ОПТИЧЕСКОЕ ВОЛОКНО

Семенов Б.В.

Содержание

3. ОПТИЧЕСКОЕ ВОЛОКНО

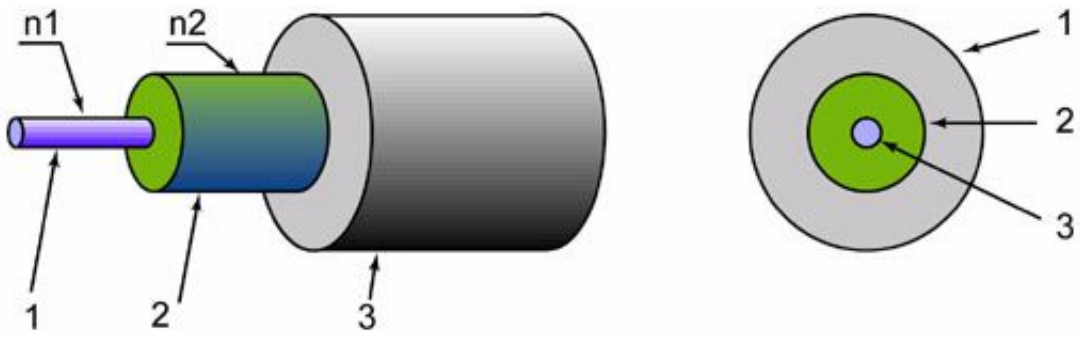
3.1 Структура оптического волокна

3.2 Типы оптических волокон

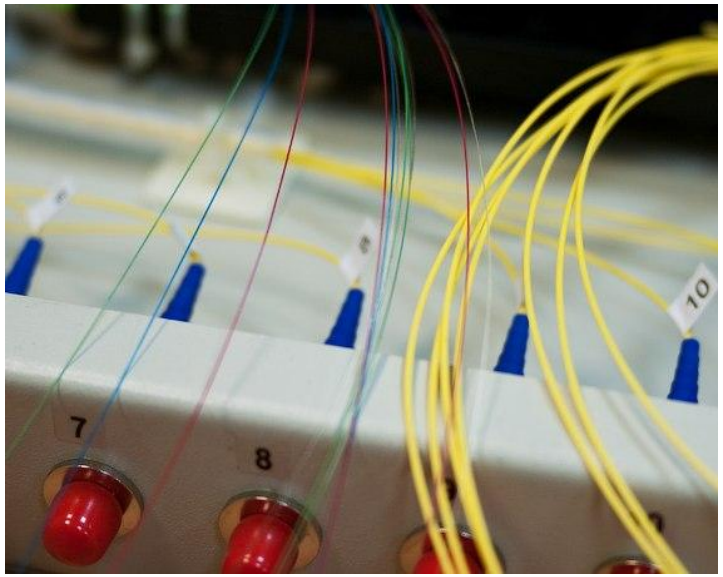
3.3 Основы передачи электромагнитной энергии по световодам

3.4 Параметры и характеристики оптических волокон

Оптическое волокно (ОВ)



1 - сердцевина ОВ (стекло);
2 - оболочка ОВ (стекло);
3 – защитное покрытие (лаковое и или полимерное)

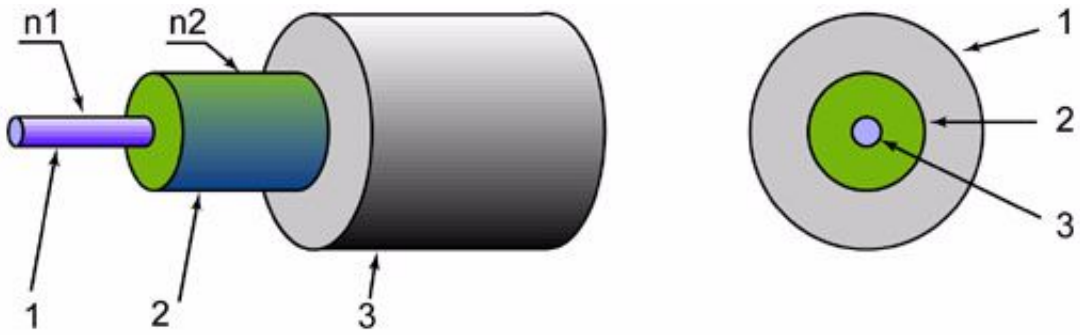


Оптоволокно в лаковом покрытии (250 мкм) и, жёлтое, в полимерном (900 мкм)

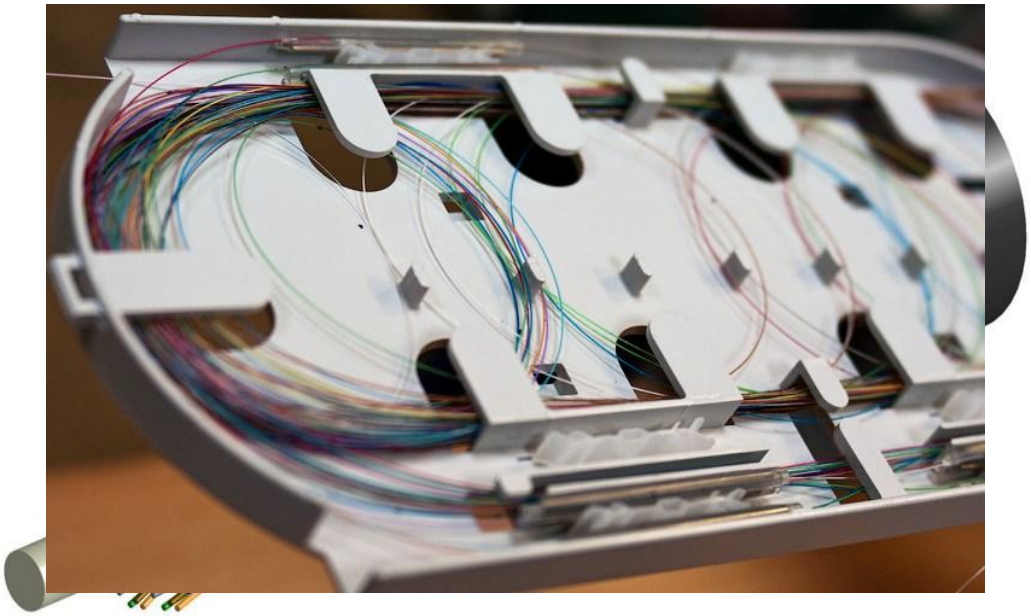
Лаковое покрытие защищает ОВ и придаёт дополнительную устойчивость ОВ к изгибам. Лак используется разноцветный. Цвет волокна определяет его условный номер в оптическом кабеле.

900 мкм оптоволокно в буферном полимерном покрытии. используется при изготовлении шнуров и подключения оптоволоконных кроссов. Цвет покрытия определяет тип оптоволокна

Оптическое волокно (ОВ)



1 - сердцевина ОВ (стекло);
2 - оболочка ОВ (стекло);
3 – защитное покрытие (лаковое и или полимерное)



Стандарты оптических волокон и области их применения

Многомодовое волокно (**MMF**)		Одномодовое волокно (**SMF**)		
MMF 62,5/125 (OM1) градиентное волокно	**MMF 50/125** (OM2, OM3, OM4, OM5) градиентное волокно	**SF** (G.652) стандартное ступенчатое волокно	**DSF** (G.653) волокно со смещенной дисперсией	**NZDSF** (G.655) волокно с ненулевой смещенной дисперсией

