



Физические основы передачи оптического излучения по волоконным световодам





Двойственная природа света:

- 1) С одной стороны свет – электромагнитная волна.
- 2) С другой стороны – это поток частиц - фотонов, или квантов.



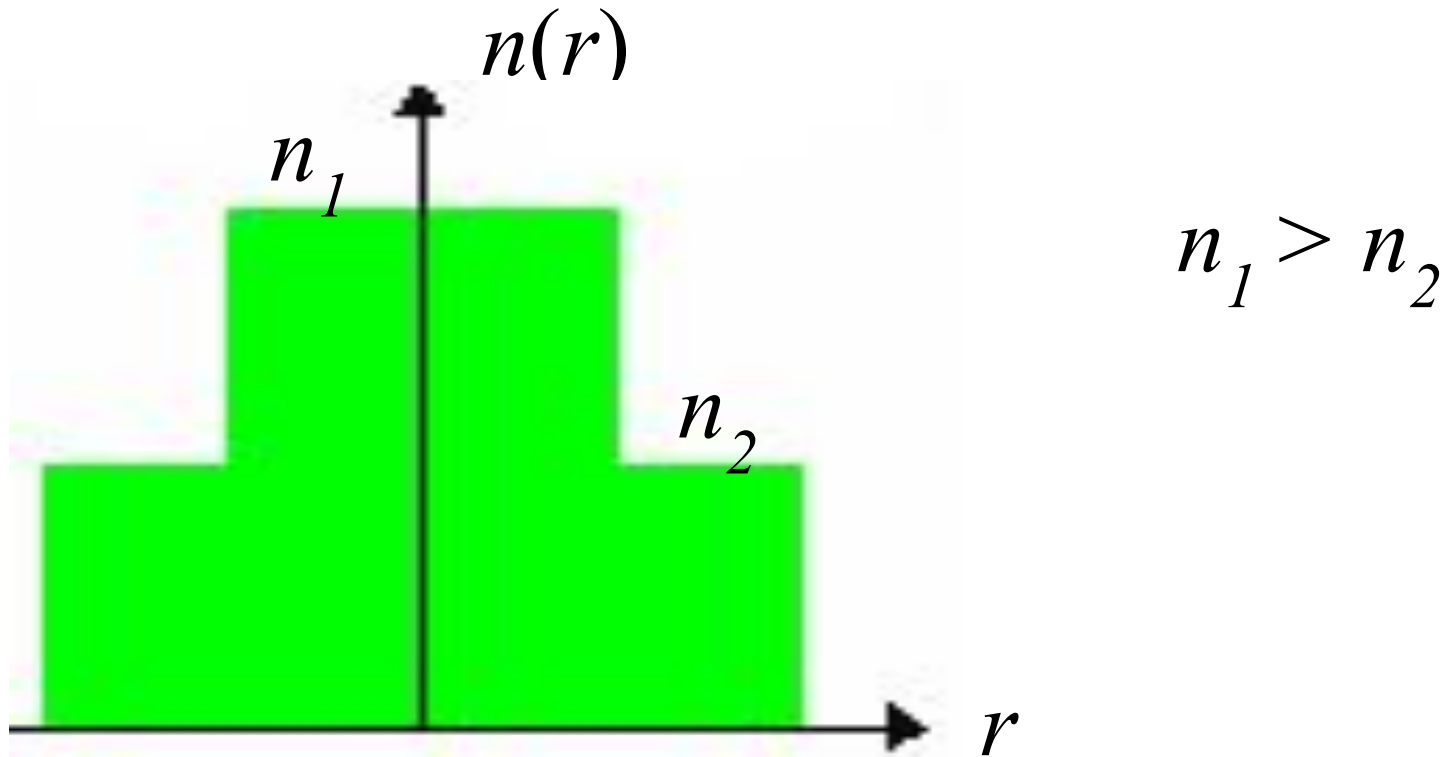
В настоящее время
для передачи информации
по оптическим волокнам
используется
ближний ИК – диапазон:
6 ... 0,75 мкм (50...400 ТГц)

Распространение лучей света вдоль ОВ основано на явлениях отражения и преломления и может быть описано с помощью законов Снеллиуса

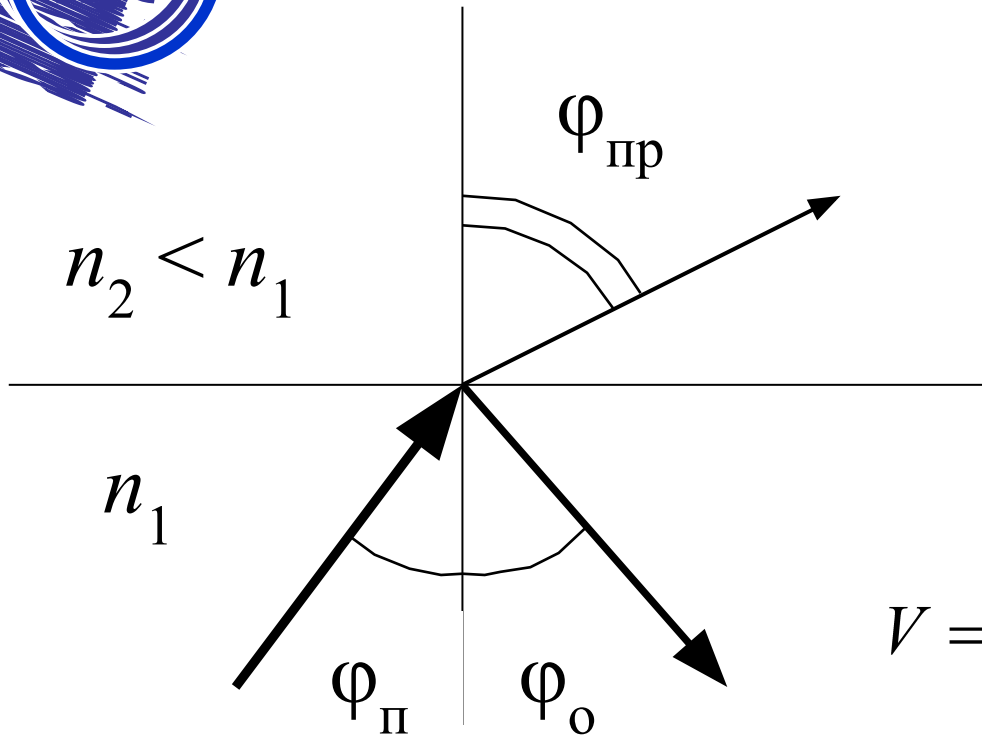


**Виллеброрд СНЕЛЛИУС
(СНЕЛЛЬ)
Willebrord Van Roijen Snell,
1580–1626**

Голландский математик
и физик.



