

Учебный курс R&Mfreeenet

Теория передачи сигналов по волоконно-оптическим каналам связи

Москва, 2007 г



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).

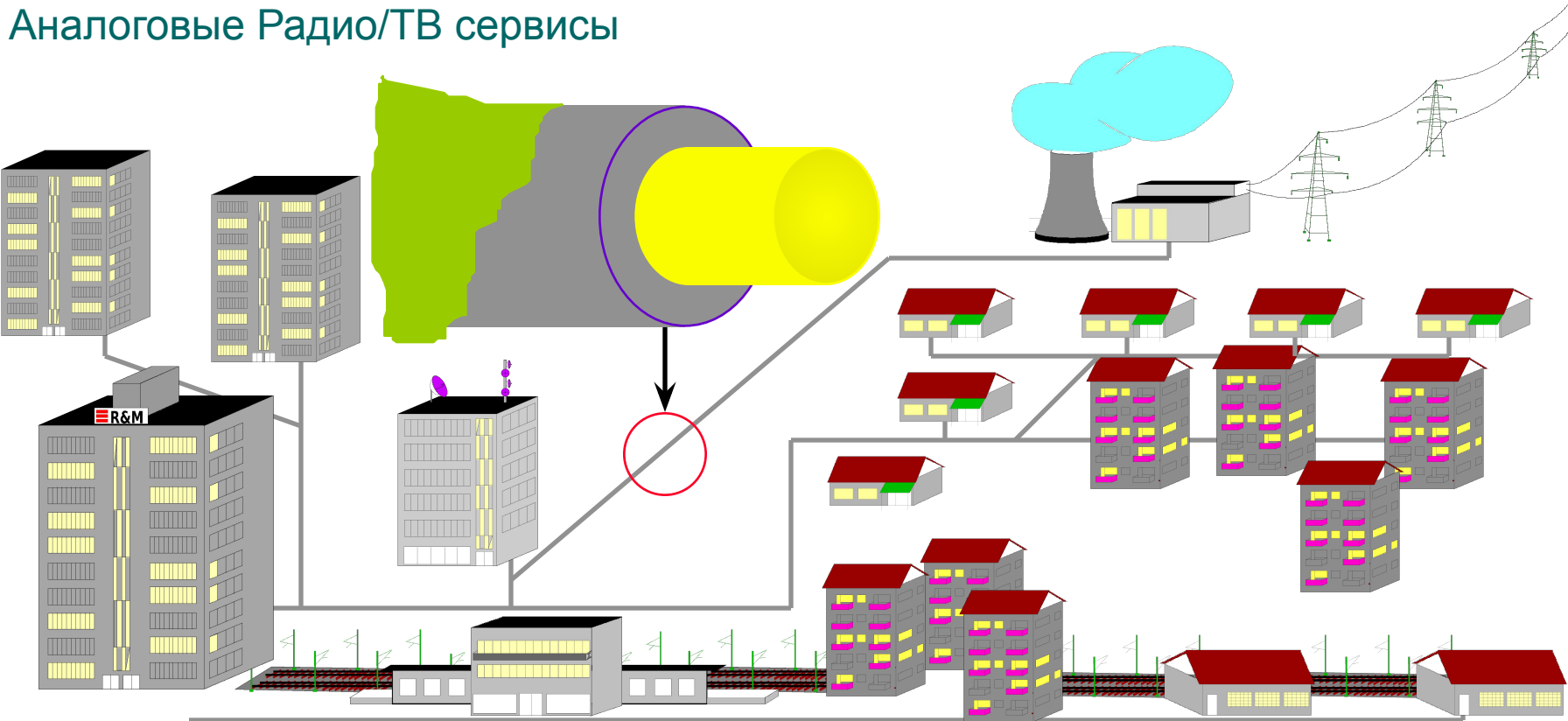


Той волоконно-оптической технологии, о которой мы знаем сегодня, предшествовали два важных научных открытия:

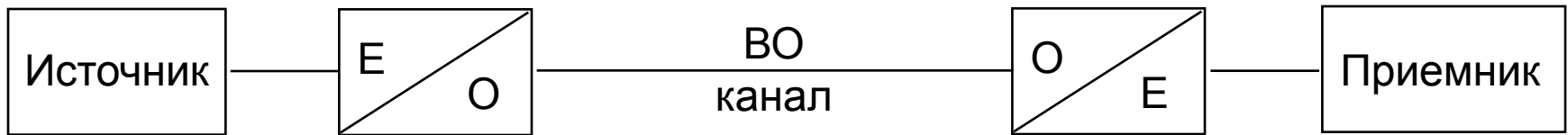
- Передача света через оптически прозрачную среду (1870 первые попытки Mister Tyndall, 1970 первое оптическое волокно Corning)
- Изобретение лазера в 1960

Волоконно-оптическая передача

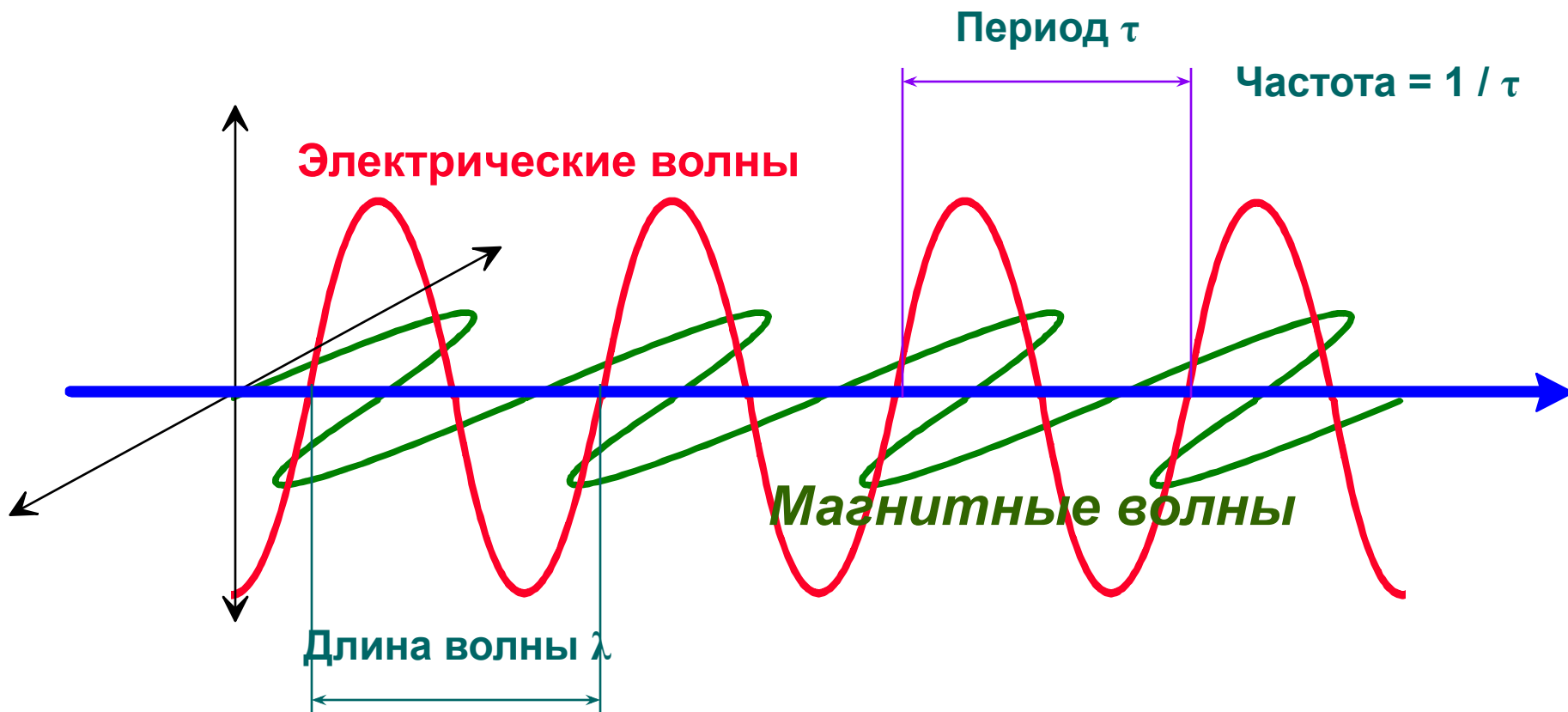
B-ISDN и Цифровой сервис
Аналоговые Радио/ТВ сервисы



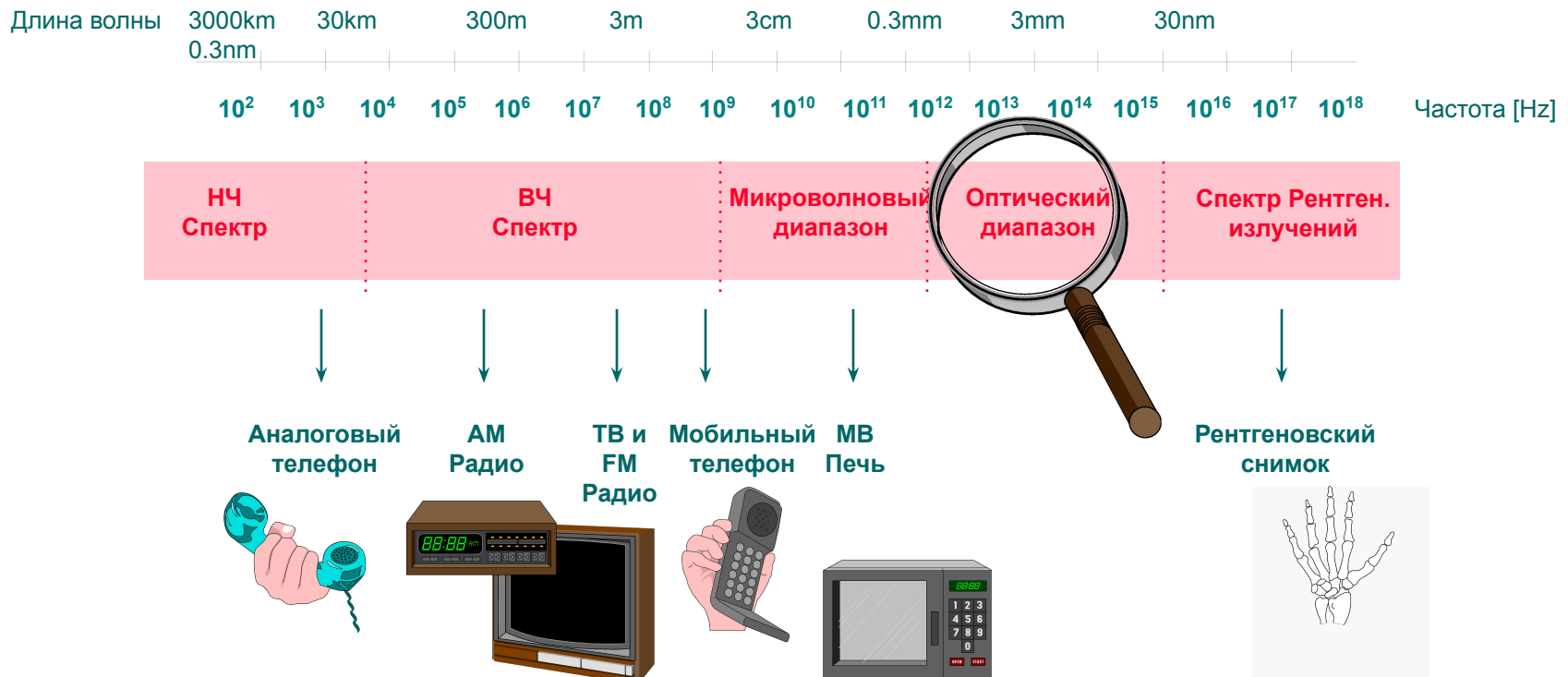
Принцип волоконно-оптической передачи



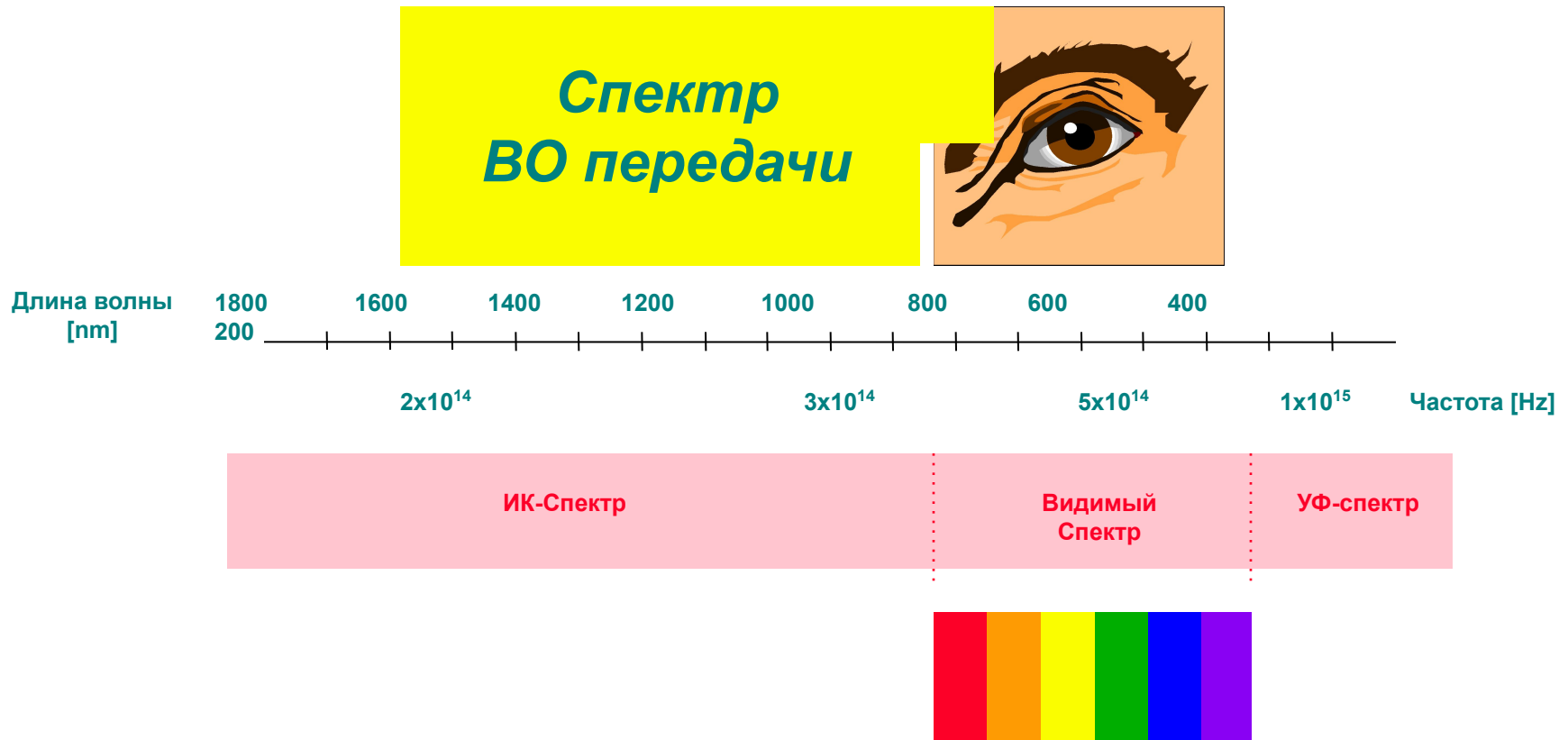
Электромагнитные волны



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

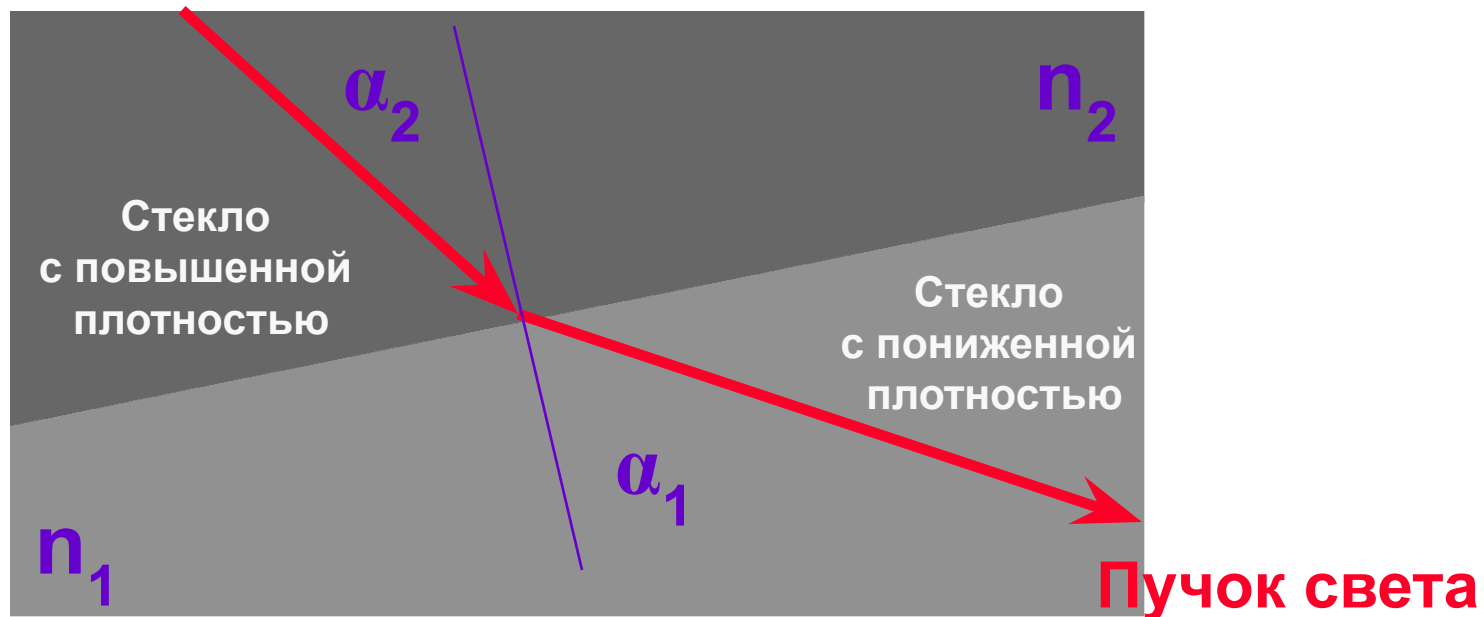
Примечание:

$$n_{\text{возд.}} = 1.0003,$$

$$n_{\text{стекла}} = 1.5000$$

$$n_{\text{сладкой воды}} = 1.8300$$

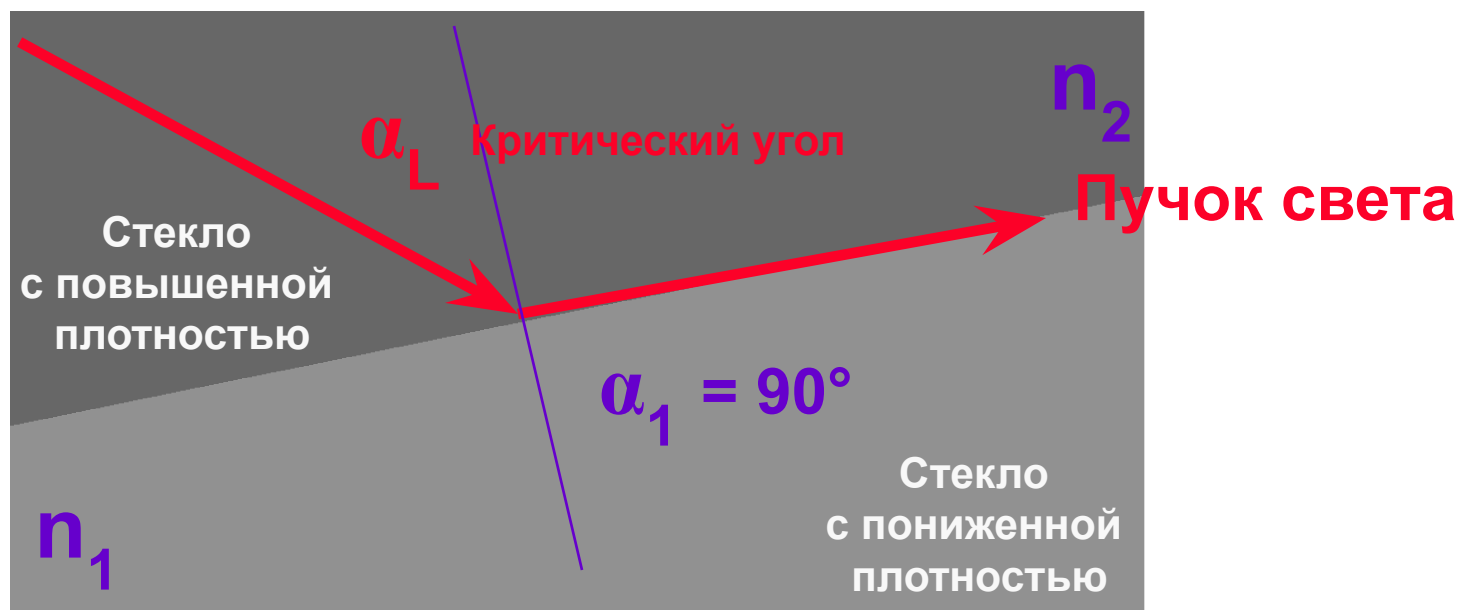
Преломление



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

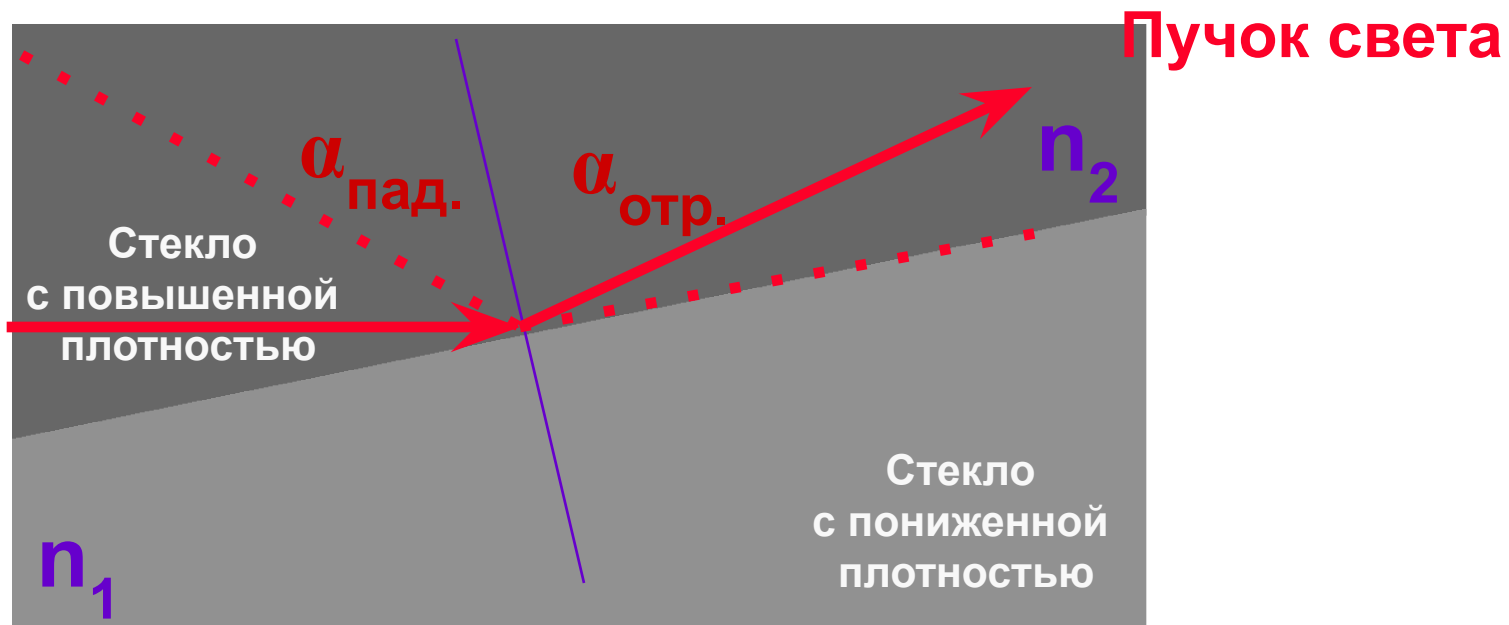
$$\sin \alpha_2 / \sin \alpha_1 = n_1 / n_2$$

Полное преломление, Критический угол



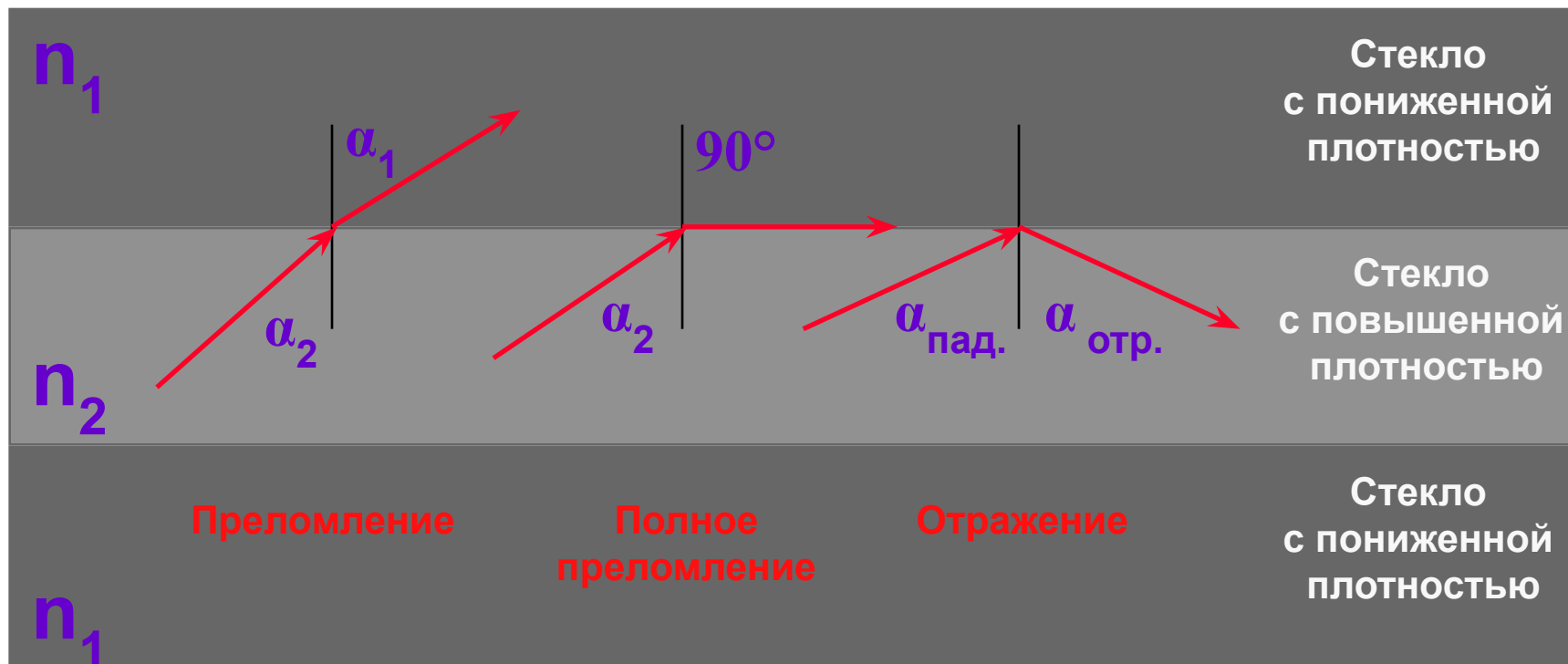
Примечание: $n_1 < n_2$ и $\alpha_2 = \alpha_L$ $\sin \alpha_1 = 1$ \longrightarrow $\sin \alpha_L = n_1 / n_2$

Полное внутреннее отражение

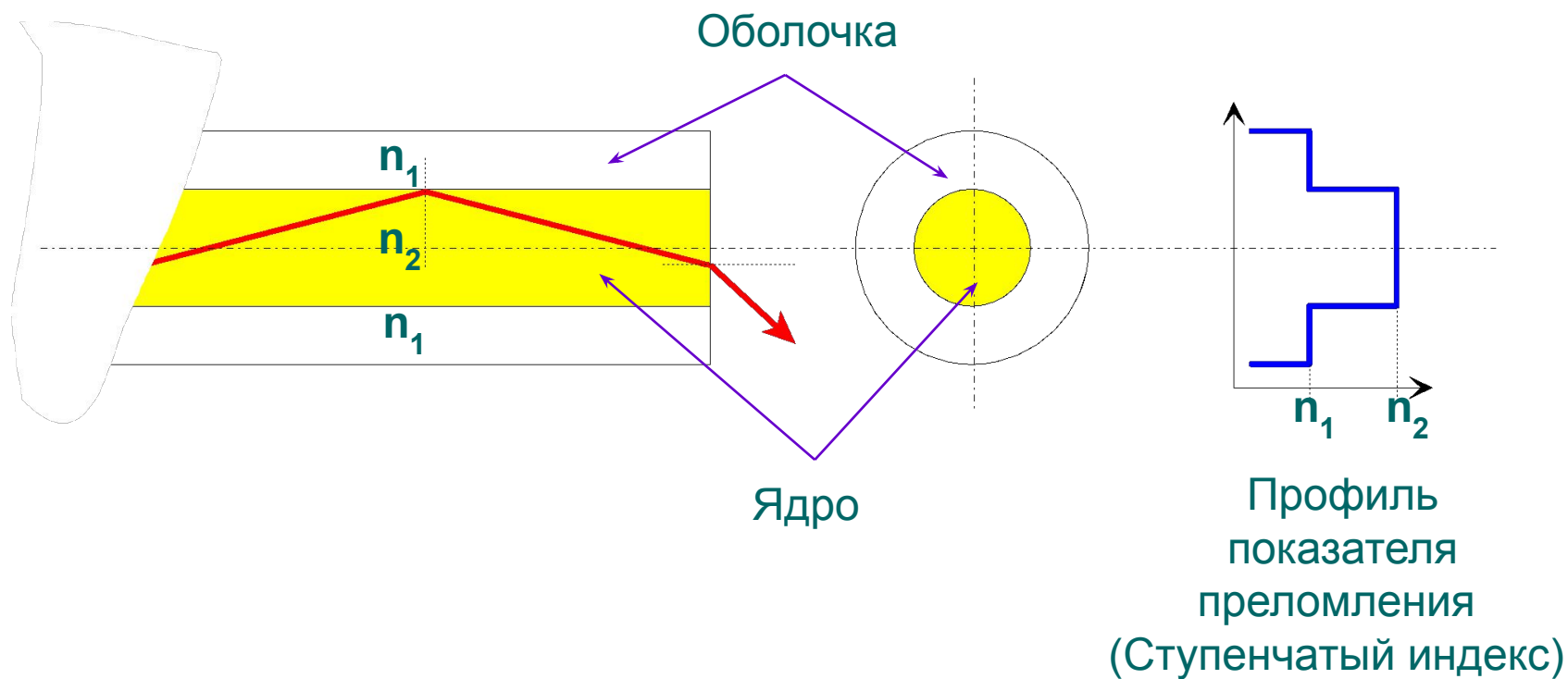


Примечание: $n_1 < n_2$ и $\alpha_{\text{пад.}} = \alpha_{\text{отр.}}$

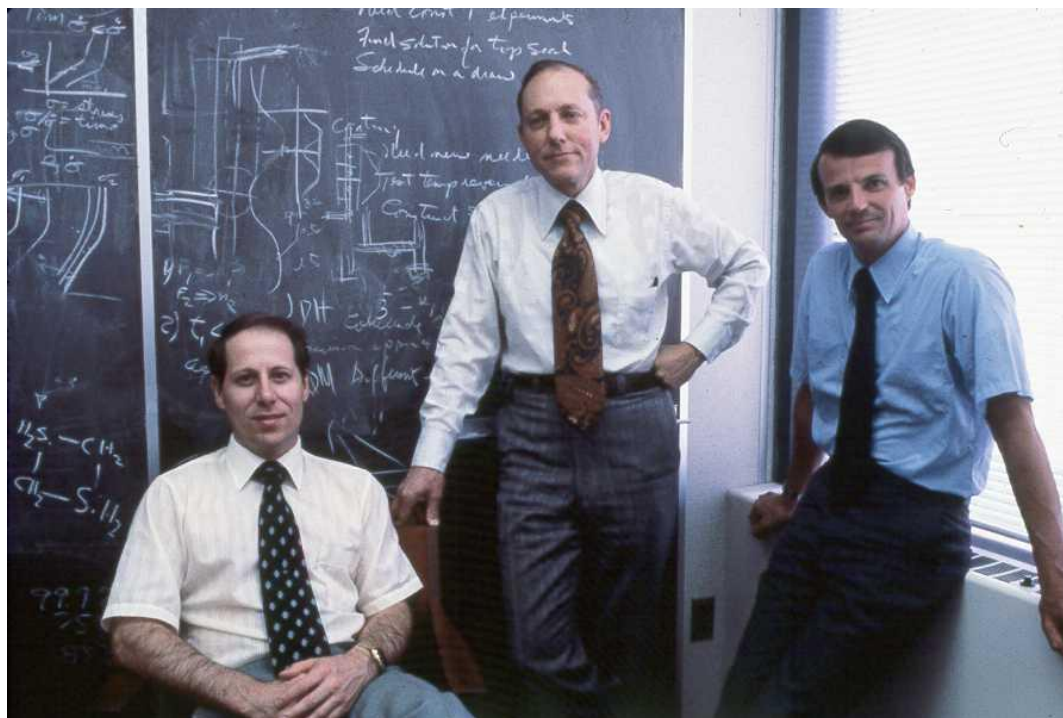
Изменение направления света в материале



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



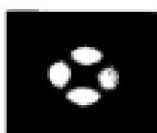
22



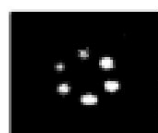
01



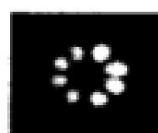
11



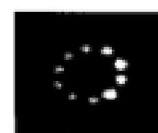
21



31

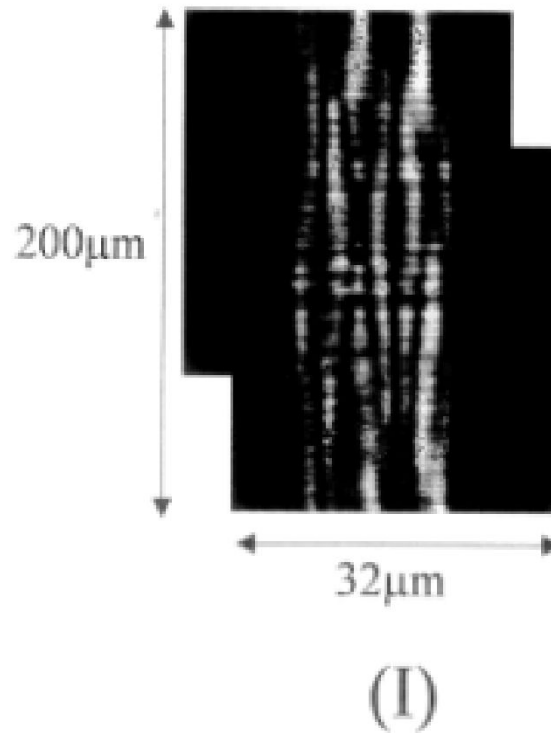


41

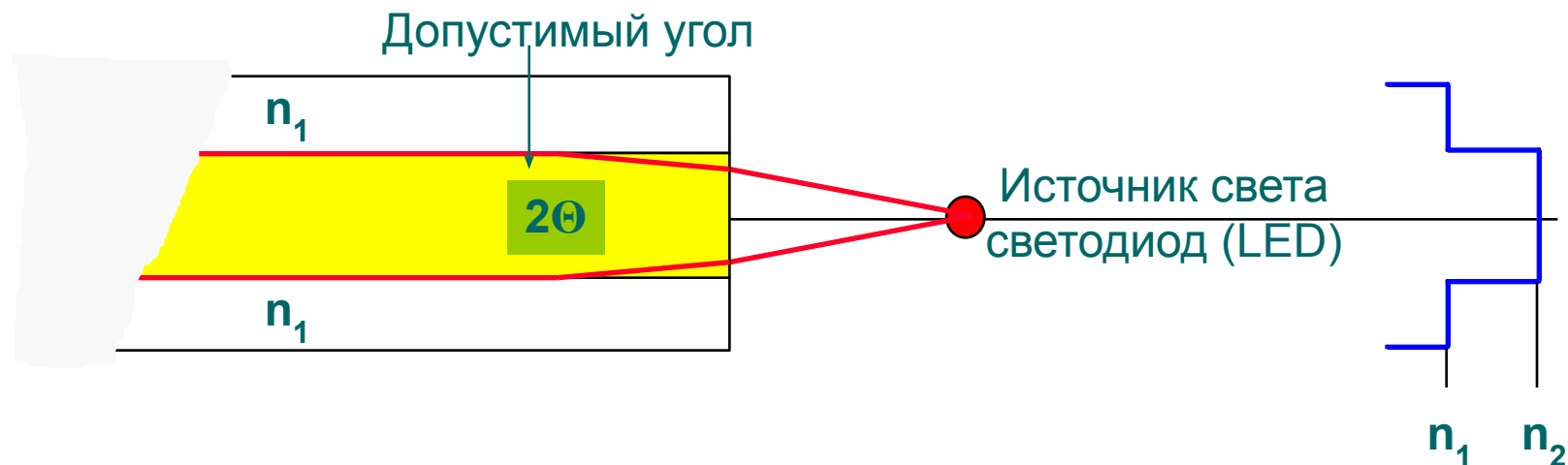


51

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)