MMF – *Multi Mode Fiber*

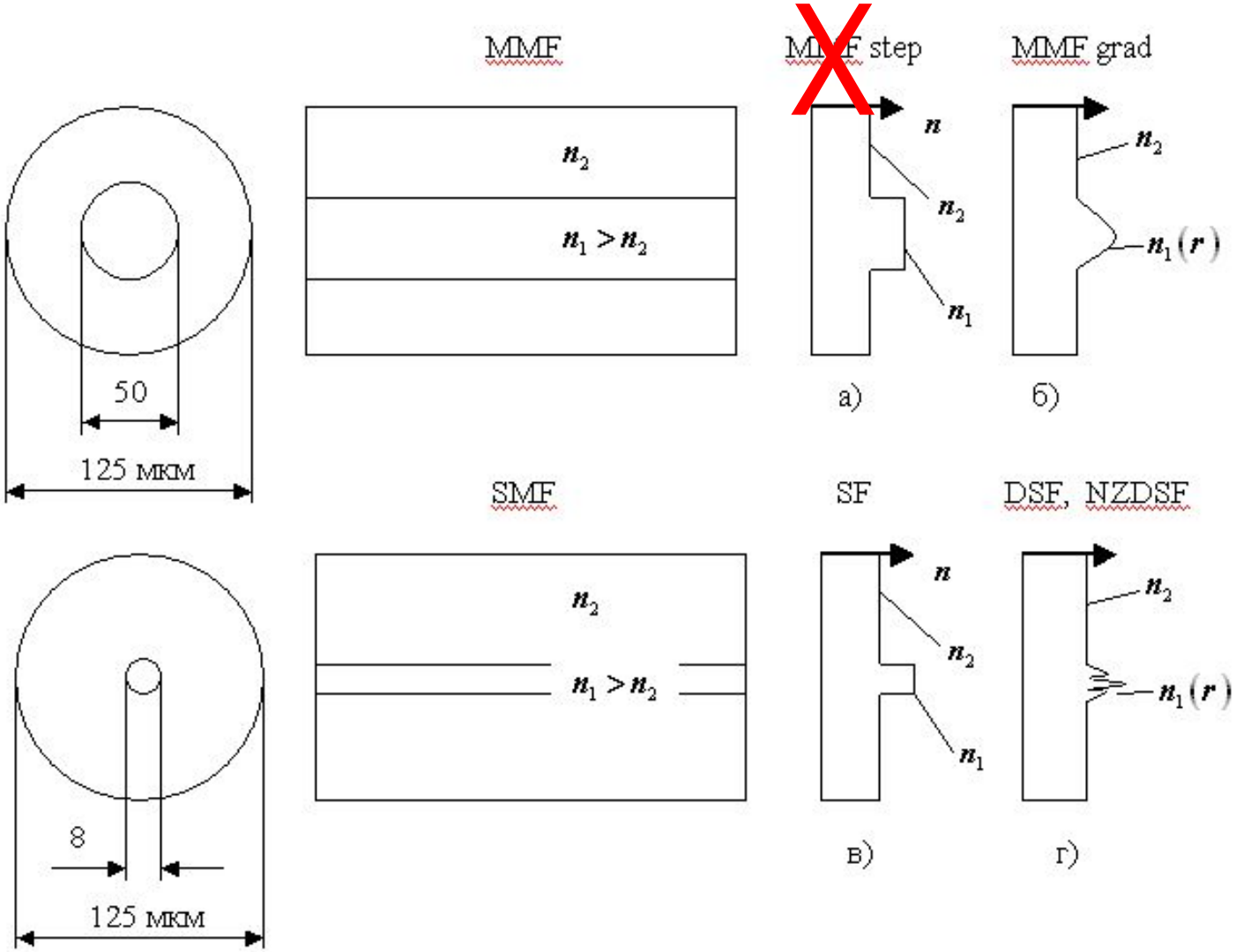
SMF – *Single Mode Fiber*

SF – *Standard Fiber*

DSF – *Dispersion-Shifted single mode Fiber*

NZDSF – *Non-Zero Dispersion-shifted single mode Fiber*

Структура ОВ



Примеры обозначений ОВ: MMF 50/125; MMF 62,5/125; SF 8/125; DSF 8,3/125

Типы MMF

Стандарт ISO/IEC 11801 определяет 4 категории многомодовых волокон. Они обозначаются латинскими буквами OM (Optical Multimode) и цифрой, обозначающей класс волокна:

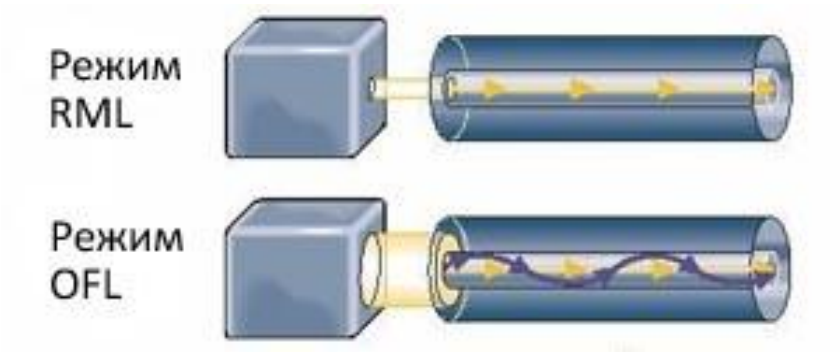
- **OM1** – стандартное многомодовое волокно 62,5/125 мкм;
- **OM2** – стандартное многомодовое волокно 50/125 мкм;
- **OM3** – многомодовое волокно 50/125 мкм, оптимизированное для работы с лазером;
- **OM4** – многомодовое волокно 50/125 мкм, оптимизированное для работы с лазером, с улучшенными характеристиками.

Особенности кабелей OM3 и OM4

Патч-корды OM3 и OM4 также похожи между собой и оба используются для лазерных источников VCSEL.Как правило, они представлены в виде кабеля с оболочкой цвета морской волны (aqua), но последний в зависимости от производителя может быть представлен в пурпурном цвете (magenta). Размер сердечника у обоих также составляет 50 μm, а поддержка 10 Gb Ethernet возможна на расстояние до 300 метров и 550 метров соответственно. В случае использования 100GbEthernet максимально возможное расстояние составляет 100 метров для OM3 и 150 метров для OM4.

Класс волокна	Затухание, дБ/км		Коэффициент широкополосности (OFL), МГц*км		**Применение**
	850 нм	1300 нм	850 нм	1300 нм	
OM1	3,5	1,5	200	500	Применяется для расширения ранее установленных систем. Использовать в новых системах не рекомендуется.
OM2			500	500	Применяется для поддержки приложений с производительностью до 1 Гбит/с на расстоянии до 550 м.
OM3			1500	500	Волокно оптимизировано для применения лазерных источников. В режиме RML коэффициент широкополосности на длине волны 850 нм составляет 2000 МГц·км. Волокно применяется в системах с производительностью до 10 Гбит/с на расстоянии до 300 м.
OM4			3500	500	Волокно оптимизировано для применения лазерных источников. В режиме RML коэффициент широкополосности на длине волны 850 нм составляет 4700 МГц·км. Волокно применяется для поддержки приложений с производительностью до 10 Гбит/с на расстоянии до 550 м.

OFL − overfilled launch − при возбуждении от СД
RML restricted mode launch − при возбуждении от лазера



RML

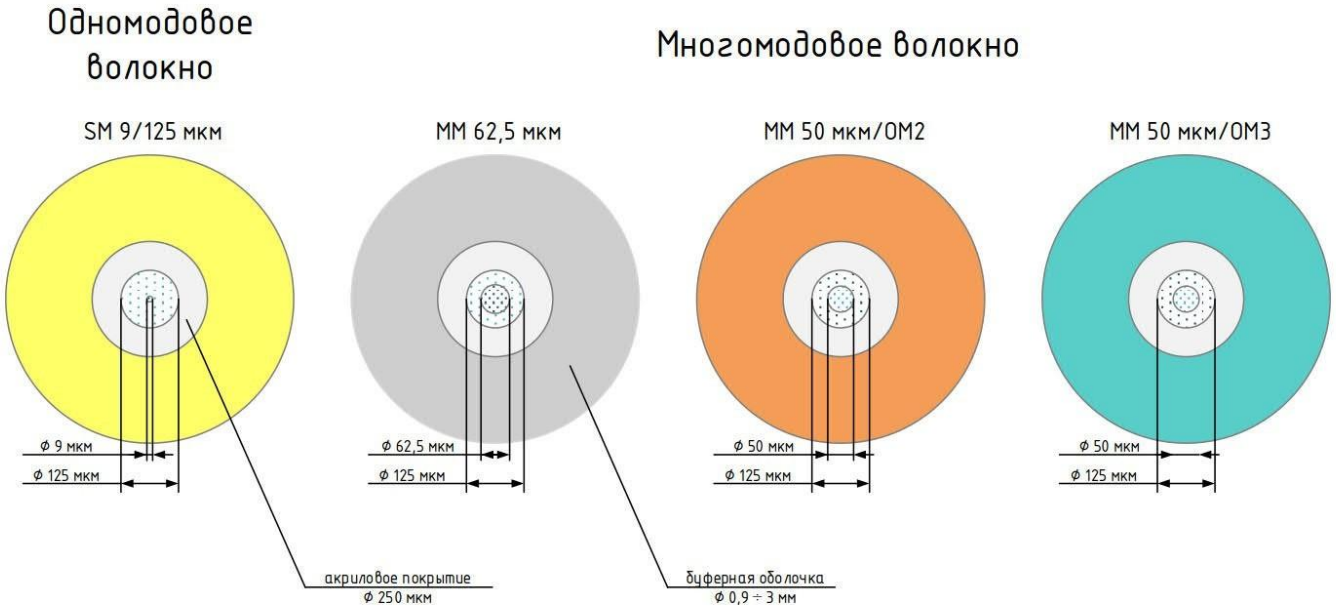
Restricted Mode Launch – режим с ограничением (мод). В этом режиме работы в сердцевину оптического волокна подается ограниченное количество мод (в идеальном представлении – одна). Переполнения сердцевины модами, в отличие от режима OFL, не происходит, что позволяет существенно увеличить расстояние и скорость передачи в многомодовой среде.

Для реализации режима **RML** необходимо использовать лазерные источники излучения, например, VCSEL. На режиме **RML** основана реализация мультигигабитных приложений в многомодовых оптических системах.

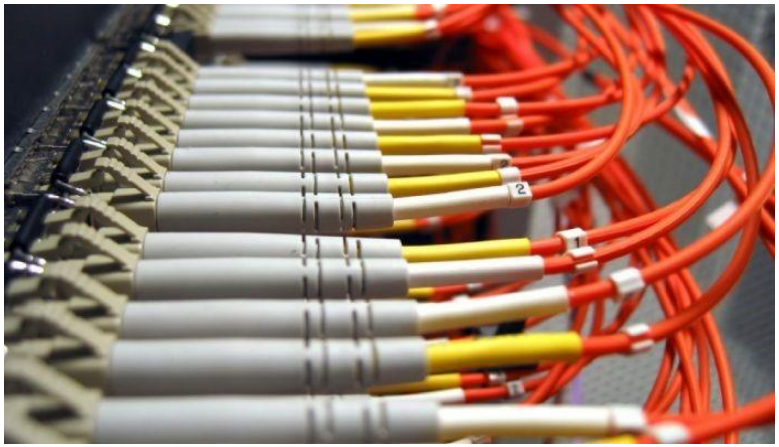
https://ru.au1lib.org/book/2887405/f196ee

Цвет оболочки патч-корда позволяет отличить тип применяемого волокна.

