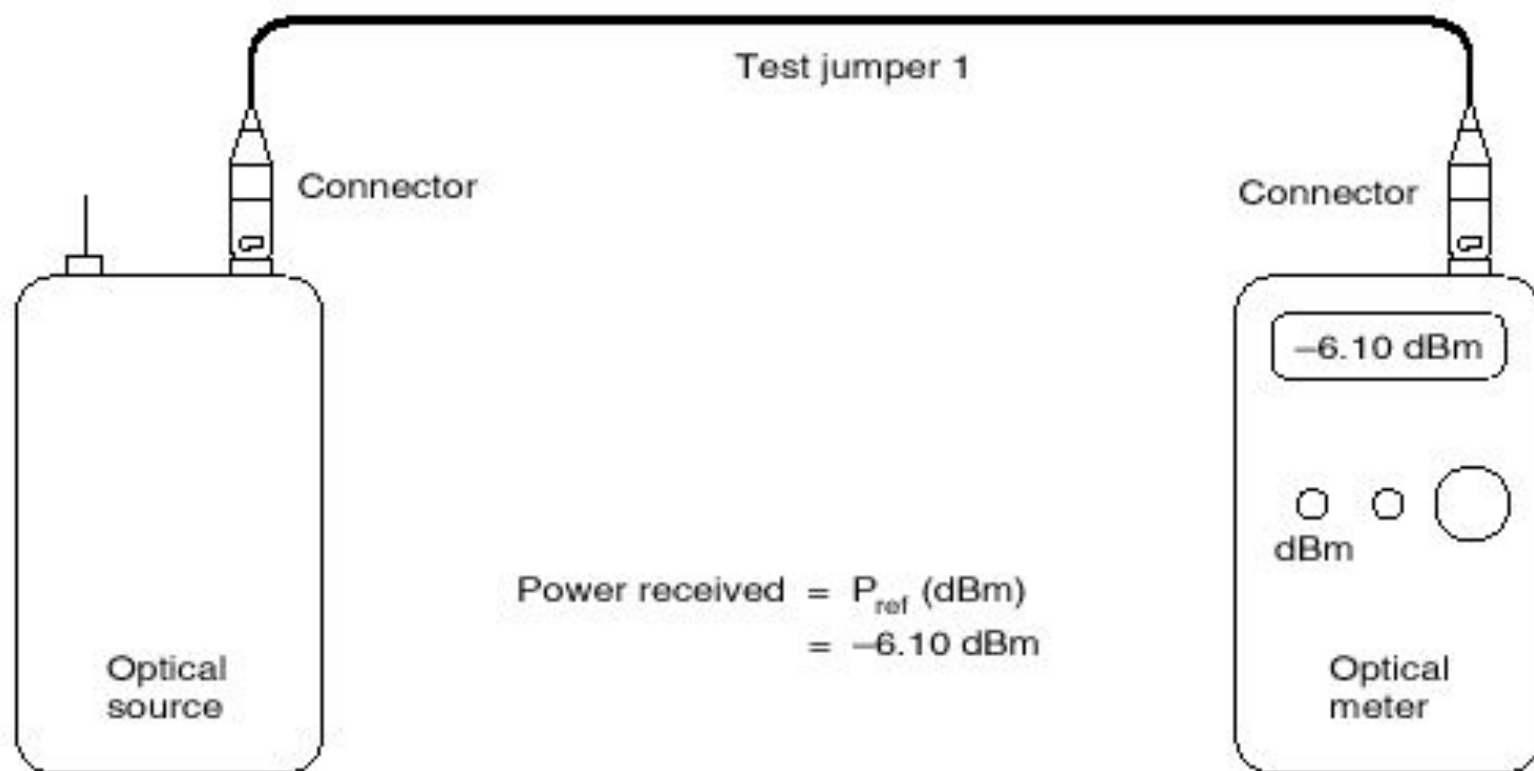
- когда на линке есть ВО муфты
- для кабелей длиной более 200 м
- для сложных линков
- для обнаружения повреждений

