

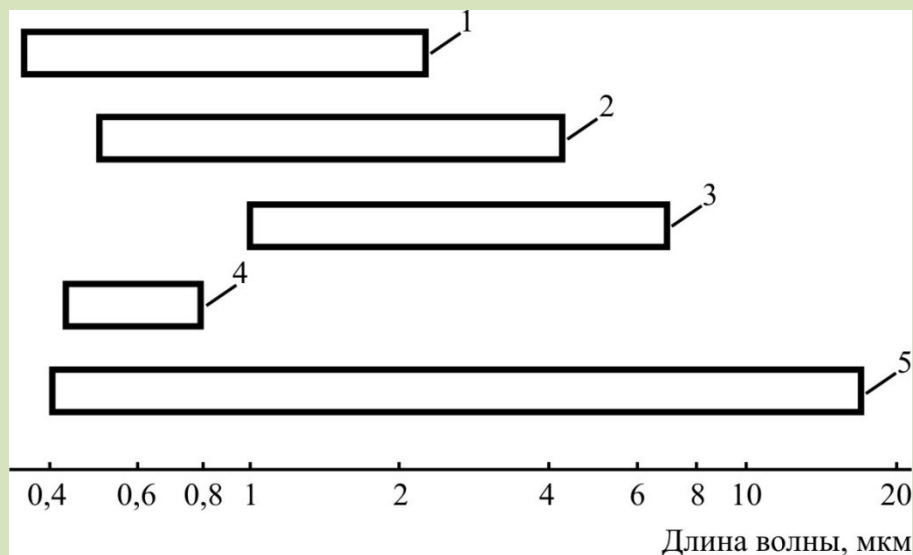
ОВ.

Структура и принцип работы  
параметры ОВ

# Применение ОВ

1. ВОСПИ
2. ВОД физических величин
3. ВОУ

## Материалы ОВ



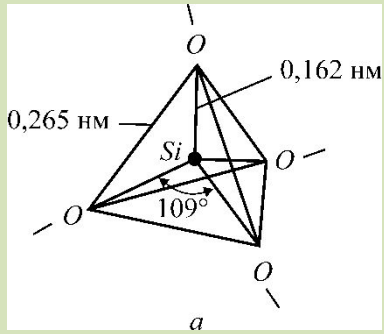
Спектральные рабочие диапазоны ОВ, изготовленных из различных материалов: 1 – кварцевое стекло; 2 – фторидные стекла; 3 – халькогенидные стекла; 4 – полимерные; 5 – галогениды таллия, серебра и т.д.

# Преимущества кварцевых ОВ

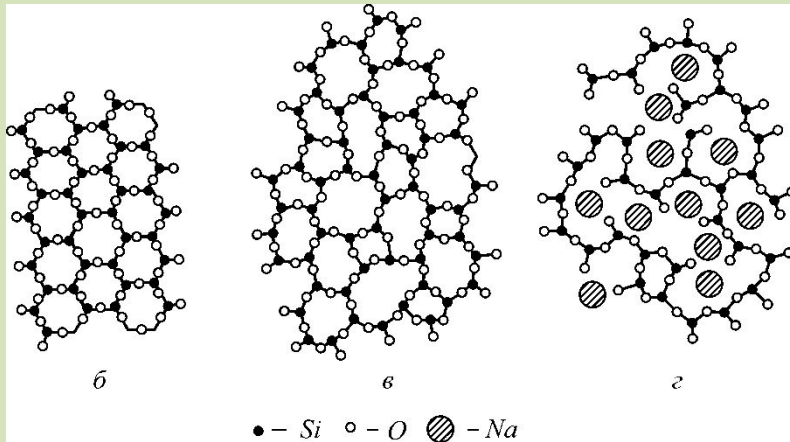
- Работают от УФ-диапазона до ближнего ИК-диапазона с низкими потерями. кварцевое стекло ( $\text{SiO}_2$ ) является моносоединением и обладает значительно большей химической и механической прочностью по сравнению с другими стеклами,
- Сырье (песок, горный хрусталь ...) широко распространено в природе,
- разработана технология получения высокочистых соединений (напр.  $\text{SiCl}_4$  с концентрацией примесей до уровня  $10^{-7} \dots 10^{-8}$  мас. %) и легирующих компонентов

# Основные свойства стекол:

- Рентгеноаморфны,
- Изотропны (если они однородны по составу, свободны от напряжений и дефектов ),
- Кварц в чистом виде прозрачен. Внутренние трещины и дефекты могут придавать белый цвет, примеси – другие цвета,
- Кварц хорошо растворяется в HF,
- Кварц является диэлектриком и пьезоэлектриком,
- Не имеют определенной температуры плавления (затвердевания),
- Свойства стекол зависят от скорости переохлаждения,
- Размягчаются и отвердевают обратимо.



**Тетраэдрическая группировка с отрицательным зарядом  $(SiO_4)^{-4}$**



**Схематическое изображение на плоскости сочленения тетраэдров в структуре кристаллического (б) и стеклообразного кварца (в), а также силикатного стекла (а)**

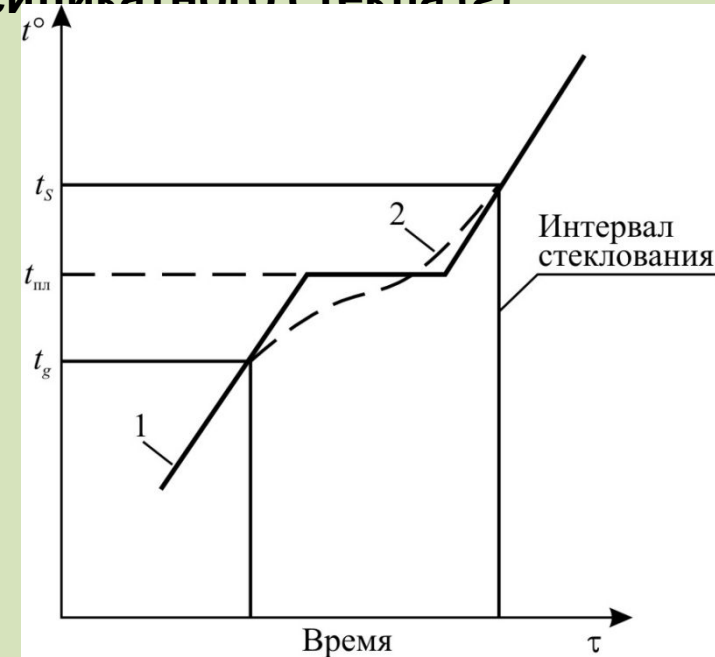
Зависимость температуры образца от времени повышения температуры нагрева: 1 – для кристаллов; 2 – для стекол.

$T_g$  – температура стеклования, соответствует вязкости стекла  $10^{12,3}$  Па·с

$T_s$  - температура размягчения - вязкости  $10^{7,6}$  Па·с

Для кварцевого стекла  $T_g \approx 1100$  °С

$T_s \approx 1600$  °С



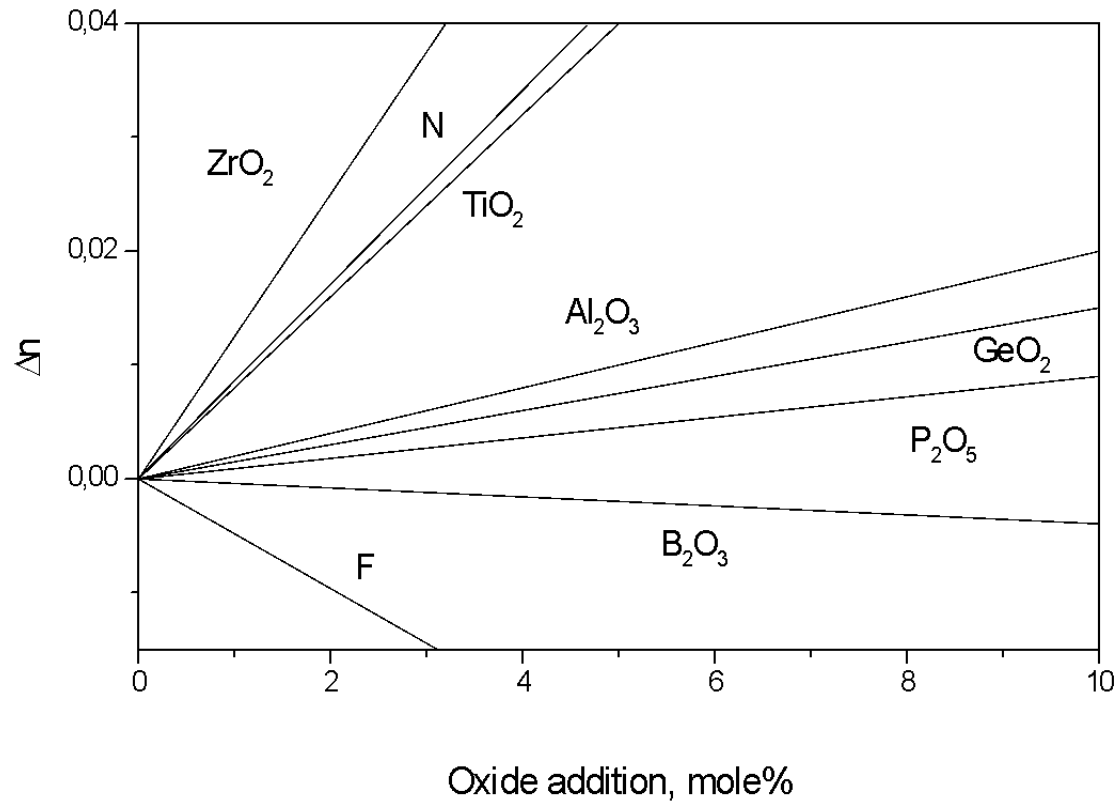
# Вязкость некоторых веществ при температурах плавления

Вещество	Температура плавления, °С	Вязкость, П	Вещество	Температура плавления, °С	Вязкость, П
Na	98	0,01	SiO <sub>2</sub>	1710	10 <sup>7,7</sup>
Fe	1535	0,07	GeO <sub>2</sub>	1115	10 <sup>5,4</sup>
H <sub>2</sub> O	0	0,02	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	450	10 <sup>5</sup>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2050	0,6	As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	309	10 <sup>6</sup>
LiCl	613	0,02	BeF <sub>2</sub>	540	10 <sup>6</sup>