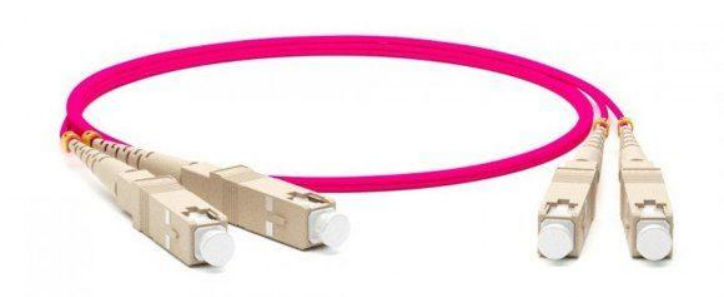
Окраска оболочки должна соответствовать стандарту TIA-598C: желтым цветом обозначается одномод 9/125 мкм, серым – многомод 62.5/125 мкм, оранжевым – многомод 50/125 мкм OM2 и бирюзовым – многомод 50/125 мкм OM3, OM4



Цветовая кодировка буферного покрытия различных видов патч-кордов



ММ-патч-корды категории ОМ2

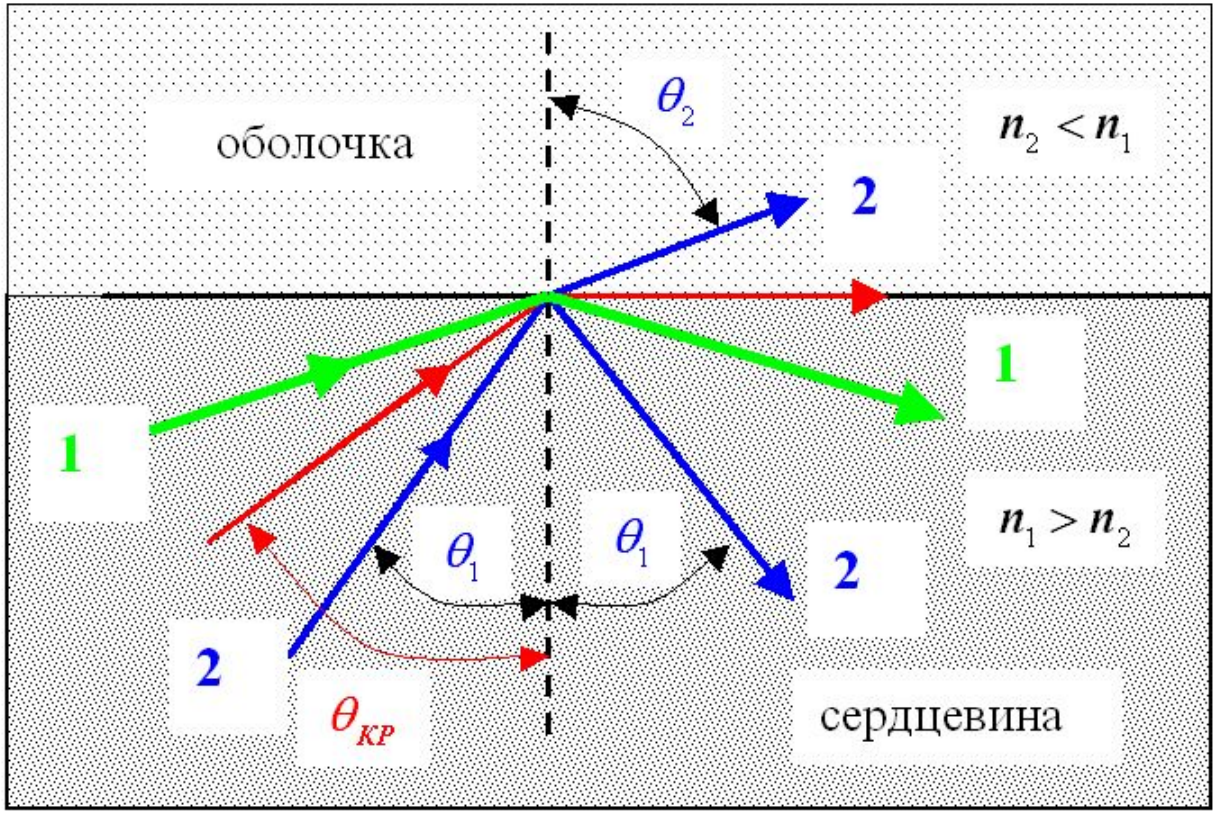


ММ-патч-корды категории ОМ4

ММ-патч-корды категории ОМ3

SM патч-корды (желтые)

Передача электромагнитной энергии по световодам

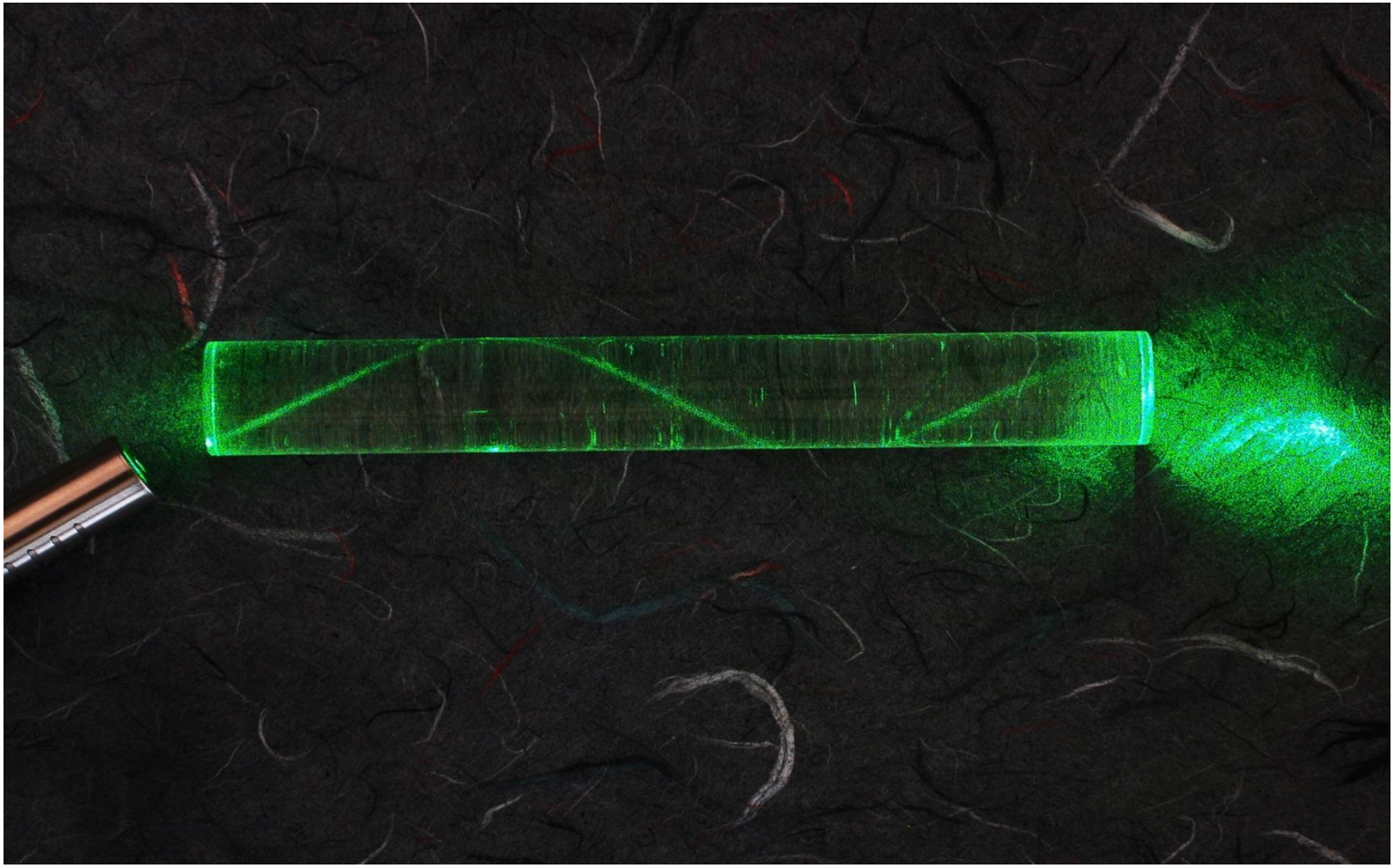


$$n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2)$$

$$\theta_{\text{КР}} = \theta_1 \left(при\, \theta_2 = 90^0 \right) = \arcsin \frac{n_2}{n_1}$$

Передача оптического сигнала по ОВ осуществляется на основе эффекта полного внутреннего отражения

Полное внутреннее отражение



https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b0/Laser_in_fibre.jpg

Параметры и характеристики ОВ

1. Относительная разность показателей преломления

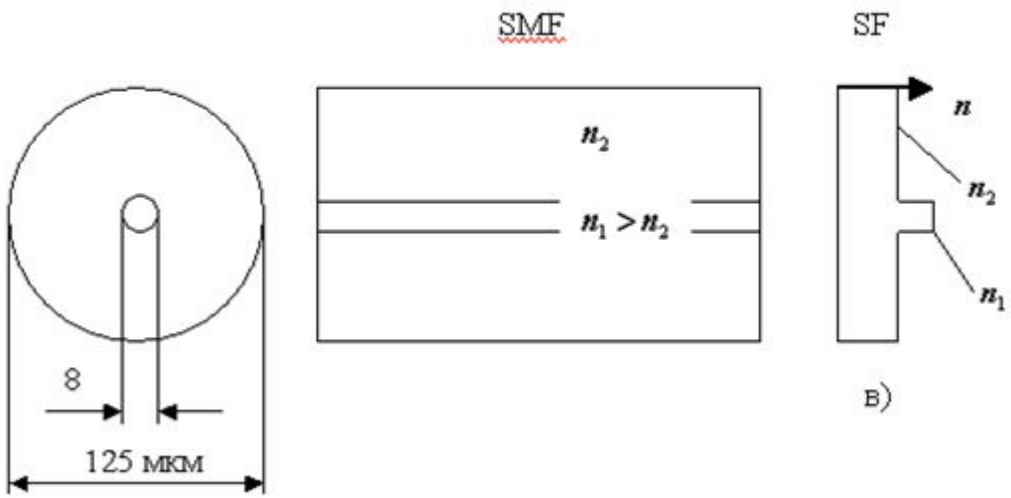
$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}, \%$$

