

Учебный курс R&Mfreenet

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).



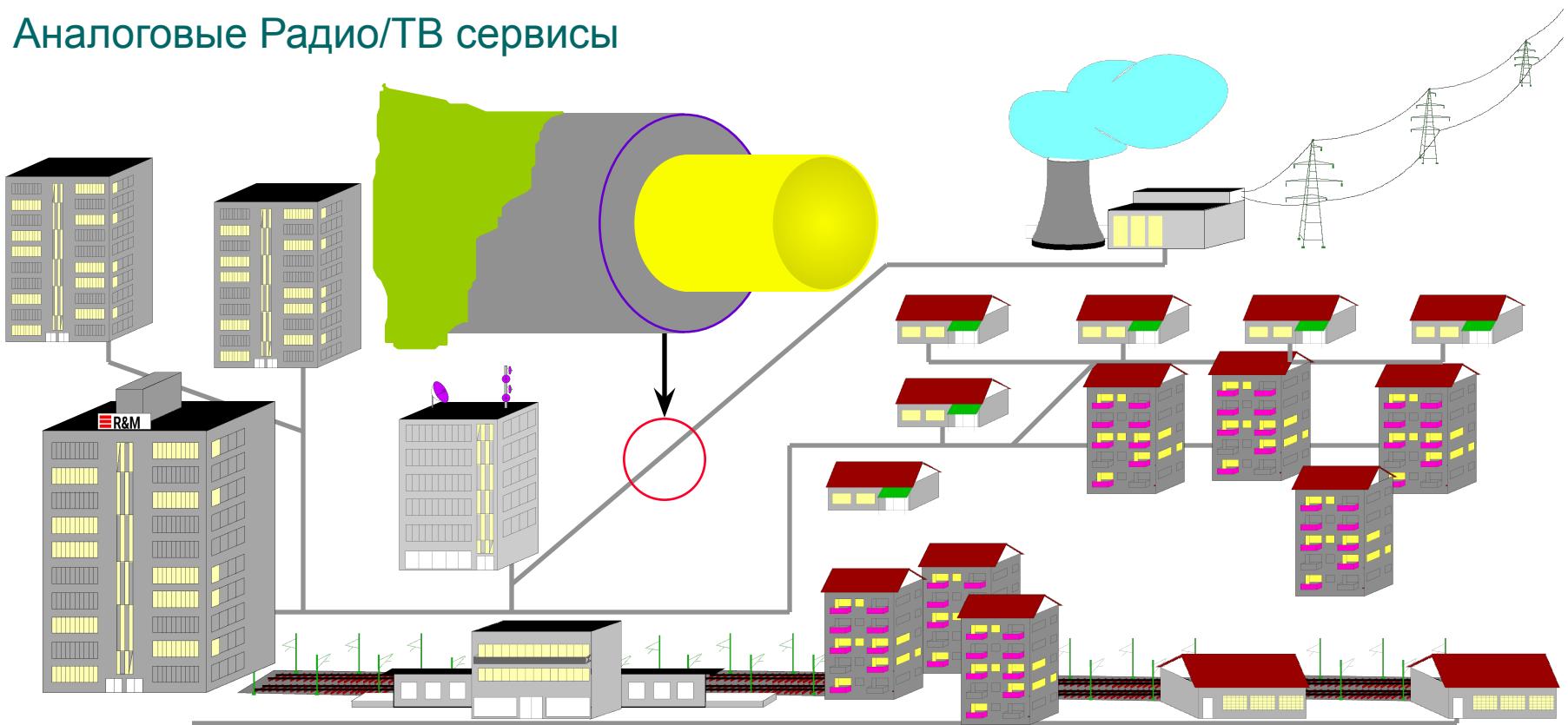
Той волоконно-оптической технологии, о которой мы знаем сегодня, предшествовали два важных научных открытия:

- 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

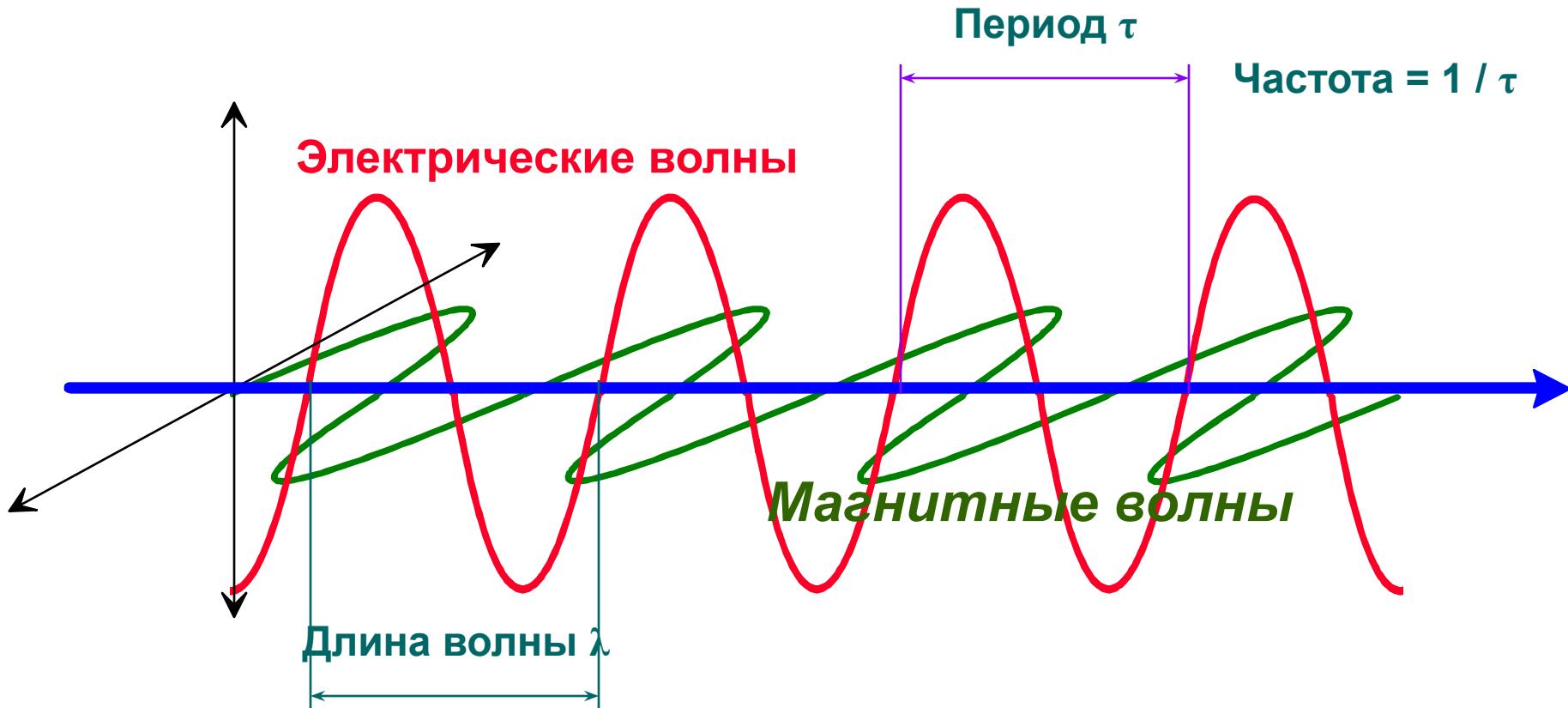
Аналоговые Радио/ТВ сервисы



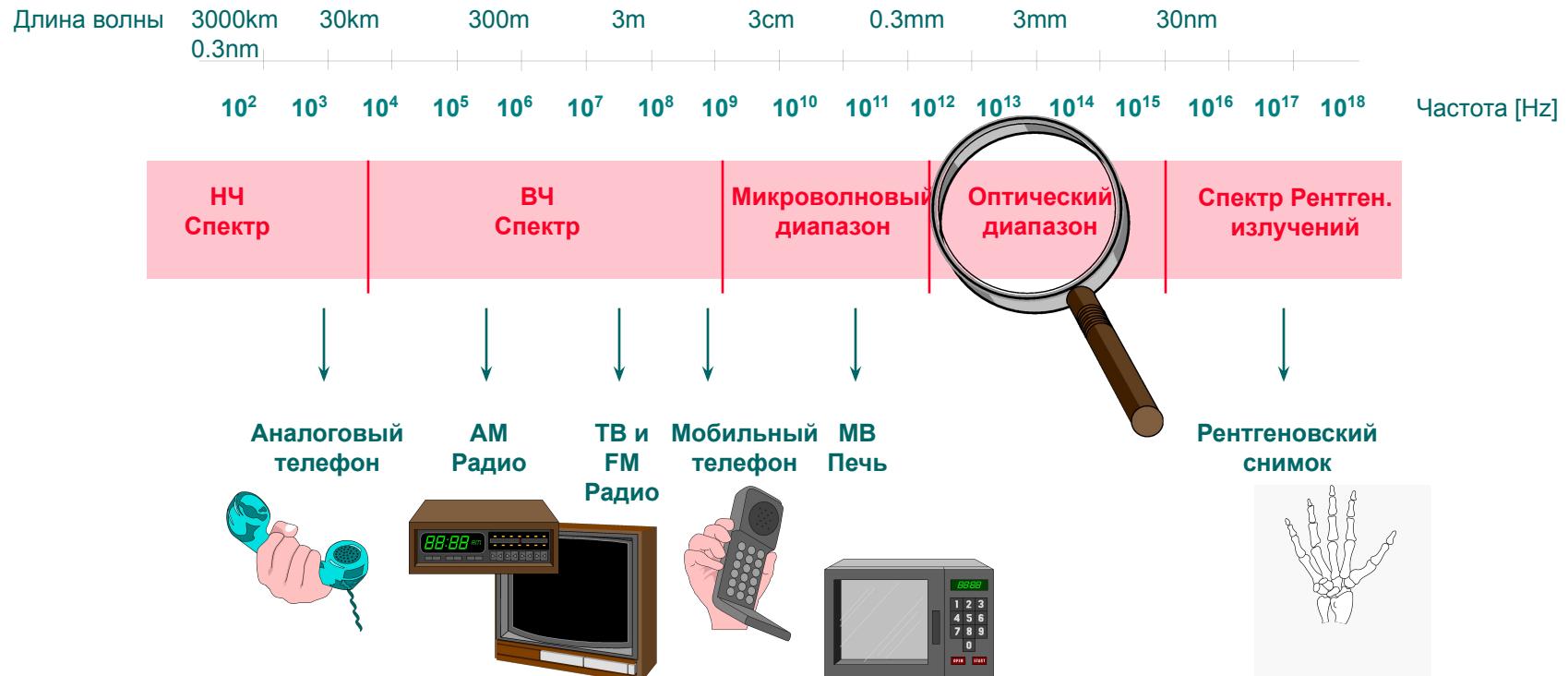
Принцип волоконно-оптической передачи



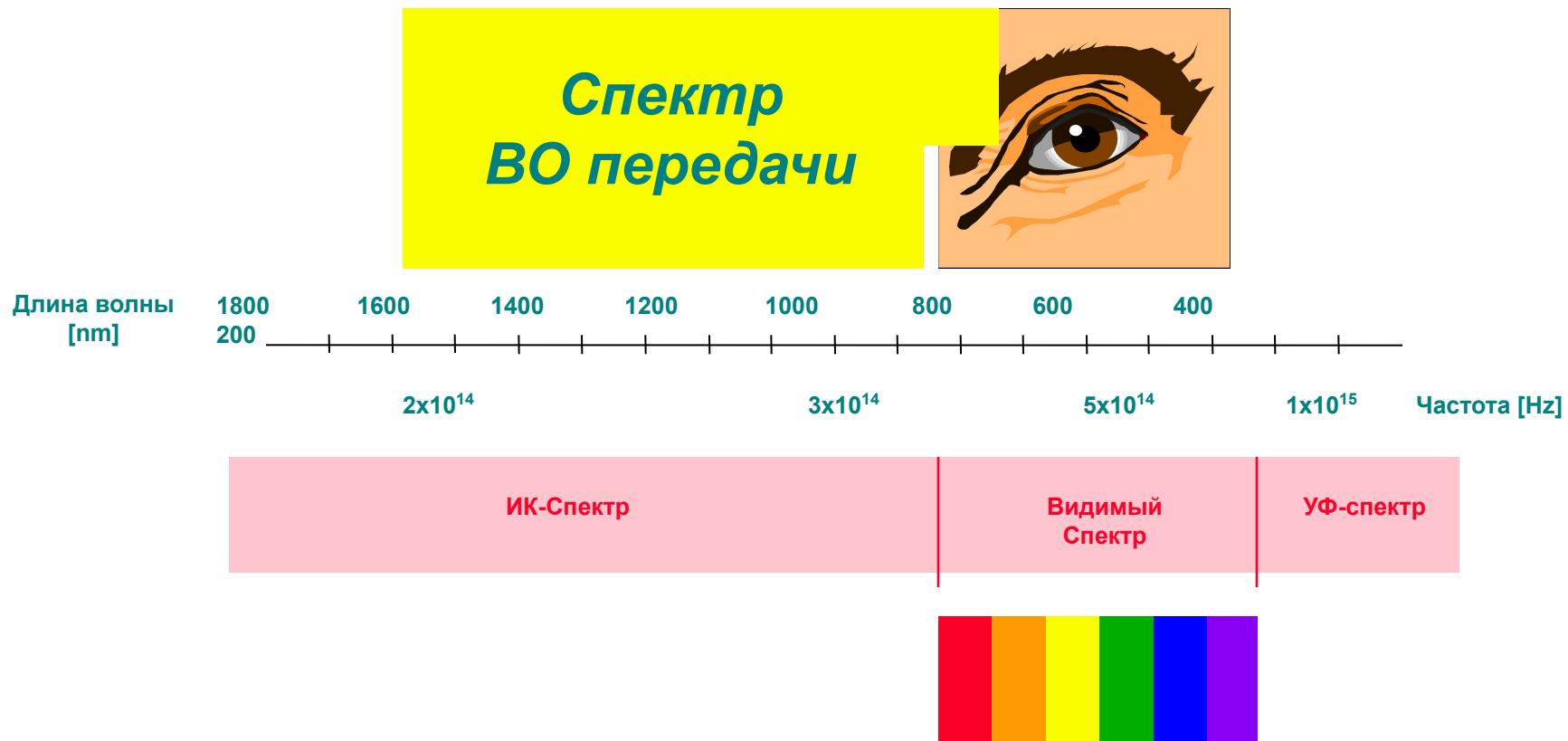
Электромагнитные волны



Шкала длин волн используемых в электромагнитной передачи



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

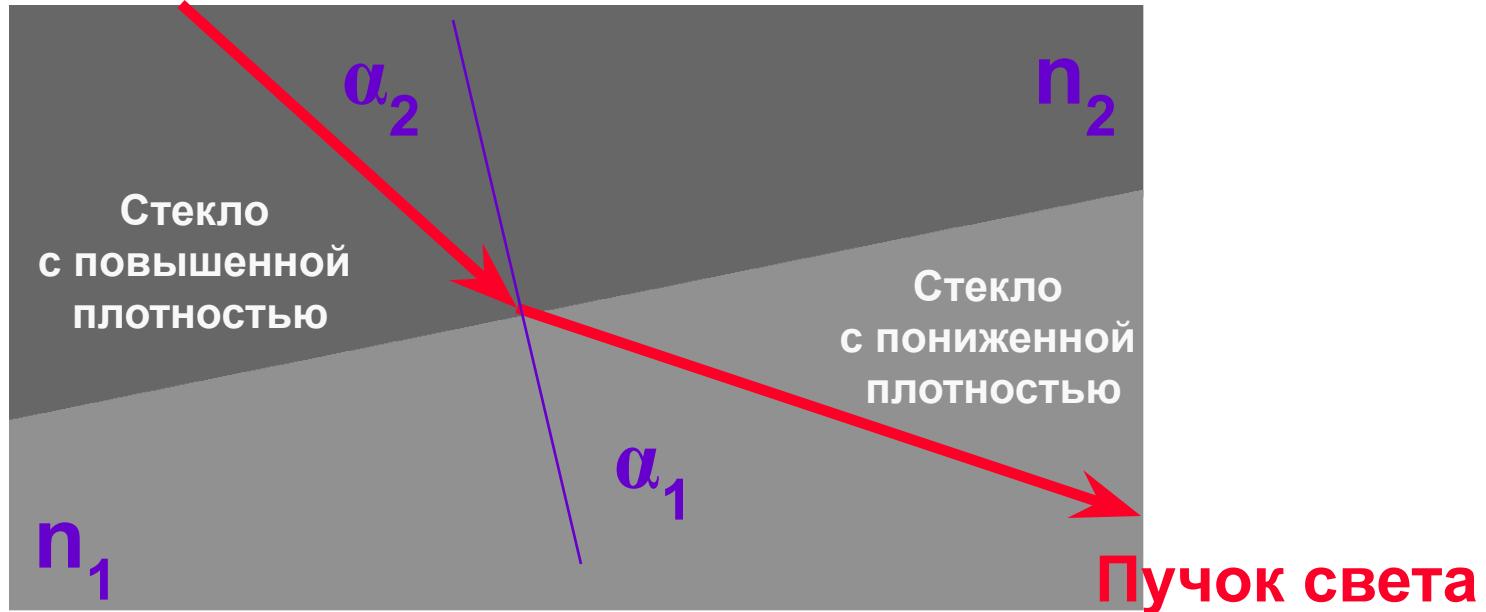
Примечание:

$$n_{\text{возд.}} = 1.0003,$$

$$n_{\text{стекла}} = 1.5000$$

$$n_{\text{сладкой воды}} = 1.8300$$

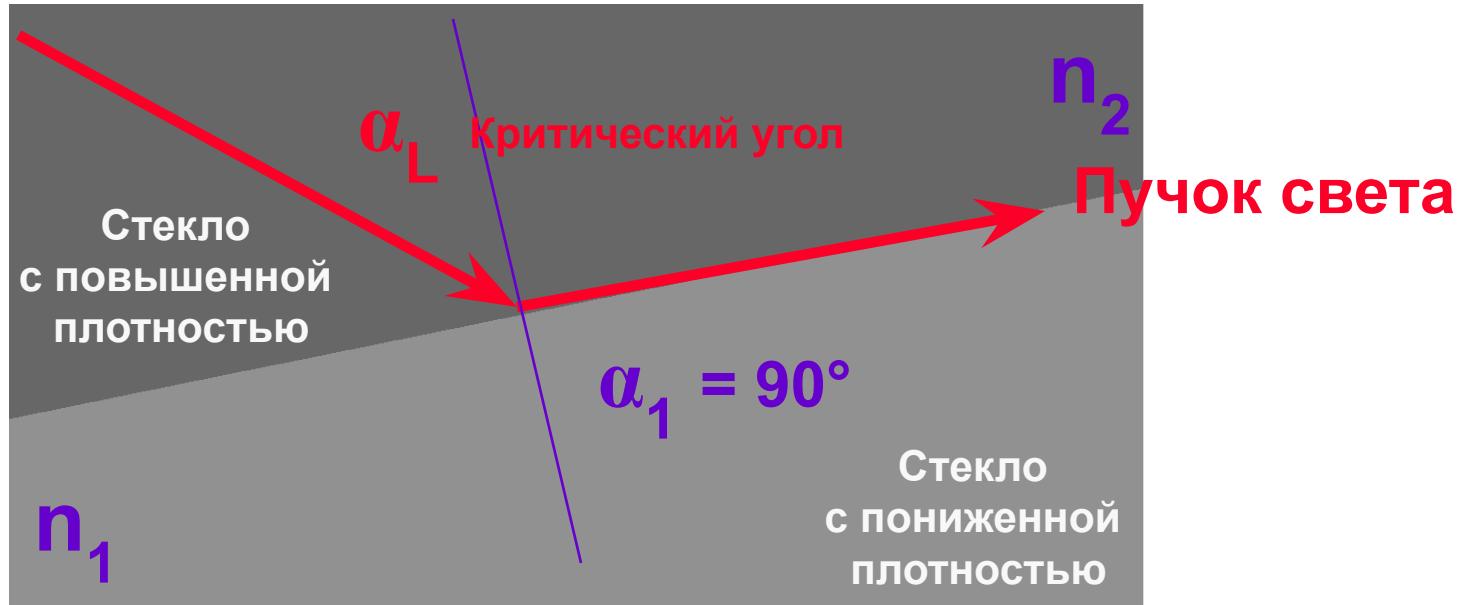
Преломление



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

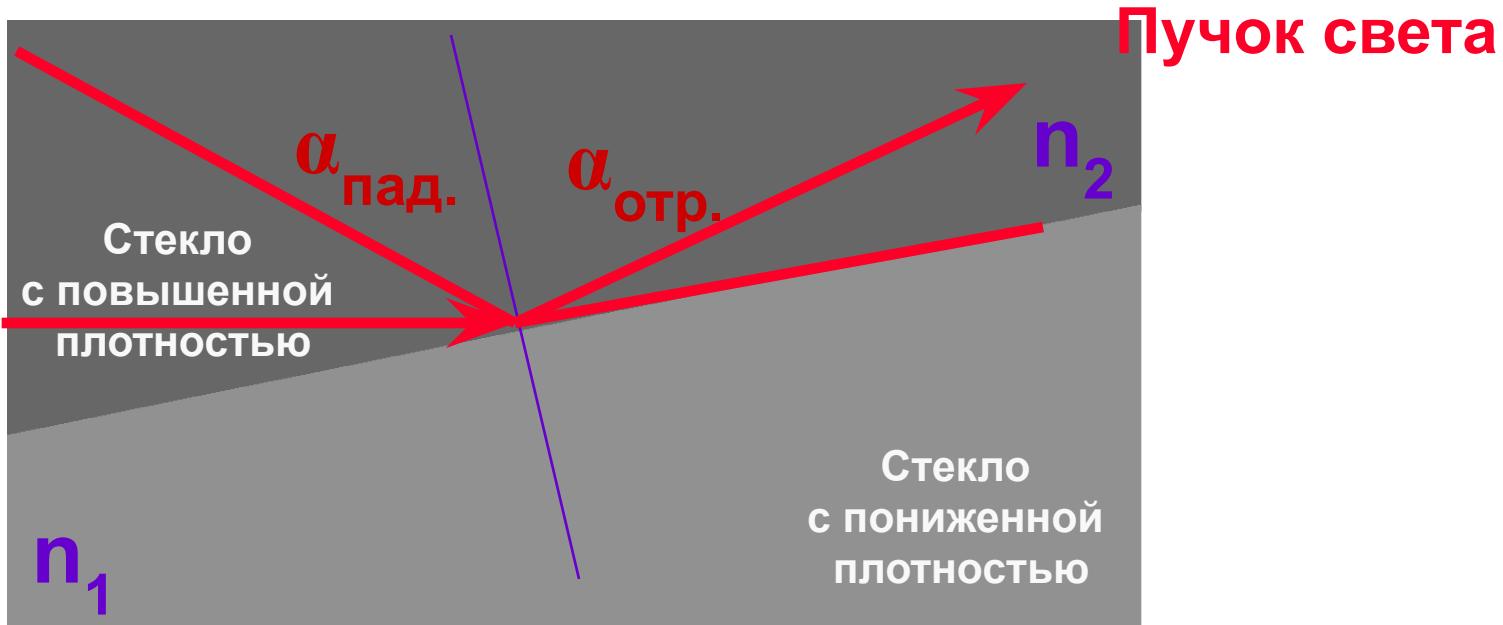
$$\sin \alpha_2 / \sin \alpha_1 = n_1 / n_2$$

Полное преломление, Критический угол



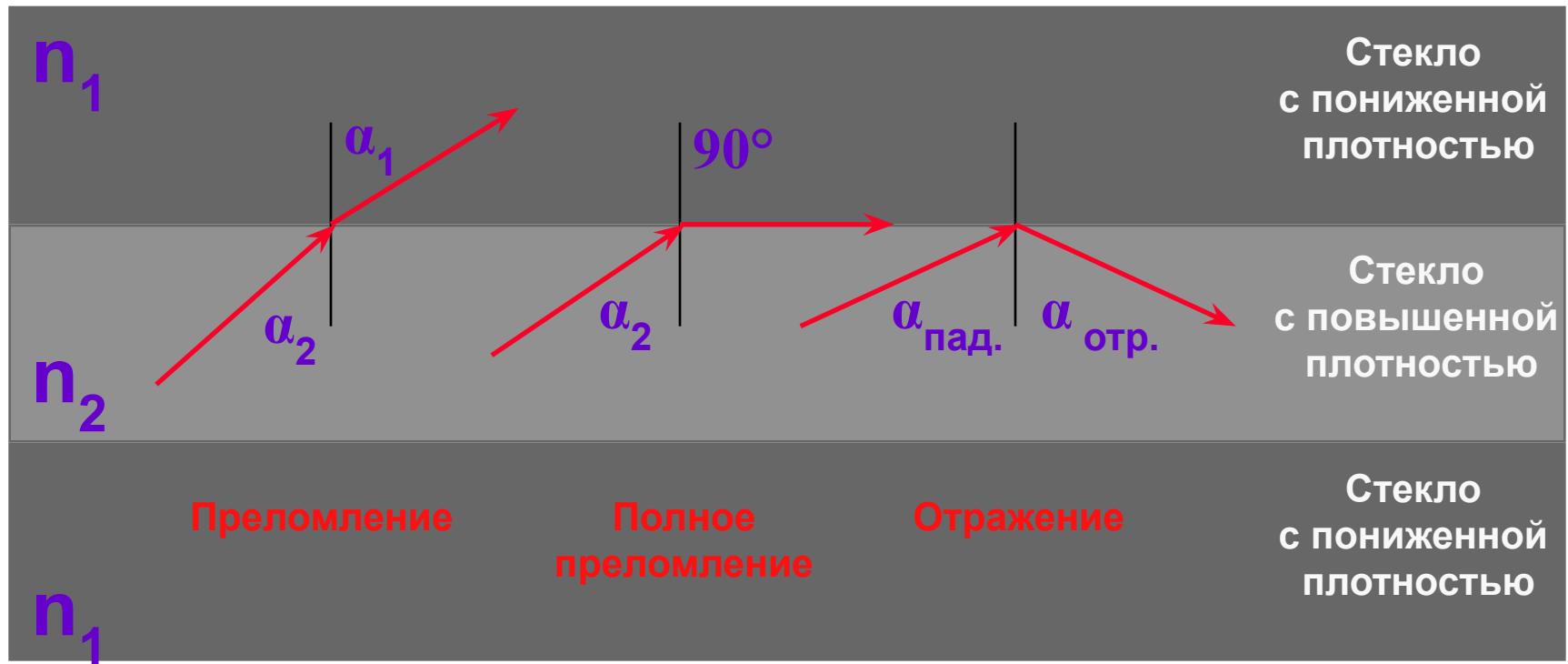
Примечание: $n_1 < n_2$ и $\alpha_2 = \alpha_L$ $\sin \alpha_1 = 1$ \longrightarrow $\sin \alpha_L = n_1 / n_2$

Полное внутреннее отражение

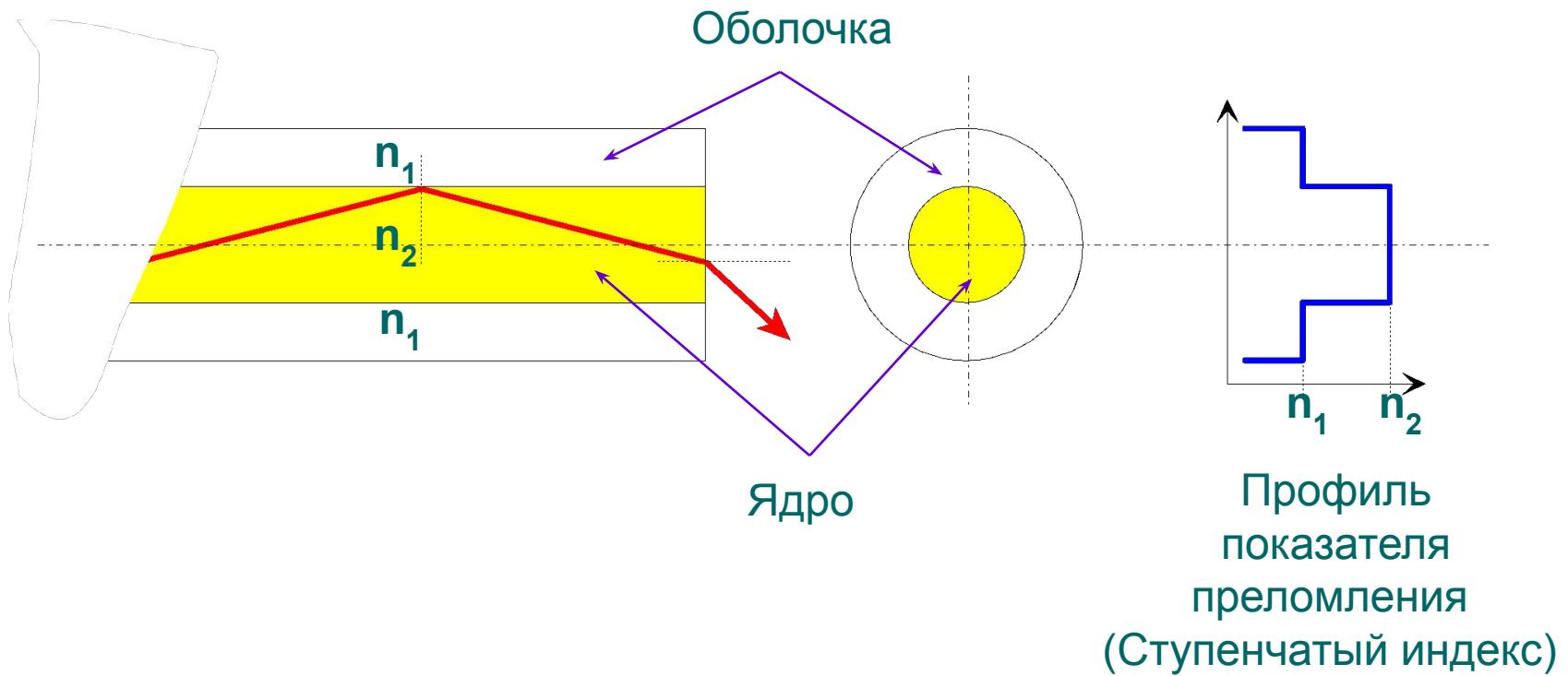


Примечание: $n_1 < n_2$ и $\alpha_{\text{пад.}} = \alpha_{\text{отр}}$

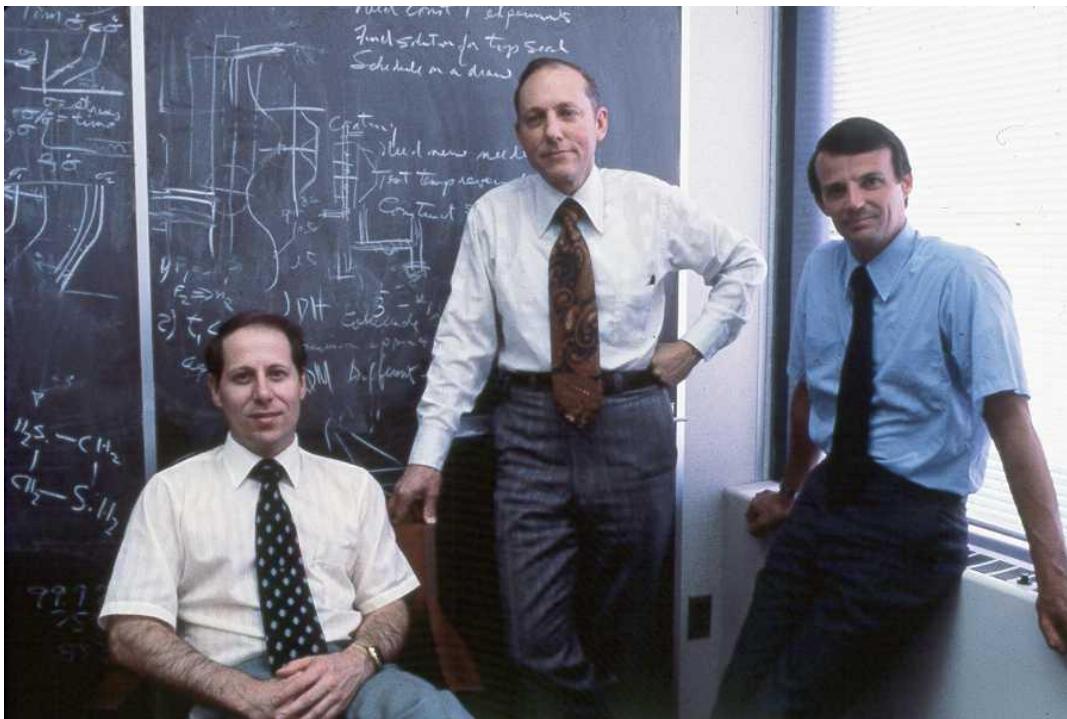
Изменение направления света в материале



Волоконно-оптический световод



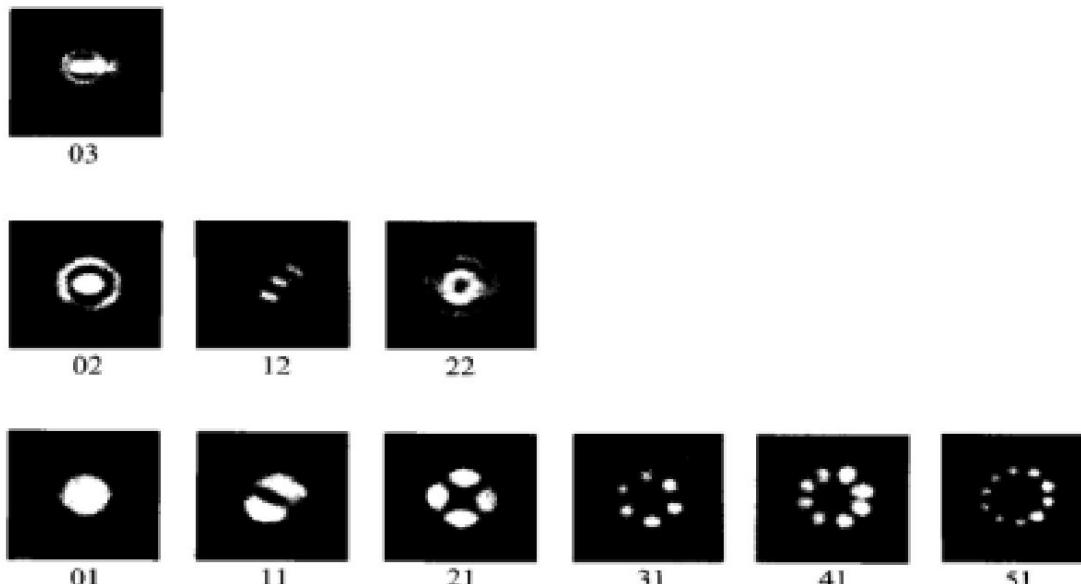
Где все начиналось



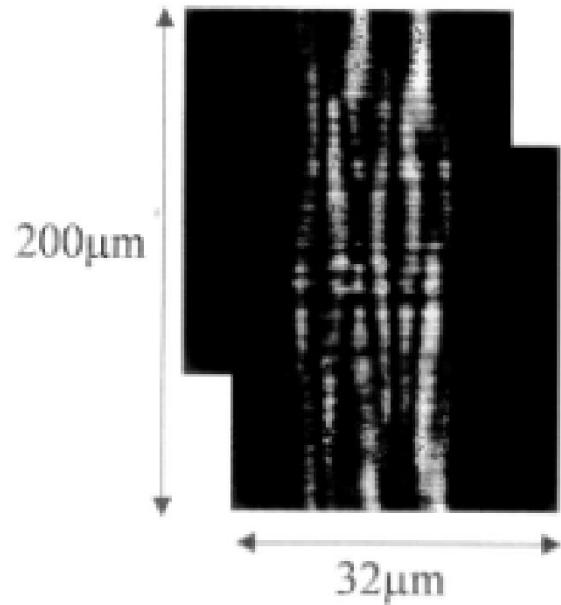
Три ученых лаборатории Corning (слева направо) Дональд Кек, Роберт Маэр и Питер Шульц в 1970 году впервые в мире создали оптическое волокно, которое было возможно использовать в коммерческих целях.

Свет в волокне распространяется только дискретными путями

Эти дискретные пути называются модами.