# Принцип измерения затухания мощности



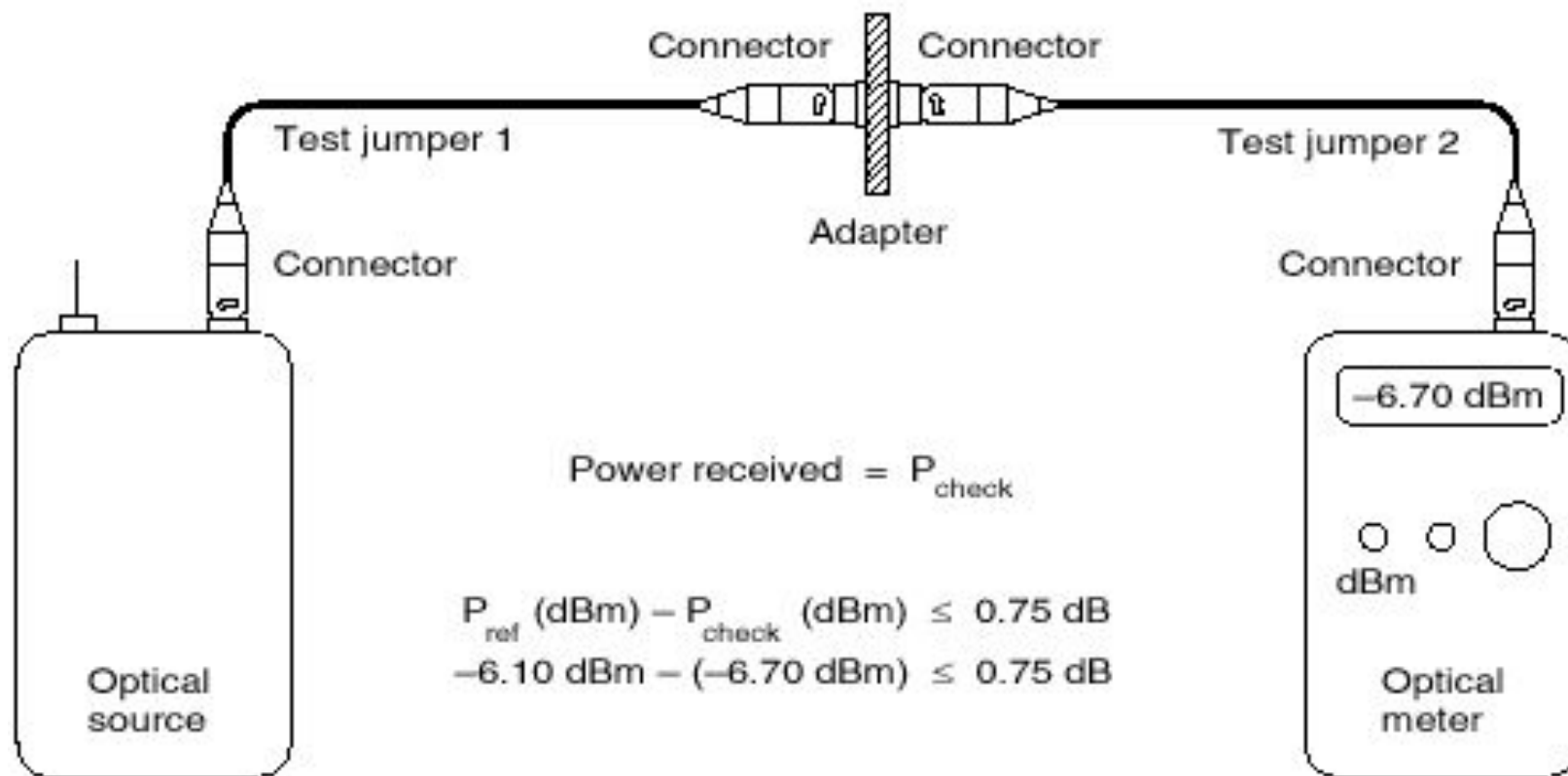


# Принцип измерения затухания мощности



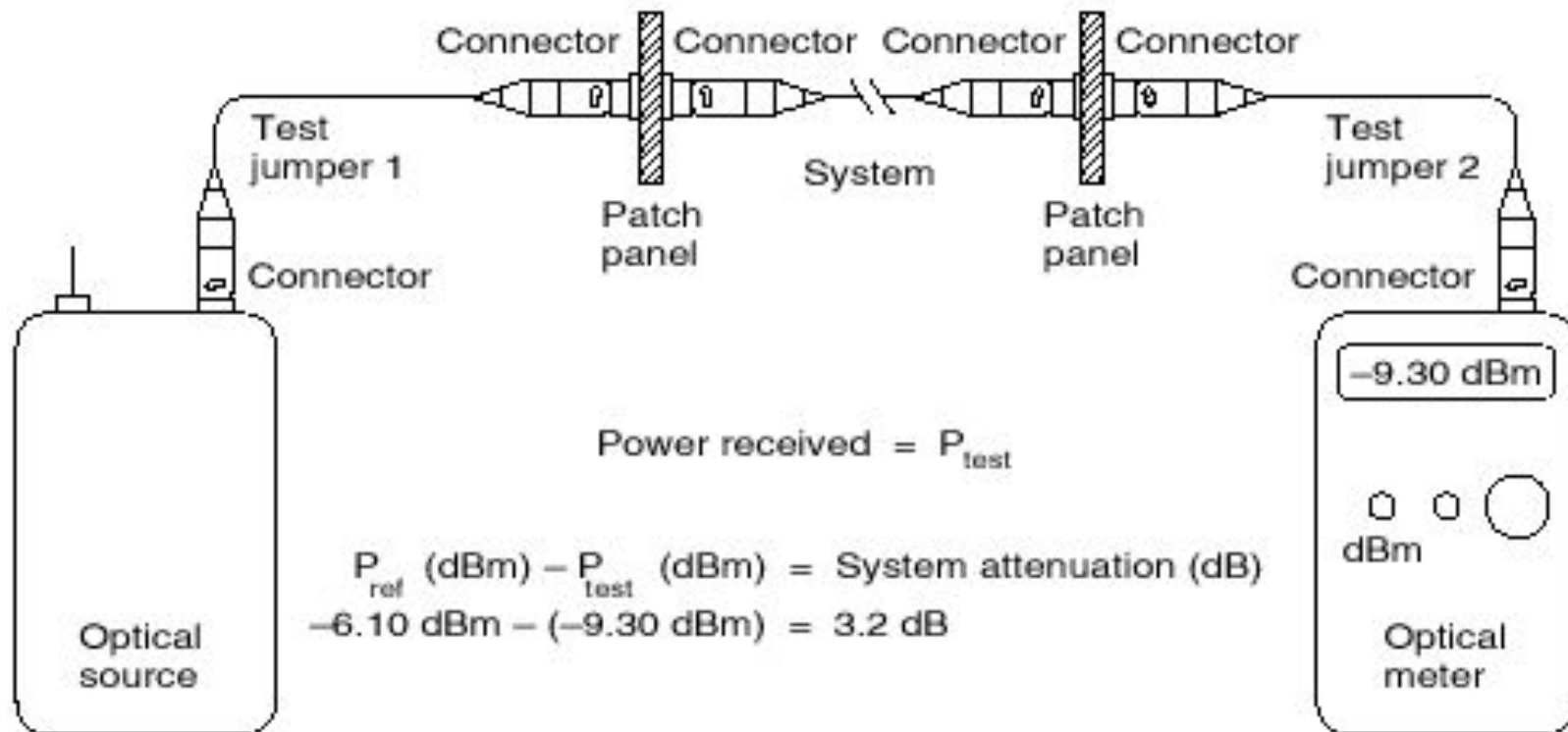