$$\Delta = 0{,}3 - 3\ \%$$

$$\Delta_{эфф} = \frac{n_1(0) - n_2}{n_1(0)}, \%$$

$$n_1 \approx 1{,}467..$$

$$\Delta = 1\ \%$$



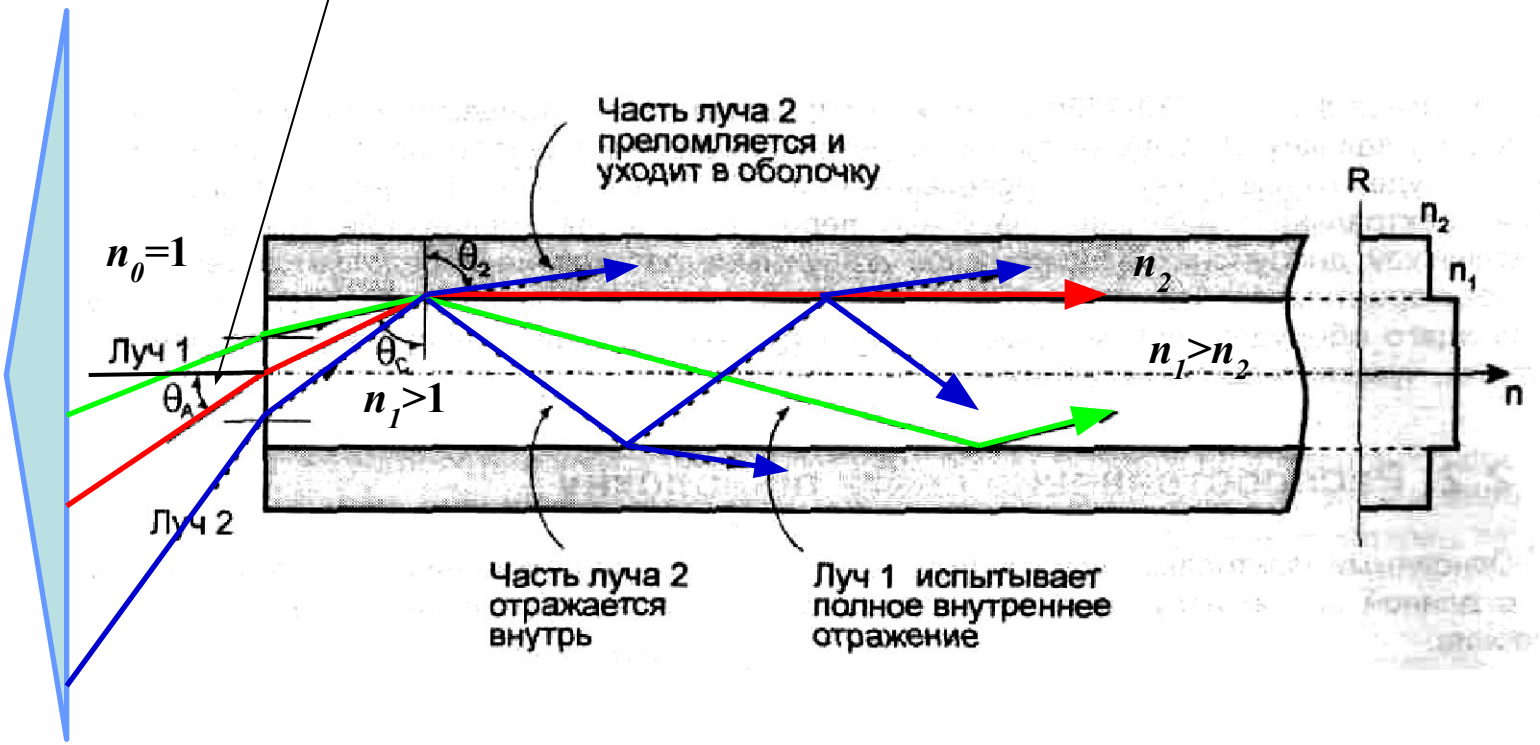
Параметры и характеристики ОВ

2. Числовая апертура ***NA***

Числовой апертурой *NA* называется синус наибольшего угла θ_A, входя под которым, моды (лучи) ещё удерживаются в сердцевине

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

$$NA = 0{,}13 \div 0{,}37$$



излучатель

оптическое волокно

Параметры и характеристики ОВ

3. Диаметр модового поля W_0

Если рассматривать распространение оптического сигнала в волокне не с точки зрения геометрической оптики, а с точки зрения физической оптики, то решение уравнений Максвелла показывает, что амплитуда поля $E(r)$ основной моды HE_{11} в оболочке одномодового волокна не равна нулю и плавно спадает от оси ОВ. Радиальная зависимость близка к гауссовому закону.

Под **диаметром модового поля** W_0 понимают удвоенное расстояние между точкой на оси ОВ, в которой амплитуда поля моды максимальна и точкой, в которой амплитуда поля моды меньше максимального значения в e = 2.718 раз. Диаметр модового поля фактически определяет некоторый виртуальный цилиндр, внутри которого распространяется основная доля оптической мощности вдоль ОВ. Этот параметр нормируется только для одномодовых волокон.

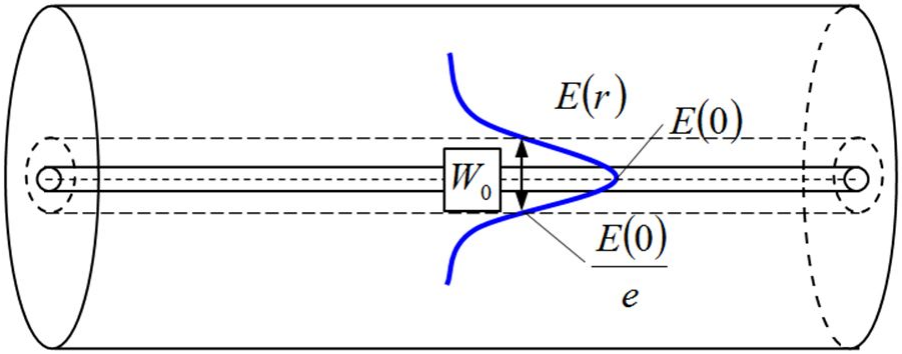


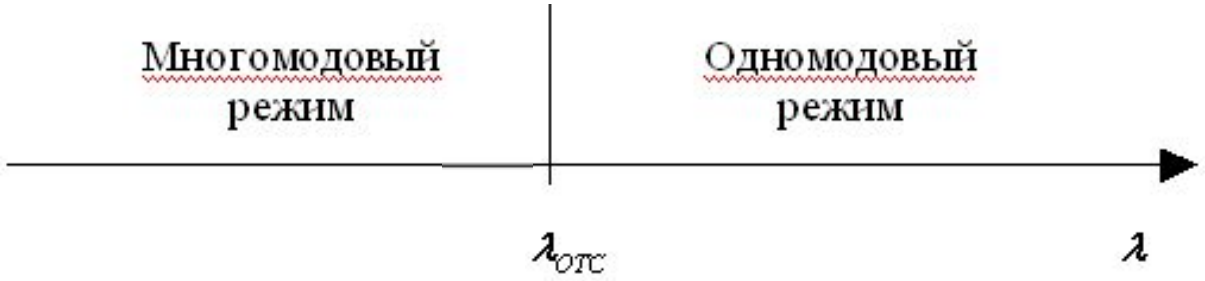
Рис. 3 К определению диаметра модового поля W_0

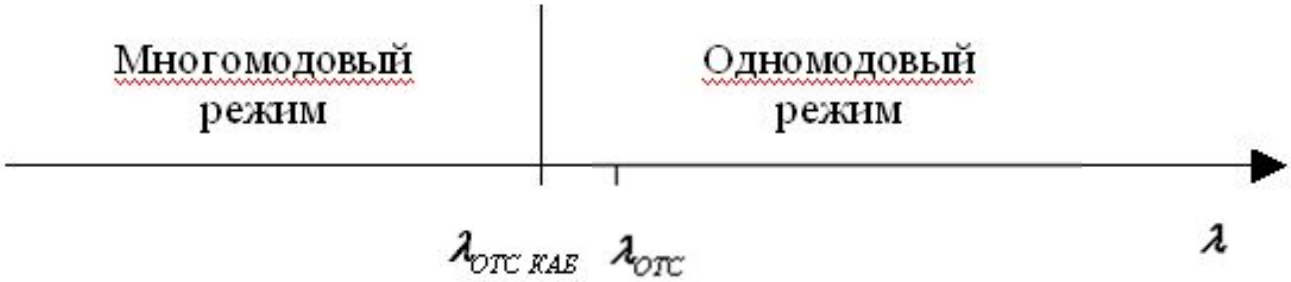
Параметры и характеристики ОВ

Длина волны отсечки (нм) – минимальная длина волны, на которой ОВ еще поддерживает одномодовый режим работы.

Различают длину волны отсечки для прямолинейного ОВ $(\lambda_{отс})$ и инсталлированного оптического волокна $(\lambda_{отс\ каб})$.

Всегда $\lambda_{отс\ каб} < \lambda_{отс}$ и граница одномодового режима для инсталлированного ОВ смещается в область более коротких длин волн.





Параметры и характеристики ОВ

Номенклатура мод низких порядков

Нормированная частота $V = \frac{\pi d}{\lambda_{omc}} NA$	Число одновременно распространяющихся мод N_{mod}	Тип моды
0-2,405	1	$HE_{11,}$
2,405-3.832	4	$HE_{11,}$ H_{01}, E_{01}, HE_{21}
3,0832-5,136	7	$HE_{11,}$ H_{01}, E_{01}, HE_{21}, HE_{12}, EH_{11}, HE_{31}
5,136-5,52	9	. . . . .

