Учебный курс R&Mfreenet

Теория передачи сигналов по волоконно-оптическим каналам связи

Москва, 2007 г

R&M
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).

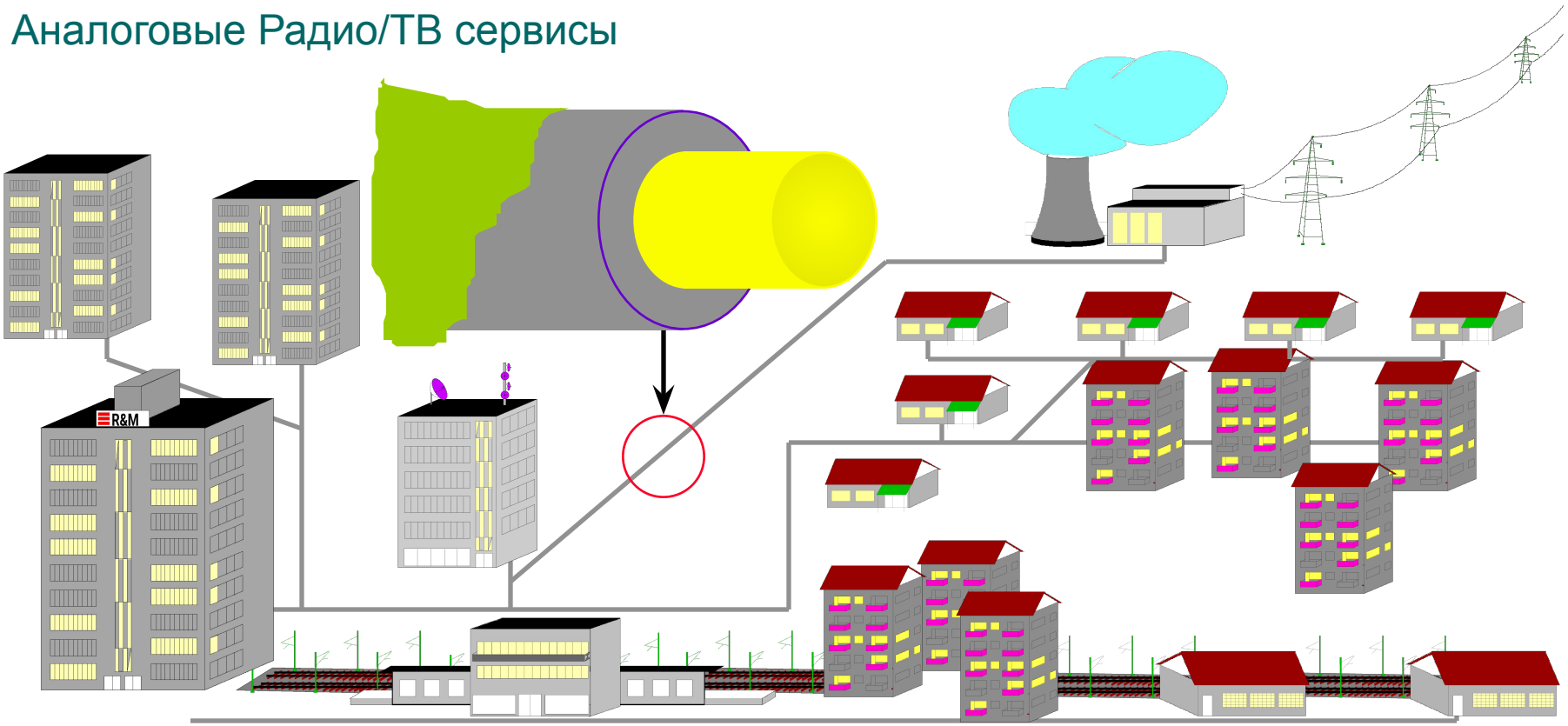
Той волоконно-оптической технологии, о которой мы знаем сегодня, предшествовали два важных научных открытия:

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

Волоконно-оптическая передача

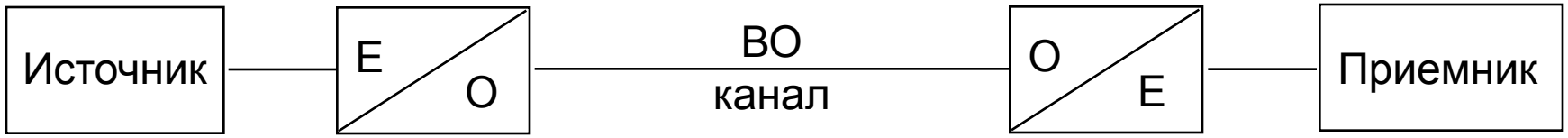
B-ISDN и Цифровой сервис

Аналоговые Радио/ТВ сервисы



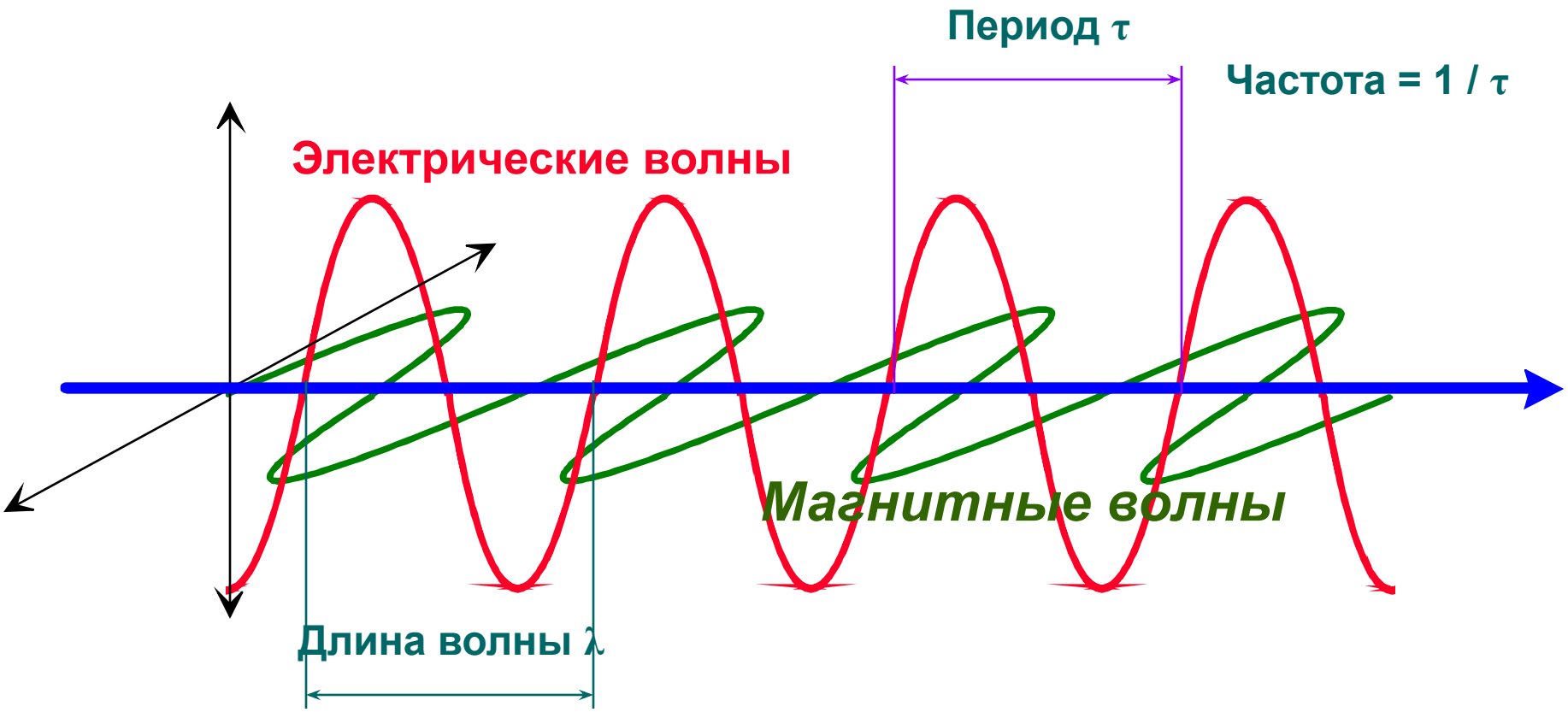
R&M
Convincing cabling solutions

Принцип волоконно-оптической передачи



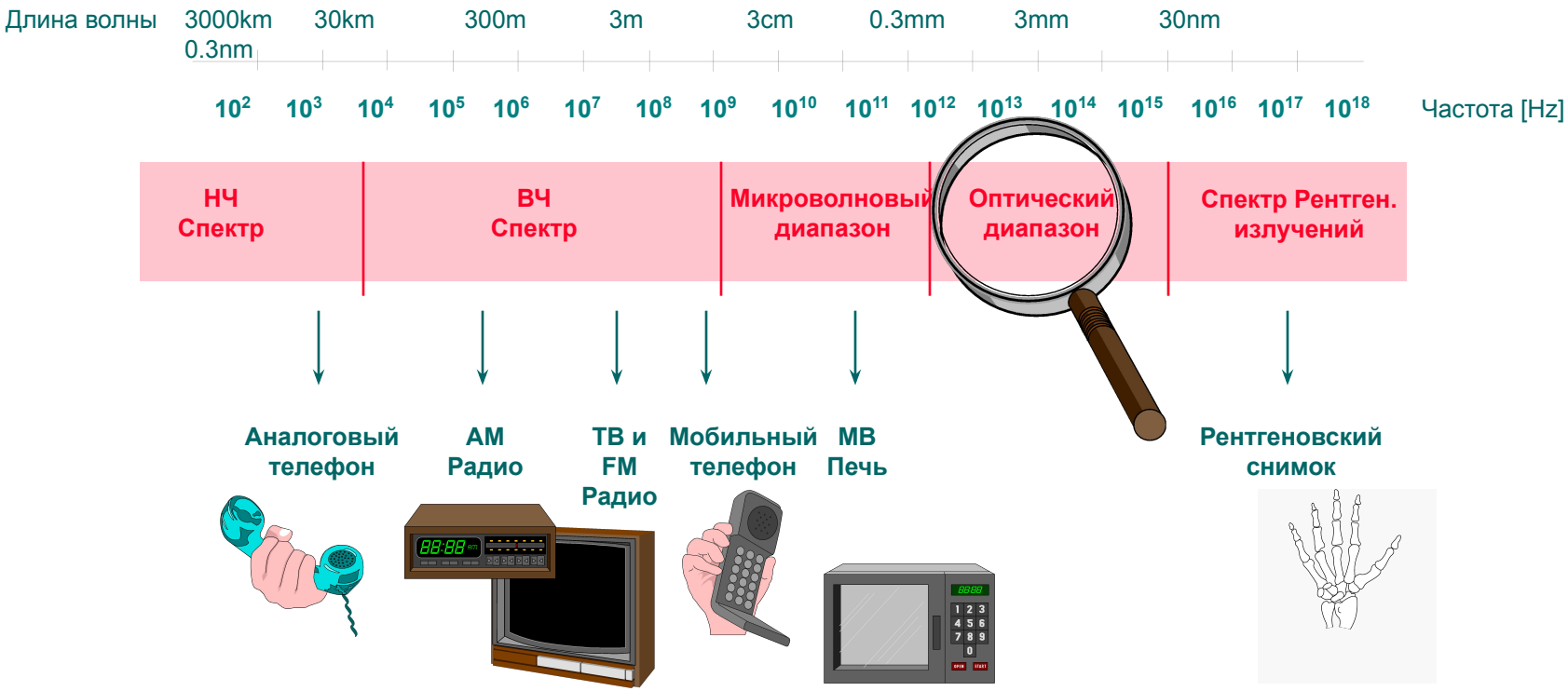
R&M
Convincing cabling solutions

Электромагнитные волны



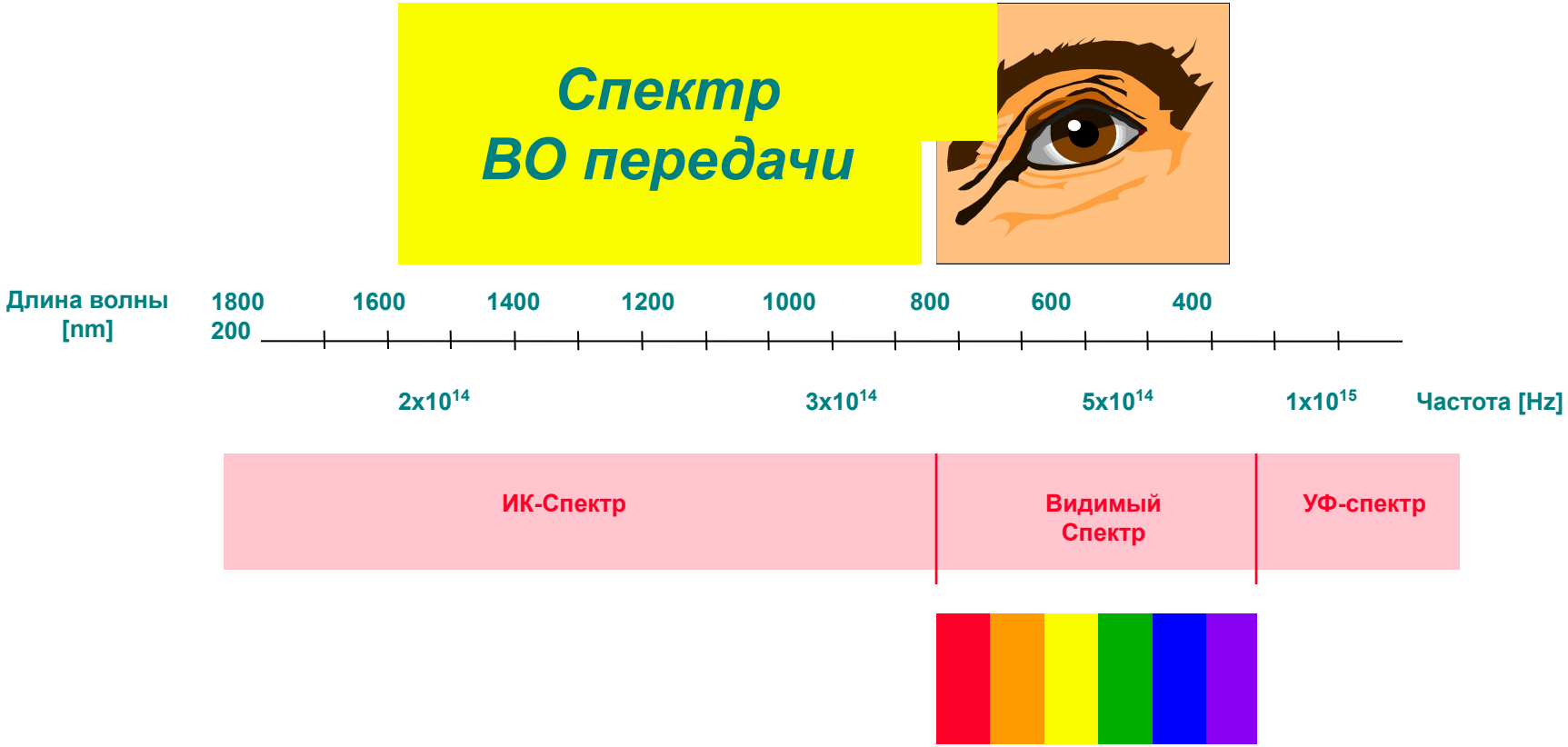
R&M
Convincing cabling solutions

Шкала длин волн используемых в электромагнитной передачи



R&M
Convincing cabling solutions

Длины волн используемых в оптической передаче



R&M
Convincing cabling solutions

Скорость электромагнитных волн

Скорость света (электромагнитное излучение) это:

- ✓ C_0 = Длина волны x Частота
- ✓ C_0 = 299793 км / сек.

Примечание:
Рентгеновское излучение (λ=0.3nm),
а УФ излучение (λ =10cm ~3GHz) или
ИК излучение (λ =840nm)
имеют <u>одинаковую скорость</u> распространения в вакууме

R&M
Convincing cabling solutions

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:

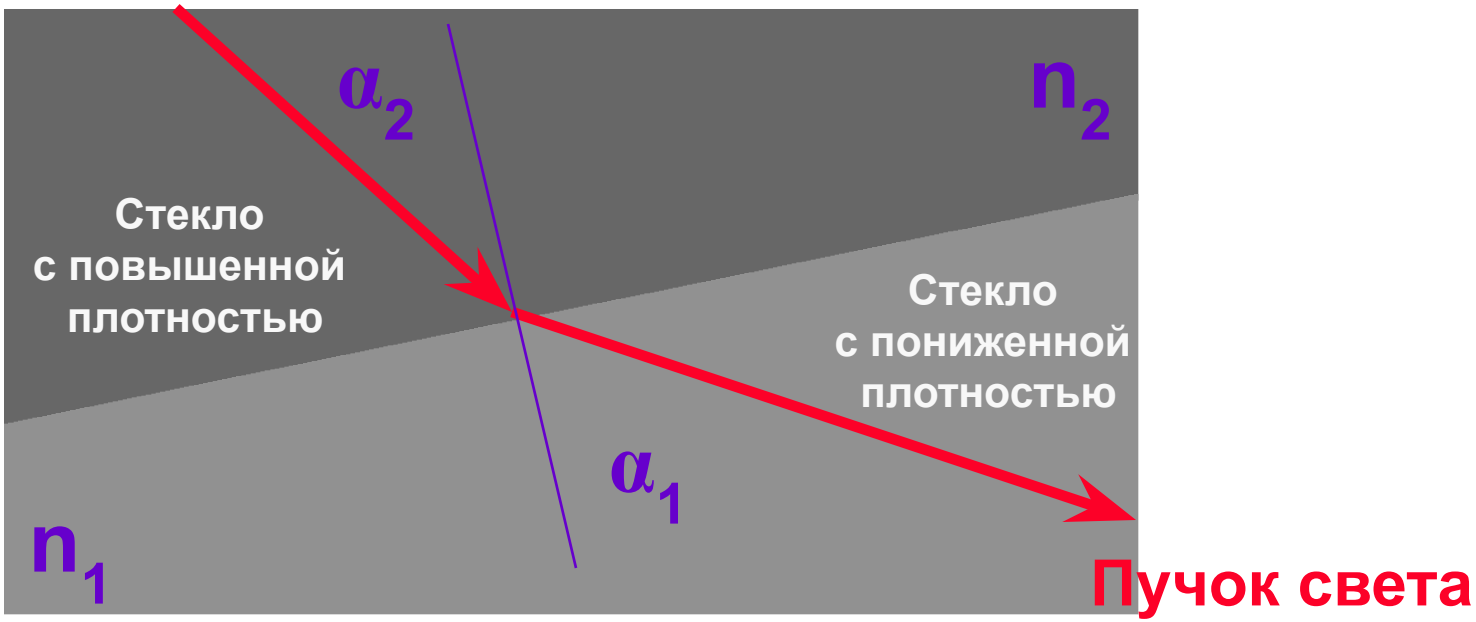
$n_{возд.} = 1.0003$,

$n_{стекла} = 1.5000$

$n_{сладкой\ воды} = 1.8300$

R&M
Convincing cabling solutions

Преломление

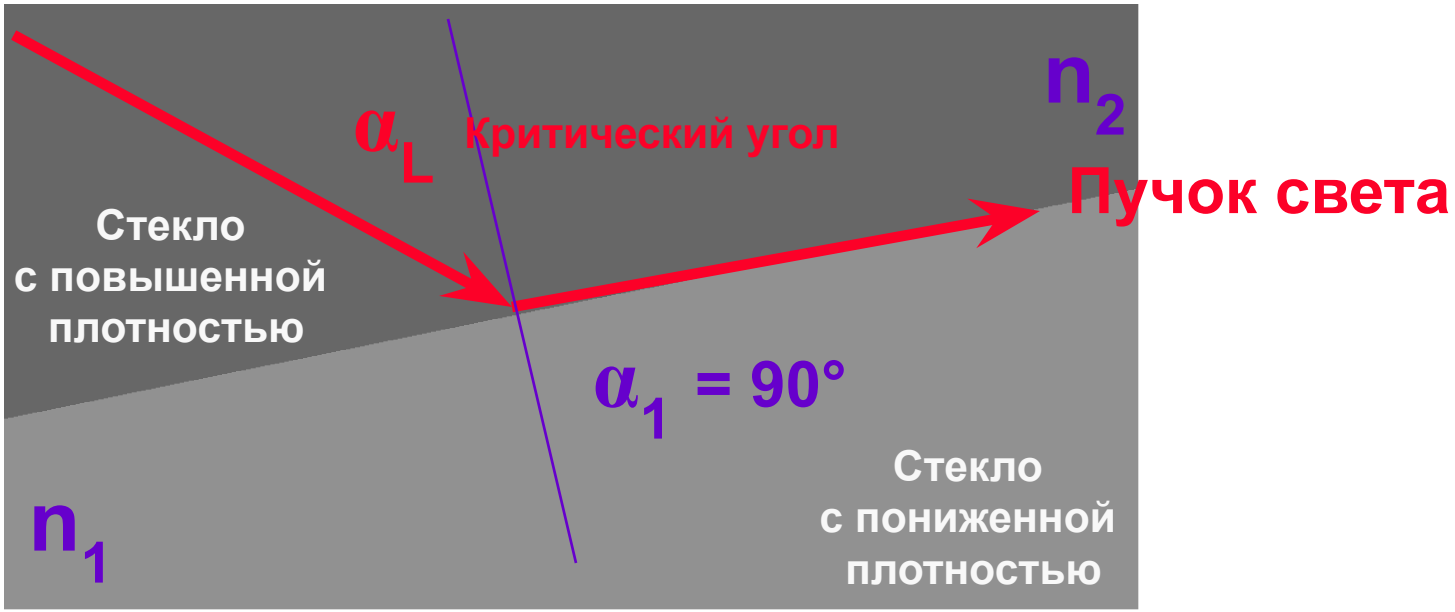


Примечание: $n_1 < n_2$ и $\alpha_1 > \alpha_2$

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

R&M
Convincing cabling solutions

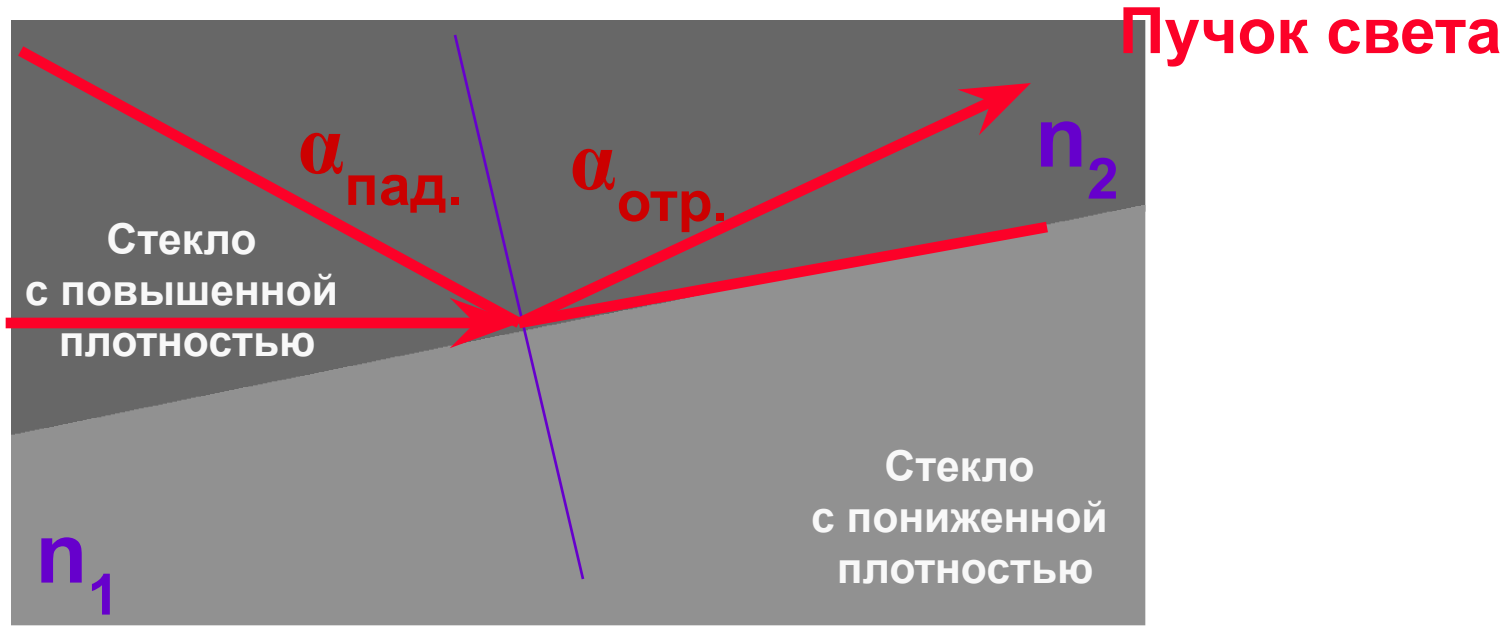
Полное преломление, Критический угол



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

R&M
Convincing cabling solutions

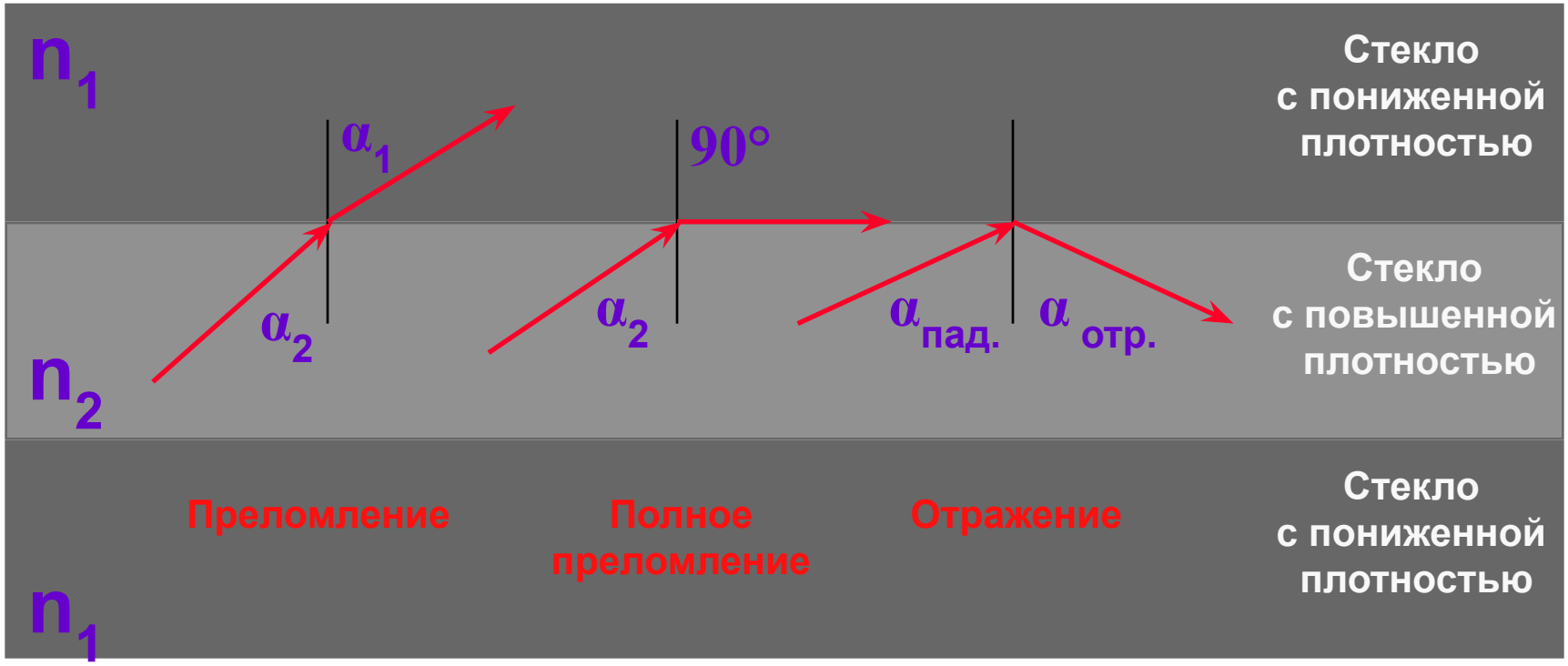
Полное внутреннее отражение



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

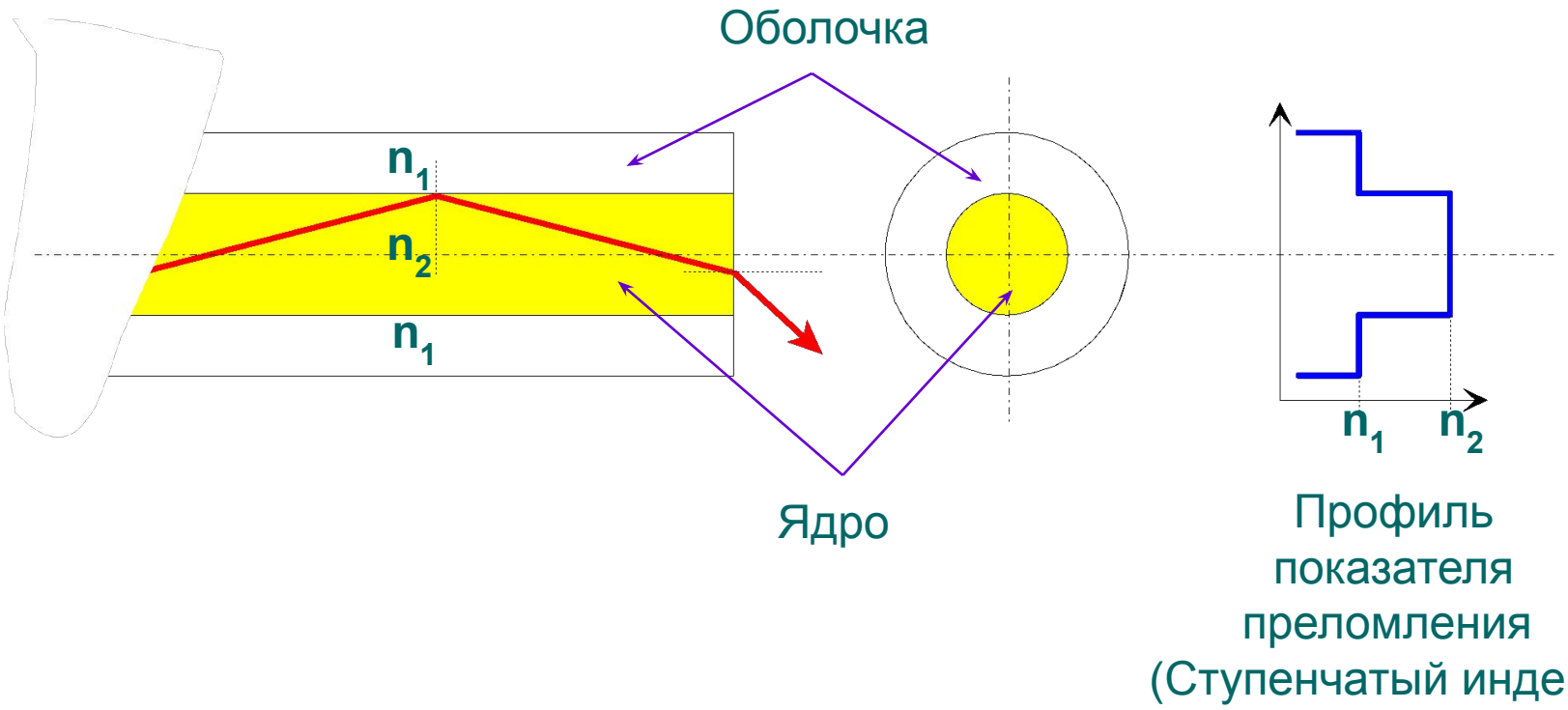
R&M
Convincing cabling solutions

Изменение направления света в материале



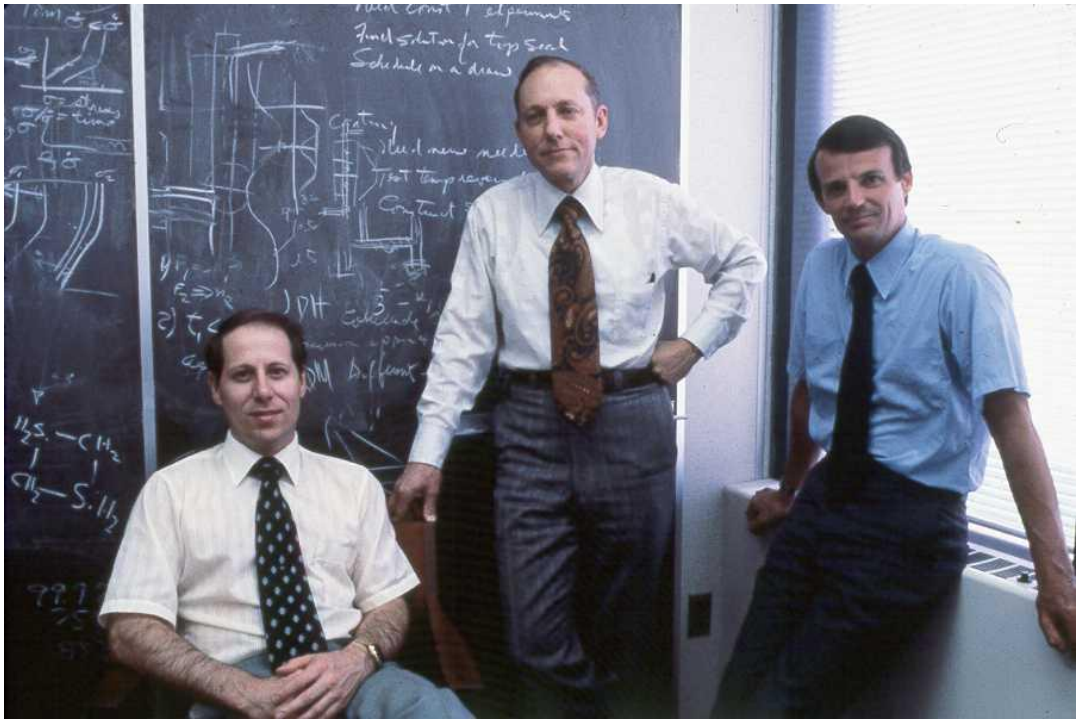
R&M
Convincing cabling solutions

Волоконно-оптический световод



R&M
Convincing cabling solutions

Где все начиналось

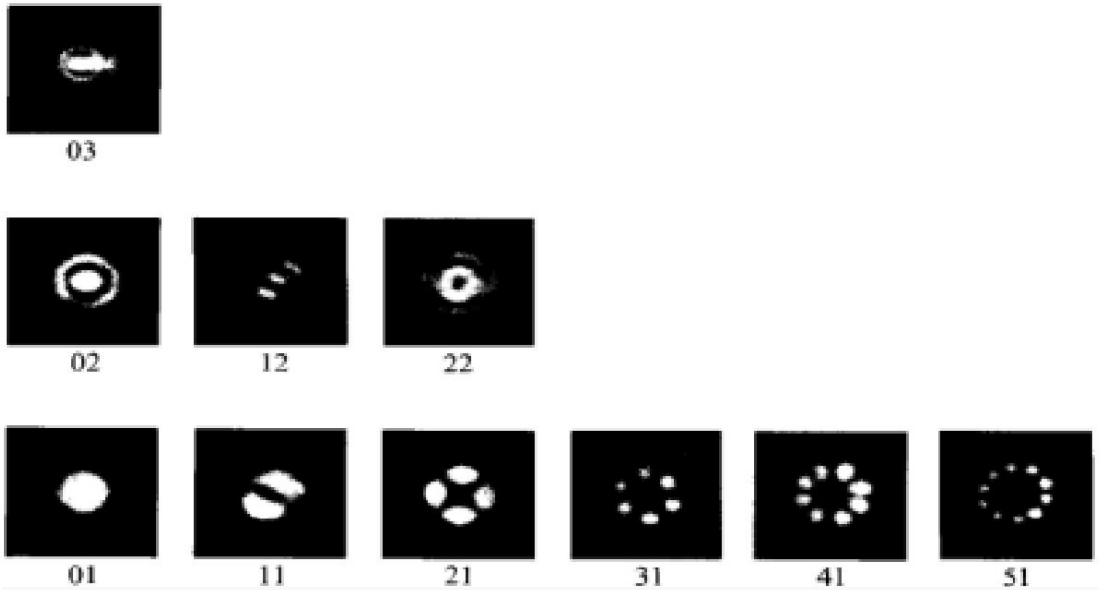


Три ученых лаборатории Corning (слева направо) Дональд Кек, Роберт Мауэр и Питер Шульц в 1970 году впервые в мире создали оптическое волокно, которое было возможно использовать в коммерческих целях.

R&M
Convincing cabling solutions

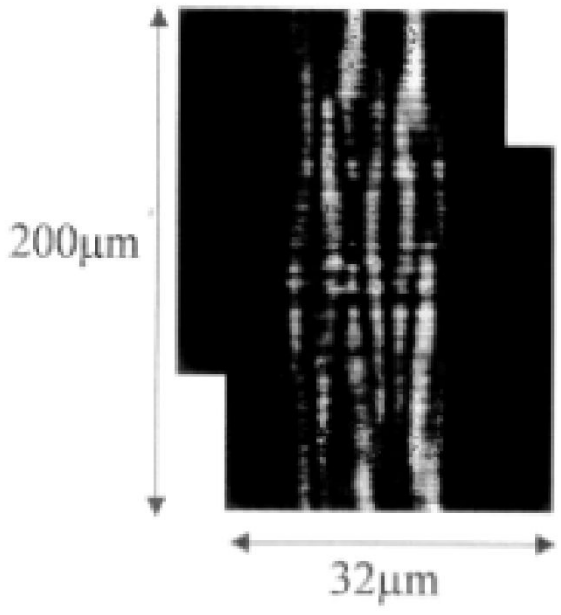
Свет в волокне распространяется только дискретными путями

Эти дискретные пути называются модами.