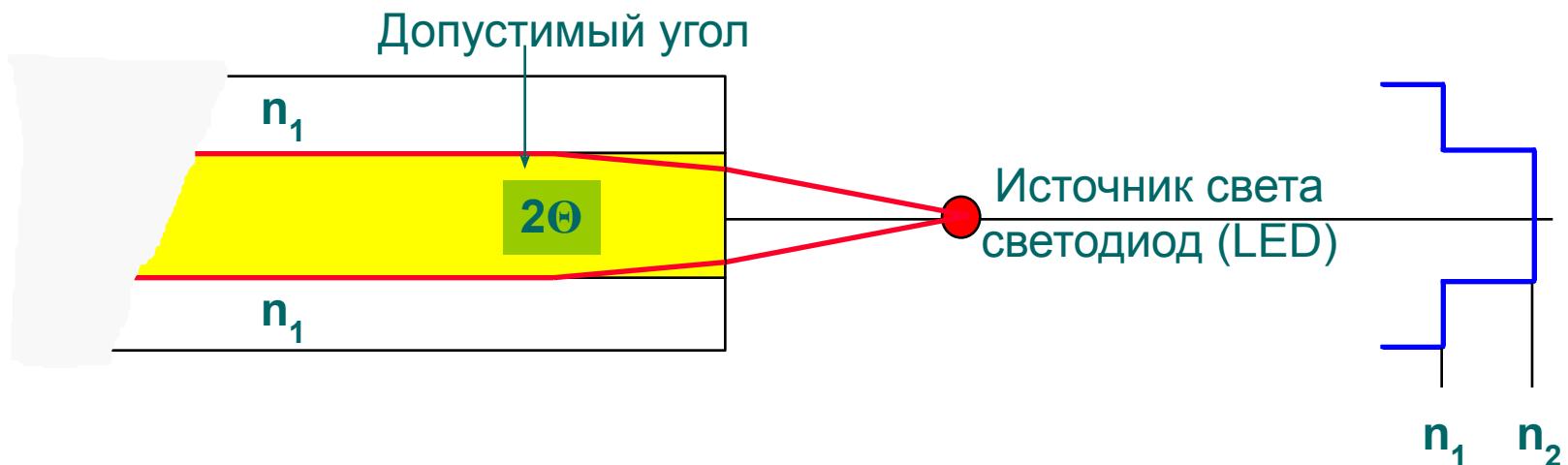


Моды выглядят как разные пути (продольный срез)



(I)

Численная апертура



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

Примечание: $\text{NA} = 0.3$ типичный показатель для ступенчатого индекса волокна

$$\rightarrow \Theta \sim 17.5^\circ$$

Профиль показателя преломления
(Ступенчатый индекс)

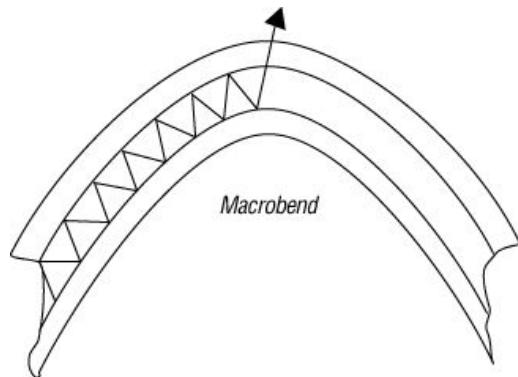
Численная Апертура и характеристики передачи

- ✓ Большое значение **NA** означает Большое значение **Θ**, 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

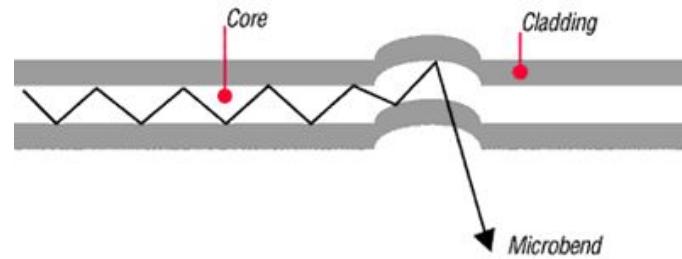
Примечание:

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



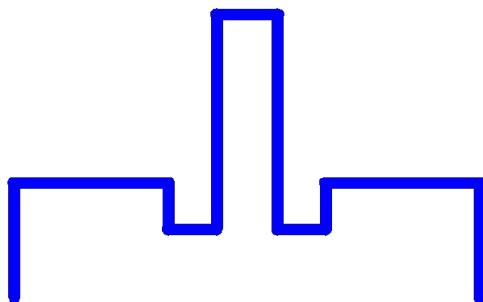
Макроизгибы



Микроизгиб
ы

Типы профилей коэффициента преломления

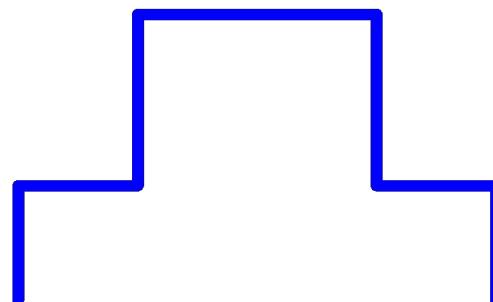
Ступенчатый индекс



Для одномодовой передачи

Размер ядра ~9 мкм

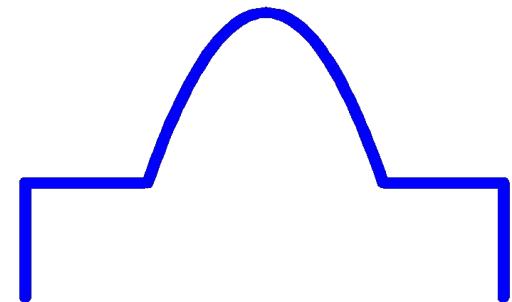
Ступенчатый индекс



Для многомодовой передачи

Размер ядра 50мкм

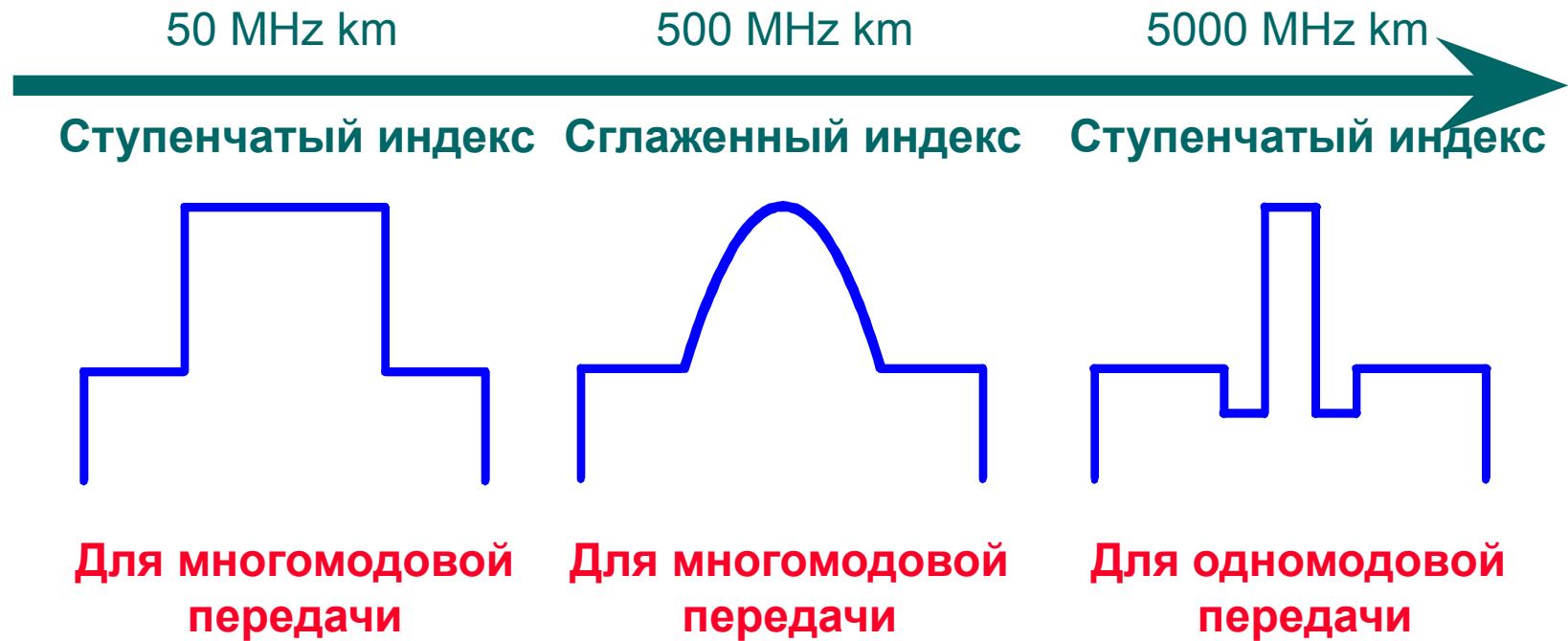
Сглаженный индекс



Для многомодовой передачи

Размер ядра 50 или 62.5мкм

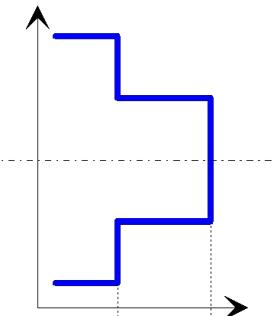
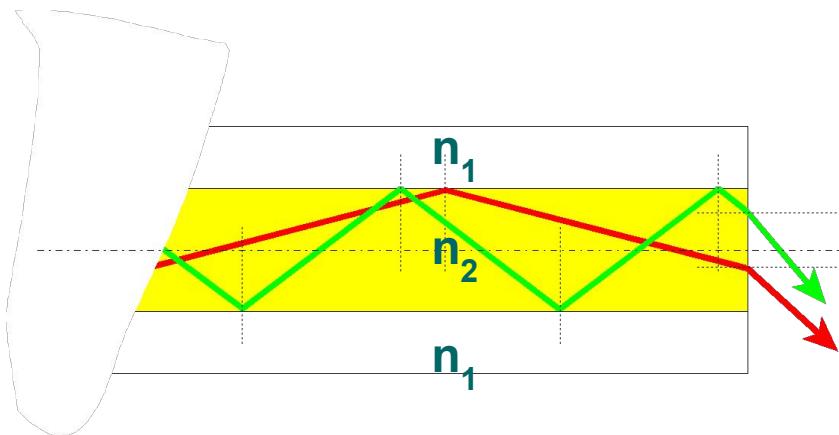
Типы профилей коефициента преломления



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)



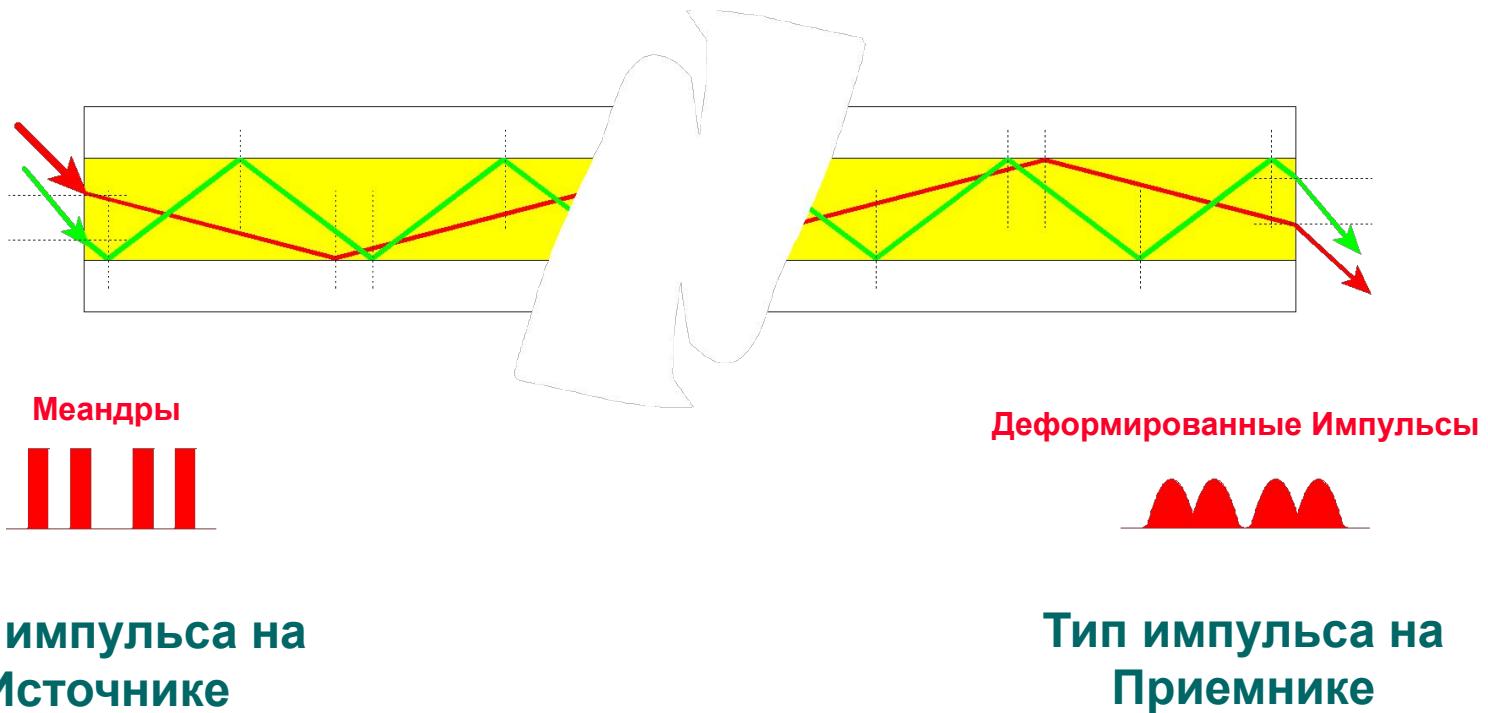
n_1 n_2

Профиль
показателя
преломления
(Ступенчатый индекс)

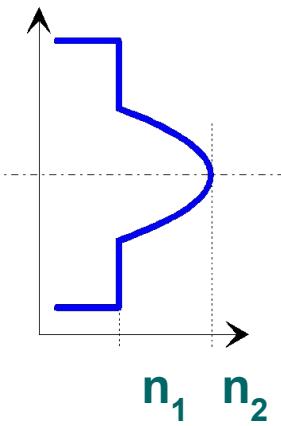
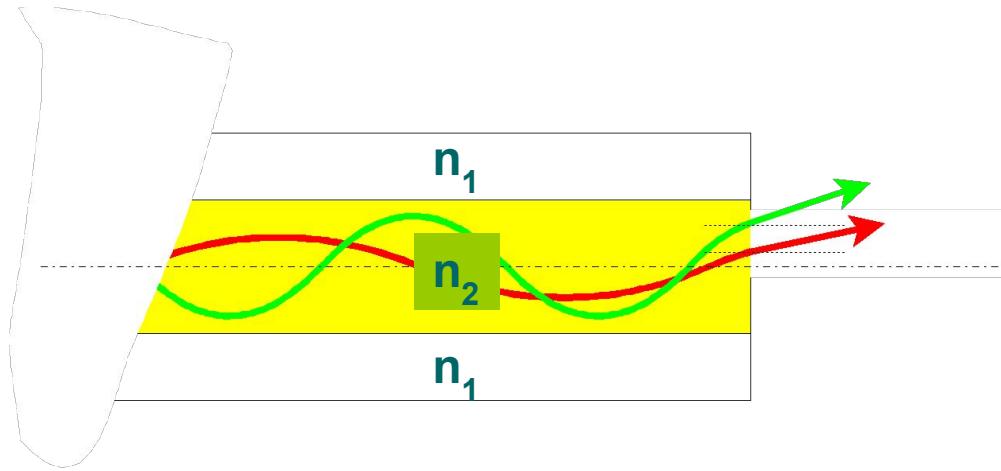
$$\text{Число Мод } M = 0.5 \times (\pi d \times NA / \lambda)^2$$

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

Модовая дисперсия (ступенчатый индекс)



Многомодовое волокно (Сглаженный индекс)

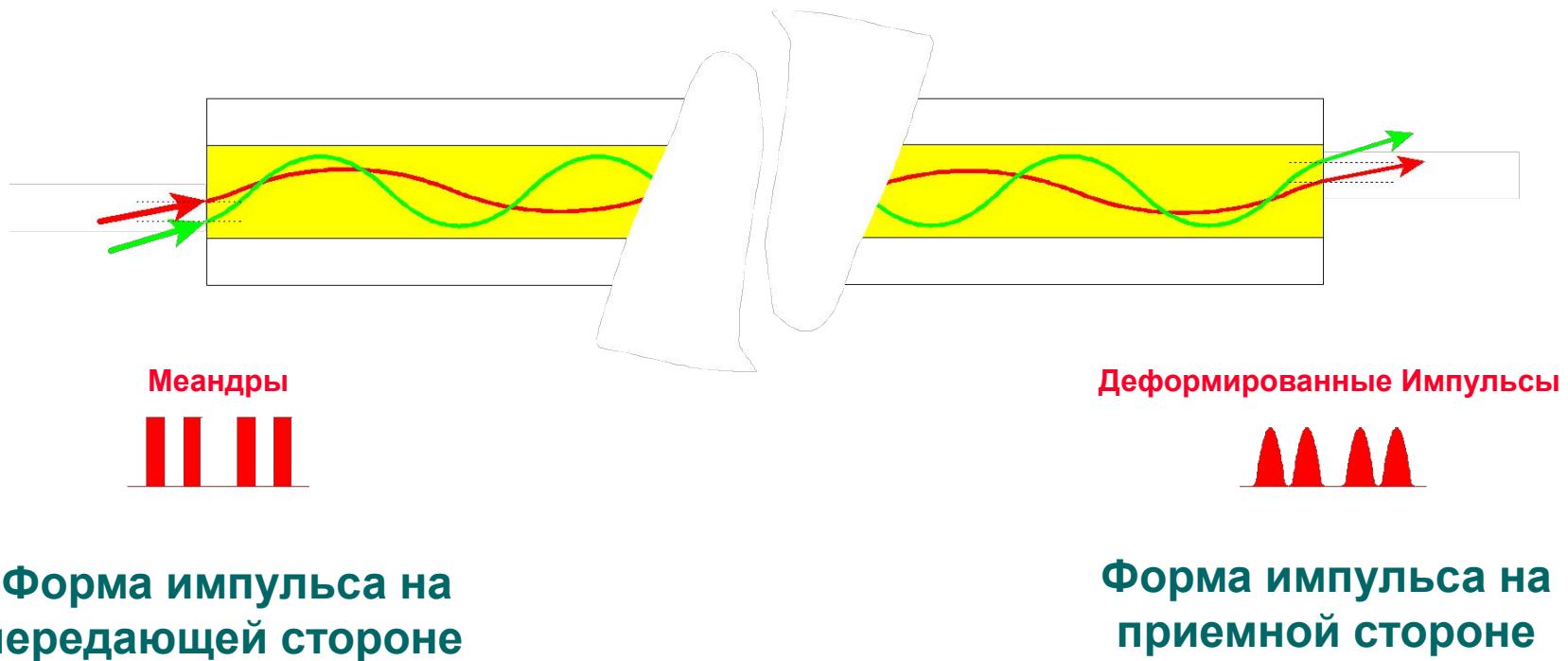


$$\text{Число Мод } M = 0.25 \times (\pi \times d \times NA / \lambda)^2$$

Профиль показателя преломления
(Сглаженный индекс)