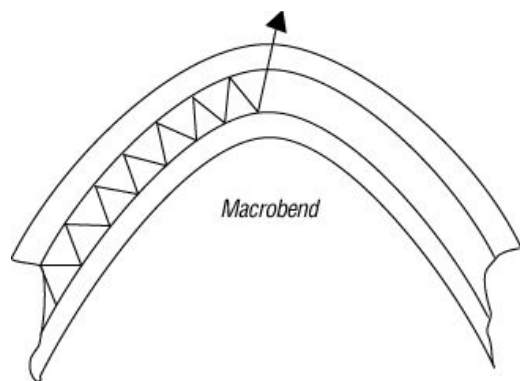
Численная Апертура и характеристики передачи

- ✓ Большое значение **NA** означает Большое значение 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

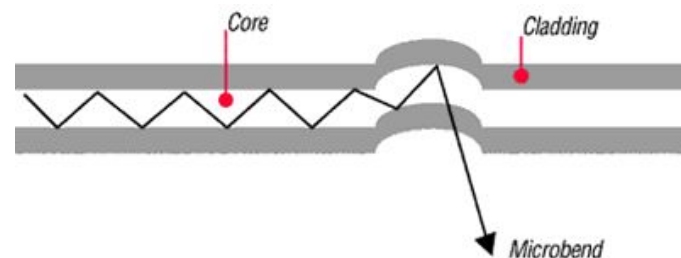
Примечание:

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



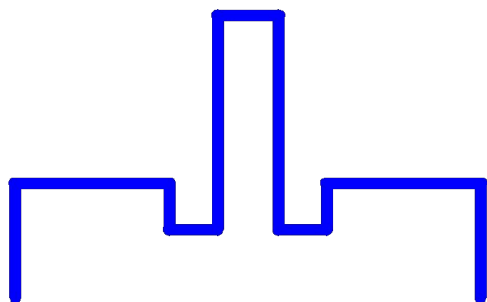
Макроизгибы



Микроизгибы

Типы профилей коэффициента преломления

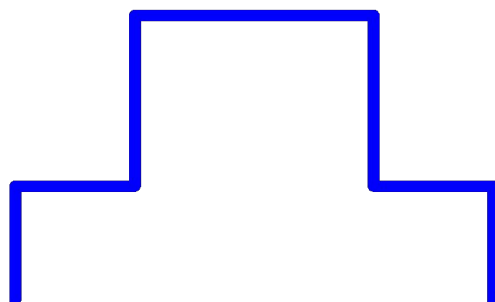
Ступенчатый индекс



Для одномодовой передачи

Размер ядра ~9 мкм

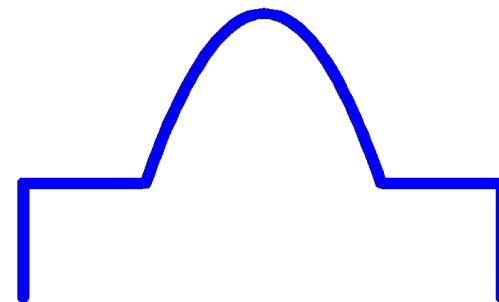
Ступенчатый индекс



Для многомодовой передачи

Размер ядра 50мкм

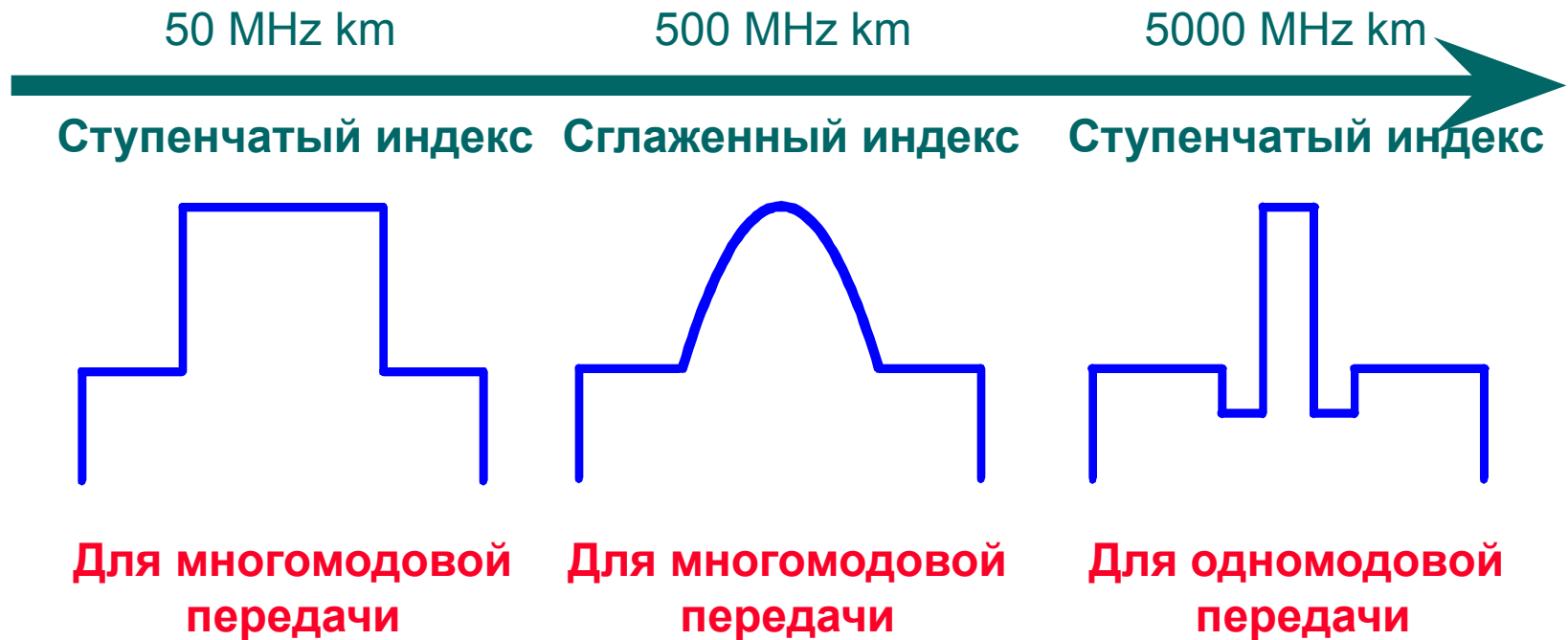
Сглаженный индекс



Для многомодовой передачи

Размер ядра 50 или 62.5мкм

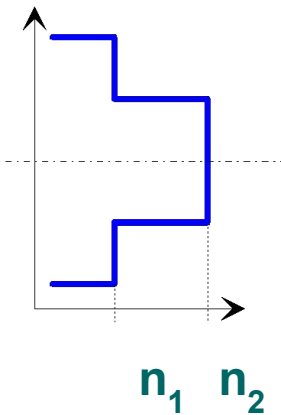
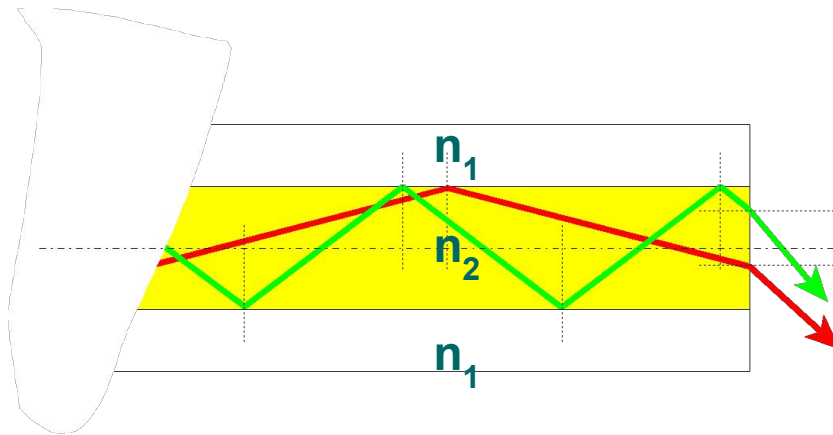
Типы профилей коэффициента преломления



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)

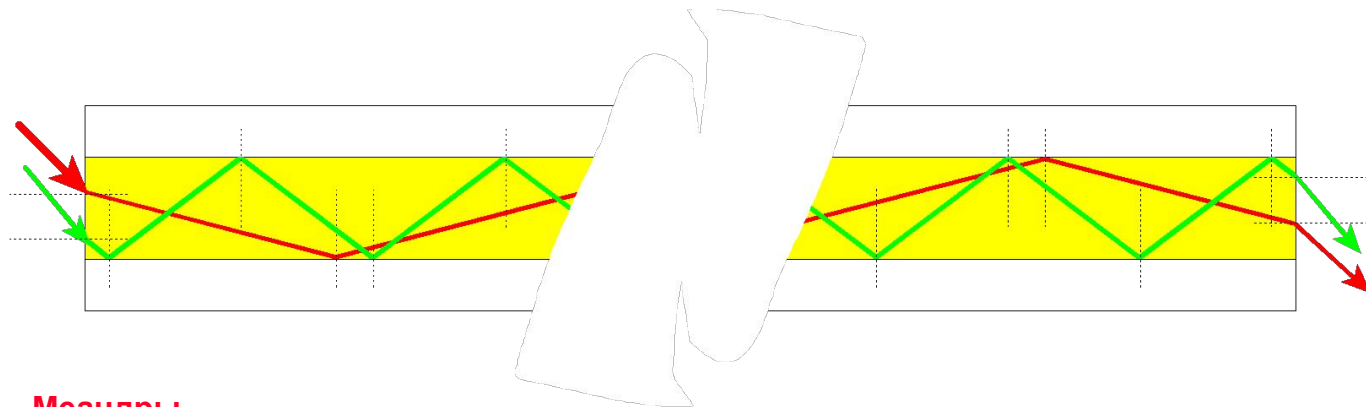


$$\text{Число Мод } M = 0.5 \times (\pi \times d \times \text{NA} / \lambda)^2$$

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



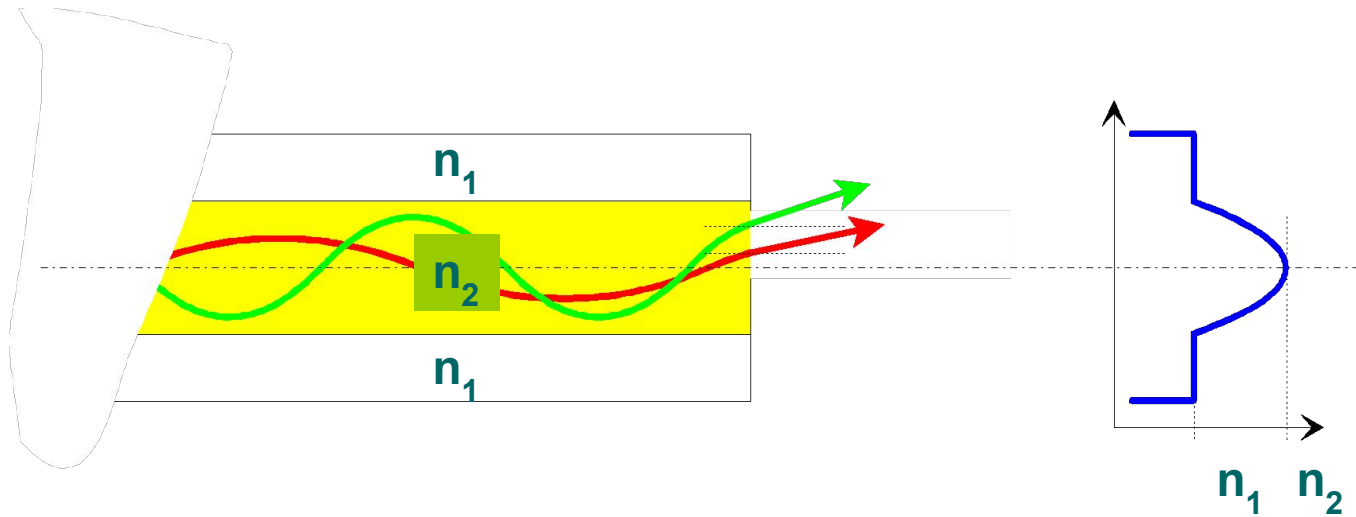
Тип импульса на
Источнике

Деформированные Импульсы



Тип импульса на
Приемнике

Многомодовое волокно (Сглаженный индекс)