R&M
Convincing cabling solutions

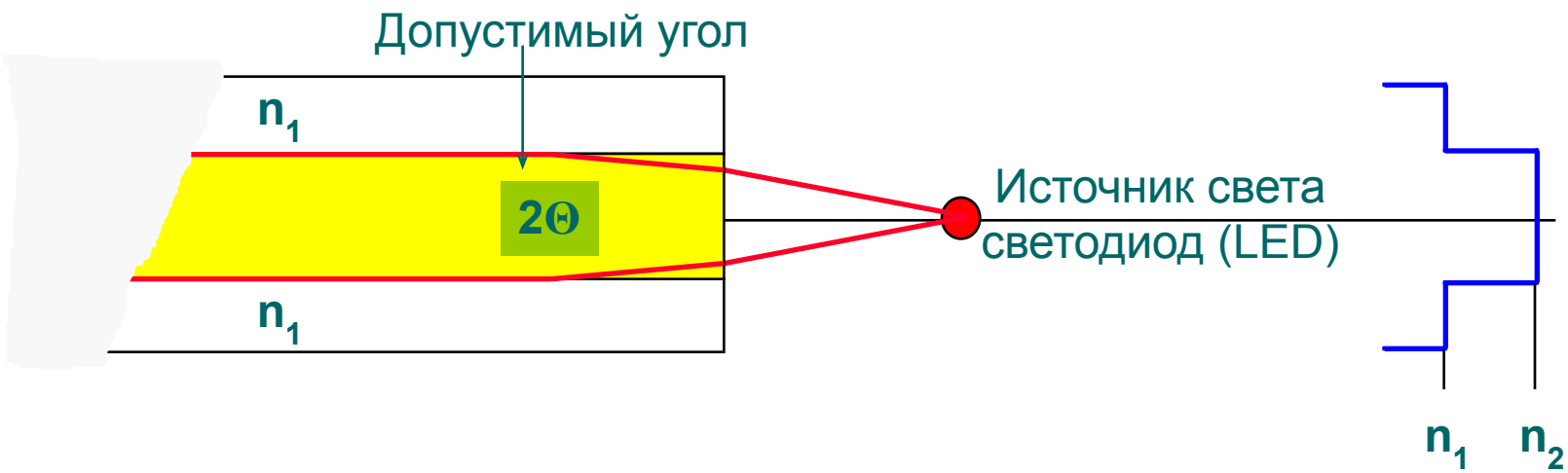
Моды выглядят как разные пути (продольный срез)



(I)

R&M
Convincing cabling solutions

Численная апертура



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

Профиль показателя преломления
(Ступенчатый индекс)

Примечание: NA = 0.3 типичный показатель для ступенчатого индекса волокна

→ $\Theta \sim 17.5°$

R&M
Convincing cabling solutions

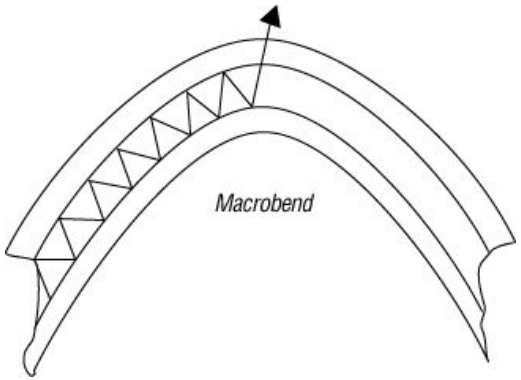
Численная Апертура и характеристики передачи

- ✔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

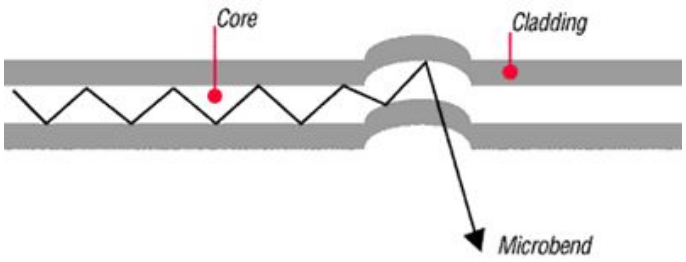
Примечание:
Два волокна с NA = 0.2 и 0.4 Волокно с NA = 0.2 в 8 раз большее затухание при изгибе чем NA = 0.4 Fibre

R&M
Convincing cabling solutions

Причины затуханий в волокне



Макроизгибы

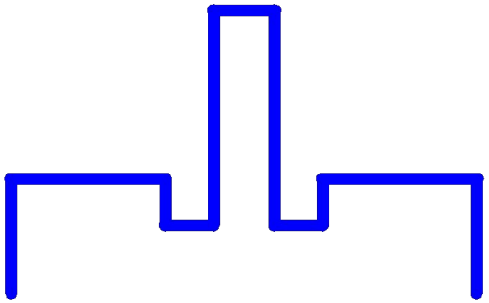


Микроизгибы

R&M
Convincing cabling solutions

Типы профилей коэффициента преломления

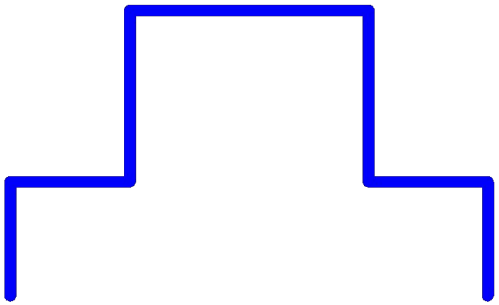
Ступенчатый индекс



Для одномодовой передачи

Размер ядра ~9 мкм

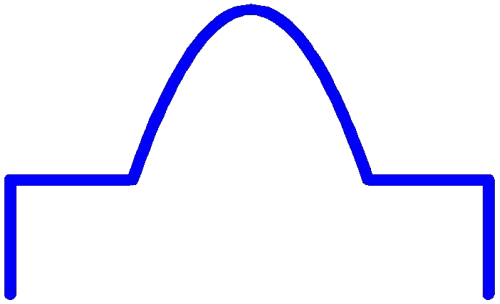
Ступенчатый индекс



Для многомодовой передачи

Размер ядра 50мкм

Сглаженный индекс

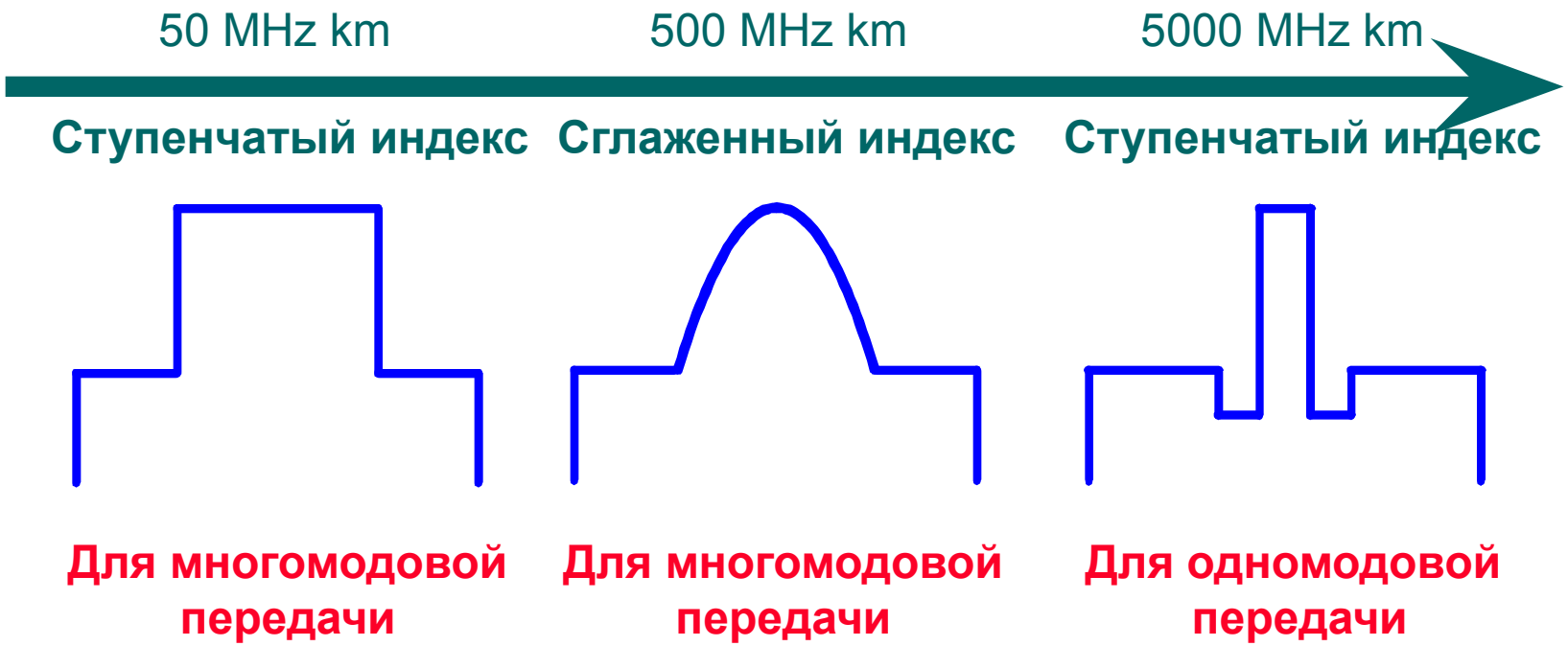


Для многомодовой передачи

Размер ядра 50 или 62.5мкм

R&M
Convincing cabling solutions

Типы профилей коефициента преломления



R&M
Convincing cabling solutions

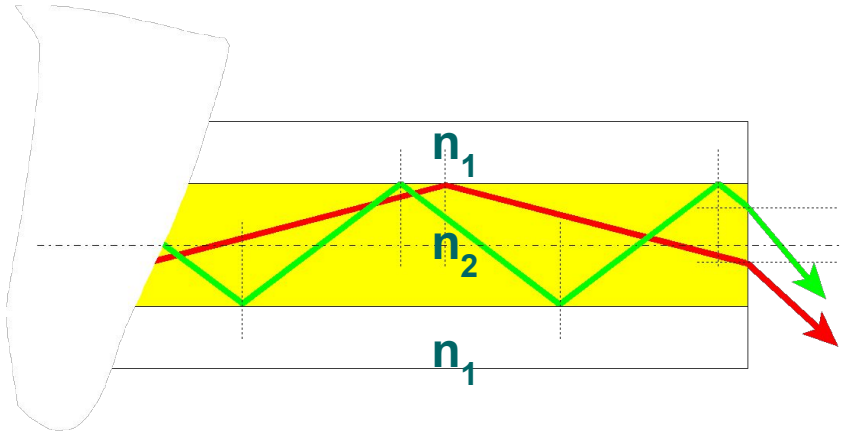
Обзор основных характеристик

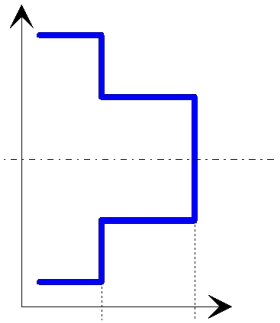
	Определение	Эффект	Ограничение
1	Затухание [dB/km]	Потери энергии по всей длине линка	Длина линка
2	Дисперсия	Расширение импульса и ослабление сигнала	Полоса пропускания & длина линка
3	Числовая апертура (NA) [-]	Потери на соединениях LED/Laser fiber fiber fiber fiber e.g. APD*	Характеристики соединения

* Лавинный фотодиод

R&M
Convincing cabling solutions

Многомодовое волокно (Ступенчатый индекс)





n_1 n_2

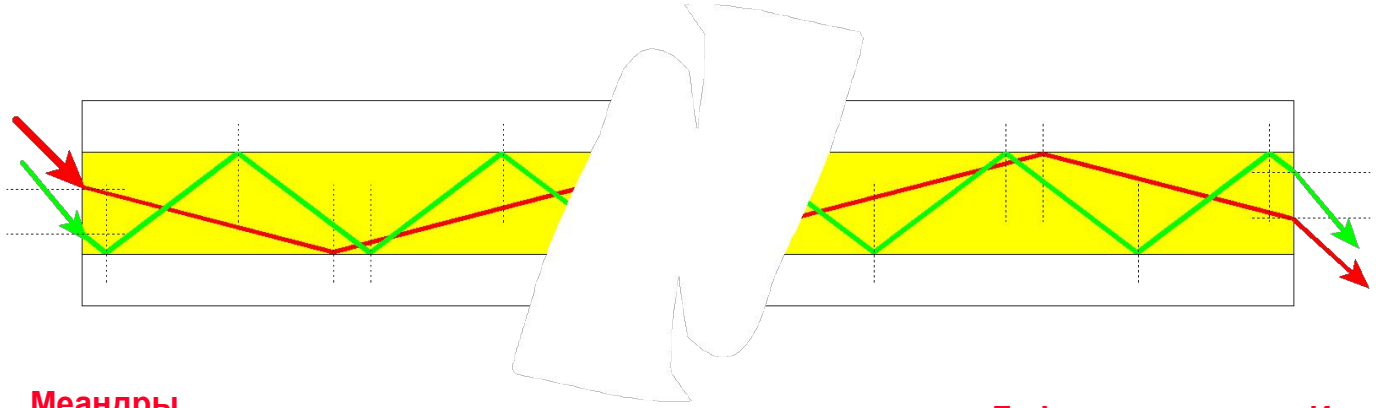
Профиль показателя преломления
(Ступенчатый индекс)

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

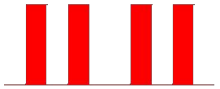
Примечание: ~ 680 Мод при NA = 0.2, d = 50 μm и λ = 850nm
~ 292 Мод при NA = 0.2, d = 50 μm и λ = 1300nm

R&M
Convincing cabling solutions

Модовая дисперсия (ступенчатый индекс)



Меандры



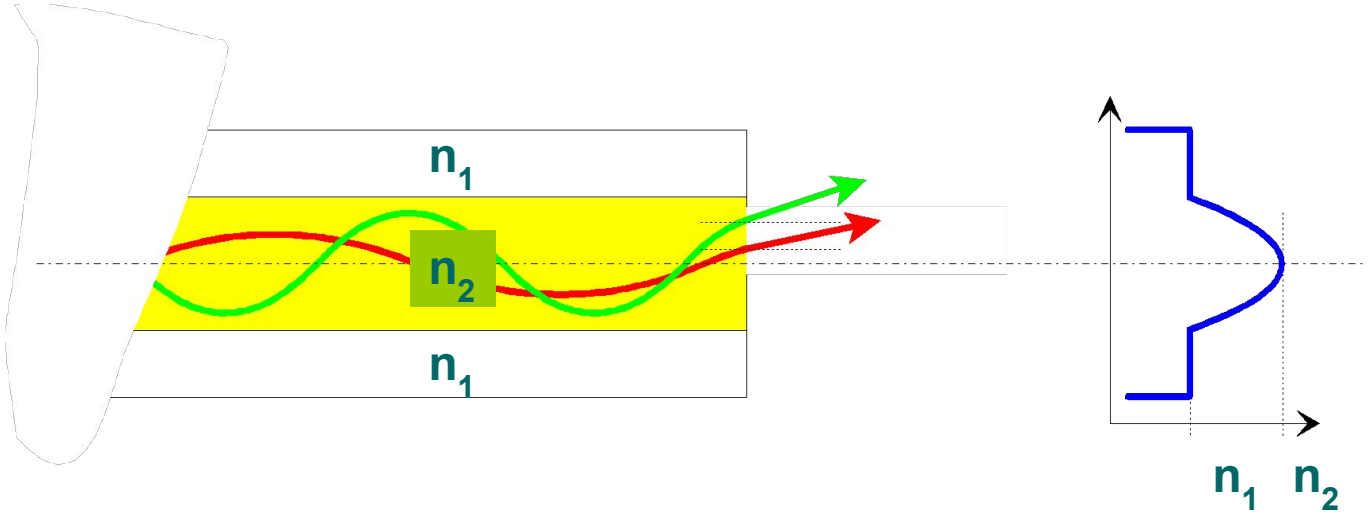
Деформированные Импульсы

Тип импульса на Источнике

Тип импульса на Приемнике

R&M
Convincing cabling solutions

Многомодовое волокно (Сглаженный индекс)



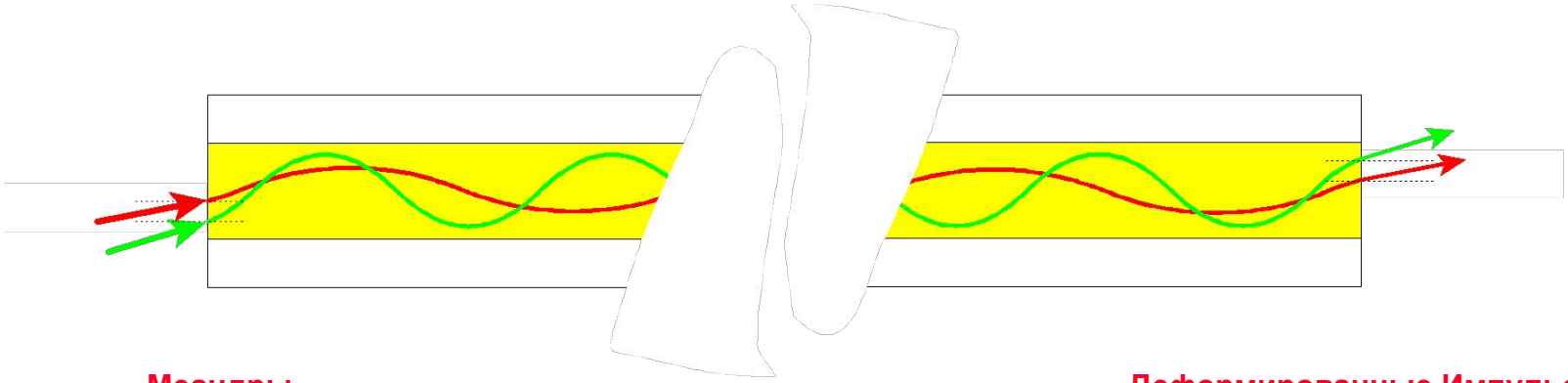
Число Мод $M = 0.25 \times (\pi \times d \times NA/\lambda)^2$

Профиль показателя преломления
(Сглаженный индекс)