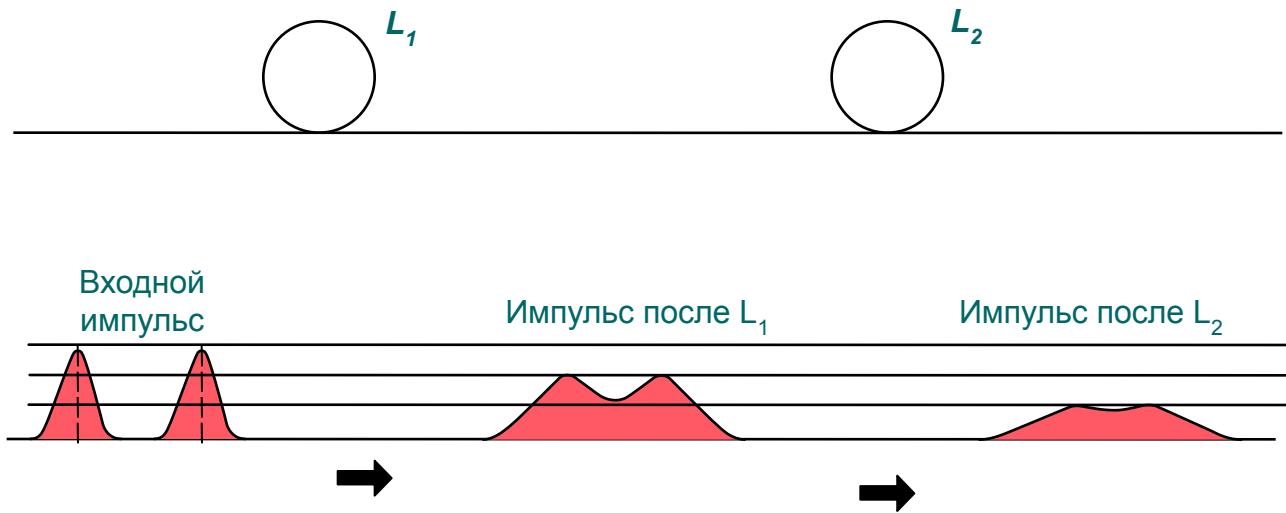
Примечание: ~150 Мод при NA = 0.2, d = 50 μm и $\lambda = 1300 \text{ nm}$

Модовая дисперсия в многомодовом волокне

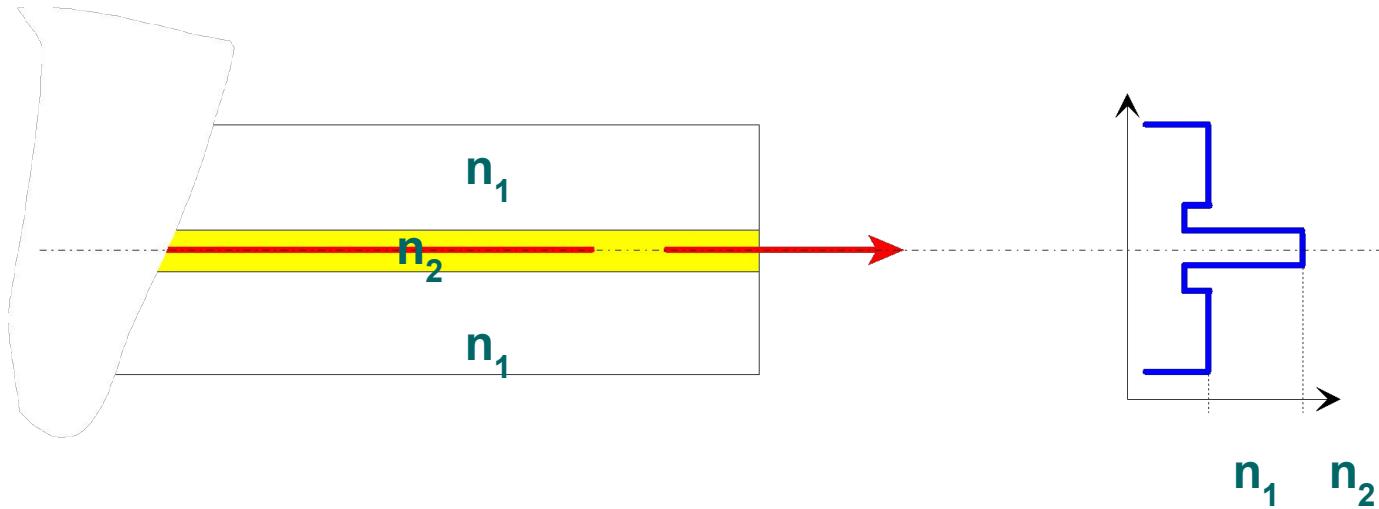


Дисперсия

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



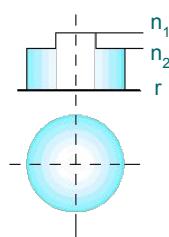
Одномодовое волокно



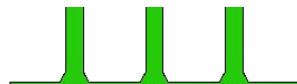
Пример: $n_1 = 1.4570$ и $n_2 = 1.4625$

Профиль
показателя
преломления
(Ступенчатый индекс)

Волоконно-оптическая теория

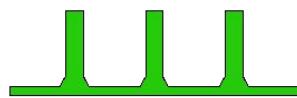
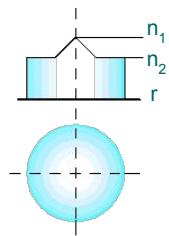


Вносимый сигнал

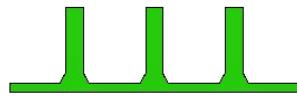
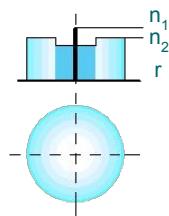


Многомод
ступенчатый

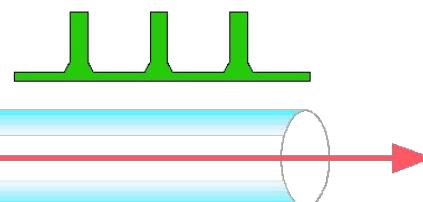
Выходной сигнал



Многомод
градиентный



Одномод



Виды дисперсии

Многомодовое
волокно

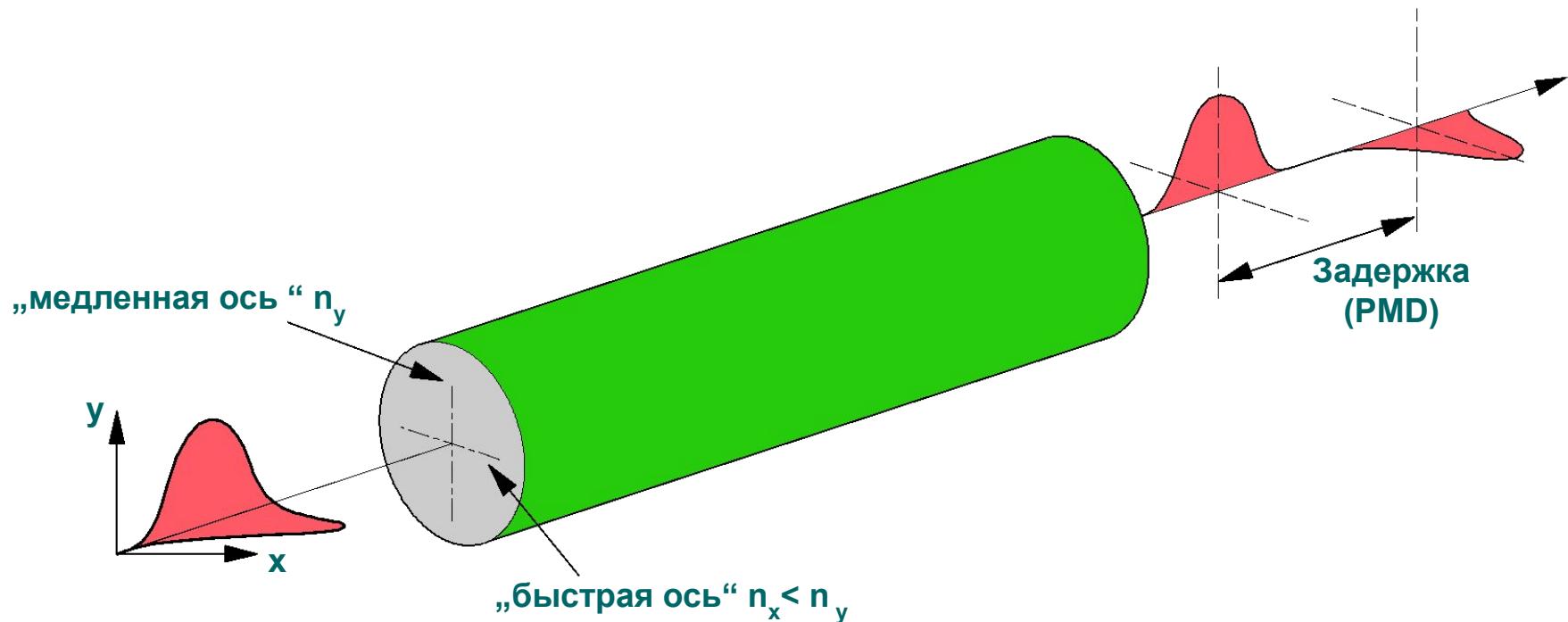
Одномодовое
волокно

Модовая
дисперсия

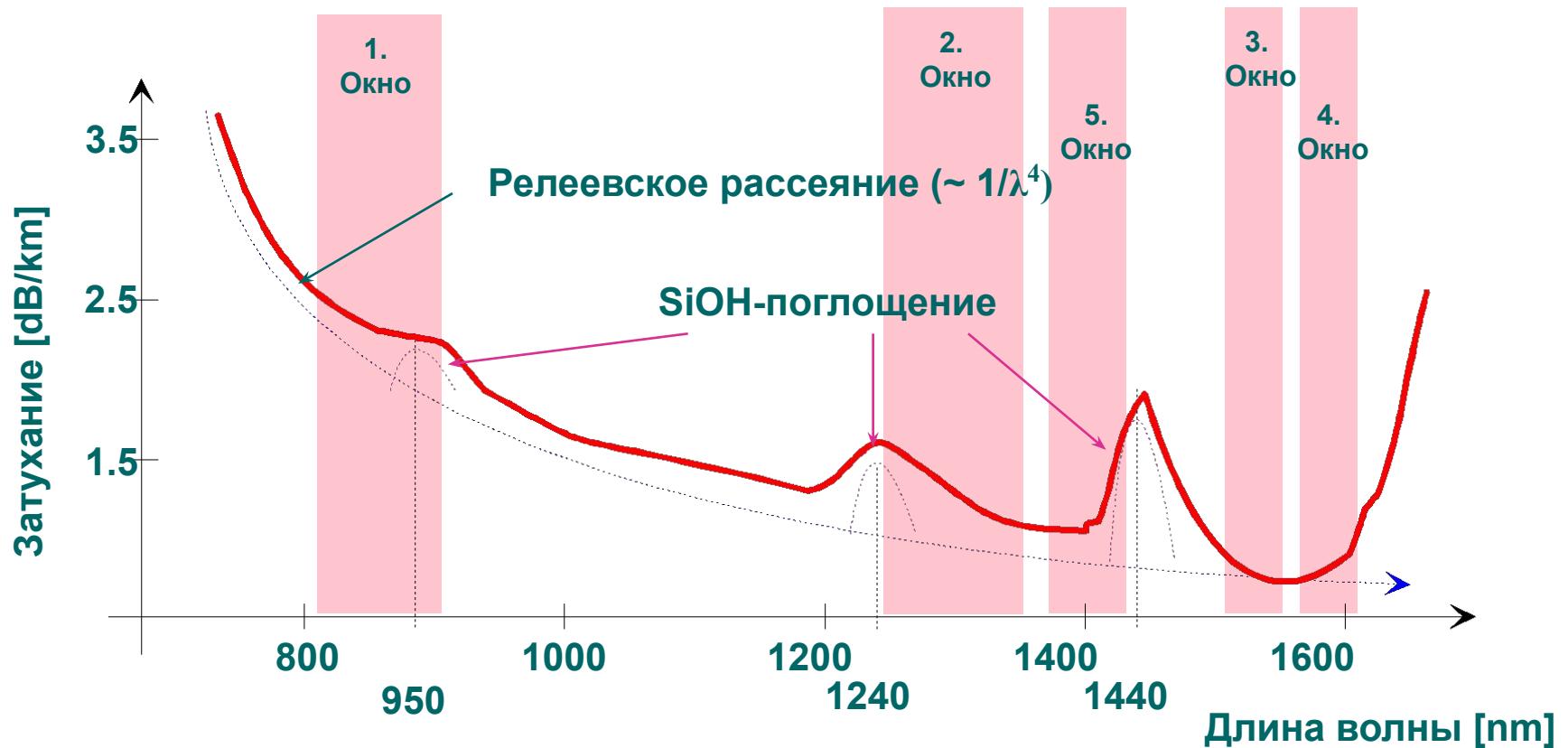
Хроматическая
дисперсия
[ps/km * nm]

Поляризационная
Модовая
дисперсия
PMD
[ps/ $\sqrt{\text{km}}$]]

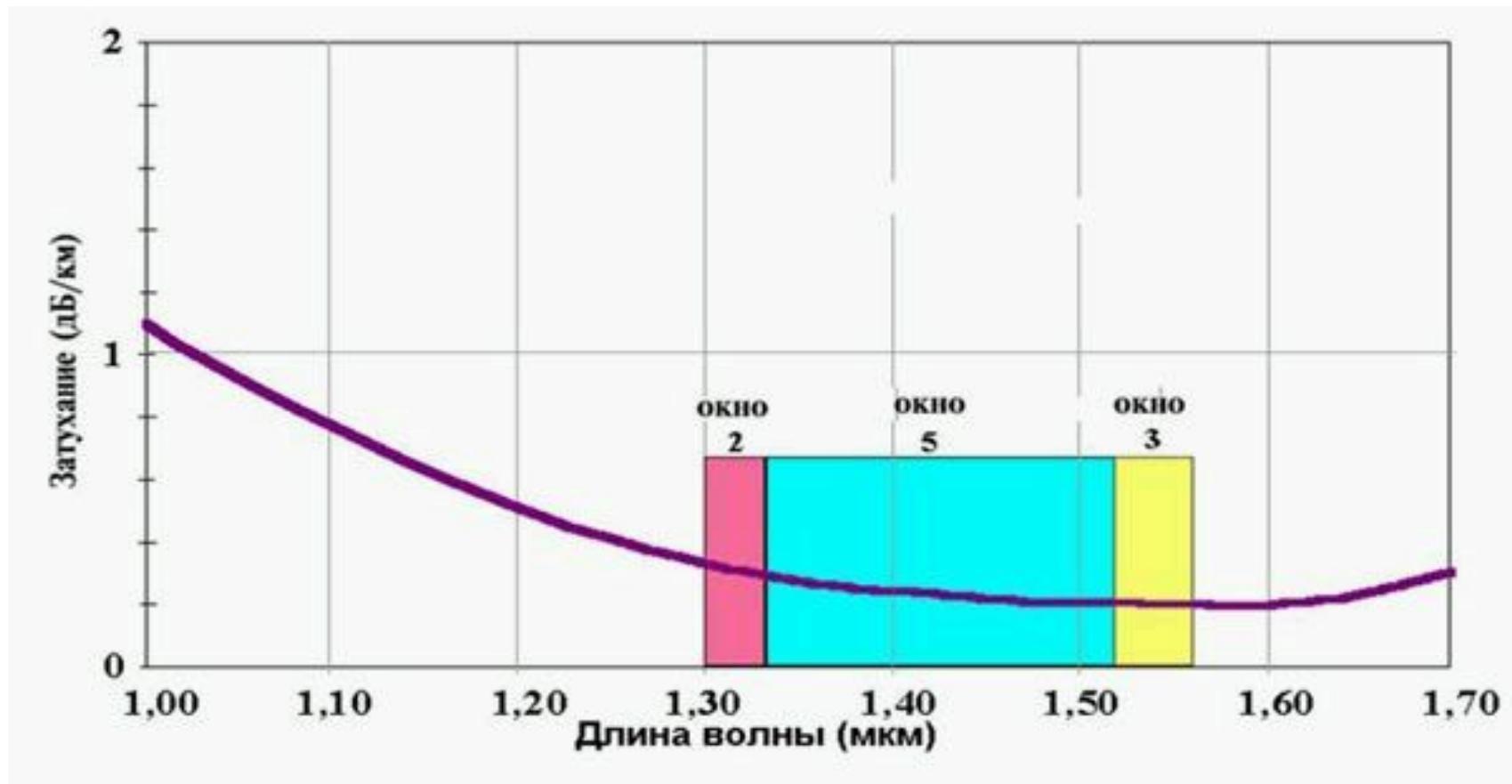
PMD для одномодового оптического волокна