При $V >> 1$ количество одновременно распространяющихся мод

$$N_{mod} \approx \frac{V^2}{4} \text{ – в градиентном ОВ}$$

$$N_{mod} \approx \frac{V^2}{2} \text{ – в ступенчатом ОВ}$$

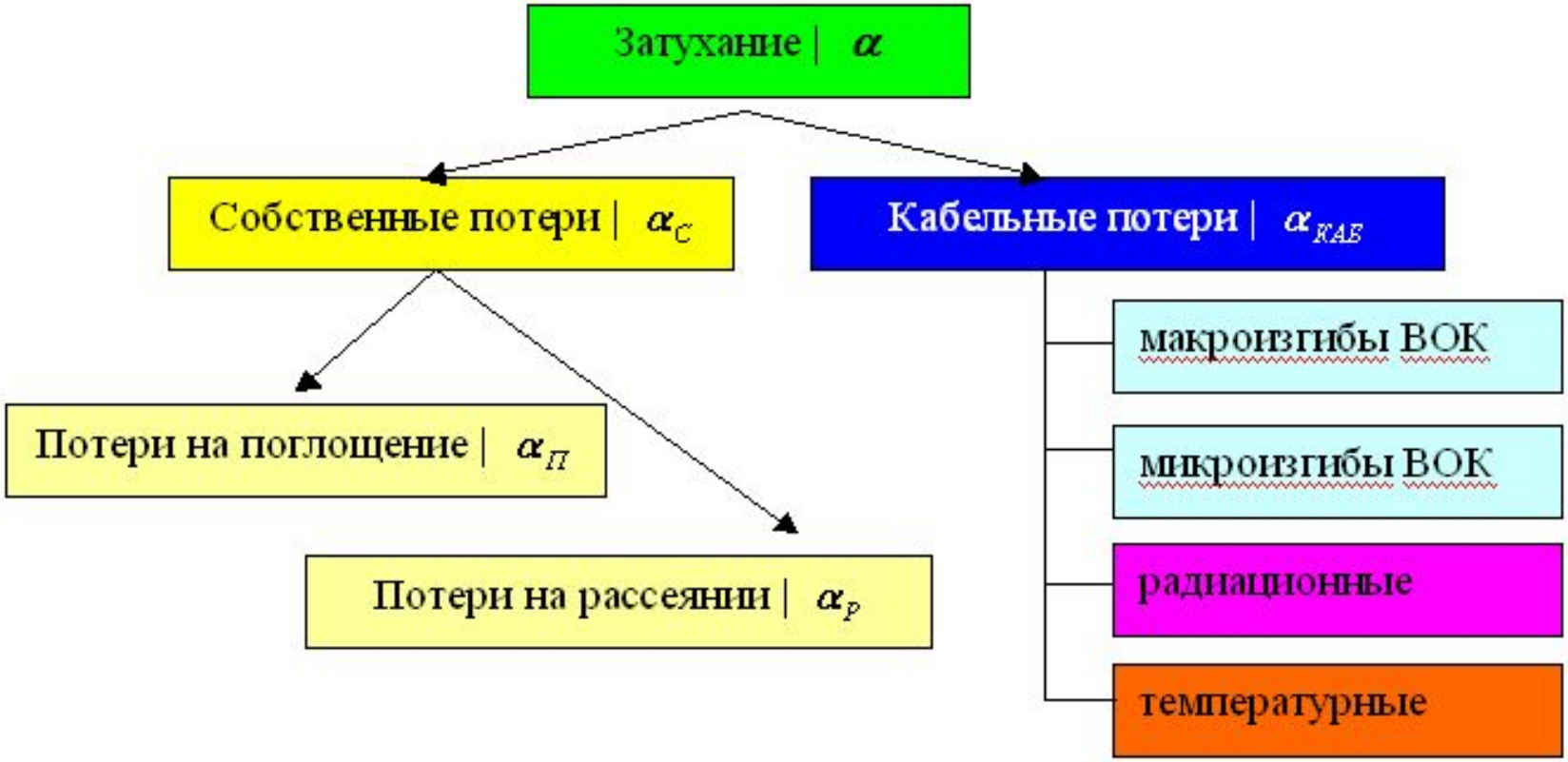
Параметры и характеристики ОВ

Значения основных оптических параметров волокон и нормированной частоты V для различных длин волн

Оптическое волокно				V / N_{mod}		
Название и диаметр	Δ (%)	n_1	NA	1550 нм	1310 нм	850 нм
grad MMF 62,5/125	2,1	1,47	0,28	V=35,46	41,96	64,67 / 1045
grad MMF 50/125	1,25	1,46	0,20	V=20,26 / $N_{мод}$=102	23,98	36,95 / 341
step SMF (SF) 8,3/125	0,36	1,468	0,13	2.187 / 1	2,588 / ?14	3.990 / 7

$$N_{mod} \approx \frac{V^2}{4} \qquad V = \frac{\pi d}{\lambda_{отс}} NA = 2{,}405 \qquad V^* = \frac{\pi d}{\lambda_{отс\ каб}} NA \approx 2{,}6$$

Потери в оптических волокнах



Собственные потери в ОВ характеризуются коэффициентом удельных километрических потерь α_c (размерность дБ/км). Параметр измеряется для прямолинейного волокна и характеризует само волокно.

В процессе изготовления, инсталляции и эксплуатации волоконно-оптических кабелей возникают дополнительные ***кабельные потери***.

Собственные потери в оптических волокнах

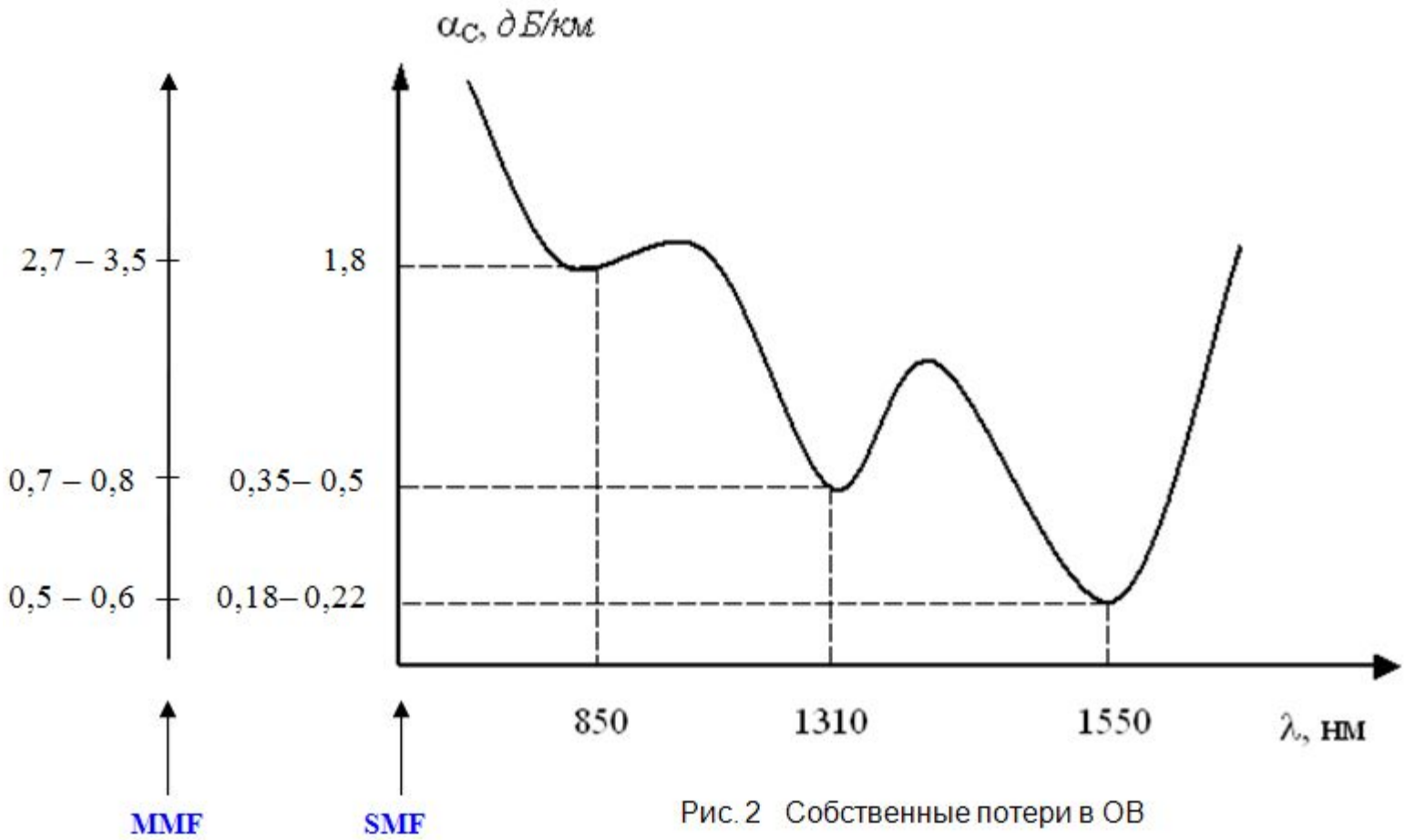


Рис. 2 Собственные потери в ОВ

График потерь в ОВ

Собственные потери в оптических волокнах

Одним из понятий в ВОЛС является понятие окна прозрачности. Это область в спектре частот светового излучения, в которой затухание в оптическом волокне минимально. Именно на эти длины волн светового излучения ориентируются при производстве приемо-передатчиков ВОЛС. Первое окно прозрачности наблюдается на длине волны 850 нм, второе соответствует длине волны 1310 нм, третье – на длине волны 1550 нм, на которой затухание ОВ минимально.

