

Тема 3

Оптические волокна

Содержание темы

- Классификация оптических волокон.
- Структура оптического волокна.
- Физические принципы работы оптического волокна.
- Числовая апертура.
- Окна прозрачности оптического волокна.
- Затухание в оптических волокнах.
- Дисперсия в оптических волокнах.
- Нелинейные эффекты в оптических волокнах.

Классификация ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

Оптическое волокно (ОВ) – диэлектрический волновод оптического диапазона частот, которое представляет собой цилиндрическую нить (волокно), изготовленную из материала, прозрачного для применяемого оптического излучения.

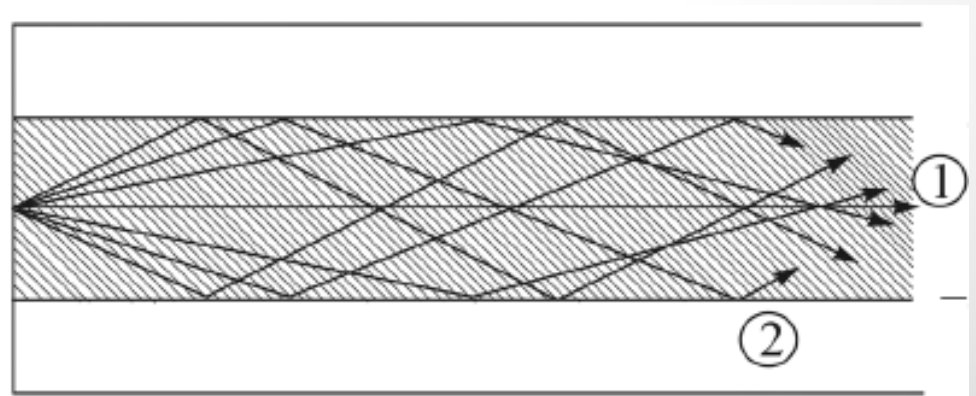
Одномодовое волокно				Многомодовое волокно (MMF)	
стандартное (SMF)	со смещённой дисперсией (DSF)	с минимизацией затухания (CSF)	с ненулевой смещённой дисперсией (NZDSF)	50 / 125	62,5 / 125
ITU-T G. 652	ITU-T G. 653	ITU-T G. 654	ITU-T G. 655	ITU-T G. 651	IEC 60793-2

Классификация ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

Если диаметр сердечника **много больше** длины волны оптической несущей, то импульс света, распространяющийся в нем, состоит из многих составляющих, направляемых в отдельных модах по оптическому волокну (ОВ).

Каждая мода возбуждается на входе световода под своим определенным углом ввода и направляется по сердечнику по своей траектории.

Такой тип ОВ называется **многомодовым (Multi Mode Fiber, MMF)**.



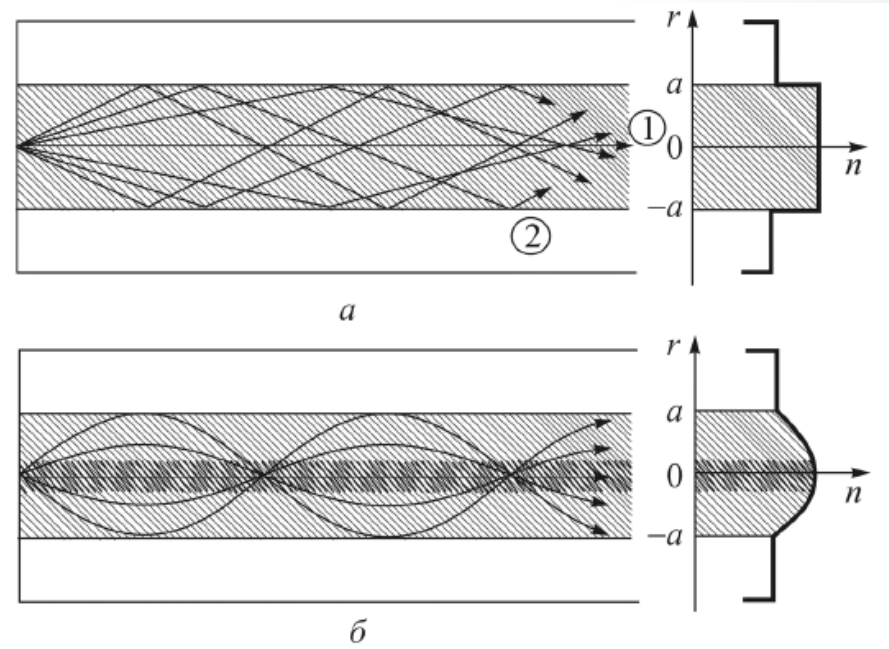
Классификация ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

Под **модой** подразумевается вид траектории, вдоль которой может распространяться свет в оптическом волокне.

а) многомодовое волокно со ступенчатым профилем (диаметр сердечника равен 50 мкм);

б) многомодовое волокно с градиентным профилем (диаметр сердечника равен 50 или 62,5 мкм);

Моды проходят **разные расстояния** оптического пути и поэтому приходят на выход ОВ в разное время.



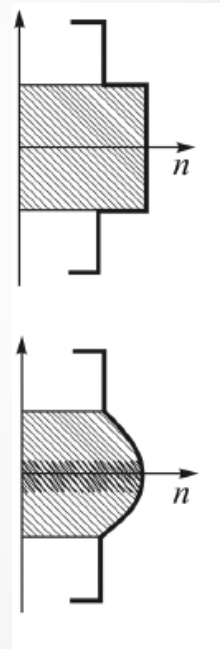
Классификация ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

Профиль – это распределение показателя преломления оптического волокна вдоль диаметра его поперечного сечения.

Показатель преломления определяется как отношение скорости распространения света в вакууме (c) к его скорости распространения в среде (v):

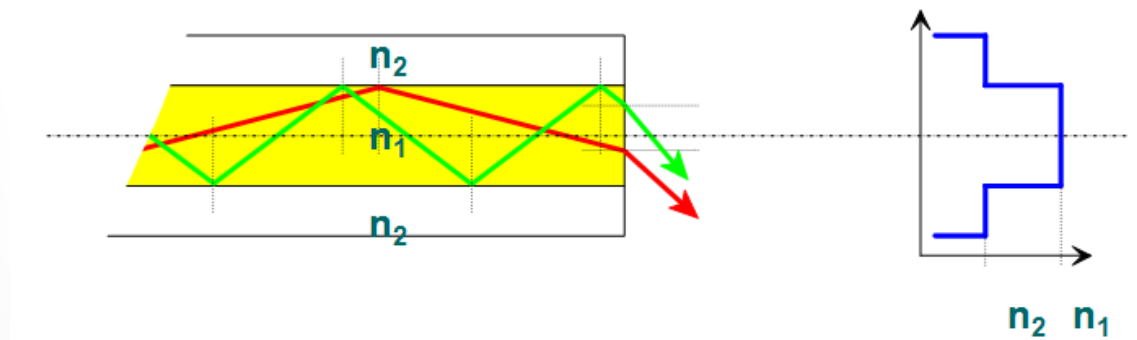
$$n = c/v.$$

Показатель преломления **воздуха** равен 1,000292, **воды** – 1,334, **алмаз** – 2,42.



Классификация ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

Многомодовые ОВ со **ступенчатым профилем** показателя преломления характеризуются искажениями, которые обусловлены дисперсией времени задержки отдельных мод, в результате чего, по мере прохождения по ОВ короткий световой импульс уширяется во времени.



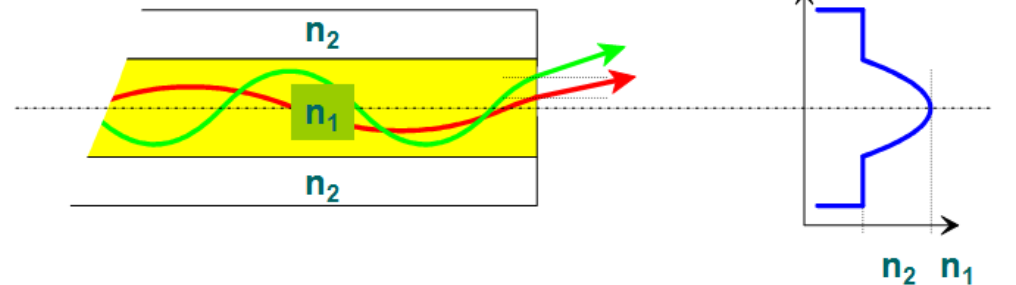
Это является недостатком для оптических систем передачи информации, так как **уменьшает скорость передачи** и **полосу пропускания**.

Классификация ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

В многомодовых ОВ с **градиентным профилем** показателя преломления лучи света проходят по винтообразным спиральным траекториям.