dBm = Decibel milliwatt

# Принцип измерения затухания мощности



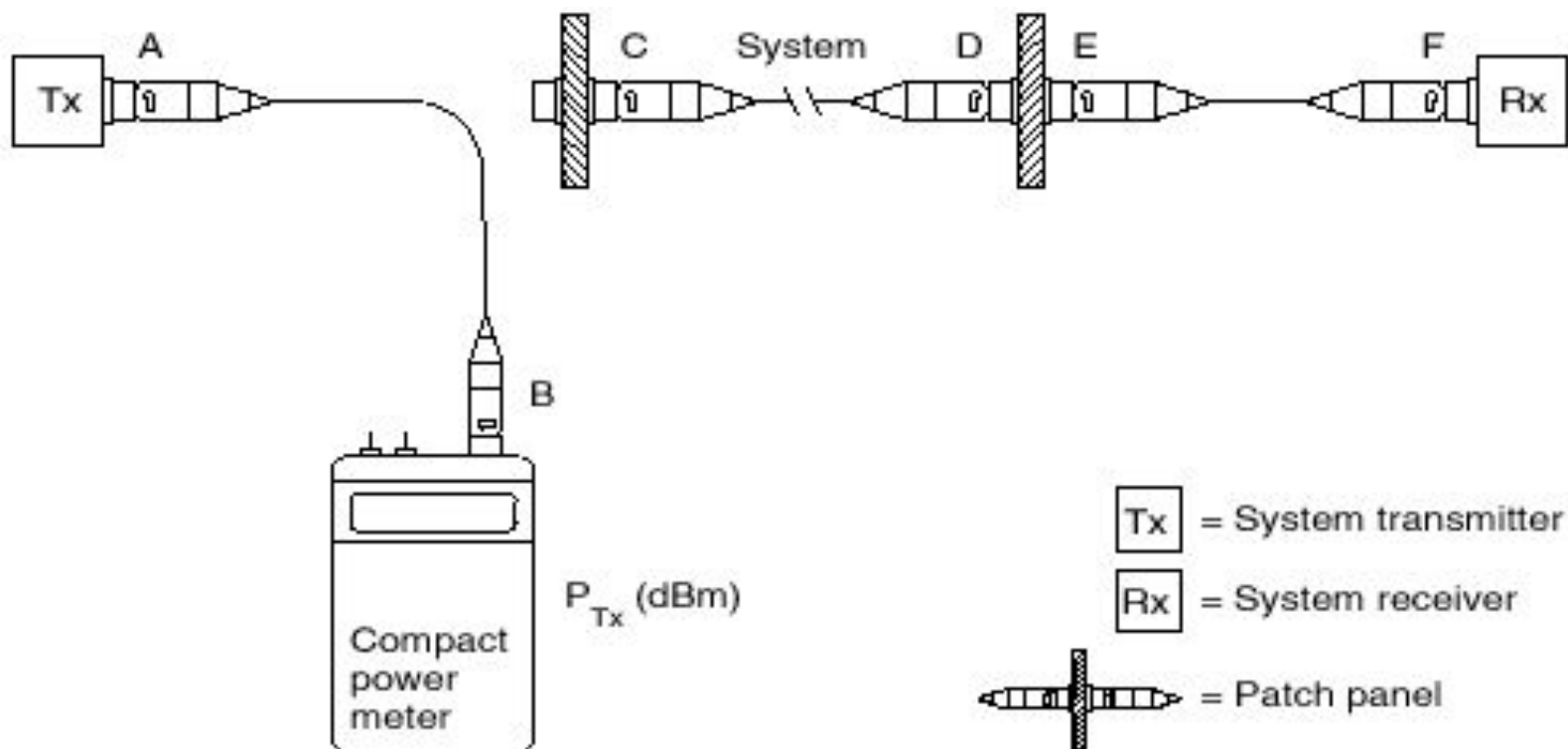
dB = Decibel  
dBm = Decibel milliwatt

# Принцип измерения затухания МОЩНОСТИ



dB = Decibel  