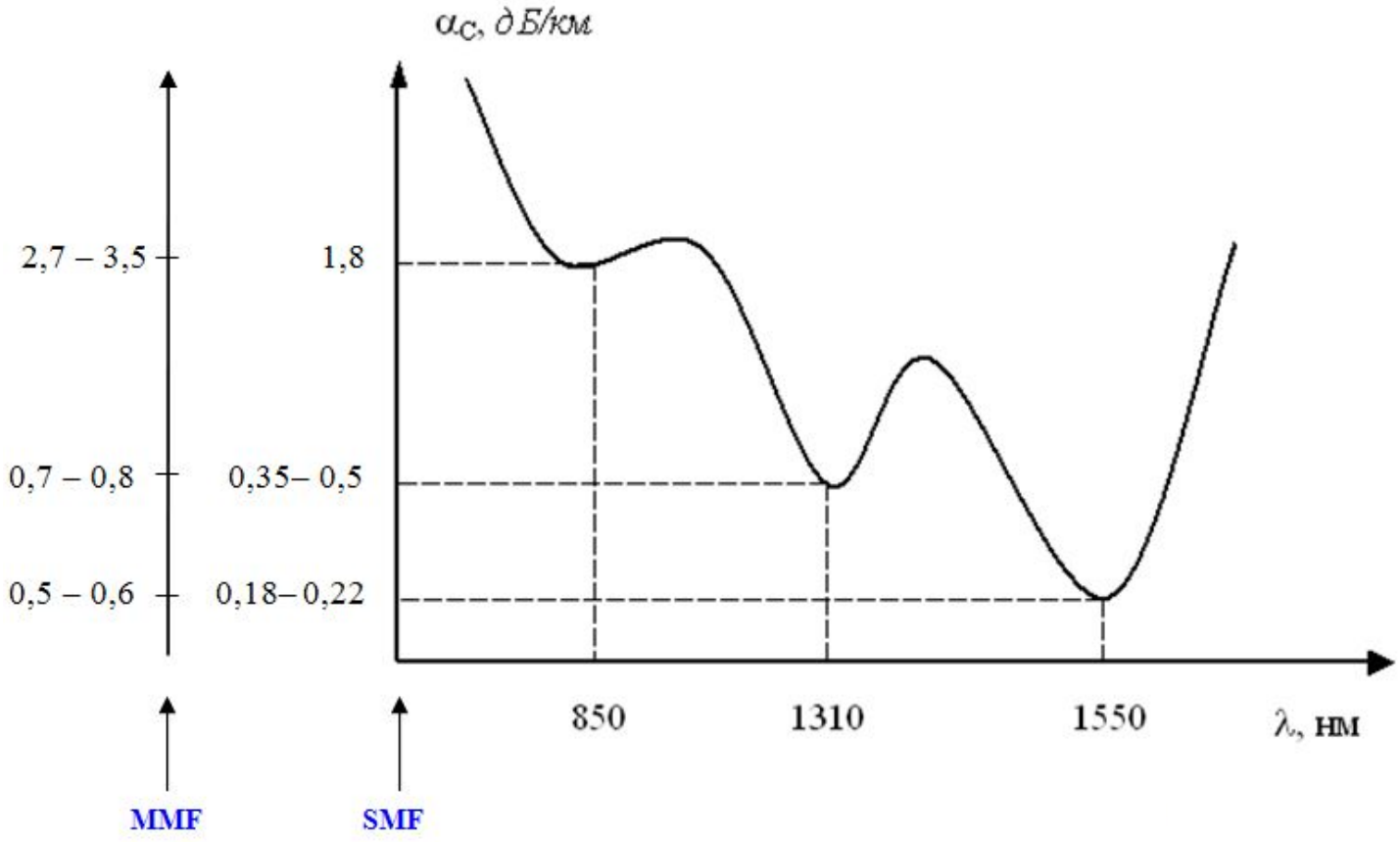


Рис. 4 График зависимости собственных потерь в оптическом волокне

Кабельные потери

Микроизгибы (случайные небольшие изгибы оптического волокна с размахом менее 1 мкм) могут возникать в процессе наложении защитного покрытия и изготовления волоконно-оптических кабелей.

Макроизгибы – изгибы оптического волокна в результате монтажа кабельной линии.

Кабельные потери

Потери на макроизгибах обусловлены изменением геометрии луча при изгибах волоконно-оптического кабеля. На изгибе волокна угол падения луча на границу раздела сред сердцевина–оболочка уменьшается и становится меньше критического.

Нарушается условие полного внутреннего отражения, при этом возникает преломленный луч, который поступает в оболочку. В результате этого значительная часть распространяемого по волокну света не только выходит за пределы сердцевины, но и вовсе выходит из волокна.

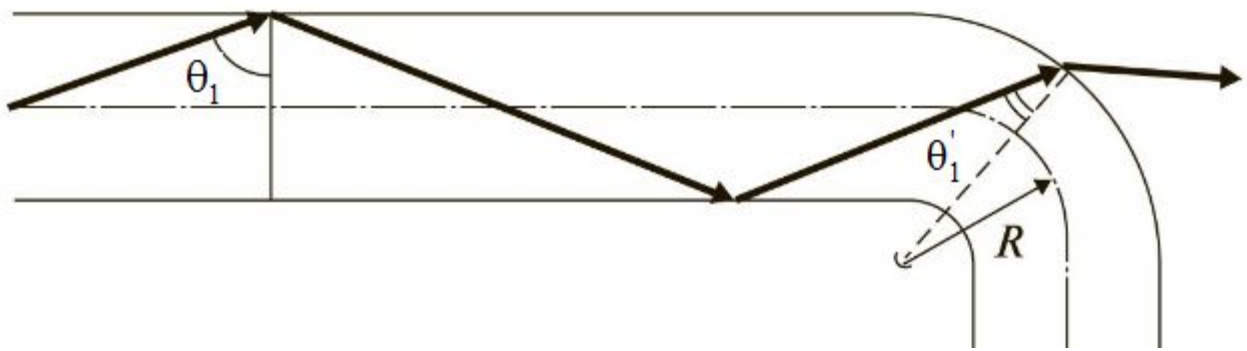
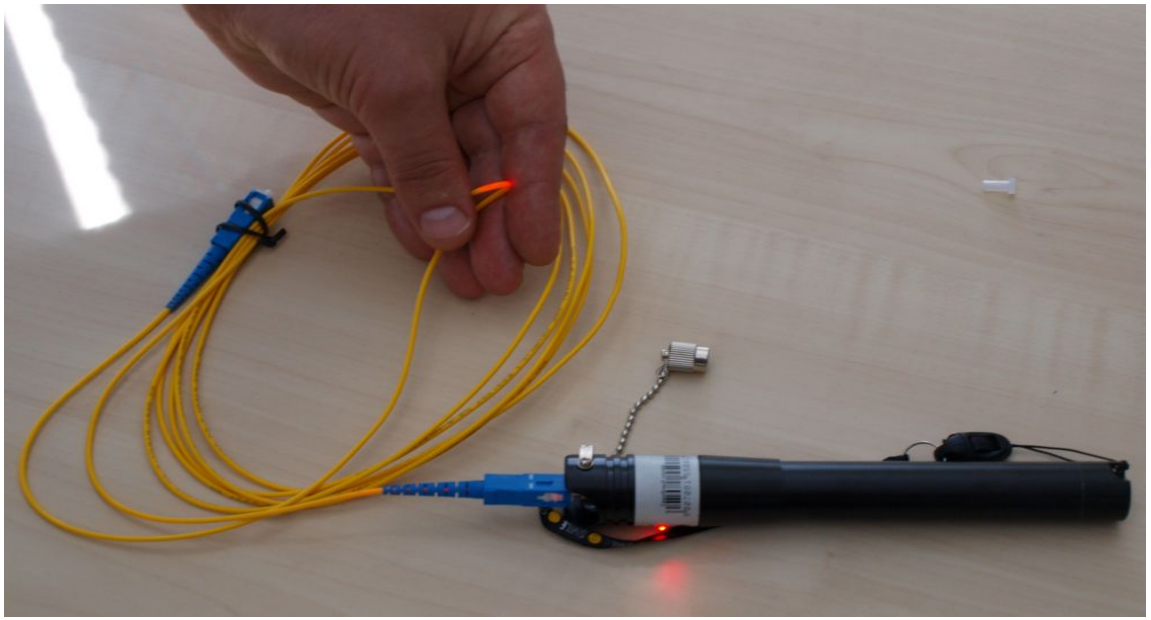


Рис. 5 Выход луча света из оптического волокна при макроизибе

Диагностика макроизгиба



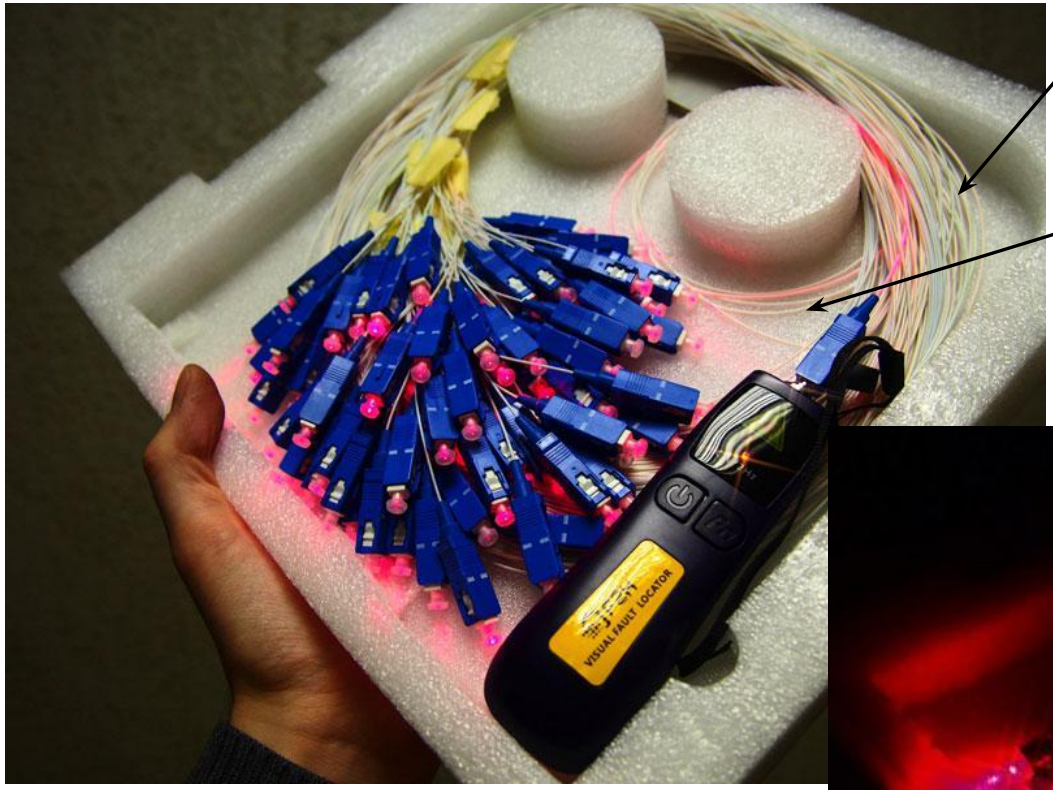
В связи с тем, что рабочие длины волн 850 нм – 1550 нм лежат в невидимом человеческому глазу диапазоне, то зафиксировать визуально макроизгиб на работающей сети невозможно. Диагностируют макроизгибы путем подачи в волокно сигнала в видимом диапазоне (650 нм – красный свет). В этом случае в месте макроизгиба наблюдается красное пятно, которое свидетельствует о выходе части излучения за пределы оптического волокна.

Потери на макроизгибе могут достигать 2 дБ и более, причем они **разные на разных длинах волн**.

Чем на большей длине волны идет передача, тем больше потери на макроизгибе. К примеру, при одинаковом изгибе, на длине волны 1550 нм будут наблюдаться большие потери, чем на длине волны 1310 нм.

ВИДЕО Как отличить надлом оптического волокна от макроизгиба? (2:21)

Проверка оптического сплиттера с помощью источника красного излучения



Волокно с большим радиусом изгиба не светится, а это означает, что нет потерь на изгибе ОВ.

