

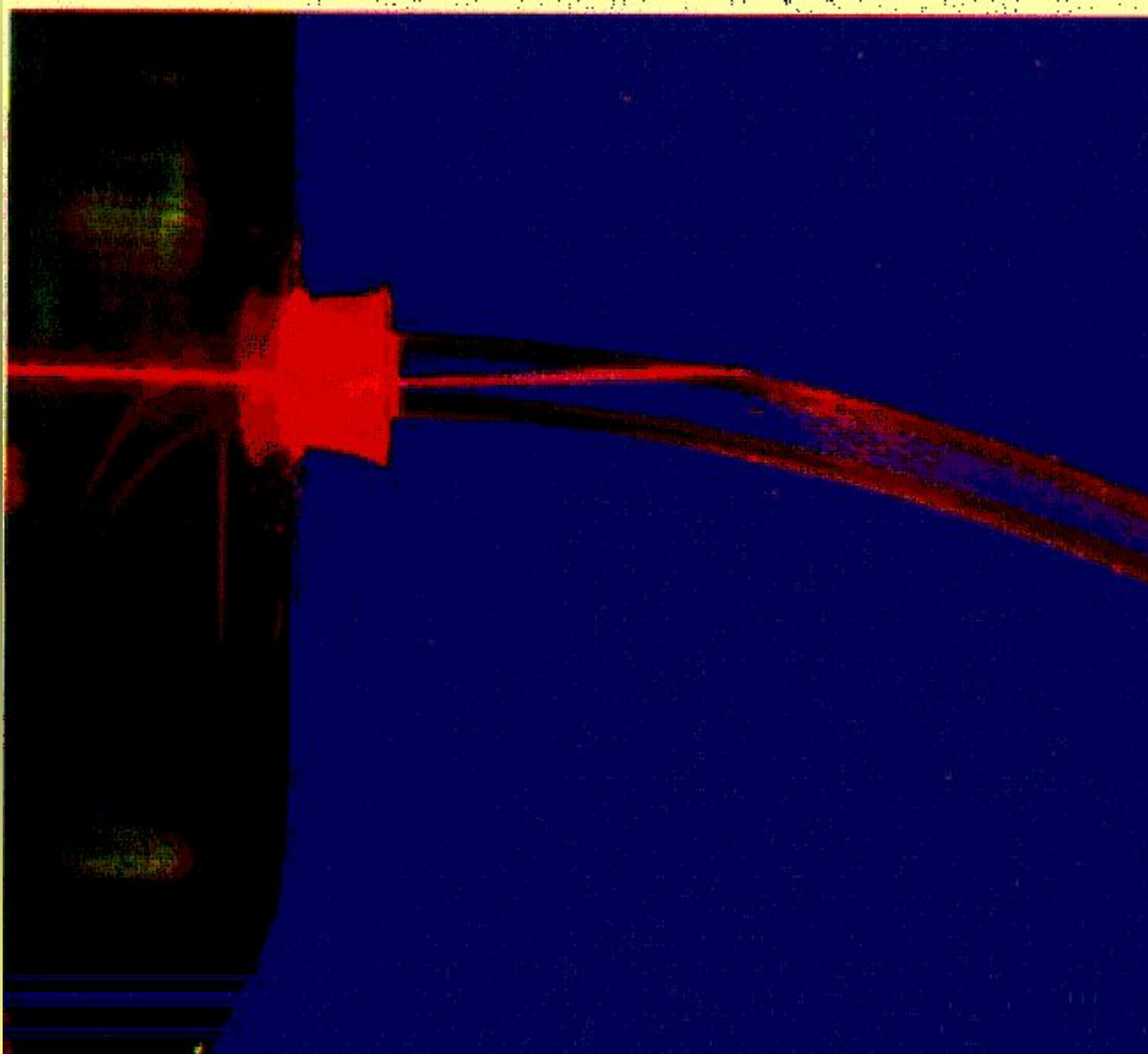
# **Волоконная оптика и её использование в оптоинформатике.**

