

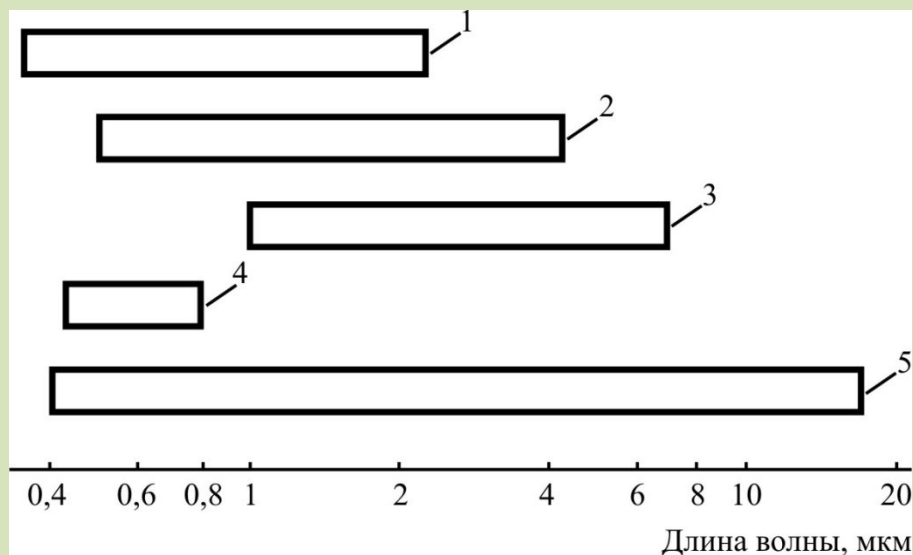
ОВ.

Структура и принцип работы
параметры ОВ

Применение ОВ

1. ВОСПИ
2. ВОД физических величин
3. ВОУ

Материалы ОВ



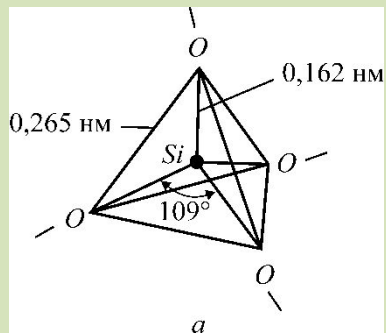
Спектральные рабочие диапазоны ОВ, изготовленных из различных материалов: 1 – кварцевое стекло; 2 – фторидные стекла; 3 – халькогенидные стекла; 4 – полимерные; 5 – галогениды таллия, серебра и т.д.

Преимущества кварцевых ОВ

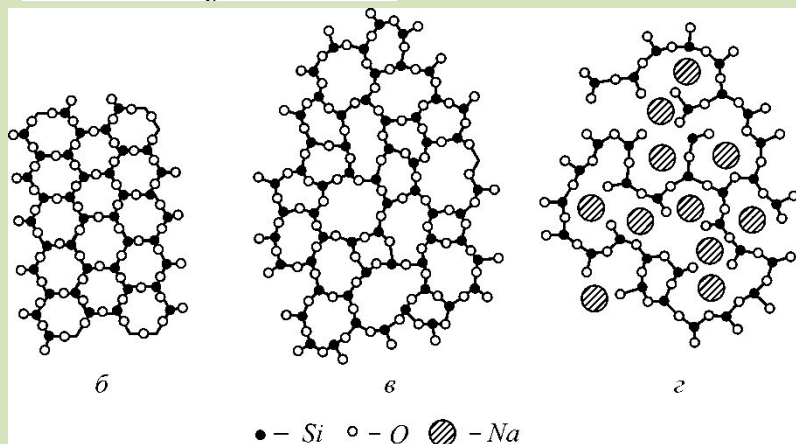
- Работают от УФ-диапазона до ближнего ИК-диапазона с низкими потерями. кварцевое стекло (SiO_2) является моносоединением и обладает значительно большей химической и механической прочностью по сравнению с другими стеклами,
- Сырье (песок, горный хрусталь ...) широко распространено в природе,
- разработана технология получения высокочистых соединений (напр. 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 (з)

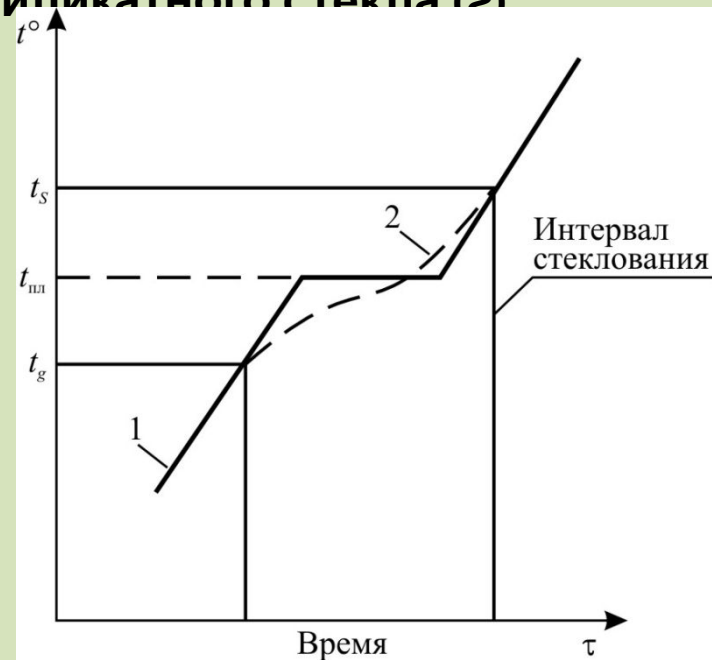
Зависимость температуры образца от времени повышения температуры нагрева: 1 – для кристаллов; 2 – для стекол.

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



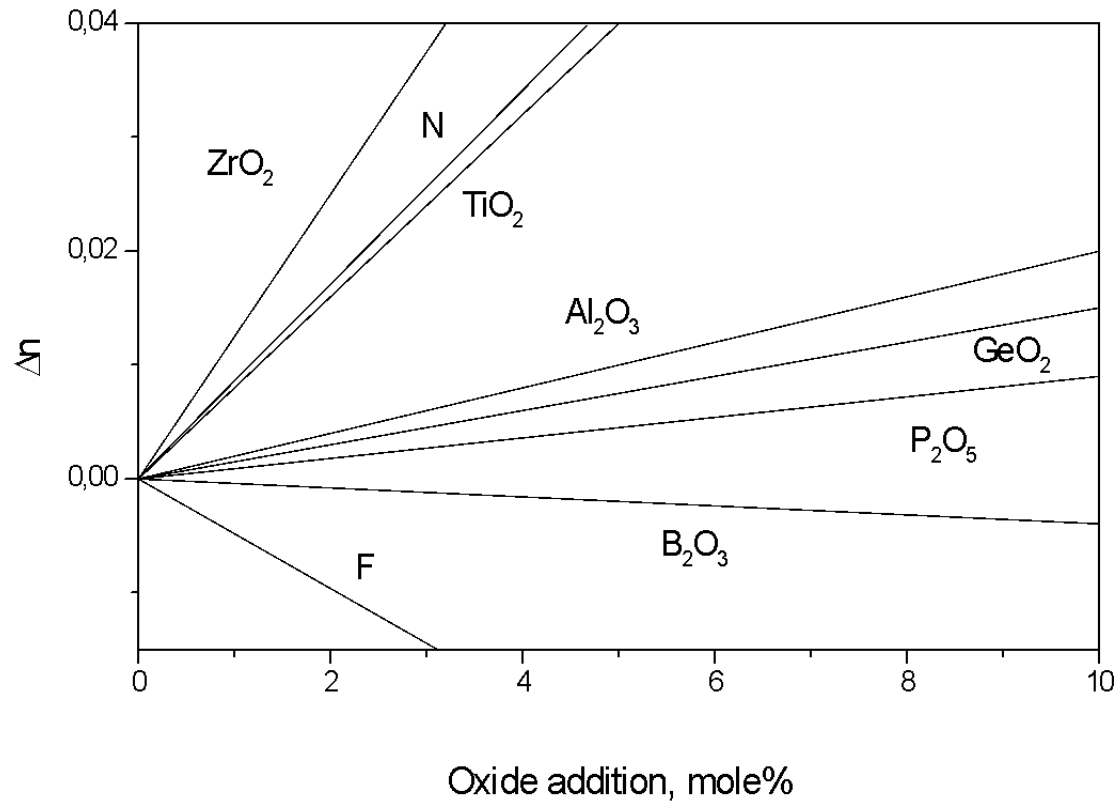
Вязкость некоторых веществ при температурах плавления

