

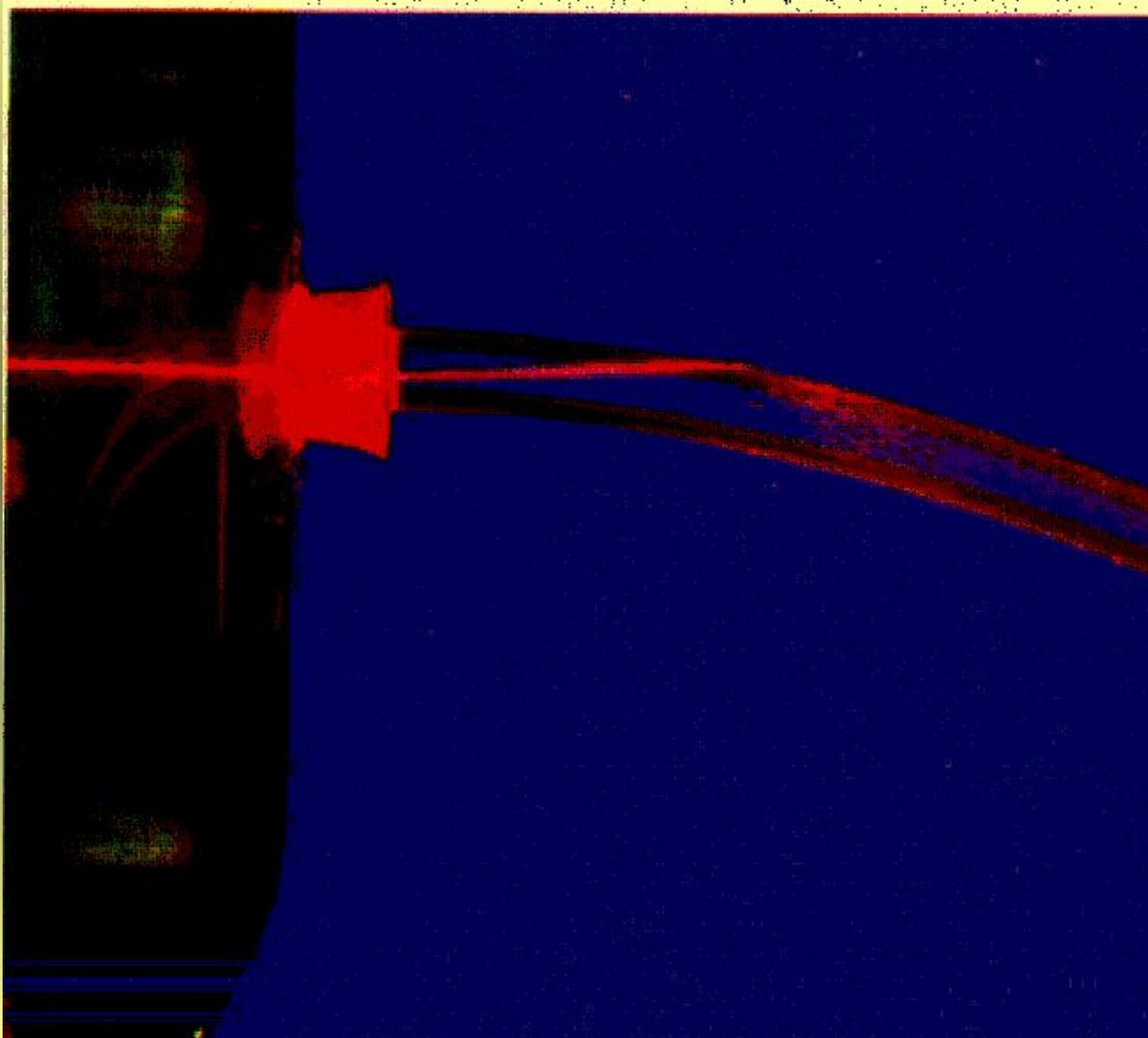
Волоконная оптика и её использование в оптоинформатике.

- **История**
- **Принцип работы оптических волоконных световодов (волокон)**
- **Основные типы волокон**
 - **Технология получения**
 - **Потери в волокнах**
 - **Дисперсия волокон**
 - **Модовое двулучепреломление**
- **Нелинейные эффекты в волокнах**

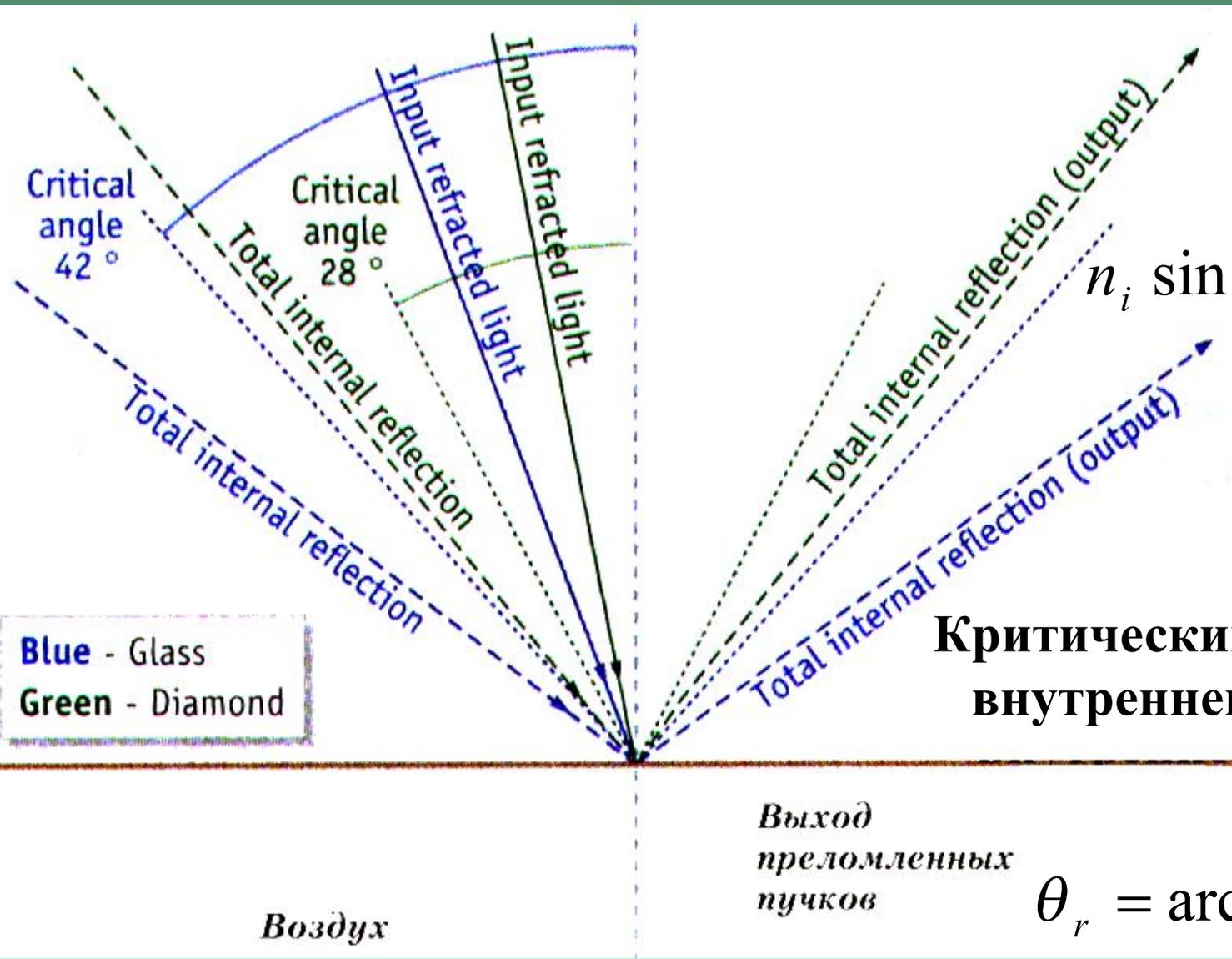
История волоконной оптики

- 1842 Опыт Д. Колладона и заметки Бабине
- 1927 Первые стеклянные волокна без оболочки
- 1958 Волокна с оболочкой (Б. О'Брайн, Х. Хансен)
- 1964 Первый волоконный лазер
- 1970 Волокно с потерями 20 дБ/км
- 1979 Волокно с потерями 0,2 дБ/км (1,55 мкм)
- 2000 «Безводное» волокно с потерями $< 0,2$ дБ/км

Эксперимент Колладона с водной струей



Углы полного внутреннего отражения для разделов стекло-воздух и алмаз-воздух

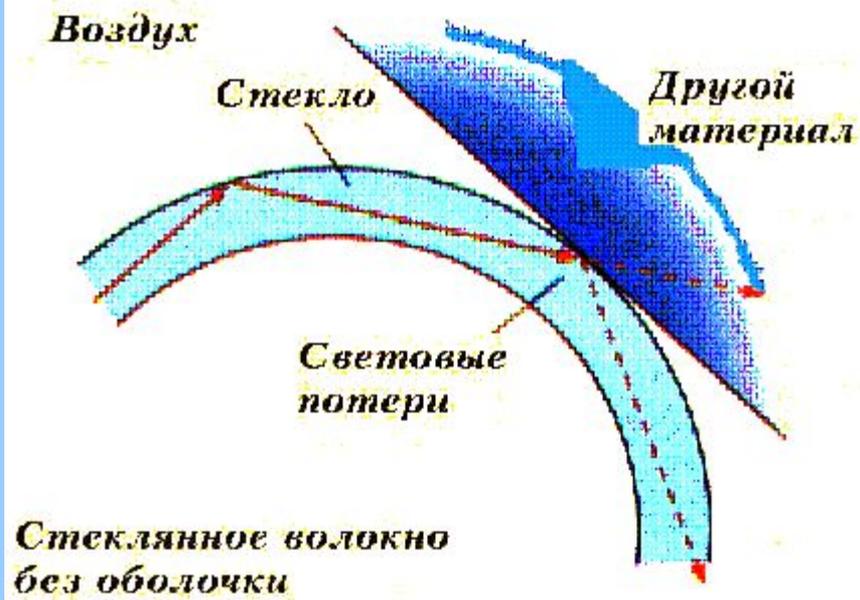


Закон Снеллиуса

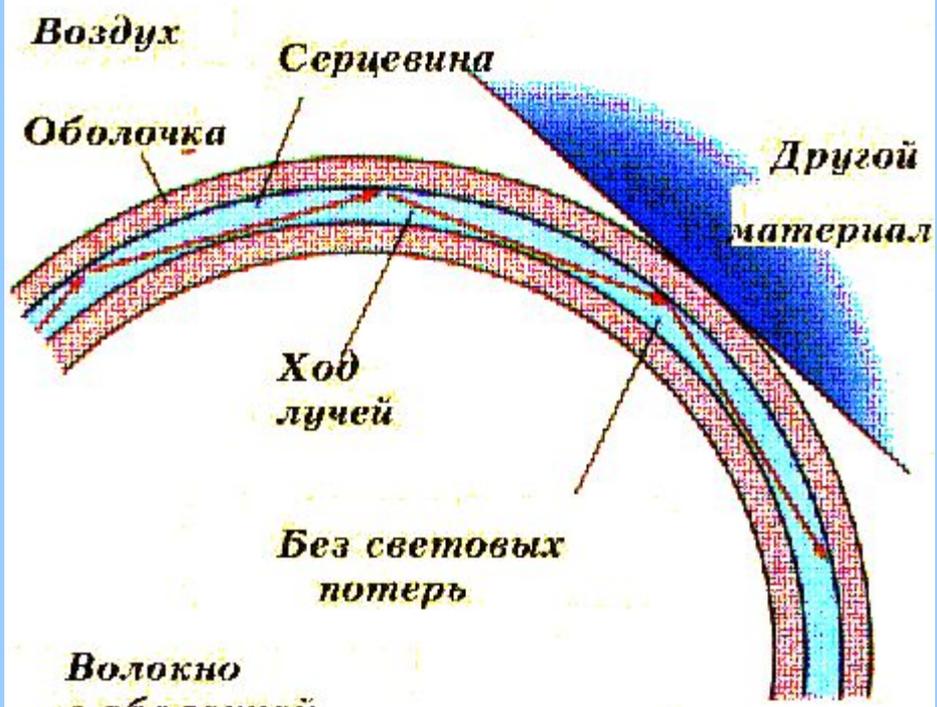
$$n_i \sin \theta_i = n_r \sin \theta_r$$