dBm = Decibel milliwatt

# Принцип измерения мощности передатчика

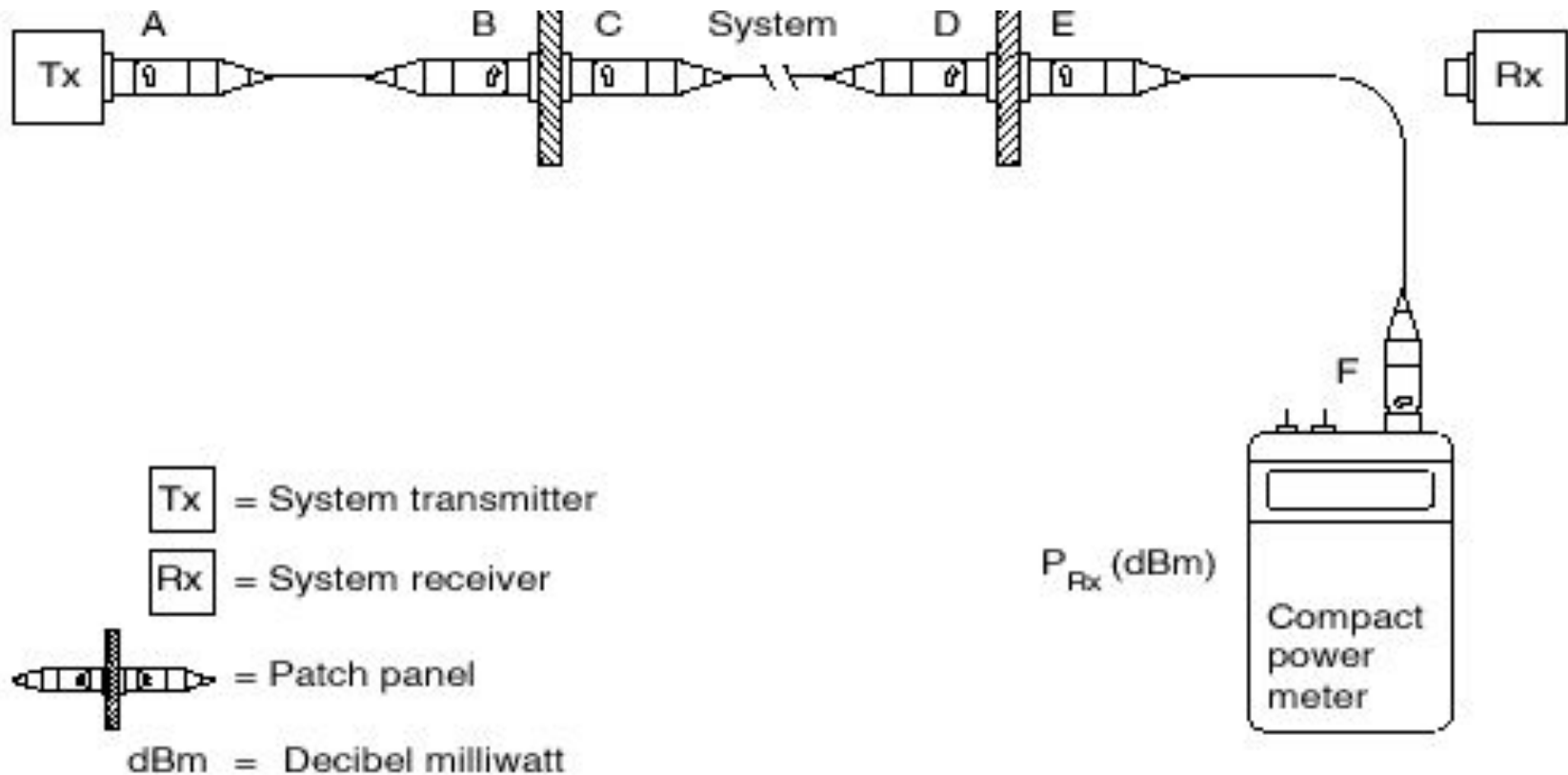


dBm = Decibel milliwatt

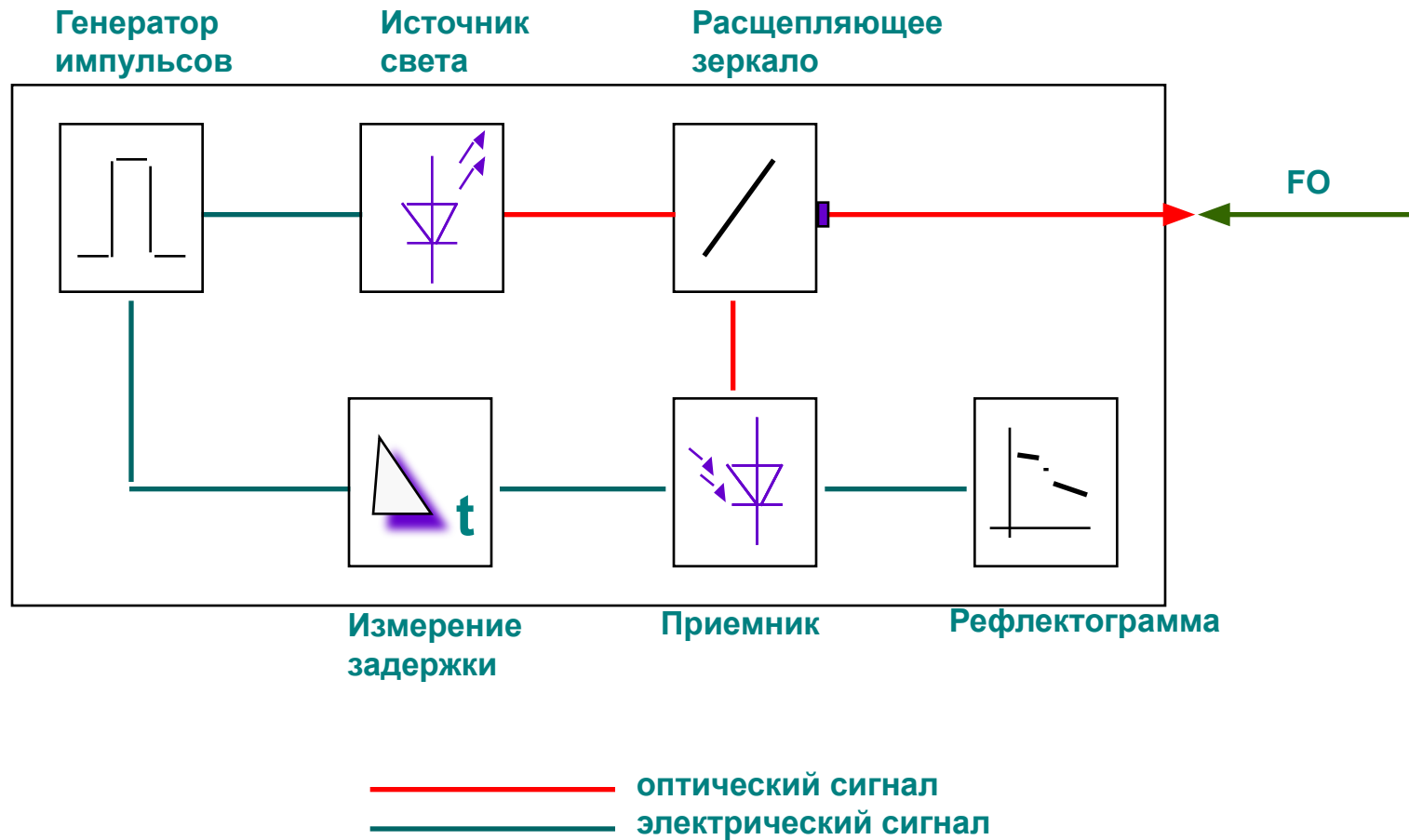


Convincing cabling solutions

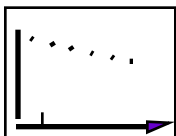
# Принцип измерения принимаемой мощности



# Optical Time Domain Reflectometer (OTDR)



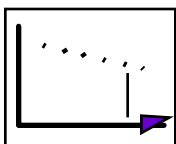
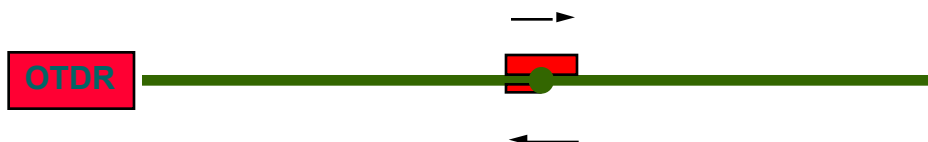
# OTDR измерительная процедура



Импульс света распространяется по оптическому волноводу.