# Основные свойства кварцевого стекла

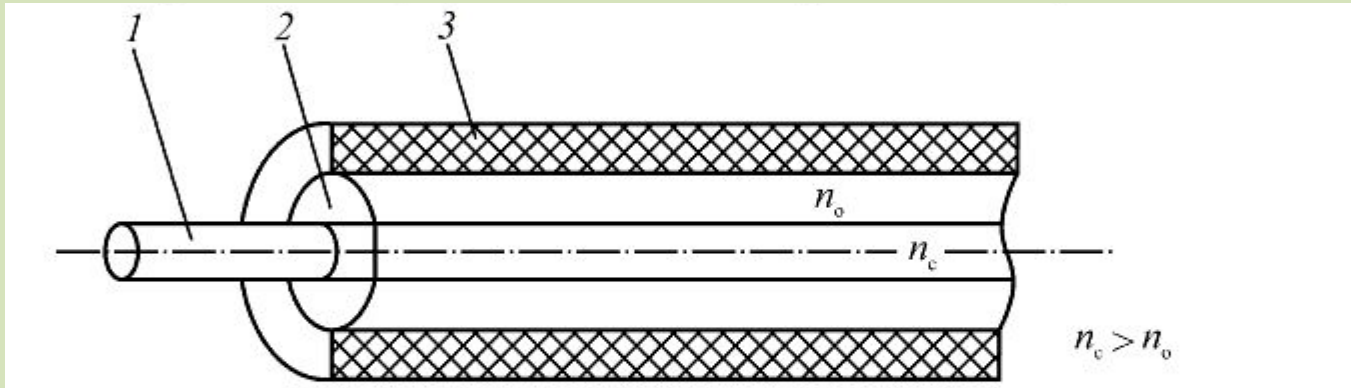
Свойство	Значение
Плотность, г/см <sup>3</sup>	2,20
Показатель преломления	1,458
Коэффициент линейного термического расширения, град <sup>-1</sup>	$5,7 \cdot 10^{-7}$
Теплоемкость, кал/г·град	0,177
Теплопроводность, кал/см·град	0,0033
Микротвердость, кг/мм <sup>2</sup>	703
Прочность, кг/мм <sup>2</sup> :	
стержней	7
волокон	1200

# Материалы, изменяющие показатель преломления SiO<sub>2</sub>



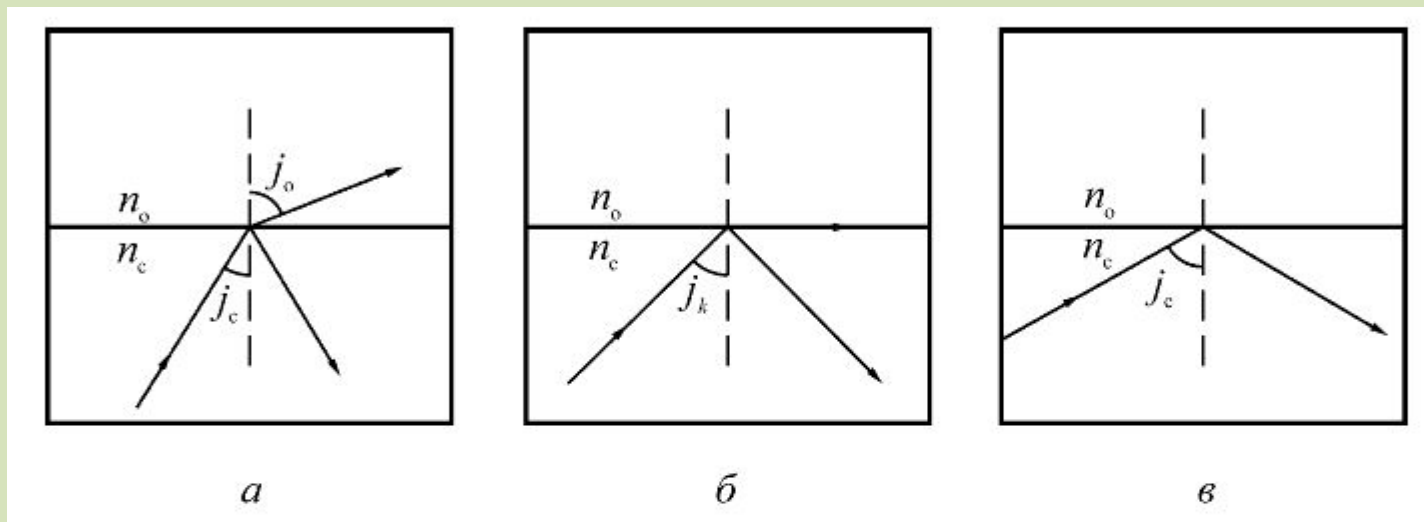


# Структура и принцип работы ОВ



Структура оптического волокна: 1 – сердцевина; 2 – светоотражающая оболочка; 3 – защитно-упрочняющее покрытие

# Структура и принцип работы ОВ



Ход лучей света на границе 2-х сред

$n_c$  и  $n_o$  – ПП сердцевины и оболочки.

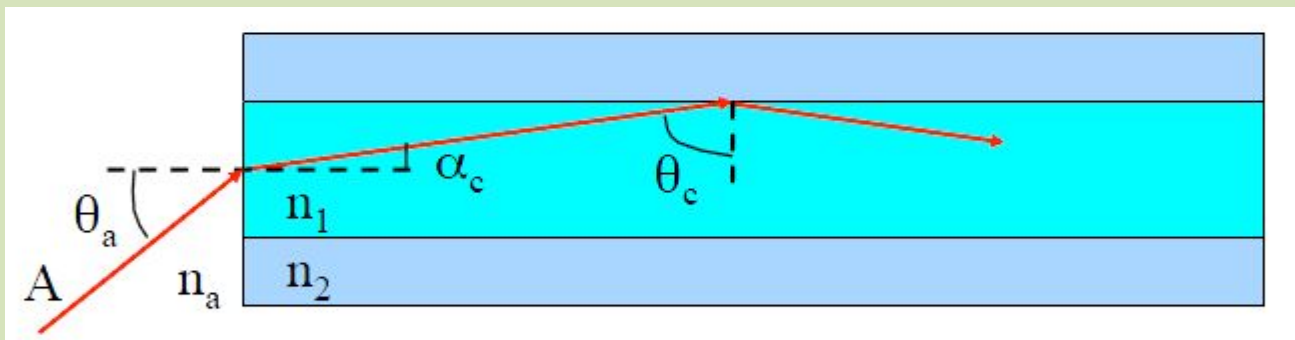
$$n_c \sin j_c = n_o \sin j_o$$

При увеличении  $j_c$ , наступает угол  $j_k$ , при котором получим полное внутреннее отражение.

При  $j_c = j_k$  и  $j_c > j_k$  свет останется внутри сердцевины

# Структура и принцип работы ОВ

При  $\theta_k = \theta_c$   $n_1 \sin \theta_k = n_2 \sin 90^\circ$



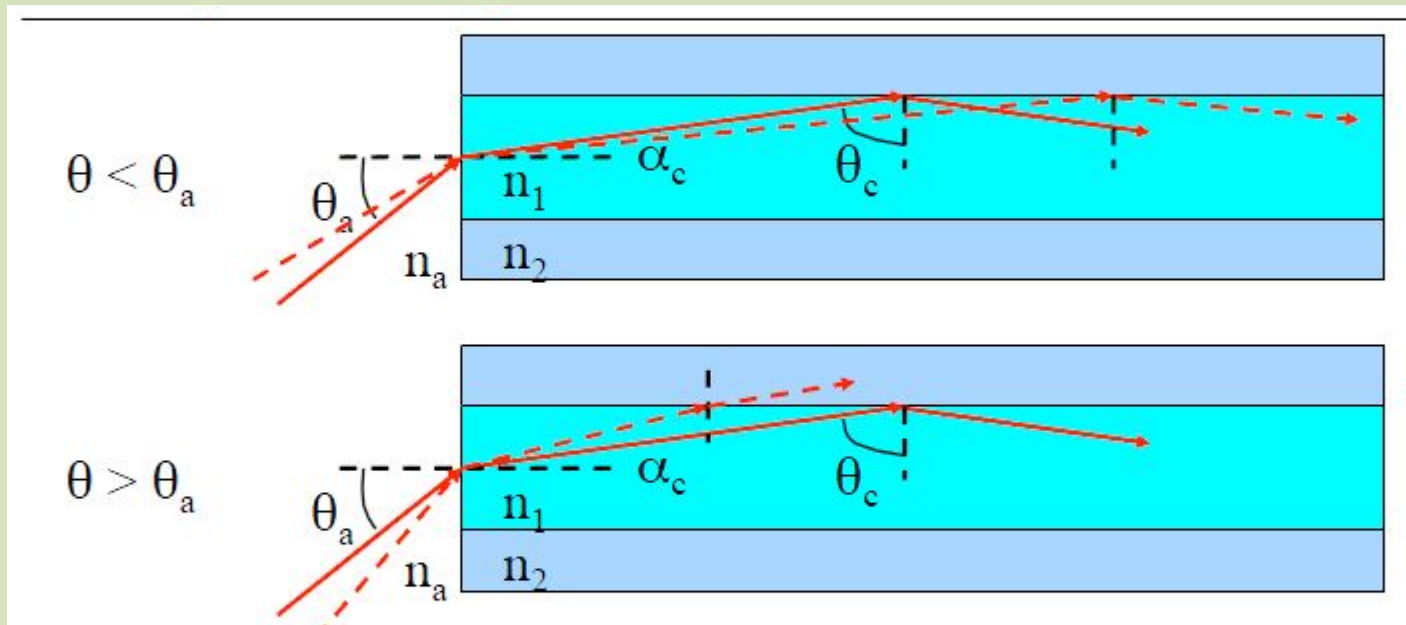
Луч А, падающий под критическим углом  $\theta_c$  на границу раздела сердцевина-оболочка входит в сердцевину волокна под углом  $\theta_a$  к оси волокна и преломляется на границе воздух-сердцевина.