Примечание: ~150 Мод при NA = 0.2, d = 50 μm и λ = 1300 nm

R&M
Convincing cabling solutions

Модовая дисперсия в многомодовом волокне



Меандры

Деформированные Импульсы

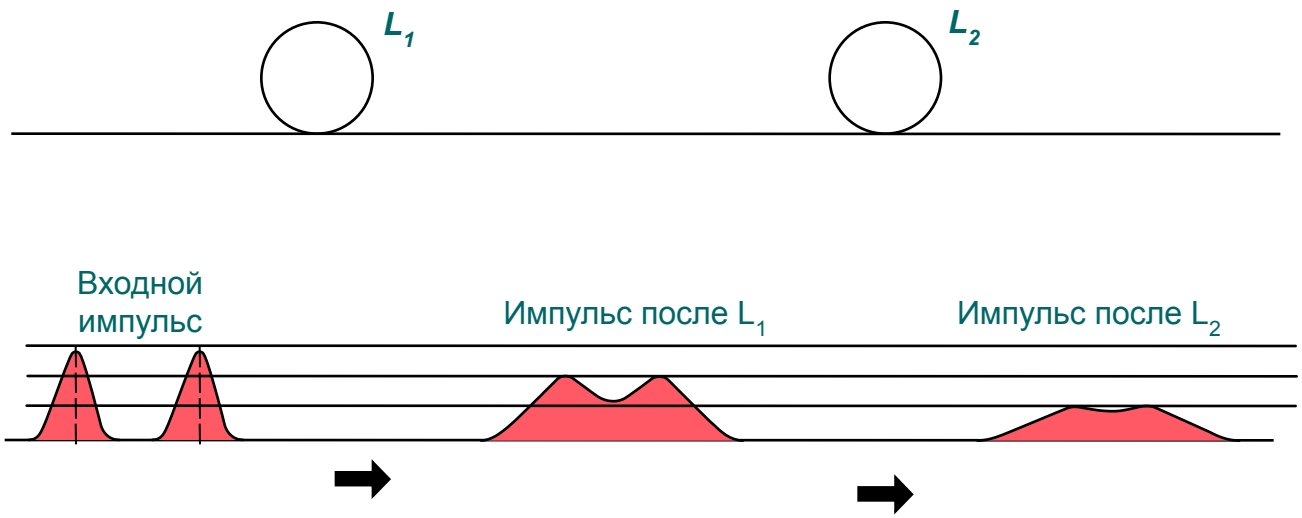
Форма импульса на передающей стороне

Форма импульса на приемной стороне

R&M
Convincing cabling solutions

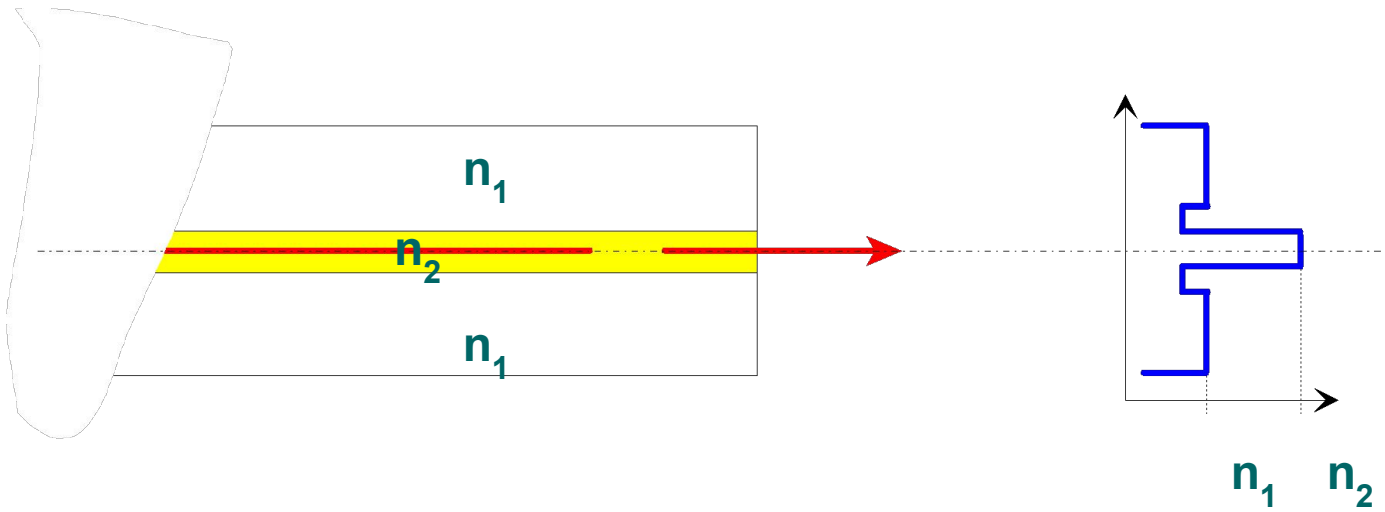
Дисперсия

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



R&M
Convincing cabling solutions

Одномодовое волокно

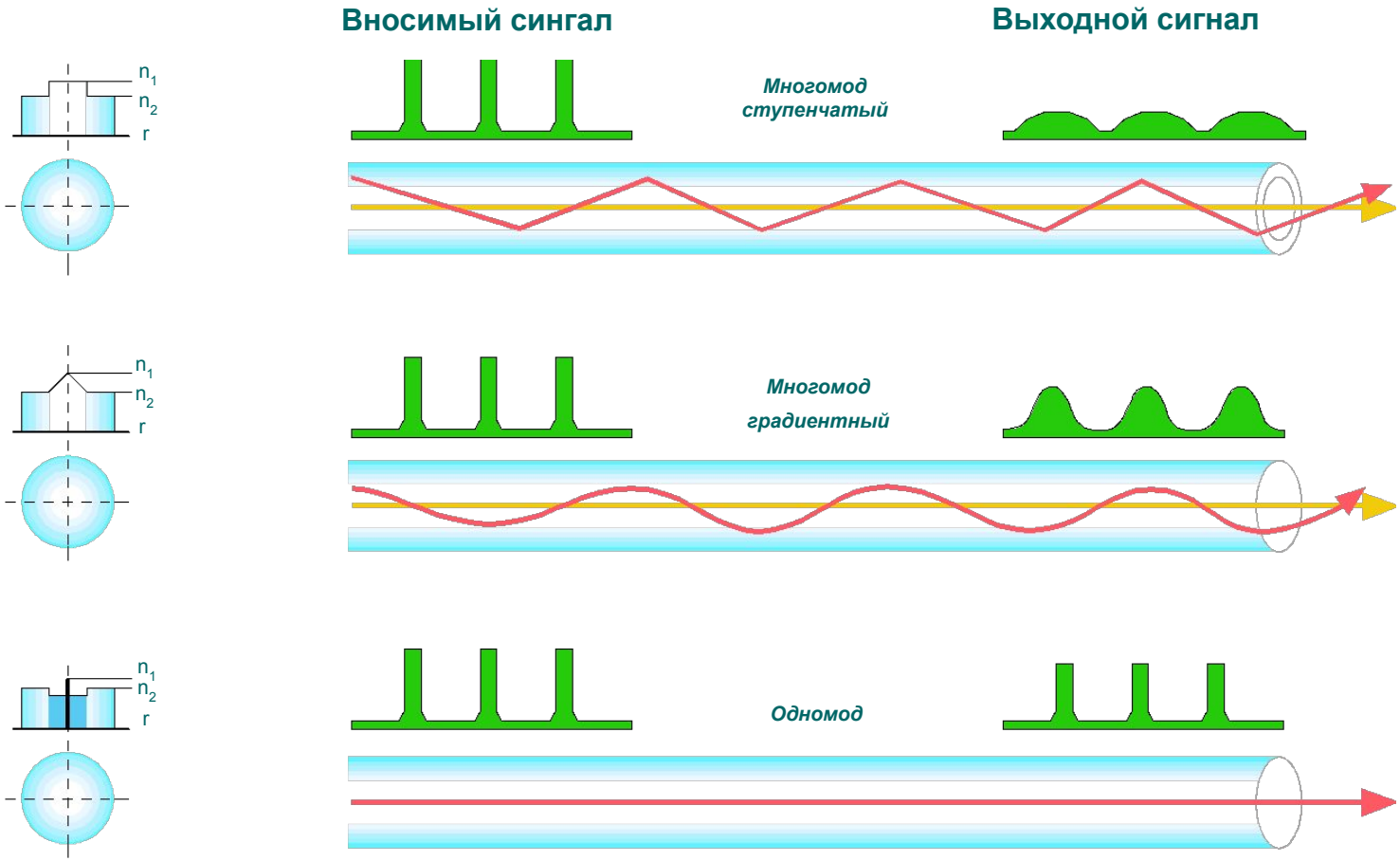


Пример: n_1 =1.4570 и n_2 = 1.4625

Профиль показателя преломления
(Ступенчатый индекс)

R&M
Convincing cabling solutions

Волоконно-оптическая теория



R&M
Convincing cabling solutions

Виды дисперсии

Многомодовое волокно

Одномодовое волокно

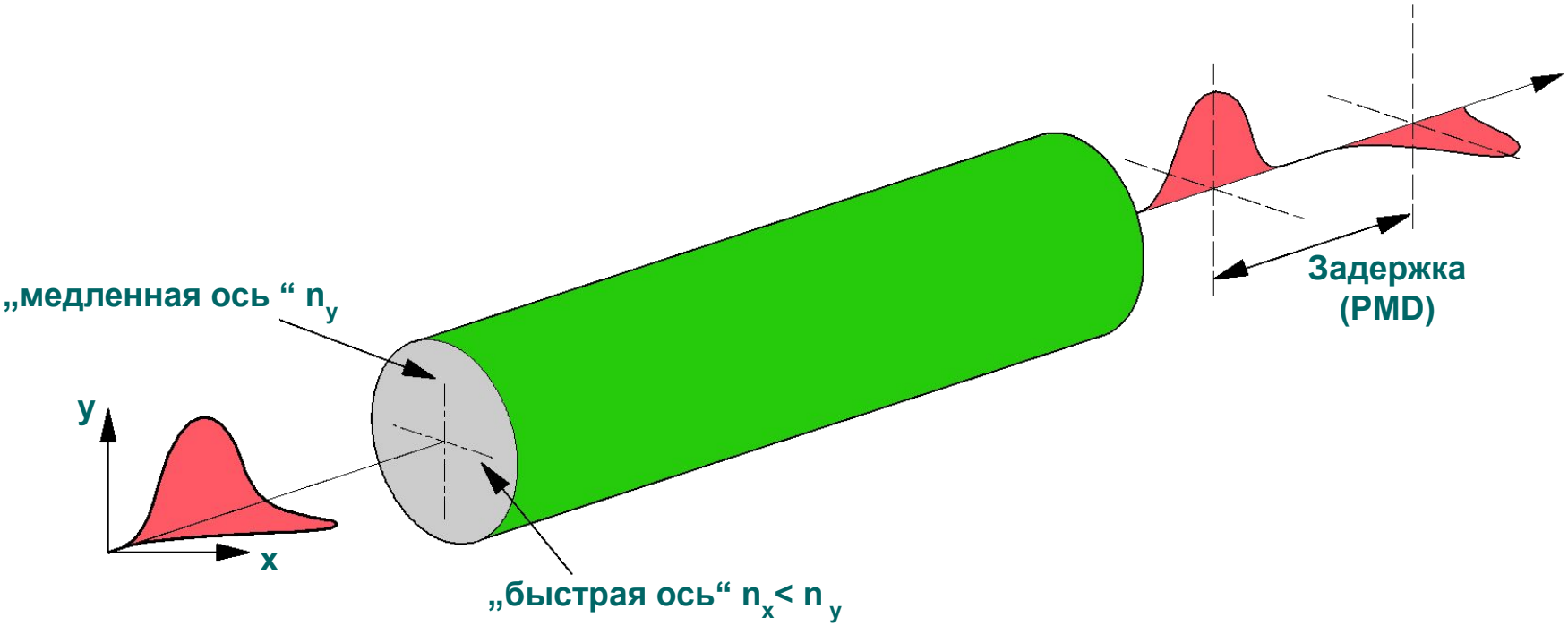
Модовая дисперсия

Хроматическая дисперсия [ps/km * nm]

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

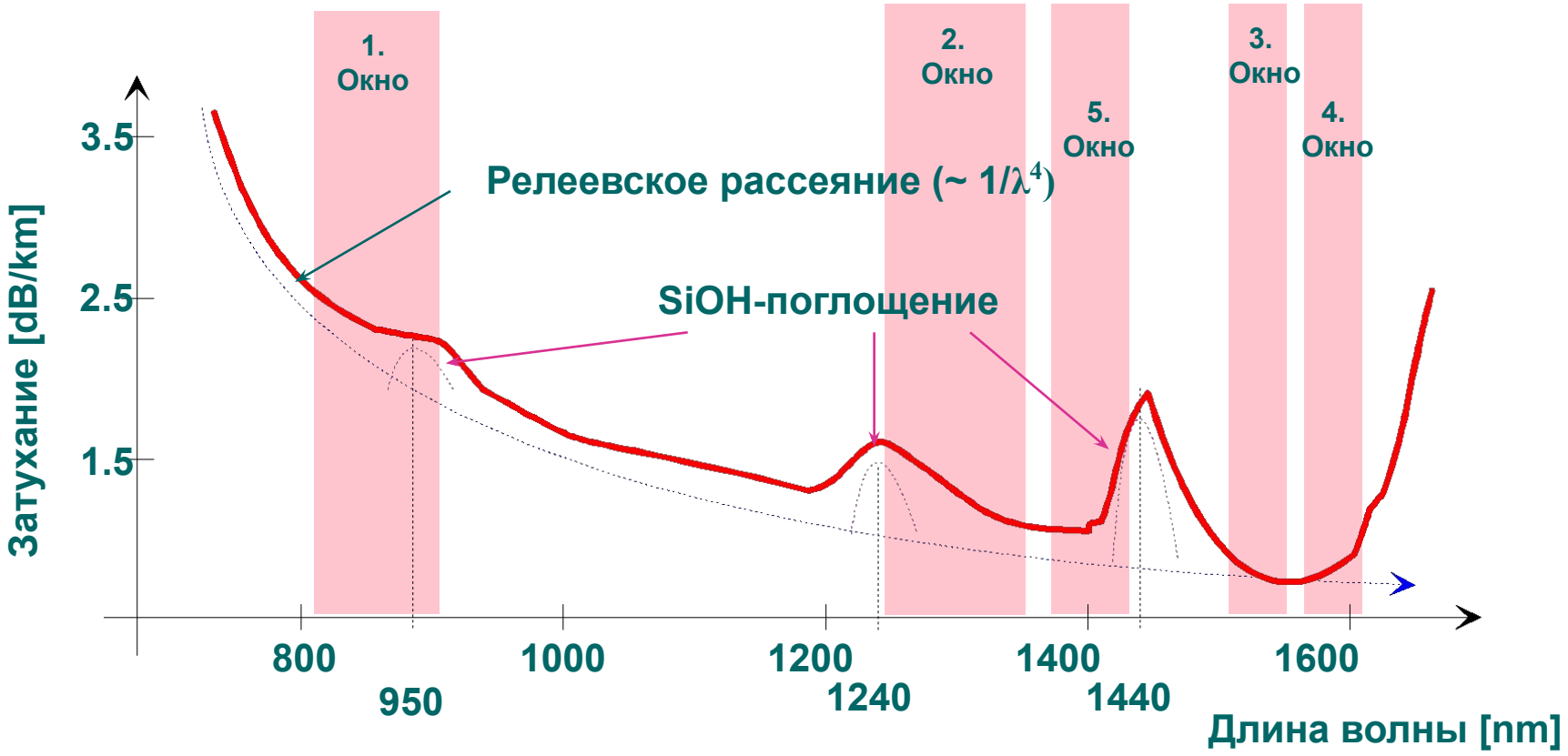
R&M
Convincing cabling solutions

PMD для одномодового оптического волокна



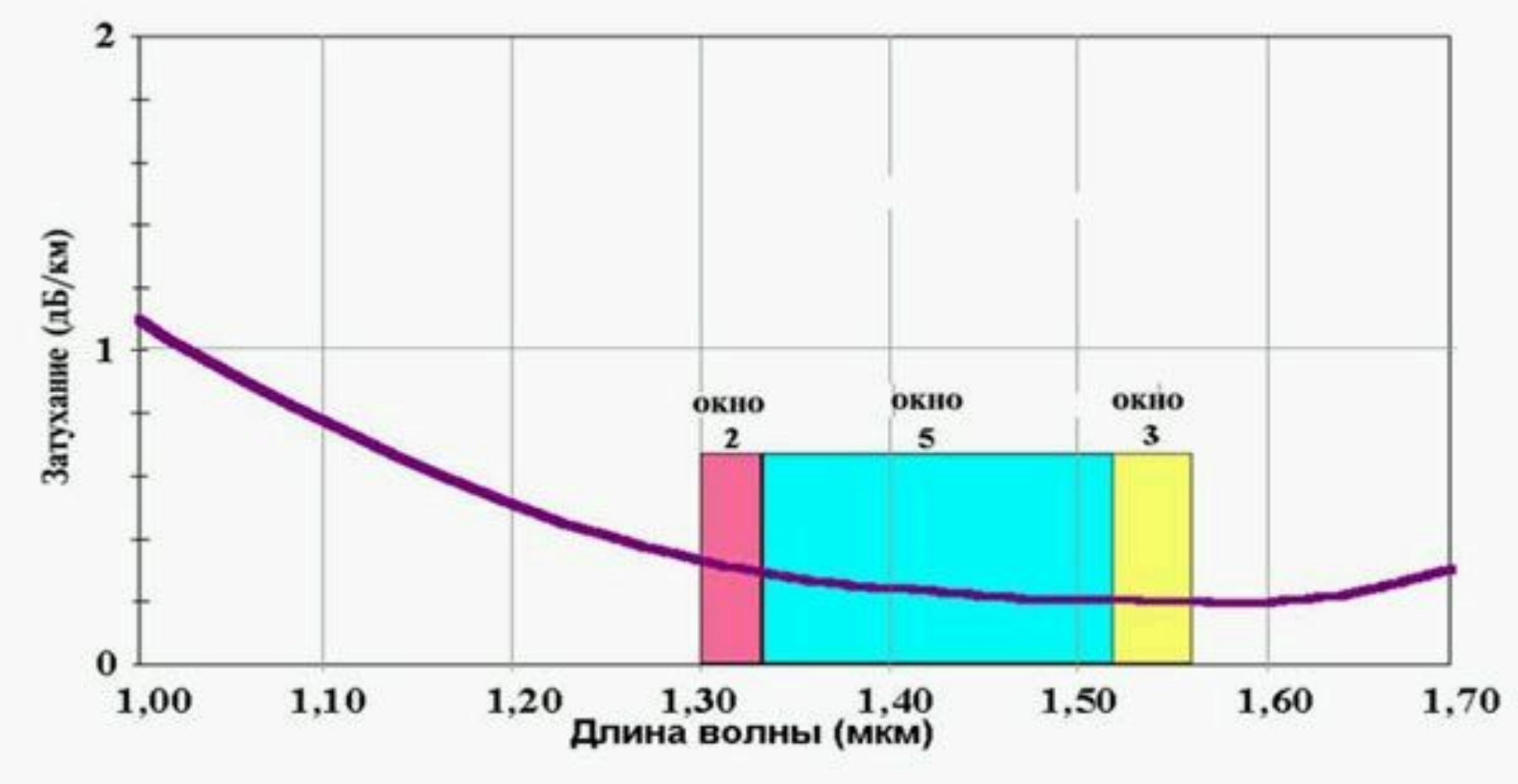
R&M
Convincing cabling solutions

Затухание многомодовых волокон



R&M
Convincing cabling solutions

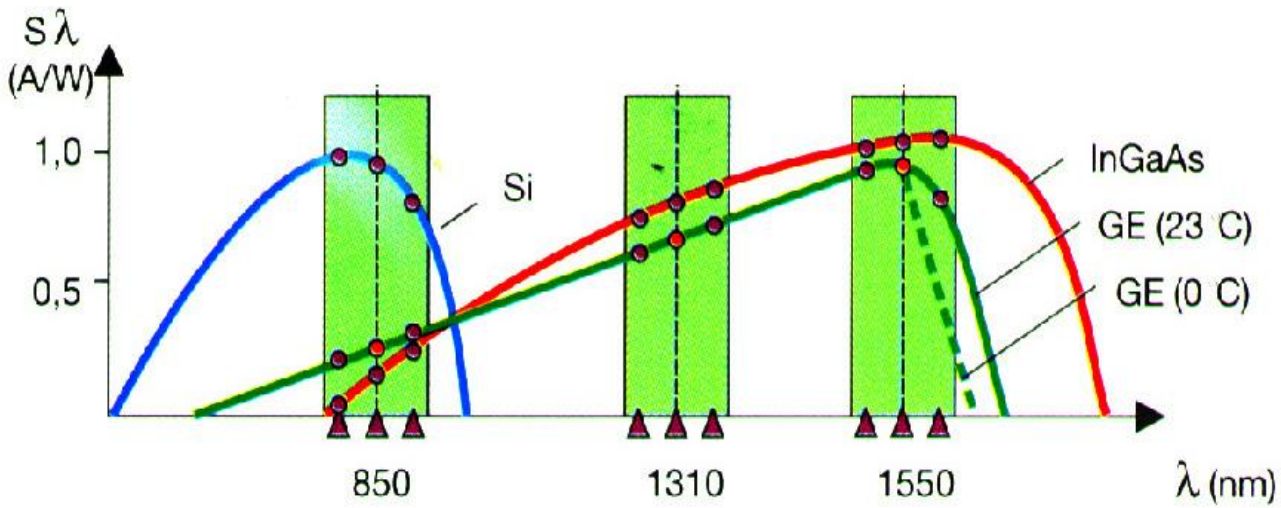
Затухание одномодовых волокон



Зависимость коэффициента затухания от длины волны одномодового оптического волокна