На фото видно, что даже при изгибе с радиусом 3 – 4 см оптическое волокно светится, а это означает, что имеют место **потери на макроизгибе ОВ**.

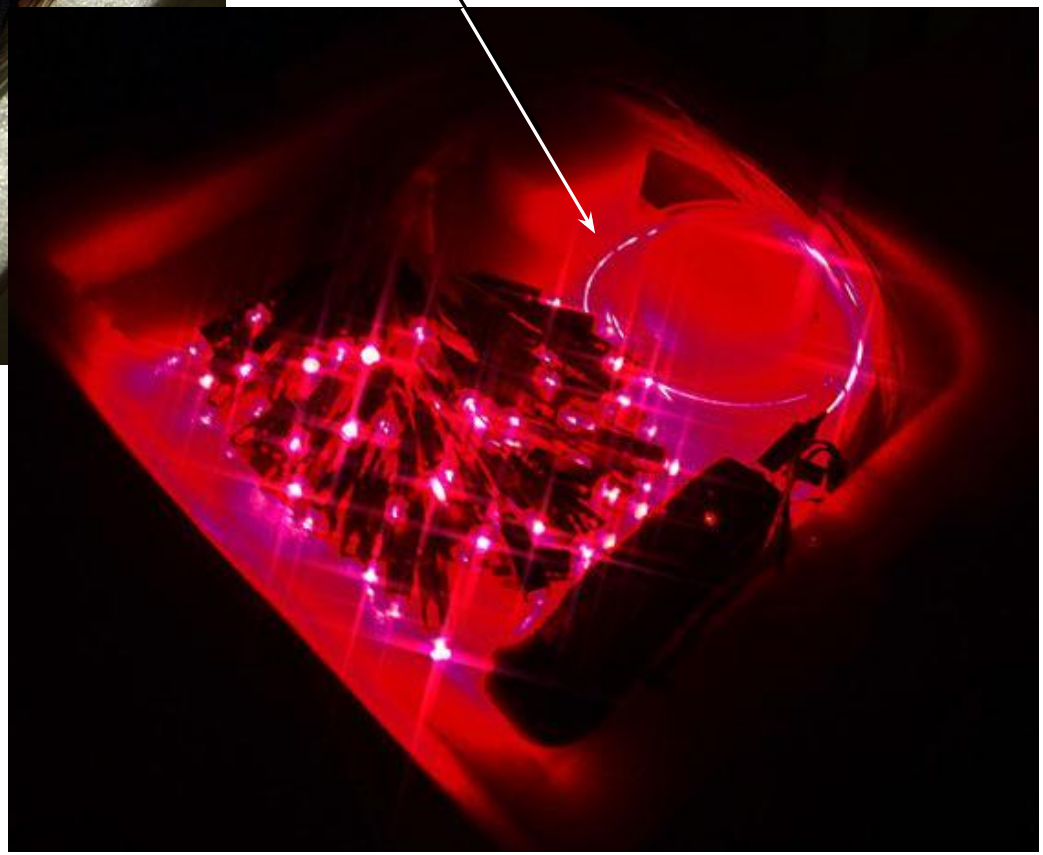


Рис.6 Пример проявления потерь на макроизгибе

В спецификации на оптический кабель (ОК) всегда указывается предельно допустимый радиус изгиба кабеля – обычно это 10 – 20 диаметров ОК, а также минимально допустимый радиус изгиба волокон при монтаже и эксплуатации.

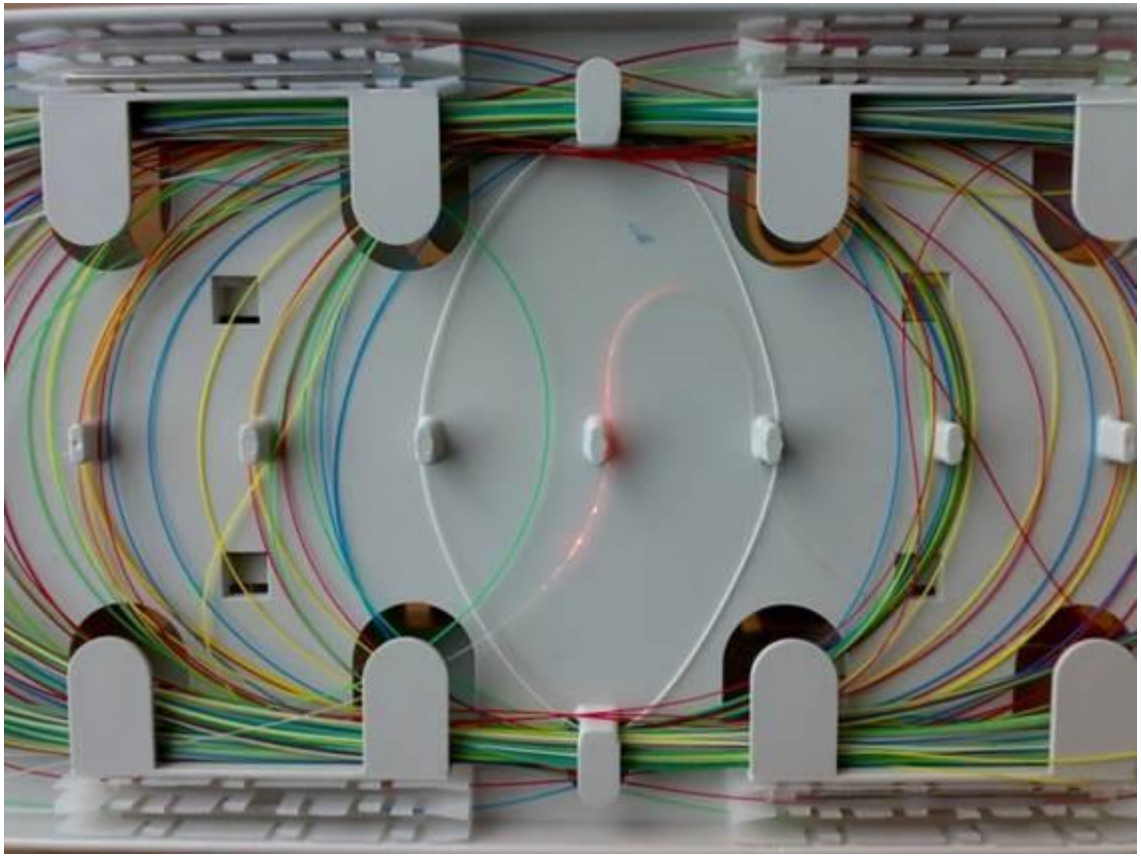


Рис. 7 Макроизгиб волокна в сплайс кассете

Чаще всего макроизгиб наблюдается в сплайс кассетах оптических кроссов и муфт, а также при прокладке абонентского кабеля (drop cabel), когда он прокладывается с нарушением технологии и жестко изгибается. Макроизгибы также возникают при укладке запасов кабеля в телекоммуникационные шкафы, когда пренебрегают минимально рекомендованным радиусом изгиба оптического кабеля.

Кабельные потери

Воздействие радиации приводит к постепенной деградации оптического волокна и росту потерь. При высоких уровнях ионизирующих излучений волокно мутнеет. Отечественная промышленность выпускает специальное радиационно-стойкое волокно (пример).

Воздействие низких температур также негативно сказывается на потерях в ОВ. Деформации оболочки оптического кабеля и других его конструктивных элементов при температурах ниже -40^{0}С приводят к заметному росту потерь в ОВ.

Расчет полных потерь в оптических волокнах

Полные потери в линии – сумма потерь в ОВ, коннекторах и стыках строительных длин ОК:

$$П_{\Sigma} = \alpha L + nП_{К} + (N_{стр} - 1)П_{ст}, \text{ дБ}$$

где α – удельные километрические потери в ОВ, дБ/км;

L – длина трассы, км;

n – количество коннекторов;

$П_{К}$ – потери на один коннектор, дБ;

$N_{стр} = \dfrac{L}{L_{стр}}$ – количество строительных длин ОК на линии;

$L_{стр}$ – строительная длина ОК, км;

$П_{ст}$ – потери на одном стыке строительных длин ОК(сварное соединение), дБ.

Предполагается, что потери на макро- и микроизгибах ОВ отсутствуют.

Расчет мощности, введенной в ОВ

Мощность оптического сигнала, которая будет распространяться вдоль волокна (полезная введенная мощность) $P_{ОВ}$:

$$P_{ОВ} = \frac{m+1}{2} \cdot \frac{S^*_{ОВ}}{S_{изл}} \cdot NA^2 \cdot P_{изл},$$

где m – параметр, характеризующий пространственную диаграмму направленности облучателя (ДН);

$S_{изл}$ – площадь излучающей площадки излучателя;

$S^*_{ОВ}$ – площадь сердцевины волокна, перекрываемая излучателем (Рис. 1);

NA – числовая апертура оптического волокна;

$P_{изл}$ – полная мощность излучения излучателя.

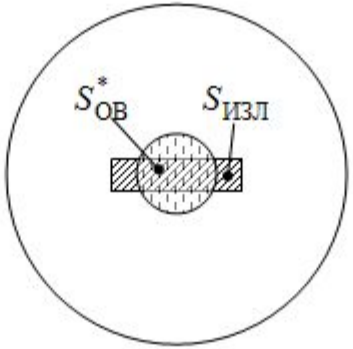


Рис. 8 - К расчету мощности, введенной в оптическое волокно

Диаграмма направленности (ДН) типовых излучателей, используемых в оптике, хорошо аппроксимируется формулой:

$$I(\theta) = \cos^m \theta .$$

Светоизлучающие диоды (СИД) имеют широкую ДН ($m = 2 \div 2{,}5$), лазерные диоды (ЛД) – узкую ($m = 7 \div 8$). Поэтому лазерные диоды позволяют ввести большую долю собственной мощности как полезную в сердцевину волокна.