Критический угол полного внутреннего отражения

$$\theta_r = \arcsin\left(\frac{n_i \sin \theta_i}{n_r}\right)$$



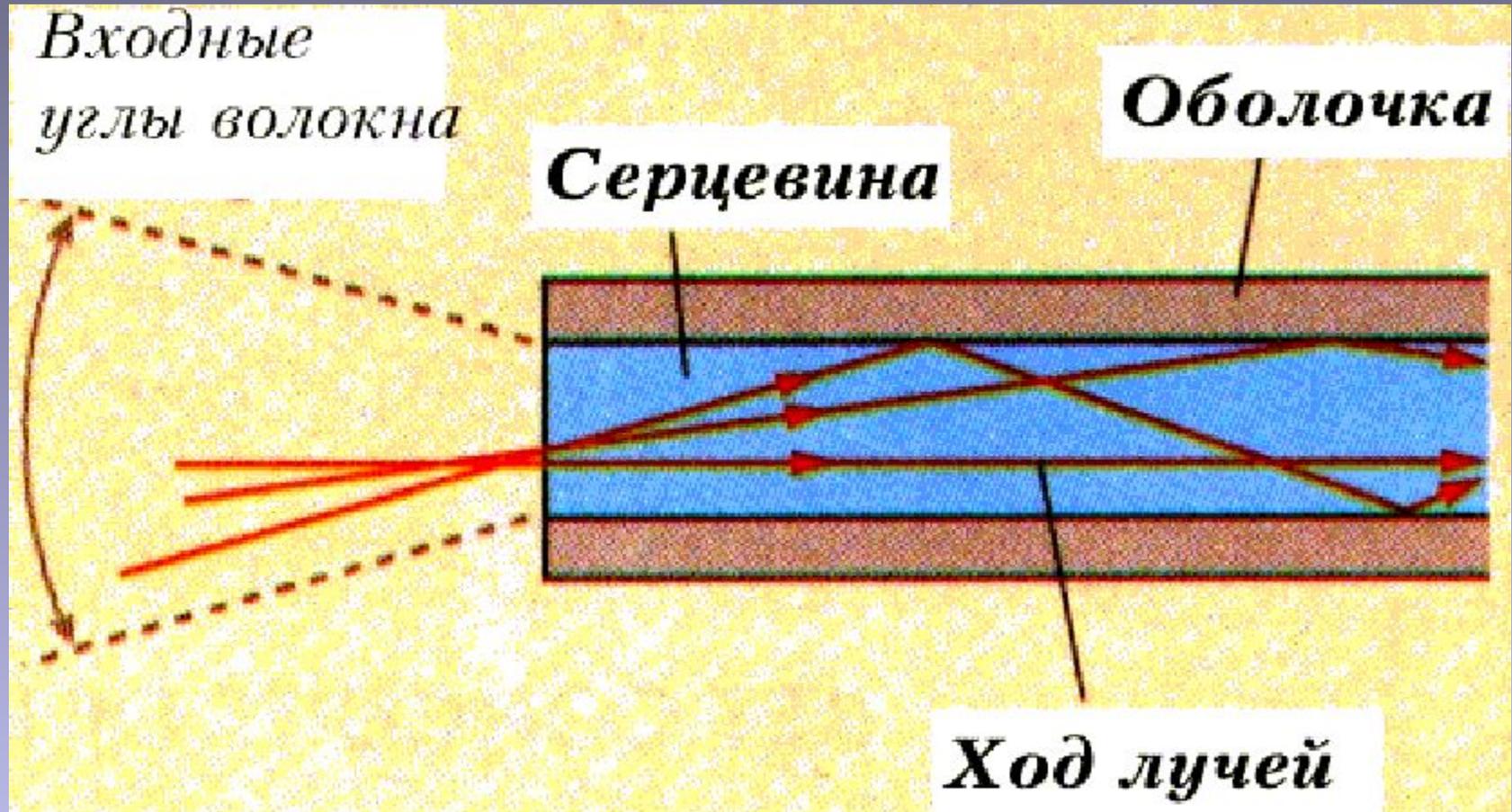
Стекло
волокно
без оболочки



Волокно
с оболочкой

Влияние оболочки

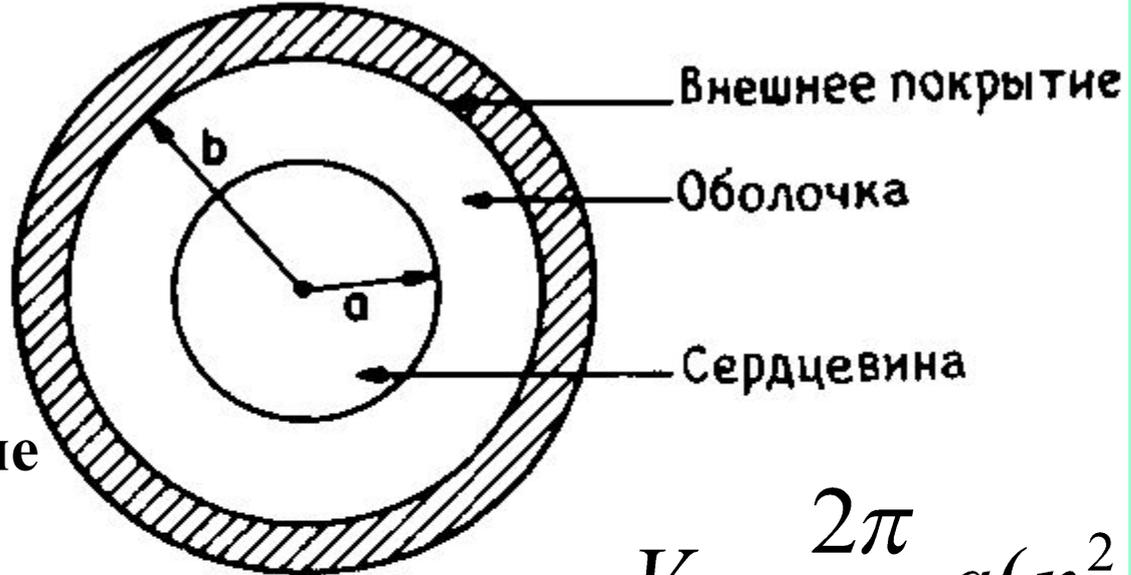
Устройство простейшего оптического волокна



Световые пучки должны падать под углами, обеспечивающими полное внутреннее отражение от раздела сердцевина-оболочка

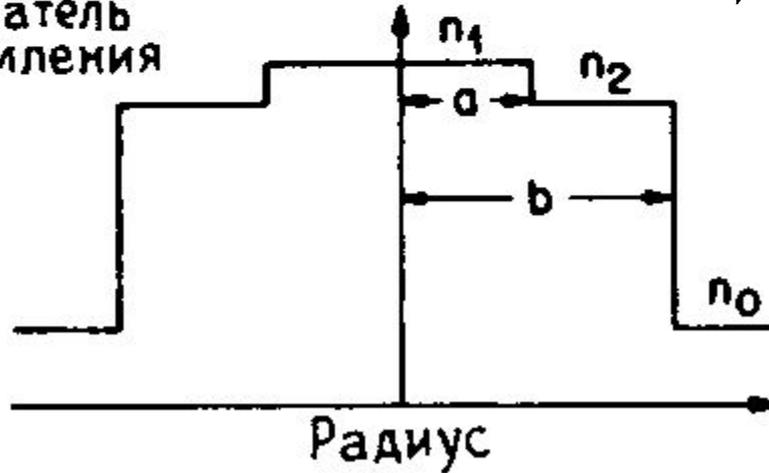
Основные параметры волокон

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



Типичное значение
 $\Delta \sim 0,03$

Показатель
преломления



$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a (n_1^2 - n_2^2)$$

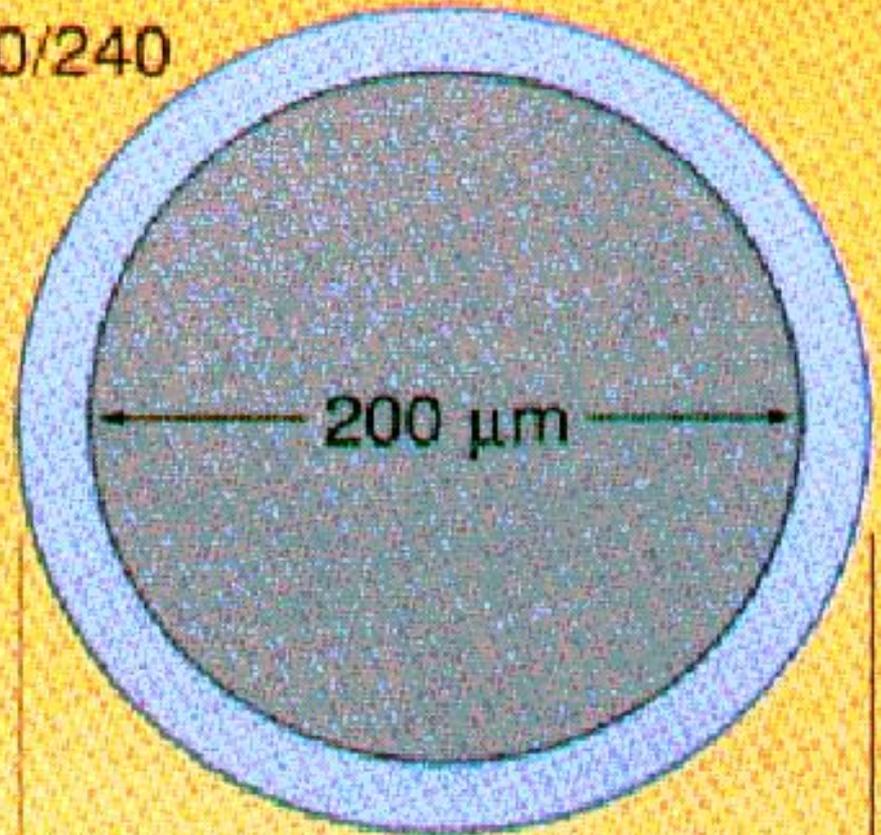
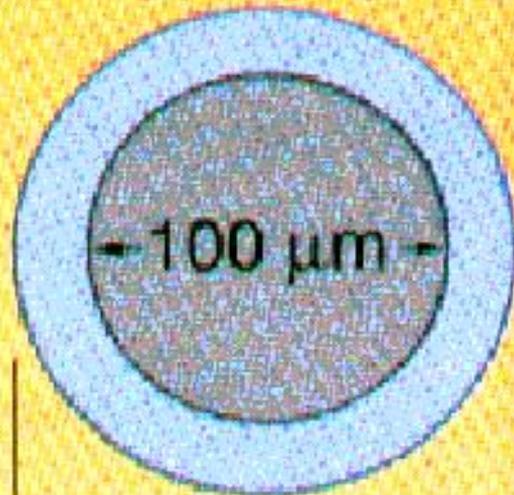
При $V < 2,405$ волокно одномодовое ($a = 2 \dots 10$ мкм)