Лучи **непрерывно преломляются**, и поэтому их направление распространения меняется, за счет чего они распространяются по волновым траекториям.

Благодаря меньшему показателю преломления в отдалении от оси ОВ лучи, проходящие большее расстояние, распространяются быстрее.

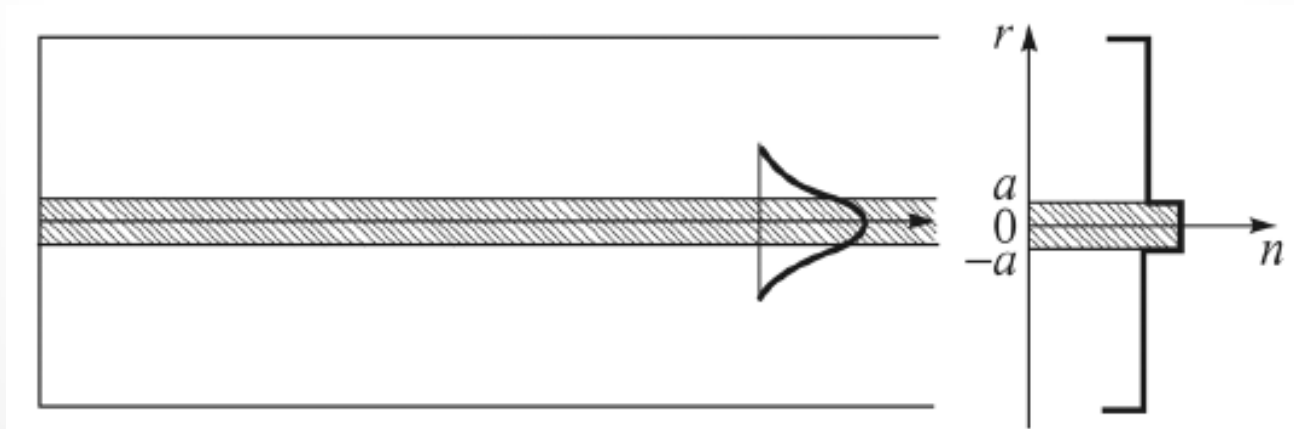


В результате различие временных задержек разных лучей почти полностью исчезает.

Классификация ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

Искажений, которые характерны для многомодовых ОВ, можно избежать, если подобрать структурные параметры ОВ таким образом, чтобы в нем распространялась **одна единственная – основная мода**.

Такие волокна называются **одномодовыми (Single Mode Fiber, SMF)**.



Классификация ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

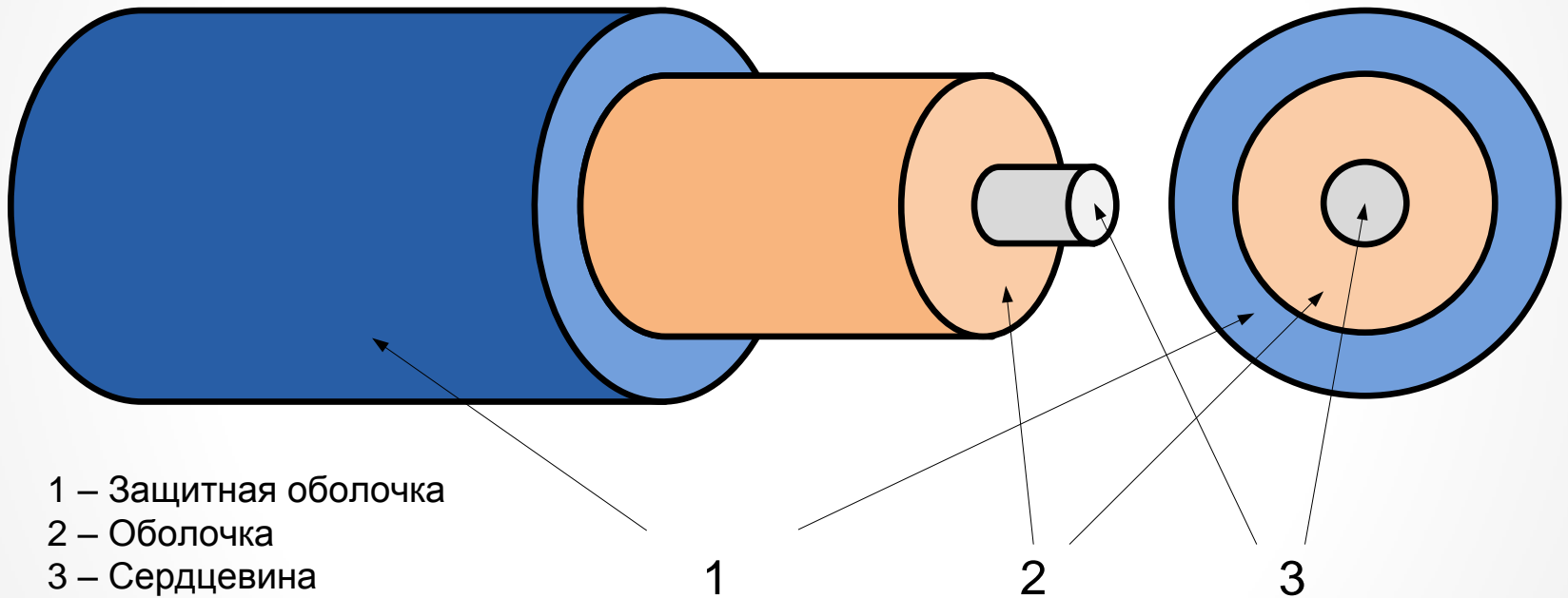
При стыковке одномодовых ОВ между собой важную роль играет **диаметр модового поля**.

В многомодовых ОВ размер сердцевины принято оценивать диаметром, в одномодовых волокнах применяется понятие диаметра модового поля.

Это связано с тем, что энергия основной моды в одномодовых ОВ распространяется **не только в сердцевине**, но и частично **в оболочке**, захватывая ее приграничную область.

Поэтому **диаметр модового поля** более точно **оценивает размеры поперечного распределения энергии основной моды**.

Структура оптического волокна



Физические принципы работы ОВ

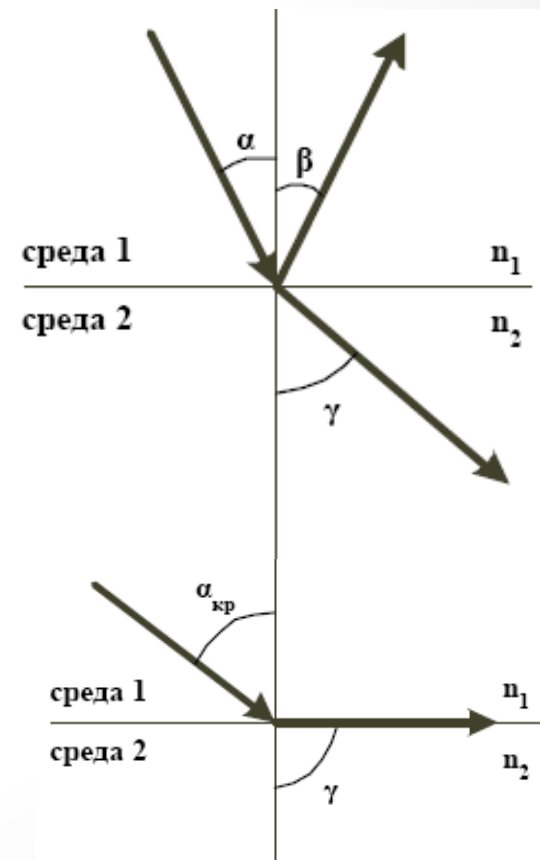
В соответствии с законом **Снеллиуса** углы падения α , отражения β и преломления γ связаны следующими соотношениями:

$\alpha = \beta$ (закон отражения);

$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \gamma$ (закон преломления).