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

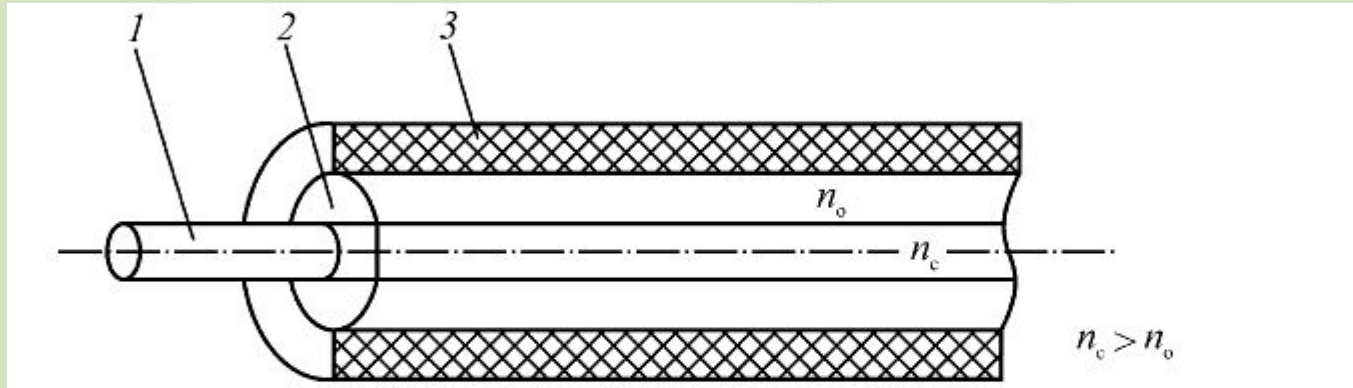
Основные свойства кварцевого стекла

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

Материалы, изменяющие показатель преломления SiO₂

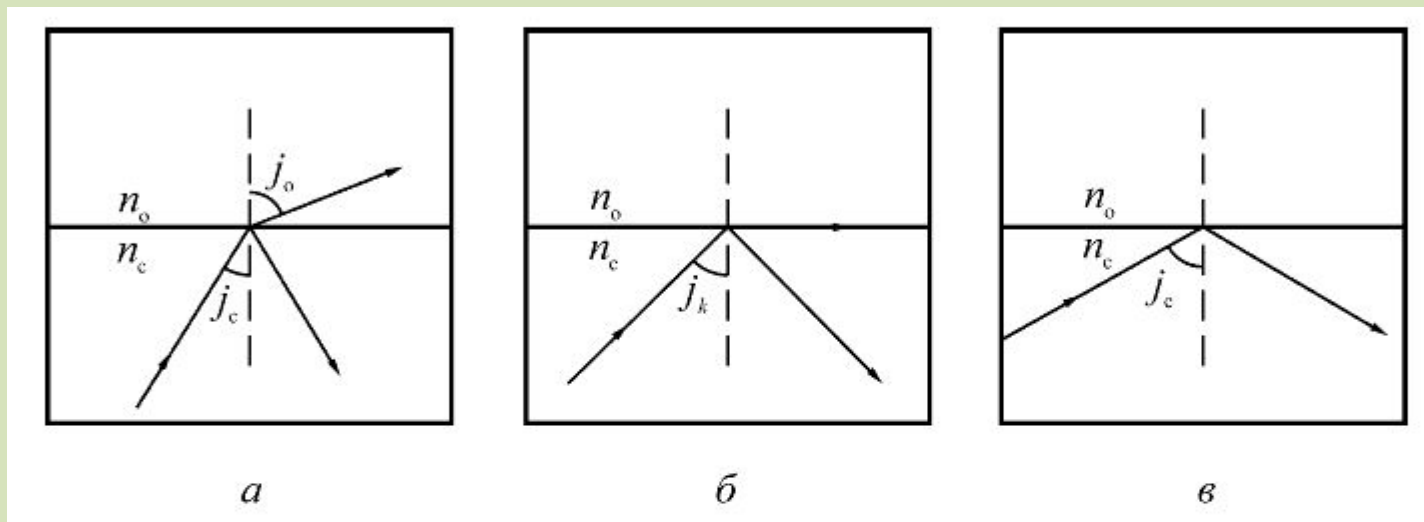


Структура и принцип работы ОВ



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.

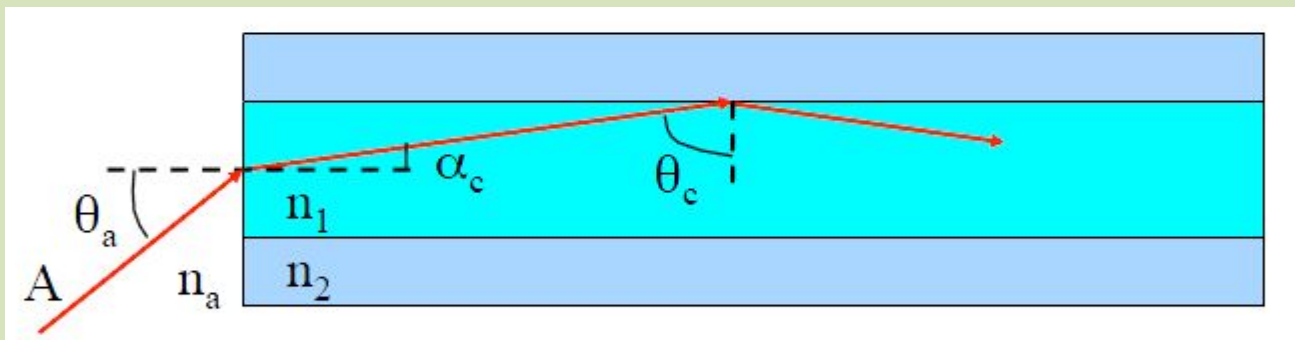
$$n_c \sin j_c = n_o \sin j_o$$

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

$$\text{При } \theta_k = \theta_c \quad n_1 \sin \theta_k = n_2 \sin 90^\circ$$



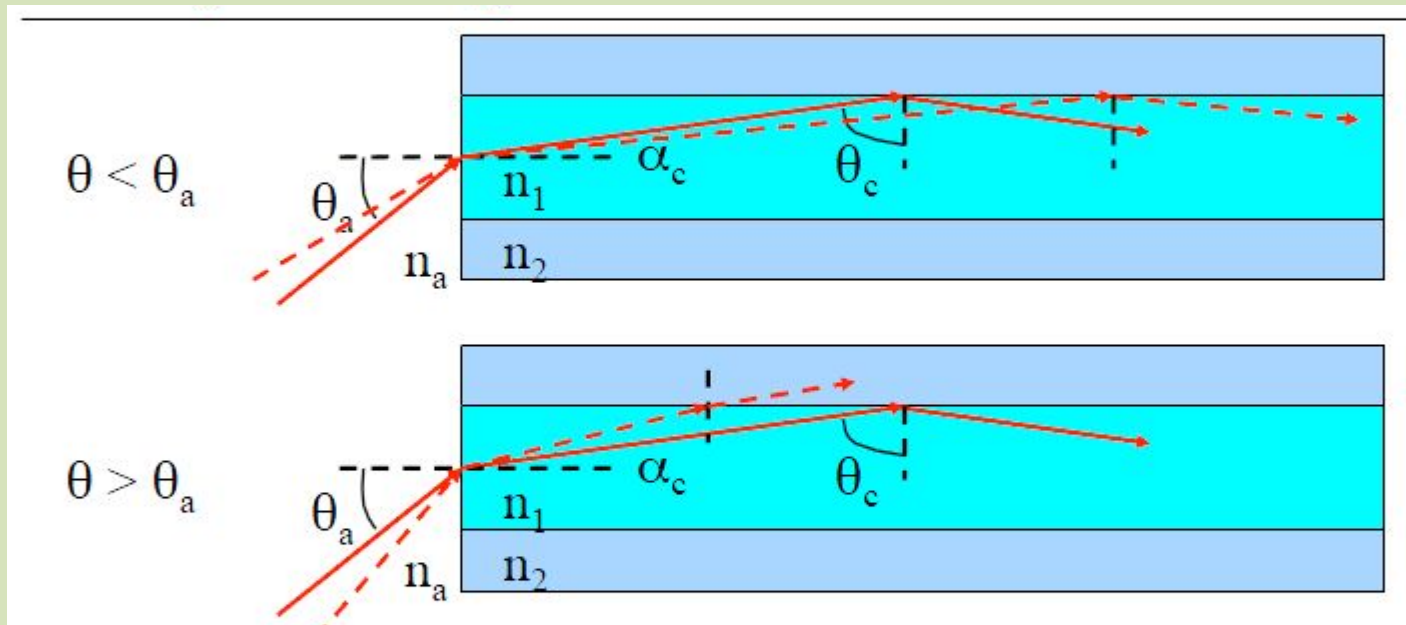
Луч А, падающий под критическим углом θ_c на границу раздела сердцевина-оболочка входит в сердцевину волокна под углом θ_a к оси волокна и преломляется на границе воздух-сердцевина.