Основные типы волокон

*Многомодовые волокна
со ступенчатым
профилем показателя
преломления*

200/240

100/140



140 μm

*Профиль
показателя
преломления*

240 μm

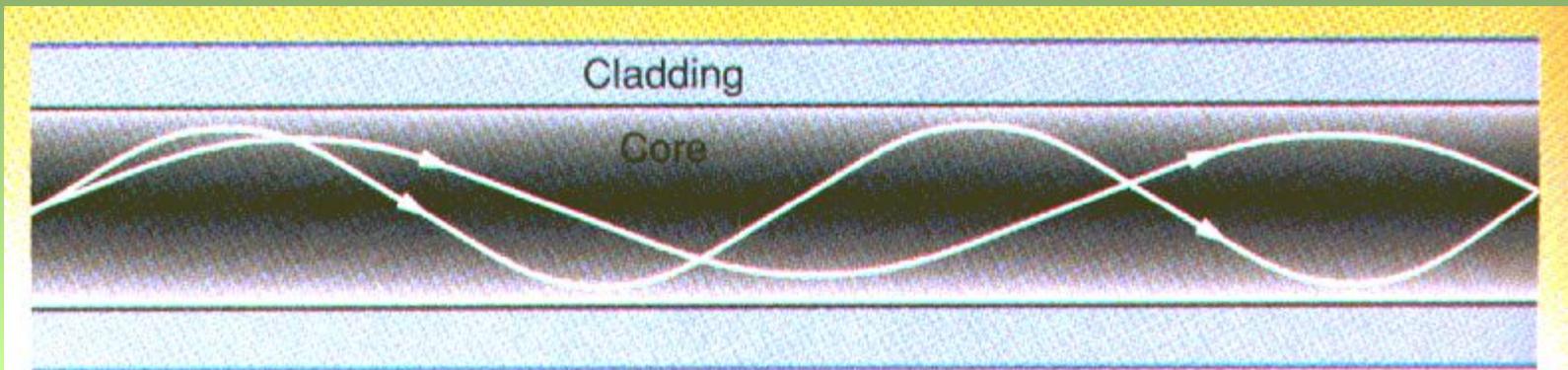


Основные типы волокон

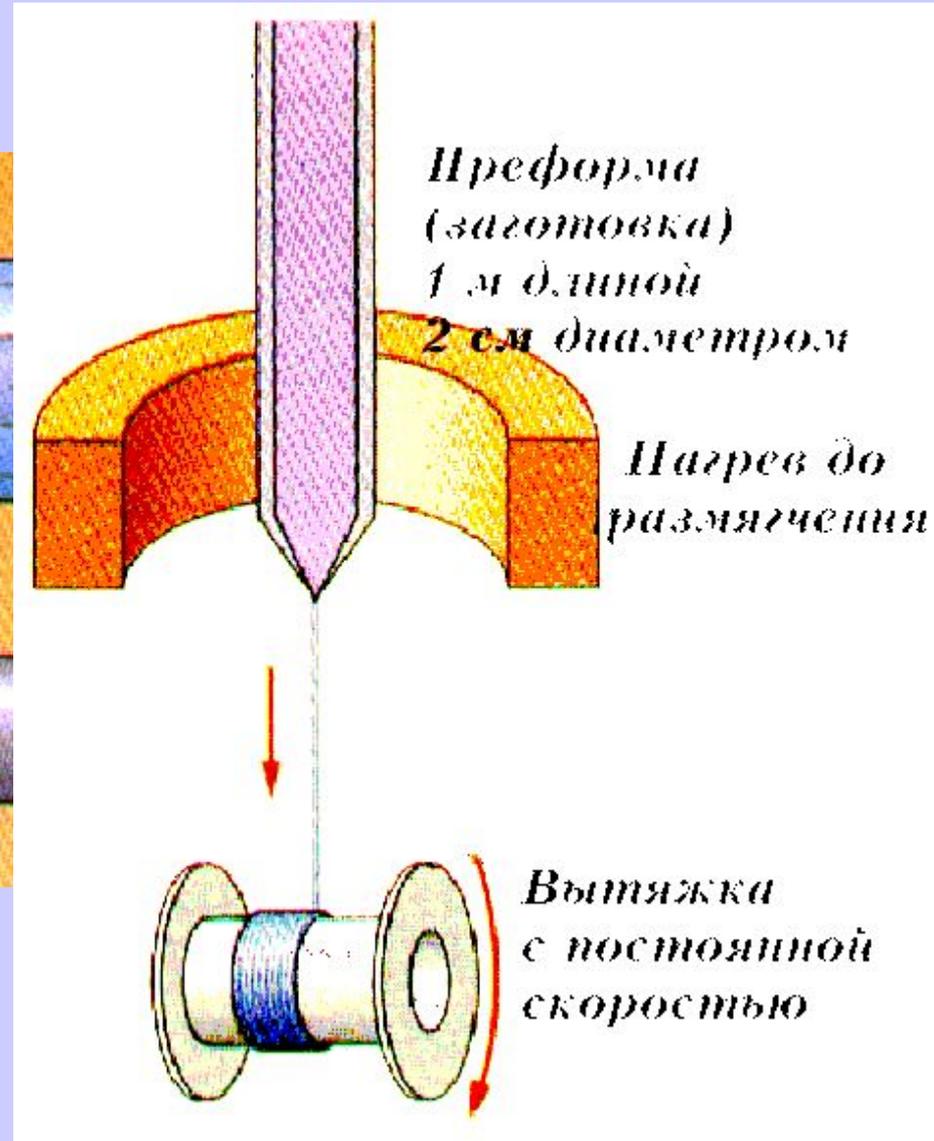
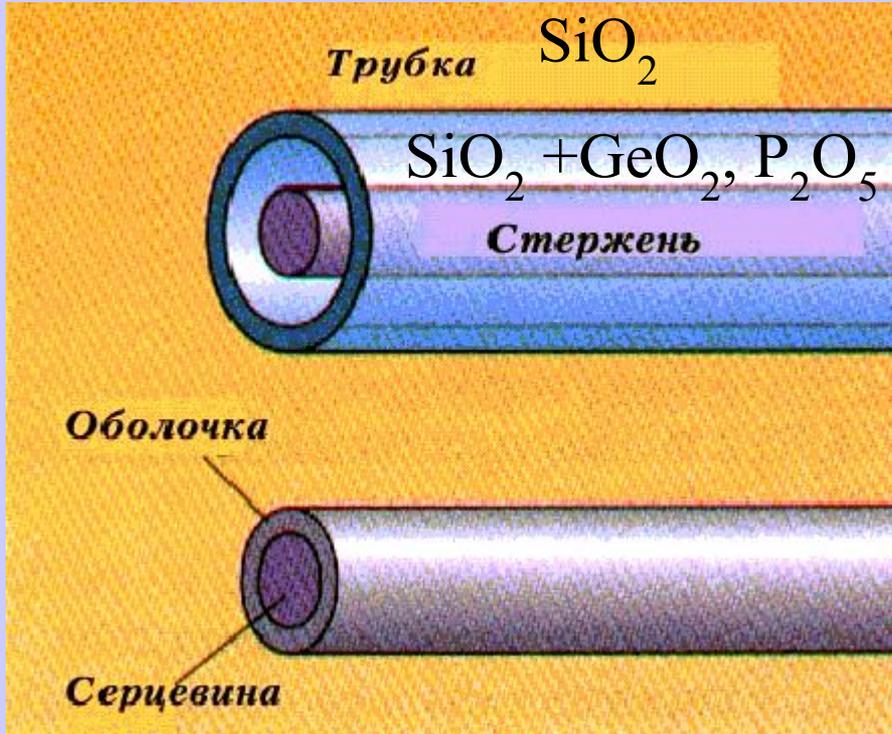
Градиентные волокна