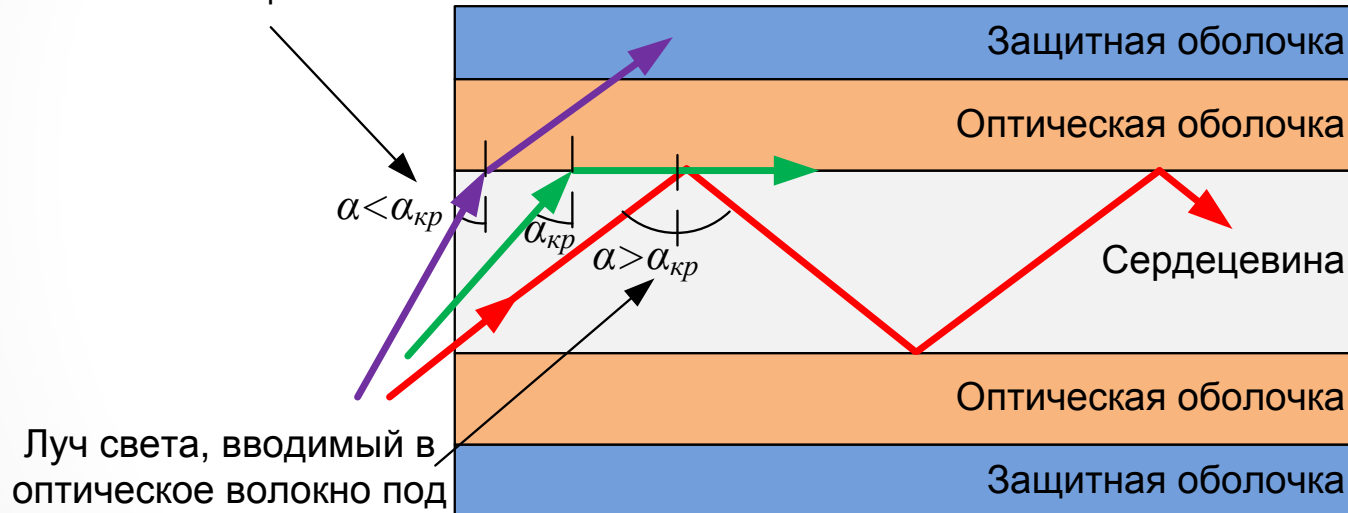
Угол падения, при котором имеет место явление полного внутреннего отражения, называется критическим углом $\alpha_{кр}$.

$$\sin \alpha_{кр} = \frac{n_2}{n_1}$$



Физические принципы работы ОВ

Луч света, вводимый в оптическое волокно под углом, меньшим критического, поглощается оболочкой

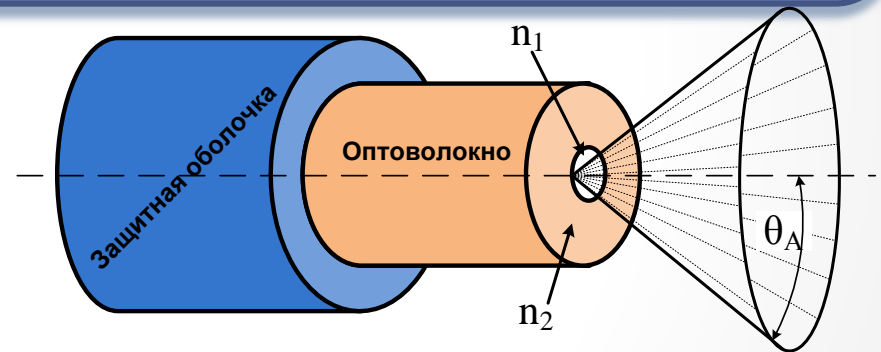


Луч света, вводимый в оптическое волокно под углом, большим критического, распространяется за счет явления полного внутреннего отражения

Числовая апертура ОВ

Числовая апертура оптического волокна (**NA**) характеризуется углом θ_A между оптической осью и одной из образующих светового конуса лучей, падающих в торец ОВ, и для которых в дальнейшем выполняется условие полного внутреннего отражения.

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$



Для **градиентного волокна** с параболическим профилем показателя преломления локальная числовая апертура определяется выражением:

$$NA = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

Числовая апертура ОВ

Большое значение NA означает большое значение θ_A , при этом больше световой энергии будет сконцентрировано в волокне, что приведет к сохранению большего количества мод в волокне.

Число мод для **многомодового волокна со ступенчатым профилем:**

$$M = \frac{1}{2} \left(\frac{\pi \cdot d \cdot NA}{\lambda} \right)^2$$

Число мод для **многомодового волокна с градиентным профилем:**

$$M = \frac{1}{4} \left(\frac{\pi \cdot d \cdot NA}{\lambda} \right)^2$$

где d – диаметр сердечника ОВ;
 NA – числовая апертура ОВ.

Окна прозрачности оптического волокна

При распространении по волокну оптические сигналы теряют свою мощность.

Это происходит из-за действия двух причин:

- **поглощения света;**
- **рассеяния света.**

Окна прозрачности оптического волокна

Поглощение света связано со свойствами материала и с рабочей длиной волны.

В зависимости от длины волны различают поглощение в:

- **ультрафиолетовом** диапазоне (становится значительным на длинах волн до 1400 нм);
- **инфракрасном** диапазоне (становится значительным на длинах волн свыше 1500 нм).

Кроме них в оптическом волокне существует также поглощение, определяемое **примесями в материале волокна** (наибольший вклад в величину затухания дают **примеси гидроксильной группы OH**).

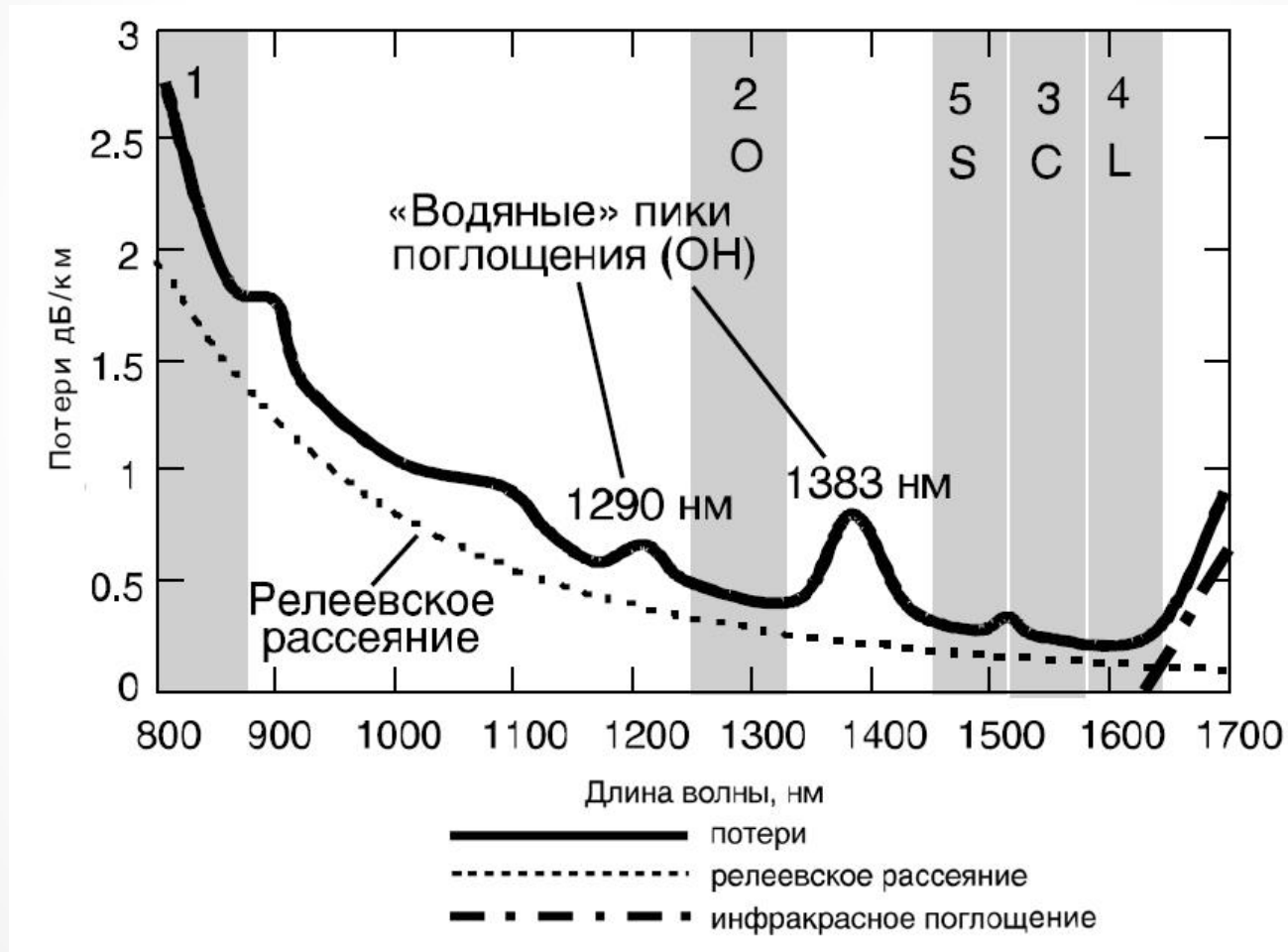
Окна прозрачности оптического волокна

Релеевское рассеяние – это рассеяние света на случайных изменениях плотности волокна (которое в действительности не является однородной), в результате чего часть света теряется в оболочке.

Релеевское рассеяние уменьшается с увеличением длины волны ($\sim 1/\lambda^4$).