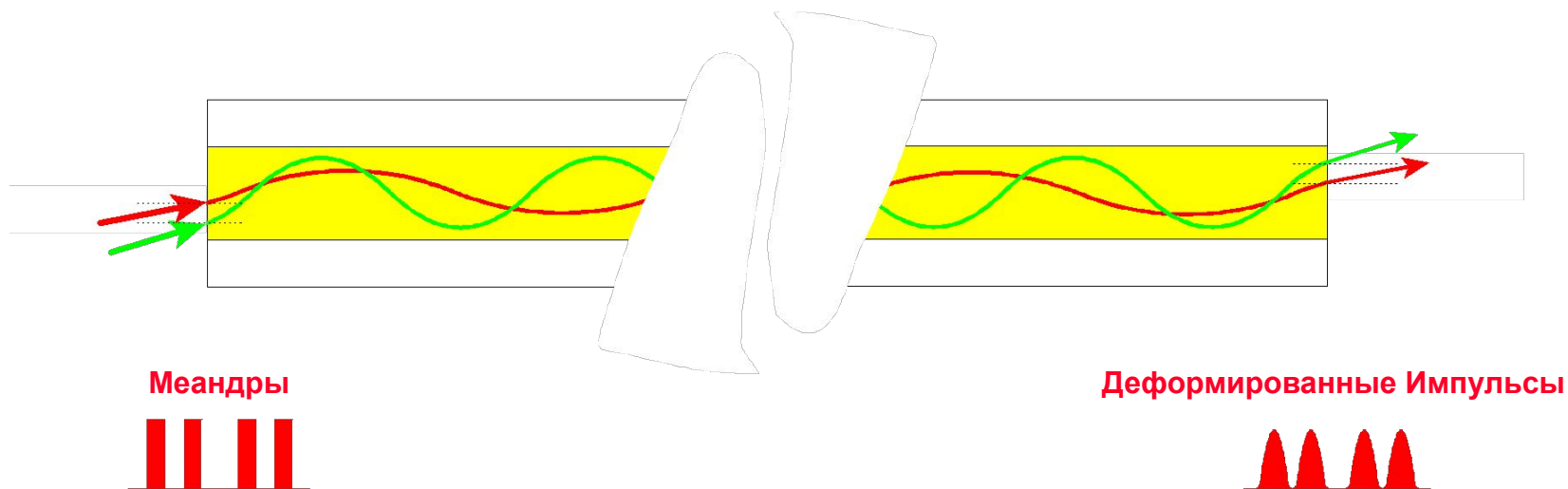


Число Мод $M = 0.25 \times (\pi \times d \times NA / \lambda)^2$

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

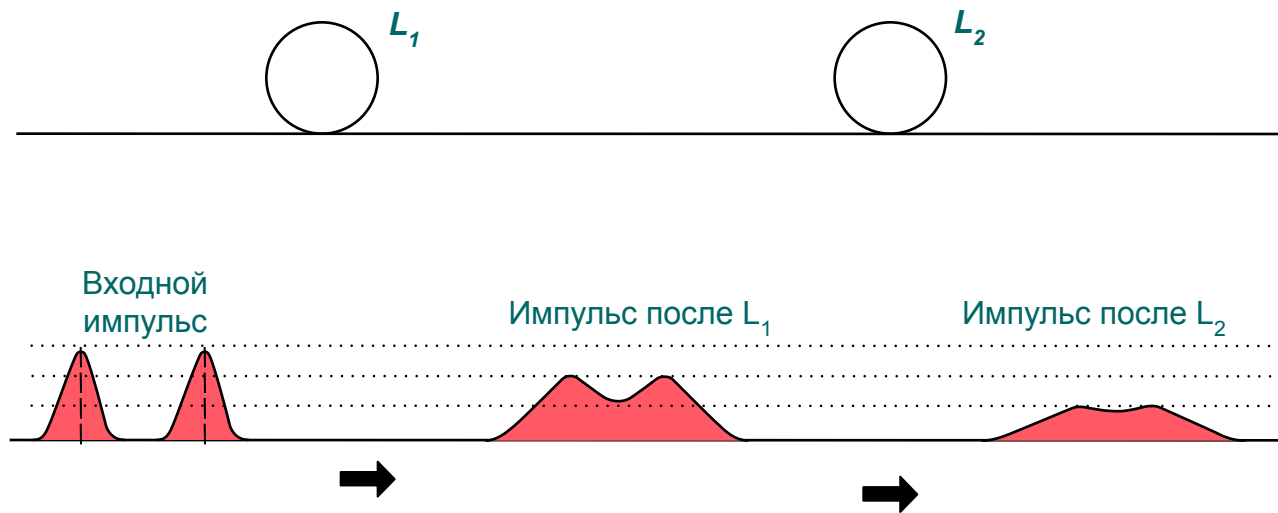


Форма импульса на передающей стороне

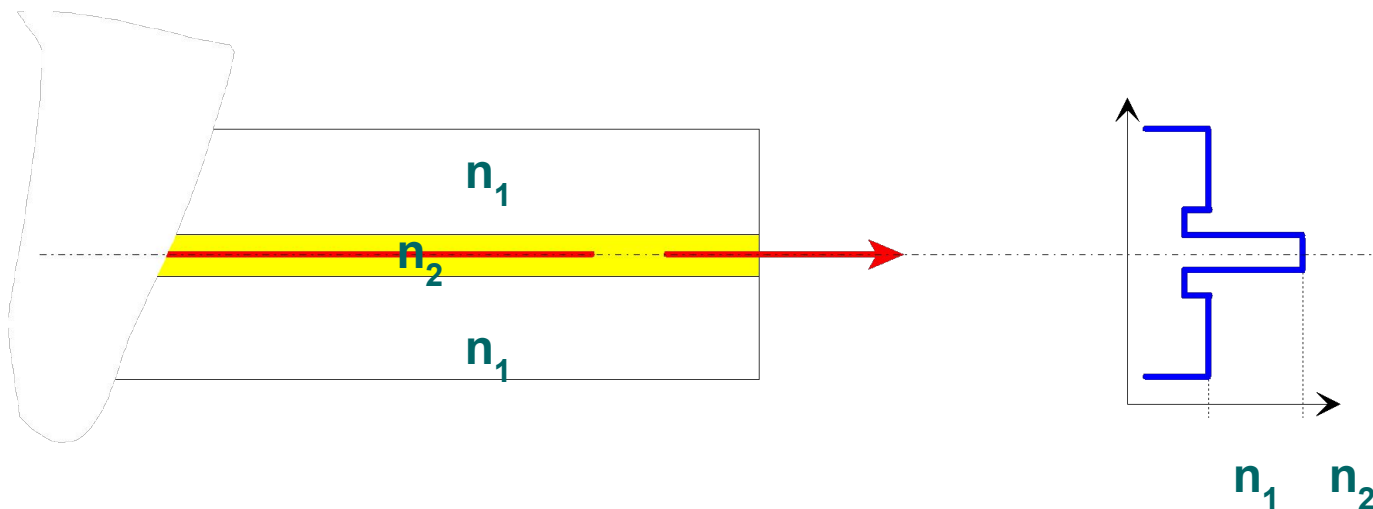
Форма импульса на приемной стороне

Дисперсия

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



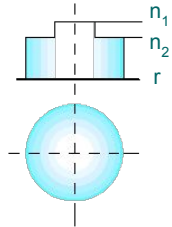
Одномодовое волокно



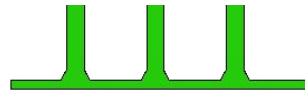
Пример: $n_1 = 1.4570$ и $n_2 = 1.4625$

Профиль
показателя
преломления
(Ступенчатый индекс)

Волоконно-оптическая теория

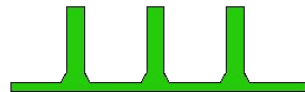
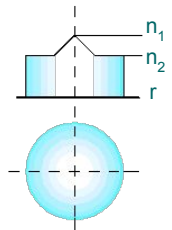
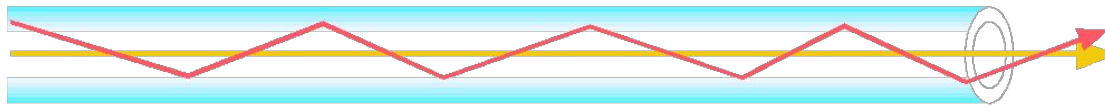


Вносимый сигнал

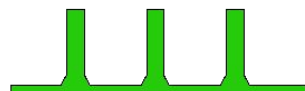
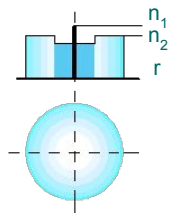
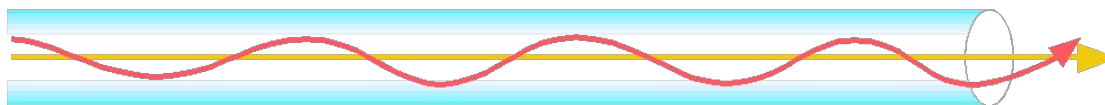
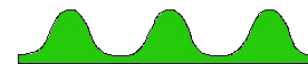


Многомод ступенчатый

Выходной сигнал



Многомод градиентный



Одномод



Виды дисперсии

Многомодовое
ВОЛОКНО

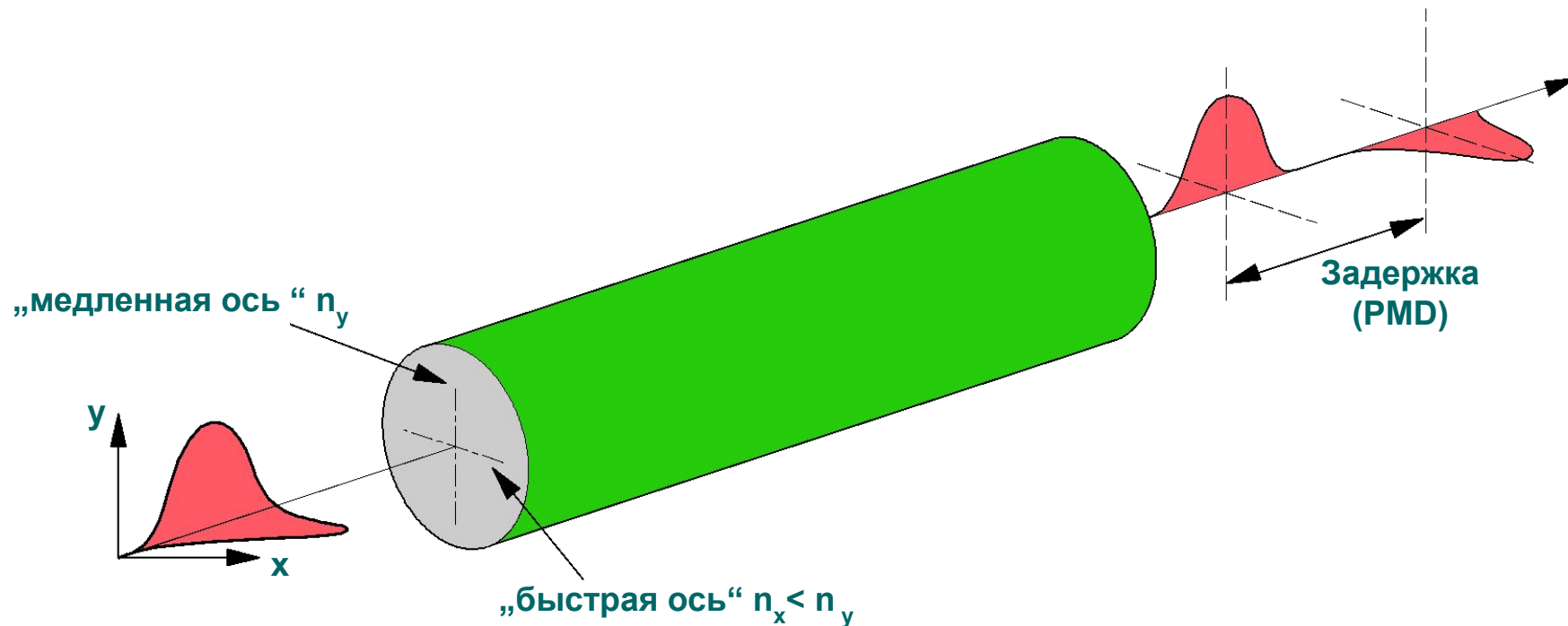
Одномодовое
ВОЛОКНО

Модовая
дисперсия

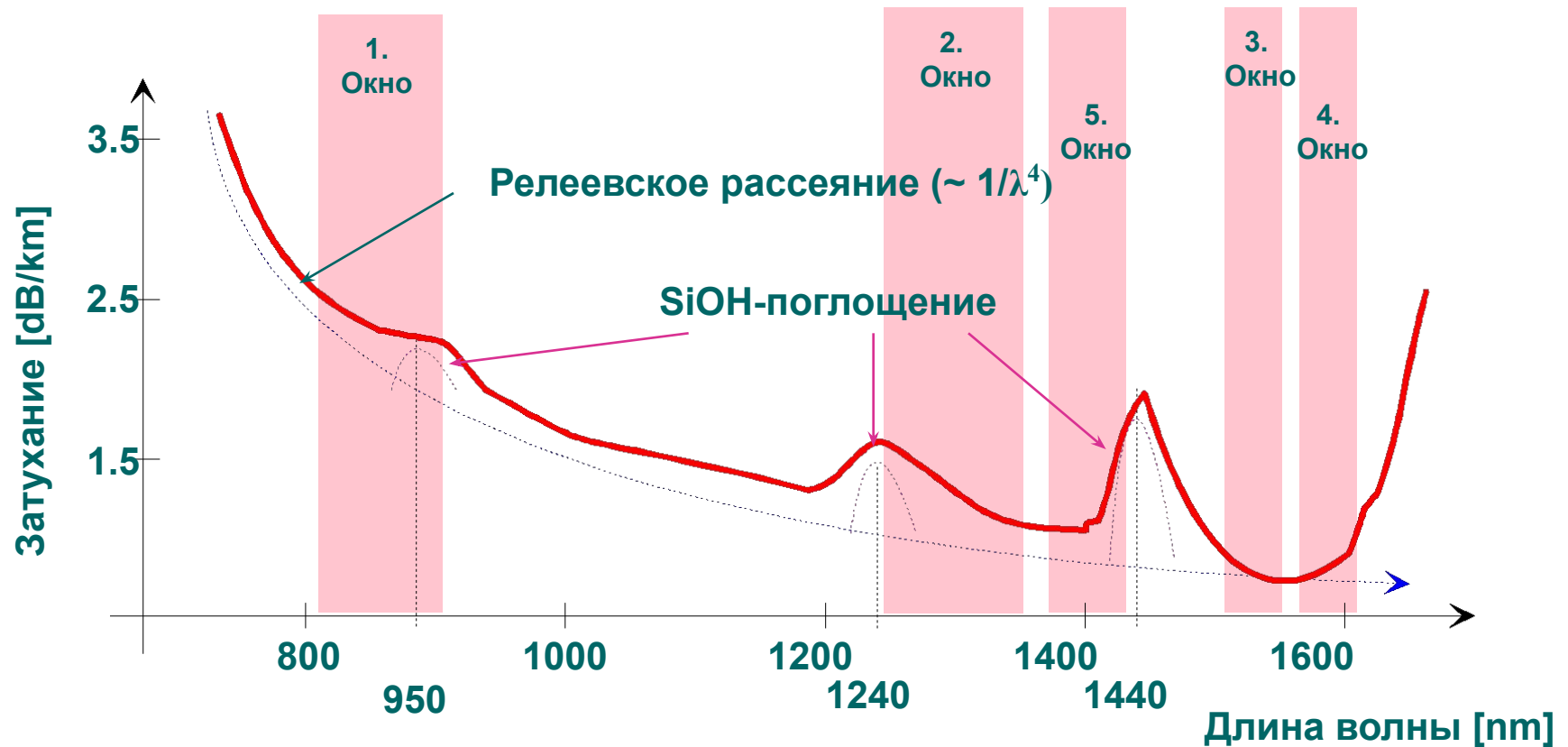
Хроматическая
дисперсия
[ps/km * nm]

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

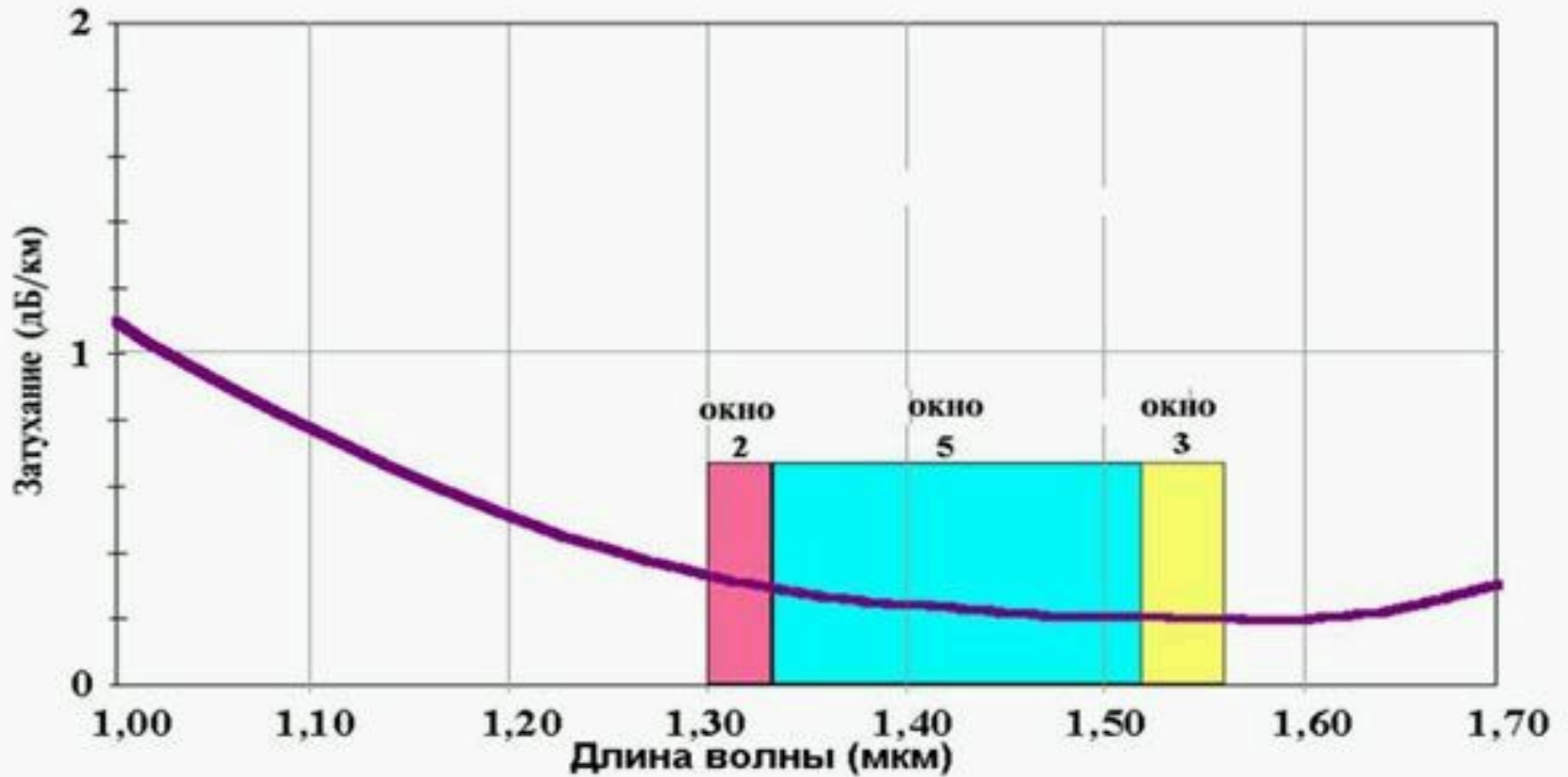
PMD для одномодового оптического волокна



Затухание многомодовых волокон

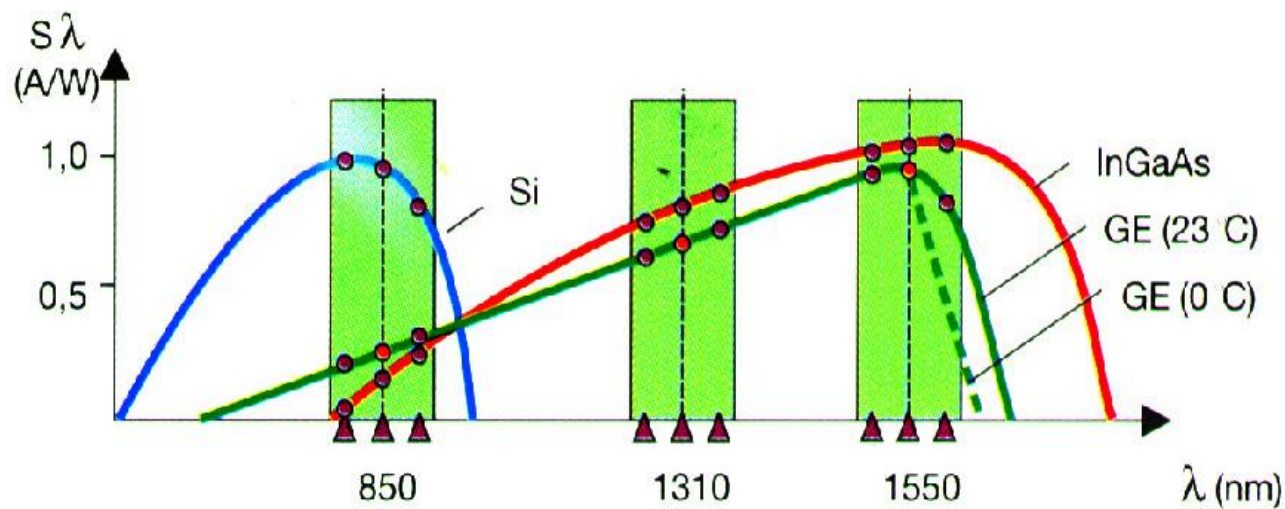


Затухание одномодовых волокон



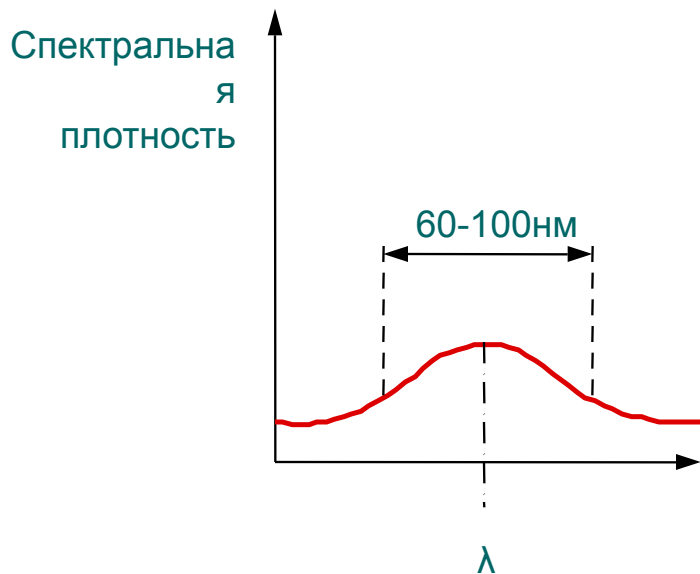
Зависимость коэффициента затухания от длины волны одномодового оптического волокна