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

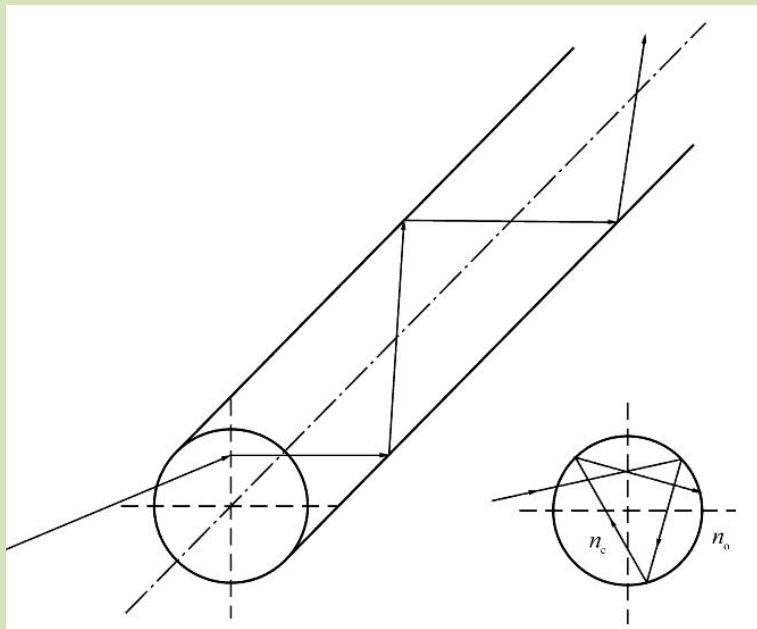
Пример:

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

$$\theta_a=?$$

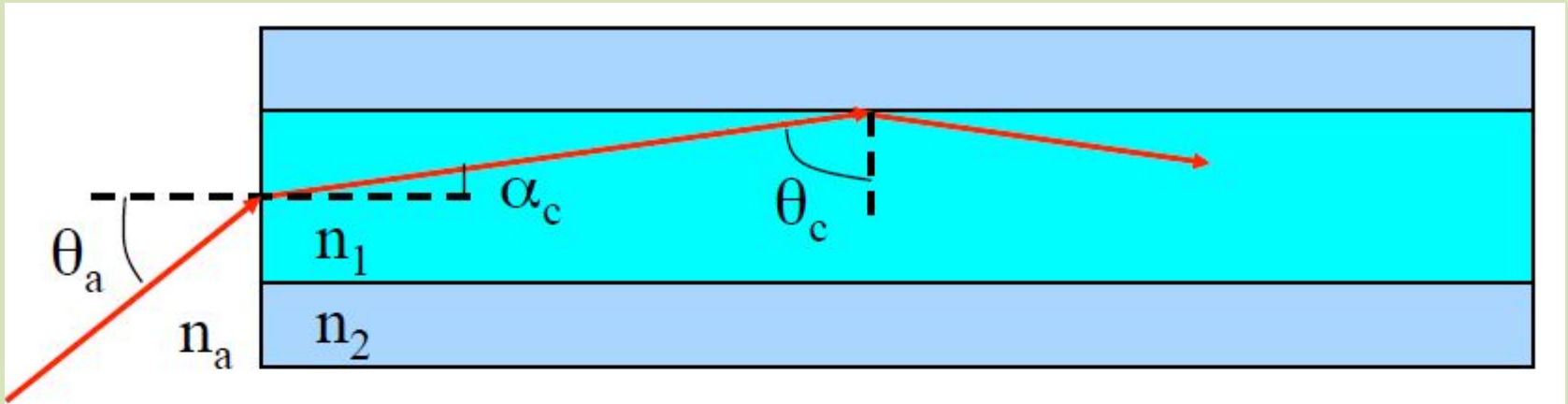
Структура и принцип работы ОВ

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:

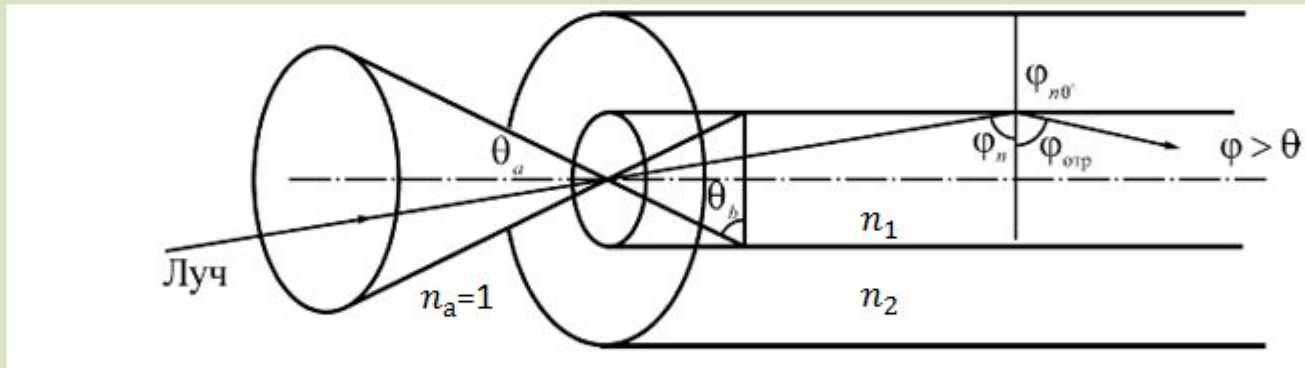
$$n_a \sin \theta_a = n_1 \sin \alpha_c \quad n_a = 1$$

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

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

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;

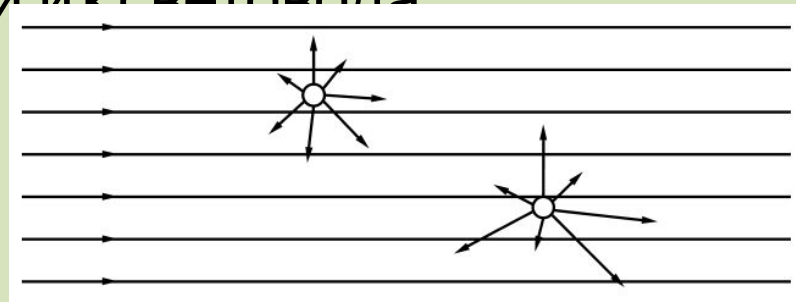
$\alpha_{\text{прим}}$ – поглощение, вызываемое примесями переходных ("красящих") металлов (*Fe, Cu, Ni, Cr, V, Mo, Co*);

$\alpha_{\text{он}}$ – 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 ~ 1500 К;

β – коэффициент сжимаемости, равный для кварца $8,1 \cdot 10^{-11}$ м²/Н;