Затухание многомодовых волокон

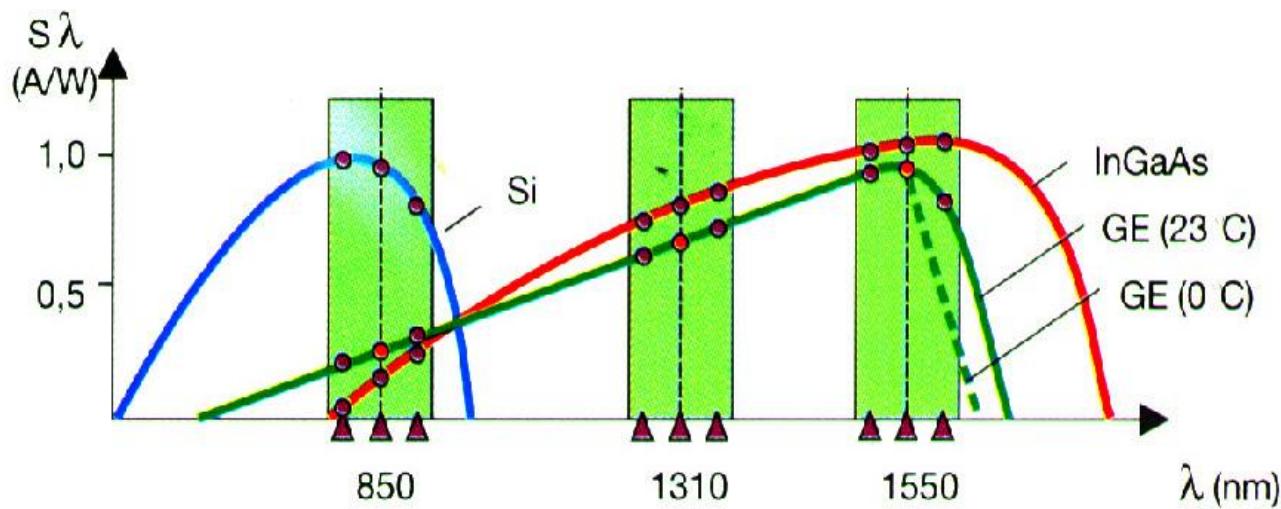


Затухание одномодовых волокон

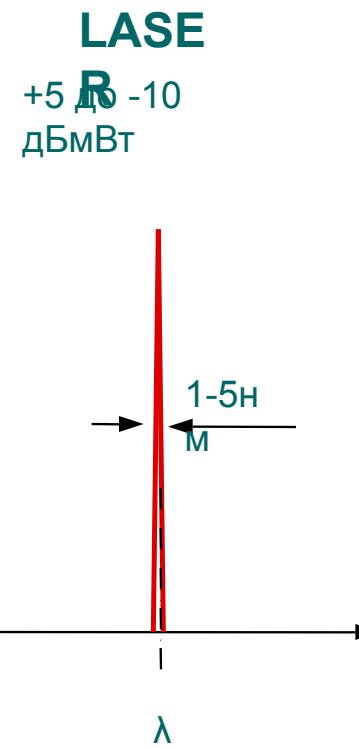
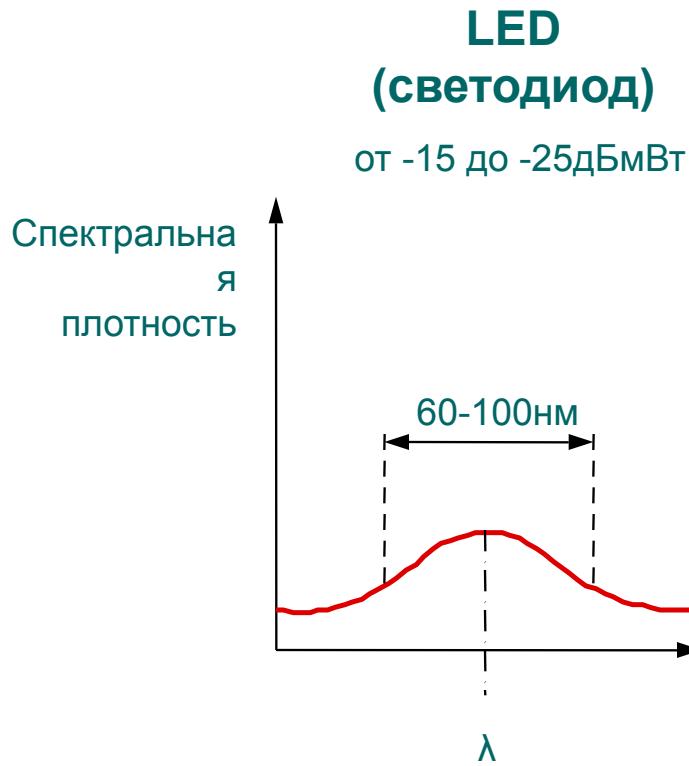


**Зависимость коэффициента затухания от длины волны
одномодового оптического волокна**

Спектральная чувствительность детекторов

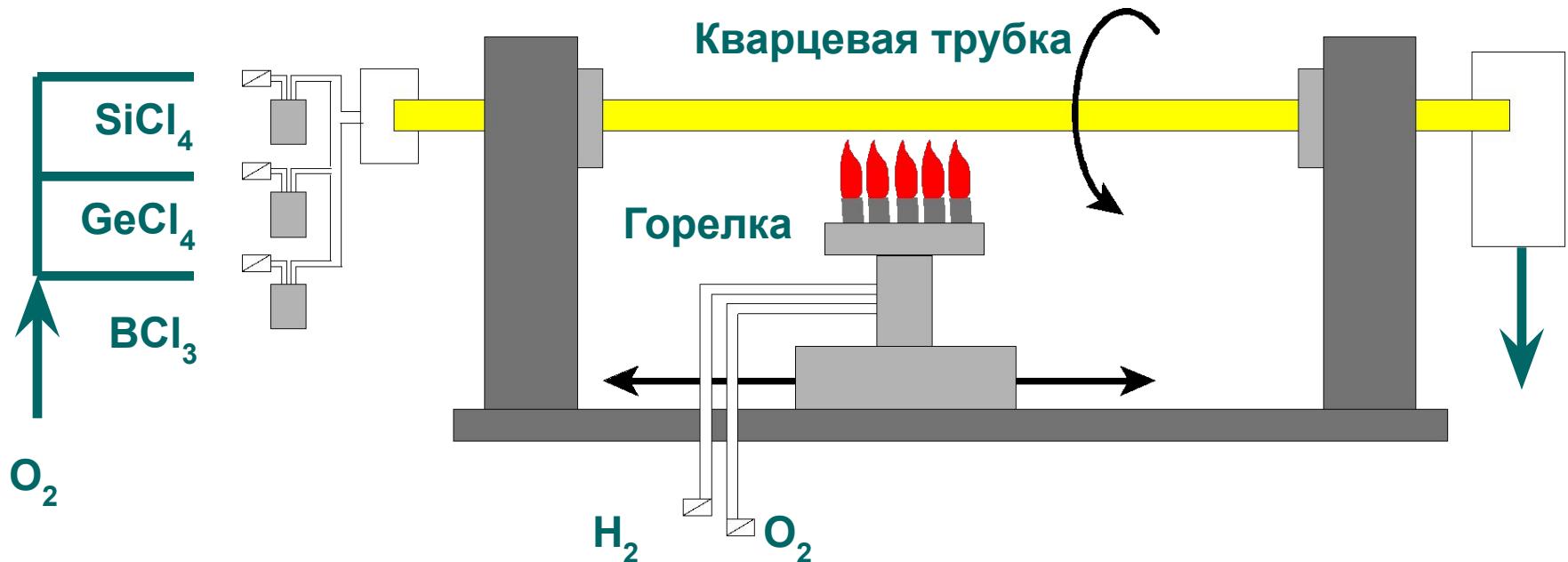


Спектр излучения лазера и LED

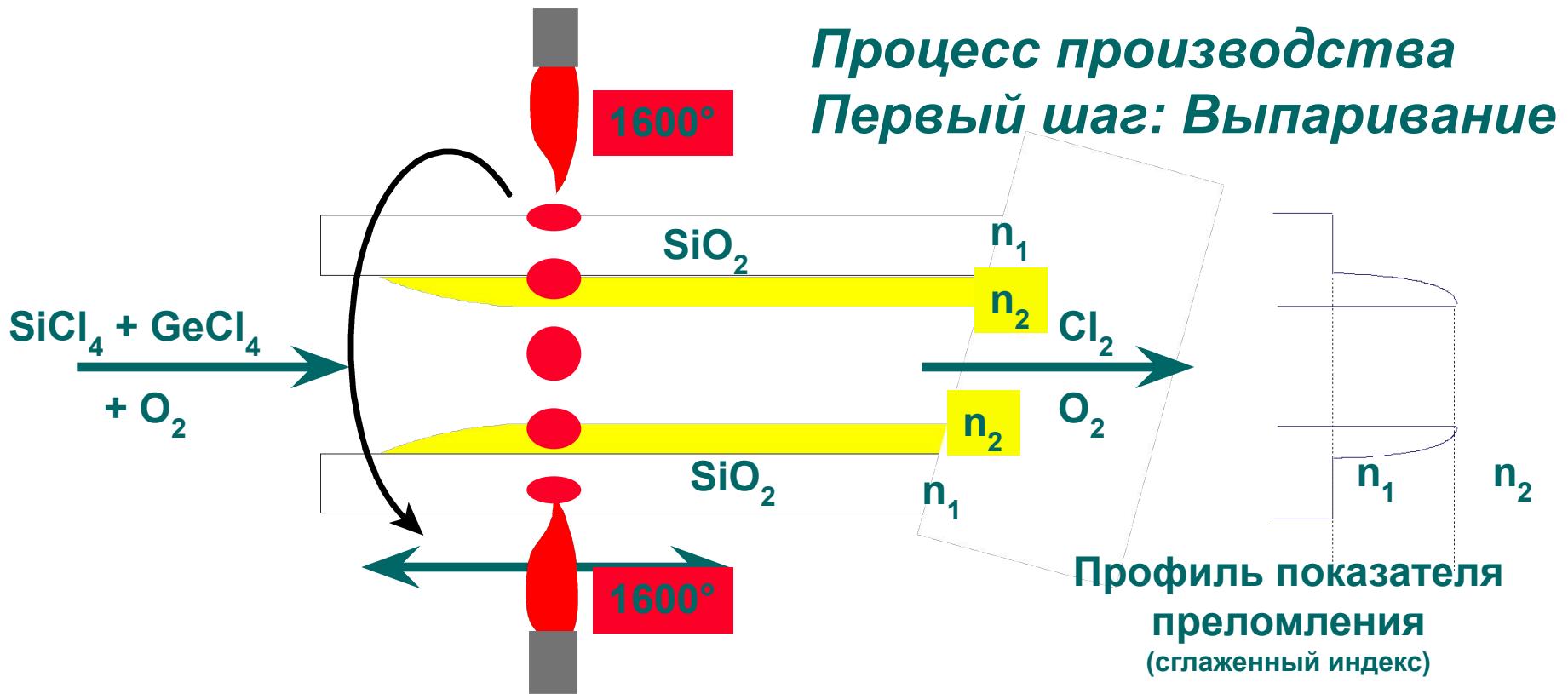


Производство ММ волокон

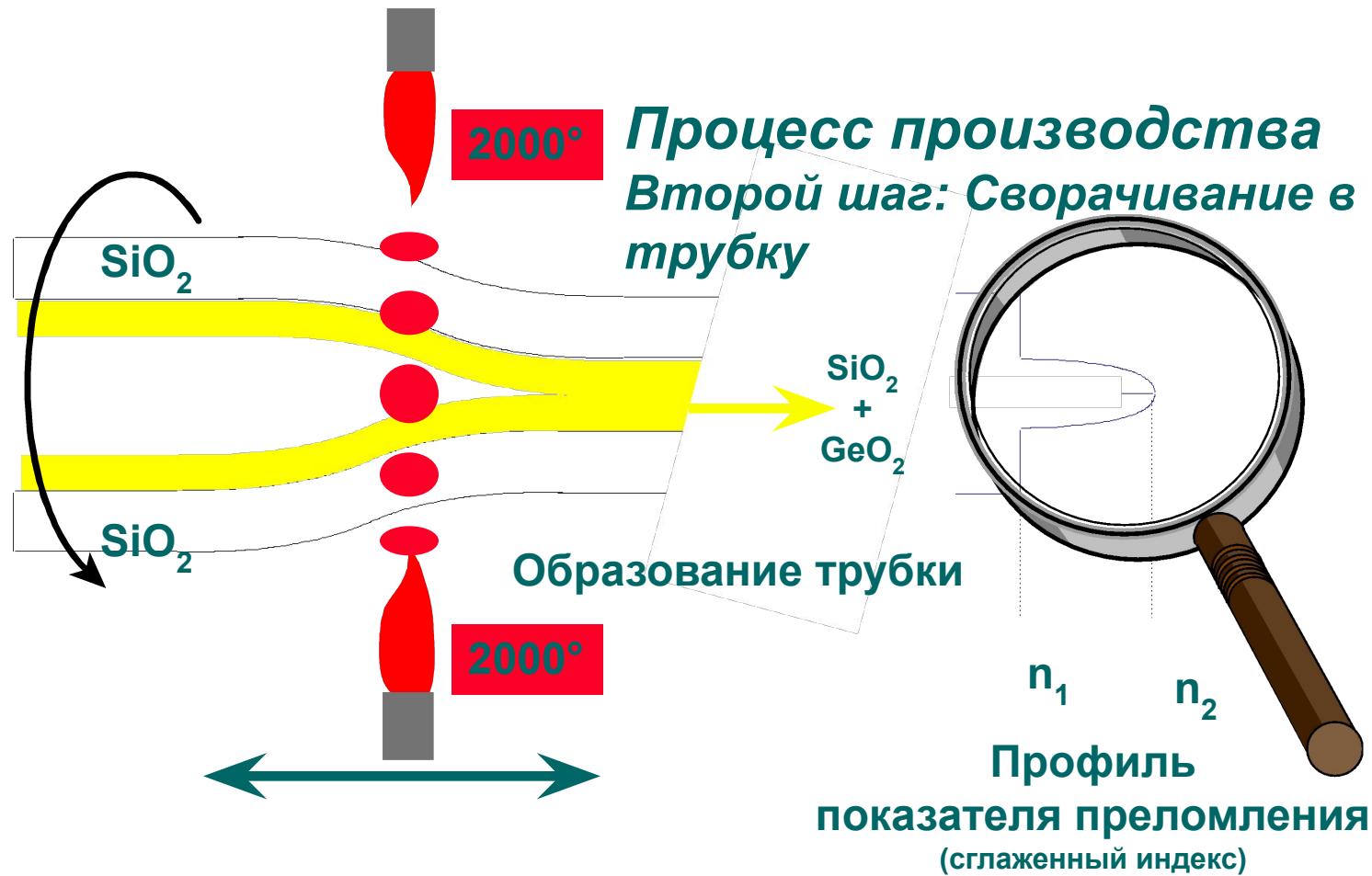
Метод модифицированного химического осаждения путем выпаривания (MCVD-Process)



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 (\Rightarrow 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 (\Rightarrow **не** все теоретически возможные моды возбуждены).
- Обычно при использовании лазерных источников.
- Обычно полоса пропускания шире при использовании ограниченного режима по сравнению с полным режимом

Цветовое кодирование волокон

Все оптические волокна окрашиваются по
определенной цветовой схеме:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
rot	grün	gelb	blau	weiss	violett	orange	schwarz	grau	braun	rosa	türkis
13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
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



Пустотелый 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

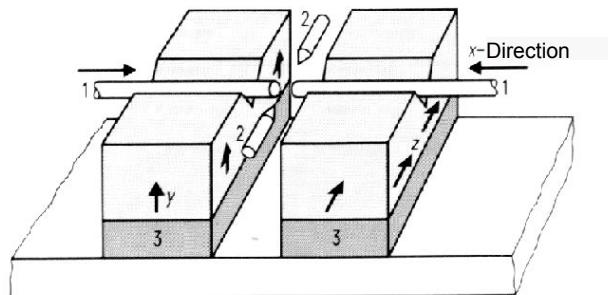


Convincing cabling solutions

Неразъемное соединение

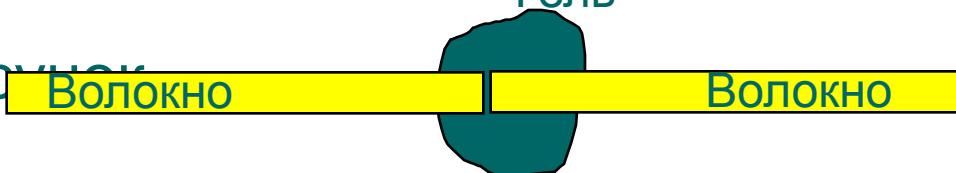
Принцип работы

- 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

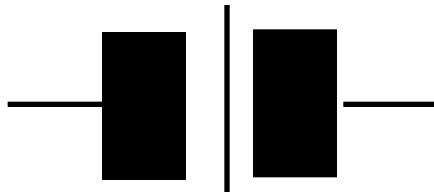
- Принцип работы
 - Два качественно сколотых волокна совмещаются торцами.
 - Для улучшения характеристик места соединения между двумя волокнами заполняется гелем.
- Рисунок



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

Criteria's	Detachable²	Quasi – Detachable	Not – Detachable
Insertion loss α_s in [dB]	$0,05 < \alpha_s < 0,75$	$0,1 < \alpha_s < 0,5$	$0,05 < \alpha_s < 0,2$
Return loss α_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 • Equipment • Initial Installation • Repeated disconnect and connect	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 (usually 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



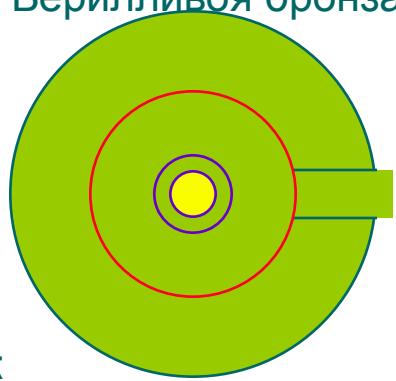
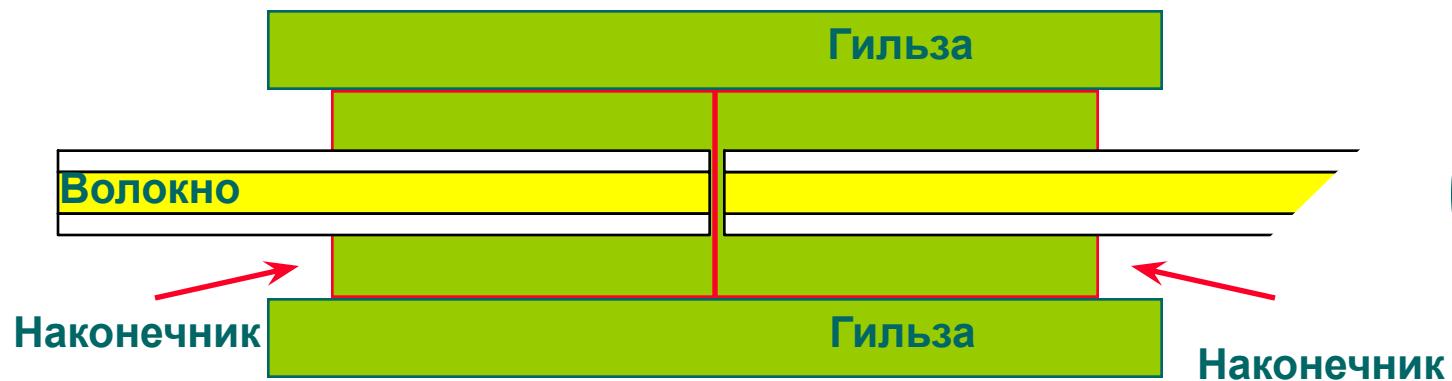
Технология совмещения - Эластичная гильза