Пример:

$$n_1=1,46, n_2=1,44.$$

$$\theta_k=?$$

# Структура и принцип работы ОВ

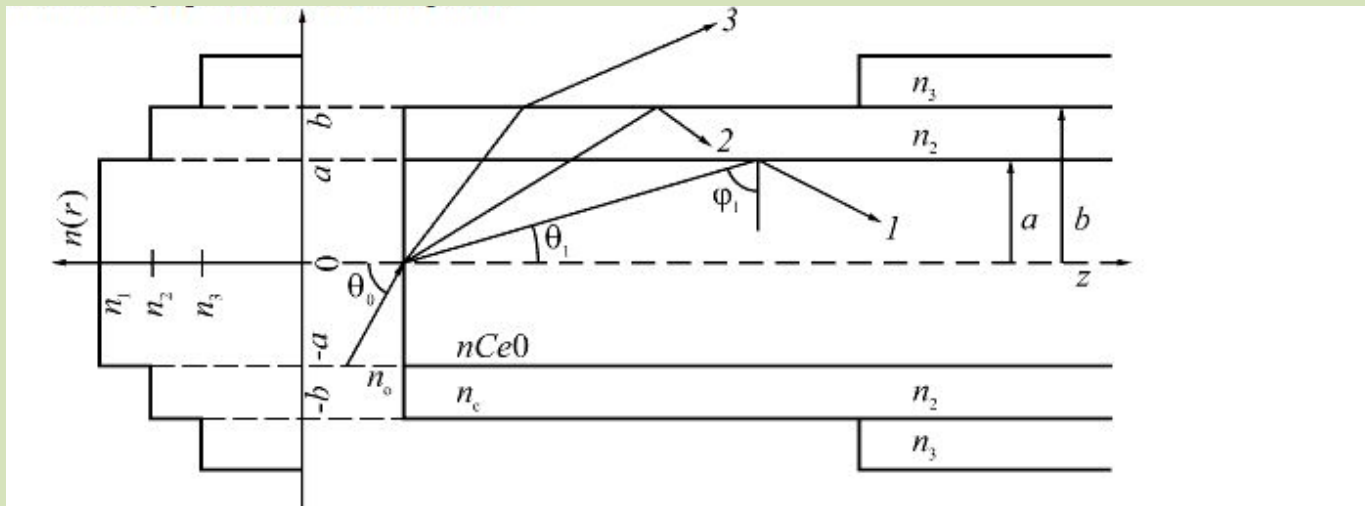


Для любых лучей, попадающих в сердцевину волокна под углом  $> \theta_a$  угол падения на границу раздела сердцевина-оболочка будет меньше  $\theta_c = \theta_{к'}$ ,  $\Rightarrow$  лучи будут вытекать

Пример:  
 $n_1=1,46, n_2=1,44, n_a=1$

$\theta_a=?$

# Структура и принцип работы ОВ

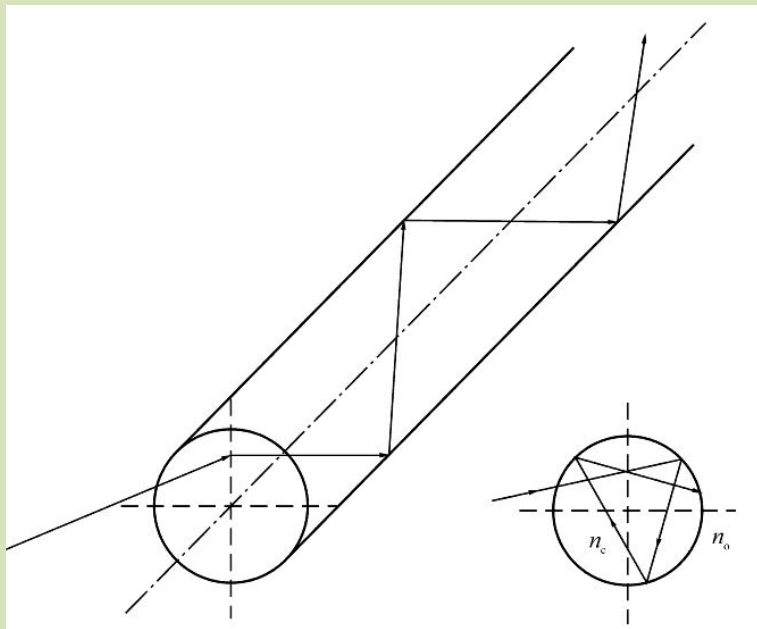


Модель ОВ со ступенчатым профилем показателя преломления:

$n_1$  – ПП сердцевины;  $n_2$  – ПП светоотражающей оболочки;  $n_3$  – ПП материала защитной оболочки

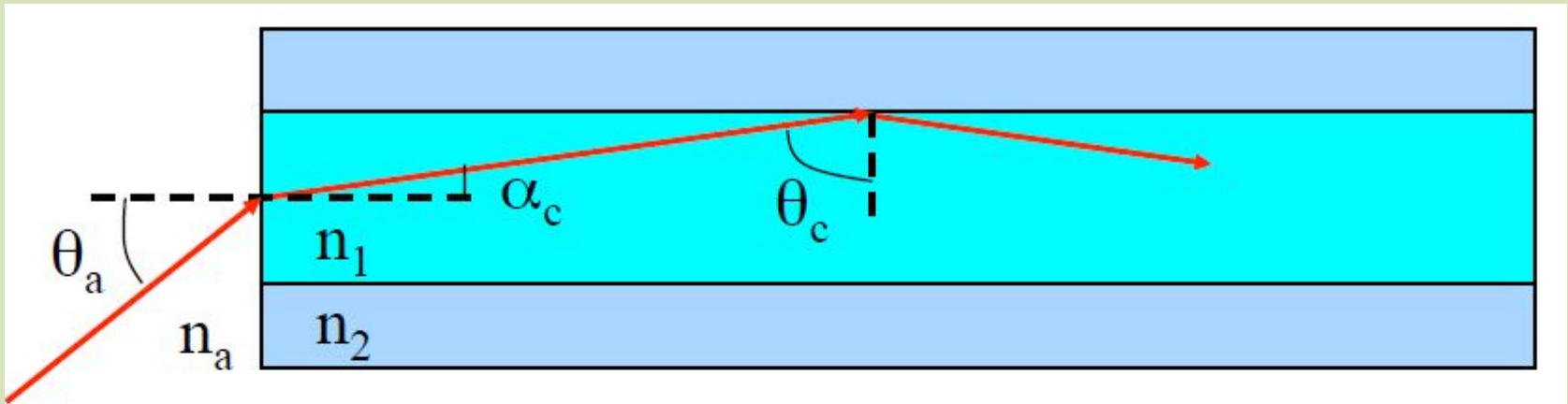
# Структура и принцип работы ОВ

Лучи, распространяющиеся по ОВ, называются направляемыми модами, а те лучи, которые выходят наружу, – вытекающими модами или модами излучения. Различают также меридиональные лучи, которые пересекают ось ОВ, и косые лучи, которые не пересекают эту ось



Траектория прохождения косого луча в ОВ

# Числовая апертура



На границе воздух-сердцевина:

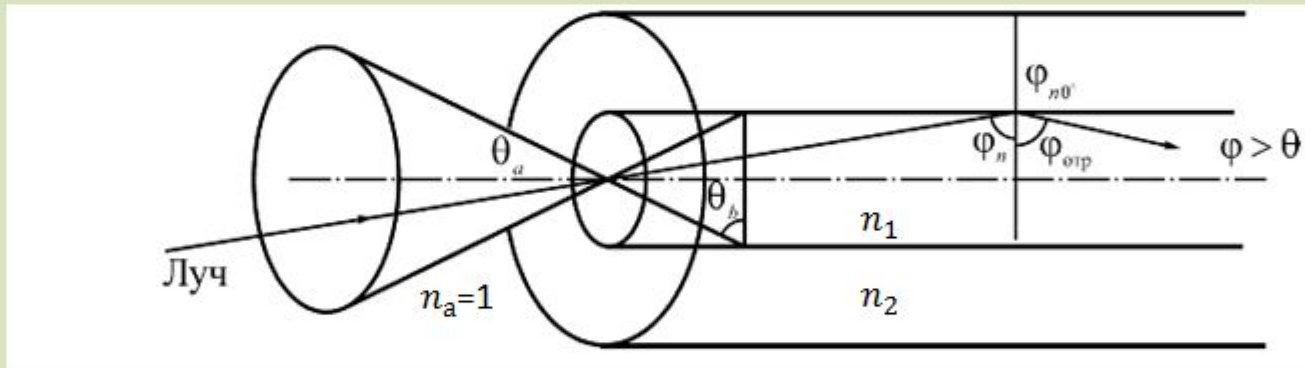
$$n_a \sin \theta_a = n_1 \sin \alpha_c \quad n_a = 1$$

$$\sin \theta_a = n_1 \sin \alpha_c = n_1 \cos \theta_c = n_1 (1 - \sin^2 \theta_c)^{1/2} = n_1 (1 - n_2^2/n_1^2)^{1/2}$$

$$NA = n_a \sin \theta_a = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \sqrt{2n_2 \Delta n}$$

# Числовая апертура

Числовая апертура представляет собой телесный угол, в пределах которого находятся лучи, которые могут распространяться по ОВ



$$NA = n_a \sin \theta_a = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \sqrt{2n_2 \Delta n}$$

Или через относительную разность ПП

$$\Delta = (n_1 - n_2) / n_1 \quad NA = n_1 \sqrt{2\Delta}$$

Пример:

$$n_1 = 1,46, n_2 = 1,44,$$

$$NA = ?$$



# Механизмы потерь в ОВ

**Затухание** в ОВ – это мера ослабления оптической мощности, распространяющейся вдоль ОВ между двумя его поперечными сечениями на данной длине волны. Затухание выражается в **дБ**. **Коэффициент затухания** – это величина затухания на единицу длины волокна (1 км), выражается в дБ/км и записывается как:

$$\alpha = \frac{10}{L} \cdot \lg \frac{I_{\text{ВХ}}}{I_{\text{ВЫХ}}}$$

$$\alpha = -\frac{10}{L} \cdot \lg \frac{I_{\text{ВЫХ}}}{I_{\text{ВХ}}}$$

Если  $\alpha = 1$  дБ/км, то оптический сигнал ослабевает на  $\sim 26\%$  после прохождения через километровый отрезок ОВ.

Если  $\alpha = 0,2$  дБ/км, то сигнал ослабнет всего на  $\sim 5\%$ .