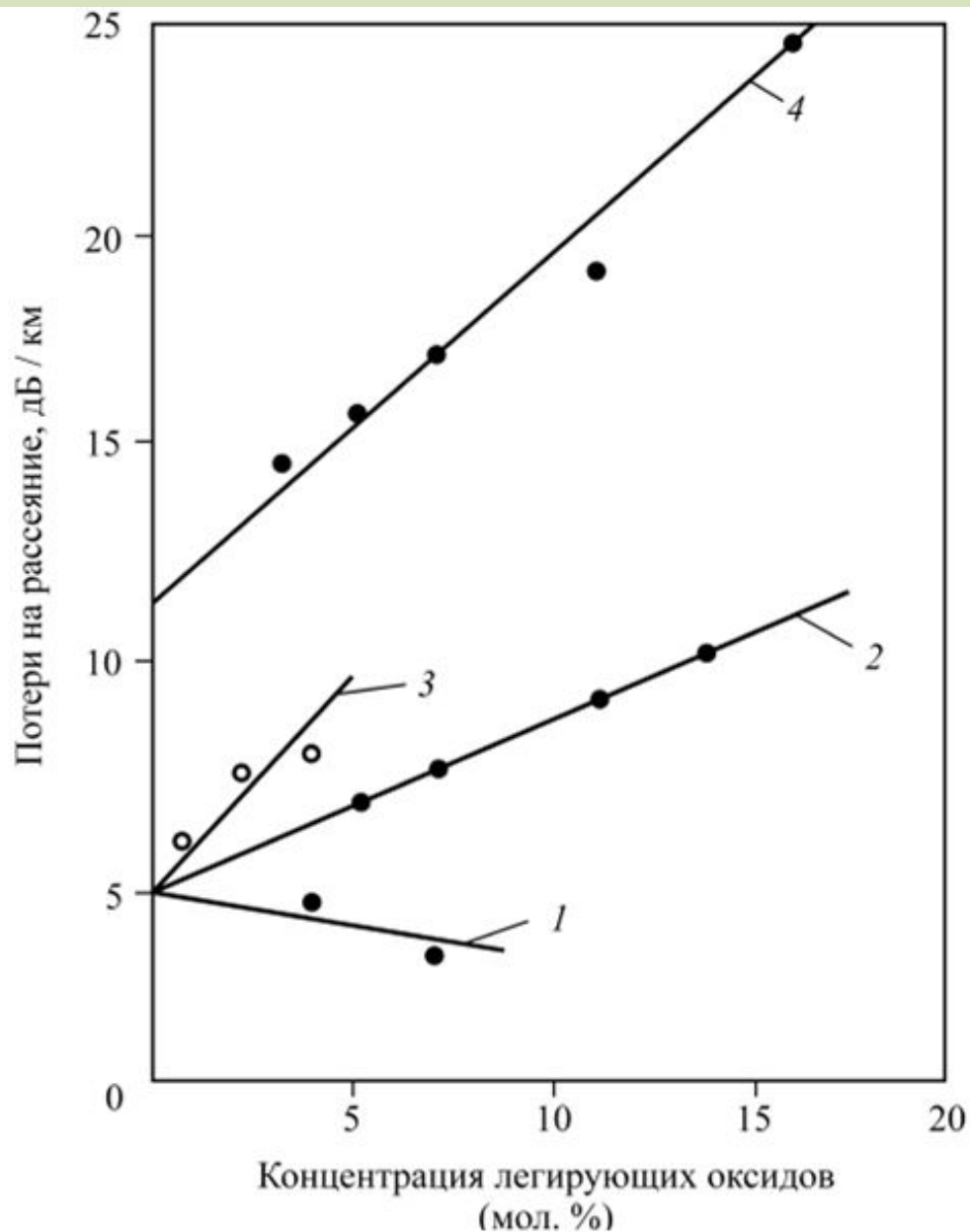
λ – длина волны света, мкм.

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 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

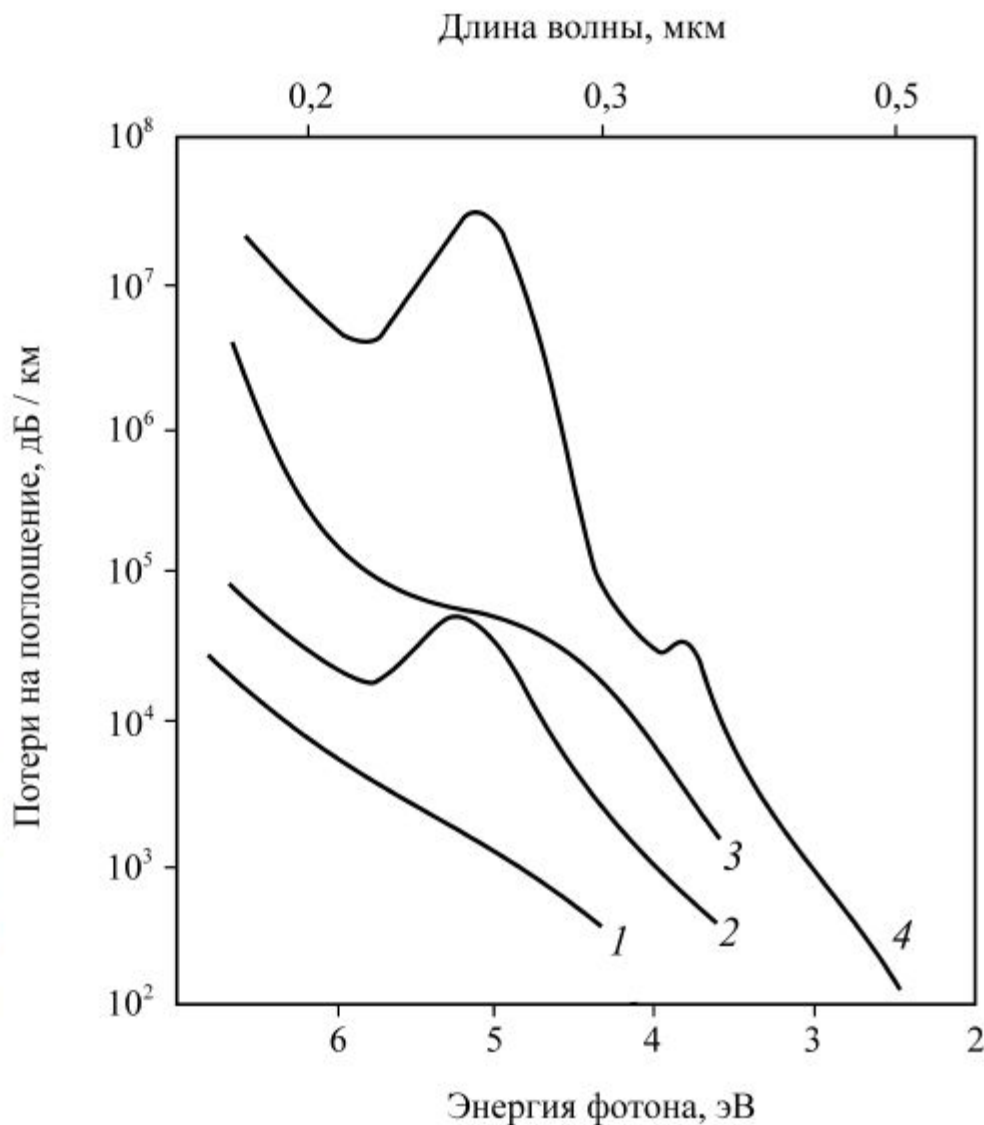
$$\alpha_{\text{уф}} = B_1 \cdot e^{\frac{B_2}{\lambda}}$$

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

(X_{Ge} молярная доля 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 – B₂O₃; 3 – P₂O₅; 4 – GeO₂

Пики поглощения для стекла GeO₂-SiO₂: 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 μm) – 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 немостиновый кислород Si - O Si