R&M
Convincing cabling solutions

Спектральная чувствительность детекторов



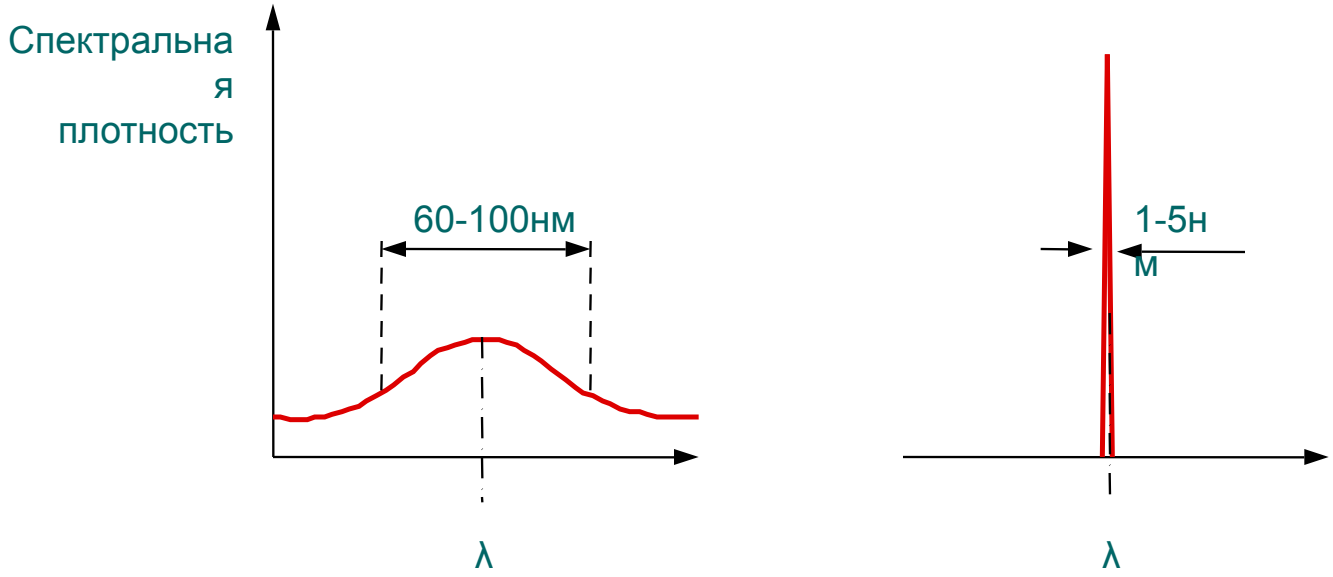
Спектр излучения лазера и LED

LED (светодиод)

от -15 до -25дБмВт

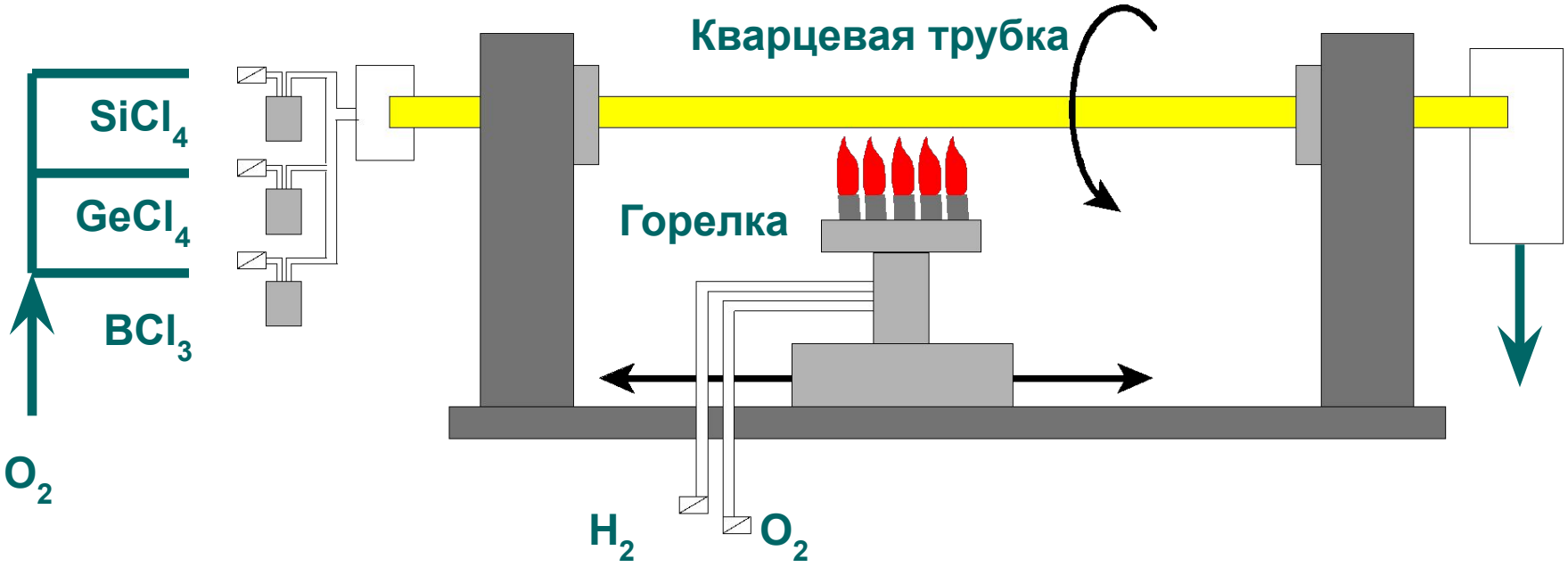
LASER

+5 до -10 дБмВт



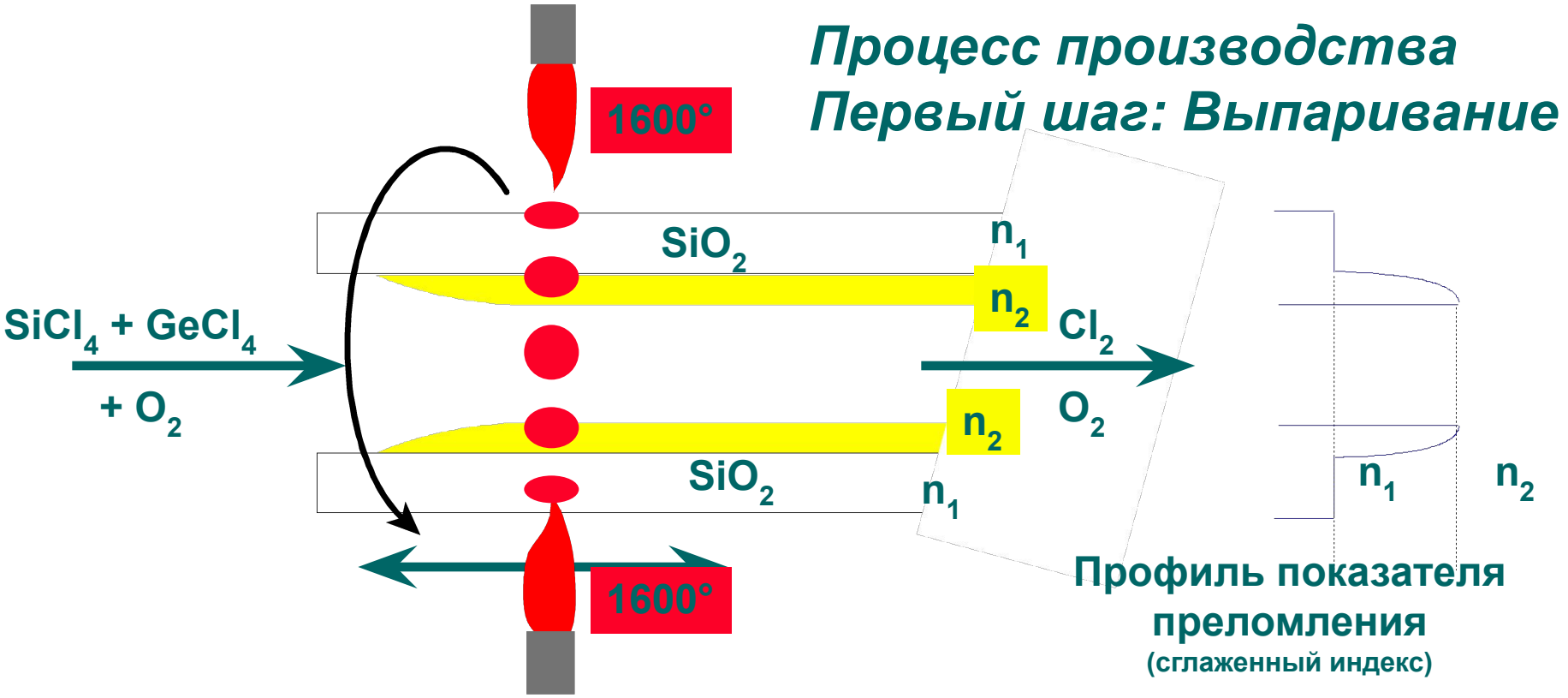
Производство ММ волокон

Метод модифицированного химического осаждения путем выпаривания (MCVD-Process)



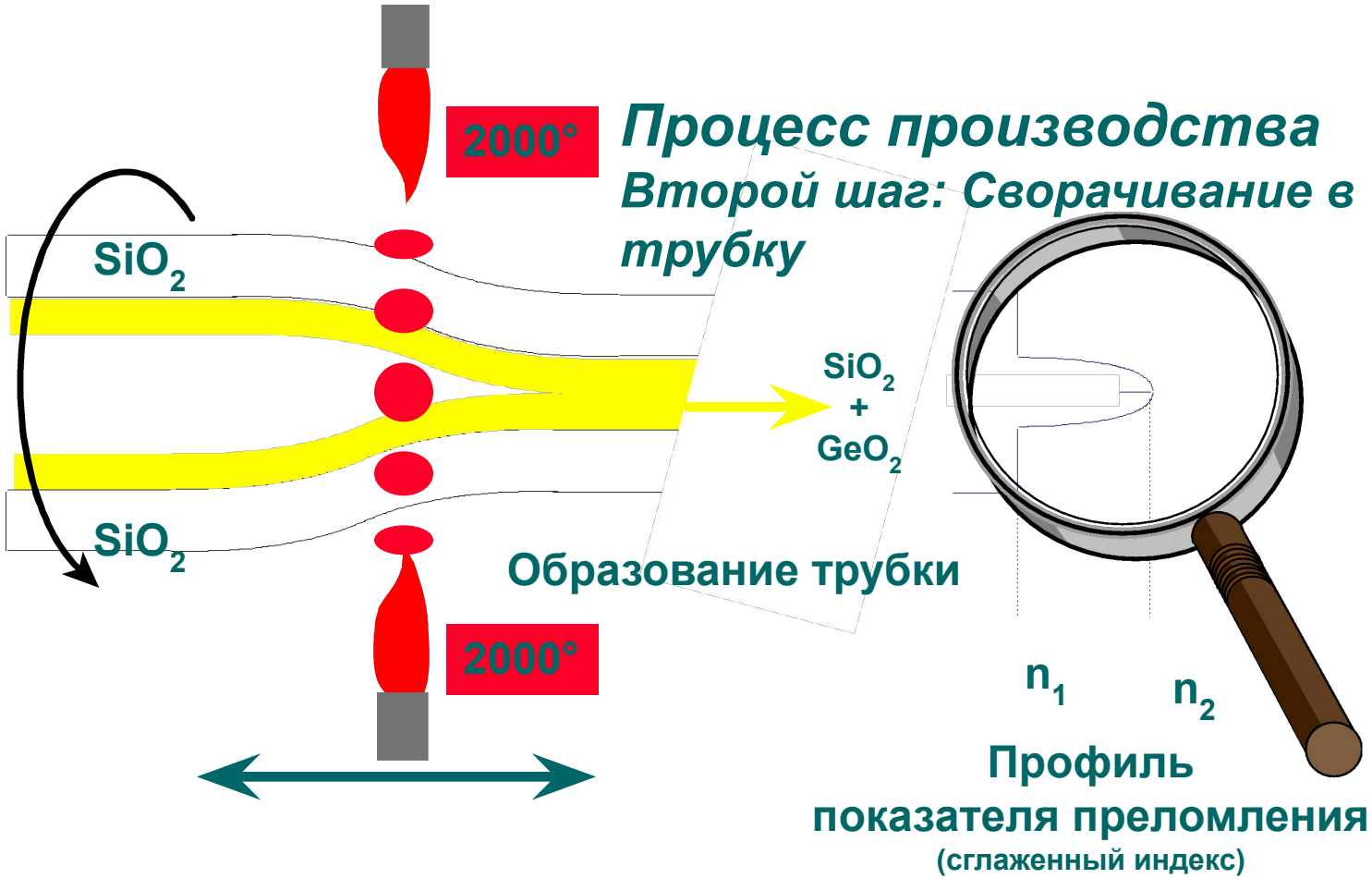
R&M
Convincing cabling solutions

MCVD-процесс



R&M
Convincing cabling solutions

«Схлопка»



R&M
Convincing cabling solutions

Протяжка

Установка для вытягивания волокна

Процесс производства

Сушильная печь

Лазерный детектор размера

Устройство первичного покрытия

Сушильная печь

Детектор натяжения

ВО барабан

R&M
Convincing cabling solutions

И вот, что выходит в результате

R&M
Convincing cabling solutions

Режимы передачи

Существует два способа ввести свет в MM 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 ограниченного режима по сравнению с полным режимом передачи.

Цветовое кодирование волокон

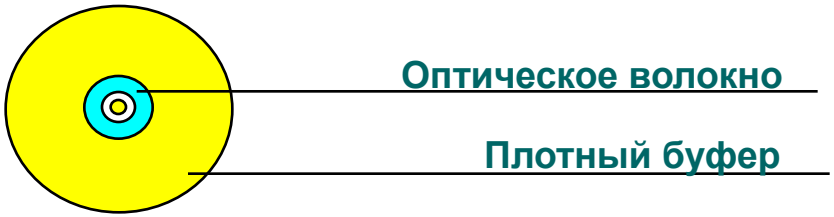
Все оптические волокна окрашиваются по определенной цветовой схеме:

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

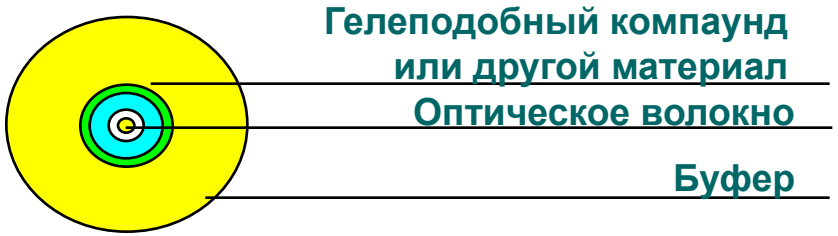
R&M
Convincing cabling solutions

Обзор различных покрытий для волокна

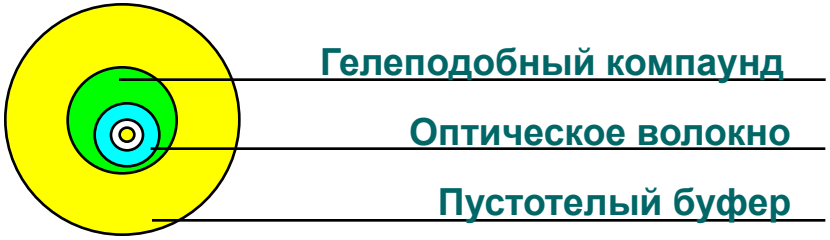
Плотный буфер
Плотно прилегает; из термопластика.



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.



R&M
Convincing cabling solutions

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:

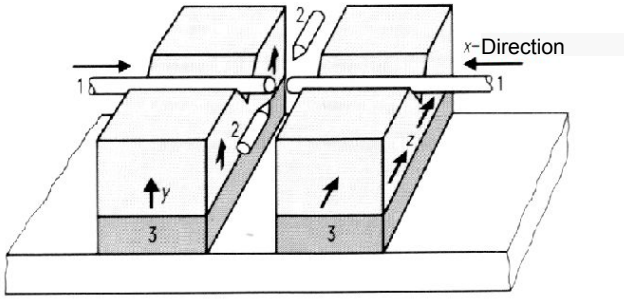
- надежности или требований к соединению
- требуемой или необходимой гибкости
- стоимости

R&M
Convincing cabling solutions

Неразъемное соединение

Принцип работы

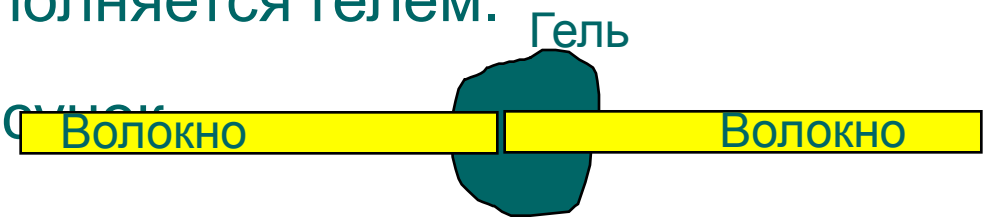
- Очищенные и сколотые волокна совмещаются друг с другом торцами как можно плотнее в сварочном аппарате (по возможности без горизонтальных или вертикальных смещений). Свариваются. Затем, сварное соединение защищается так называемой гильзой защиты сварного соединения.