Профиль показателя преломления (ППП) ОВ – зависимость показателя от поперечной координаты. n_1 и n_2 – показатели преломления сердцевины и оболочки



Законы Снеллиуса:

1) $\varphi_{\Pi} = \varphi_{\text{O}}$

2) $\frac{\sin \varphi_n}{\sin \varphi_{np}} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{V_1}{V_2}$

$V = \frac{c}{n}$, - скорость света в среде

$c = 3 \cdot 10^8$ м/с – ск. света в вакууме

$V_1 < V_2 \Rightarrow$ сердцевина - более плотная оптическая среда,
чем оболочка



Передача оптического излучения по световоду осуществляется за счет свойства полного внутреннего отражения, которое обеспечивается неравенством показателей преломления сердцевины и оболочки $n_1 > n_2$, при этом среда с большим показателем преломления называется оптически более плотной средой.



Угол падения, при котором выполняется условие полного внутреннего отражения, называется критическим углом падения и определяется из выражения:

$$\Theta_A = \arcsin \frac{n_2}{n_1}$$

Явление полного внутреннего отражения определяет условия ввода излучения в световод и характеризуется апертурой оптического волокна. **Апертура** – это угол между оптической осью и одной из образующих светового конуса, попадающего в торец световода, при котором выполняется условие полного внутреннего отражения . Также пользуются понятием **числовой апертуры**.



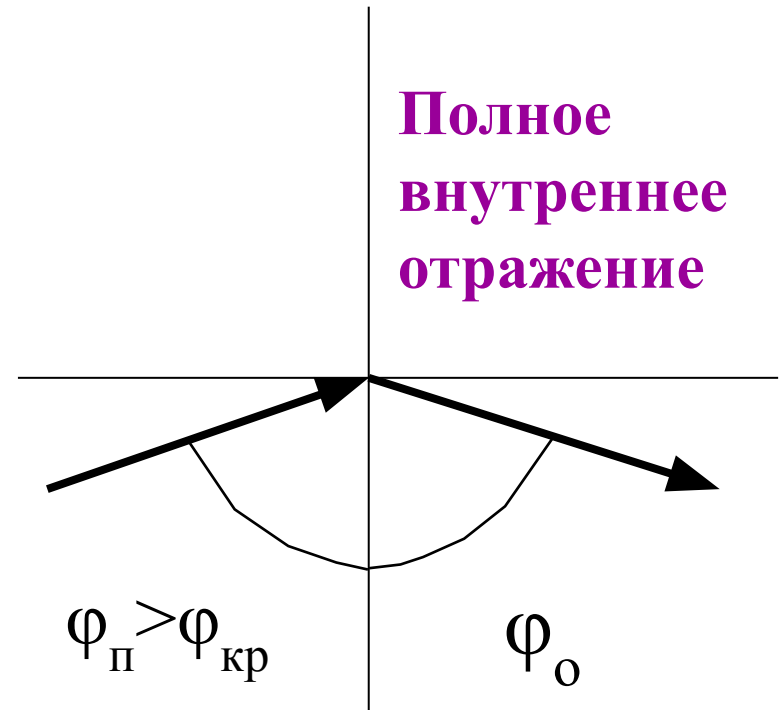
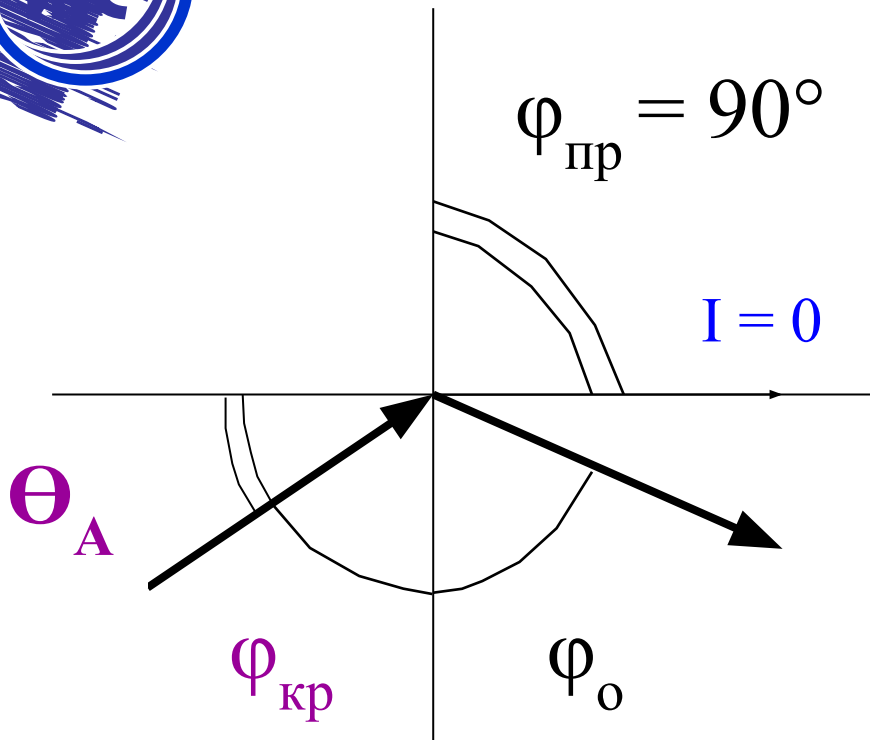
Числовая апертура ОВ:

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

Нормированная частота ОВ:

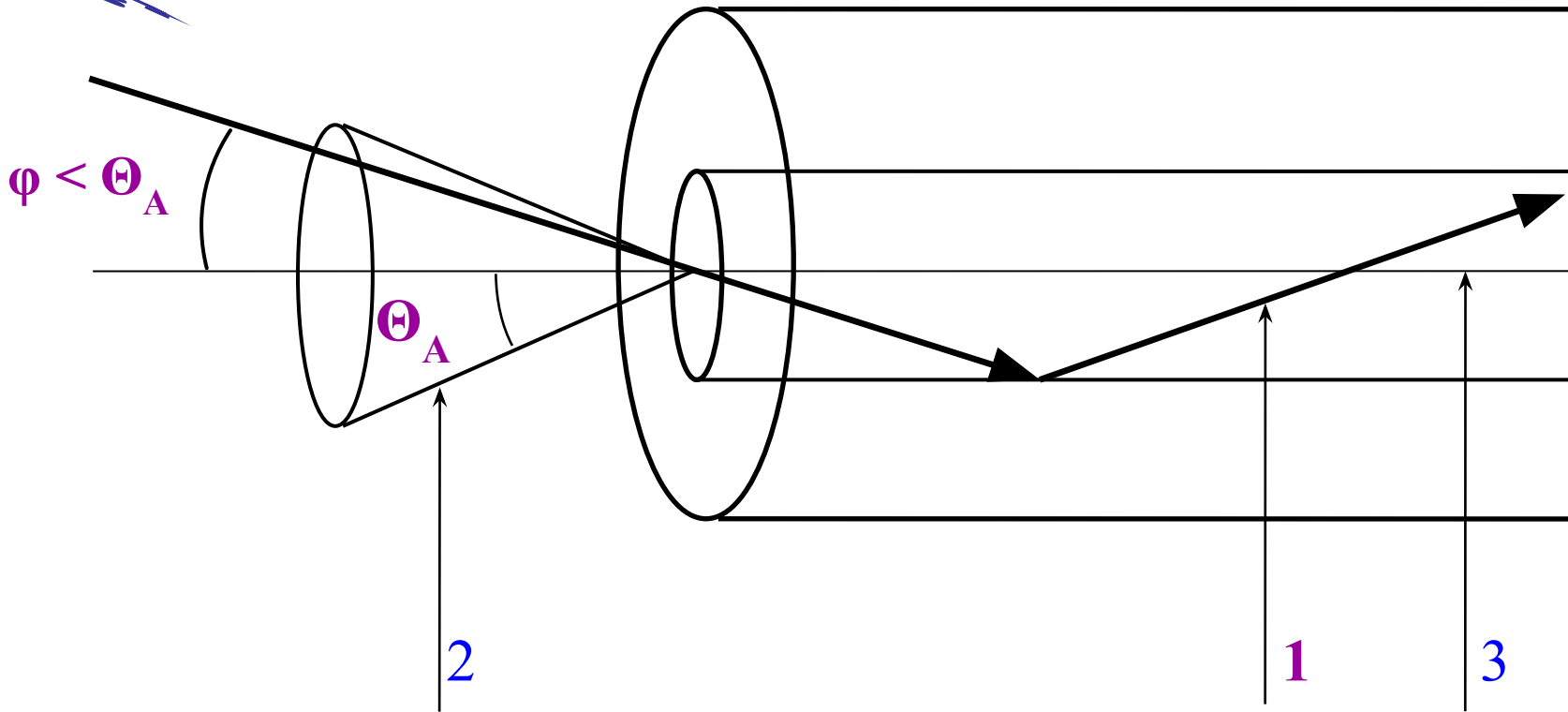
$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} NA \quad - \text{ параметр, определяющий число мод ОВ}$$

λ - рабочая длина волны, a – радиус сердцевины ОВ

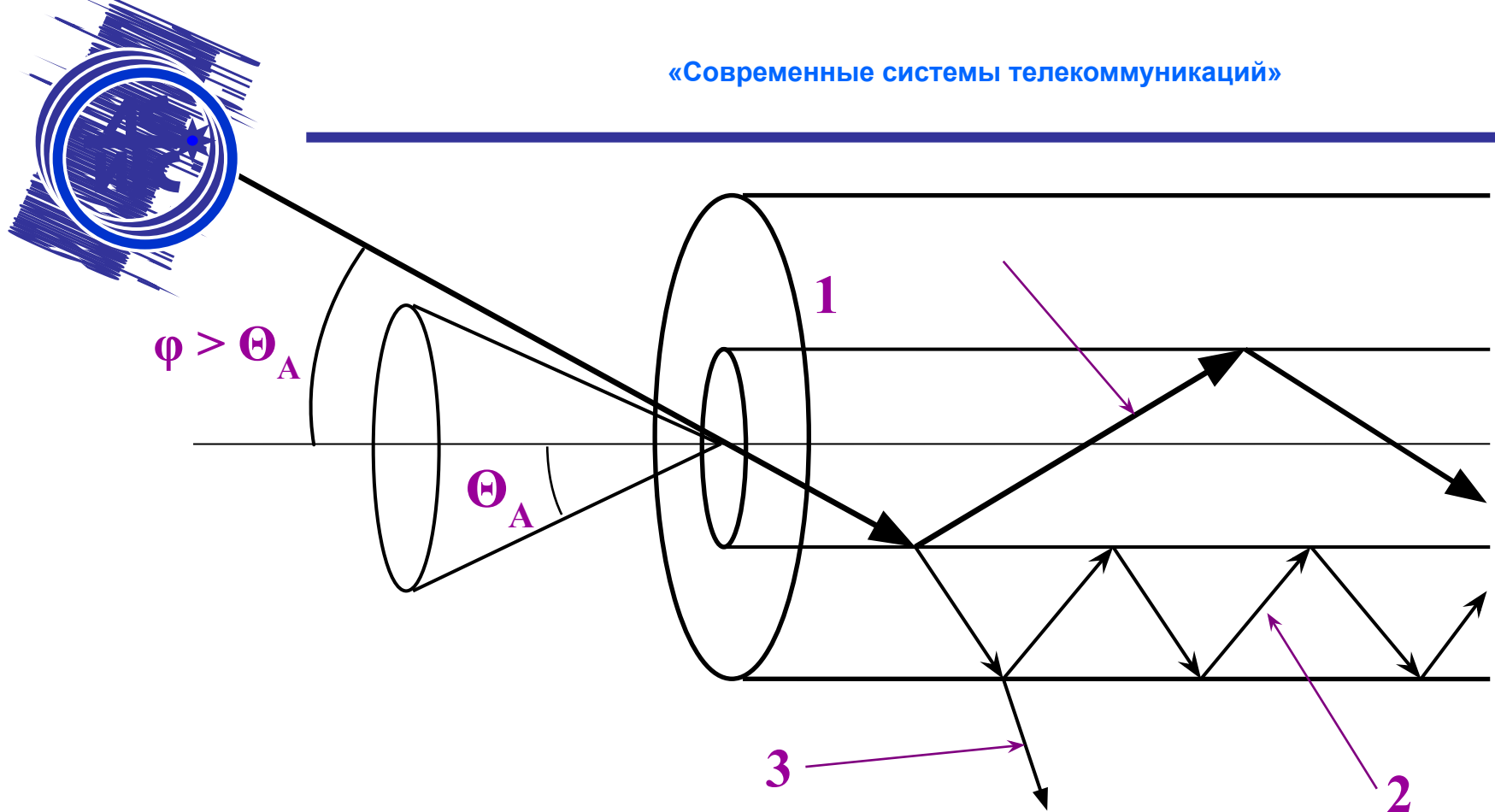


$\varphi_{кр}$ – критический угол падения , Θ_A – апертура ОВ.
С ростом $\varphi_{пр}$ интенсивность преломленного луча $I \rightarrow 0$

Ввод светового луча в ОВ



1 – направляемая мода; 2 – световой конус; 3 – оптическая ось



Из-за неидеальности диаграммы направленности источника излучения часть лучей может не попасть в световой конус => будут формироваться **моды оболочки 2** и **излучаемые моды 3 (ненаправляемые моды)**



**Важнейшими параметрами
передачи являются:
затухание и дисперсия**



ЗАТУХАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН



Затухание – потеря мощности оптического сигнала при распространении по ОВ

Рэлеевское рассеяние – рассеяние света на случайных флуктуациях (неоднородностях) показателя преломления сердцевины, если размеры неоднородностей соизмеримы с длиной световой волны λ .