Спектральная чувствительность детекторов

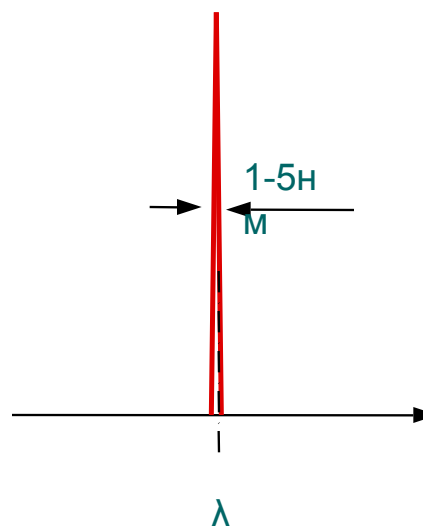


Спектр излучения лазера и LED

LED
(светодиод)
от -15 до -25дБмВт

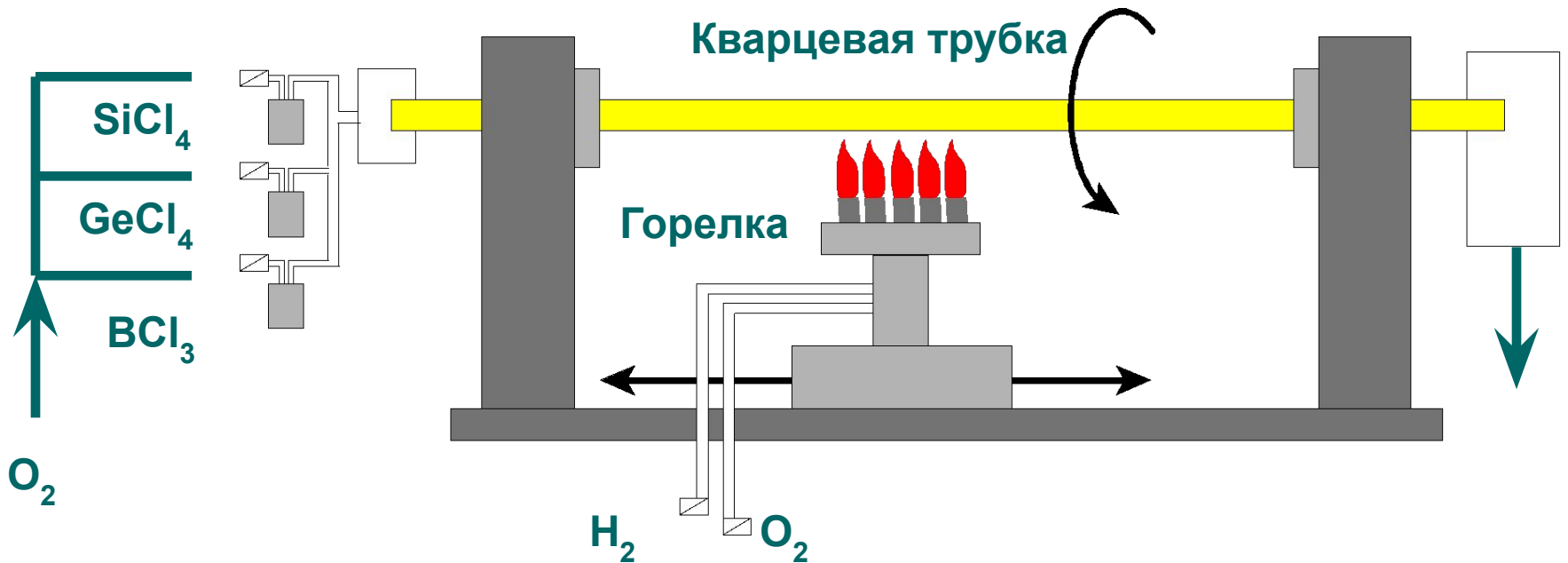


LASE
+5 до -10
дБмВт

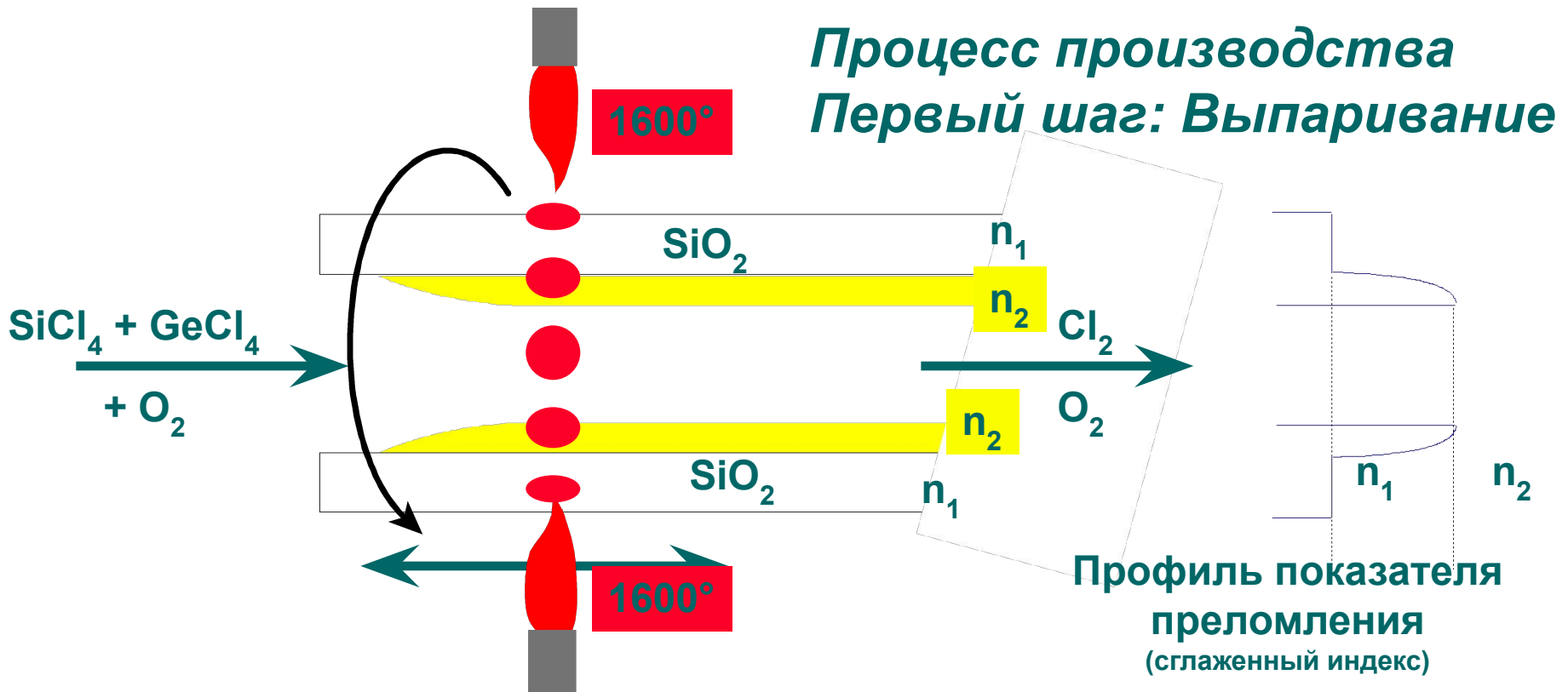


Производство ММ волокон

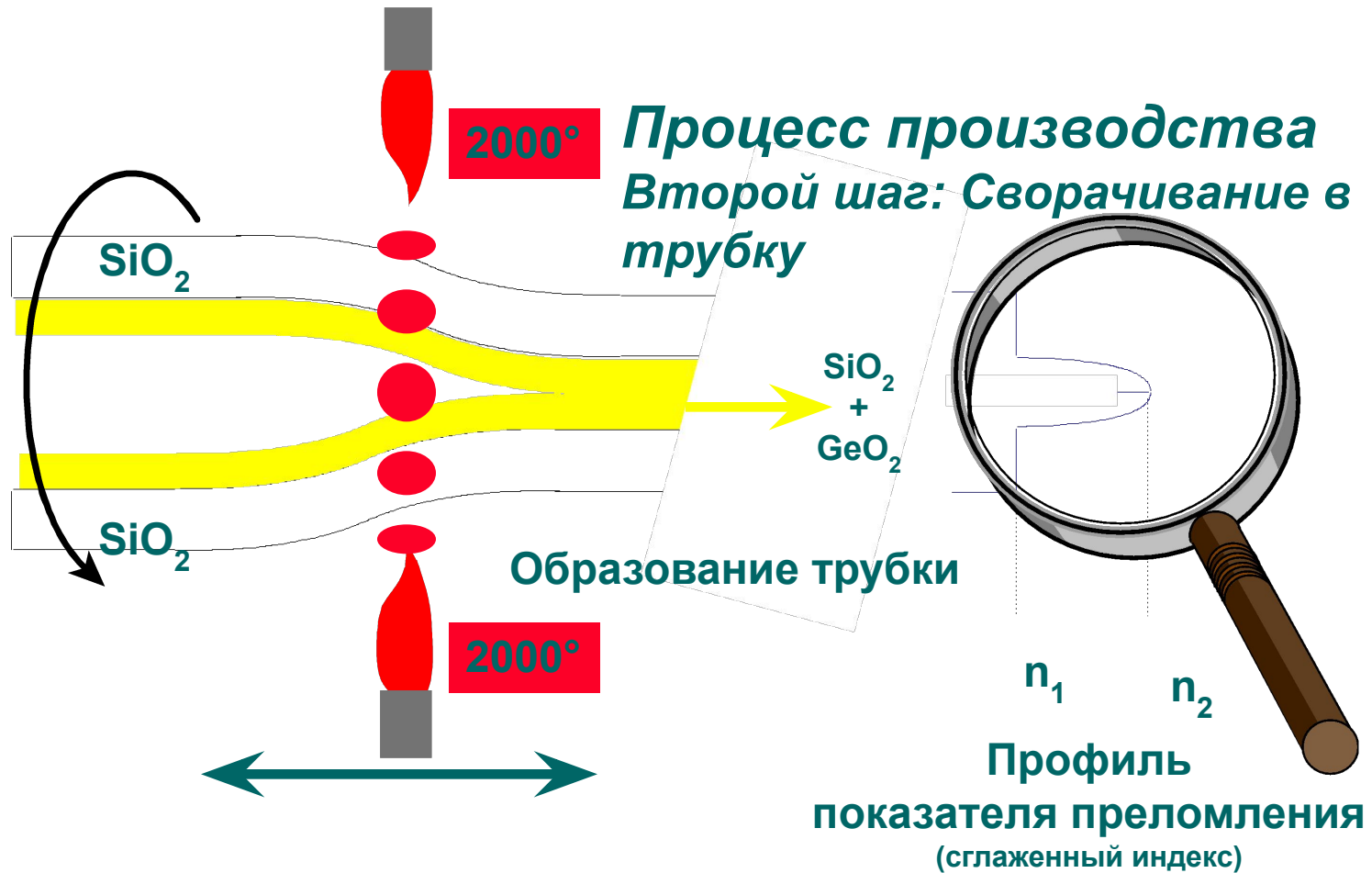
Метод модифицированного химического осаждения путем выпаривания (MCVD-Process)



MCVD-процесс



«Схлопка»

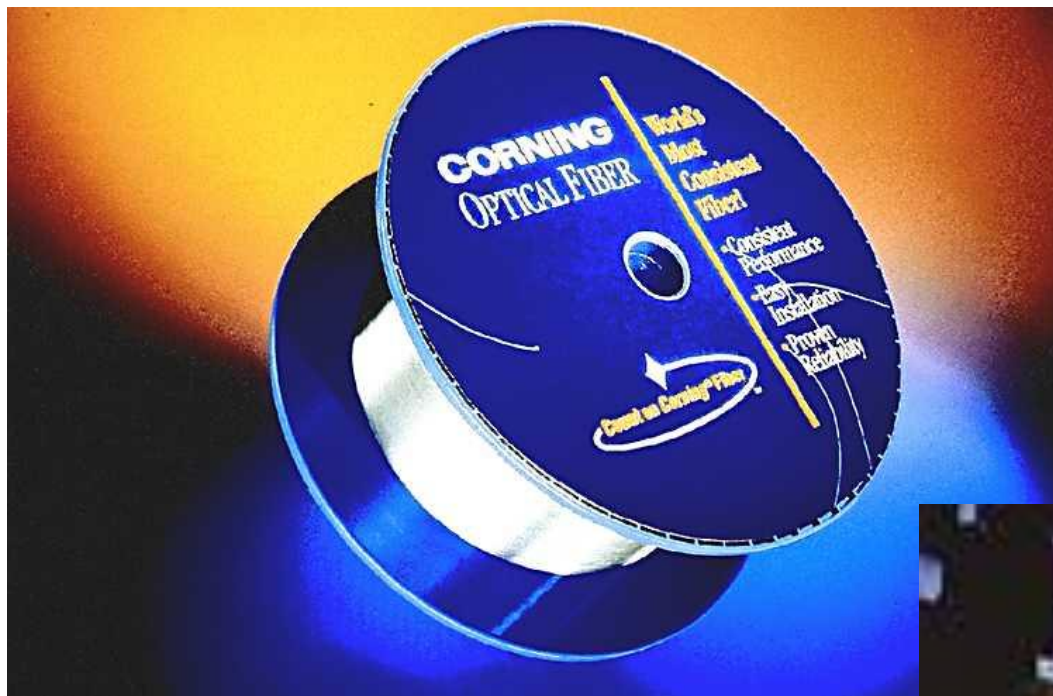


Протяжка

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

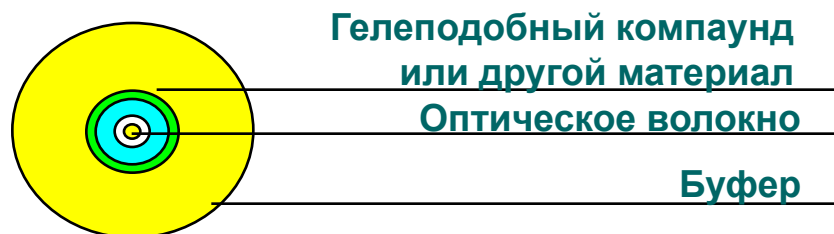
Плотно прилегает; из термопластика.



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

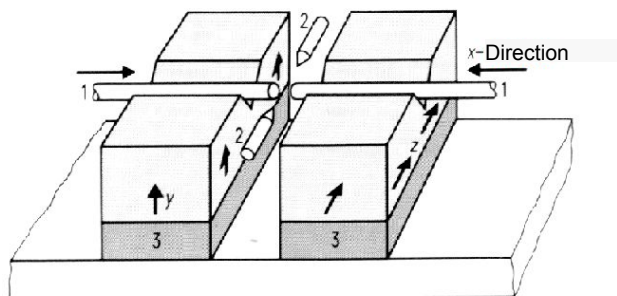
Какой способ использовать зависит от:

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

Неразъемное соединение

Принцип работы

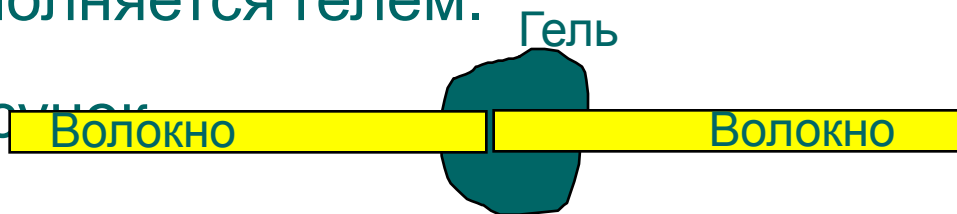
- Очищенные и сколотые волокна совмещаются друг с другом торцами как можно плотнее в сварочном аппарате (по возможности без горизонтальных или вертикальных смещений). Свариваются. Затем, сварное соединение защищается так называемой гильзой защиты сварного соединения.