# Механизмы потерь в ОВ

$$\alpha_{\text{пол}} = \alpha_{\text{рэл}} + \alpha_{\text{сер}} + \alpha_{\text{уф}} + \alpha_{\text{ик}} + \alpha_{\text{прим}} + \alpha_{\text{он}}$$

$\alpha_{\text{рэл}}$  – потери на рэлеевское рассеяние (когда размер неоднородностей меньше длины волны света);

$\alpha_{\text{сер}}$  – "серые" потери на рассеяние (когда размер неоднородностей больше длины волны света);

$\alpha_{\text{уф}}$  – поглощение в УФ части спектра, обусловленное электронными полосами поглощения;

$\alpha_{\text{ик}}$  – фононное поглощение в ИК области, связанное с колебаниями химических связей компонентов стекла;

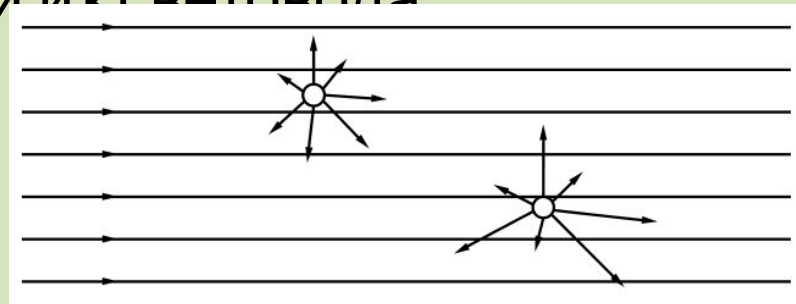
$\alpha_{\text{прим}}$  – поглощение, вызываемое примесями переходных ("красящих") металлов (*Fe, Cu, Ni, Cr, V, Mo, Co*);

$\alpha_{\text{он}}$  – поглощение, обусловленное гидроксильными ионами, присутствующими в стекле.

# Потери на рассеяние

## Рэлеевское рассеяние

- рассеяние света на микронеоднородностях в среде, через которую распространяется электромагнитная волна, в результате чего может измениться угол распространения и свет может выйти из световода



**Причины:** флуктуации плотности и флуктуации состава. Наличие плотных и менее плотных областей можно отнести к флуктуациям теплового происхождения, возникающим из-за броуновского движения компонентов в жидком стекле перед тем, как оно затвердеет. Поскольку различные компоненты стекла могут иметь различный ПП, то флуктуации состава могут приводить к флуктуациям ПП и, соответственно, к рассеянию. Чем выше концентрация легирующих компонентов, тем больше вероятность флуктуаций состава и больше рассеяние.

# Потери на рассеяние

## Рэлеевское рассеяние

$$\alpha_{\text{рэл}} = 4,34 \frac{8\pi^3 (n_c - 1)}{3\lambda^4} \cdot \beta \cdot k \cdot T \cdot 10^3,$$

**Где:**

$n_c$  – ПП материала сердцевины кварцевого ОВ, равный 1,48–1,5;

$k$  – постоянная Больцмана, равная  $1,38 \times 10^{-23}$  Дж/К;

$T$  – температура затвердения кварцевого стекла при вытяжке, равная  $\sim 1500$  К;

$\beta$  – коэффициент сжимаемости, равный для кварца  $8,1 \cdot 10^{-11}$  м<sup>2</sup>/Н;

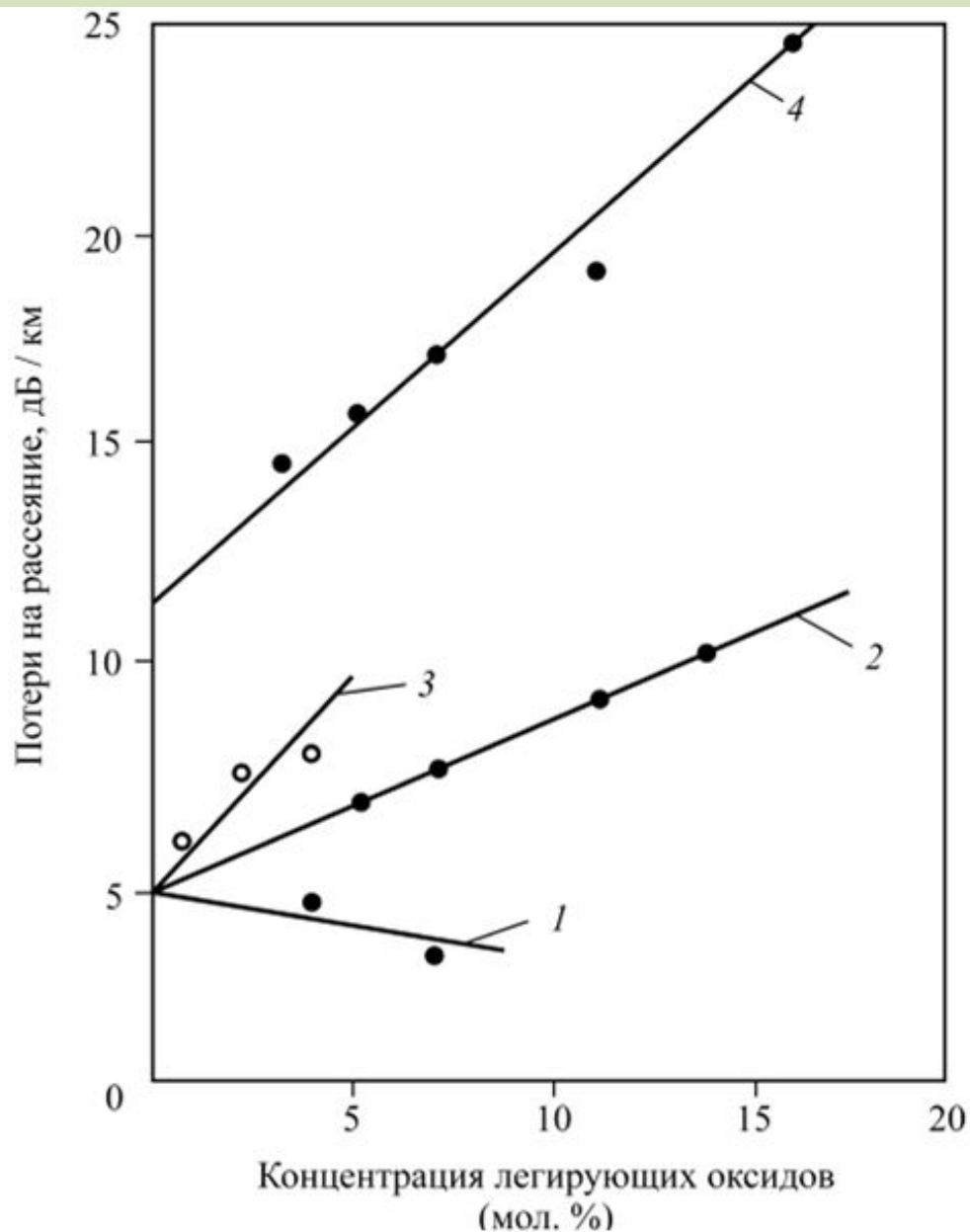
$\lambda$  – длина волны света, мкм.

Чаще пользуются упрощенным выражением

$$\alpha_{\text{рэл}} = A\lambda^{-4}$$

$A$  – коэффициент рэлеевского рассеяния. Растет с ростом легирования сердцевины, с ростом  $T_{\text{выт}}$ . По характеру зависимости  $A(\lambda)$  можно судить об основном механизме потерь. Для кварцевого стекла  $A =$  от 0,7 до 1,0

# Рэлеевское рассеяние



Зависимости потерь на рассеяние от концентрации легирующих примесей: 1 -  $P_2O_5$ ; 2 -  $GeO_2$ ; 3 -  $B_2O_3$  (для  $\lambda = 0,83$  мкм); 4 -  $GeO_2$  (для  $\lambda = 0,51$  мкм)

# Потери на рассеяние

## Рэлеевское рассеяние

и

Если зависимость  $A(x)$  линейная, то потери обусловлены рэлеевским рассеянием и наклон прямой позволяет определить коэффициент рэлеевского рассеяния, а отрезок, отсекаемый на оси ординат, составляет величину "серых" потерь. Если эта зависимость носит нелинейный характер, то имеют место другие механизмы потерь

- "Серые" потери вызваны крупными неоднородностями в ОВ (например, газовые пузыри, неровная граница между сердцевинной и оболочкой и другие несовершенства) и не зависят от длины волны

# Потери на рассеяние

## Другие причины

- Рассеяние за счет кручения ОВ, флуктуации геометрических размеров,
- В значительной степени зависит от легирующих и загрязняющих включений,
- Зависит от термической и механической «истории» стекла при производстве, такие как излишние растягивающие напряжения при вытяжке ОВ и другие механические напряжения
- Потери на рассеяние можно минимизировать оптимизацией процесса производства ОВ, правильным выбором сырья для производства и тщательной обработкой кварца.

# Потери на поглощение

- Искривления, напряжения и колебания в решетке кварца,
- Вакансии в решетке (немостииковые дырочные центры),
- колебания межатомных связей (ИК-поглощение),
- Нарушения межатомных связей
- Межузловые атомы
- Включения и примеси: гидроксильные группы (ОН и  $\text{H}_2$ ), ионы металлов
- Поглощение на электронных переходах (УФ-поглощение)



# Потери на поглощение

- УФ-поглощение обусловлено электронными переходами и зависит от энергии фотона, т.е. длины волны излучения. УФ-поглощение характерно для области малых длин волн излучения