Потери на поглощение

ИК-

поглощение

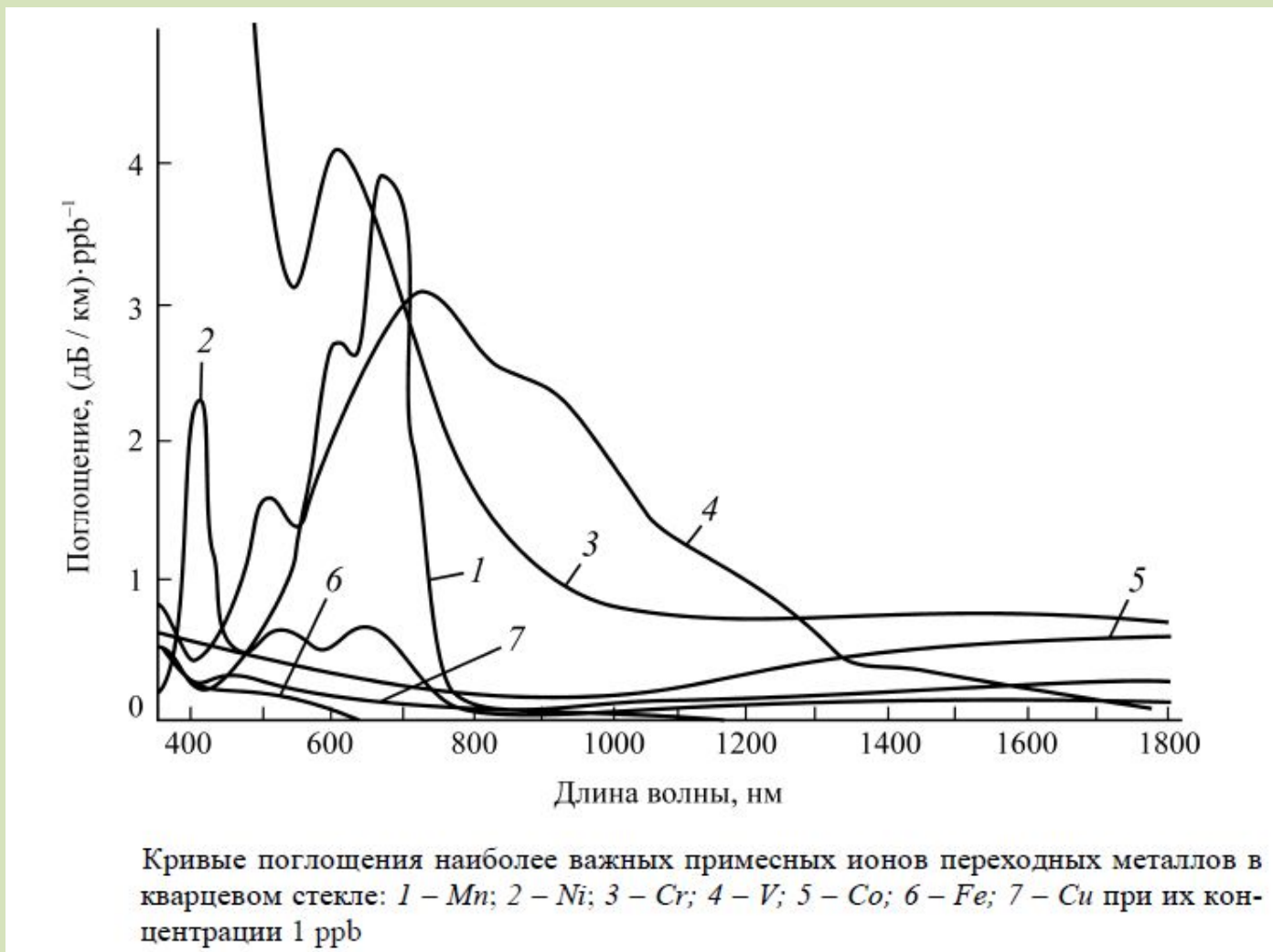
Длины волн, соответствующие частотам продольных колебаний (пик поглощения) для связей между компонентами, наиболее широко применяемыми в волоконной оптике:

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.

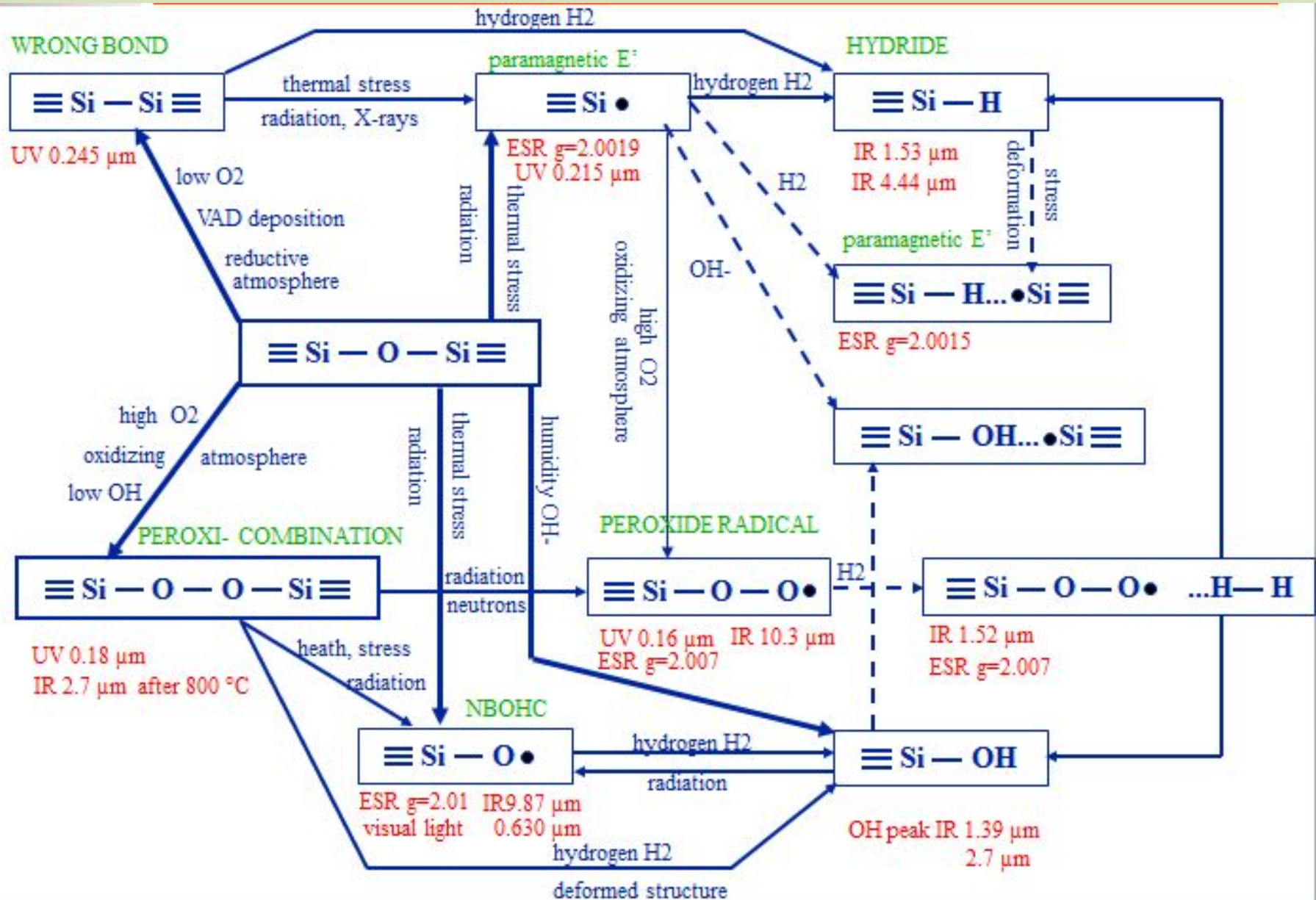
Обертоны приводят к поглощению на длинах волн:

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

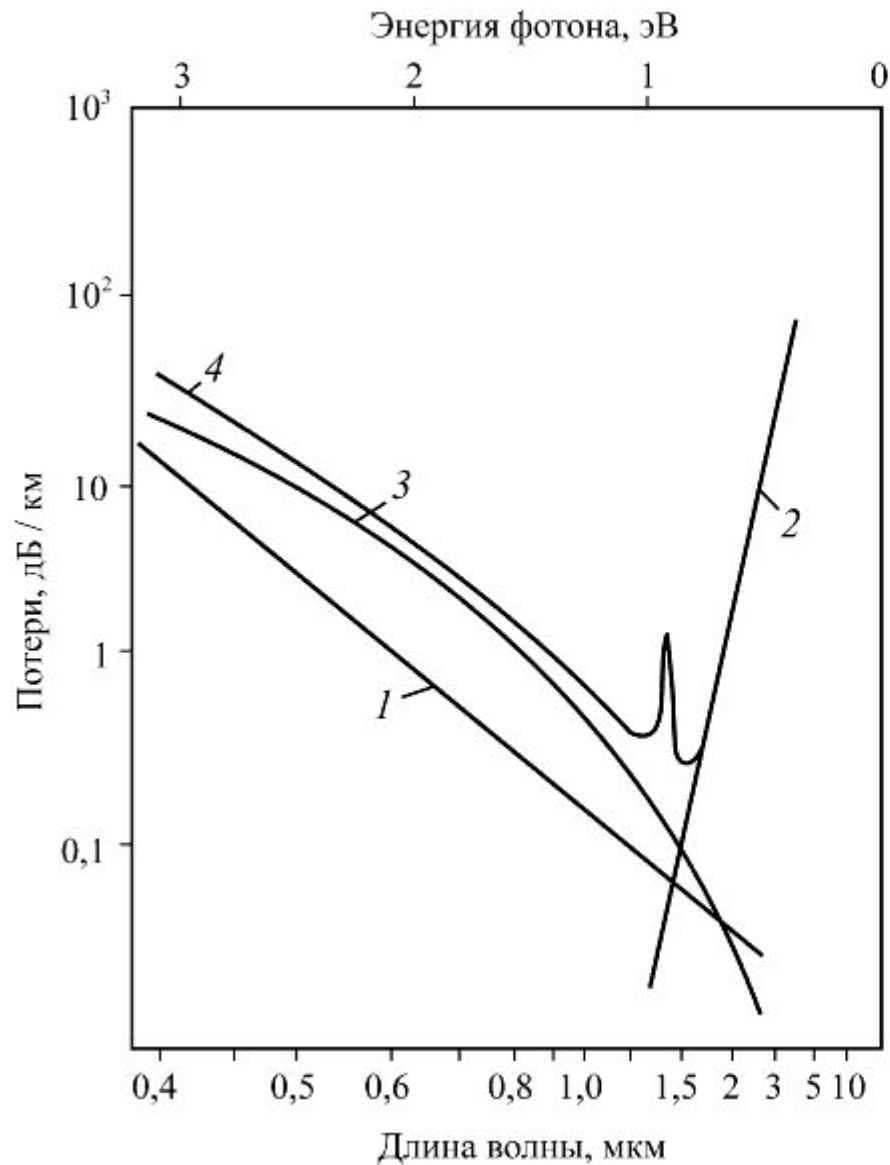
Содержание 1 ppm (10^{-4} масс. %) гидроксильных групп в ОВ дает полосу поглощения на 1,38 мкм интенсивностью ~ 55 дБ/км. Необходимо снизить концентрацию ОН-групп до уровня ~ 10^{-7} масс. %.