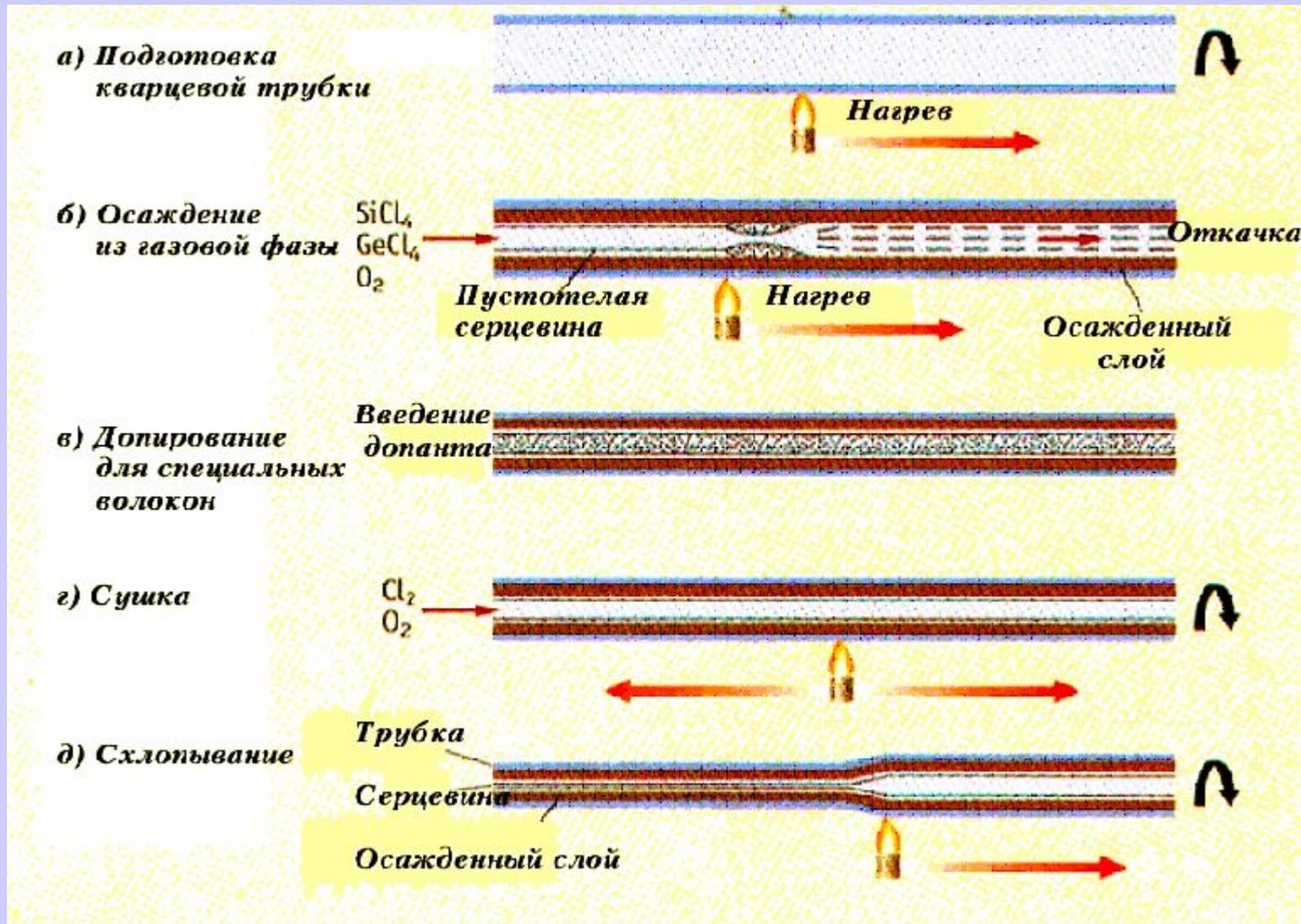
Распространение света в градиентном волокне



Материалы и изготовление



Модифицированный метод химического осаждения из газовой фазы (МСVD) ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗАГОТОВКИ



Оптические потери в кварцевом волокне

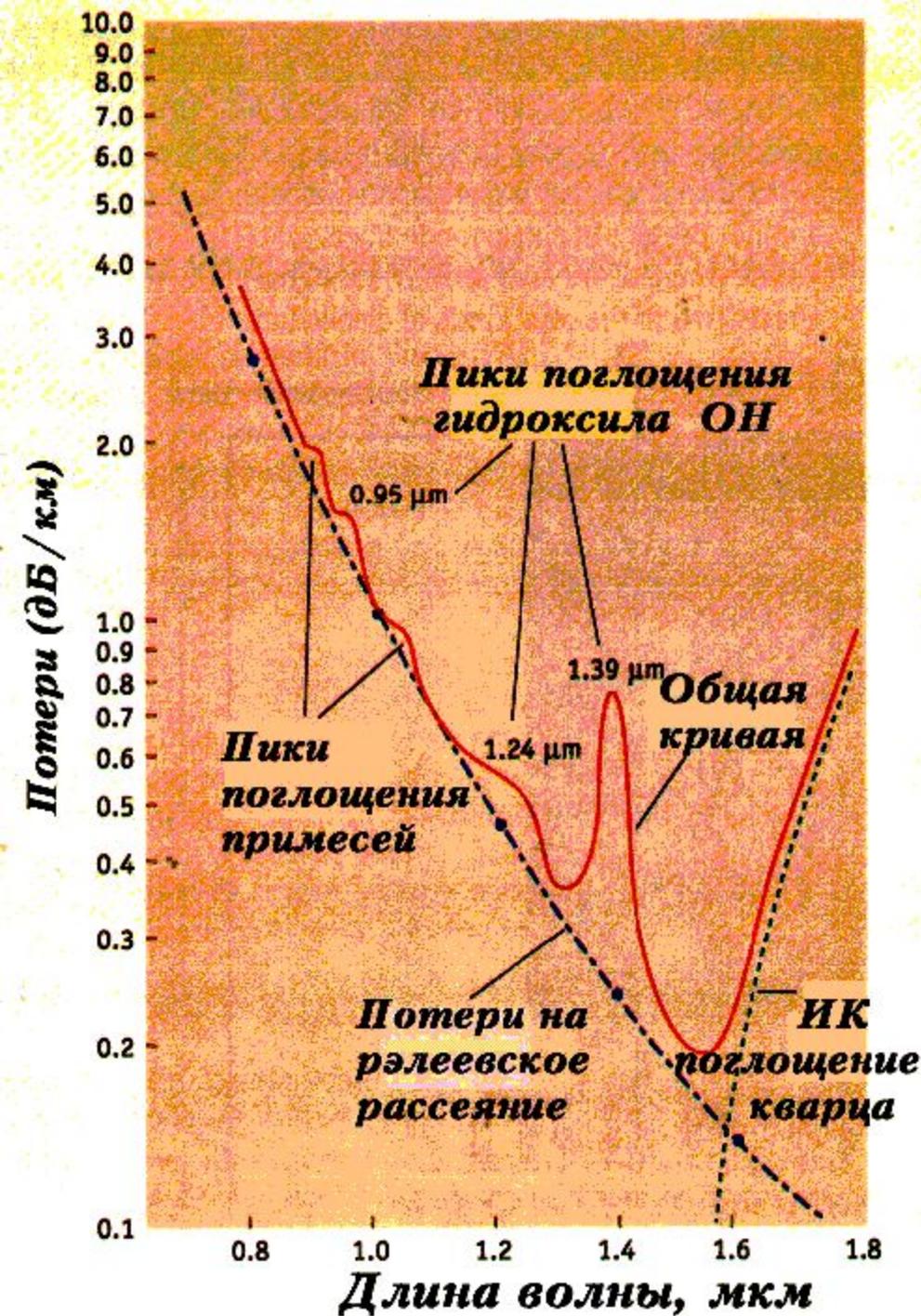
$$\alpha_{\text{дБ}} = -10 \log\left(\frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}}\right)$$

Рэлеевские потери

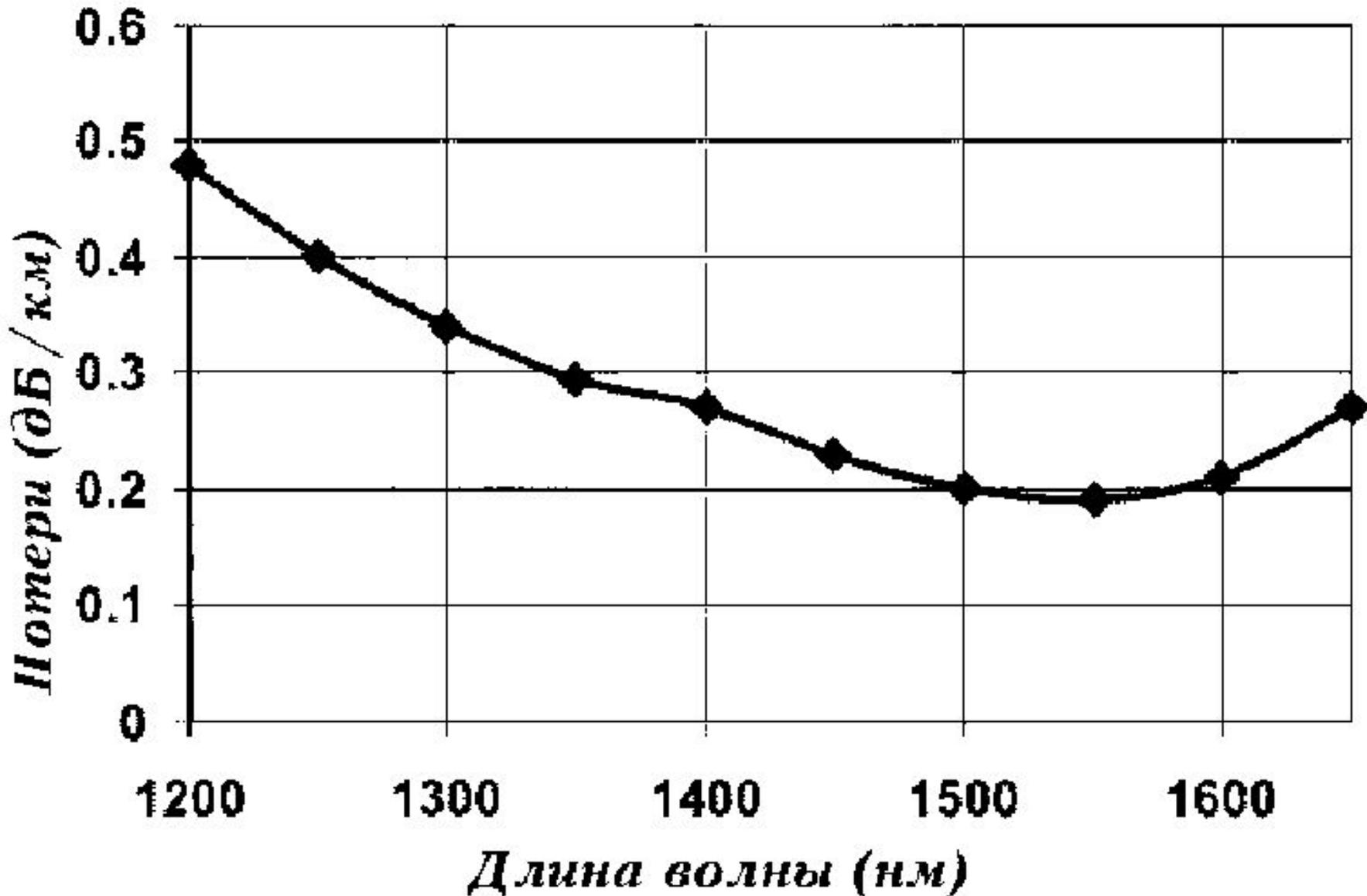
$$\alpha_R = C / \lambda^4$$

$$C = 0,7 - 0,9 \text{ дБ}/(\text{км мкм}^4)$$

$$\alpha_R = 0,12 - 0,15 \text{ дБ}/\text{км} \\ (1,55 \text{ мкм})$$



Оптические потери в новом волокне фирмы Lucent



ХРОМАТИЧЕСКАЯ ДИСПЕРСИЯ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

Формула Зельмейера

$$n^2(\omega) = 1 + \sum_{j=1}^m \frac{B_j \omega_j^2}{\omega_j^2 - \omega^2},$$

при $m = 3$

Для объемного кварцевого стекла

$B_1 = 0,696163$, $B_2 = 0,4079426$, $B_3 = 0,8974794$, $\lambda_1 = 0,0684043$ мкм,
 $\lambda_2 = 0,1162414$ мкм, $\lambda_3 = 9,896161$ мкм, где $\lambda_j = 2\pi c/\omega_j$ и c – скорость
света в вакууме