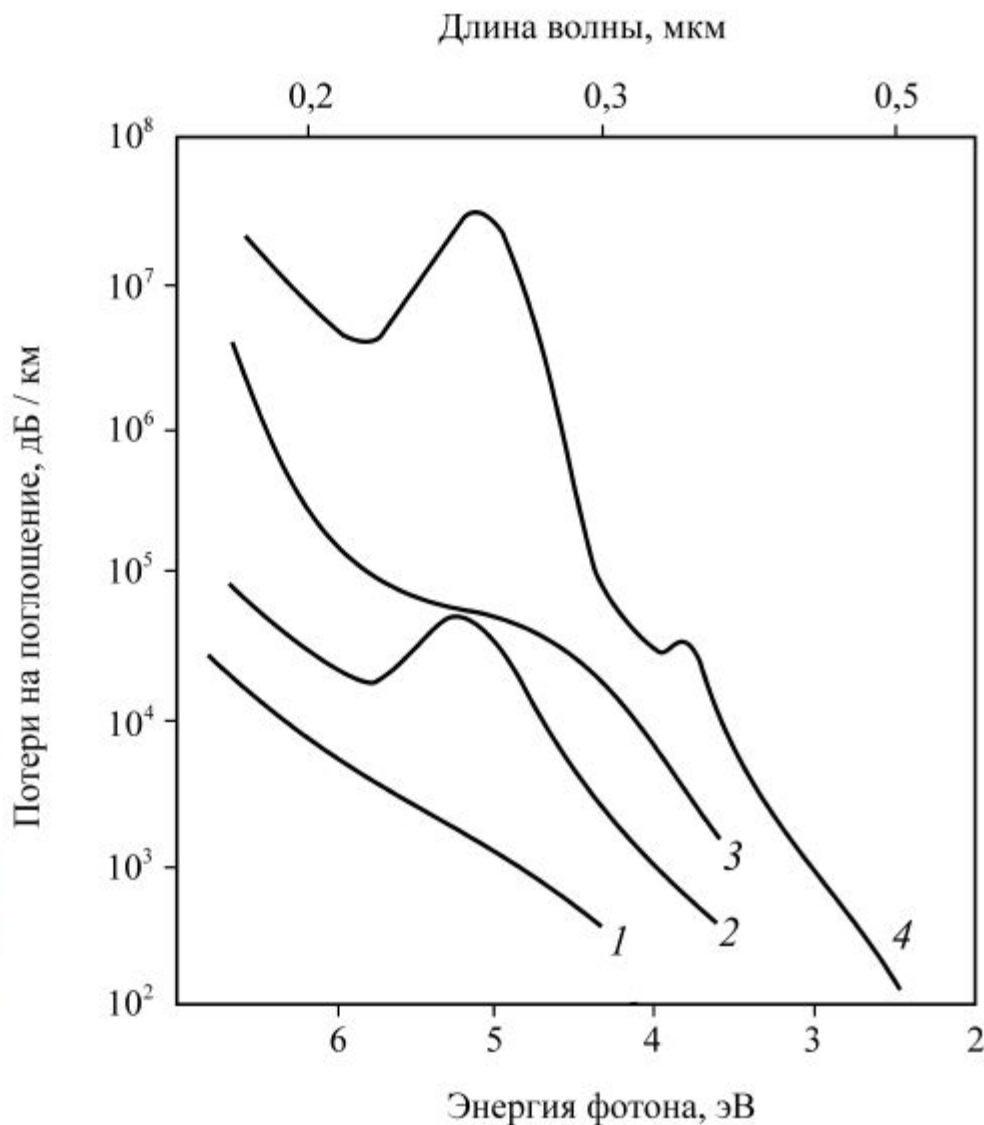
$$\alpha_{\text{уф}} = B_1 \cdot e^{\frac{B_2}{\lambda}}$$

$$B_1 = 0,015 X_{\text{Ge}} / (44,6 X_{\text{Ge}} + 60) \text{ dB/km}, B_2 = 4,64$$

( $X_{\text{Ge}}$  молярная доля  $\text{GeO}_2$  в кварце)

# Потери на поглощение

## - УФ-поглощение



Зависимости потерь на поглощение в УФ-диапазоне от энергии фотонов для чистого (1) и легированного кварцевого стекла: 2 – B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 3 – P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>; 4 – GeO<sub>2</sub>

Пики поглощения для стекла GeO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>: 5,12 эВ (242 нм), 3,75 эВ (330 нм)  
На длинах волн более 800 нм потери <<1 дБ/км

# Потери на поглощение

ИК-поглощение обусловлено взаимодействием фотонов с низкой энергией (излучение в диапазоне больших длин волн) с колебательными состояниями вещества (колебания связей между компонентами стекла). За счет такого взаимодействия энергия фотонов частично переходит в тепловую энергию.

$$\alpha_{\text{ИК}} = C_1 \cdot e^{\frac{-C_2}{\lambda}}$$

$C_1$  ([дБ/км], для стекла  $\text{GeO}_2\text{-SiO}_2$   $7,8 \times 10^{11}$ ) и  $C_2$  (Const=44.48  $\mu\text{m}$ ) – коэффициенты, зависящие от мольных долей легирующих элементов

Обусловлены:

- Кручение, растяжение, изгибания в кварцевой сетке Si - O - Si,
- Кислородные вакансии Si - Si (образуются до вытяжки ОВ),
- Разрыв связи Si – O, или немостиковый кислород Si - O Si

# Потери на поглощение

ИК-

поглощение

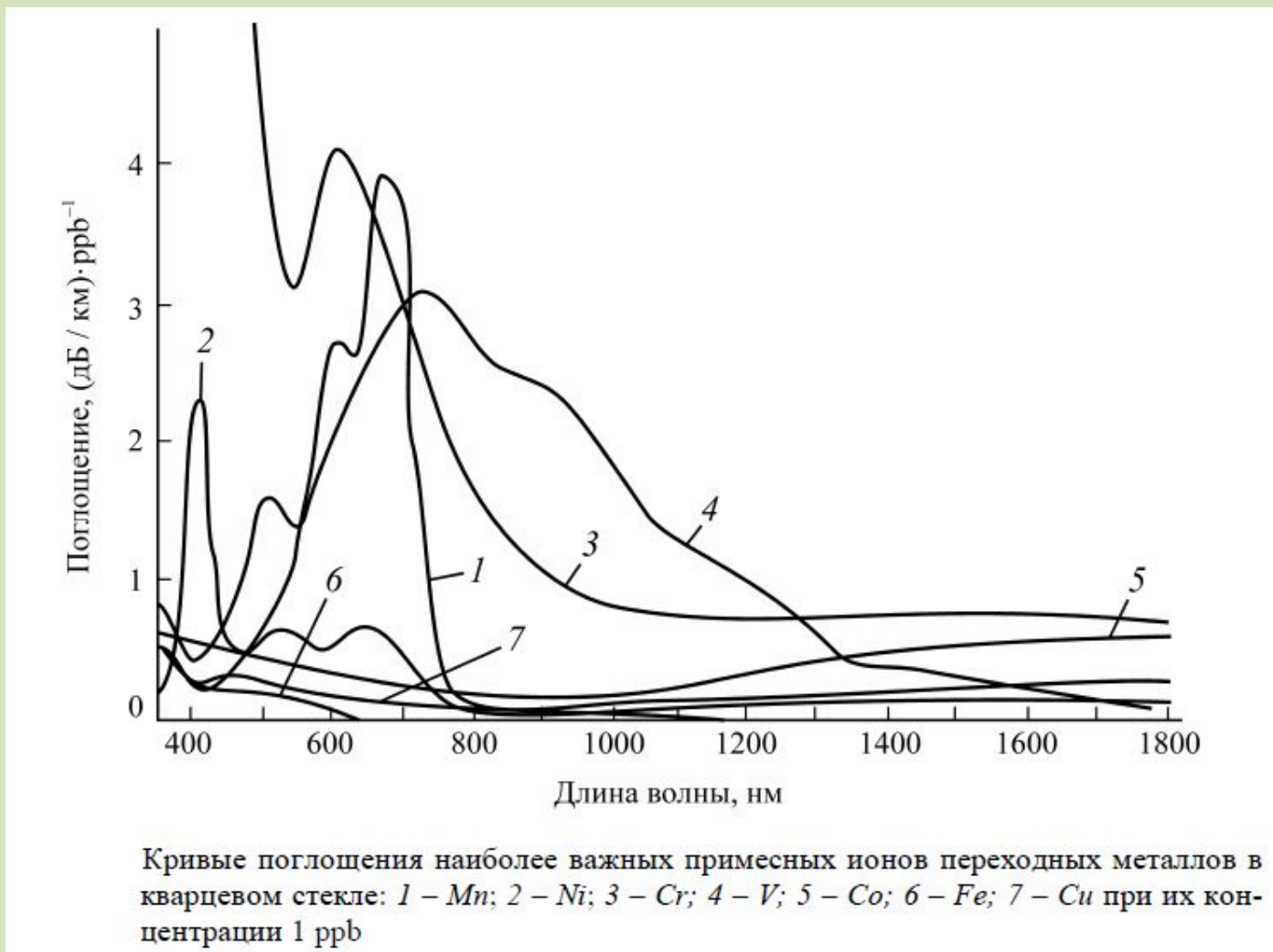
Длины волн, соответствующие частотам продольных колебаний (пик поглощения) для связей между компонентами, наиболее широко применяемыми в волоконной оптике:

Связь	Длина волны, мкм
Si-O	9,0
B-O	7,3
P-O	8,0
Ge-O	11,0

В германо-силикатном стекле ИК-поглощение большей частью обусловлено колебаниями и напряжениями в сетке Si - O - Si

# Потери на поглощение

## Поглощение на



1 ppb -  $10^{-7}$  масс. %/ содержание наиболее распространенных примесей  $Cu^{+2}$  и  $Fe^{+3}$  не должно превышать  $10^{-8}$  масс. %

# Потери на поглощение

Поглощение на ОН-

группах

Макс. Поглощение (колебания связи) – 2,72 мкм.