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

Источники потерь на поглощение

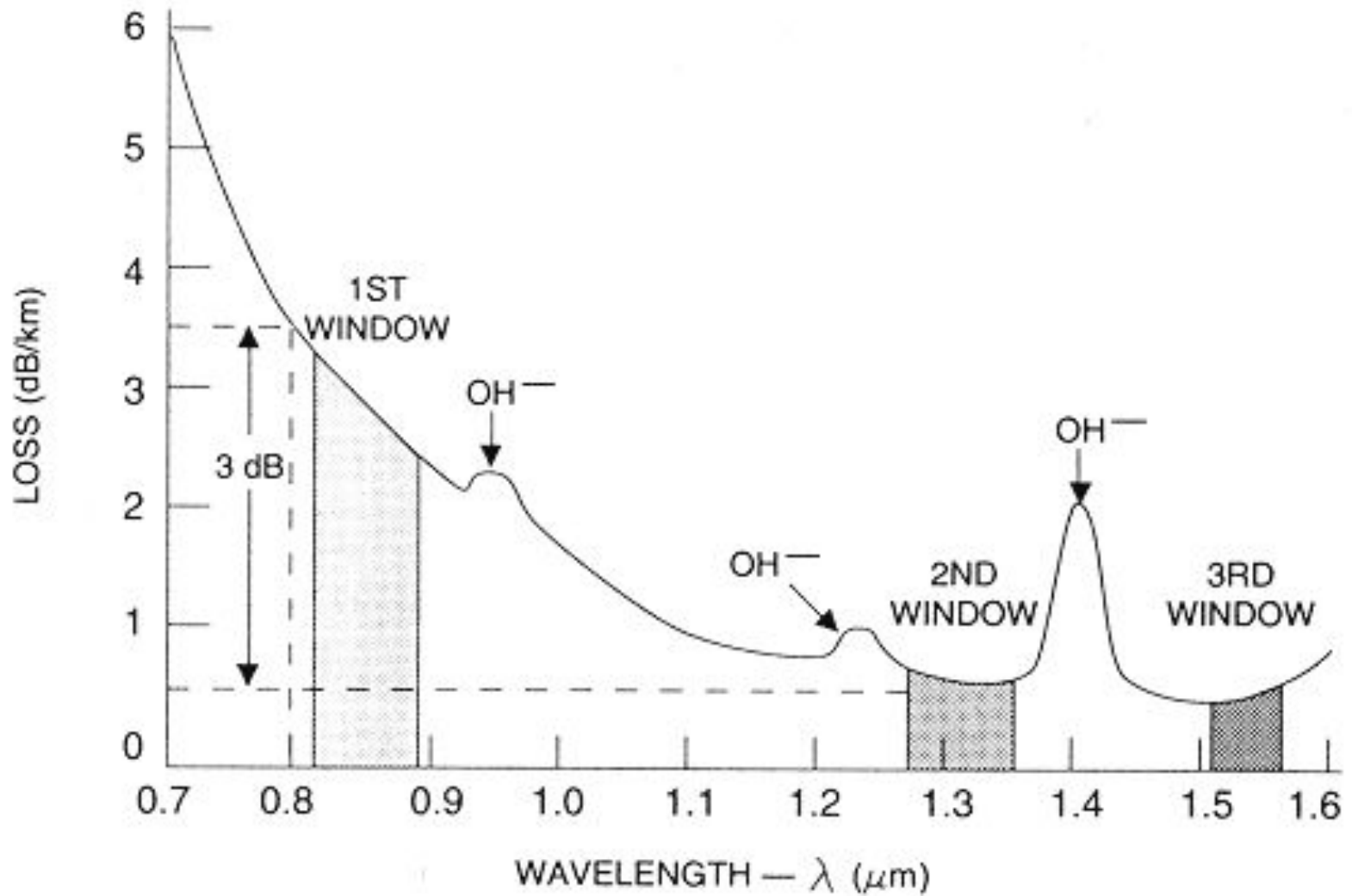


Оптические потери

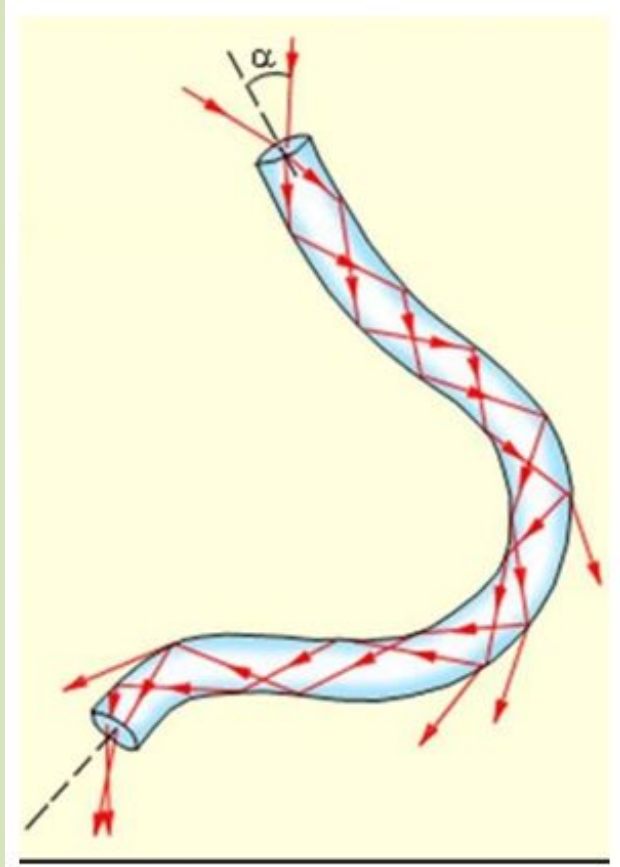


Основные составляющие потерь для кварцевых ОВ:
1 – хвост УФ-поглощения;
2 – многофононное поглощение;
3 – рэлеевское рассеяние;
4 – полные потери