Френелевское отражение всегда появляются на границе раздела двух сред с различными показателями преломления n_1 и n_2 (разъемные и неразъемные соединители оптических волокон).

Окна прозрачности оптического волокна



Окна прозрачности оптического волокна

Для передачи оптических сигналов может быть использован **широкий участок спектра**, где потери в волокнах достаточно малы.

Его принято разбивать на более узкие участки – **рабочие диапазоны**, или **окна прозрачности**.

Первоначально под окнами прозрачности понимались участки длин волн вблизи узких локальных минимумов в зависимости потерь от длины волны: **850 нм (1-ое)**, **1310 нм (2-ое)**, **1550 нм (3-е)**.

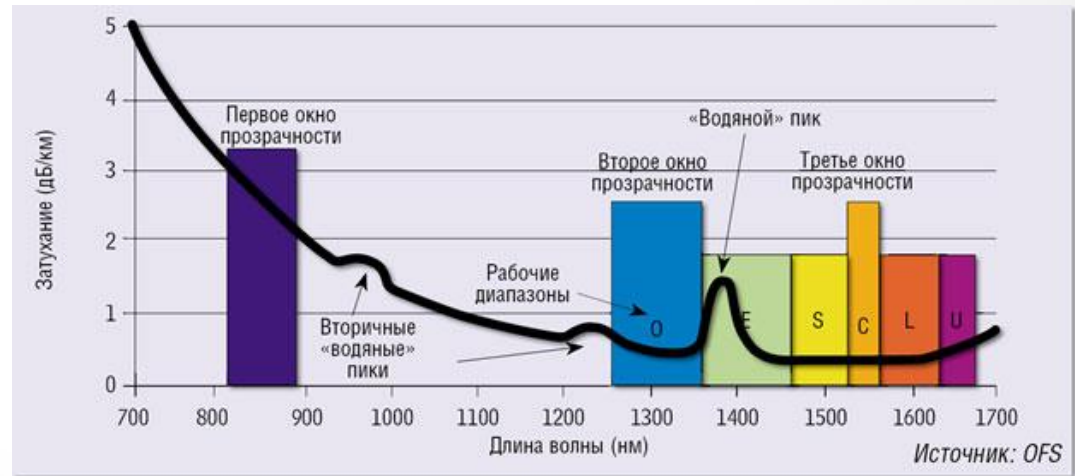
Постепенно стала доступна вся область малых потерь от **1260 до 1675 нм**.

Окна прозрачности оптического волокна

Первое окно прозрачности использовалось в 70-х годах в первых линиях связи на многомодовых волокнах.

Диапазон длин волн этого окна прозрачности составляет от **780 – 860 нм**.

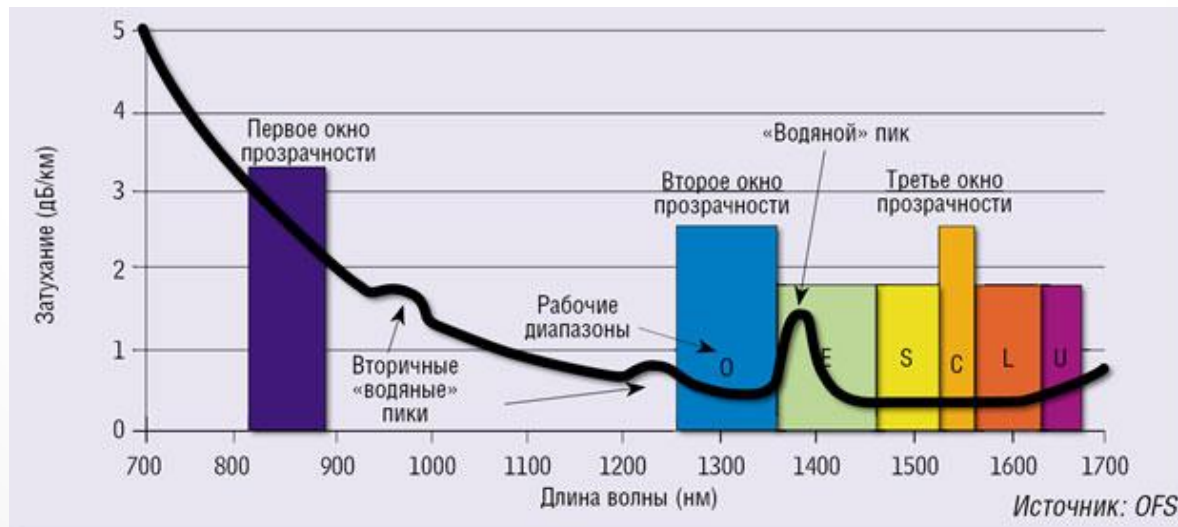
В настоящее время, из-за большой величины потерь в волокнах, этот диапазон используется в основном в **ЛОКАЛЬНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ**.



Окна прозрачности оптического волокна

Второе окно прозрачности (O) стало использоваться в 80-х годах для передачи оптических сигналов по **ОДНОМОДОВЫМ ВОЛОКНАМ** в линиях дальней связи.

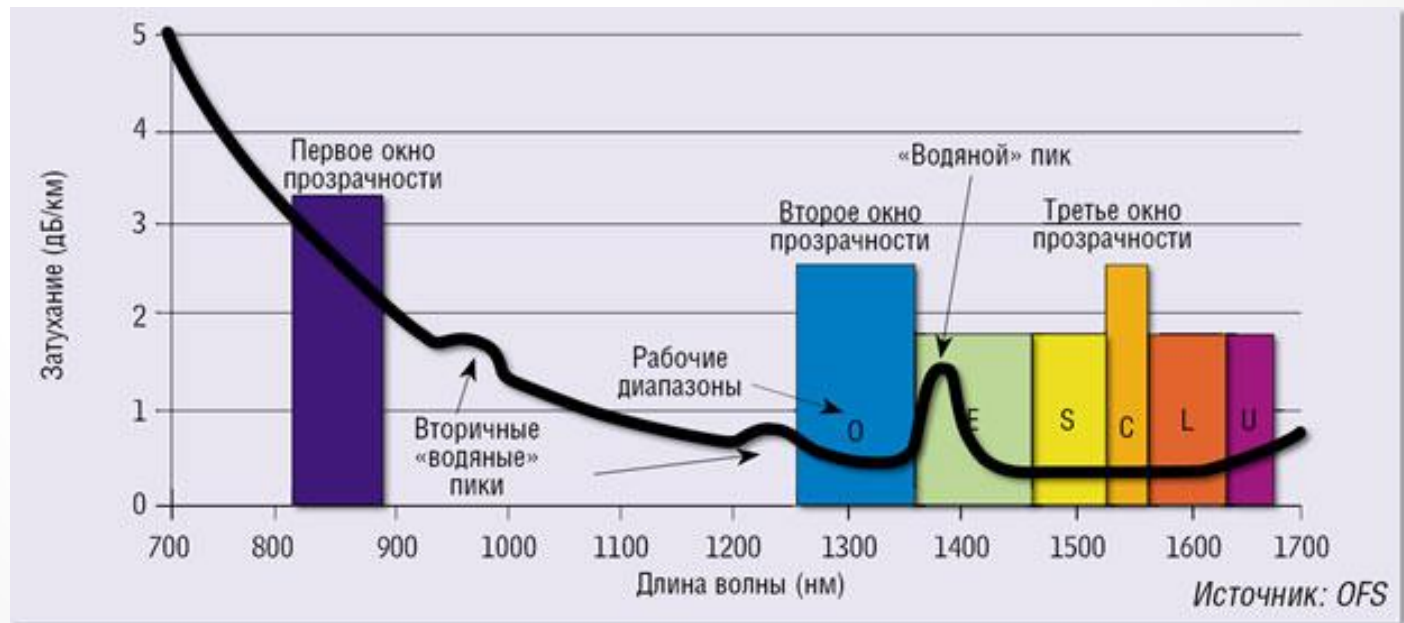
В настоящее время второе окно прозрачности используется преимущественно в городских и зонавых линиях.



Окна прозрачности оптического волокна

Третье окно прозрачности (С) было освоено в начале 90-х годов.

Третье окно наиболее широко используется в магистральных линиях.



Окна прозрачности оптического волокна

Четвертое окно прозрачности (L + U) позволяет передвинуть длинноволновую границу на 1625 нм.

Пятое окно прозрачности (S + E) появилось после создания волокна, в котором в результате тщательной очистки от посторонних включений потери в «водяном» пике на длине волны 1390 нм были снижены до 0,31 дБ/км, что меньше чем во втором окне прозрачности на длине волны 1310 нм (0,35 дБ/км).

Пятое окно прозрачности завершило освоение спектральной области малых потерь в волокне простирающейся от 1260 до 1625 нм.