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

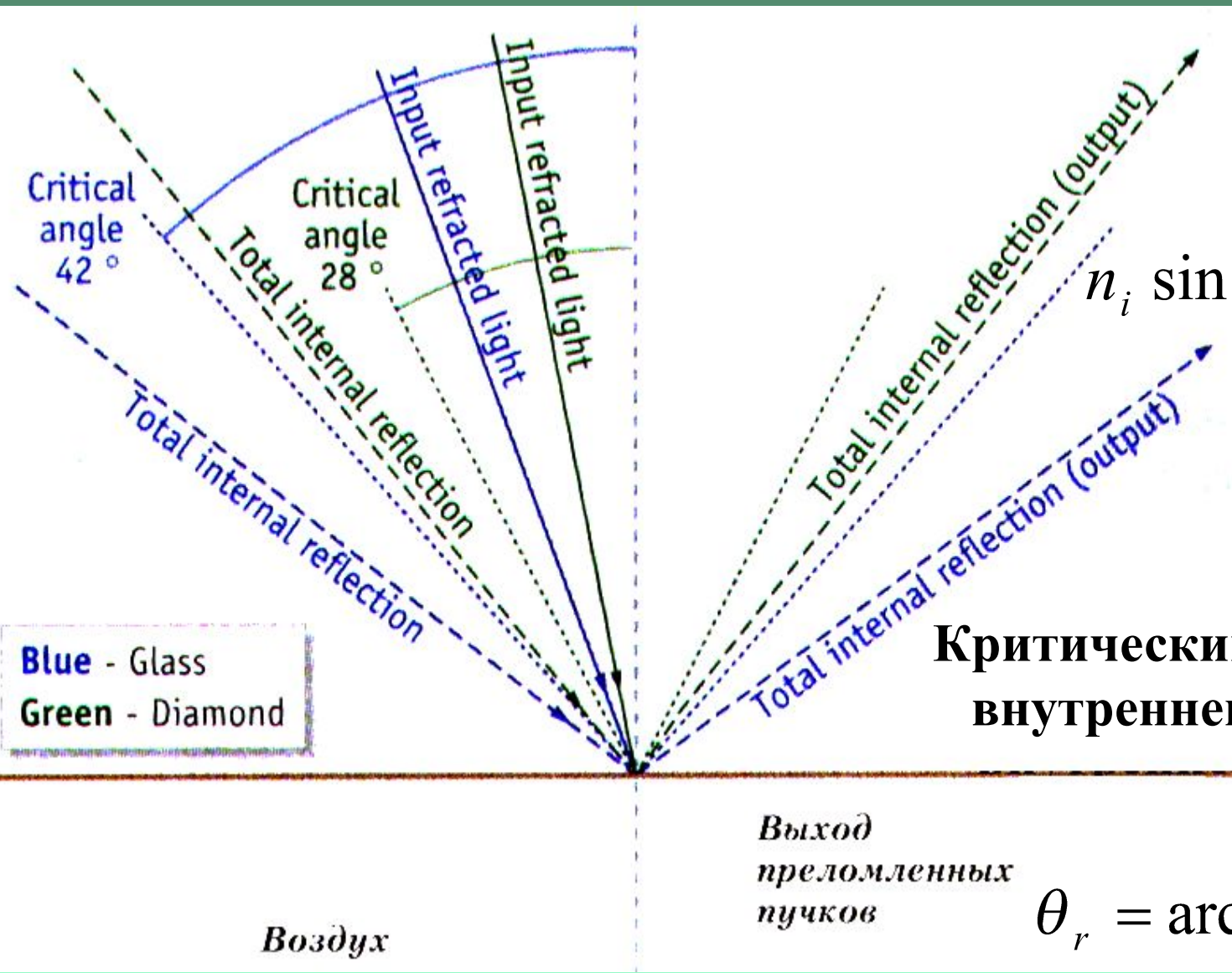
# История волоконной оптики

- 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