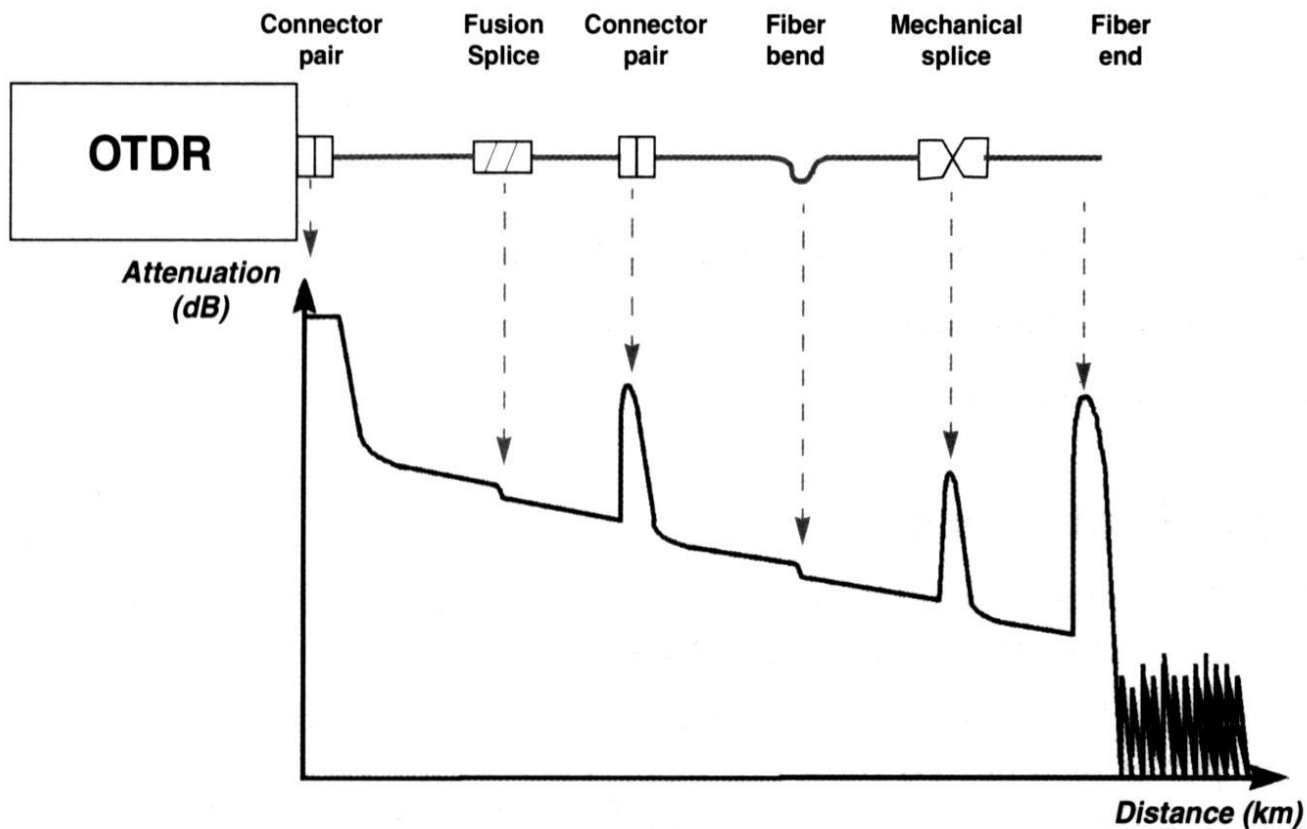
Импульс света частично отражается на неоднородностях.



Отраженный импульс принимается OTDR.