Оптические потери

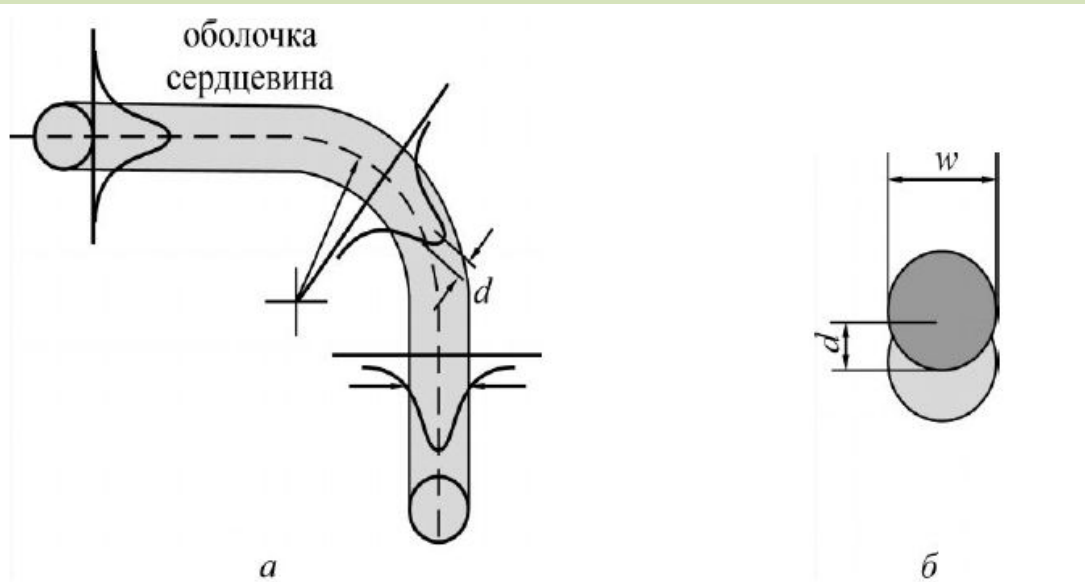


Изгибные потери



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,



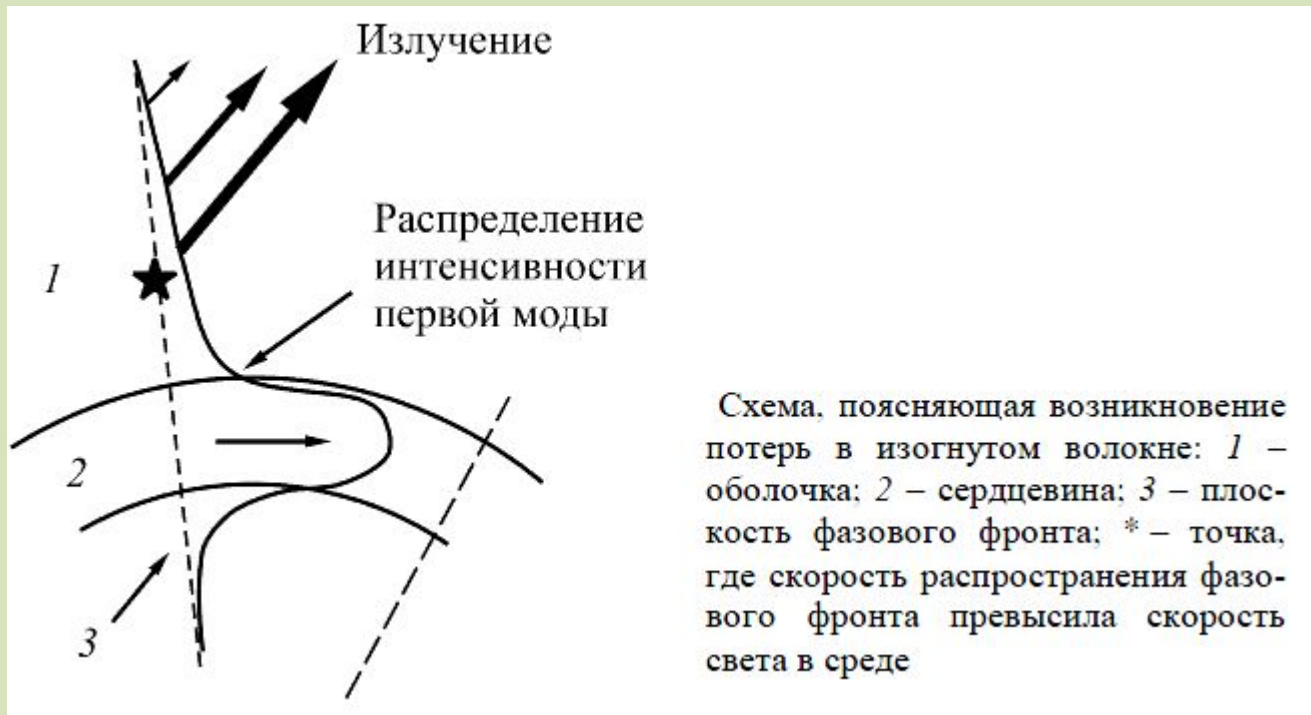
Схема, поясняющая причину возникновения потерь при соединении прямого и изогнутого волокна:

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

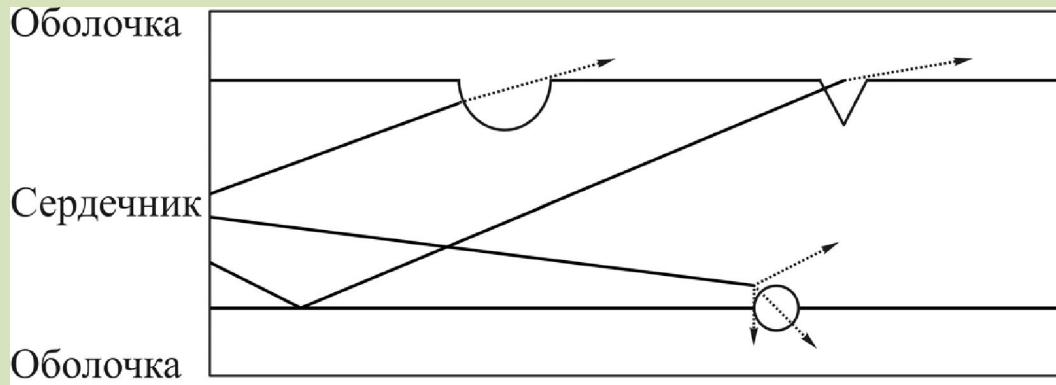
Изгибные потери

- 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.

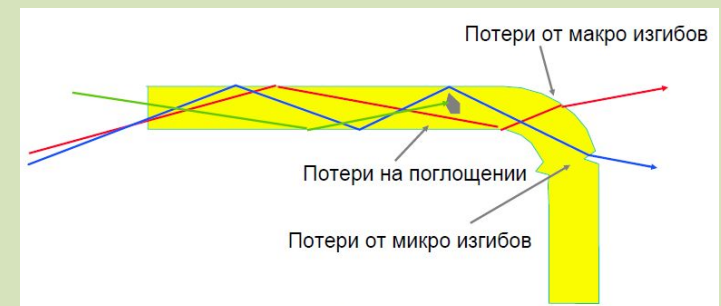
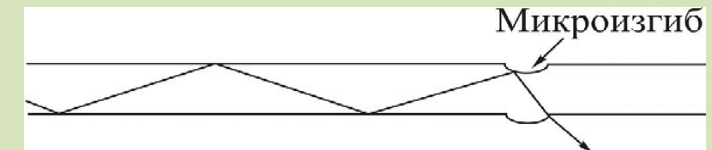


микроизгибные потери и потери на неоднородностях

- 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



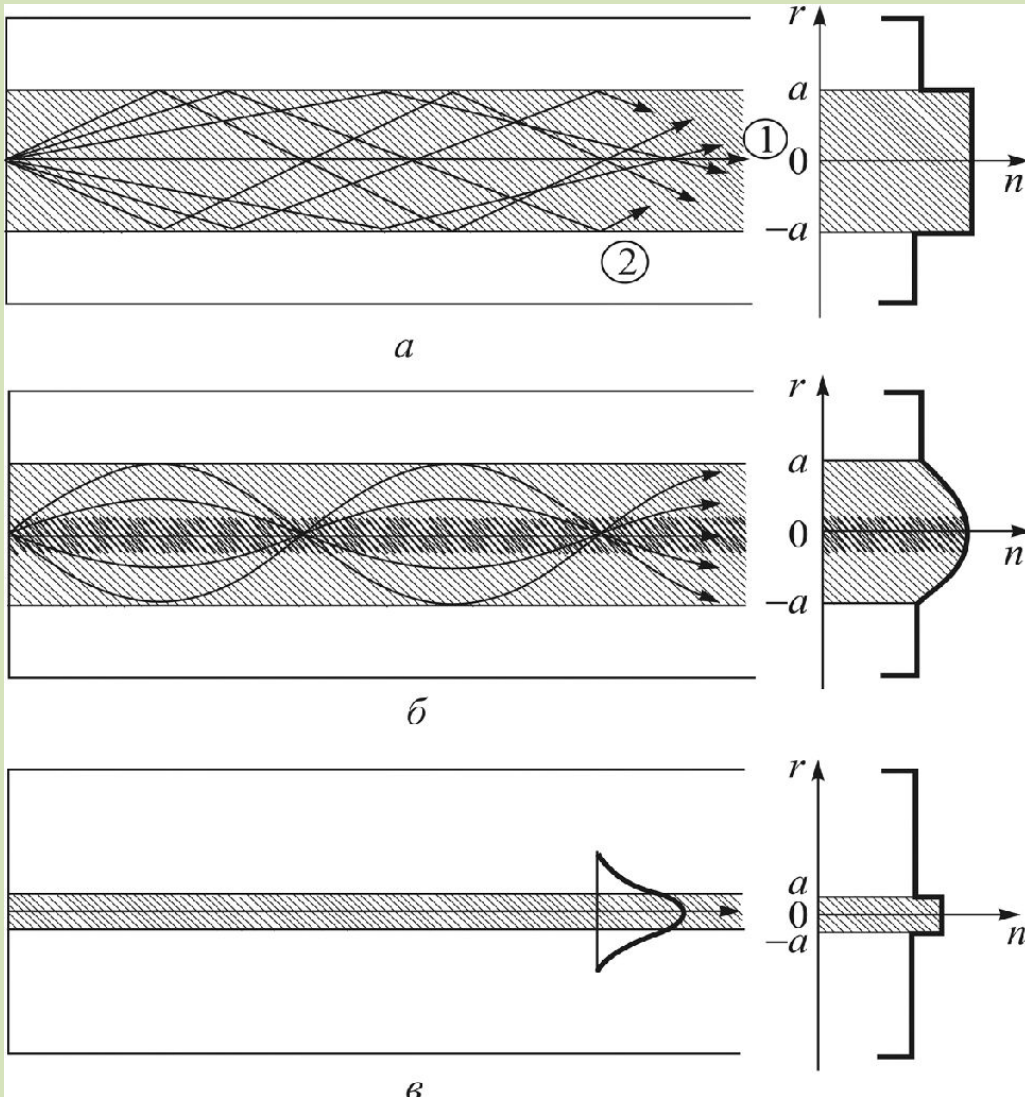
Потери на рассеяние, связанные с неоднородностью