Постоянная распространения моды излучения в волокне

$$\beta(\omega) = n(\omega) \frac{\omega}{c} = \beta_0 + \beta_1 (\omega - \omega_0) + \frac{1}{2} \beta_2 (\omega - \omega_0)^2 + \dots,$$

где

$$\beta_m = \left[\frac{d^m \beta}{d\omega^m} \right]_{\omega=\omega_0} \quad (m = 0, 1, 2, 3 \dots).$$

$$\beta_1 = \frac{1}{c} \left(n + \omega \frac{dn}{d\omega} \right) = \frac{n_g}{c} = \frac{1}{v_g},$$

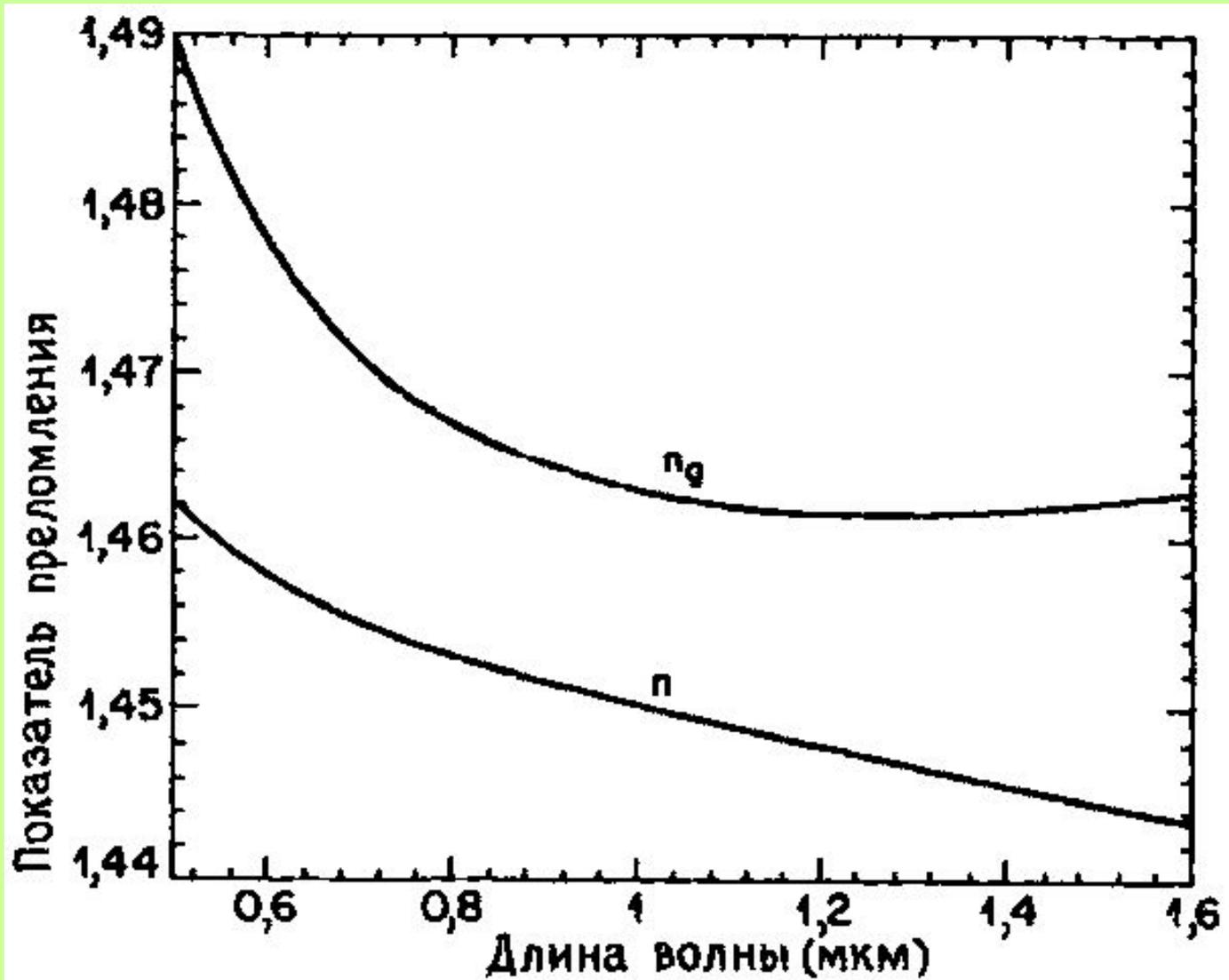
$$\beta_2 = \frac{1}{c} \left(2 \frac{dn}{d\omega} + \omega \frac{d^2 n}{d\omega^2} \right) \approx \frac{\omega}{c} \frac{d^2 n}{d\omega^2} \approx \frac{\lambda^3}{2\pi c^2} \frac{d^2 n}{d\lambda^2},$$

Дисперсионный параметр

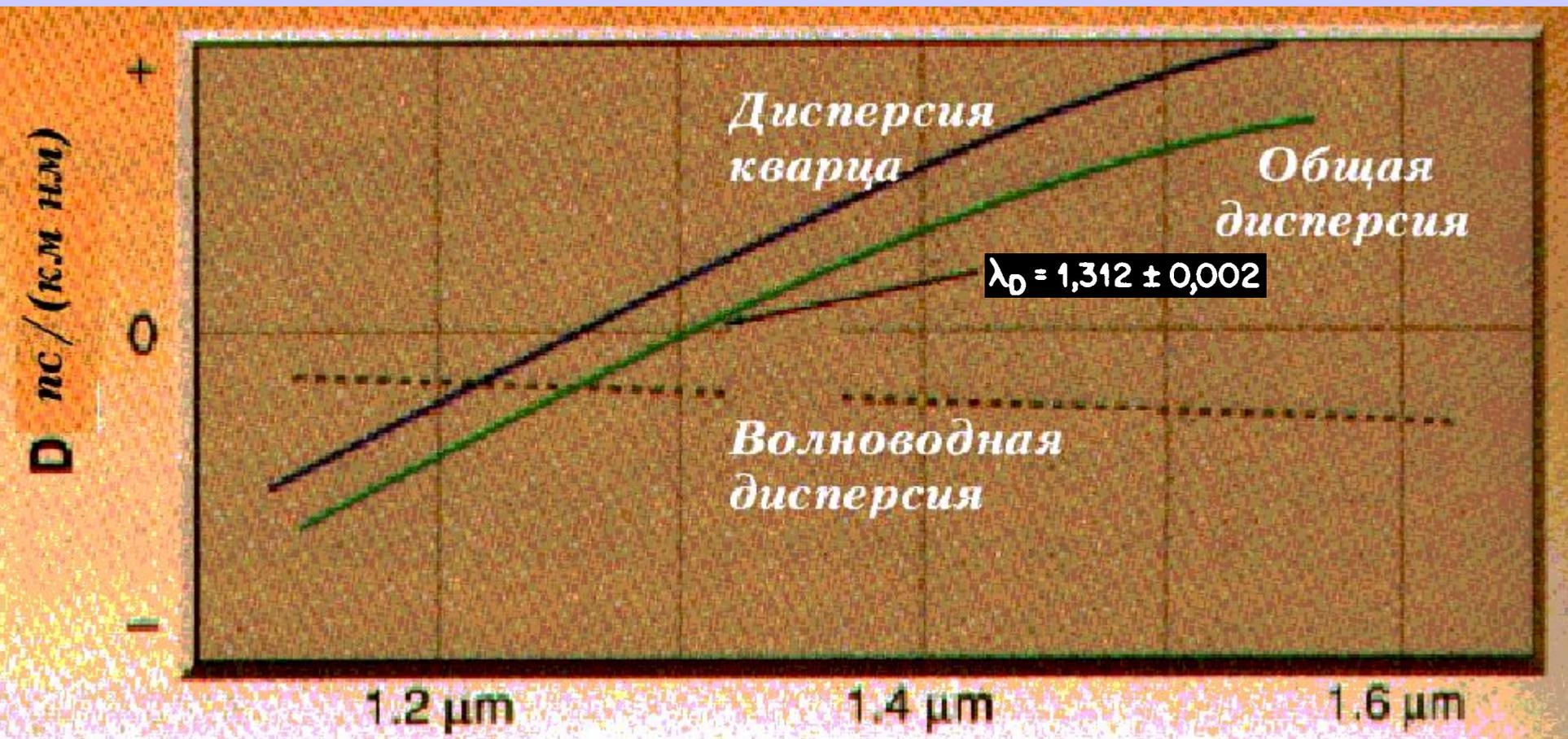
$$D = \frac{d\beta_1}{d\lambda} = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2 \approx -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n}{d\lambda^2}.$$

где n_g – групповой показатель преломления.

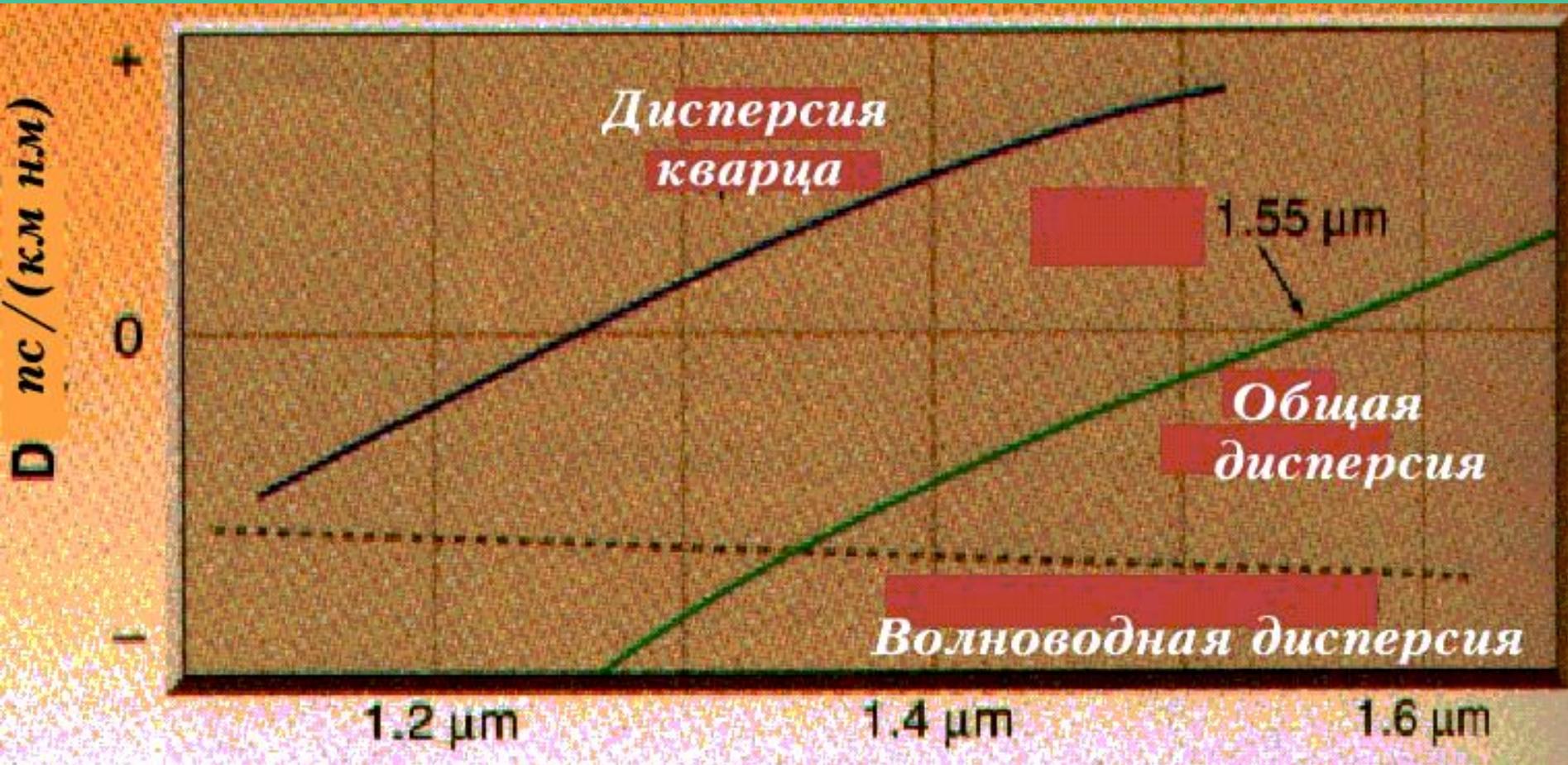
Зависимость показателя преломления n и группового показателя преломления n_g кварцевого стекла от длины волны.