Обертоны приводят к поглощению на длинах волн:

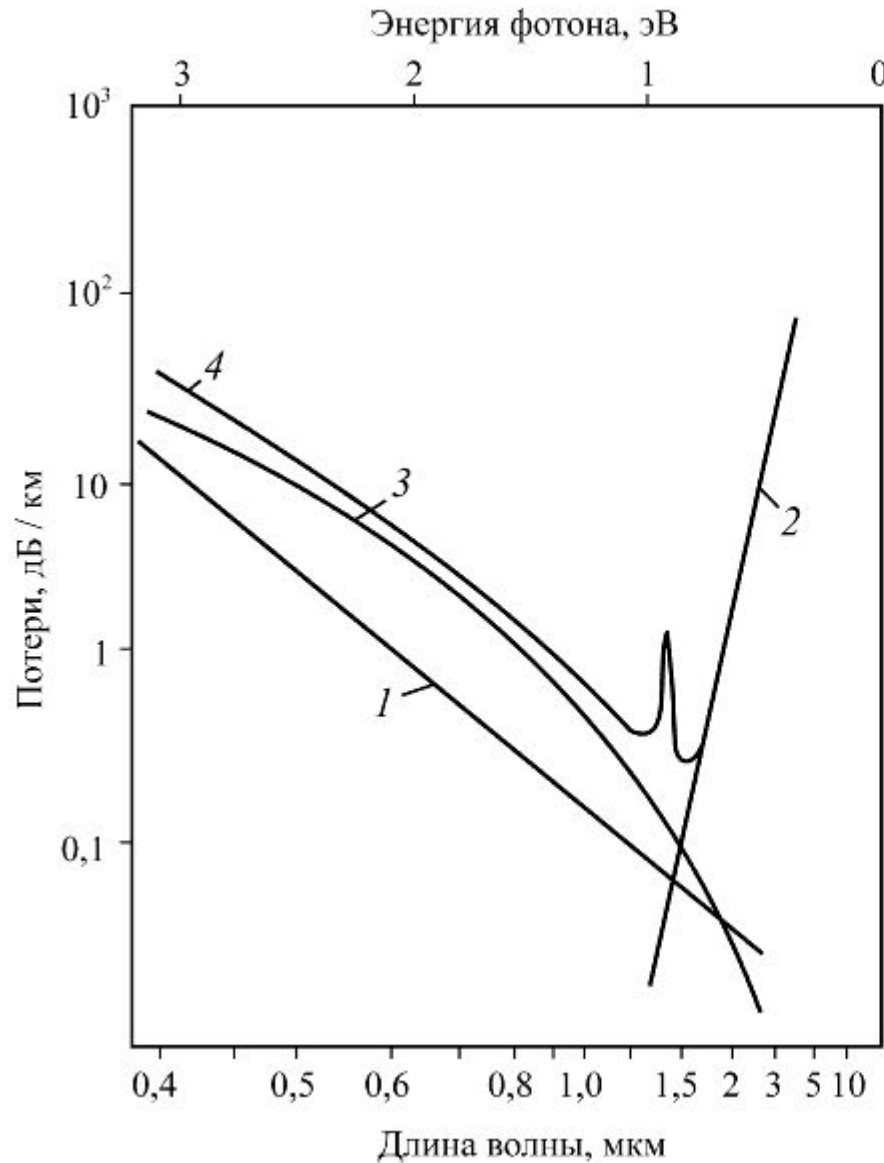
Соединения ОН-групп	$\lambda_{\text{пог}}$ (обертоны), мкм
Si-OH	1,38; 1,24; 0,95; 0,75
Ge-OH	1,42
P-OH	1,6

Содержание 1 ppm ( $10^{-4}$  масс. %) гидроксильных групп в ОВ дает полосу поглощения на 1,38 мкм интенсивностью ~ 55 дБ/км. Необходимо снизить концентрацию ОН-групп до уровня ~  $10^{-7}$  масс. %.

Потери @ 1300 нм составляют 1,6% от уровня пика потерь на ОН-группах (1383 нм). А потери @ 1550 нм – 0,8 % от уровня пика.



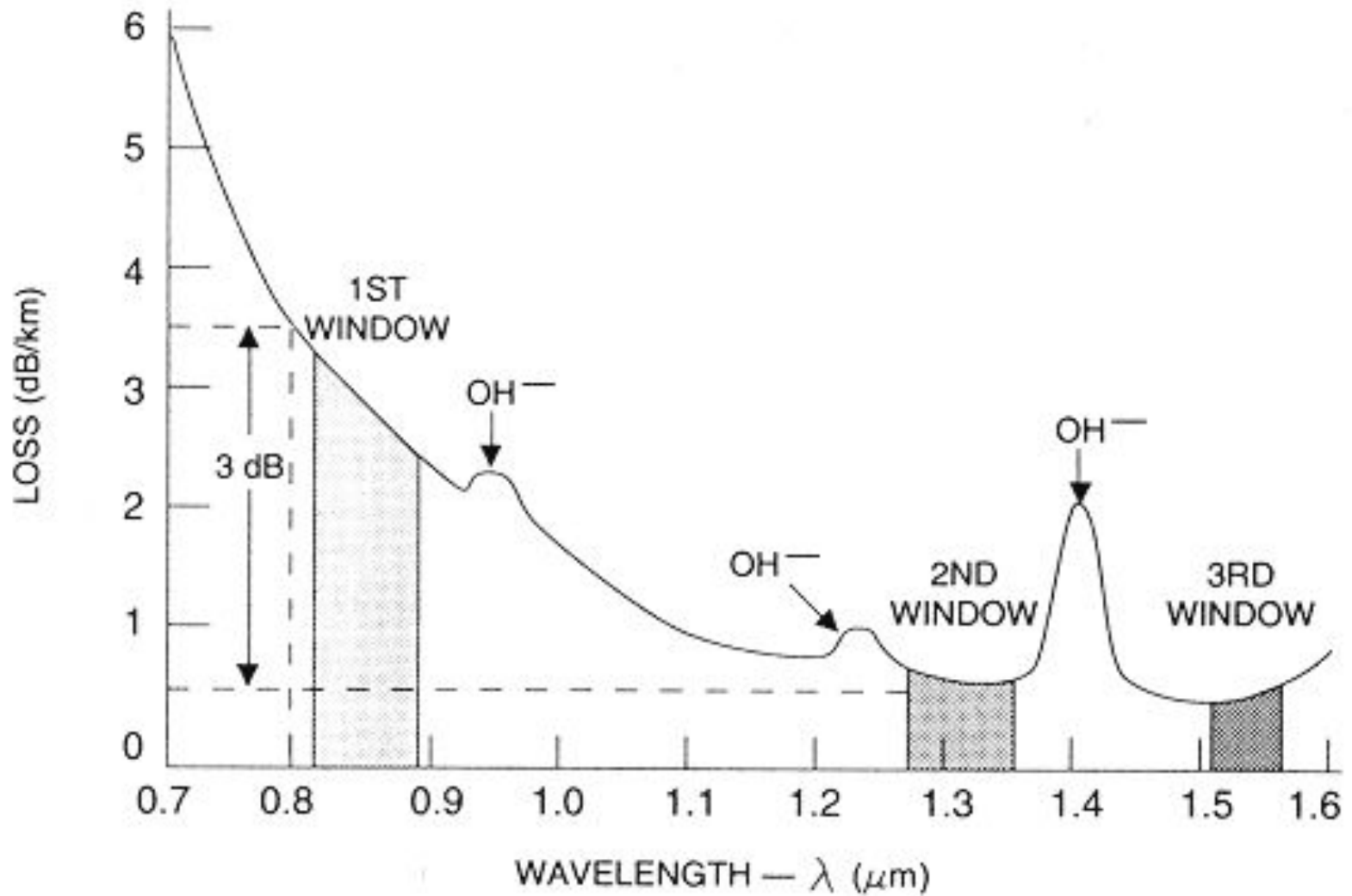
# Оптические потери



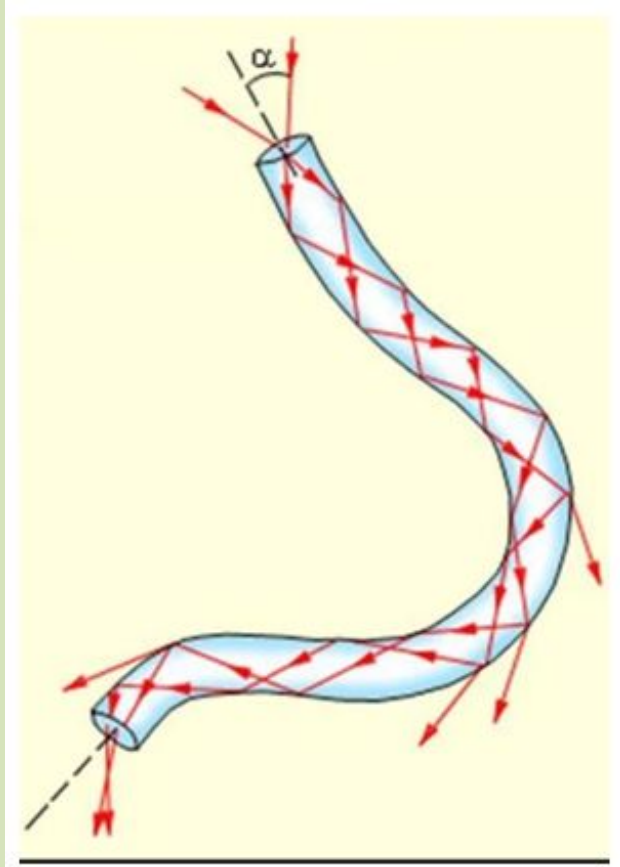
Основные составляющие потерь для кварцевых ОВ:  
1 – хвост УФ-поглощения;  
2 – многофононное поглощение;  
3 – рэлеевское рассеяние;  
4 – полные потери



# Оптические потери

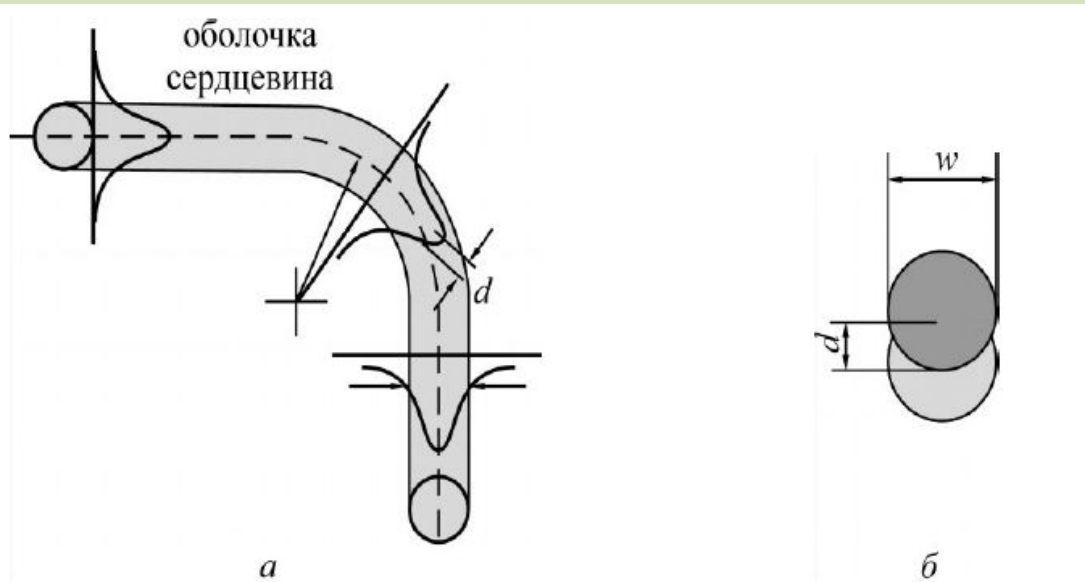


# Изгибные потери



# Изгибные потери

- потери возникают в месте соединения прямого и изогнутого волокна. Обусловлены они тем, что в изогнутом волокне центр модового пятна смещен относительно оси волокна на некоторую величину, зависящую от радиуса изгиба волокна. В результате модовые пятна прямого и изогнутого волокна в месте их соединения оказываются смещенными друг относительно друга на эту же величину. Поэтому только часть мощности моды "прямого" волокна передается моде изогнутого волокна, а оставшаяся мощность преобразуется в оболочечные моды и,