Окна прозрачности оптического волокна

Спектральные диапазоны, утвержденные **Международным союзом электросвязи (МСЭ – International Telecommunication Union, ITU)**.

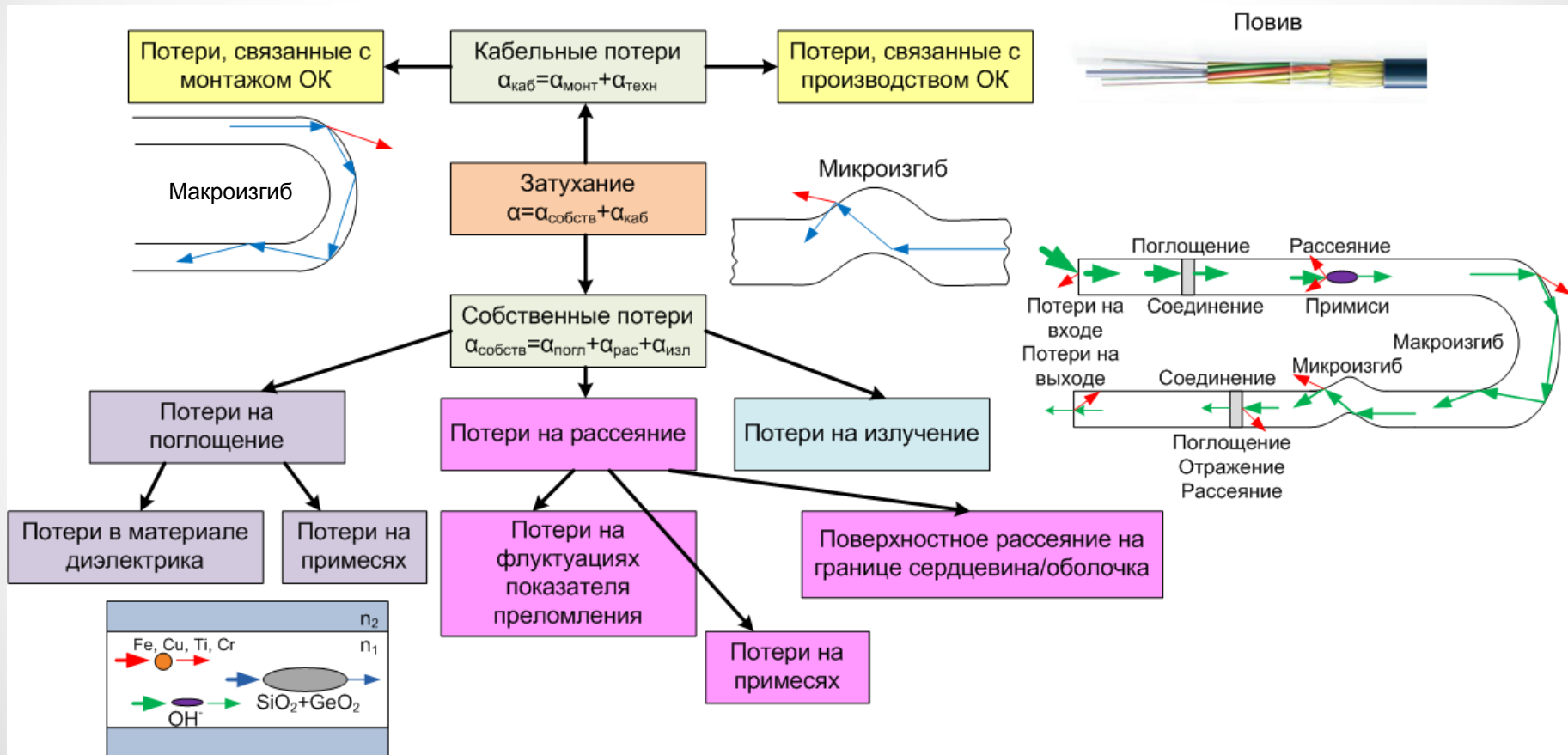
Обозначение диапазона	Наименование диапазона	Диапазон длин волн, нм
O	Основной	1260 – 1360
E	Расширенный	1360 – 1460
S	Коротковолновой	1460 – 1530
C	Стандартный	1530 – 1565
L	Длинноволновой	1565 – 1625
U	Сверхдлинноволновой	1625 – 1675

Затухание В ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ

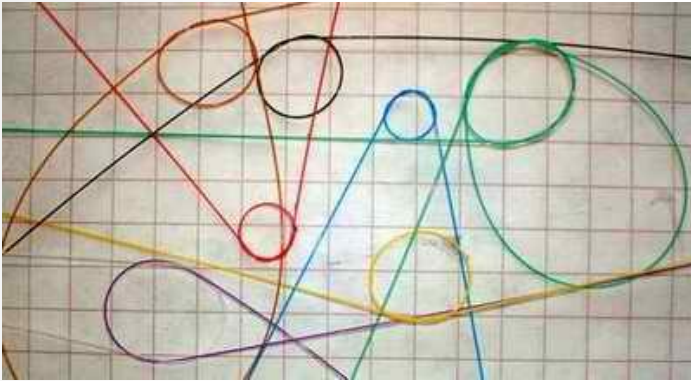
Затухание – это потери оптической мощности сигнала по мере его распространения по волокну, которое определяется отношением оптических мощностей на входе $P_{\text{ВХ}}$ и выходе $P_{\text{ВЫХ}}$:

$$\alpha = 10 \lg(P_{\text{ВХ}}/P_{\text{ВЫХ}}), \text{ дБ}$$

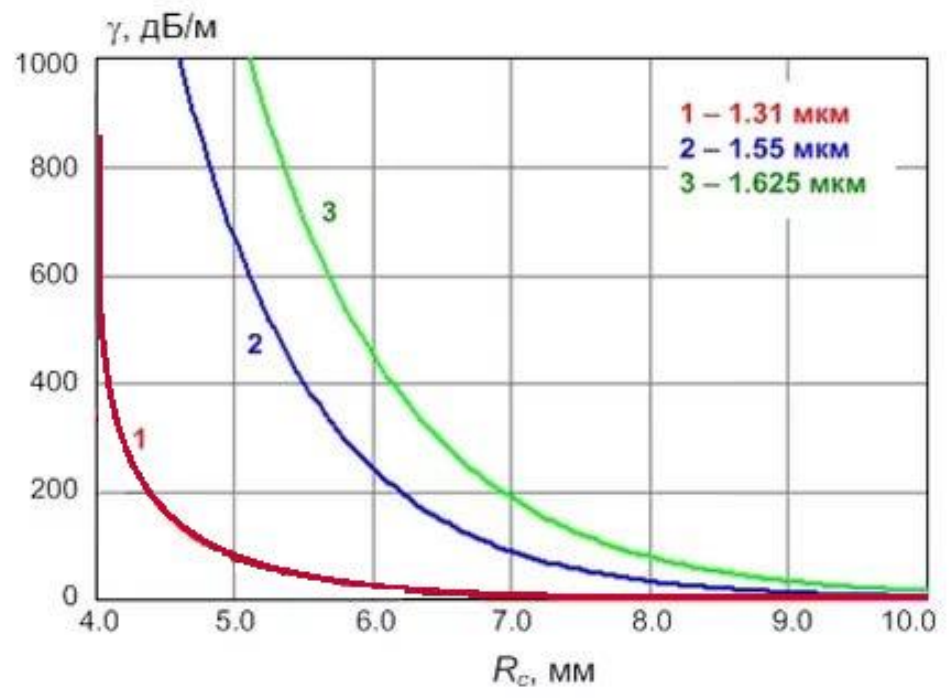
Затухание в ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ



Затухание в оптических волокнах



Влияния радиуса изгиба на затухание в одномодовом оптическом волокне.



Затухание в ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ

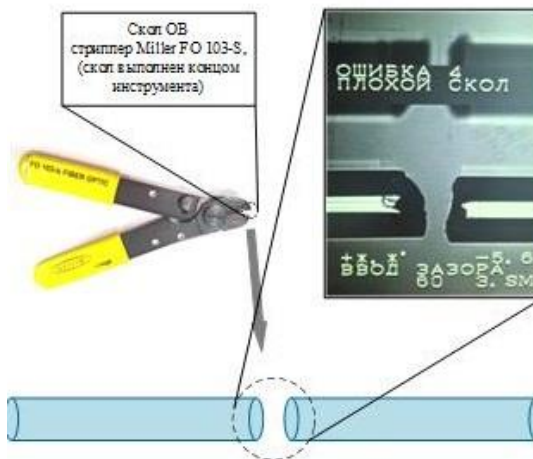
Сколы под микроскопом сварочного аппарата.