R&M
Convincing cabling solutions

Квази-разъемное соединение

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

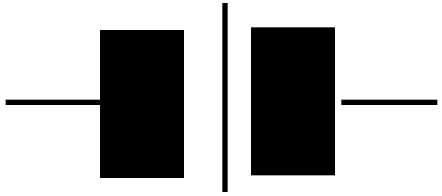


R&M
Convincing cabling solutions

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)

R&M
Convincing cabling solutions

Обзор

Criteria's	*Detachable*[2]	*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 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 (usualyl R. 8° Angle Polished)

R&M
Convincing cabling solutions

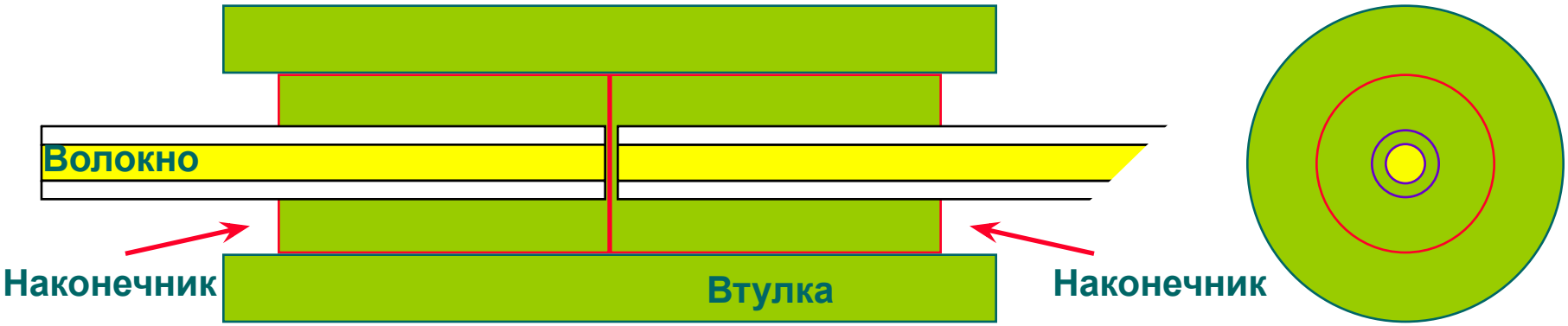
Технология совмещения – Цилиндрическая гильза

Допустимое отклонение

Наконечник	2.4990 - 2.4995
Втулка	2.4995 - 2.5000

Материалы

Наконечник	железо, карбид вольфрама
Втулка	железо, карбид вольфрама



R&M
Convincing cabling solutions

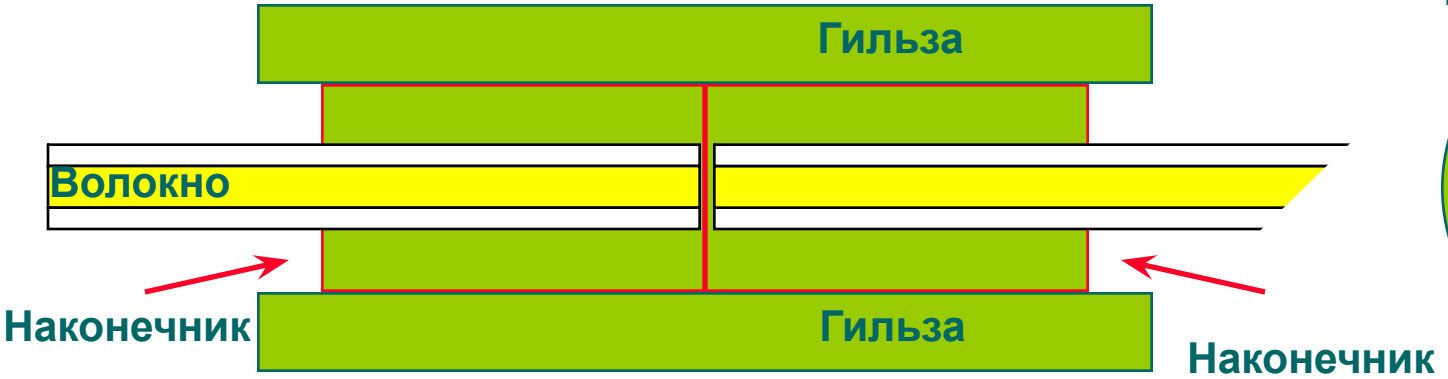
Технология совмещения - Эластичная гильза

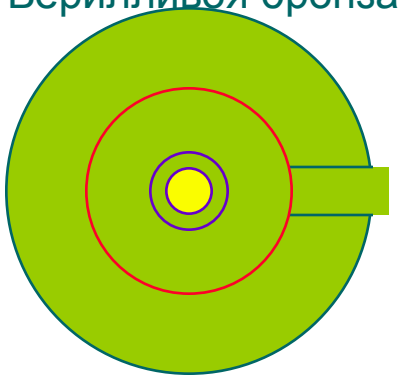
Допустимое отклонение

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

Материалы

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



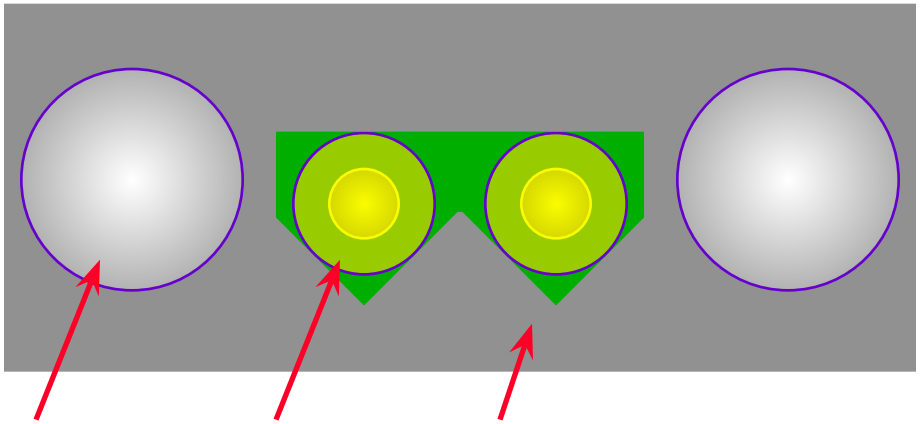


R&M
Convincing cabling solutions

Новые технологии совмещения – V-образный канал

Материалы

V- обр. желоб	Силиконовая подложка
Центровщик	Карбид вольфрама

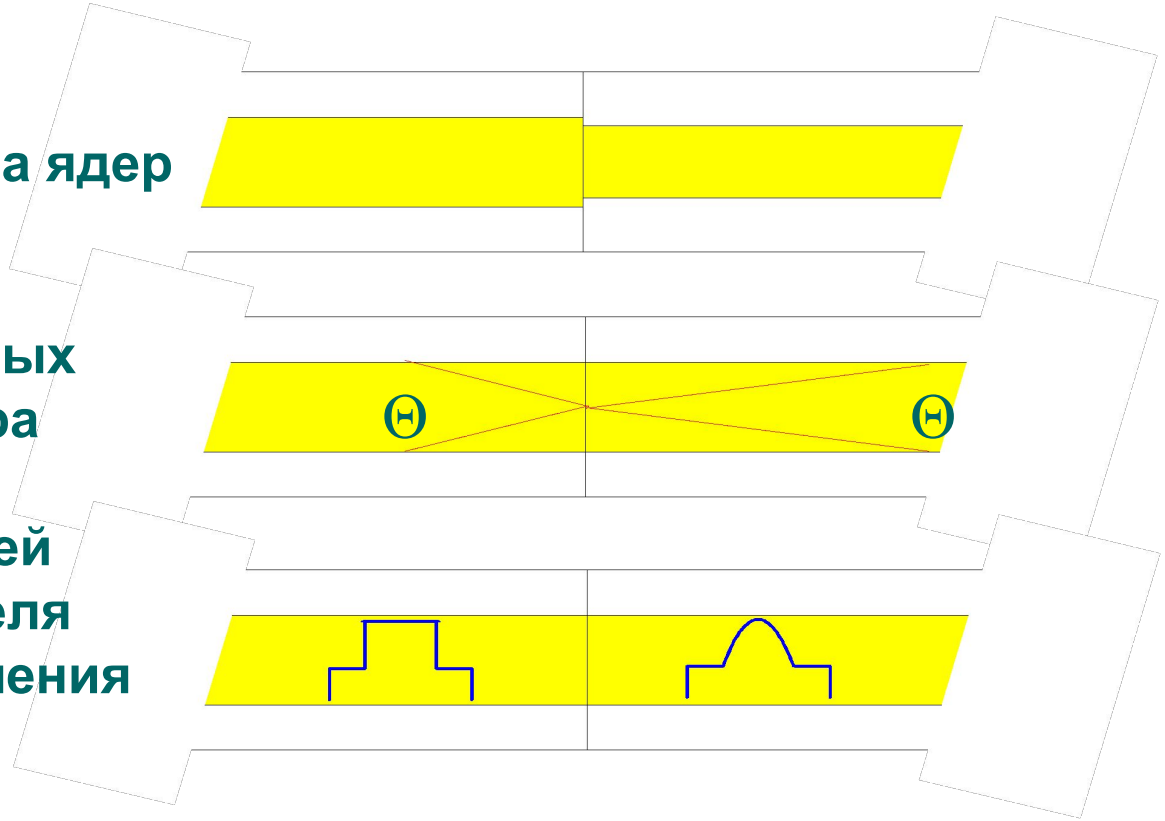


R&M
Convincing cabling solutions

Вносимые потери - внутренние

Разницей в:

- Диаметра ядер
- Численных Апертура
- Профилей показателя преломления

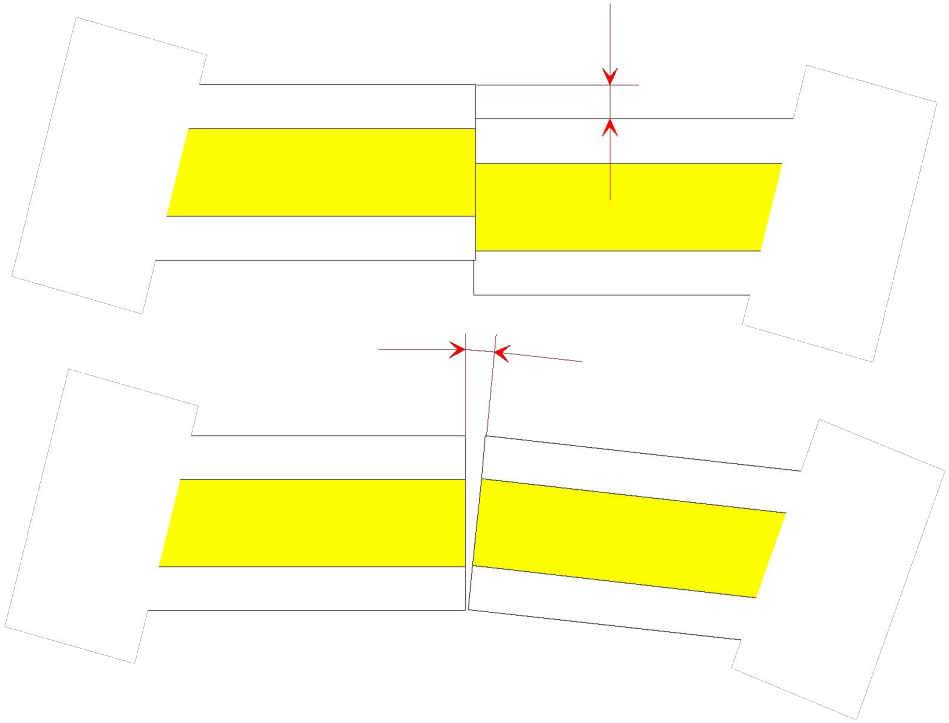


R&M
Convincing cabling solutions

Вносимые потери - Внешние

Относительное позиционирование:

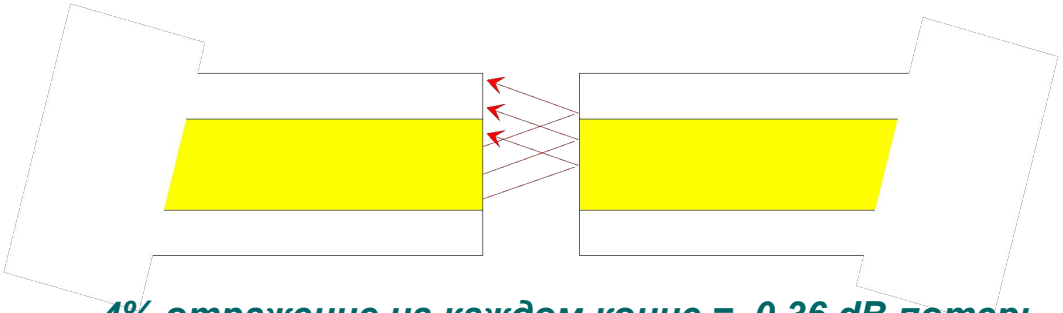
- Горизонтальное несовпадение волокон
- Осевой наклон



R&M
Convincing cabling solutions

Вносимые потери - внешние

Неплотное прилегание

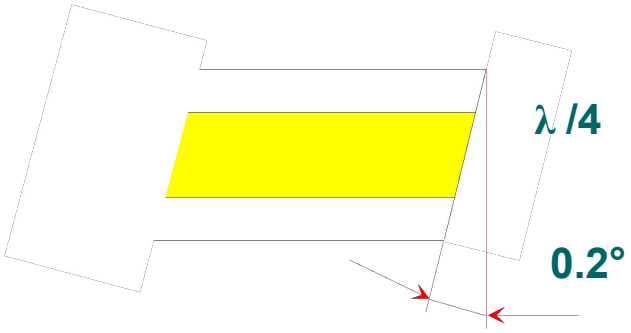


4% отражение на каждом конце = 0.36 dB потерь

Подготовка поверхности волокна:

Шероховатость поверхности

Угол

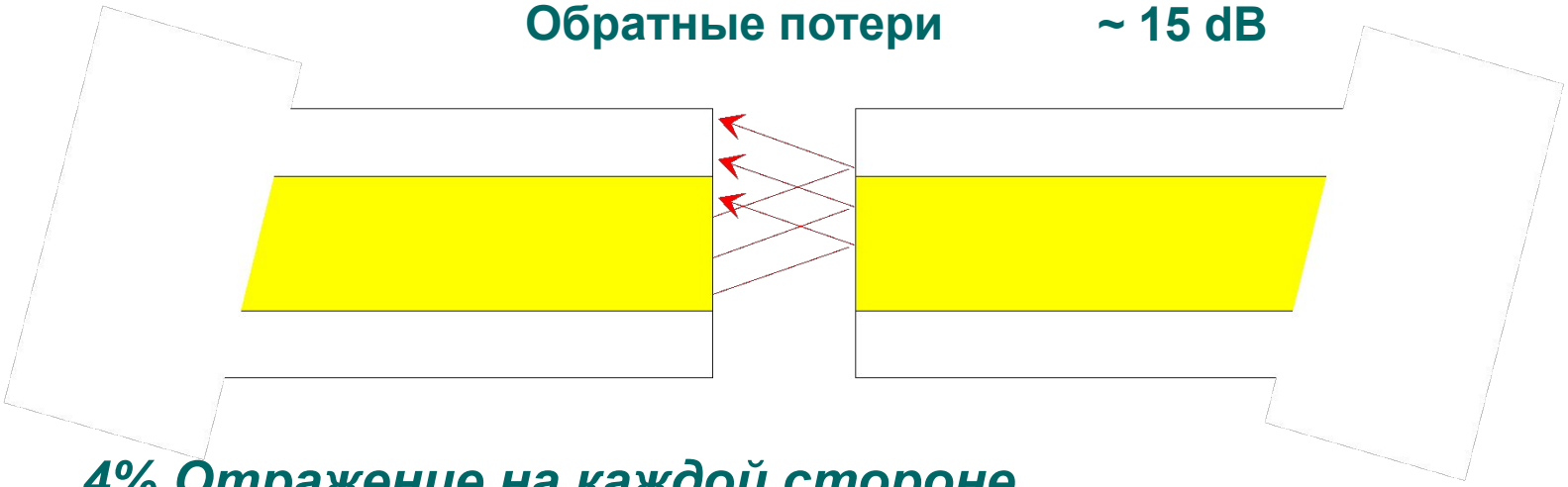


R&M
Convincing cabling solutions

Зазор между сердцевинами – нет физического контакта

Параметры передачи

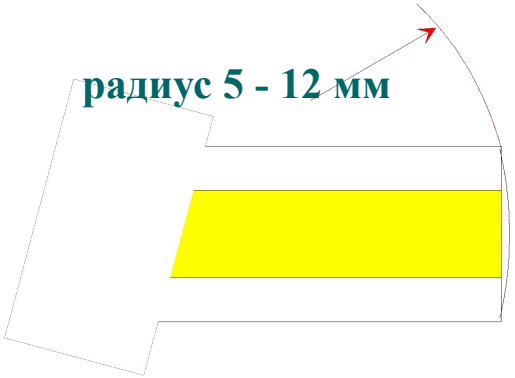
Вносимые потери	**< 1.0 dB**
Обратные потери	**~ 15 dB**



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

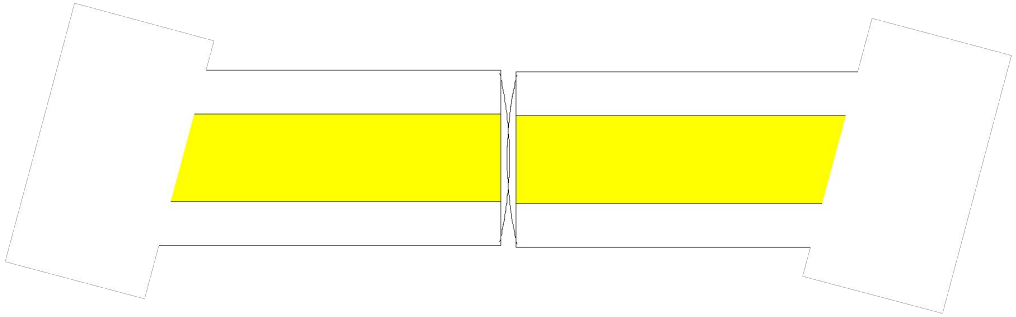
R&M
Convincing cabling solutions

Торцы наконечников – Сферический контакт



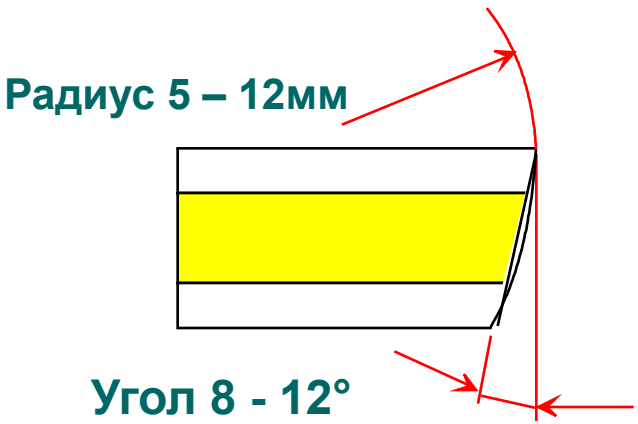
Параметры передачи

Вносимые потери	< 0.5 dB
Обратные потери	> 35 dB



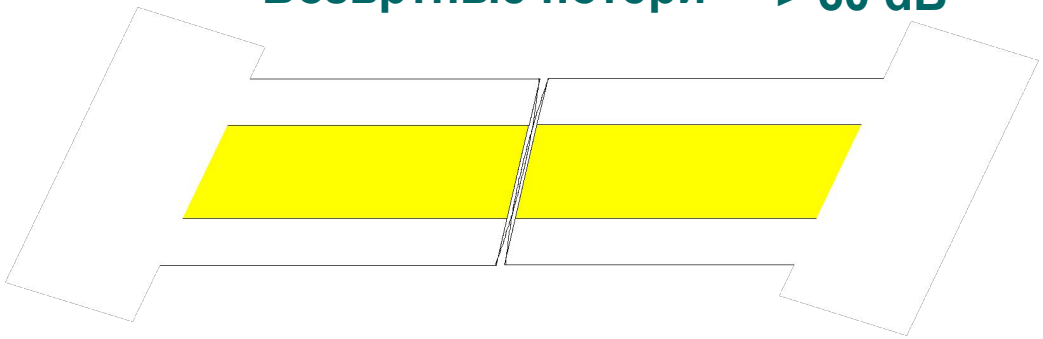
R&M
Convincing cabling solutions

Угловой сферический физический контакт



Передаточные характеристики

Вносимое затухание	< 0.3 dB
Возвртные потери	> 60 dB

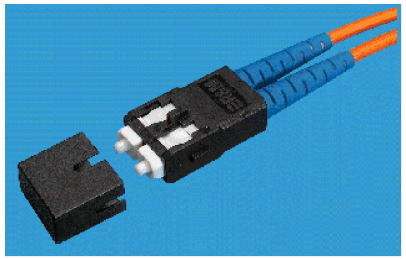


R&M
Convincing cabling solutions

SC-RJ коннектор

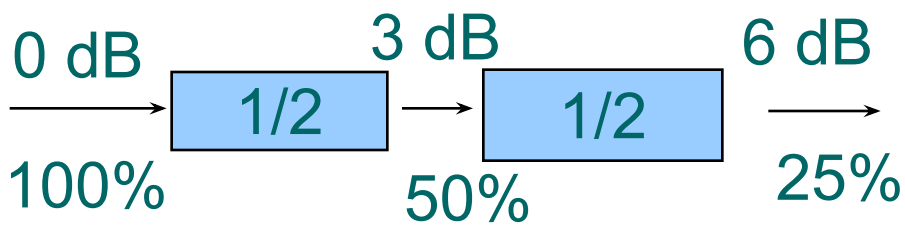
- SFF коннектор с размерами как у RJ45
- Керамический наконечник -> Хорошо известный на рынке
- Высокая плотность портов, примерно в 2 раза с Duplex SC
- Многомодовые и одномодовые
- Обратная совместимость с SC
- Один тип коннектора + адаптер
- Соответствие спецификациям ISO/IEC 11801 и TIA/EIA 568A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