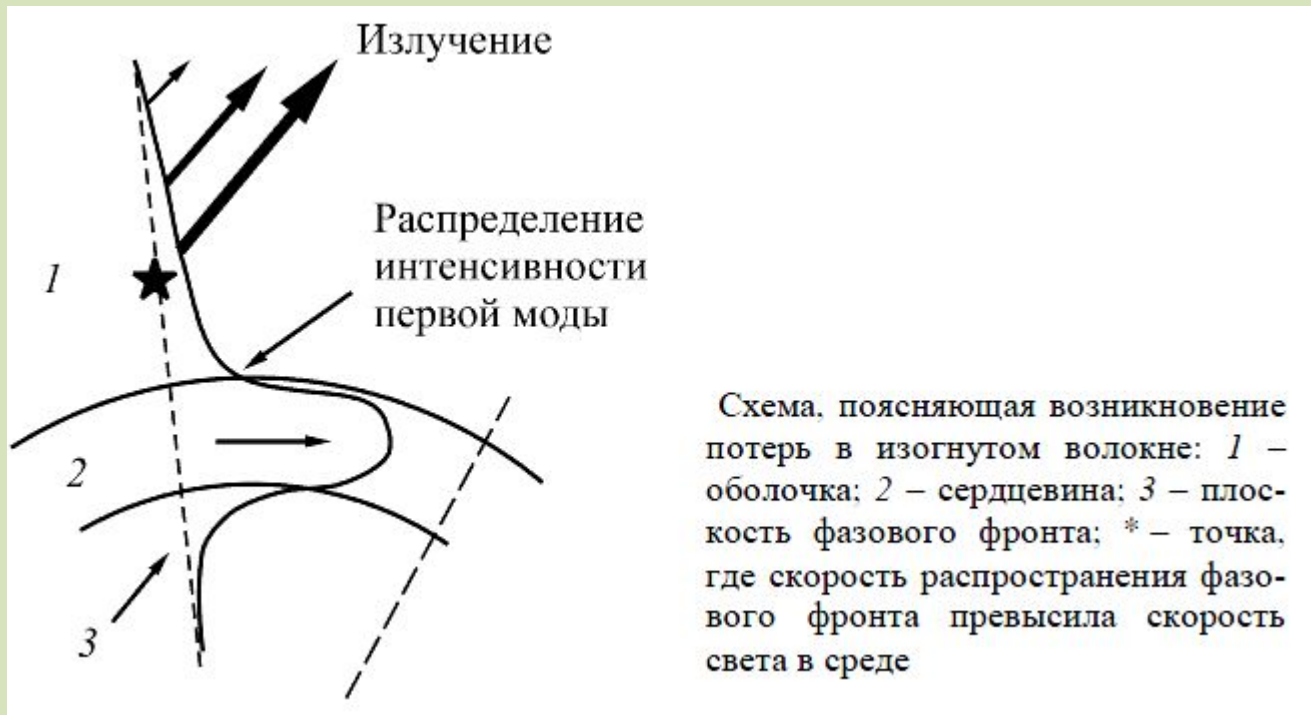
Схема, поясняющая причину возникновения потерь при соединении прямого и изогнутого волокна:

*а* – в изогнутом волокне центр модового пятна смещен относительно оси волокна на некоторую величину  $d$ ;

*б* – в месте соединения прямого и изогнутого волокон их модовые пятна  $w$  смещены относительно друг друга на величину  $d$

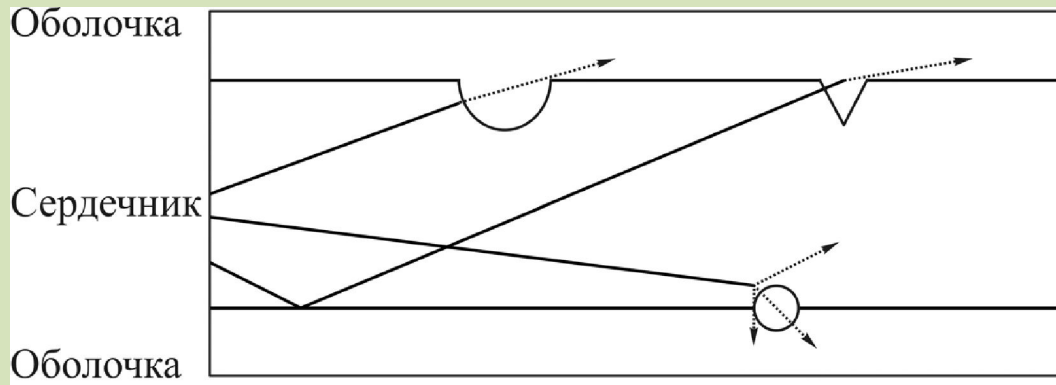
# Изгибные потери

- мощность теряется и непосредственно в изогнутом волокне. В изогнутом волокне периферийная часть моды распространяется со скоростью больше скорости света, эта часть моды излучается в оболочку волокна и, в конечном счете, теряется. Величина этих потерь тем выше, чем больше число витков изогнутого волокна и чем меньше радиус его изгиба.

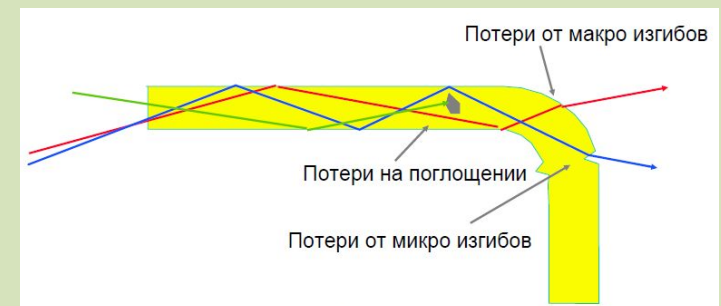
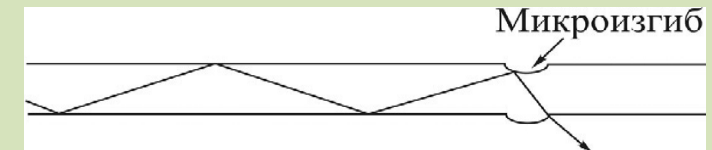


# микроизгибные потери и потери на неоднородностях

- Неоднородности изготовления, например изменение размеров диаметра или круглой формы сердечника, наличие пустот в стекле и дефектов на границе сердечник – оболочка, неравномерное распределение легирующих добавок, могут вызвать потери на рассеяние.
- микроизгибные потери связаны с небольшими вариациями профиля границы сердцевина – оптическая оболочка



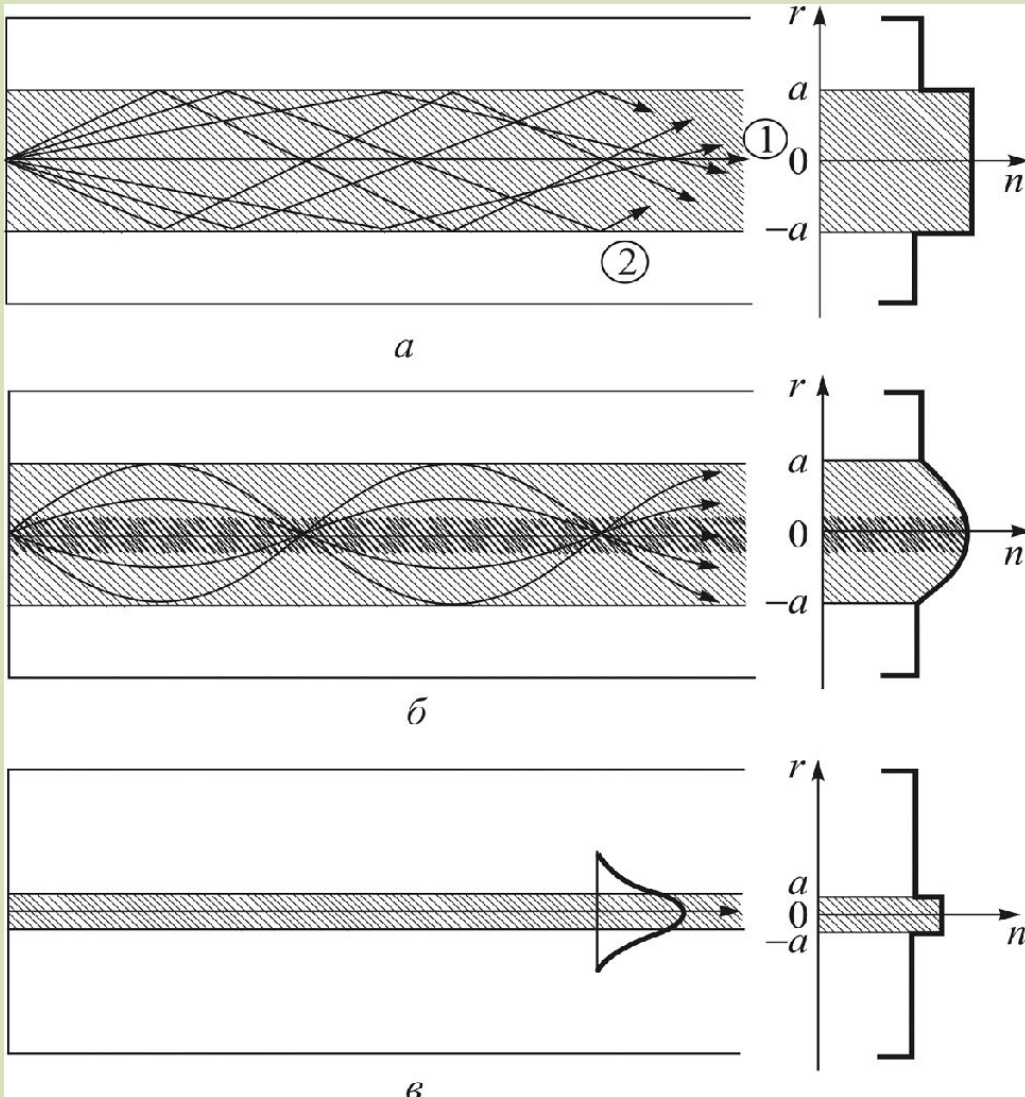
Потери на рассеяние, связанные с неоднородностью



Распространение света в сердцевине и влияние на него изгибных, микроизгибных, поглощающих дефектов

# Основные виды ОВ и их ППП

Существует 3 основных вида ОВ:



а – Многомодовое ОВ со ступенчатым профилем показателя преломления (ППП);  $D_c$  – от 50 до 970 мкм.