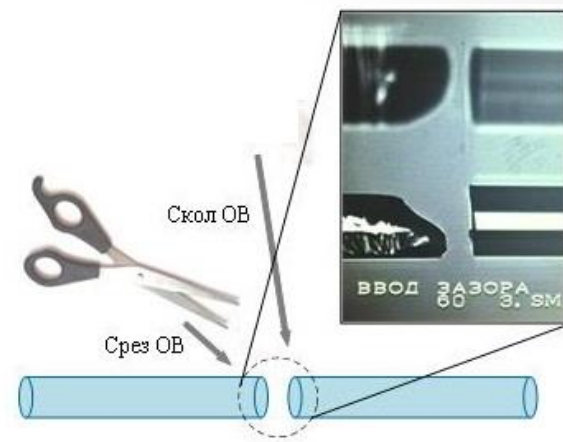
Затухание В ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ

Скол волокна:

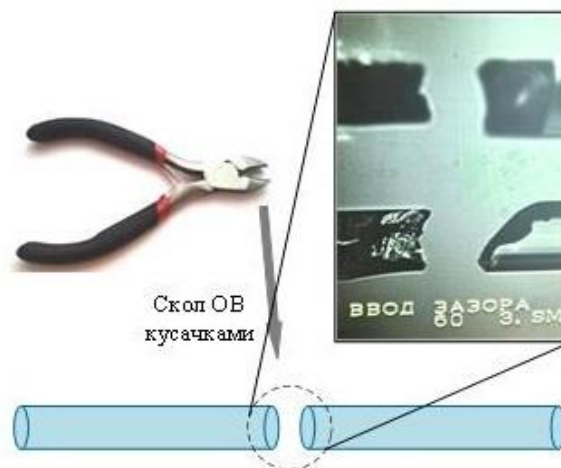
- стриппером;



- НОЖНИЦАМИ;



- кусачками.

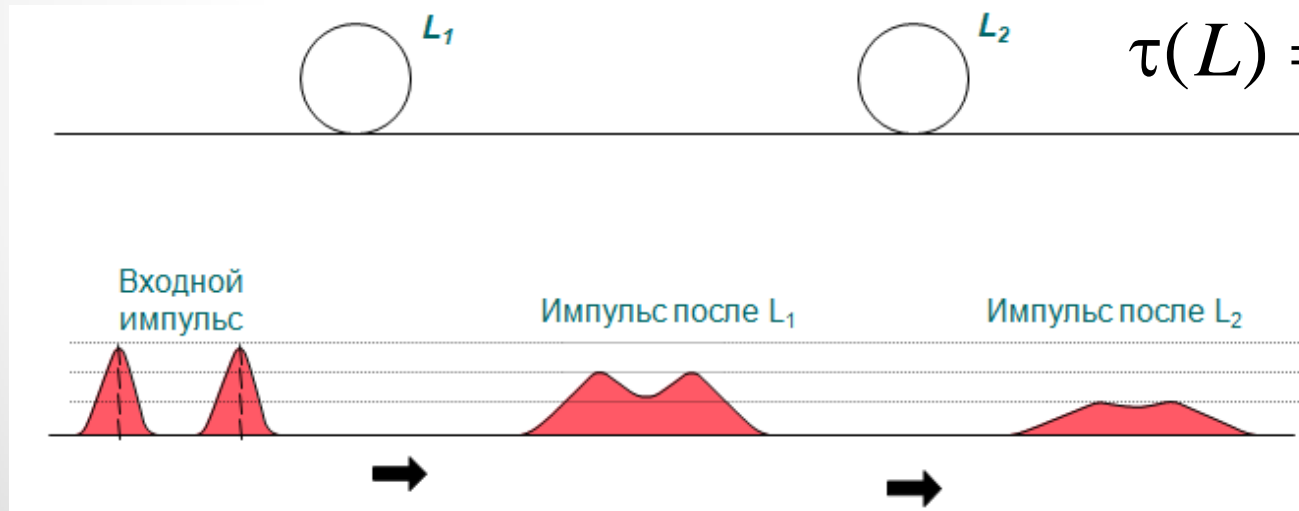


Дисперсия в оптических волокнах

Дисперсия – это явление уширения импульсов при передаче по оптическому волокну.

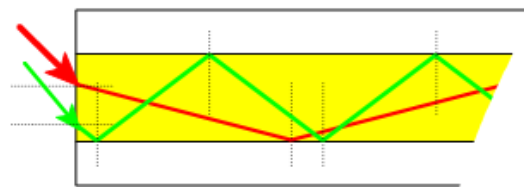
Она имеет размерность времени и определяется как квадратичная разность длительностей импульсов на выходе и входе кабеля протяженностью L км:

$$\tau(L) = \sqrt{\tau_{\text{ВЫХ}}^2 - \tau_{\text{ВХ}}^2}$$



Дисперсия в оптических волокнах

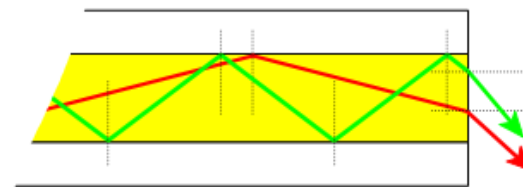
Межмодовая дисперсия – это дисперсия, существующая только в многомодовом волокне и вызванная различной скоростью распространения в нем лучей разных мод, достигающих выхода в разное время, что приводит к уширению импульса на выходе.



Меандры



Тип импульса на
Источнике



Деформированные Импульсы

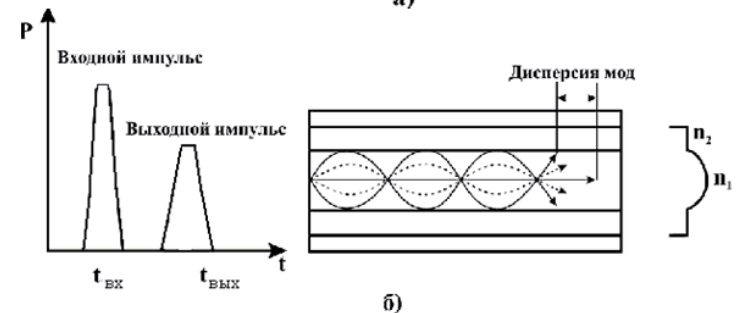
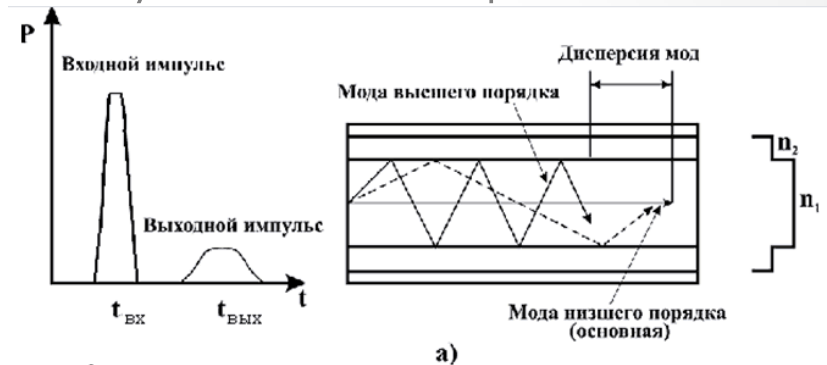
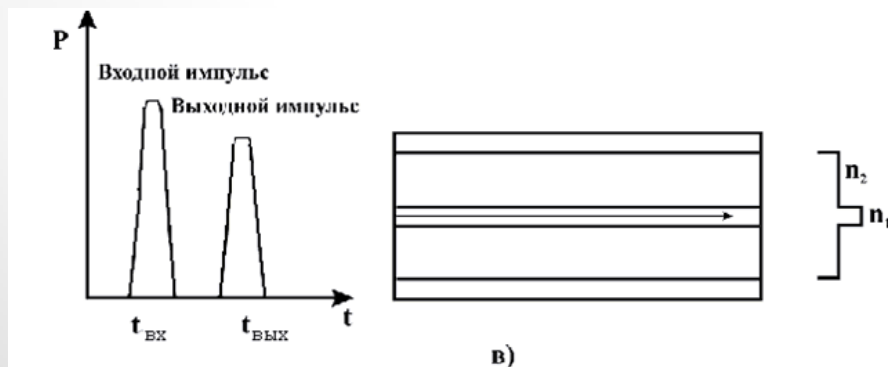


Тип импульса на
Приемнике

Дисперсия в ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ

Межмодовая дисперсия может быть уменьшена тремя путями:

- использованием градиентного ОВ;
- уменьшением диаметра сердцевины;
- подавлением мод высшего порядка.