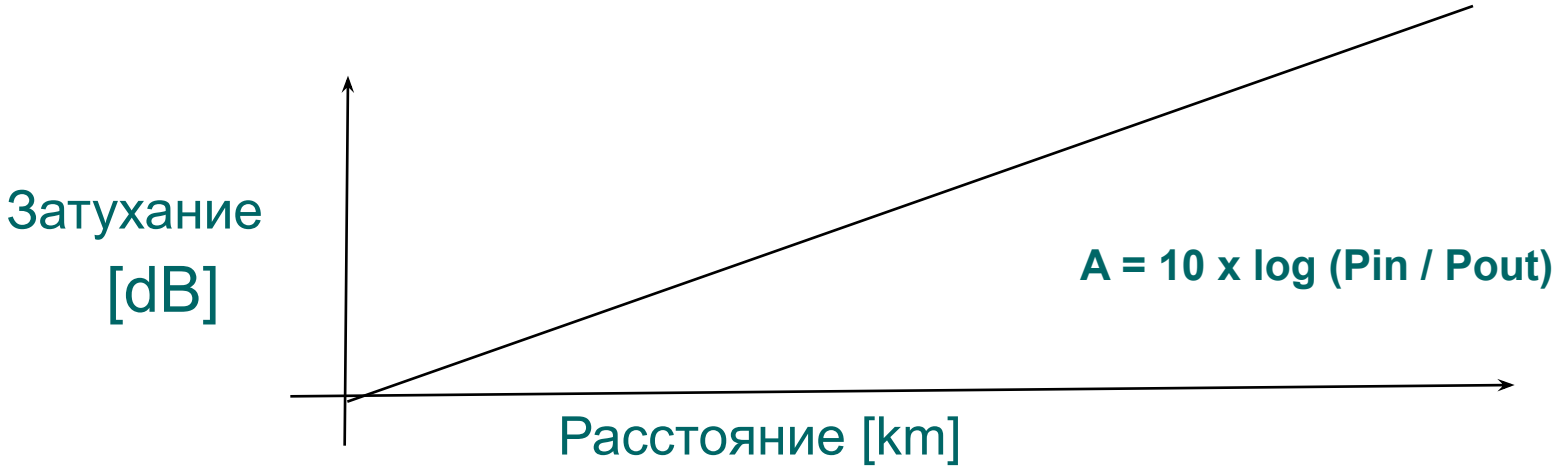
  Возможно соединение с SC Simplex
- Типичное вносимое затухание : < 0.2dB.



R&M
Convincing cabling solutions

Затухание и мощность





R&M
Convincing cabling solutions

Затухание канала связи

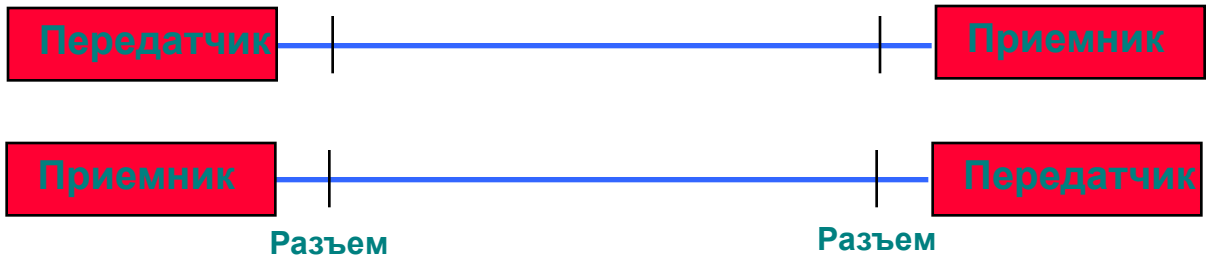
Предполагаемое затухание ВО канала связи

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

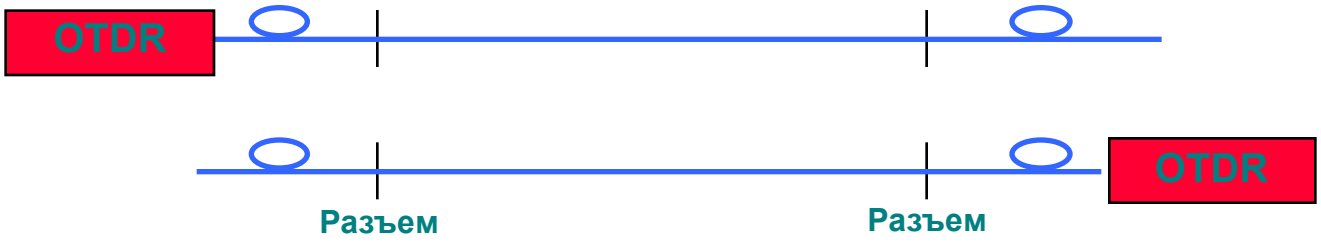
α : Затухание кабеля [dB/km]
L : Длина кабеля km]
A_S: Затухание на соединении [dB]
N_S: Число соединений
A_C: Вносимые потери коннектора [dB]
N_C: К-во конекторов

R&M
Convincing cabling solutions

Измерение затухания / принципы



Измерение обратных отражений (OTDR)



R&M
Convincing cabling solutions

Какой метод использовать?

Измерение затухания:

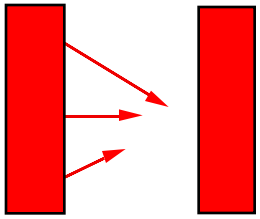
- всегда при оконечивании кабелей
- для измерения затухания линка

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

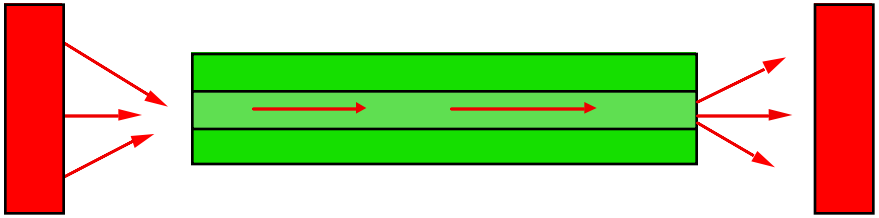
Калибровка



Значение = 100% → Затухание = 0

Передатчик **Приемник**

Измерение

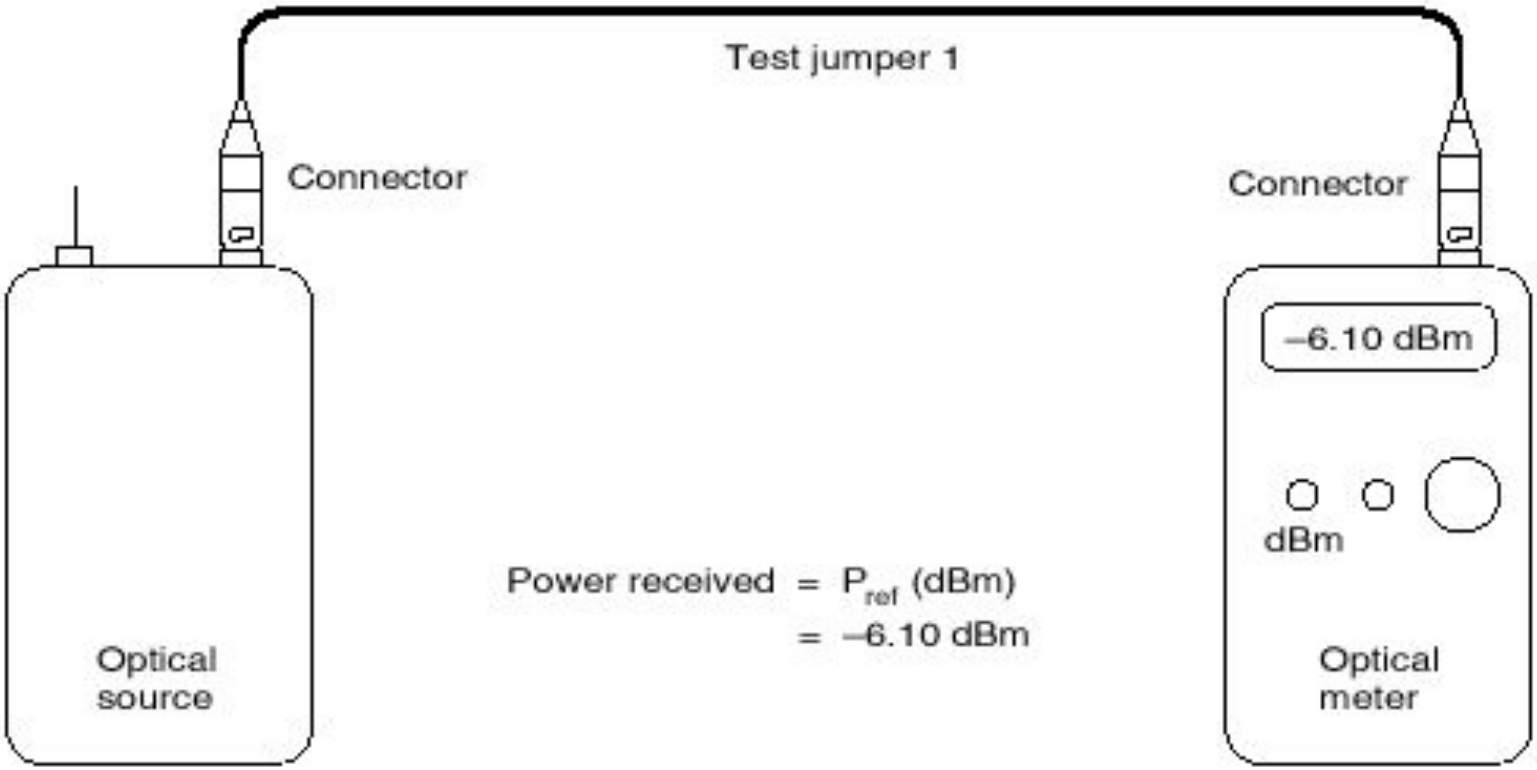


Значение = x% → Затухание = y

Передатчик **Приемник**

R&M
Convincing cabling solutions

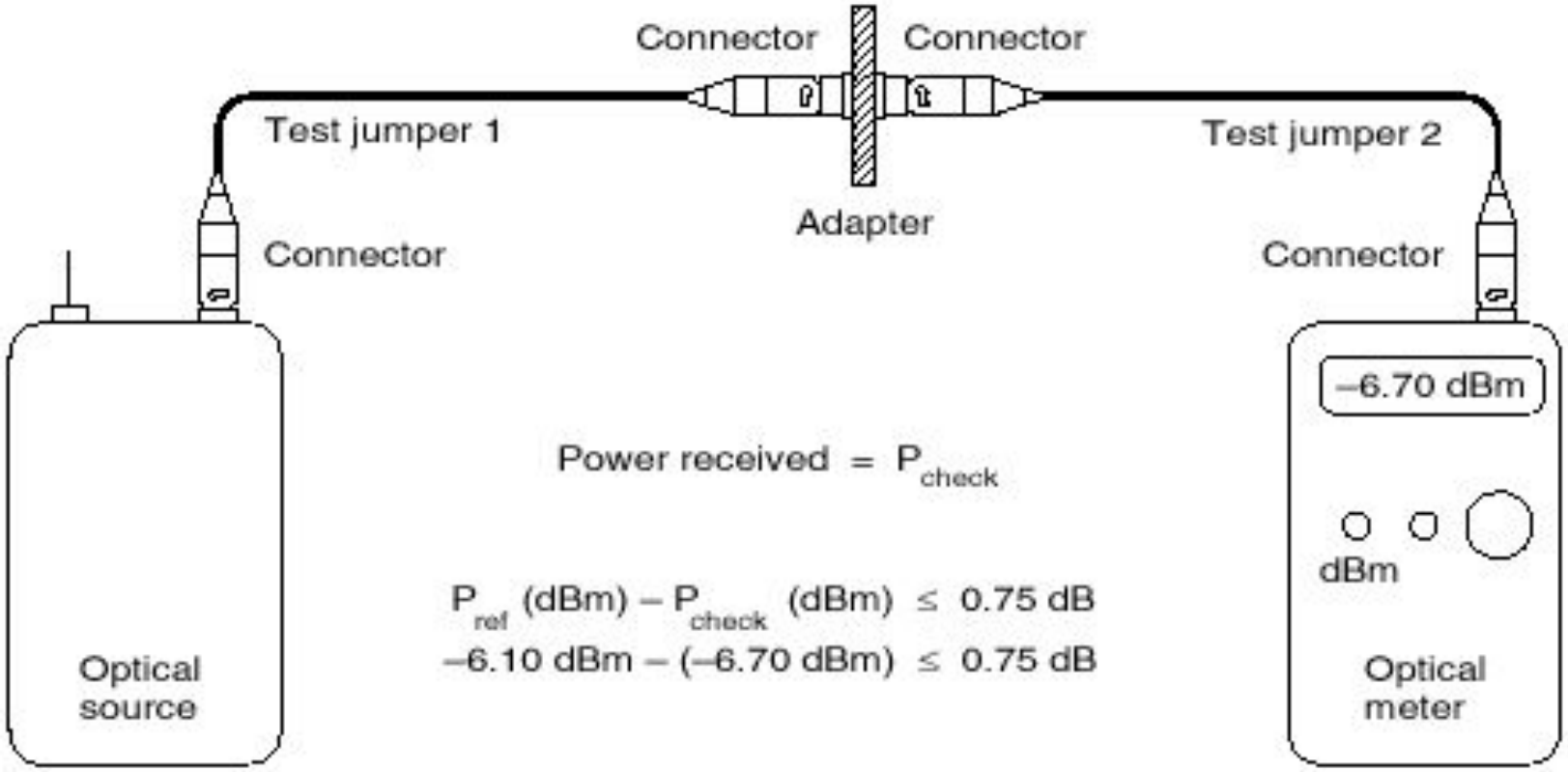
Принцип измерения затухания мощности



dBm = Decibel milliwatt

R&M
Convincing cabling solutions

Принцип измерения затухания мощности



Power received = P_{check}

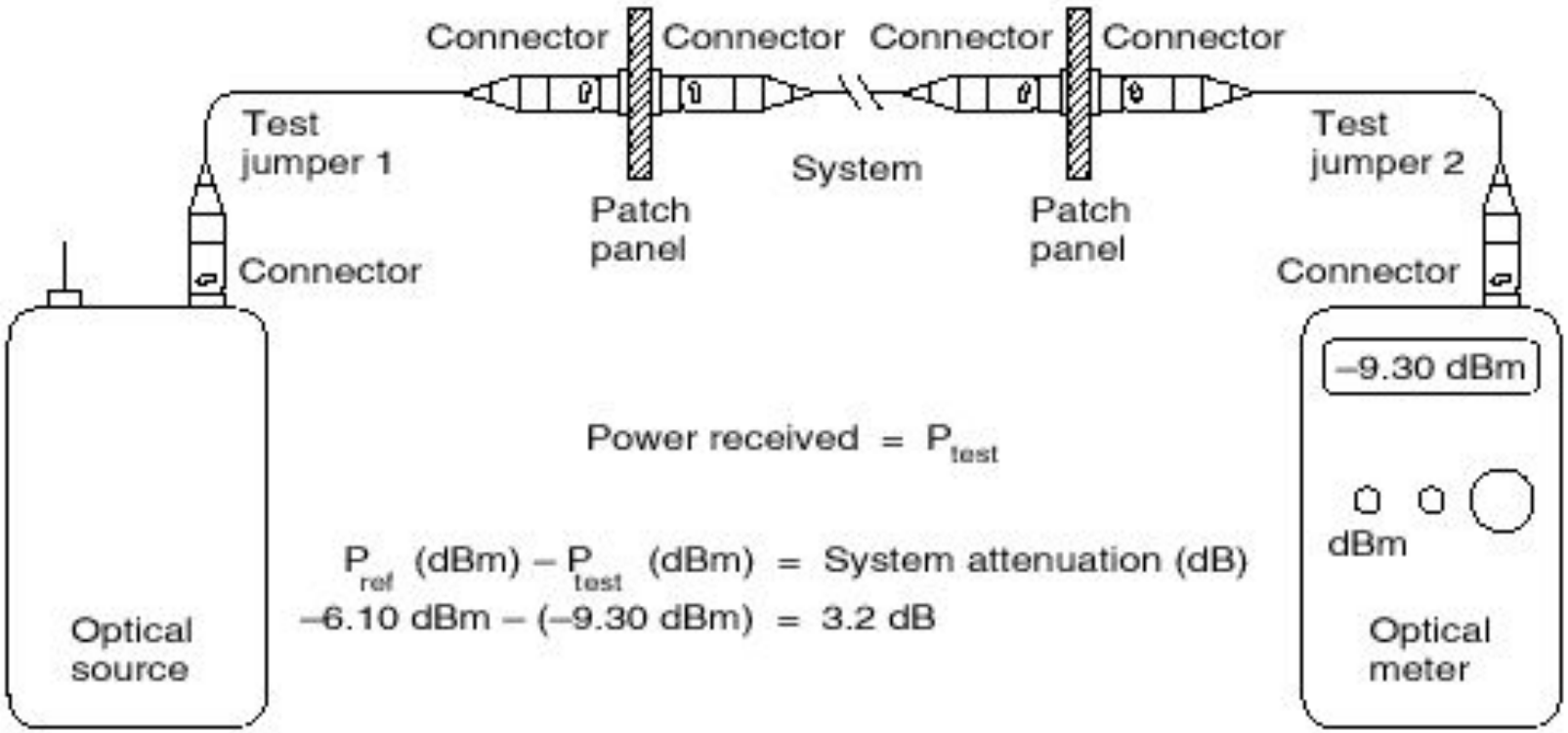
P_{ref} (dBm) – P_{check} (dBm) ≤ 0.75 dB