# Пример OTDR рефлектограммы



Typical OTDR trace



# Типичные и стандартизированные значения затуханий

Сварное соединение

Типичное:

MM: approx. 0.05 dB

SM: approx. 0.10 dB

В соответствии со стандартом (ISO 11801):

MM: 0.3 dB

SM: 0.3 dB

Разъемное соединение (IL / RL)

Типичное :

MM: RL: 30 dB IL: approx. 0.3 dB

SM RL: 45 dB IL: approx. 0.1 - 0.2 dB

В соответствии со стандартом (ISO 11801):

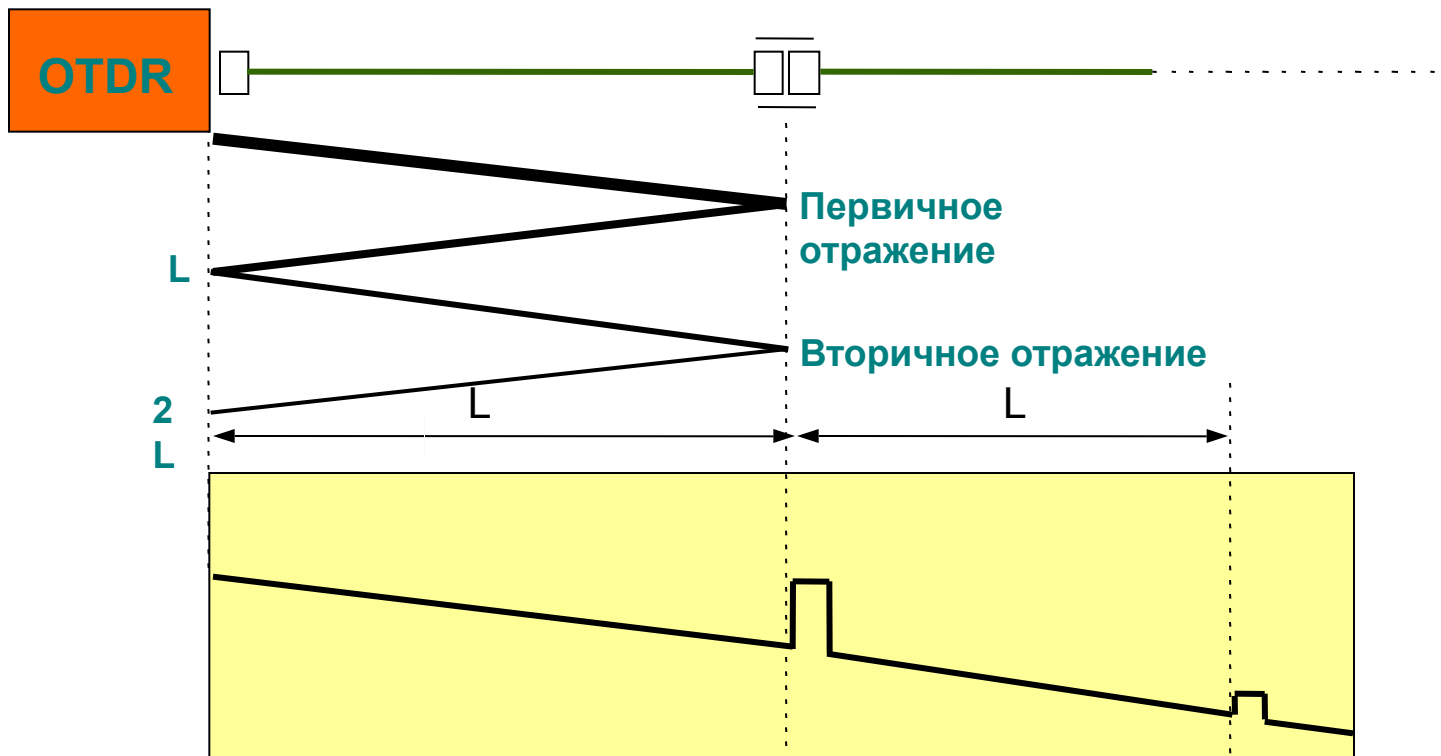
MM:RL: 20 dB IL: 0.75 dB

SM: RL: 35 dB IL: также как для MM

# Приведения и OTDR???



# Вторичные отражения (приведения)



# Вопросы?



Convincing cabling solutions