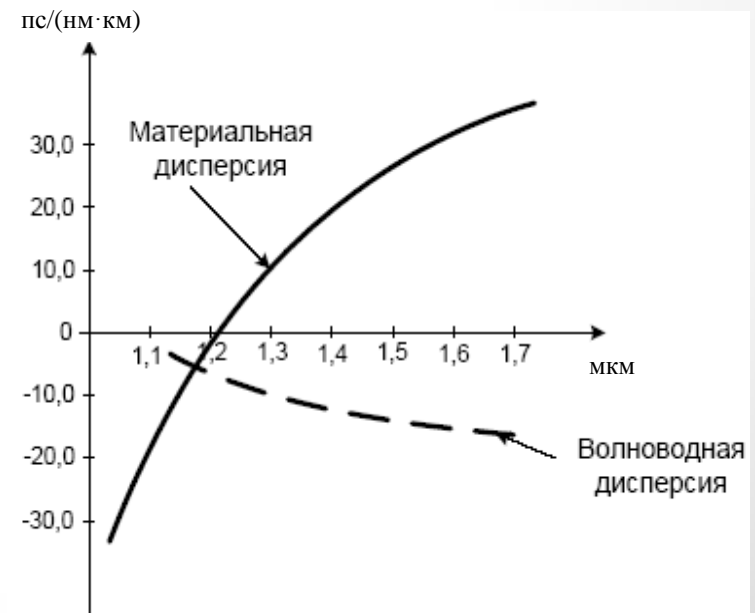


Дисперсия в оптических волокнах

В одномодовом волокне на распространение сигнала оказывают влияние как **хроматическая**, так и **поляризационно-модовая дисперсия**.

Хроматическая дисперсия, в свою очередь, имеет две составляющие:

- **материальную** (обусловлена зависимостью показателя преломления волокна от длины волны);
- **волноводную** (обусловлена зависимостью коэффициента распространения моды от длины волны).



Дисперсия в оптических волокнах

Обычно хроматическая дисперсия нормируется в расчете на **1 км протяженности ОВ** и на **1 нм ширины спектра оптического сигнала**, поступающего от источника.

Такая хроматическая дисперсия называется **удельной** (σ) и измеряется в пс/(нм·км):

$$\sigma = \frac{S_0}{4} \left[\lambda - \frac{\lambda_0^4}{\lambda^3} \right]$$

где S_0 – наклон дисперсионной кривой одномодового волокна на длине волны нулевой дисперсии, пс/(нм²·км);

λ – рабочая длина волны, нм;

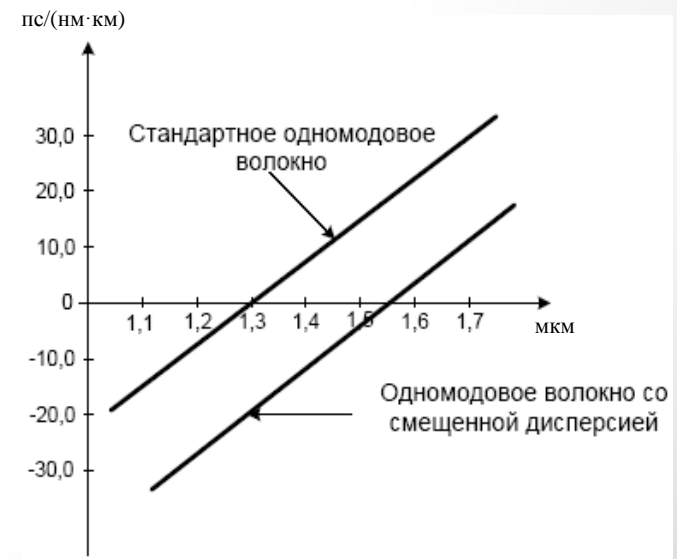
λ_0 – длина волны нулевой дисперсии, нм.

Дисперсия в оптических волокнах

Одномодовые волокна со смещенной дисперсией.

Стандартное одномодовое оптическое волокно не обеспечивает малой дисперсии для длины волны 1550 нм, поэтому были разработаны **оптические волокна со смещенной дисперсией (Dispersion-Shifted Fiber, DSF)**, которые отличаются конфигурацией профиля показателя преломления.

Основой для создания оптических волокон со смещенной дисперсией является ее **более отрицательная волноводная дисперсия.**



Дисперсия в оптических волокнах

Одномодовые волокна с минимизацией затухания (**Conventional Single-mode Fiber, CSF**) имеют нулевую дисперсию при длине волны около 1300 нм с минимальным уровнем потерь.

При длине волны около 1550 нм данное одномодовое оптическое волокно имеет смещенную дисперсию и отсечку.

Оно **оптимизировано для использования в диапазоне длин волн 1530 – 1625 нм** и может использоваться в приложениях для цифровой передачи на большие расстояния, таких как наземные системы дальней связи и магистральные подводные кабели с оптическими усилителями.

Дисперсия в оптических волокнах

В системах с **мультиплексированием каналов по длинам волн (DWDM)** и с оптическим усилением компенсация дисперсии представляет более сложную задачу в силу наличия нелинейных эффектов в одномодовом оптическом волокне.

Использование **одномодовых волокон со смещенной дисперсией** не решает проблемы – необходимо наличие в оптическом волокне **небольшого (ненулевого) уровня хроматической дисперсии**.

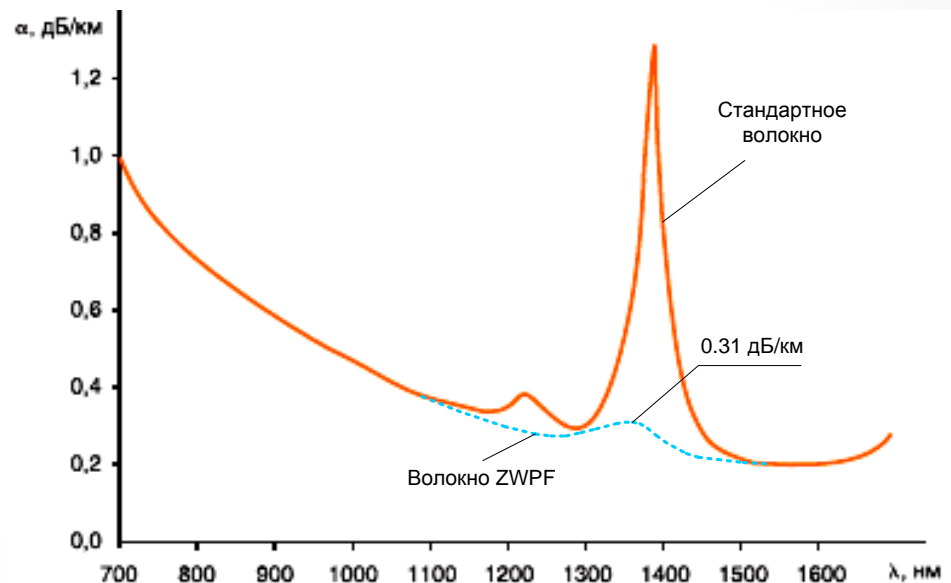
Поэтому было разработано **одномодовое волокно с ненулевой смещенной дисперсией (Non-Zero Dispersion-Shifted Fiber, NZDSF)**.

Дисперсия в оптических волокнах

Наличие пика поглощения на длине волны **1383 нм**, который обусловлен содержанием в волокне гидроксильных групп ОН, существенно сужает диапазон передаваемых длин волн.

Для решения этой проблемы было разработано **волокно с нулевым водородным пиком (Zero Water Peak Fiber, ZWPF)**.

В ОВ данного типа величина затухания составляет не более **0,31 дБ/км** в рабочем диапазоне длин волн.