Допустимое отклонение

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

Материалы

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

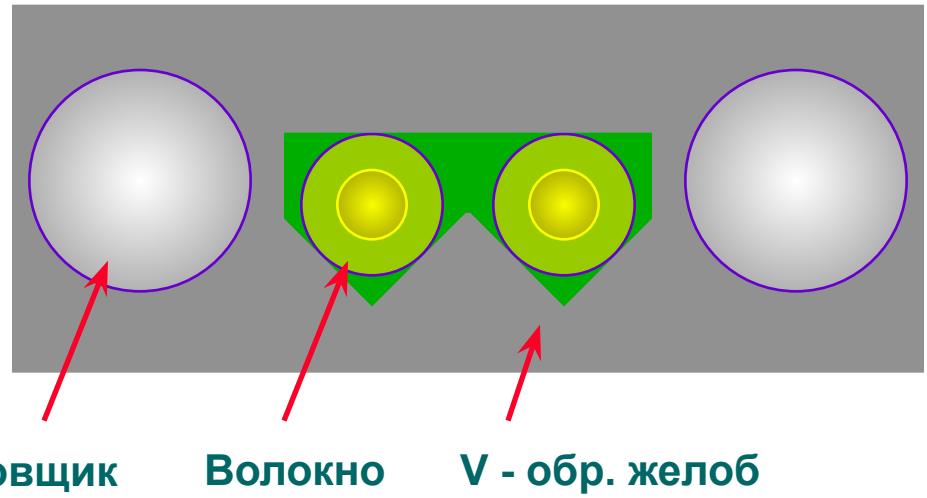


Новые технологии совмещения – V-образный канал

Материалы

V- обр. желоб Силиконовая подложка

Центровщик Карбид вольфрама



Вносимые потери - внутренние

Разницей в:



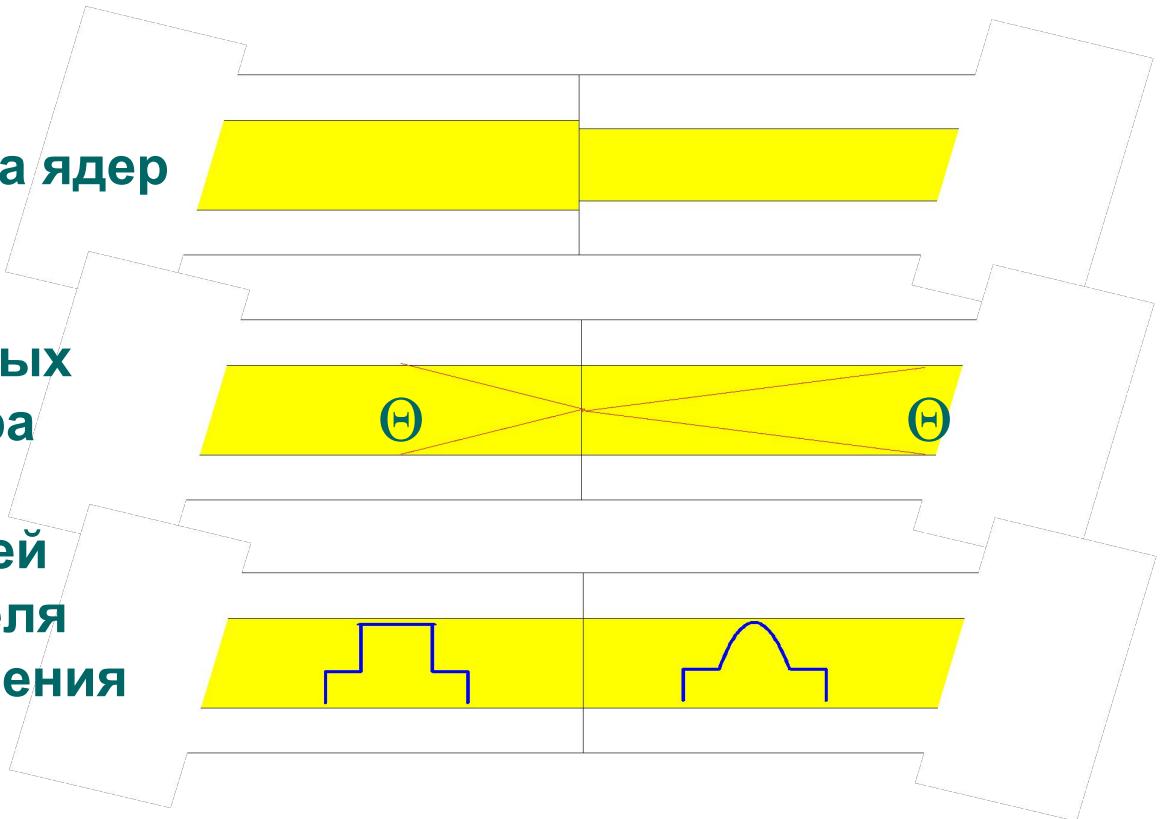
Диаметра ядер



Численных
Апертура



Профилей
показателя
преломления



Вносимые потери - Внешние

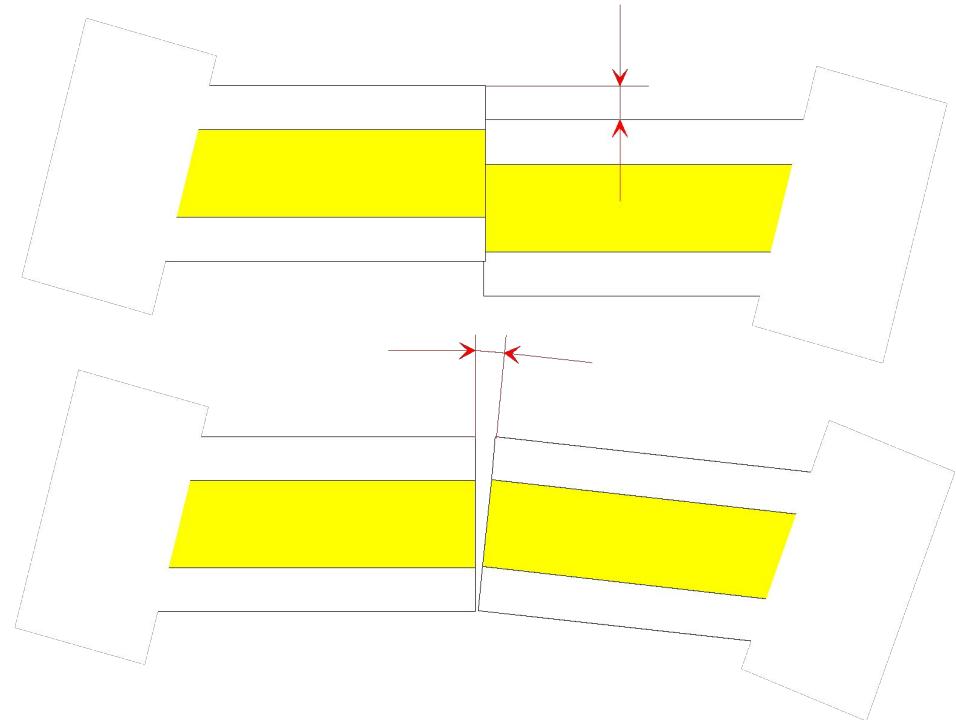
Относительное
позиционирование:



Горизонтальное
несовпадение
волокон



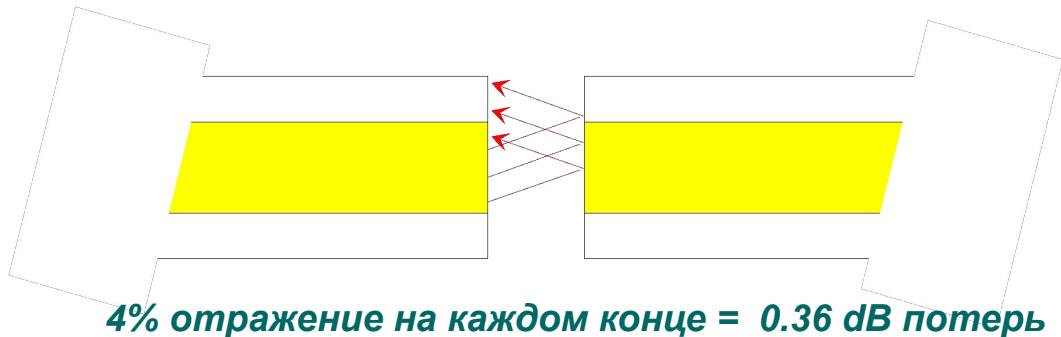
Осевой наклон



Вносимые потери - внешние



**Неплотное
прилегание**



4% отражение на каждом конце = 0.36 dB потерь

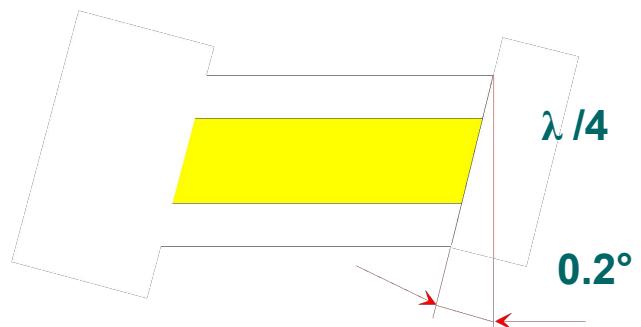
Подготовка поверхности волокна:



**Шероховатость
поверхности**



Угол

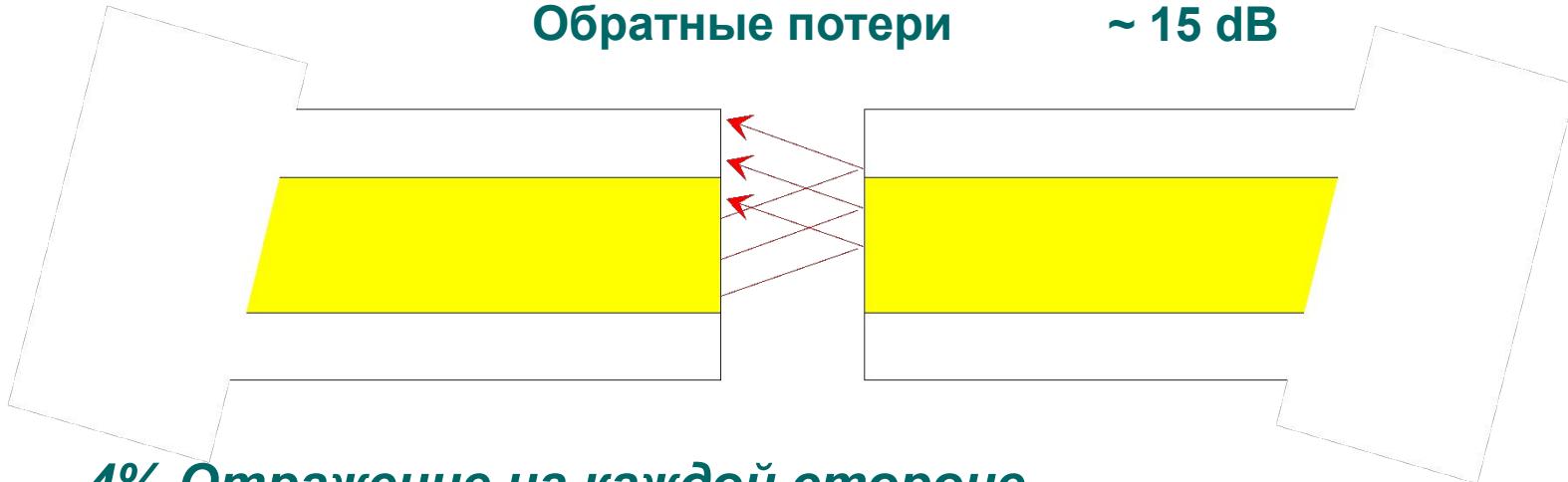


Зазор между сердцевинами – нет физического контакта

Параметры передачи

Вносимые потери
Обратные потери

< 1.0 dB
~ 15 dB



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

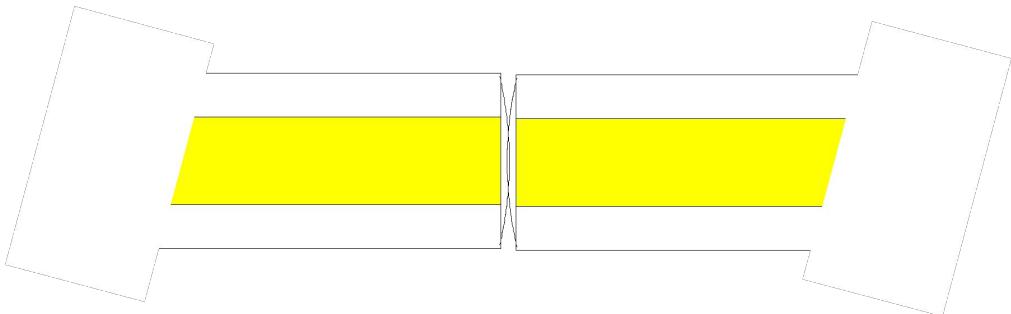
Торцы наконечников – Сферический контакт



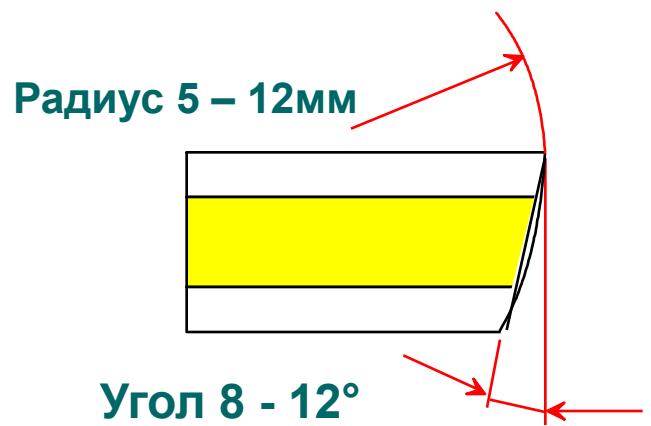
Параметры передачи

Вносимые потери
Обратные потери

< 0.5 dB
> 35 dB

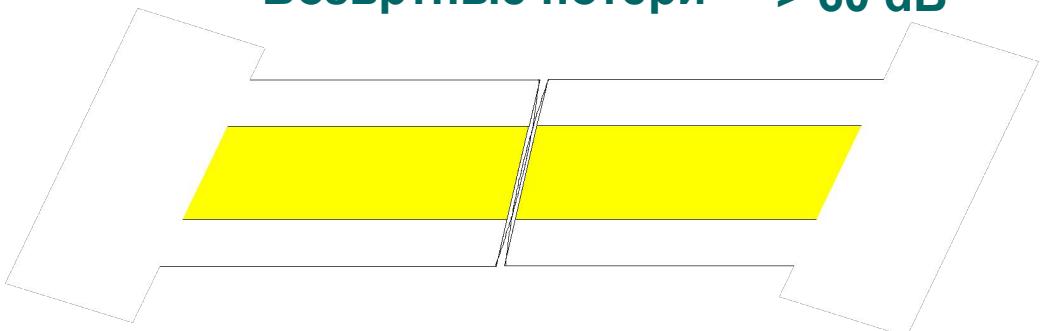


Угловой сферический физический контакт



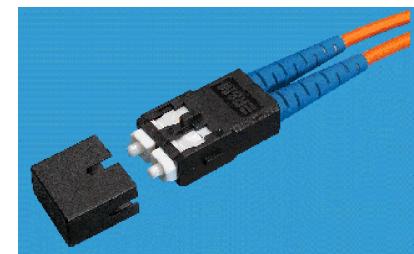
Передаточные характеристики

Вносимое затухание < 0.3 dB
Возвратные потери > 60 dB

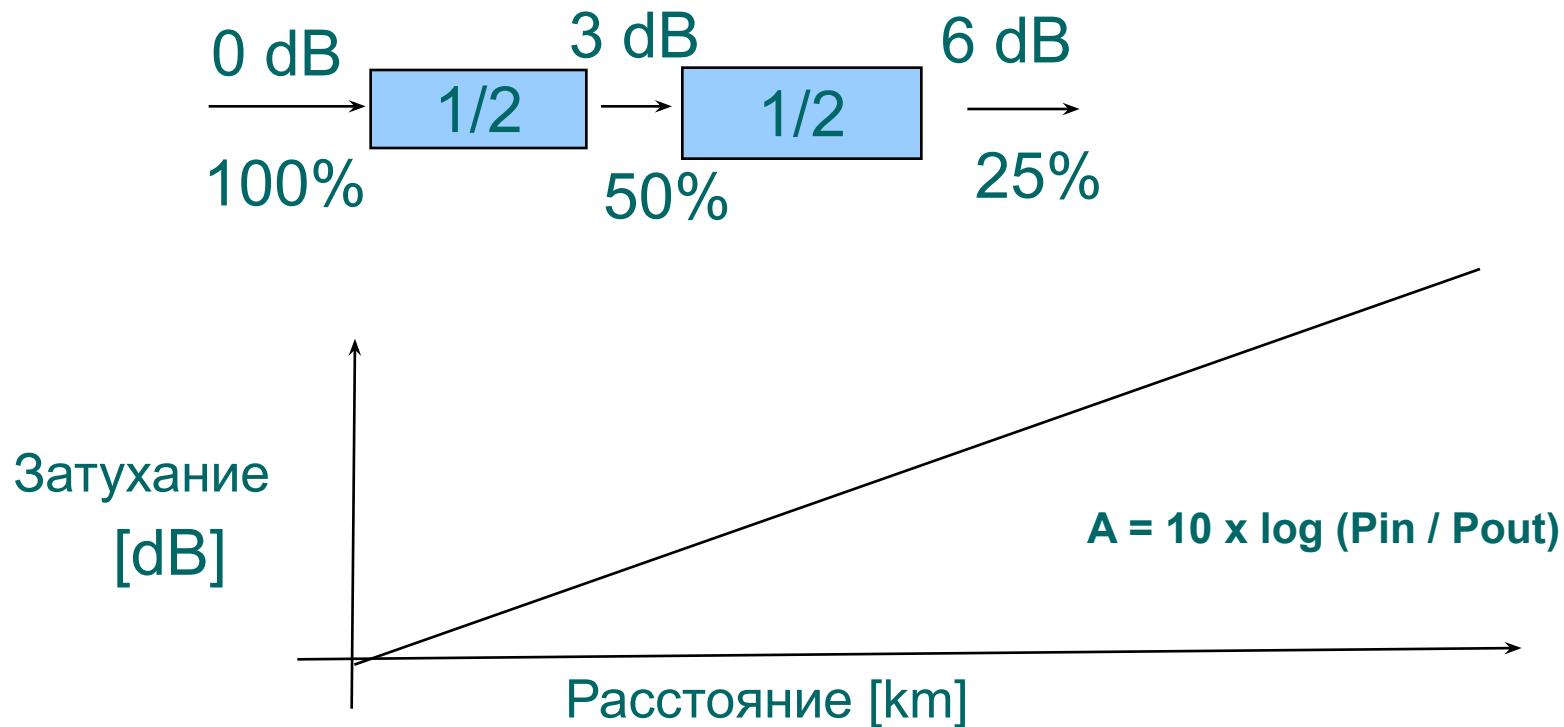


SC-RJ коннектор

- 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 канала связи

Предполагаемое затухание ВО канала связи

$$ATT = \alpha \times L + A_s \times N_s + A_c \times N_c$$

α : Затухание кабеля [dB/km]