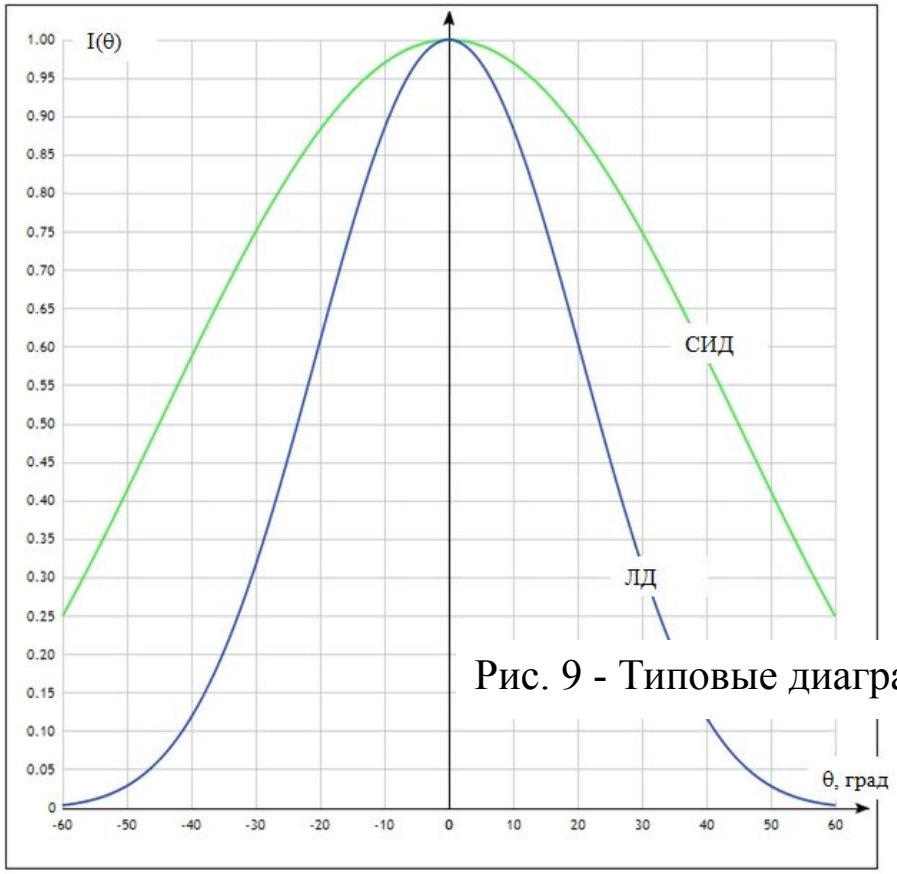


Рис. 9 - Типовые диаграммы направленности СИД и ЛД

В оптике уровень мощности принято оценивать в логарифмических единицах дБм (децибел на милливатт):

$$P_{\text{ОВ}}[дБм] = 10\log\frac{P_{\text{ОВ}}[мВт]}{1\,[мВт]}.$$

Уровень мощности в 1 мВт в оптике принят за базовый и ему соответствует 0 дБм.

Таблица 1 – Перевод дБм в мВт

P, дБм	P, мВт
0	1 мВт
-10	0,1 мВт
-20	10 мкВт
-30	1 мкВт
-40	0,1 мкВт
10	10 мВт
20	100 мВт
27	0,5 Вт
30	1 Вт
33	2 Вт

ПРИМЕР

Двухволоконный приемо-передающий оптический модуль с форм-фактором SFP+ для 10G Ethernet. Предназначен для работы с одномодовым оптическим волокном (Single mode fiber, SMF), оптический бюджет 26 дБ, duplex LC коннектор.

Рис. 10 - Приемо-передаюший оптический модуль SFP+

Технические характеристики

Рабочая длина волны Tx, нм	1550
Тип лазера	EML
Мощность излучения, dBm	1.5..5
Тип приемника	APD
Чувствительность приемника, dBm	-24.5
Максимальная допустимая мощность на входе приемника, dBm	-8
Максимальная дальность, км Поддержка DDMI	100 +
Оптический бюджет, дБ	26
Поддержка горячей замены	+
Тип коннектора	LC
Диапазон рабочих температур, С	0..+70

Таблица 2 – Типовые уровни введенной мощности в ОВ

Тип излучателя	$P_{ОВ}$, дБм	
	MMF	SMF
СИД		
ЛД	2 – 5	0 – 2

Затухание оптического сигнала (потери в линии) – величина, показывающая во сколько раз мощность сигнала на выходе линии связи $P_{ВЫХ}$ меньше мощности сигнала на входе этой линии $P_{ВХ}$. Затухание выражается в дБ (децибел) и определяется по следующей формуле:

$$П[дБ] = -10\log\frac{P_{ВЫХ}[мВт]}{P_{ВХ}[мВт]}.$$

В логарифмической шкале:

$$П[дБ] = P_{ВХ}[дБм] - P_{ВЫХ}[дБм].$$

Затухание оптического сигнала (потери в линии) – величина, показывающая во сколько раз мощность сигнала на выходе линии связи $P_{\text{вых}}$ меньше мощности сигнала на входе этой линии $P_{\text{вх}}$. Затухание выражается в дБ (децибел) и определяется по следующей формуле:

$$П[дБ] = -10\lg\frac{P_{\text{вых}}[мВт]}{P_{\text{вх}}[мВт]}.$$

В логарифмической шкале:

$$П[дБ] = P_{\text{вх}}[дБм] - P_{\text{вых}}[дБм].$$

Для расчета мощности на выходе оптической линии получаем удобную формулу

$$P_{\text{вых}}[дБм] = P_{\text{вх}}[дБм] - П_{\Sigma}[дБ],$$

ЗАДАЧА

Оптическая линия длиной 5 км состоит из 5 строительных длин ВОК по 1 км. Удельные километрические потери в ОВ α=3,5 дБ/км. Потери на каждом стыке строительных длин ВОК 1,5 дБ. Уровень введенной оптической мощности в ОВ 200 мкВт. Чувствительность приемника $Ч_{ПР}$ = -32 дБм.

Построить график изменения оптической мощности вдоль ОВ. Определить запас по бюджету мощности (ЗБМ) на входе приемника.

РЕШЕНИЕ

Уровень введенной мощности в дБм:

$$P_{ОВ} = 10\lg\frac{0,2}{1} \approx -7 \text{ дБм.}$$

Если бы оптическая линия была реализована на ВОК со строительной длиной 5 км, то потери бы в линии составили:

$$П = \alpha L = 3,5 \cdot 5 = 17,5 \text{ дБ.}$$

В этом случае график изменения оптической мощности вдоль ОВ в логарифмической шкале представлял бы собой линейную зависимость от расстояния:

$$P(L) = P_{ОВ} - \alpha L$$

и уровень мощности на выходе линии составил бы

$$P_{ВЫХ} = P_{ОВ} - \alpha L = -7 - 17,5 = -24,5 \text{ дБм.}$$

Запас по бюджету мощности на входе приемника

$$ЗБМ = P_{ВЫХ} - Ч_{ПР} = -30{,}5 - (-32) = 1{,}5\ дБ$$

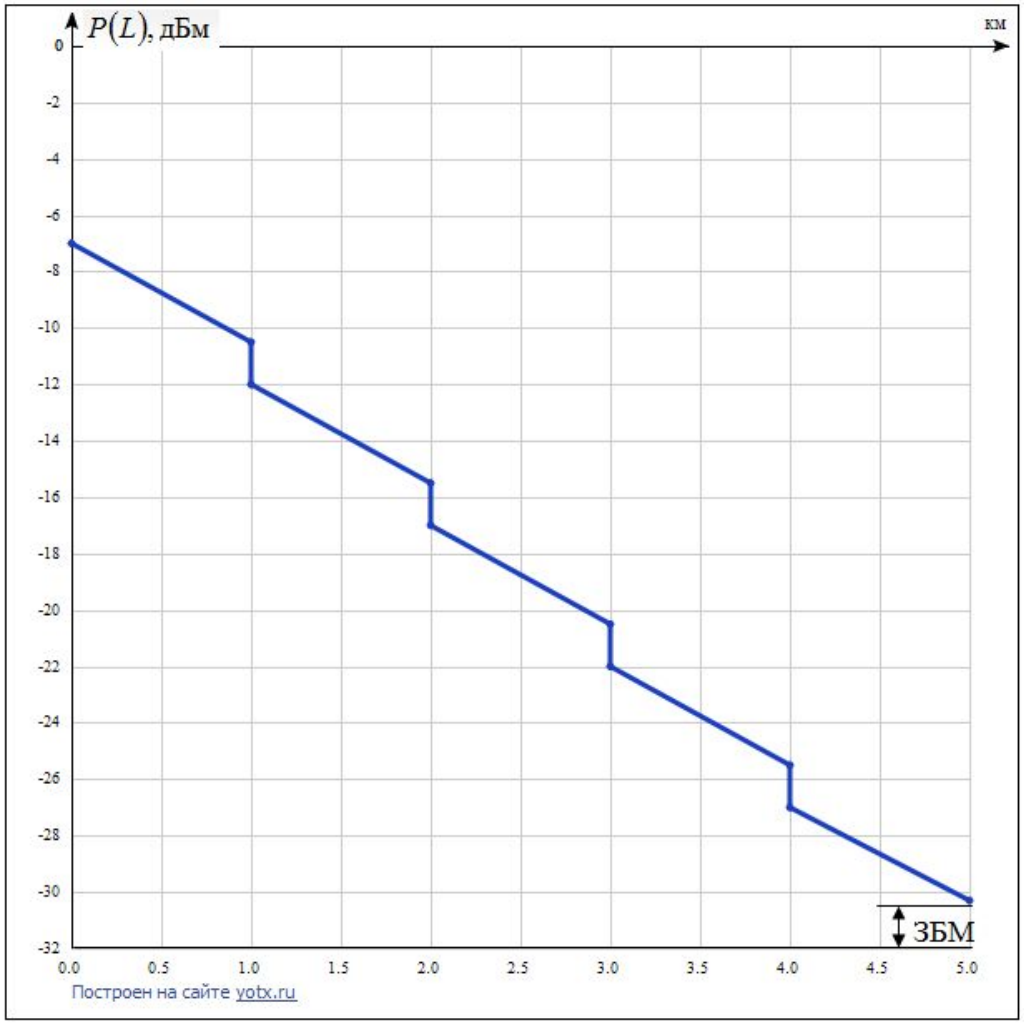


Рис. 11 - График изменения оптической мощности вдоль ОВ
(графики подобного типа удобно строить на ресурсе http://www.votx.ru/)

ВОПРОСЫ ?