–6.10 dBm – (–6.70 dBm) ≤ 0.75 dB

dB = Decibel
dBm = Decibel milliwatt

R&M
Convincing cabling solutions

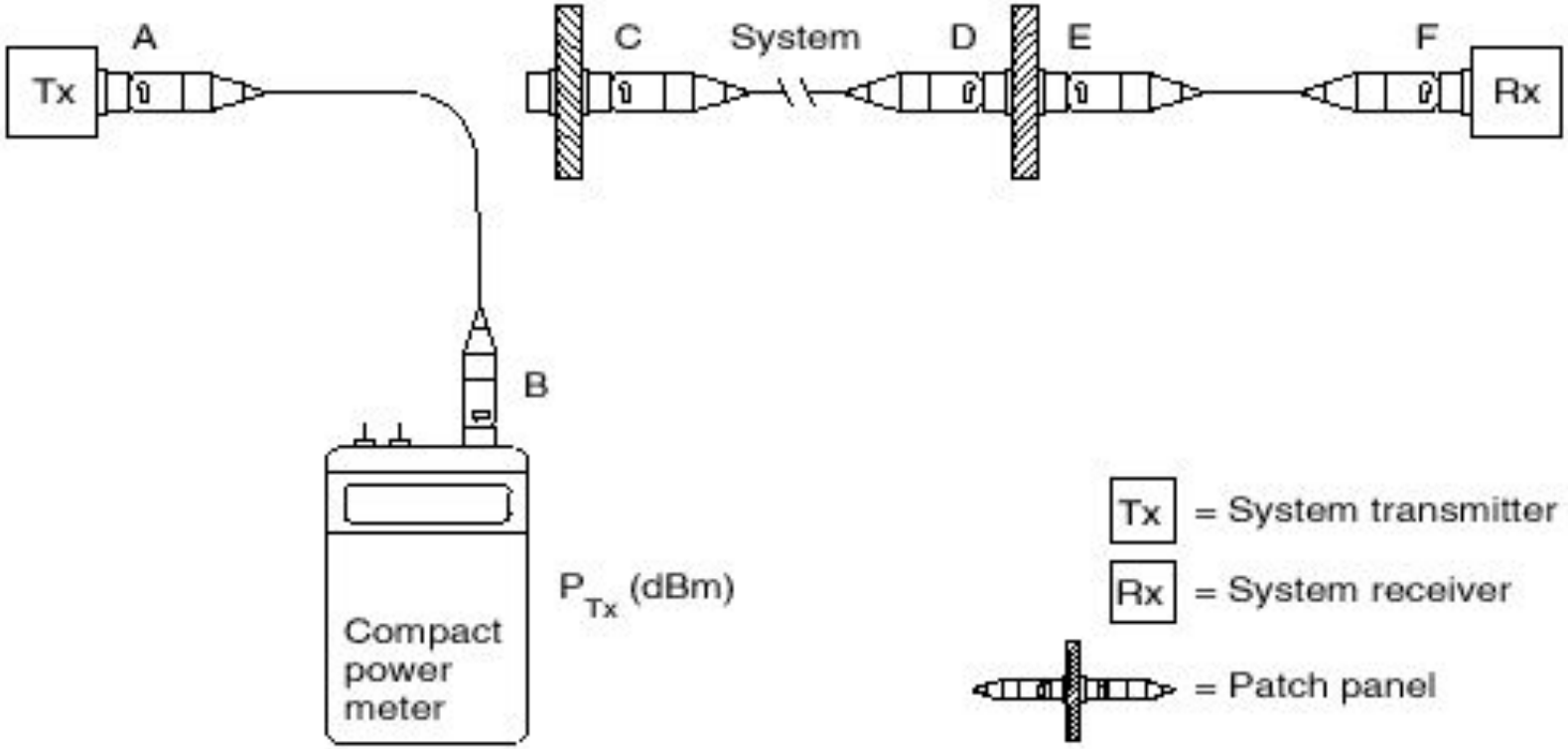
Принцип измерения затухания мощности



dB = Decibel
dBm = Decibel milliwatt

R&M
Convincing cabling solutions

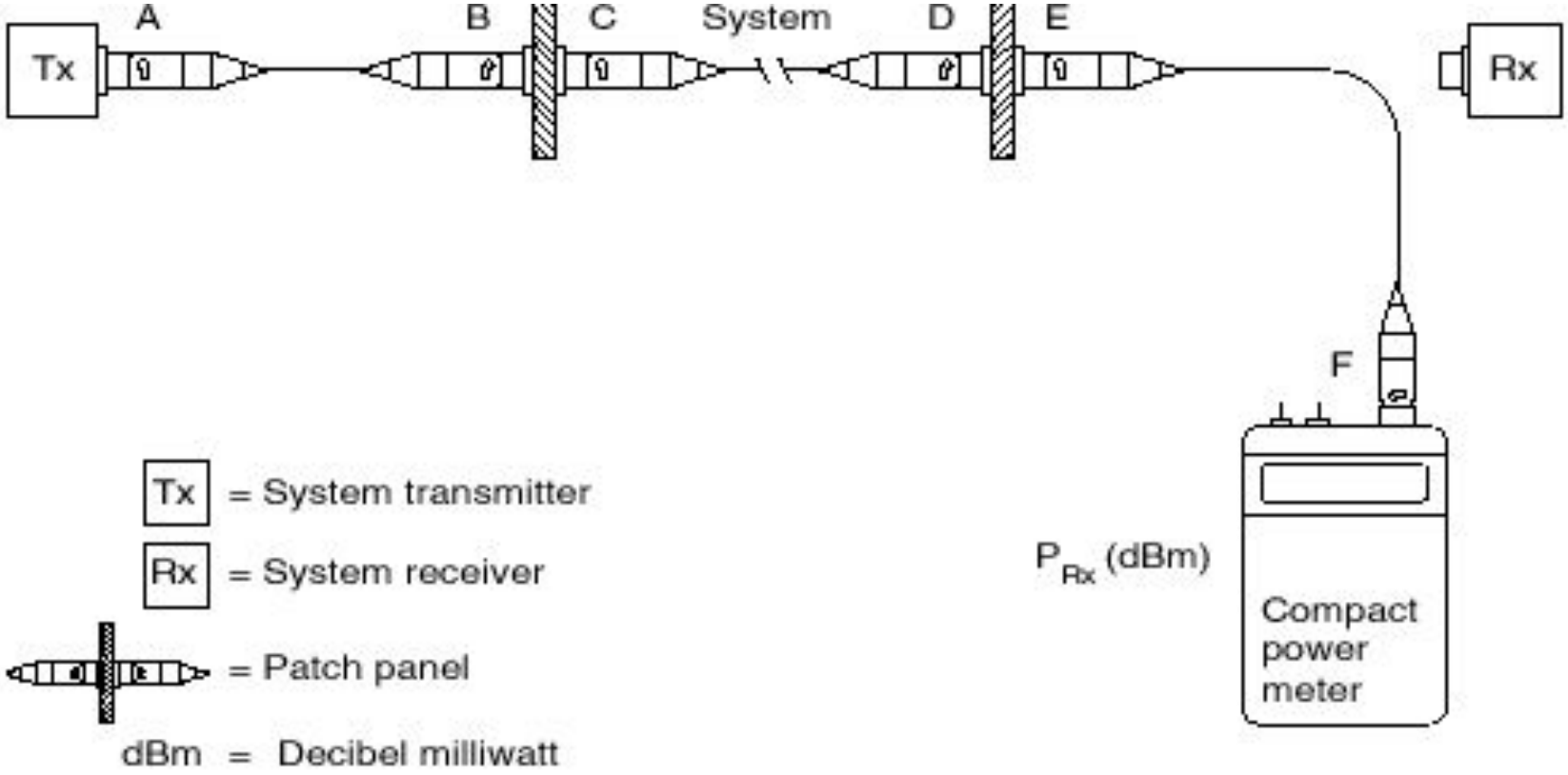
Принцип измерения мощности передатчика



dBm = Decibel milliwatt

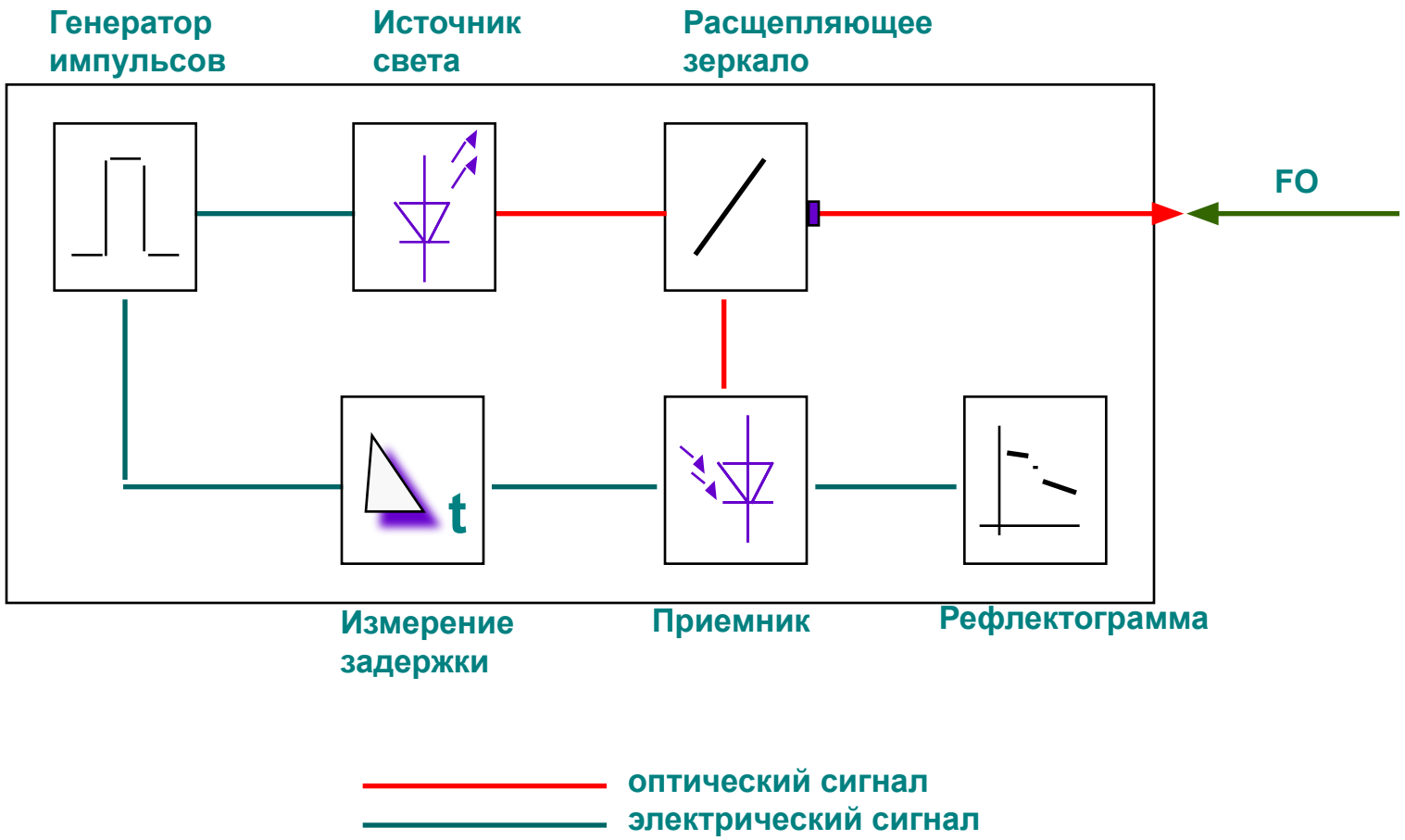
K&M
Convincing cabling solutions

Принцип измерения принимаемой мощности



R&M
Convincing cabling solutions

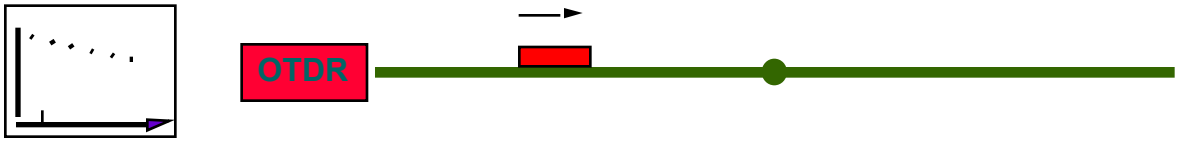
Optical Time Domain Reflectometer (OTDR)



R&M
Convincing cabling solutions

OTDR измерительная процедура

Импульс света распространяется по оптическому волноводу.

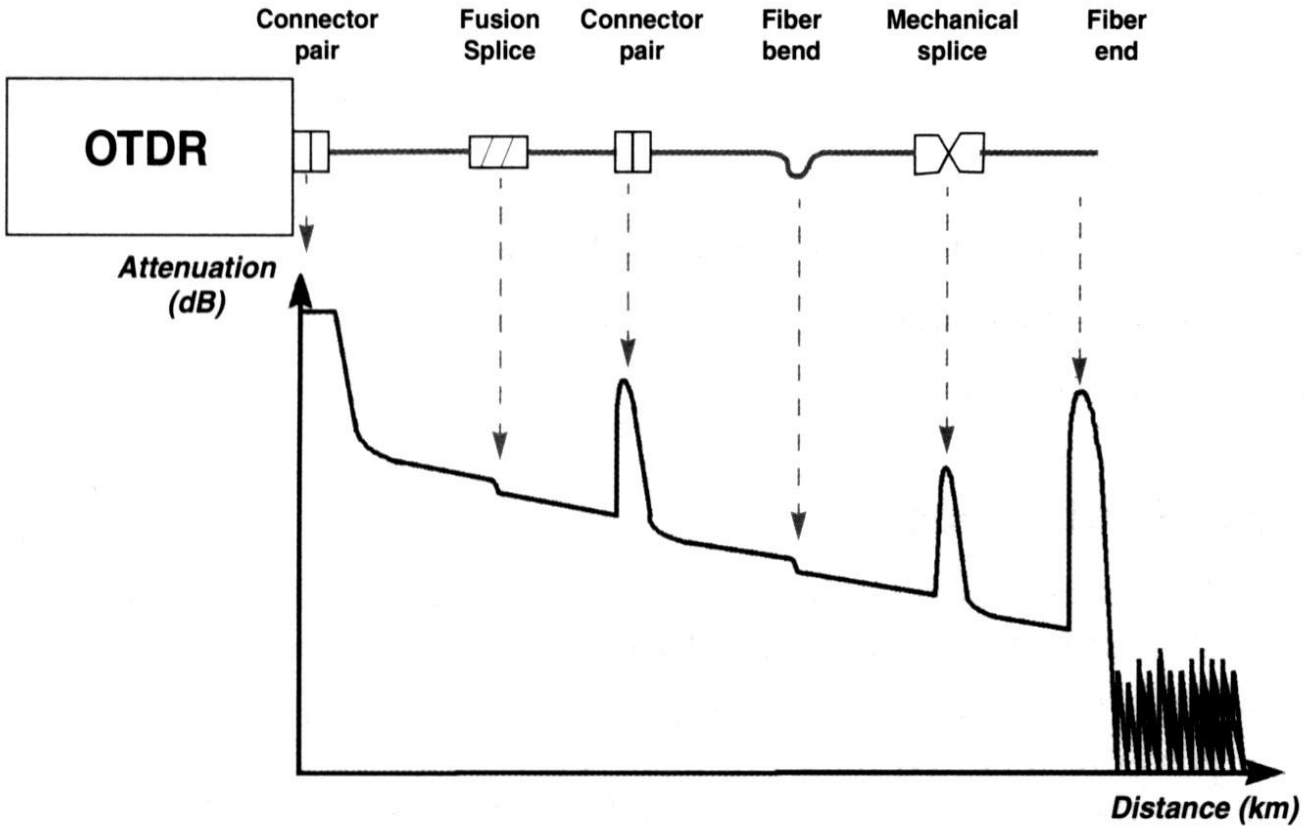


Импульс света частично отражается на неоднородностях.

Отраженный импульс принимается OTDR.

R&M
Convincing cabling solutions

Пример OTDR рефлектограммы



Typical OTDR trace

R&M
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):

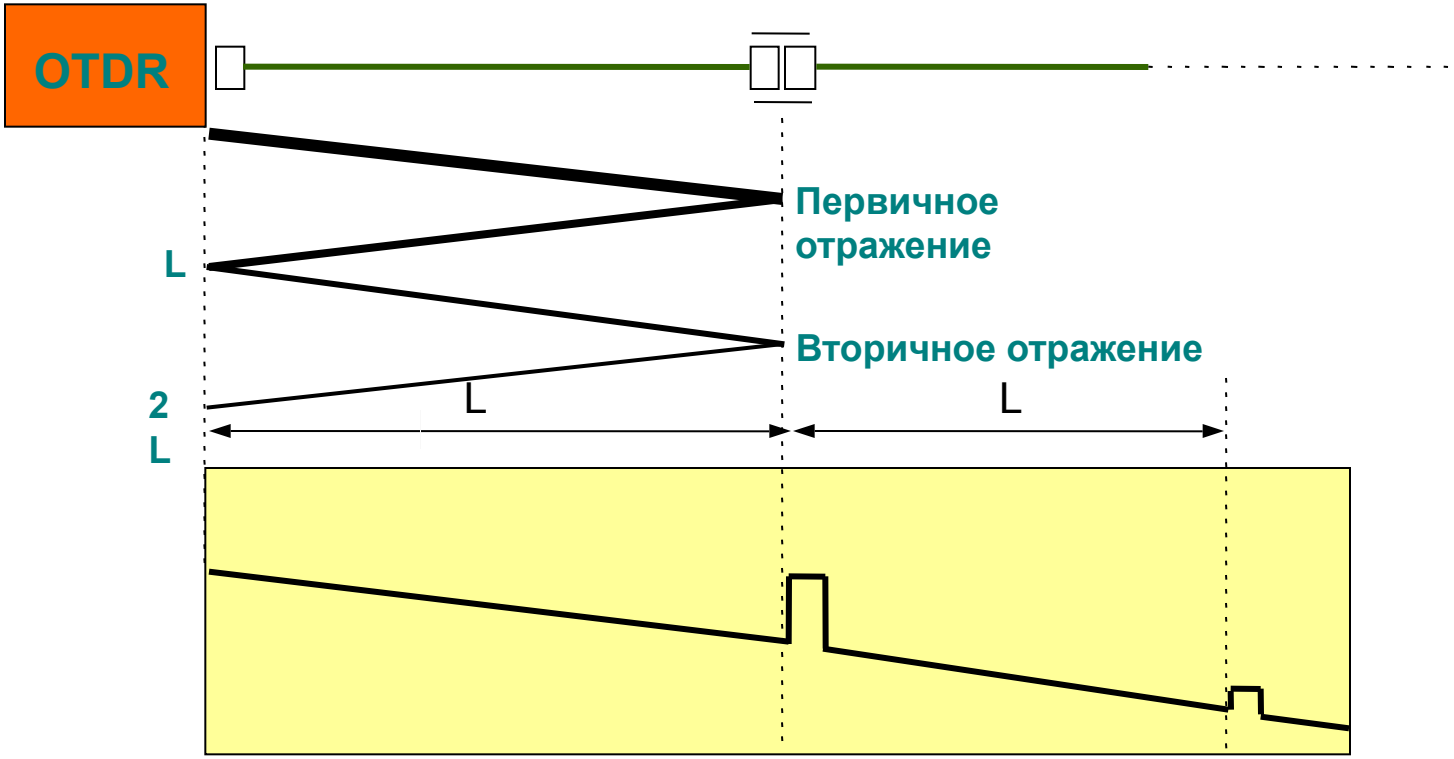
MM:	RL: 20 dB	IL: 0.75 dB
SM:	RL: 35 dB	IL: также как для MM

R&M
Convincing cabling solutions

Приведения и OTDR???

R&M
Convincing cabling solutions

Вторичные отражения (приведения)



R&M
Convincing cabling solutions

Вопросы?

R&M
Convincing cabling solutions