L : Длина кабеля km]

A_s : Затухание на соединении [dB]

N_s : Число соединений

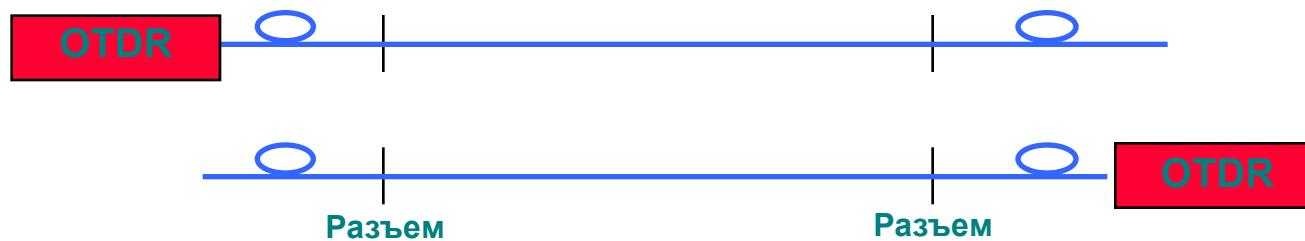
A_c : Вносимые потери коннектора [dB]

N_c : К-во коннекторов

Измерение затухания / принципы



Измерение обратных отражений (OTDR)



Какой метод использовать?

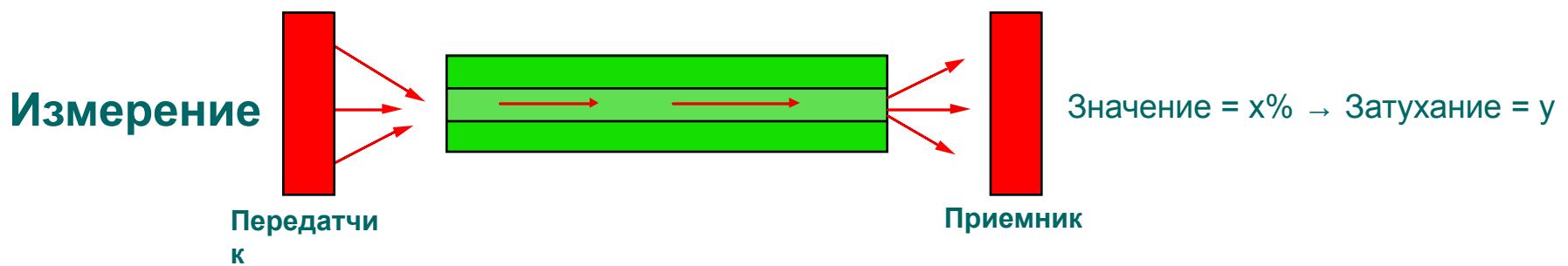
Измерение затухания:

- всегда при окончивании кабелей
- для измерения затухания линка

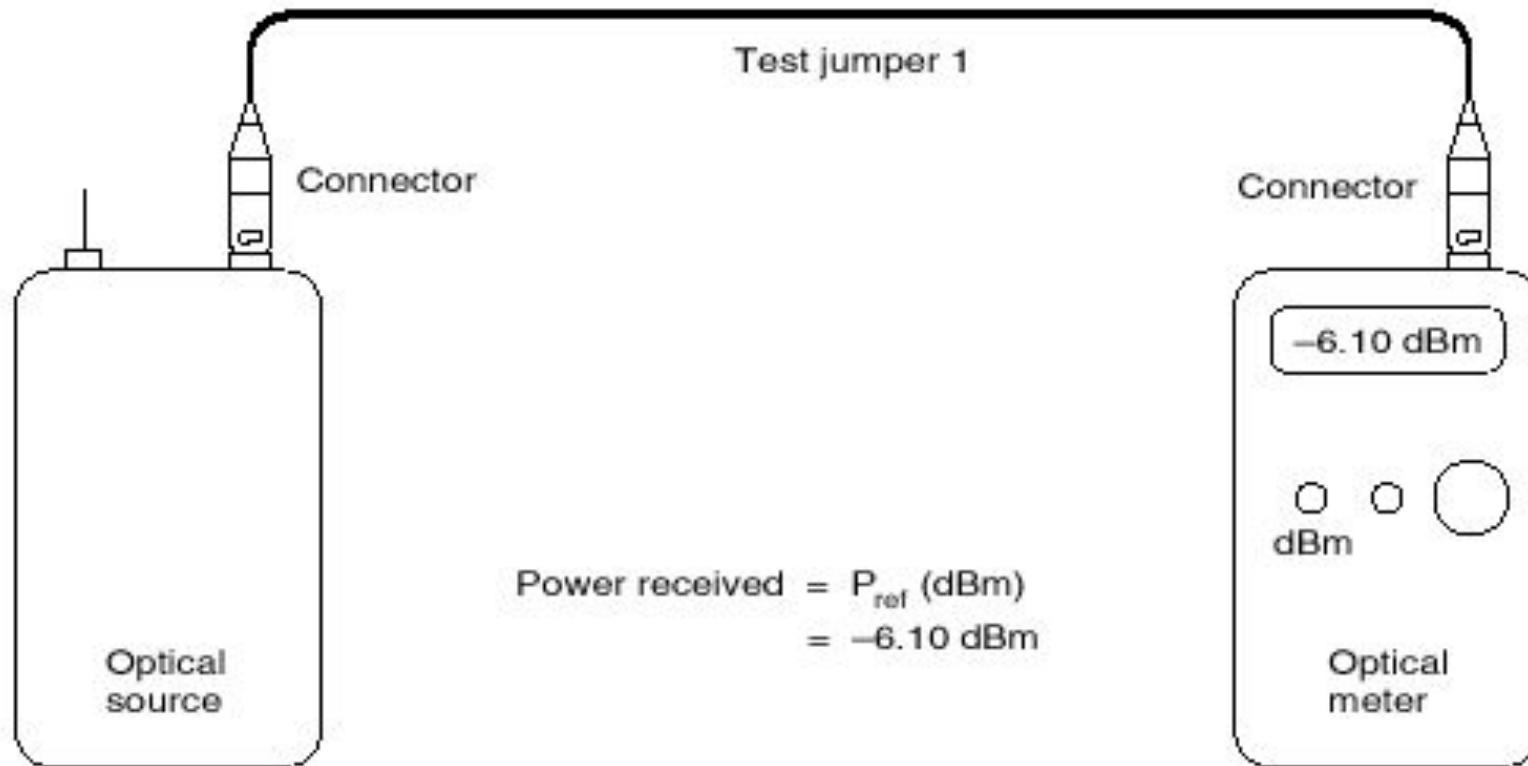
Измерение обратных отражений:

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

Принцип измерения затухания мощности

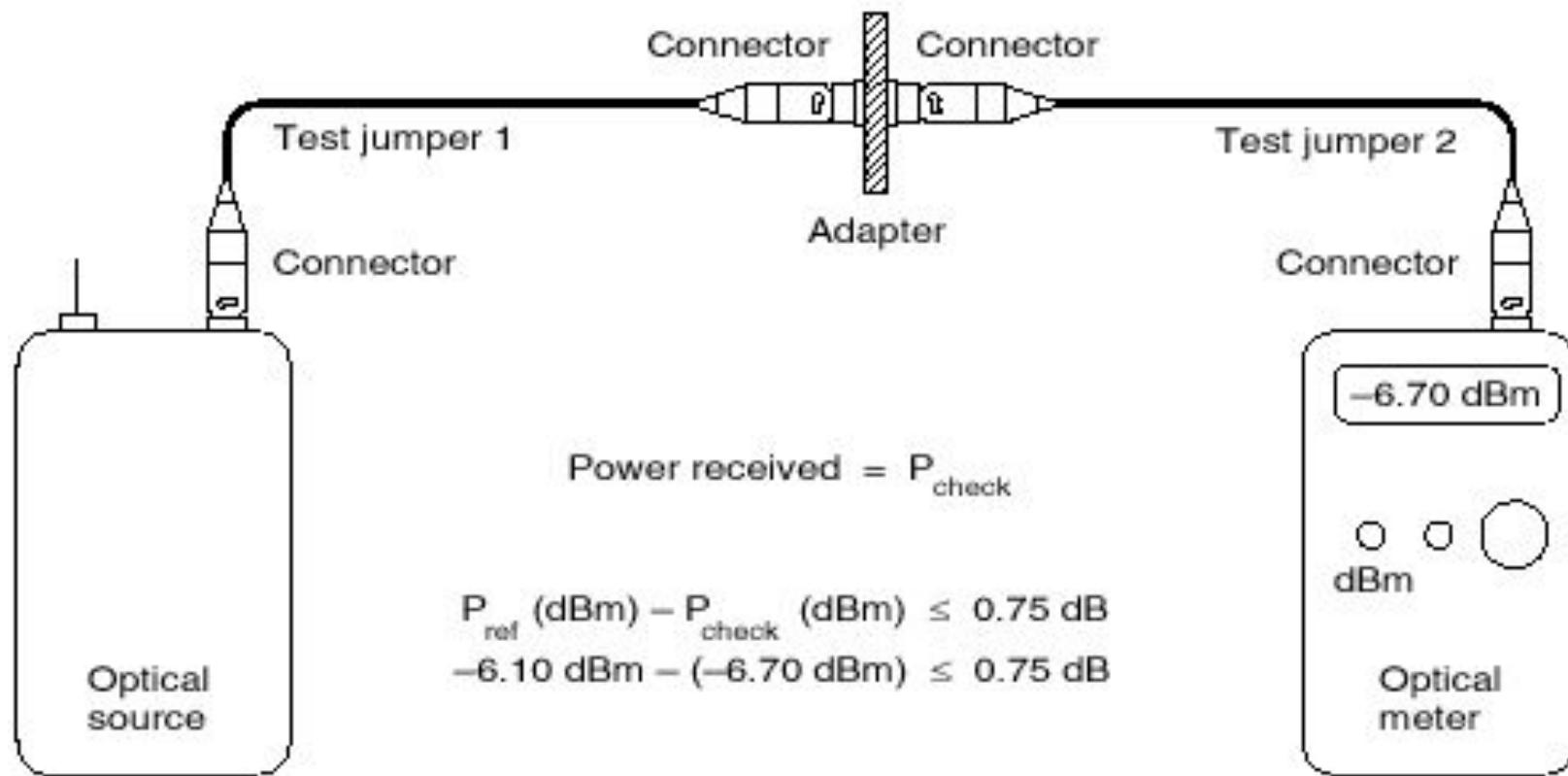


Принцип измерения затухания мощности



dBm = Decibel milliwatt

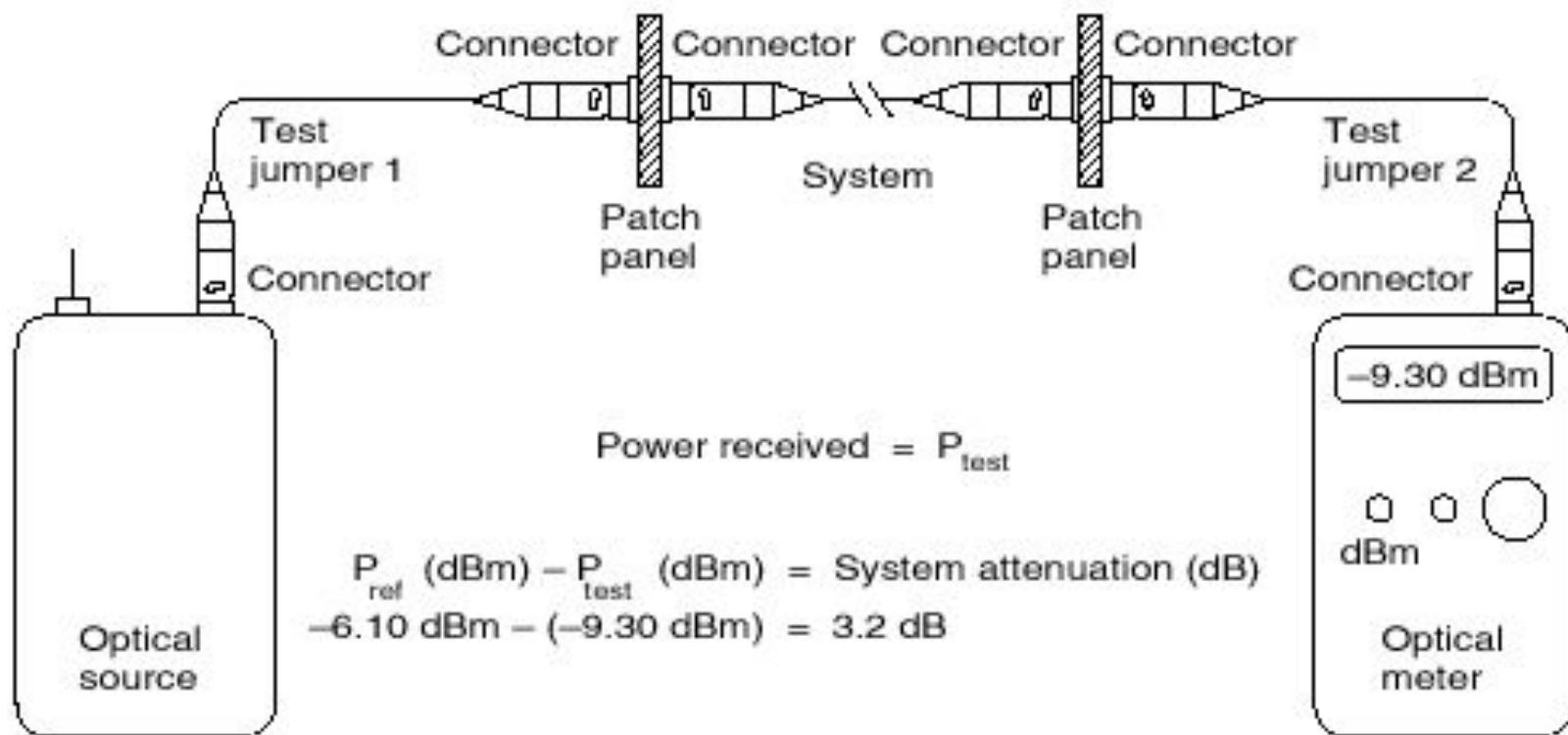
Принцип измерения затухания мощности



dB = Decibel

dBm = Decibel milliwatt

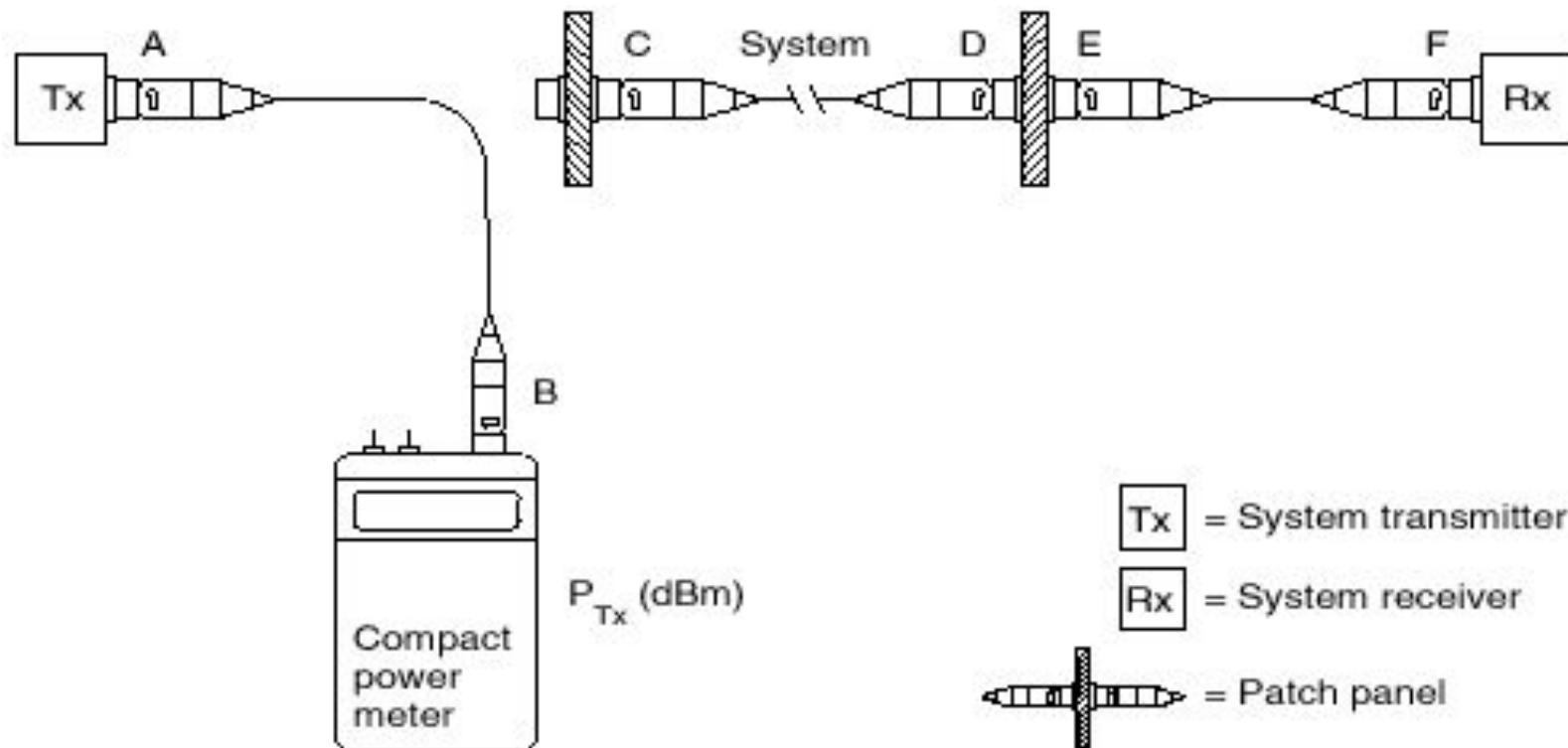
ПРИНЦИП ИЗМЕРЕНИЯ ЗАТУХАНИЯ МОЩНОСТИ



dB = Decibel

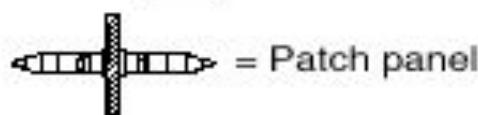
dBm = Decibel milliwatt

Принцип измерения мощности передатчика



Tx = System transmitter

Rx = System receiver



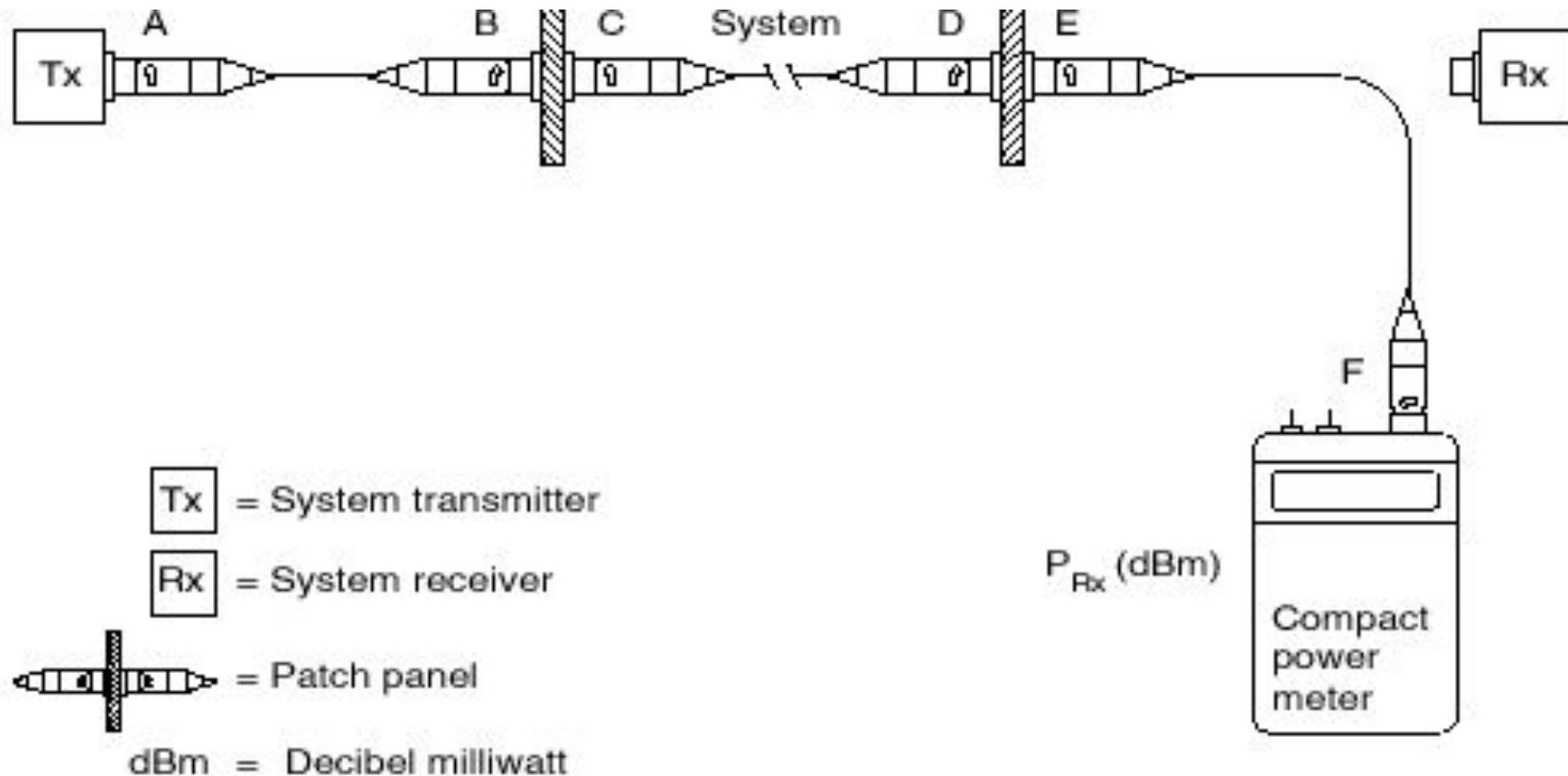
= Patch panel

dBm = Decibel milliwatt

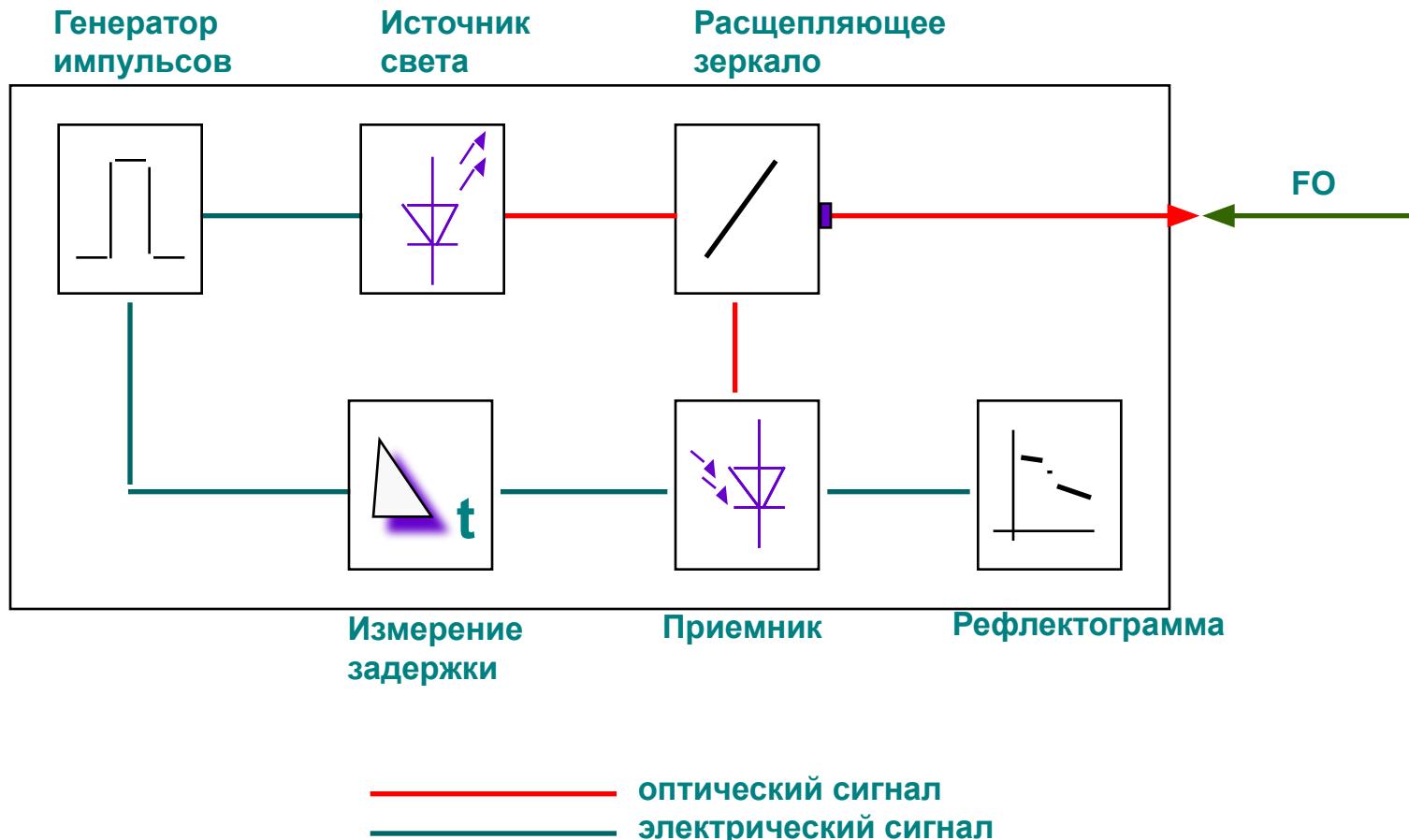


Convincing cabling solutions

Принцип измерения принимаемой мощности

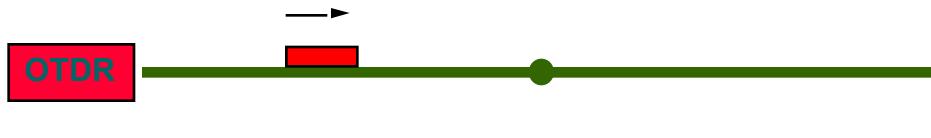
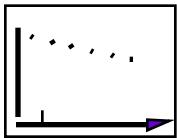


Optical Time Domain Reflectometer (OTDR)

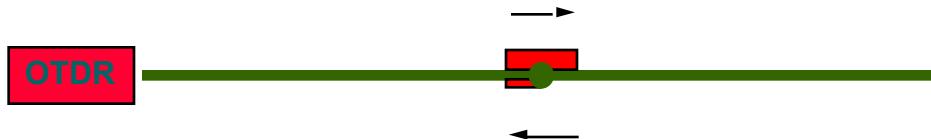
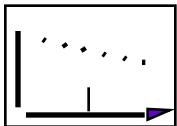


OTDR измерительная процедура

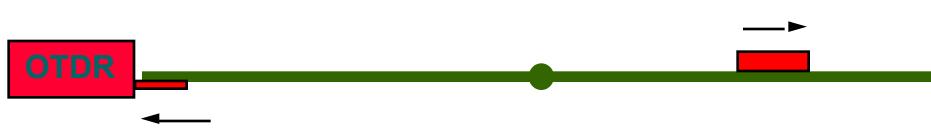
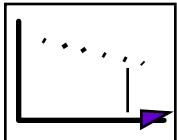
Импульс света распространяется по оптическому волноводу.



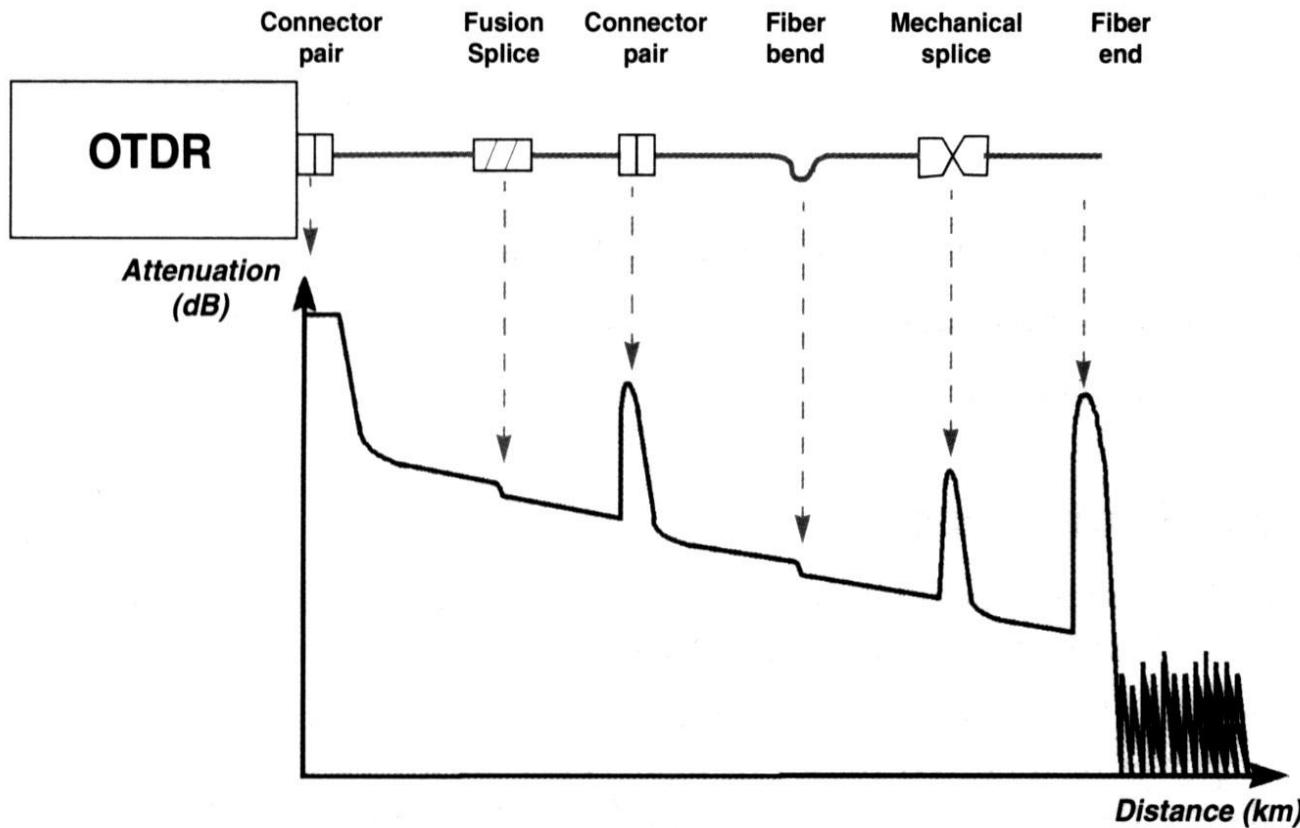
Импульс света частично отражается на неоднородностях.



Отраженный импульс принимается OTDR.



Пример OTDR рефлектомограммы



Typical OTDR trace



Convincing cabling solutions

Типичные и стандартизованные 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

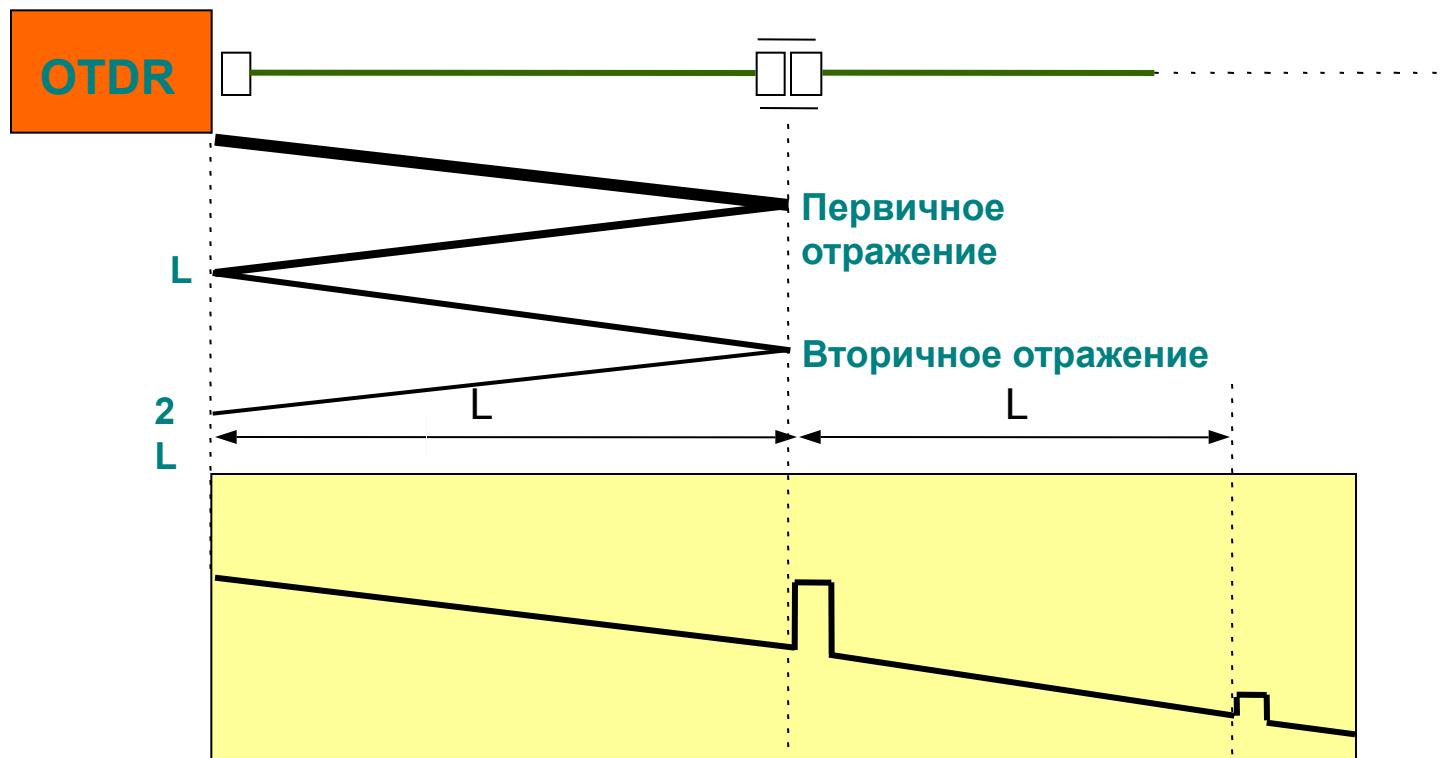
SM: RL: 35 dB IL: также как для MM

Приведения и OTDR???



Cvincing cabling solutions

Вторичные отражения (приведения)



Вопросы?