Гидроксильная группа ОН –

Поглощения квантов света атомами кварца в инфракрасной области спектра



Основные причины и составляющие затухания ОВ

$$\alpha = \alpha_n + \alpha_p + \alpha_{np} + \alpha_k + \alpha_{ик}$$

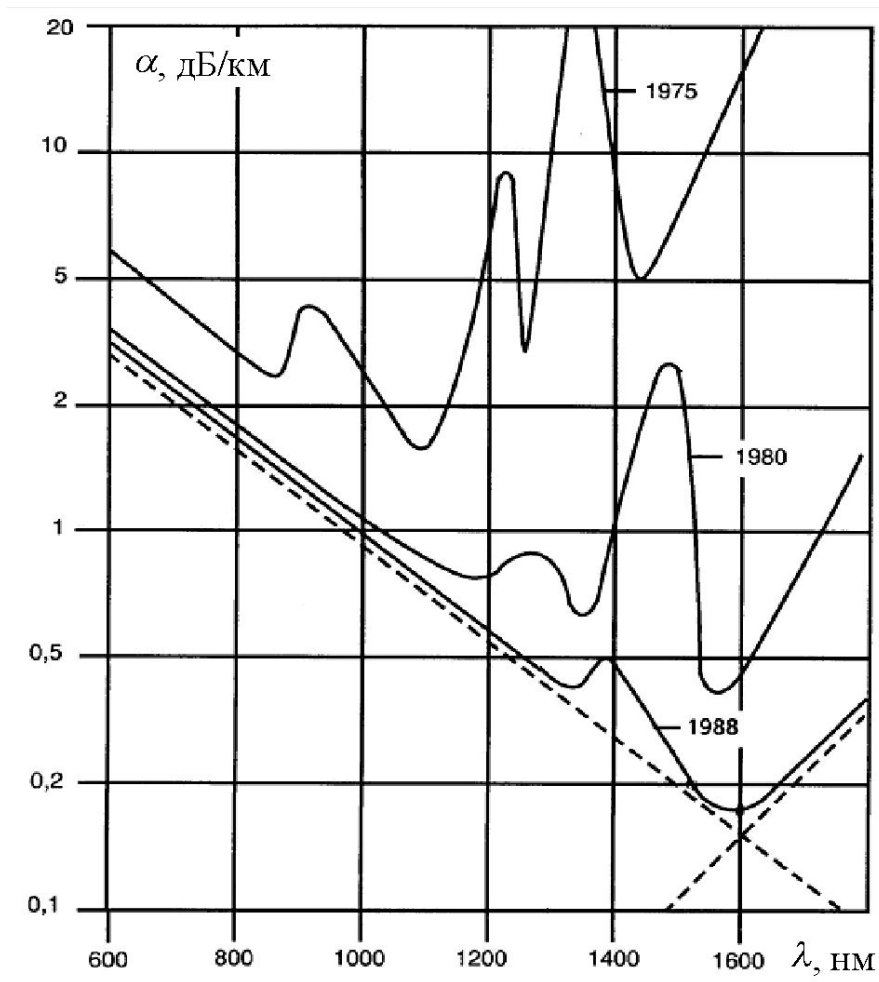
где α_n – потери на поглощение;

α_p – потери на рассеяние;

α_{np} – потери на поглощение, обусловленные примесями;

α_k – кабельные потери;

$\alpha_{ик}$ – потери на поглощение в инфракрасной области.