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.

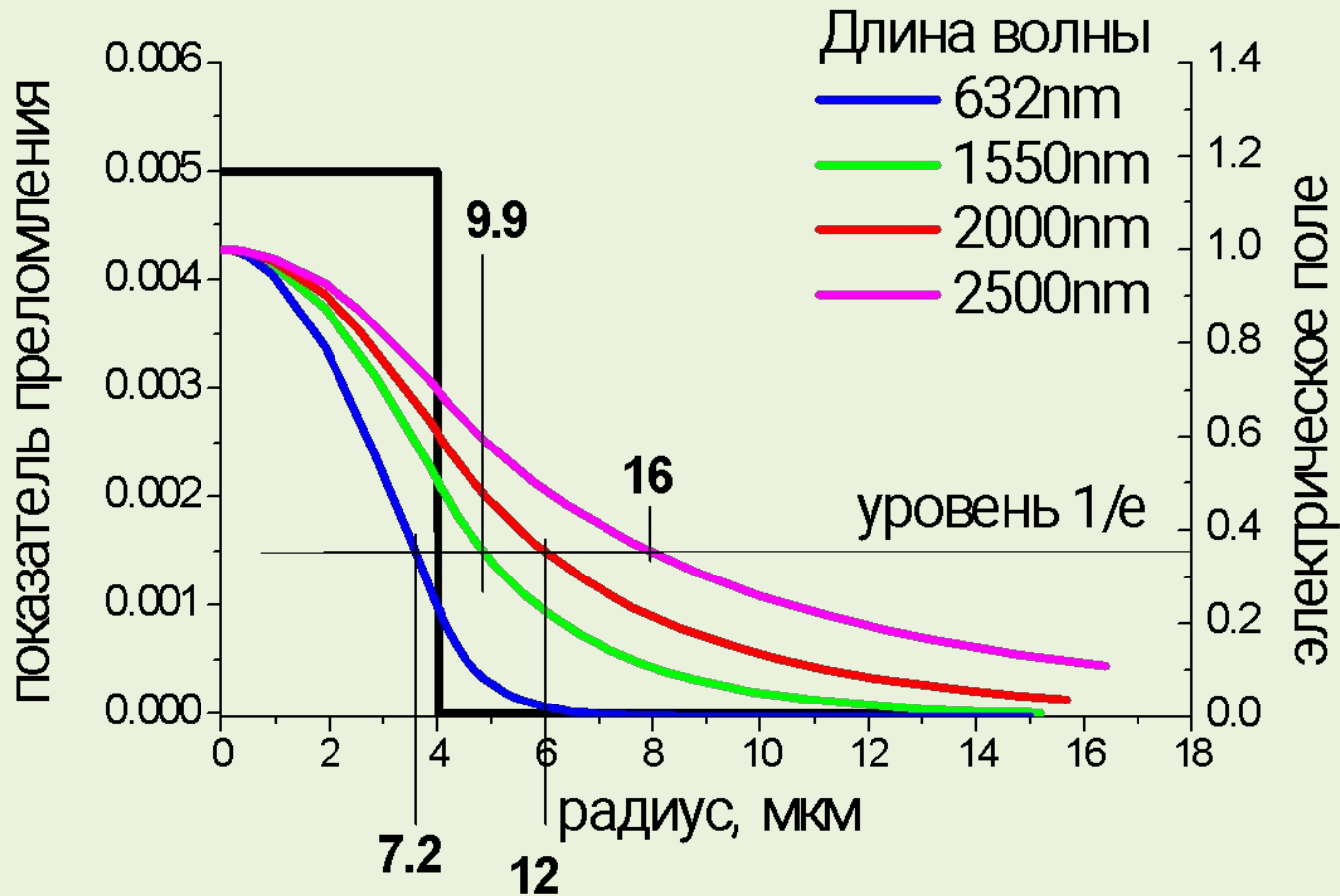
Радиальная зависимость амплитуды поля фундаментальной моды ОМ-ОВ носит плавно спадающий характер и близка к гауссовому закону

- 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

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

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

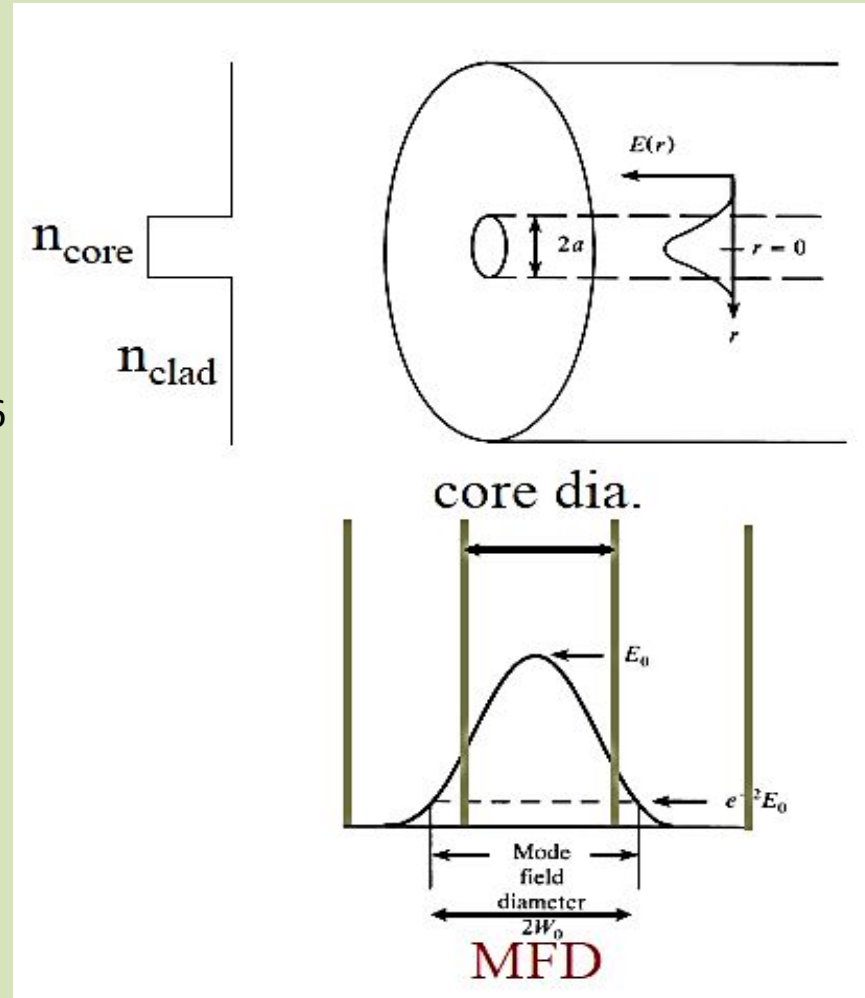
$$w = 0,83 \cdot \lambda / NA$$

n – ПП кварцевого стекла

λ – 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

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

Δ - 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:

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

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

$$\lambda_c = ?$$