Квази-разъемное соединение

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

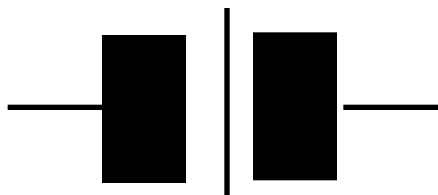
• Рисунок



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 <ul style="list-style-type: none"> • Equipment • Initial Installation • Repeated disconnect and connect | medium high very low | low high low | high low high |
| Alignment principe | 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)



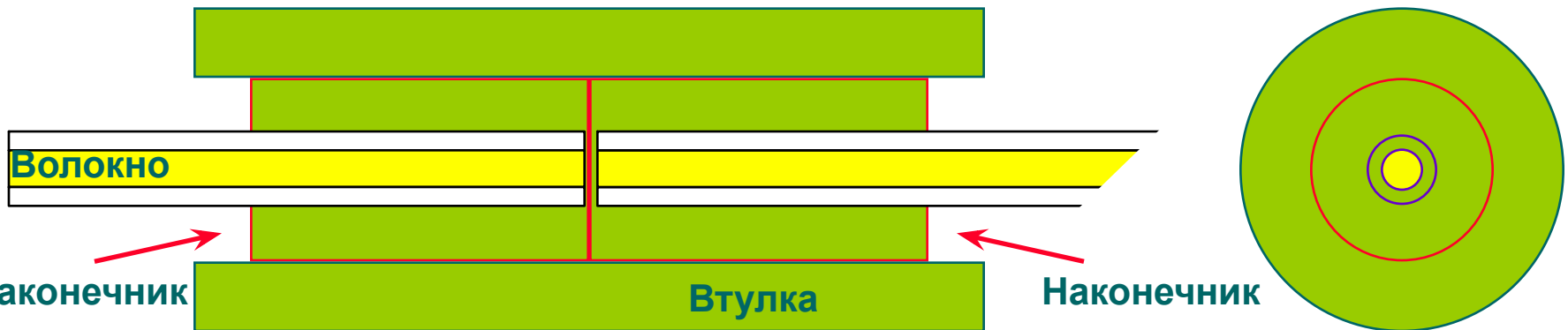
Технология совмещения – Цилиндрическая гильза

Допустимое отклонение

Наконечник 2.4990 - 2.4995
Втулка 2.4995 - 2.5000

Материалы

Наконечник железо, карбид вольфрама
Втулка железо, карбид вольфрама



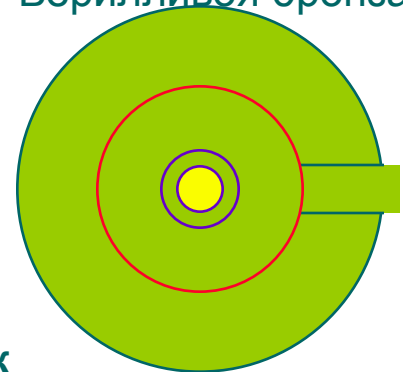
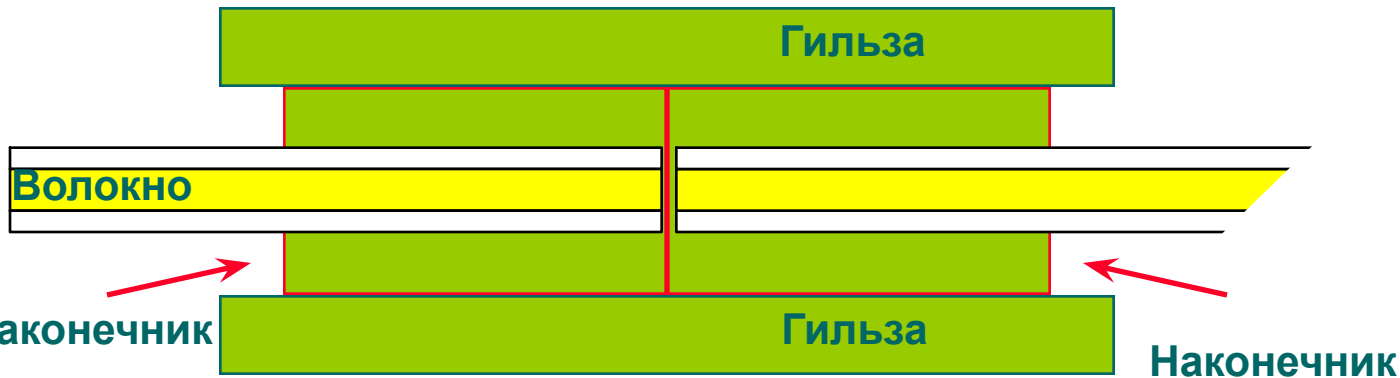
Технология совмещения - Эластичная гильза

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

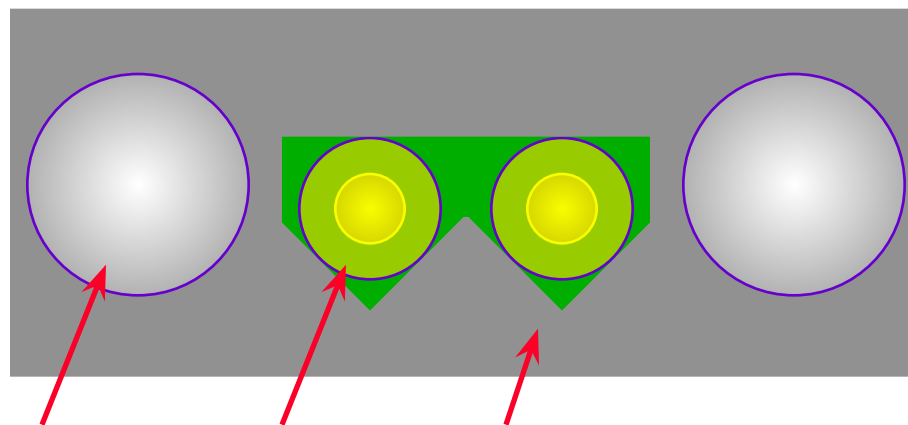


Новые технологии совмещения – V-образный канал

Материалы

V-обр. желоб Силиконовая подложка

Центровщик Карбид вольфрама



Центровщик

Волокно

V - обр. желоб

Вносимые потери - внутренние

Разницей в:



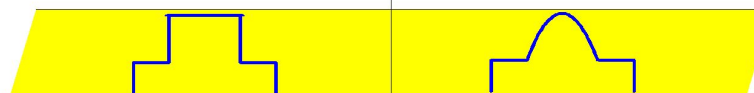
Диаметра ядер



Численных
Апертура



Профилей
показателя
преломления



Вносимые потери - Внешние

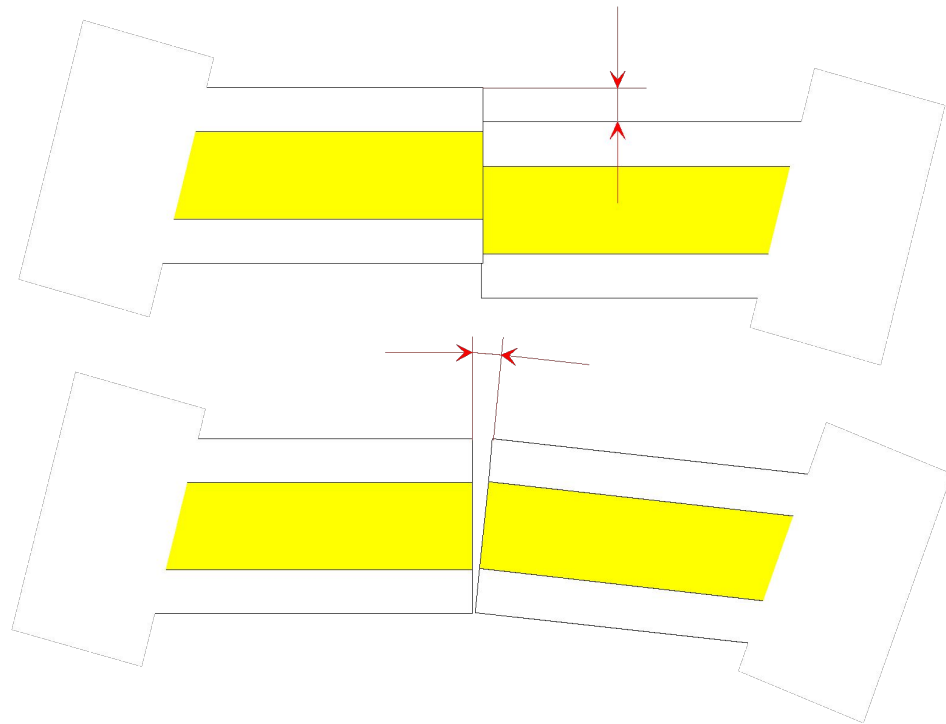
Относительное
позиционирование:



Горизонтальное
несовпадение
волокон



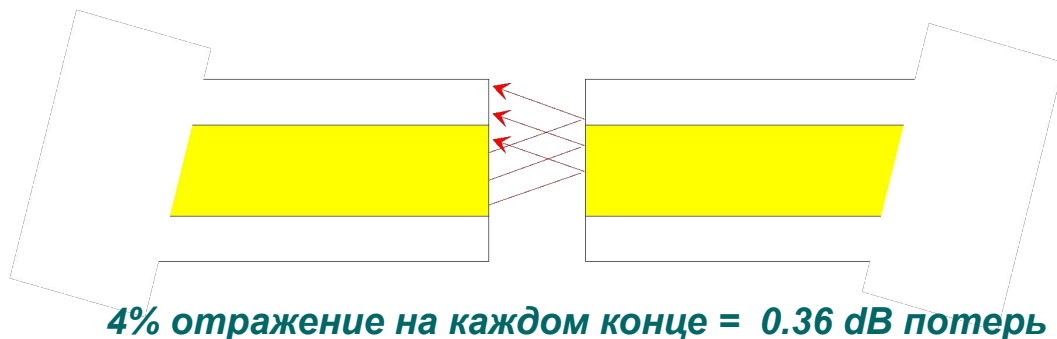
Осевой наклон



Вносимые потери - внешние



Неплотное прилегание



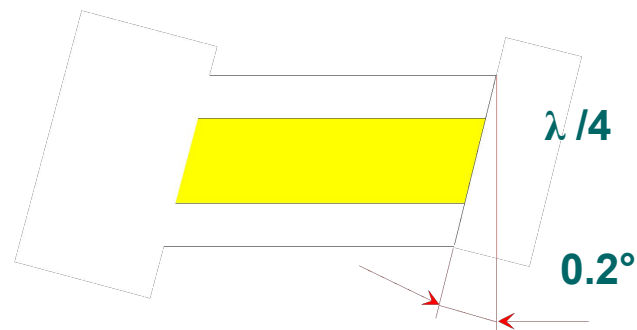
Подготовка поверхности волокна:



Шероховатость поверхности



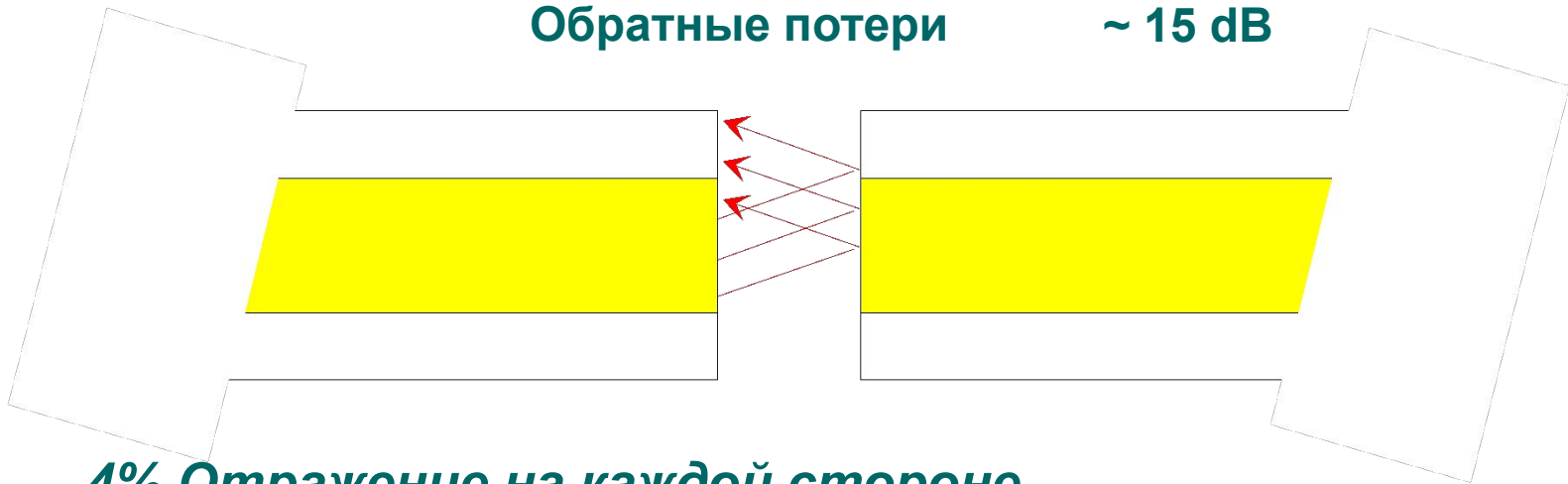
Угол



Зазор между сердцевинами – нет физического контакта

Параметры передачи

Вносимые потери < 1.0 dB
Обратные потери ~ 15 dB



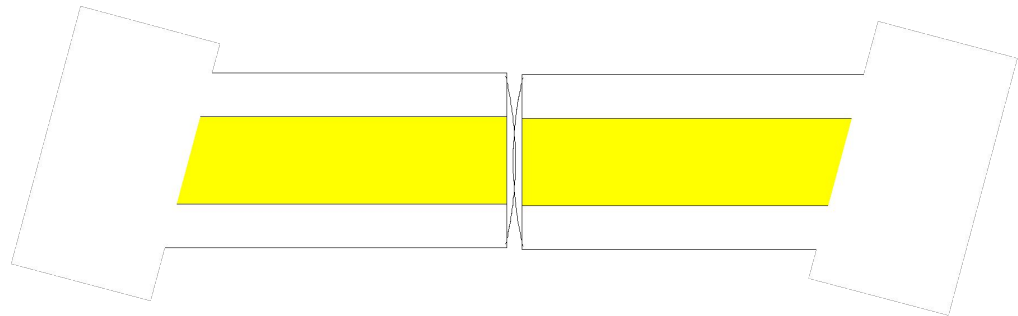
*4% Отражение на каждой стороне
приводит к потерям в 0.36 dB*

Торцы наконечников – Сферический контакт

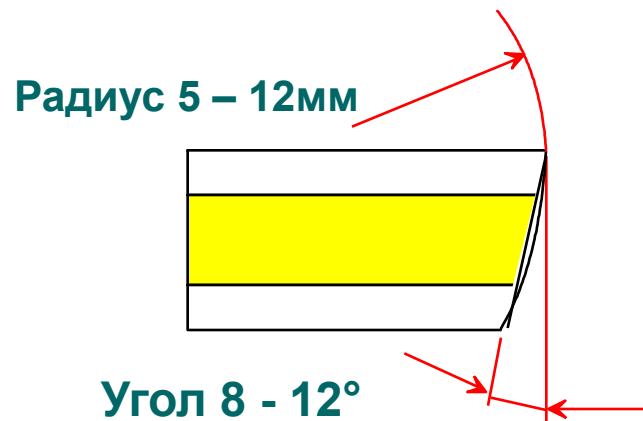


Параметры передачи

Вносимые потери < 0.5 dB
Обратные потери > 35 dB



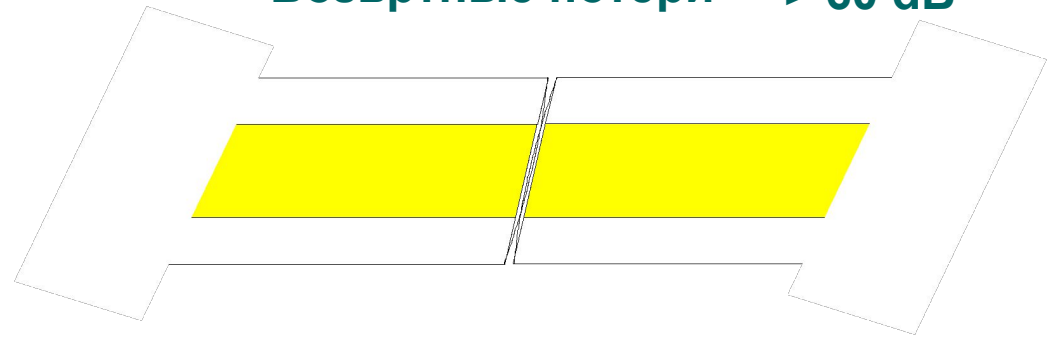
Угловой сферический физический контакт



Передаточные характеристики

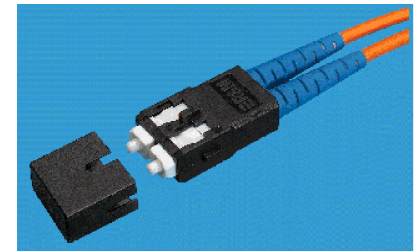
Вносимое затухание < 0.3 dB

Возвртные потери > 60 dB

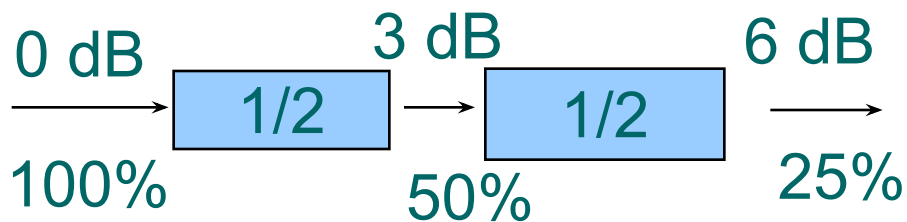


SC-RJ коннектор

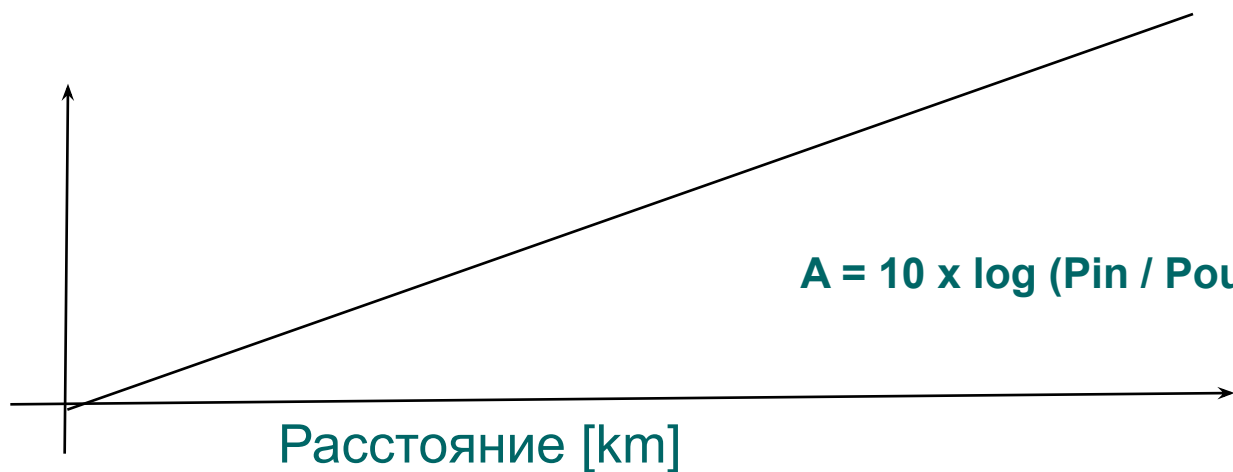
- SFF коннектор с размерами как у RJ45
- Керамический наконечник -> Хорошо известный на рынке
- Высокая плотность портов, примерно в 2 раза с Duplex SC
- Многомодовые и одномодовые
- Обратная совместимость с SC
- Один тип коннектора + адаптер
- Соответствие спецификациям ISO/IEC 11801 и TIA/EIA 568A
- *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