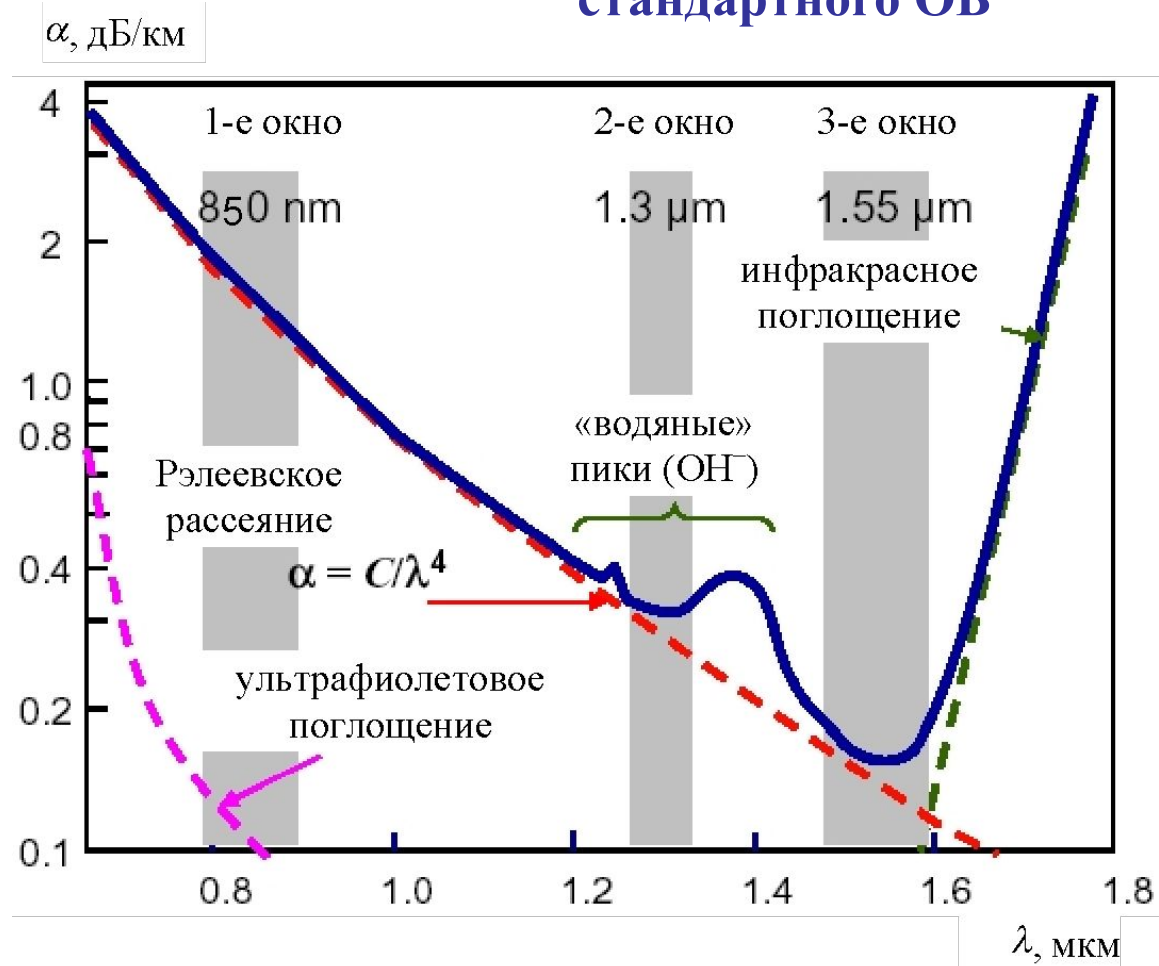


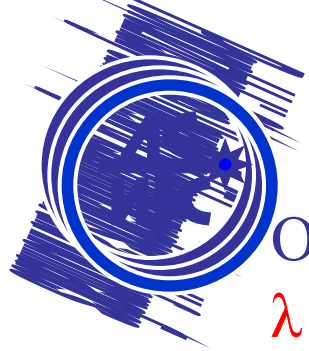
На характеристиках, соответствующих 1975...1980 гг. четко просматривается резкое уменьшение затухания на длинах волн, лежащих в области трех окон прозрачности (850 нм, 1300 нм и 1550 нм).

Технология производства оптических волокон совершенствуется, и к 1990 г. наблюдается сглаживание характеристики, по сравнению с более ранним периодом, а также яркого проявления пика поглощения на примесях ОН с максимумом при $\lambda = 1380$ нм.



Результатирующая характеристика затухания стандартного ОВ





Области длин волн вблизи значений

$\lambda = 0,85, 1,31$ и $1,55$ мкм (850, 1310, 1550 нм)

называются соответственно **I**, **II** и **III** окнами прозрачности

Минимальные величины затуханий:

I окно: 2 – 3 дБ/км; (0,85 мкм)

II окно: 0,3 – 0,5 дБ/км; (1,31 мкм)

III окно: 0,2 – 0,4 дБ/км; (1,55 мкм)

Наиболее выгодным и с точки зрения полосы частот, и затухания является **III** окно прозрачности:

диапазон длин волн: $\Delta\lambda = 1,36 – 1,675$ мкм ($\Delta F \approx 28$ ТГц,

предел пропускной способности $C \approx 370$ Тбит/с),

затухание – 0,22 дБ/км



Спектральные диапазоны

| | | |
|----------|---|----------------|
| O | Original (основной) | 1260...1360 нм |
| E | Extended (расширенный) | 1360...1460 нм |
| S | Short wavelength (коротковолновый) | 1460...1530 нм |
| C | Conventional (стандартный) | 1530...1565 нм |
| L | Long wavelength (длинноволновый) | 1565...1625 нм |
| U | Ultra-long wavelength (сверхдлинный) | 1625...1675 нм |



ДИСПЕРСИЯ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН



Дисперсией оптического волокна называют рассеяние во времени спектральных или модовых составляющих оптического сигнала.

Основная причина дисперсии – разные скорости распространения отдельных составляющих оптического сигнала.

Дисперсия проявляется как уширение, увеличение длительности распространяющихся по волокну оптических импульсов.

Дисперсия бывает:

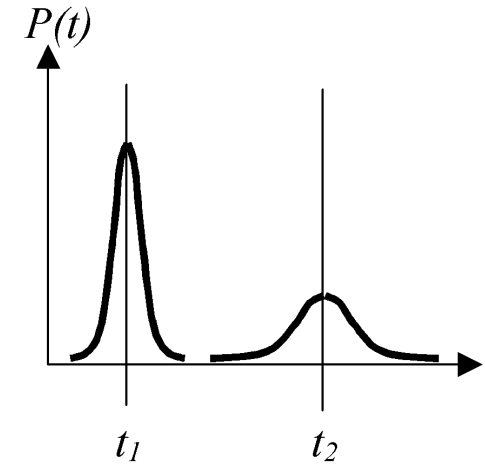
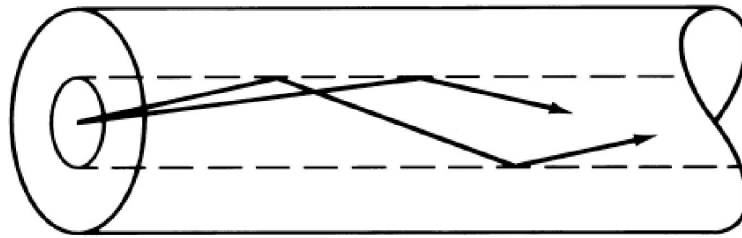
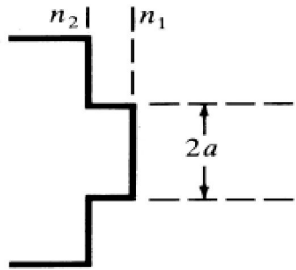
- Межмодовая;
- Хроматическая (состоит из волноводной и материальной);
- Поляризационная модовая дисперсия (PMD);



Межмодовая дисперсия характерна только для многомодовых оптических волокон. Она возникает в многомодовых световодах из-за наличия большого числа мод с различным временем распространения за счет различной длины пути, который отдельные моды проходят в сердцевине волокна.