Дисперсия В ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ

Характеристики ОДНОМОДОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН	SMF	DSF	CSF	NZDSF
Затухание, дБ/км, при длине волны, нм:				
850	–	–	–	–
1300	–	–	–	–
1310	≤ 0,36	–	–	–
1550	≤ 0,22	≤ 0,35	≤ 0,22	≤ 0,35
Удельная хроматическая дисперсия, пс/(нм·км):				
1285–1330 нм	≤ 3,5	–	–	–
1550 нм	≤ 18	–	≤ 20	–
1530–1565 нм	–	–	–	1,0–6,0
1525–1575 нм	–	≤ 3,5	–	–
Диапазон длин волн при нулевом значении дисперсии, нм	1300 – 1325	1525 – 1575	1260 – 1300	–
Максимальный наклон дисперсионной кривой в точке её нулевого значения, пс/(нм ² ·км)	≤ 0,092	≤ 0,085	≤ 0,095	–

Дисперсия в оптических волокнах

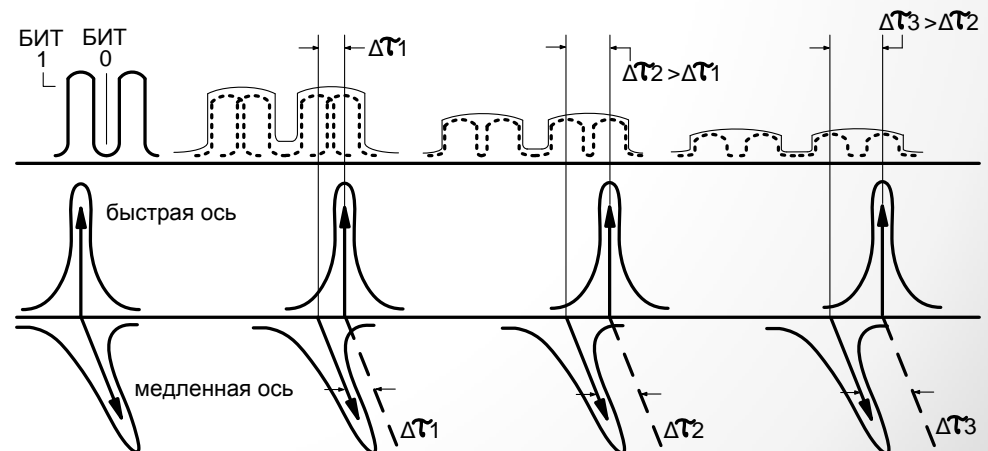
Поляризационная модовая дисперсия возникает вследствие различной скорости распространения двух взаимно перпендикулярных поляризационных составляющих моды.

Эта дисперсия возникает как в одномодовом, так и многомодовом волокнах.

$$\tau_{пол} = T \cdot \sqrt{L}$$

где T – коэффициент удельной дисперсии в расчёте на 1 км (0,1);

L – протяженность линии связи, км.



Нелинейные эффекты в оптических волокнах

Нелинейные эффекты появляются тогда, когда интенсивность лазерного излучения (мощность на единицу поперечного сечения) достигает некоторого порогового значения.

Нелинейные эффекты порождают генерацию паразитных гармоник на частотах равных сумме или разности основных частот системы, которые приводят к непредсказуемым потерям.

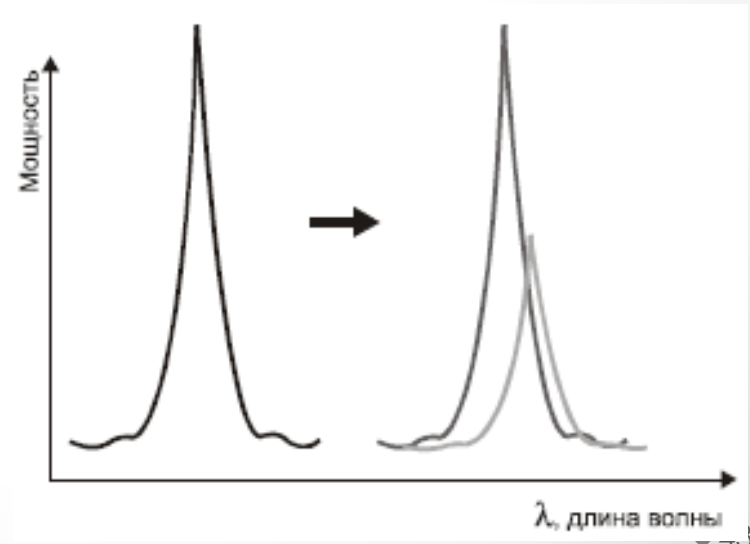
Нелинейность ОВ **не является дефектом производства** или **конструкции волокна**.

Это **неотъемлемое свойство материальной среды** при распространении в ней любой электромагнитной энергии.

Нелинейные эффекты в ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ

Стимулированное Бриллюэновское рассеяние (**Stimulated Brillouin Scattering, SBS**) устанавливает верхний предел на уровень оптической мощности, который может быть передан по оптическому волокну.

При превышении определенного уровня оптической мощности, именуемого **порогом SBS**, в ОВ возникает волна, распространяющаяся в обратном направлении к источнику света, в результате чего полезная передаваемая оптическая мощность ослабляется.

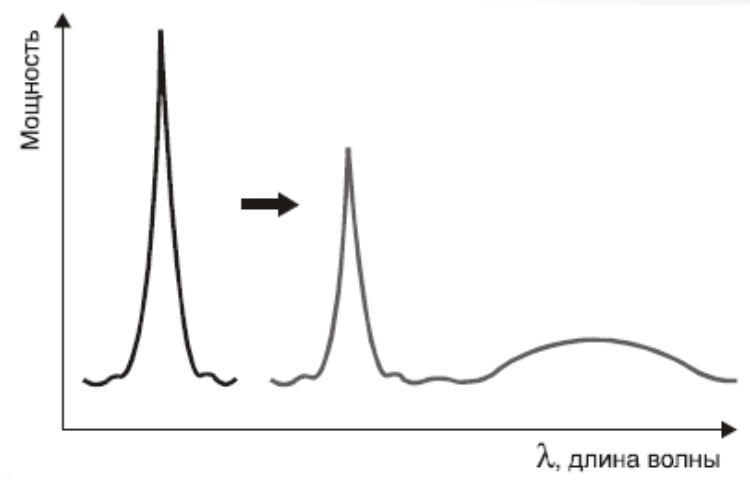


Нелинейные эффекты в ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ

Стимулированное рамановское рассеяние (Stimulated Raman Scattering, SRS) по своему характеру проявления близко к SBS – оптический сигнал рассеивается и смещается в область более длинных волн.

При SBS спектр стимулированного излучения узкий (не более 60 МГц) и смещен в длинноволновую сторону на 10 – 11 ГГц.

При SRS спектр стимулированного излучения широкий (~ 7 ТГц) и смещен в длинноволновую сторону на величину порядка 10 – 13 ТГц.



Нелинейные эффекты в оптических волокнах

Фазовая самомодуляция (Self-Phase Modulation, SPM) – при очень высокой интенсивности лазерного излучения сигнал может модулировать свою собственную фазу, расширяя спектр сигнала.

Кроме того, в хвосте волнового пакета возникает сдвиг к более коротким длинам волн, а на переднем фронте – в область длинных.



Фазовая самомодуляция возрастает при:

- **увеличении вводимой в канал мощности при постоянном эффективном сечении ОВ;**
- **увеличении скорости передачи в канале;**
- **отрицательной хроматической дисперсии.**

Нелинейные эффекты в ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ

Перекрестная фазовая модуляция (Cross-Phase Modulation, CPM или XPM) – сигнал одного канала модулирует фазы сигналов в соседних каналах.

Перекрестная фазовая модуляция чувствительна к тем же факторам, что и явление фазовой самомодуляции, а также к увеличению числа каналов.



Разнесение каналов, как и при фазовой самомодуляции, на нее практически не влияет, но явление CPM уменьшается при:

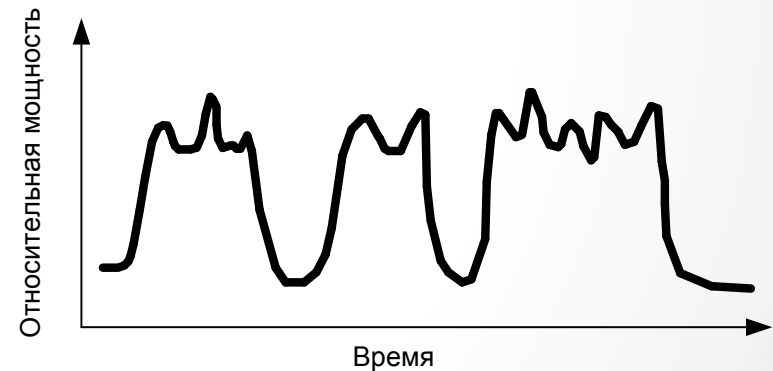
- **увеличении эффективного сечения ОВ;**
- **компенсации дисперсии.**

Нелинейные эффекты в оптических волокнах

Модуляционная нестабильность (Modulation Instability, MI) наблюдается только в ОВ с положительной дисперсией.

Во временном представлении MI проявляется в виде пиков на импульсах, а в спектральном – как уширение спектра импульса.

Появление пиков на импульсах связано с тем, что длина волны на заднем фронте импульса оказывается короче длины волны на переднем фронте, что при положительной дисперсией ускоряет волну заднего фронта более, чем длинную волну переднего фронта.



Нелинейные эффекты в ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ

Четырехволновое смешение (Four-Wave Mixing, FWM) является одним из самых вредных нелинейных оптических явлений в системах с волновым разделением каналов.

При достижении критического уровня мощности излучения лазера нелинейность ОВ приводит к взаимодействию трех волн с частотами ω_i , ω_j , ω_k и появлению новой четвертой волны на частоте $\omega_i \pm \omega_j \pm \omega_k$.

Некоторые частоты таких ложных сигналов могут попасть в рабочие полосы пропускания каналов.