Зависимость дисперсионного параметра D одномодового волокна от длины волны



Волокно со смещенной областью нулевой дисперсии к 1,55 мкм

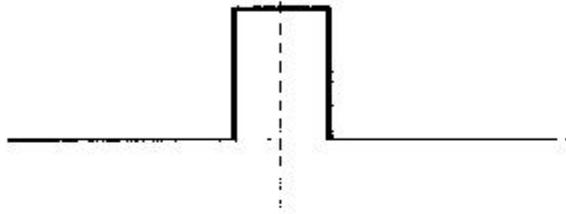


Способы управления волноводной дисперсией

Зависимости показателя преломления волокна от радиуса

Волокно с одной оболочкой

n



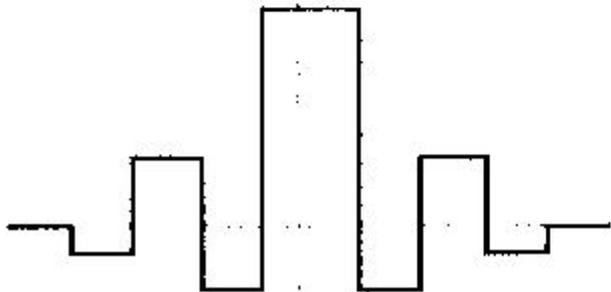
Волокно с двумя оболочками для сдвига дисперсии

r

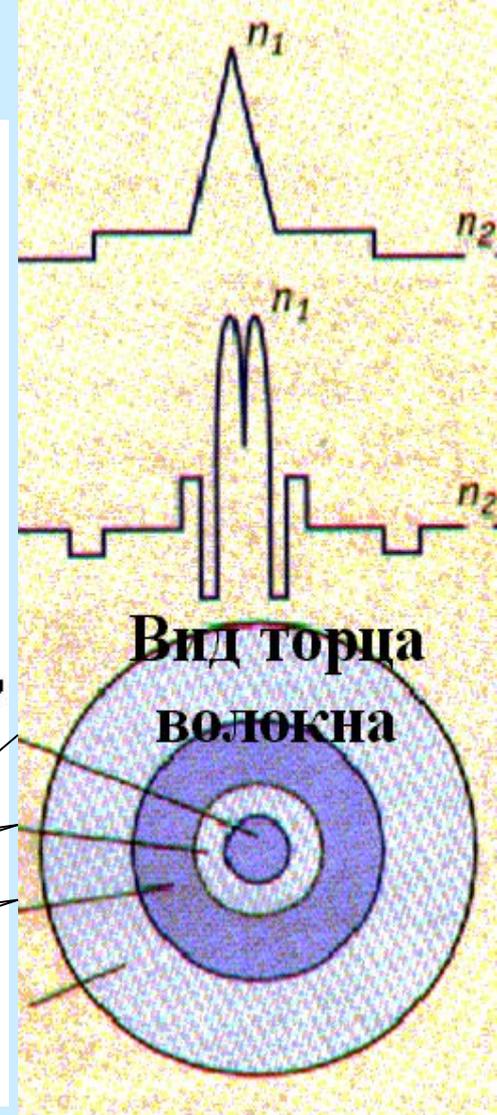
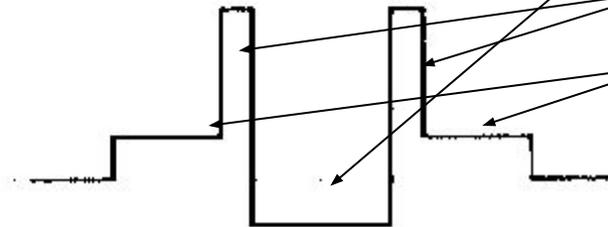


Волокна с четырьмя оболочками

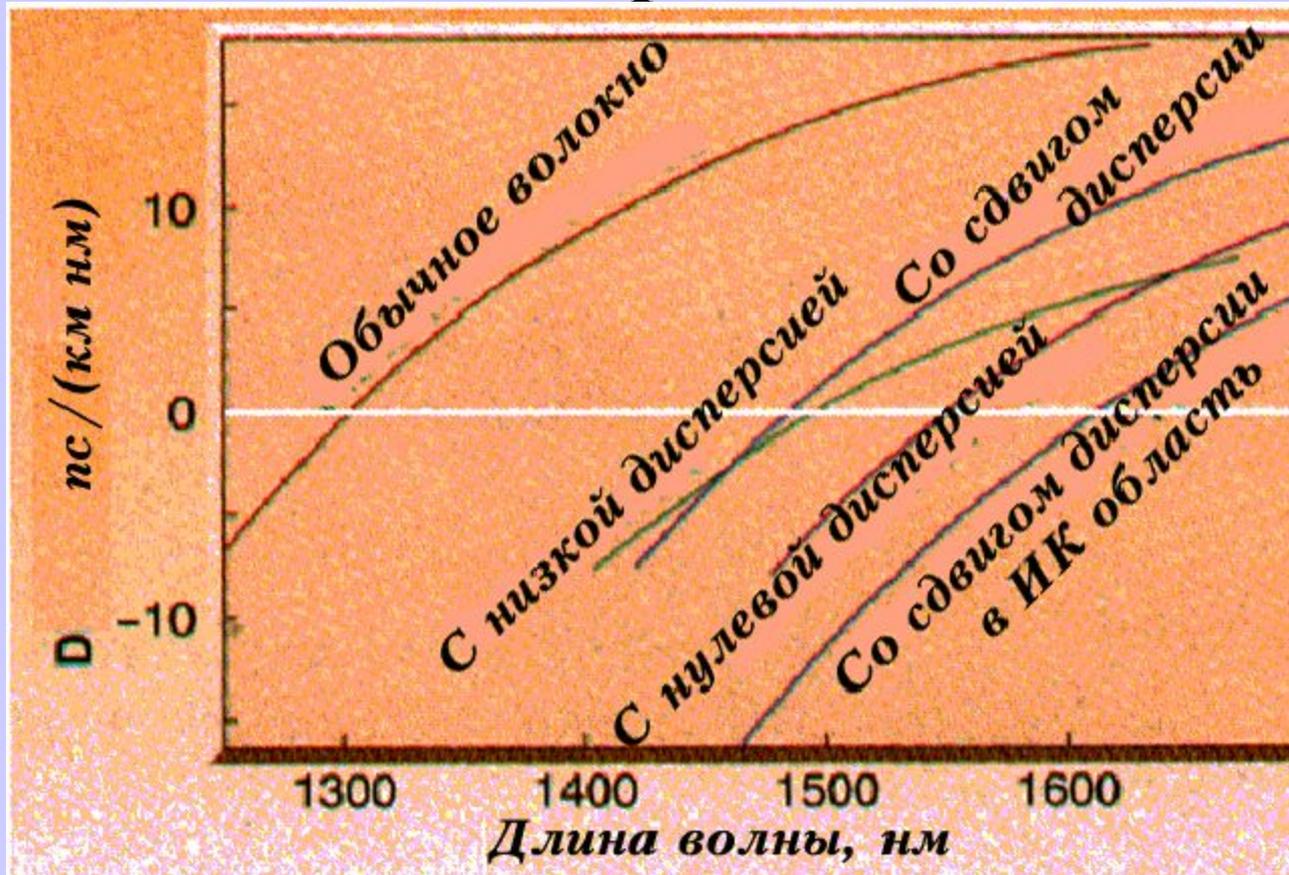
с низкой дисперсией
(< 1 пс/(км нм))



с большой площадью
серцевины



Зависимость дисперсионного параметра D от длины волны для разных типов волокон



Параметр расстройки
групповых скоростей

Длина дисперсионного
разбегания

$$d_{12} = \beta_1(\lambda_1) - \beta_1(\lambda_2) = v_g^{-1}(\lambda_1) - v_g^{-1}(\lambda_2),$$