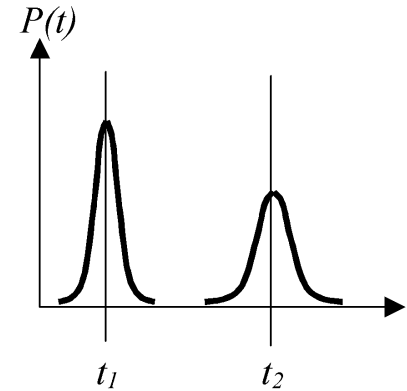
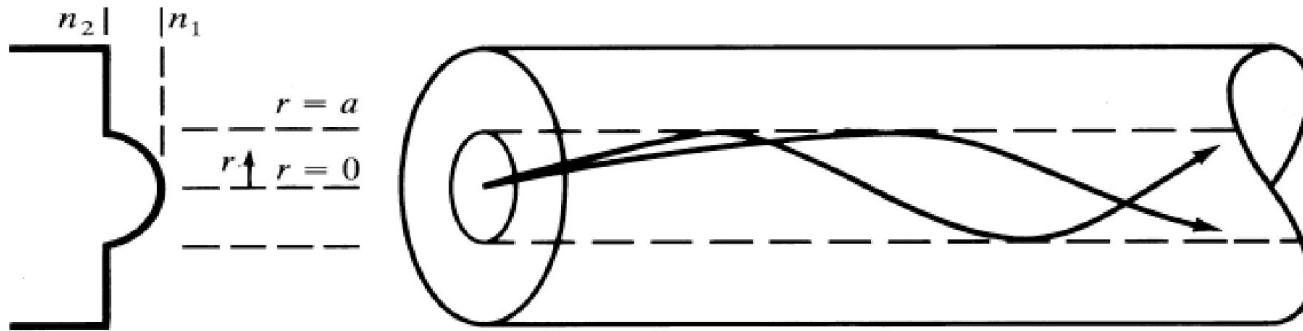


В ступенчатых многомодовых оптических волокнах траектории лучей отдельных мод имеют вид зигзагообразных линий.



импульс импульс
на входе на выходе

Пути следования лучей различны, и поэтому они приходят к концу линии со сдвигом по времени, что приводит к искажению передаваемого сигнала, известному как проявление межмодовой дисперсии.



импульс на входе импульс на выходе

В многомодовых световодах с градиентным профилем показателя преломления траектории распространения большинства лучей представляют собой плавные волнообразные кривые, в результате чего моды приходят на выход ВОЛП с меньшим разбросом по времени.



Оптически более плотная среда соответствует центральной области сердцевины, в то время как менее плотная – границе раздела сердцевина/оболочка.

В этом случае более “быстрые” моды распространяющиеся ближе к центру сердцевины, благодаря градиенту профиля, искусственно “притормаживаются”, что позволяет существенно уменьшить разброс по времени появления лучей на приемной стороне и уменьшить проявление межмодовой дисперсии.



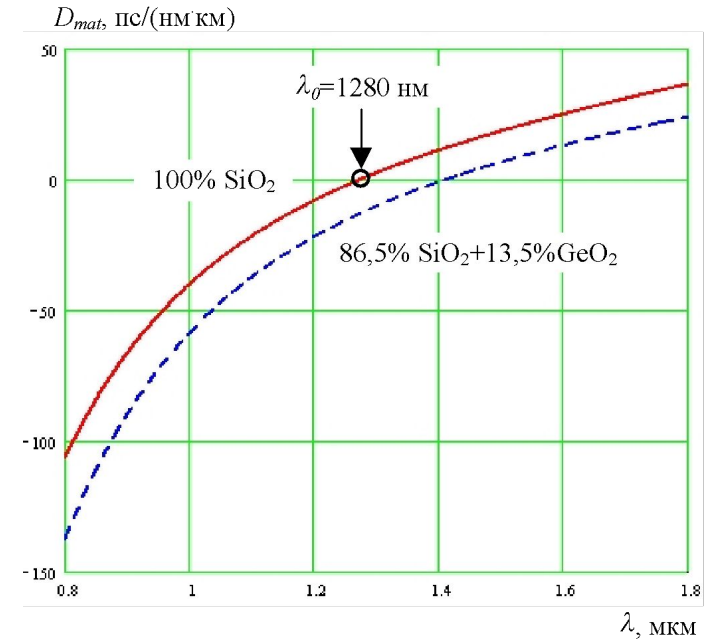
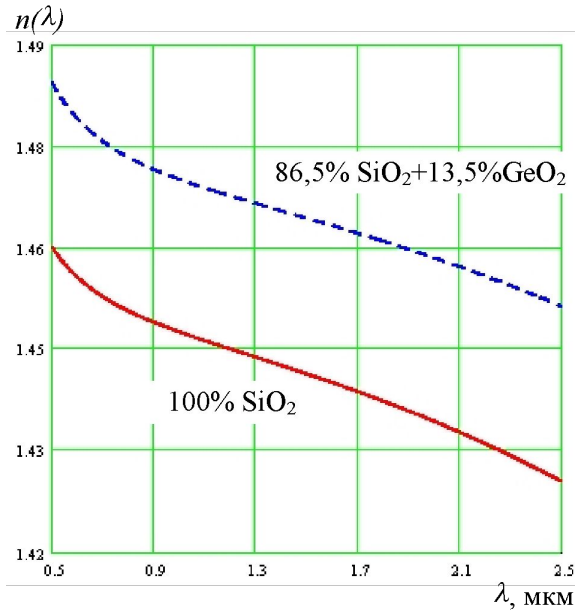
Очевидно, что в одномодовых волоконных световодах межмодовая дисперсия не проявляется.

Одними из основных факторов искажений сигналов, распространяющихся по одномодовым оптическим волокнам являются **хроматическая** и **поляризационная модовая дисперсии**.



Хроматическая дисперсия D_{ch} обусловлена конечной шириной спектра излучения лазера и различием скоростей распространения отдельных спектральных составляющих оптического сигнала. Хроматическая дисперсия складывается из **материальной** и **волноводной** дисперсии, и проявляется как в одномодовых, так и многомодовых оптических волокнах.