б – Многомодовое ОВ с градиентным ППП;  $D_c$  – 50, 62,5 мкм (редко 85 мкм).

в – одномодовое ОВ со ступенчатым ППП,  $D_c$  5 – 10 мкм

# Поле моды.

## Диаметр поля моды

- Характерный поперечный размер области локализации поля основной моды оптического волокна, в котором сосредоточена основная доля оптической мощности.

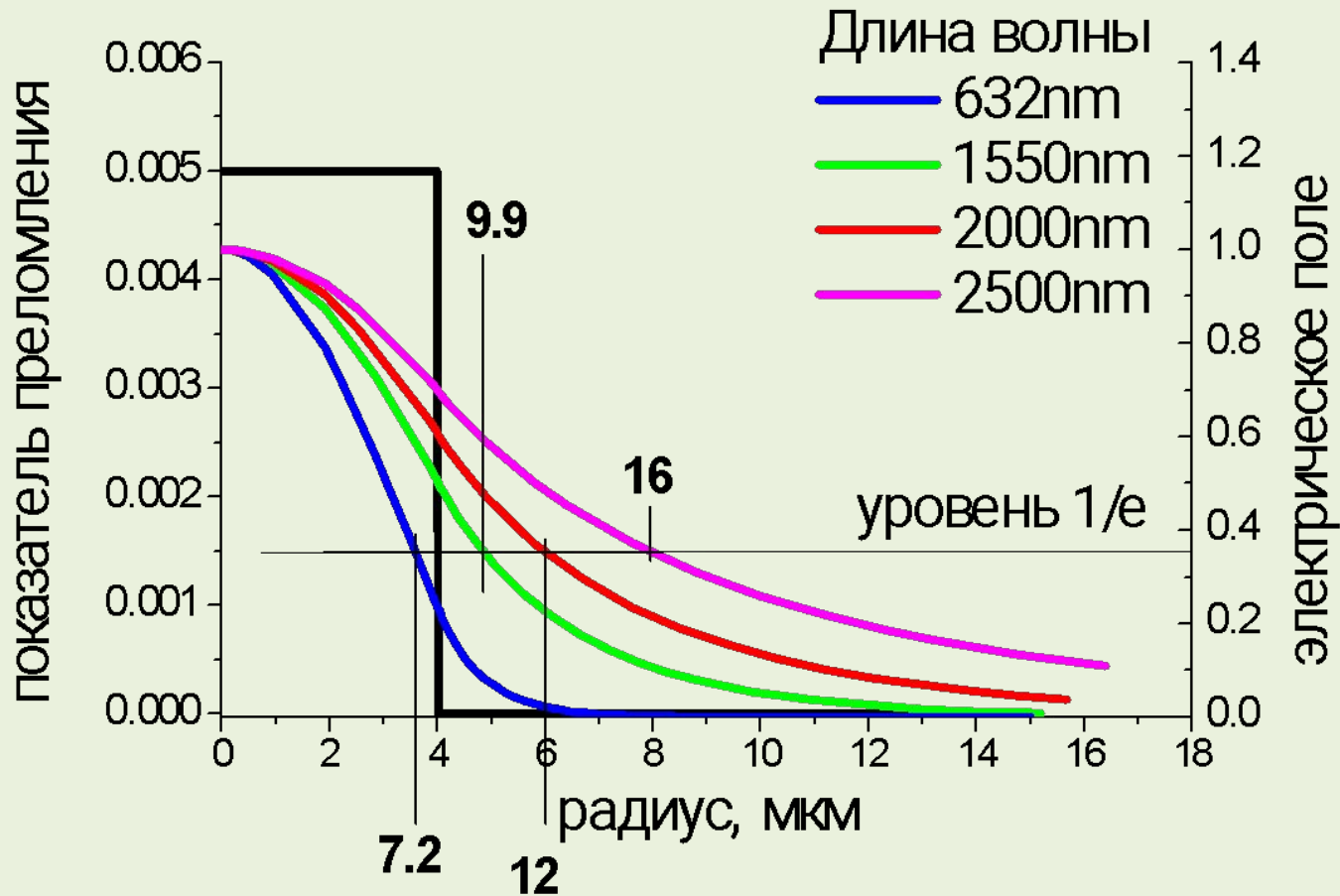
Радиальная зависимость амплитуды поля фундаментальной моды ОМ-ОВ носит плавно спадающий характер и близка к гауссовому закону

- Удвоенное расстояние  $2w_0$  между точкой на сечении ОВ, в которой амплитуда электрического поля моды максимальна ( $E_{\max}$ ) и точкой, в которой амплитуда поля моды меньше максимального значения в  $e$  ( $e = 2.718$ ) раз:

$$E(MFD) = \frac{1}{e} E_{\max}$$

- используется при  
приблизительных оценках

# Диаметр поля моды для разных длин волн излучения



Радиус сердцевины ОВ – 4 мкм



# Поле моды.

## Диаметр поля моды

Диаметр поля моды можно выразить через интенсивность поля:

$$I(r) = I_0 \cdot \exp(-4r^2/w^2)$$

$I_0$  – интенсивность поля на оси волокна;

$r$  - радиус

$w$  – диаметр модового поля, т.е. значение диаметра, при котором интенсивность излучения составляет:

$$(1/e^2) \cdot I_0 = 0,135 \cdot I_0.$$

# Поле моды. Диаметр поля моды

Для ОВ со ступенчатым профилем

$V$  – нормализованная частота

$$V = \frac{\pi d_c}{\lambda} \cdot NA = \frac{\pi d_c}{\lambda} \cdot (2n \cdot \Delta n)^{1/2}$$

$$w/d_c = 0,65 + 1,619 V^{-3/2} + 2,879 V^{-6}$$

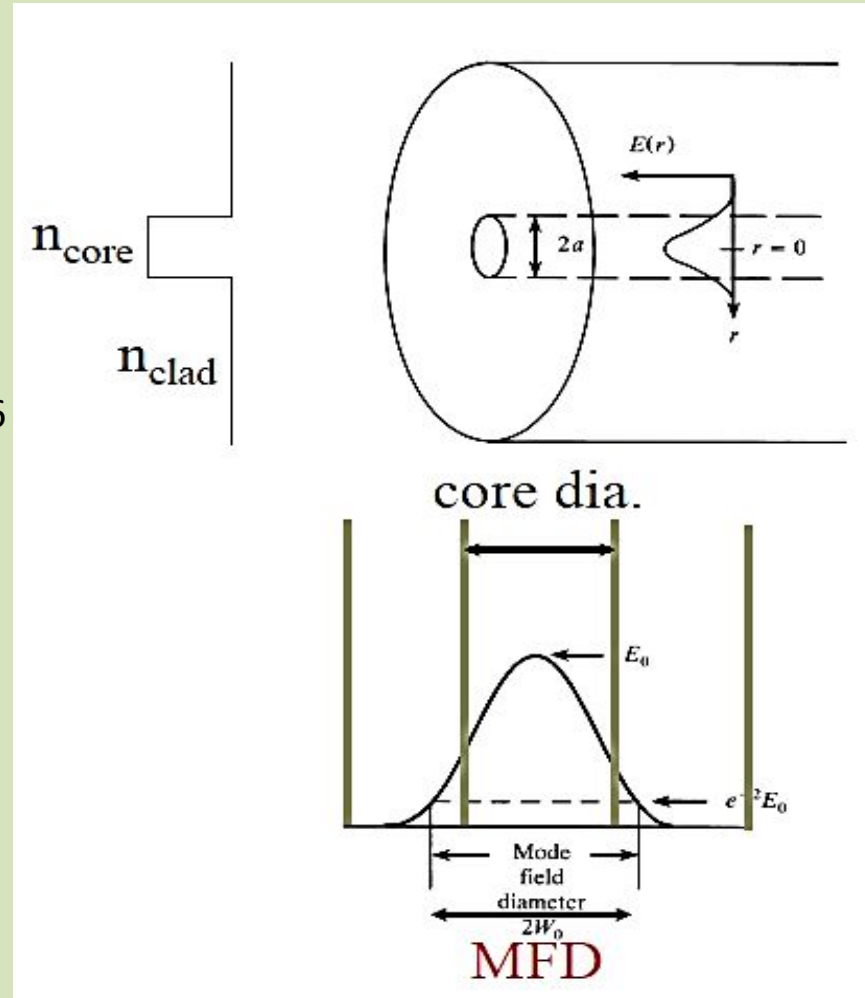
$$w = 0,83 \cdot \lambda / NA$$

$n$  – ПП кварцевого стекла

$\lambda$  – длина волны излучения, мкм

$V \leq 2,405$  для ОМ ОВ

$$\lambda_c = \frac{\pi * d_c}{2,405} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$



## Длина волны отсечки

- длины волны отсечки - это наименьшее значение длины волны, при котором только основная мода может распространяться в одномодовом волокне.

Длину волны отсечки можно рассчитать (спрогнозировать) с помощью показателя преломления сердцевины и оболочки, или числовой апертуры:

$$\lambda_c = \pi d n_1 \sqrt{2\Delta} / 2.4048$$

$n_1$  - ПП сердцевины

$d_c$  - диаметр сердцевины, мкм

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \leq 0.01$$

$\Delta$  - относительная разность показателей преломления

$$\lambda_c = \frac{\pi * d_c}{2,405} * NA = \frac{\pi * d_c}{2,405} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

Пример:

$$n_1 = 1,46, r_c = 4,5 \text{ мкм},$$

$$\Delta = 0,25\%$$

$$\lambda_c = ?$$