Модовое двулучепреломление

Степень модового
двулучепреломления

$$B = \frac{|\beta_x - \beta_y|}{k_0} = |n_x - n_y|$$

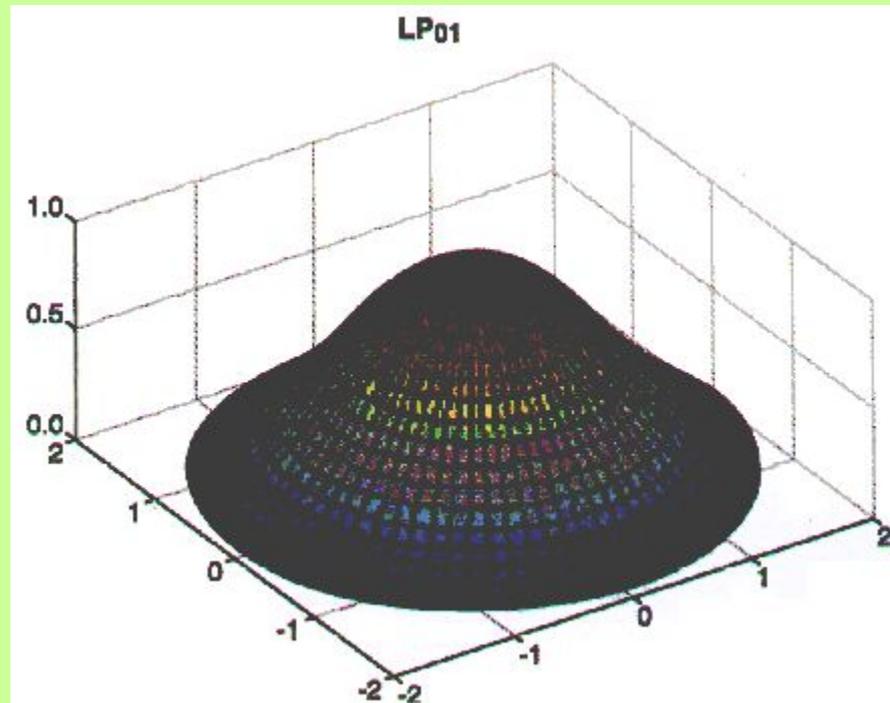
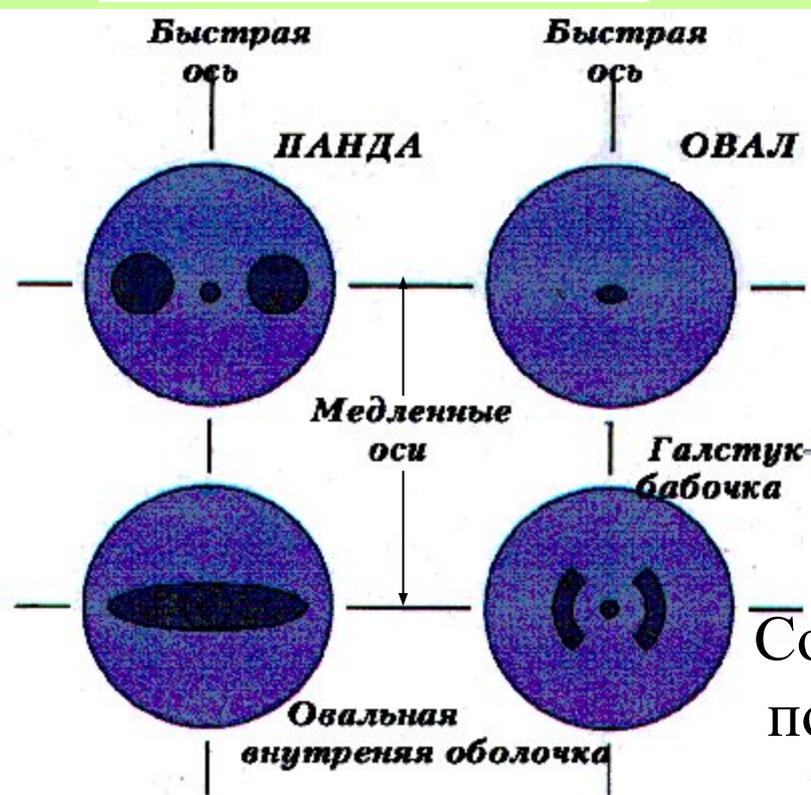
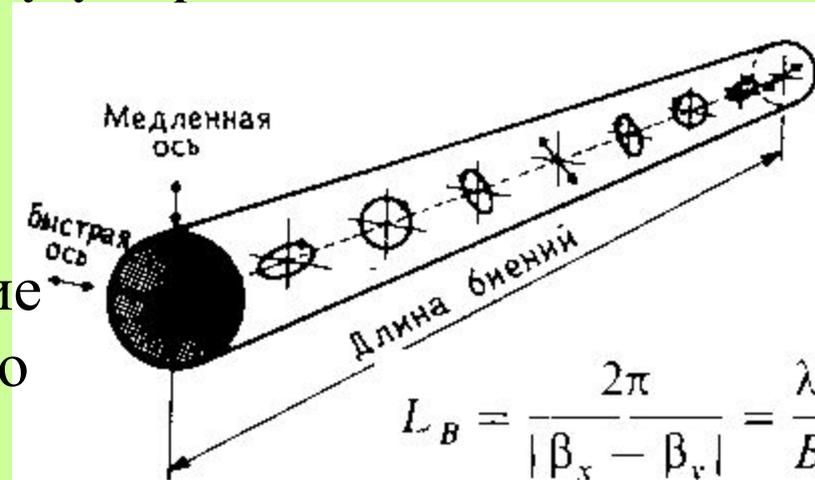


Схема эволюции состояния поляризации света
вдоль двулучепреломляющего световода.



Сохраняющие
поляризацию
волокна



$$L_B = \frac{2\pi}{|\beta_x - \beta_y|} = \frac{\lambda}{B}$$

Нелинейные эффекты в волокнах

Индукцированная поляризация

$$\mathbf{P} = \epsilon_0 (\chi^1 \mathbf{E} + \chi^2 : \mathbf{E}\mathbf{E} + \chi^3 : \mathbf{E}\mathbf{E}\mathbf{E} + \dots)$$

где ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума, χ^j ($j = 1, 2, \dots$) – восприимчивость j -го порядка, χ^j – тензор ранга $j + 1$, вводимый для учета поляризационных эффектов.

Фазовая самомодуляция

$$\bar{n}(\omega, |E|^2) = n(\omega) + n_2 |E|^2$$

Фаза оптического поля

$$\phi = \bar{n} k_0 L = (n + n_2 |E|^2) k_0 L,$$

Нелинейный набег фазы

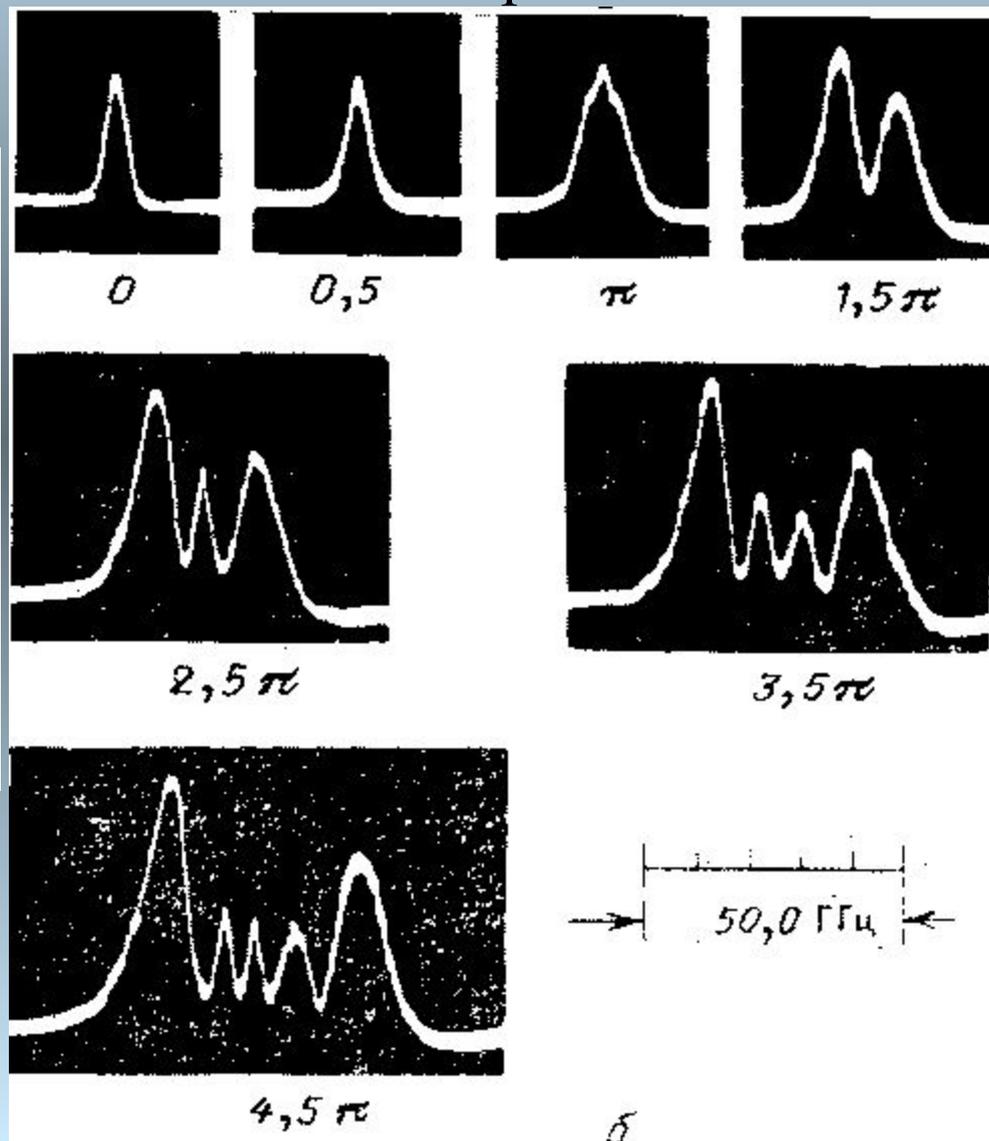
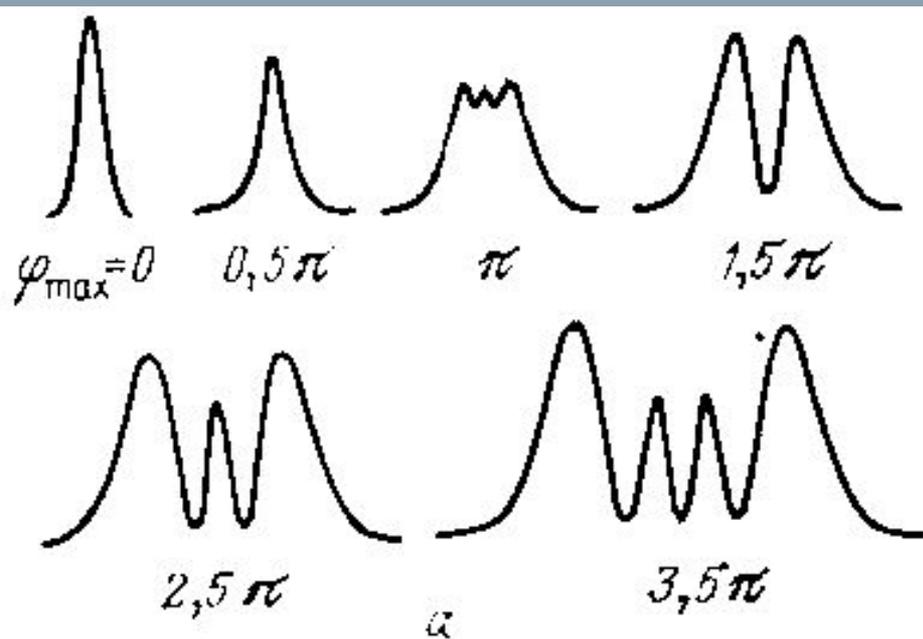
Нелинейный показатель преломления