$$D_{ch} = D_{mat} + D_w$$

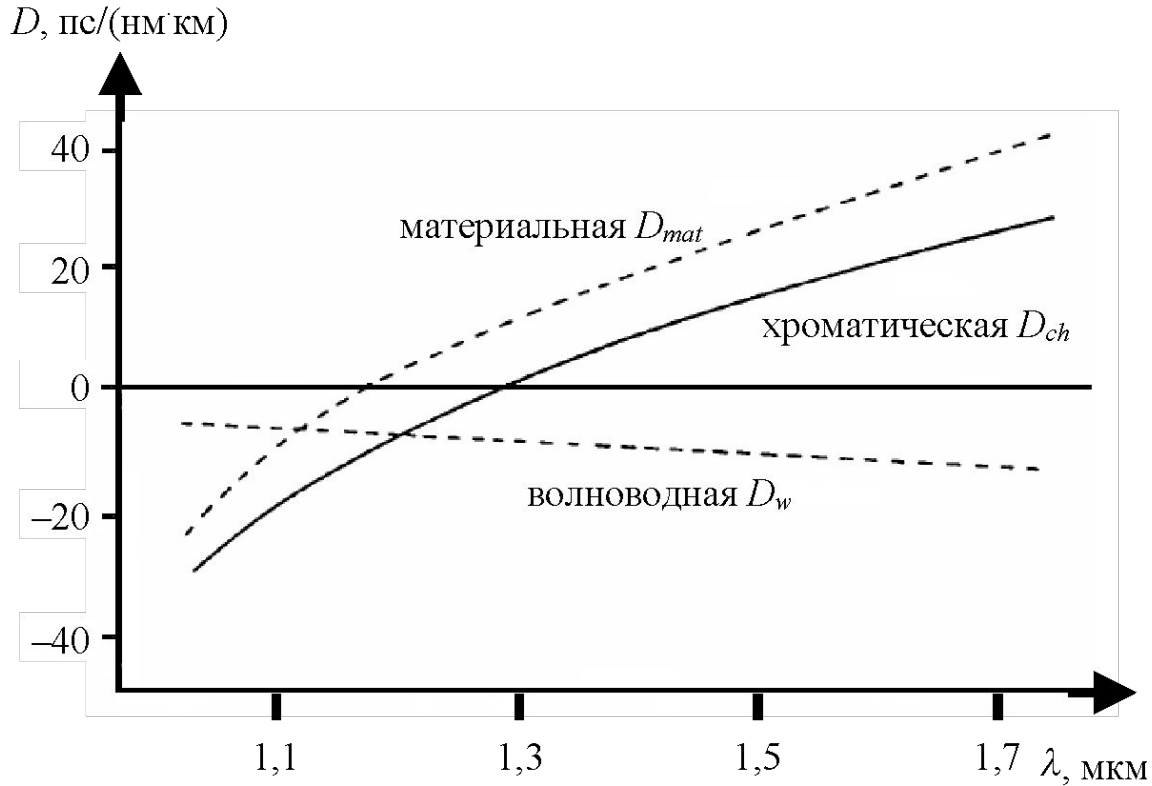


Материальная дисперсия D_{mat} определяется дисперсионными характеристиками материалов, из которых изготовлена сердцевина оптического волокна – кварца и легирующих добавок.



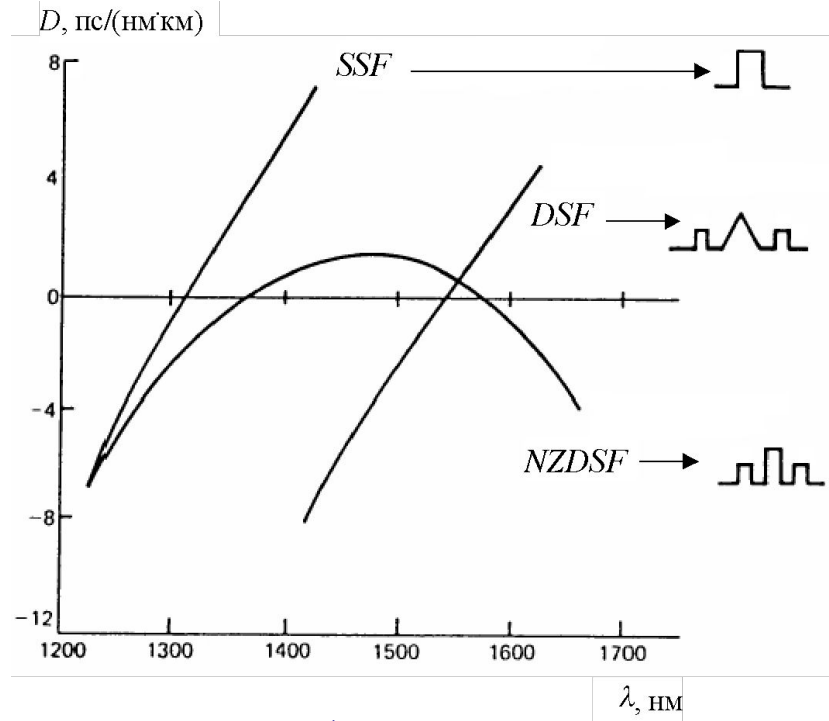
Волноводная дисперсия D_w обусловлена зависимостью групповой скорости распространения моды от длины волны, характер которой определяется формой профиля показателя преломления оптического волокна.

Указанная зависимость определяется пространством, занимаемым модой по отношению к профилю показателя преломления волокна.



SSF (G.652)

Результирующее значение хроматической дисперсии D_{ch} складывается из материальной D_{mat} и волноводной D_w составляющих.



Очевидно, что подбор профиля показателя преломления позволяет соответствующим образом изменить итоговую спектральную характеристику хроматической дисперсии.



Поляризационная модовая дисперсия (PMD – Polarization Mode Dispersion) является следствием двулучепреломления (анизотропии), которое заключается в зависимости показателя преломления от состояния поляризации света.

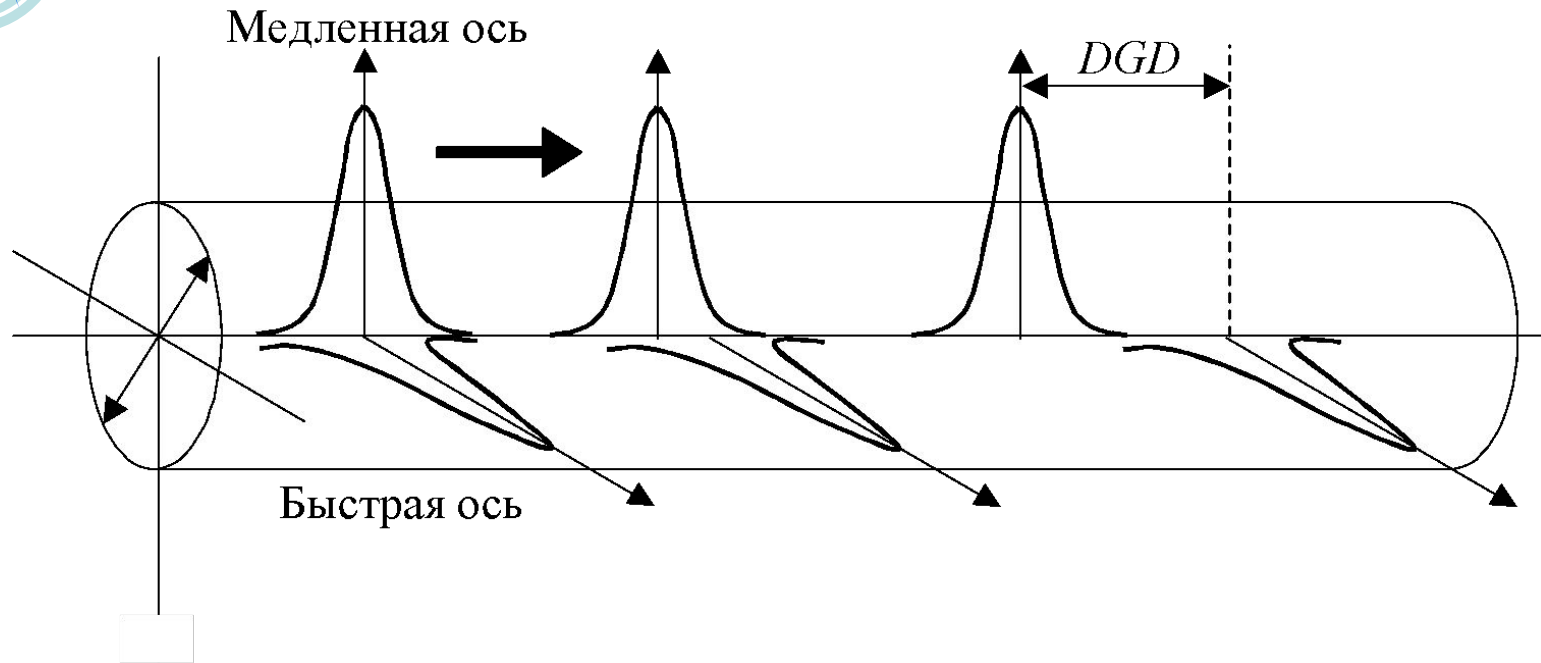
Двулучепреломление обусловлено нарушением круговой симметрии геометрических характеристик или внутренних механических напряжений оптических волокон