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

α : Затухание кабеля [dB/km]

L : Длина кабеля [km]

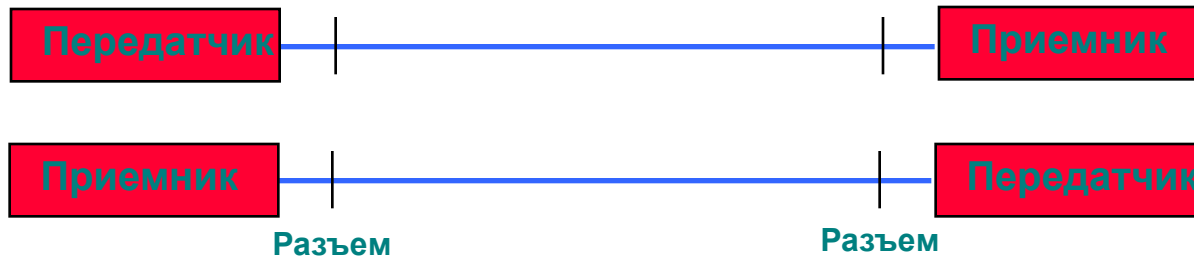
A_S : Затухание на соединении [dB]

N_S : Число соединений

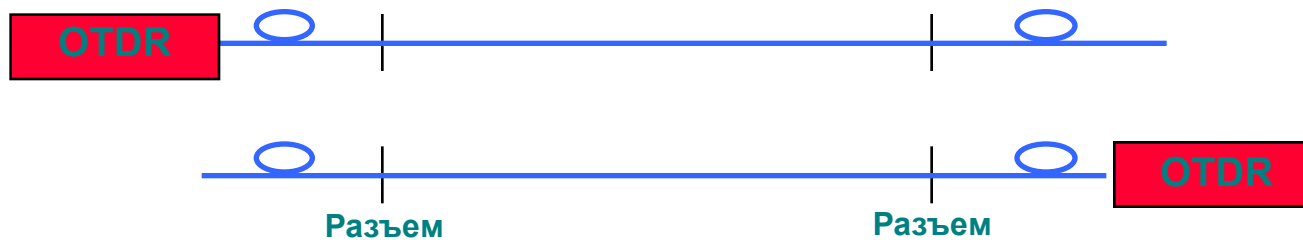
A_C : Вносимые потери коннектора [dB]

N_C : К-во коннекторов

Измерение затухания / принципы



Измерение обратных отражений (OTDR)



Какой метод использовать?

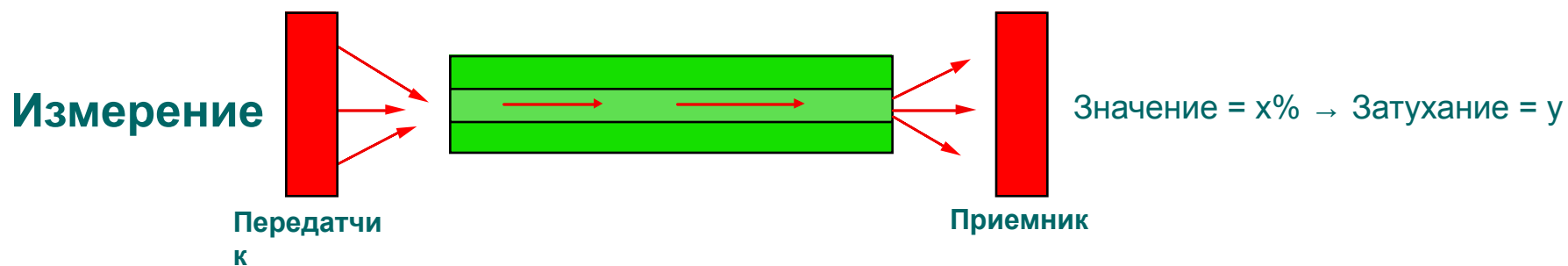
Измерение затухания:

- всегда при оконечивании кабелей
- для измерения затухания линка

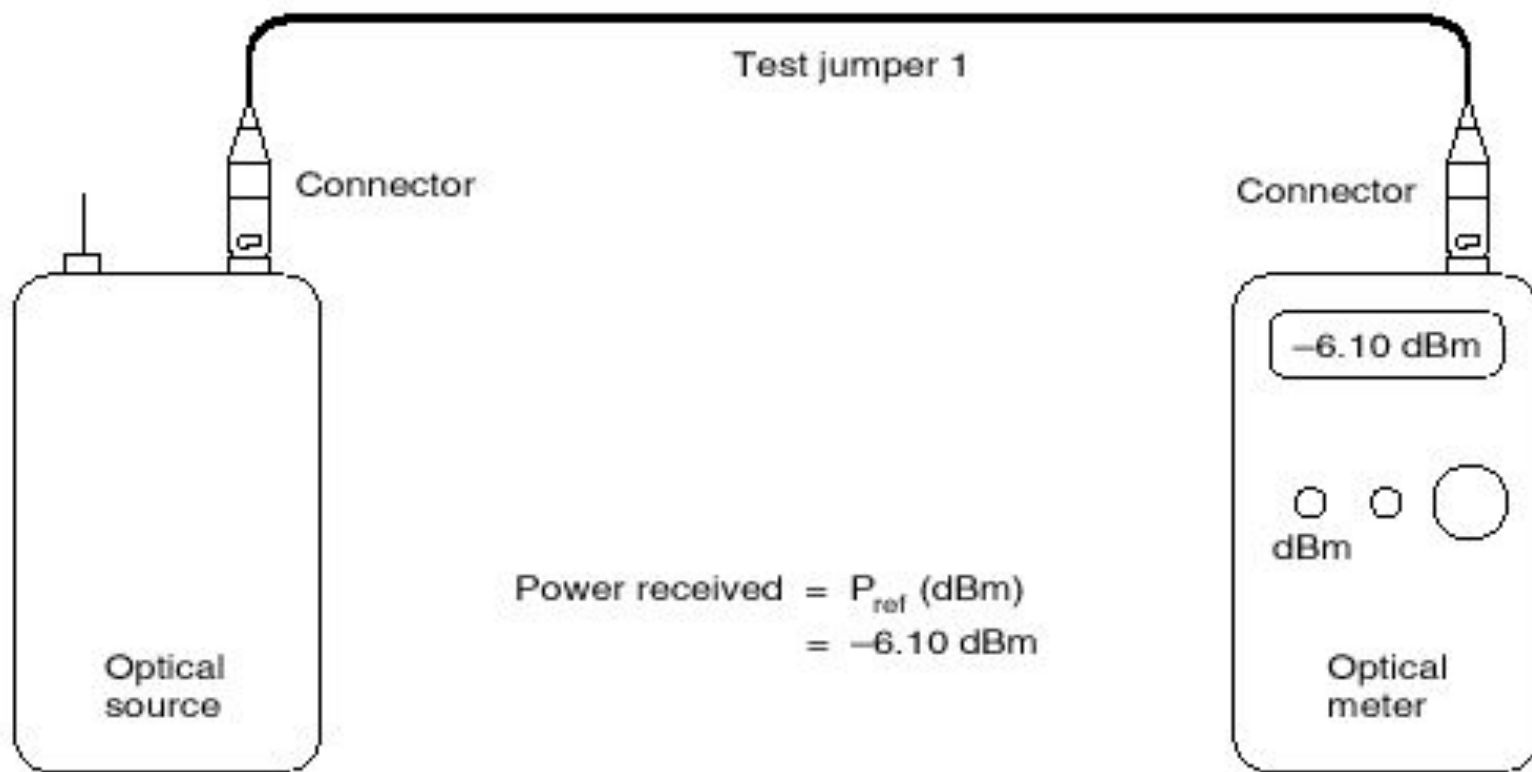
Измерение обратных отражений:

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

Принцип измерения затухания мощности

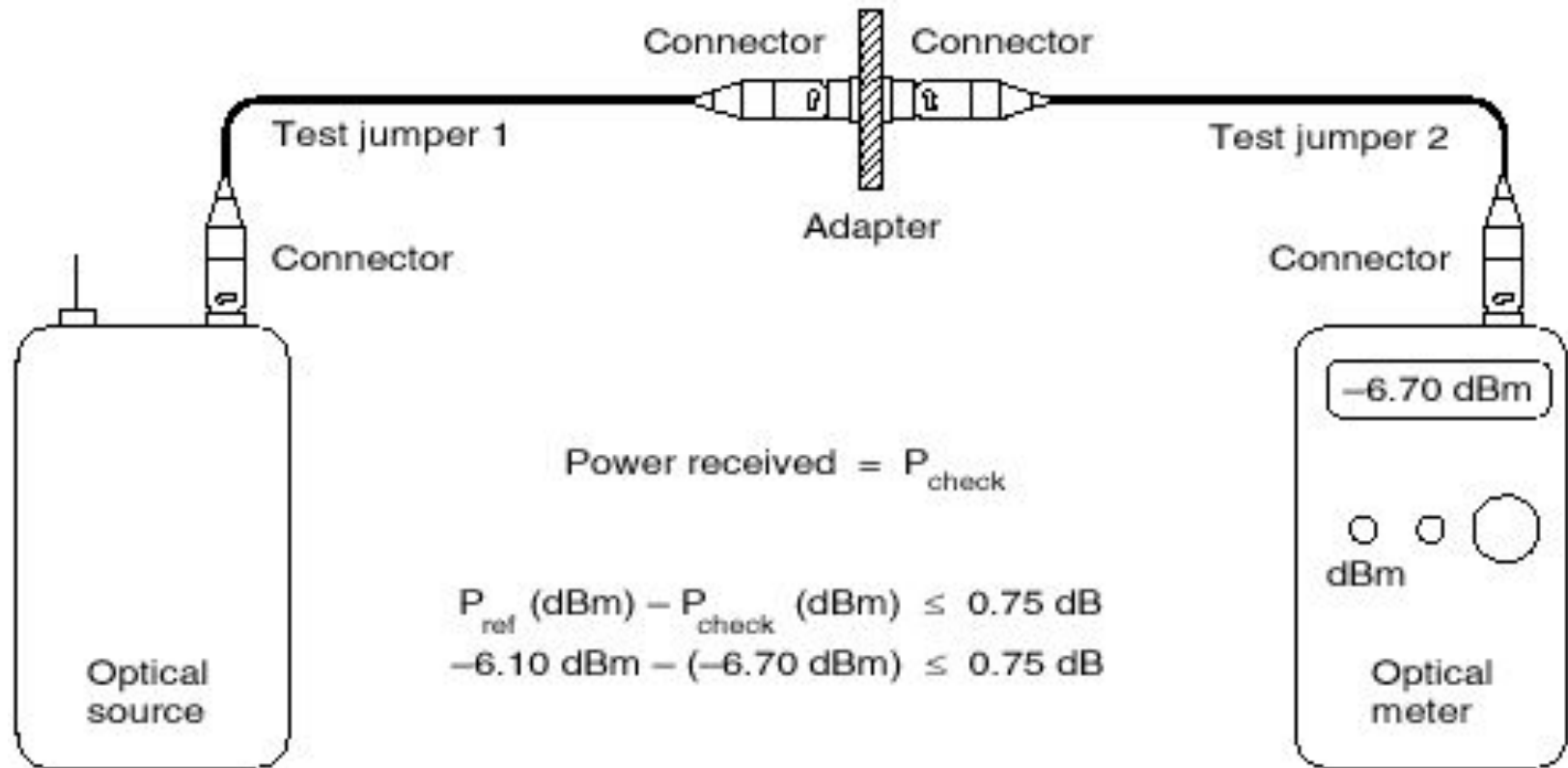


Принцип измерения затухания мощности



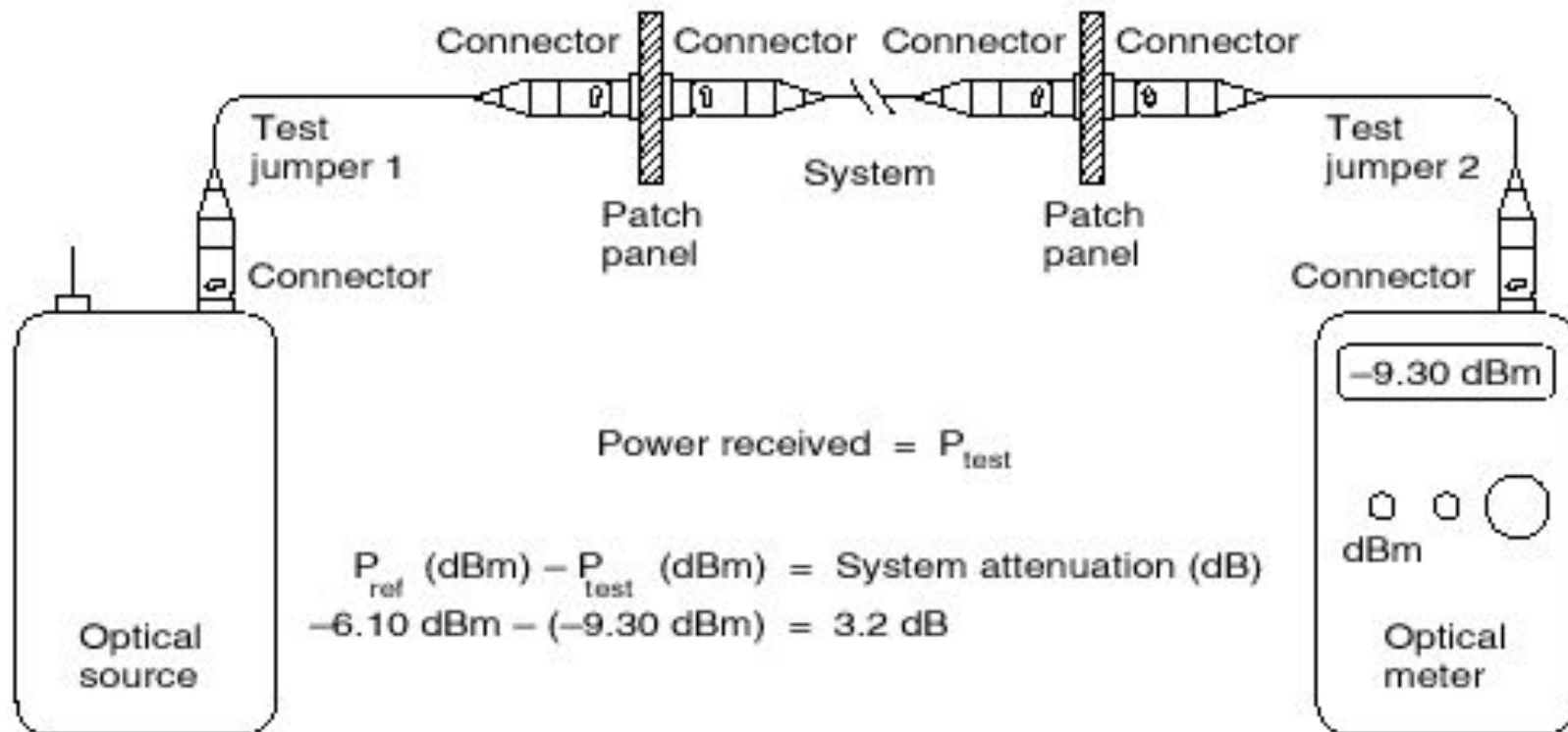
dBm = Decibel milliwatt

Принцип измерения затухания мощности



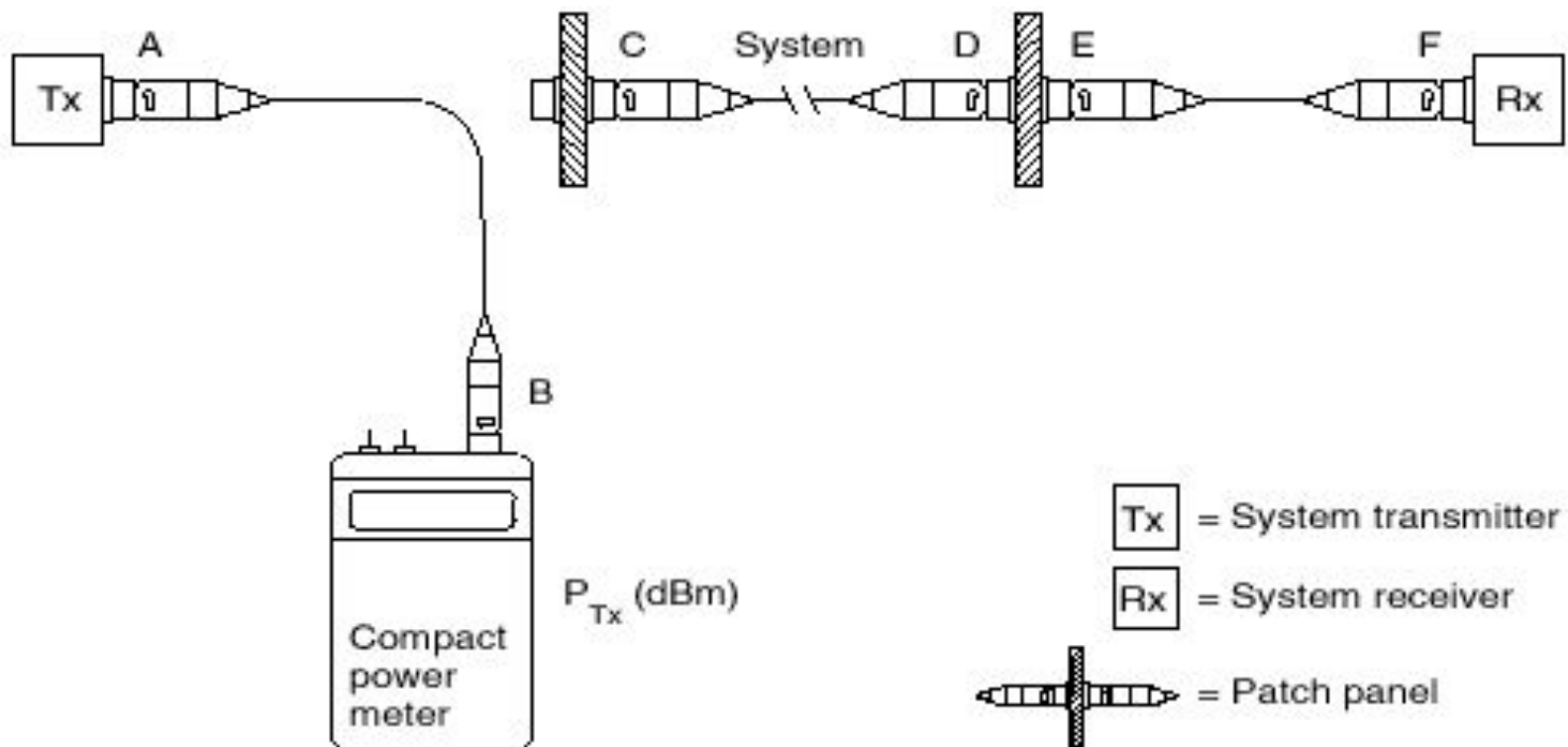
dB = Decibel
dBm = Decibel milliwatt

Принцип измерения затухания МОЩНОСТИ



dB = Decibel
dBm = Decibel milliwatt

Принцип измерения мощности передатчика

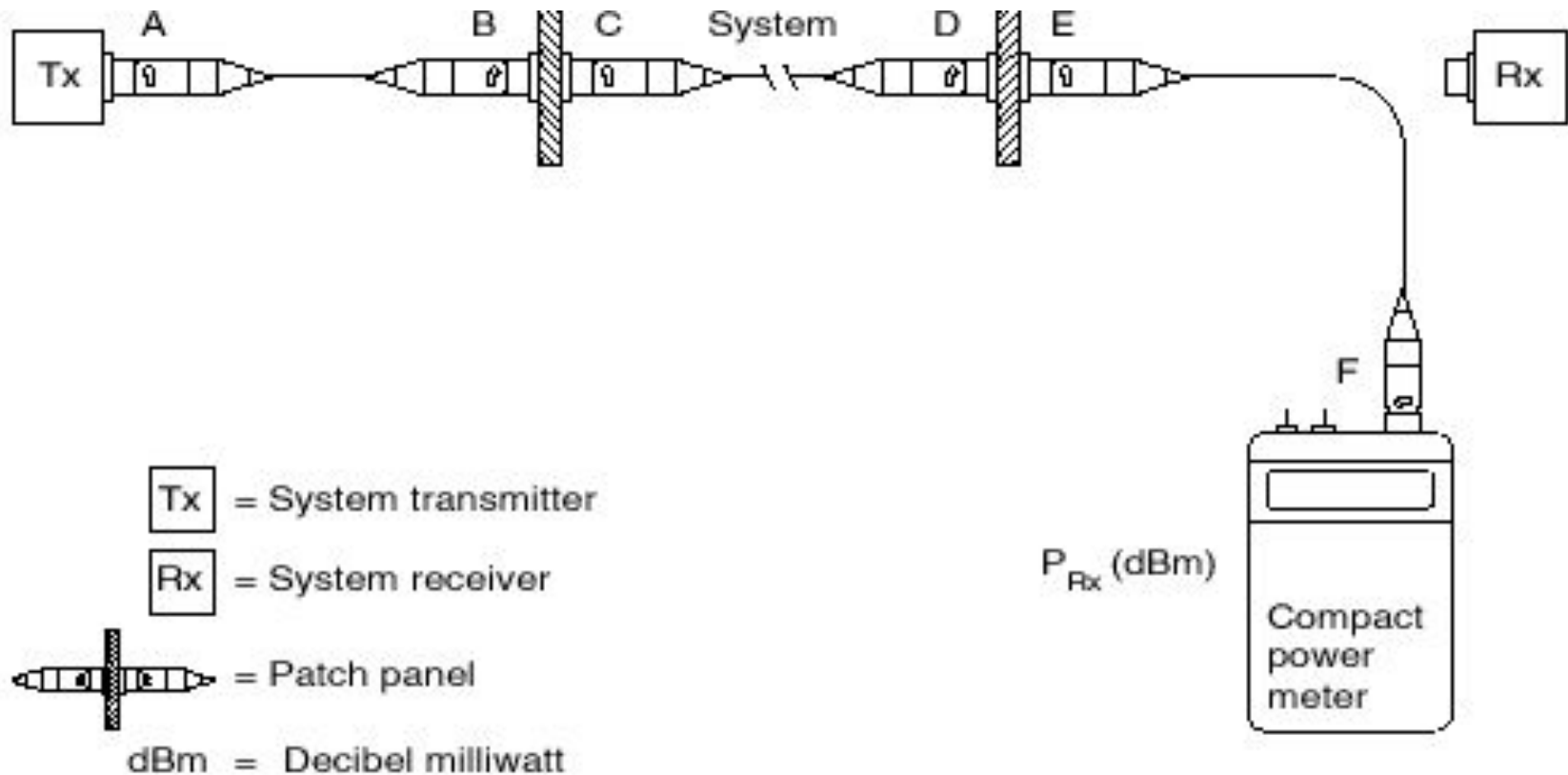


dBm = Decibel milliwatt

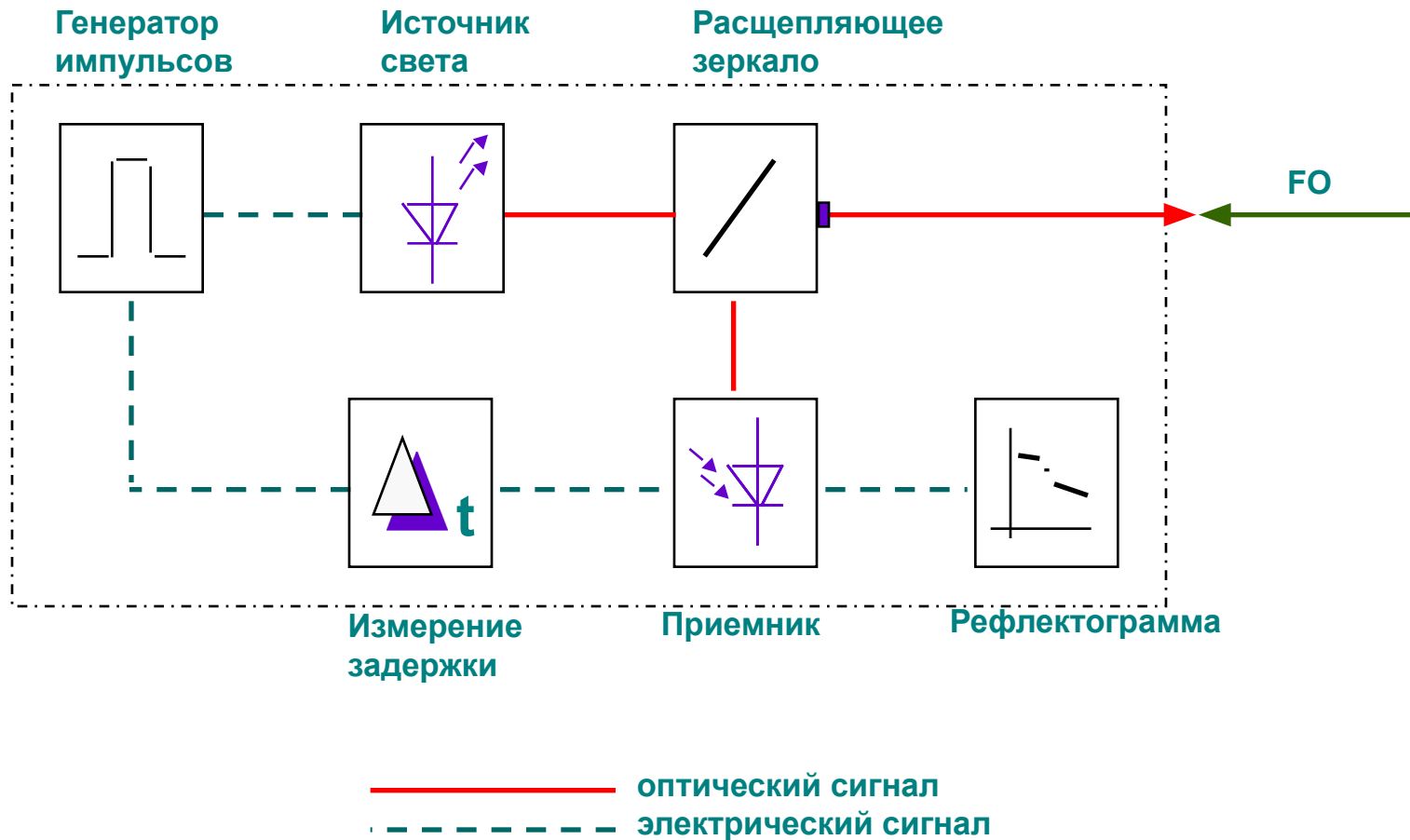


Convincing cabling solutions

Принцип измерения принимаемой мощности

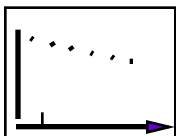


Optical Time Domain Reflectometer (OTDR)

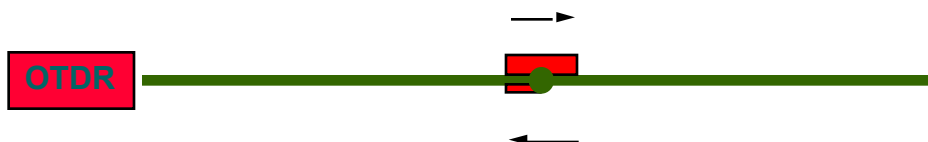


OTDR измерительная процедура

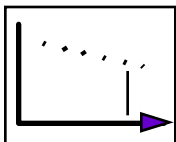
Импульс света распространяется по оптическому волноводу.



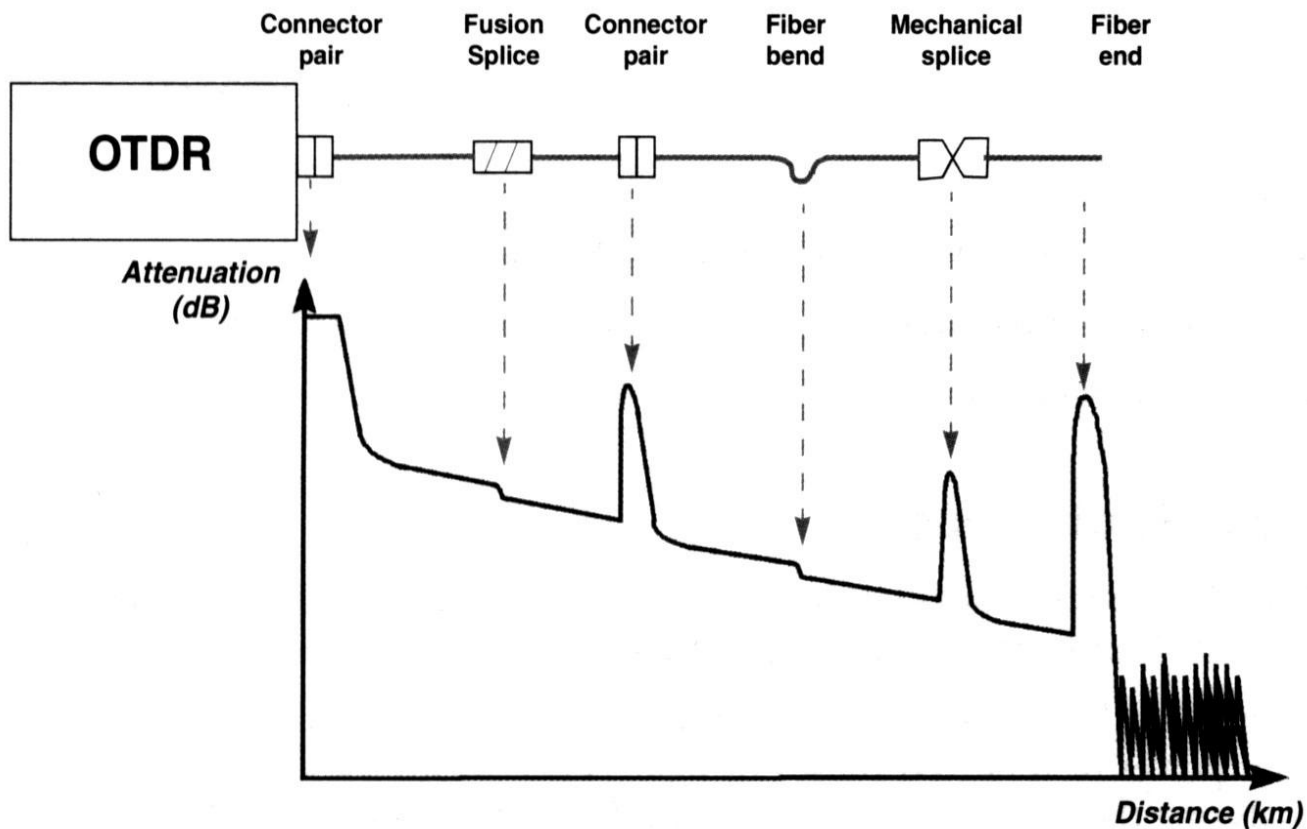
Импульс света частично отражается на неоднородностях.



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):

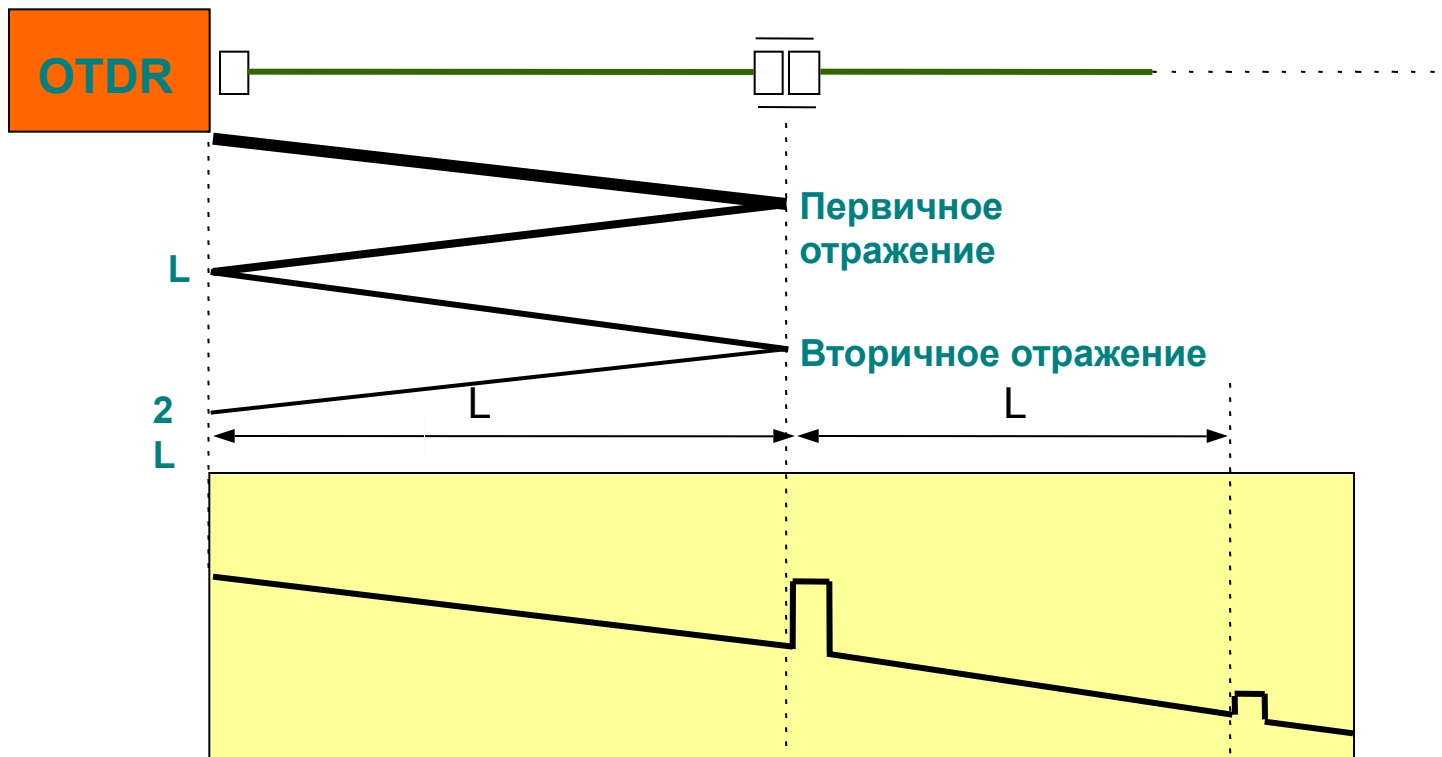
MM:RL: 20 dB IL: 0.75 dB

SM: RL: 35 dB IL: также как для MM

Приведения и OTDR???



Вторичные отражения (приведения)



Вопросы?



Convincing cabling solutions