$$n_2 = \frac{3}{8n} \chi_{xxxx}^{(3)}$$

Спектральное уширение в волокне вследствие фазовой самомодуляции

Эксперимент

Расчет

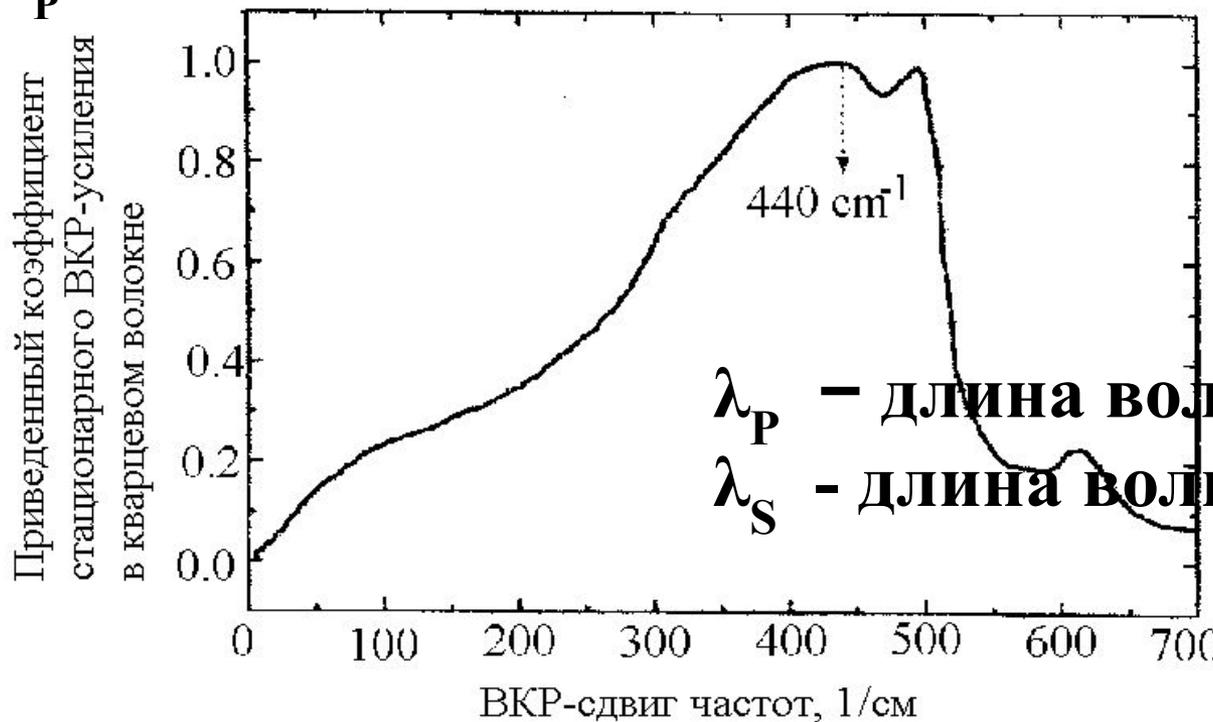


Нелинейные эффекты в волокнах

Вынужденные рассеяния ВКР и ВРМБ.

ВКР – вынужденное комбинационное рассеяние

ВРМБ – вынужденное рассеяние Манделъштама-Бриллюэна



Уравнение для начального роста стоксовой волны

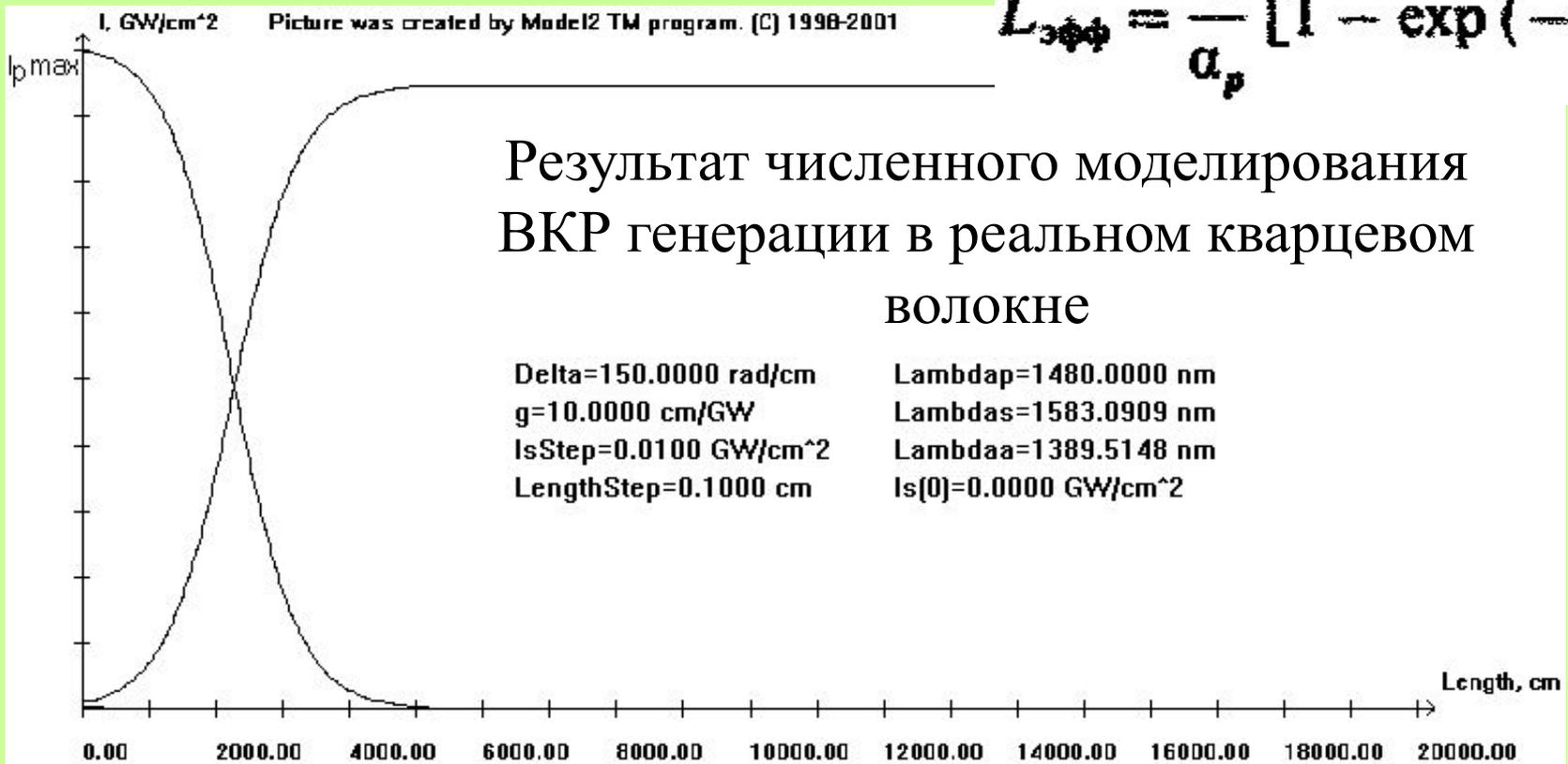
$$\frac{dI_s}{dz} = g_R I_p I_s - \alpha_s I_s$$

$I_{S,P}$ – интенсивности волн Стокса и накачки, g_R – коэффициент усиления стационарного ВКР, $\alpha_{S,P}$ – потери на стоксовой частоте и частоте накачки

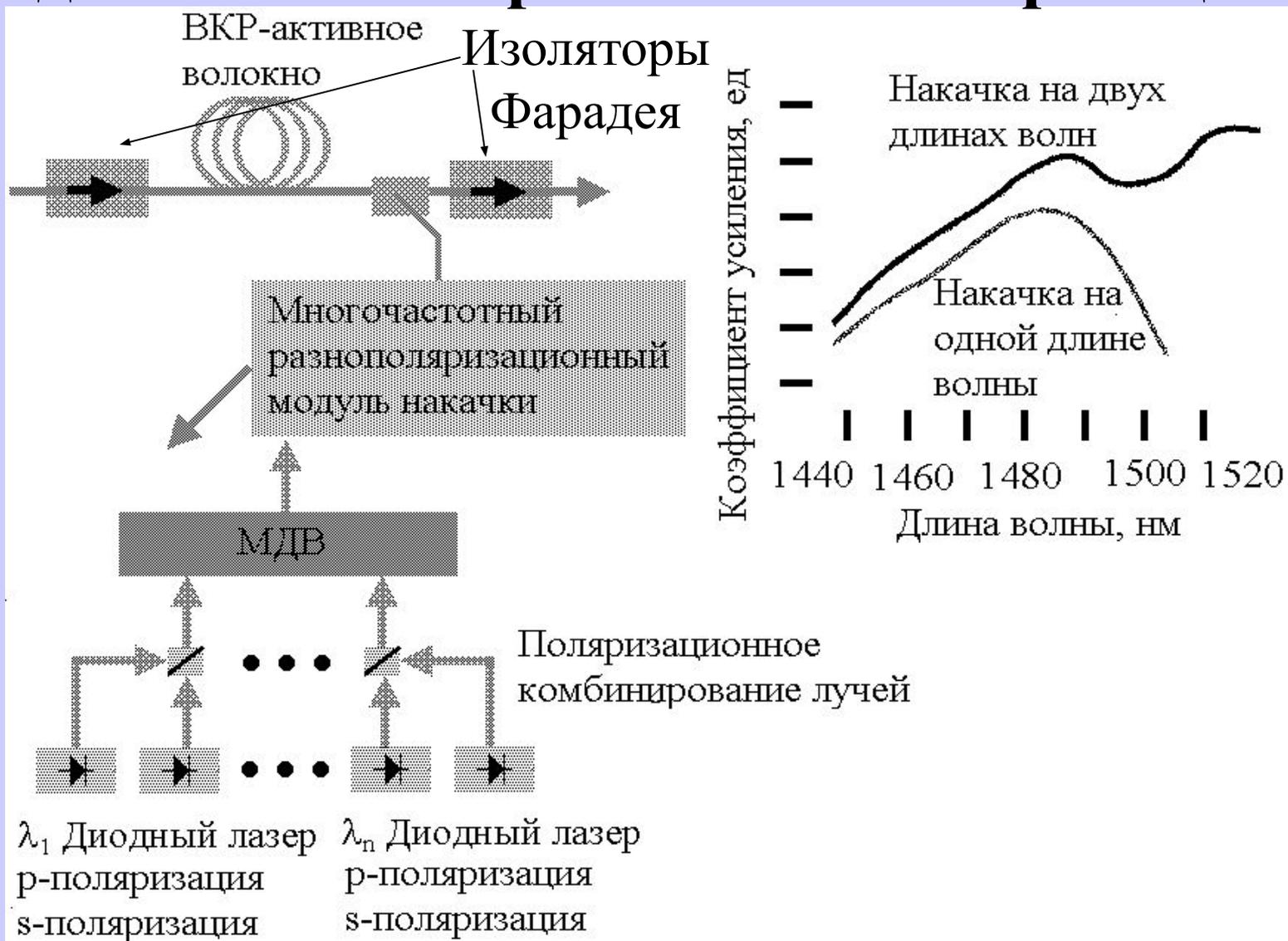
$$I_s(L) = I_s(0) \exp(G_R I_0 L_{эфф} - \alpha_s L)$$

Решение в приближении заданной накачки

$$L_{эфф} = \frac{1}{\alpha_p} [1 - \exp(-\alpha_p L)]$$



Принципиальная схема ВКР-усилителя с использованием накачки на нескольких длинах волн с различной поляризацией.



Литература

- Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика.-М.: Мир, 1996.
-323 с. Раздел «Введение»