В общем случае основную моду распространяющегося в сердцевине одномодового волокна оптического излучения можно представить в виде суперпозиции двух ортогонально-поляризованных мод.

В идеальных волокнах постоянные распространения данных мод одинаковы.

В реальных волокнах, вследствие воздействия различных факторов, образуются “быстрая” и “медленная” оси, вдоль которых моды ортогональной поляризации распространяются с разной скоростью и, соответственно, приходят к концу некоторого участка оптического волокна в разное время.



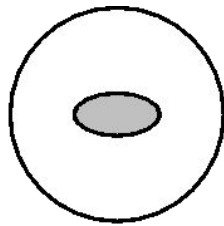
Другими словами, моды разной поляризации приходят с определенной задержкой относительно друг друга, которая получила название дифференциальная групповая задержка (DGD – Differential Group Delay).



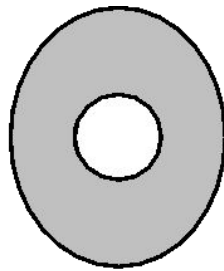
Основные **источники** двулучепреломления можно условно разделить на **внутренние** и **внешние**.

Внутренние источники возникают, в основном, в процессе производства волокна: его вытяжки из заготовки и наложении защитно-упрочняющего покрытия.

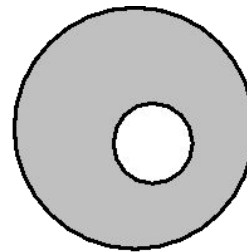
Внешние источники возникают как в процессе производства оптического кабеля (например, укладка ОВ в модули, скрутка модулей при формировании сердечника ОК), так и при строительном-монтажных работах, а также в процессе эксплуатации ОК ВОЛП.



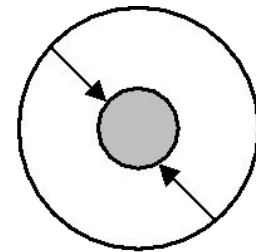
Эллиптичность
сердцевины



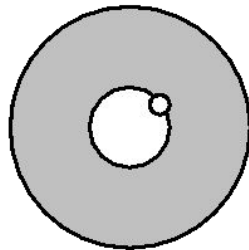
Эллиптичность
оболочки



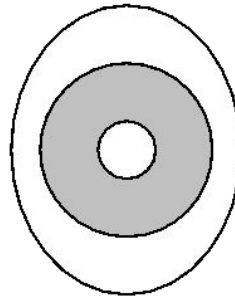
Эксцентриситет
сердцевины и
оболочки



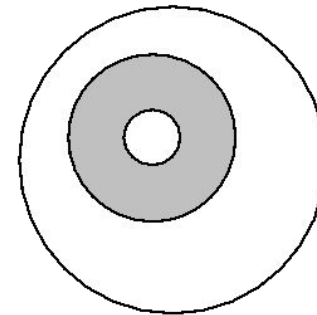
Внутренние
механические
напряжения



Неоднородности
(например, пузырьки
воздуха)

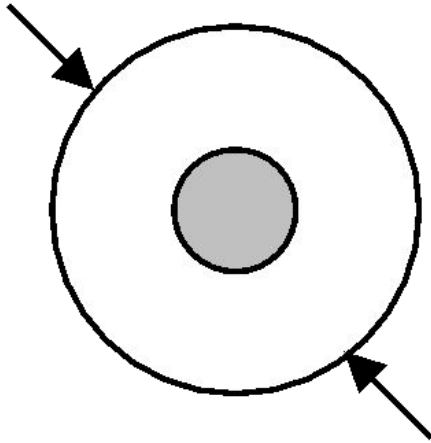


Эллиптичность за-
щитного покрытия

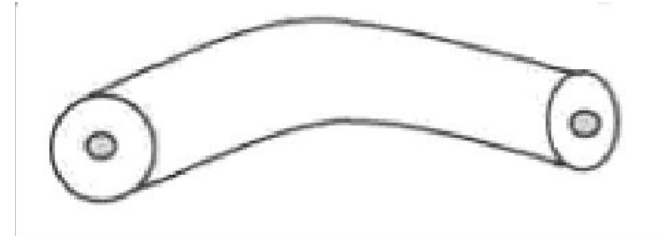


Эксцентриситет
защитного покрытия

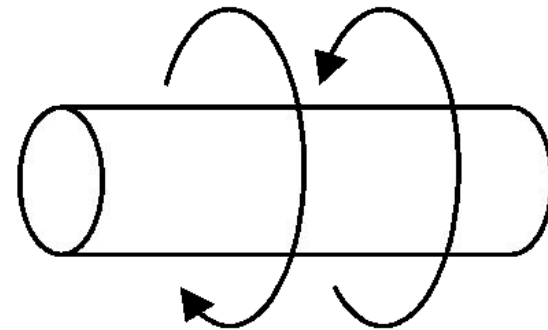
Внутренние источники двулучепреломления



Внешние механические напряжения (сдавливания)



Изгиб



Кручение

Внешние источники двулучепреломления



Кроме того, **воздействия** также можно разделить на **две группы**:

- **статические** (несовершенство технологии производства волокна, кабеля; механические деформации при строительстве);
- **динамические** (вариации температуры окружающей среды, динамическая деформация волокон).

***СПАСИБО
ЗА
ВНИМАНИЕ!***