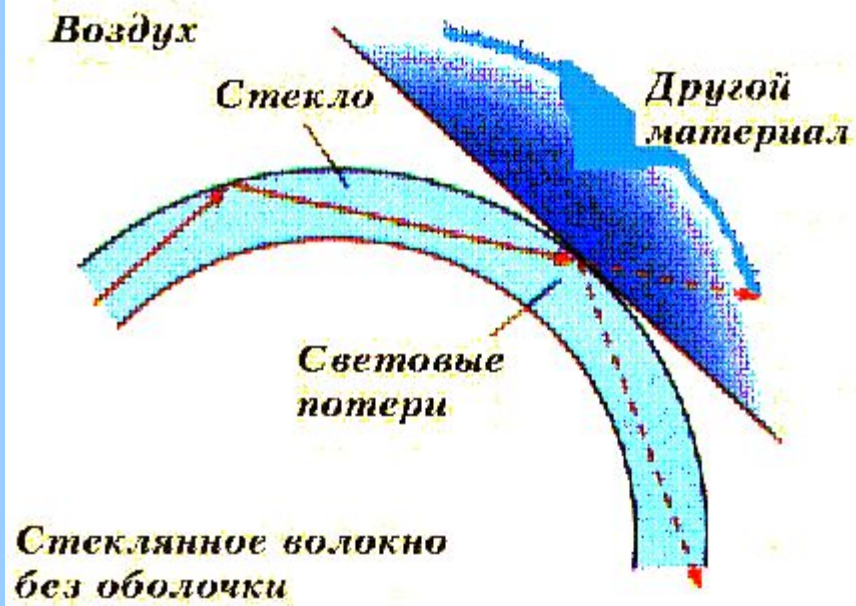


## Закон Снеллиуса

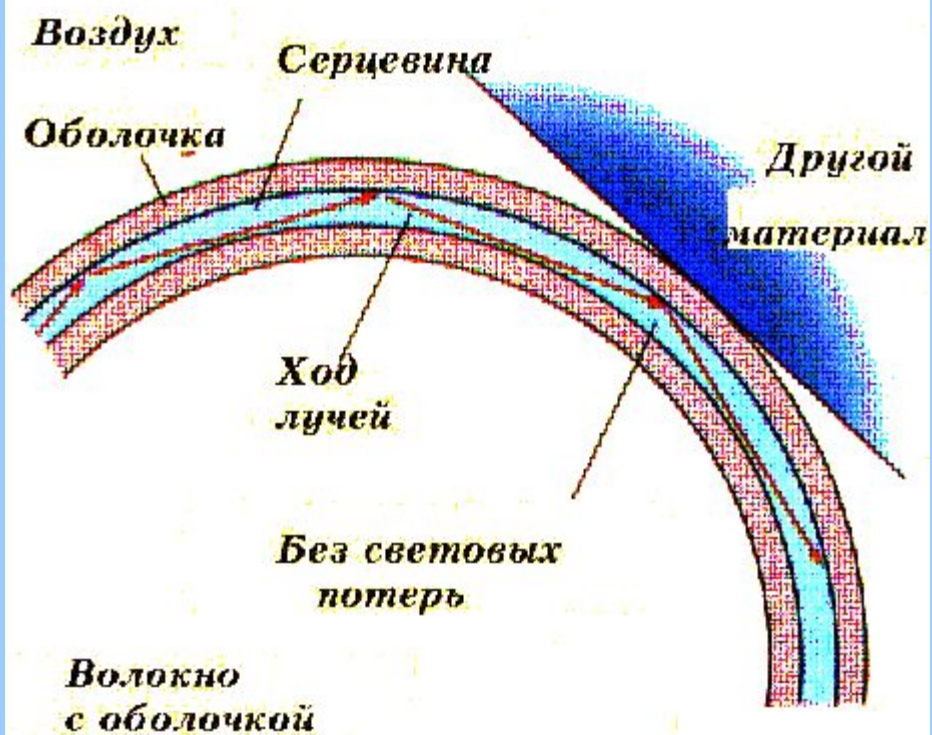
$$n_i \sin \theta_i = n_r \sin \theta_r$$

## Критический угол полного внутреннего отражения

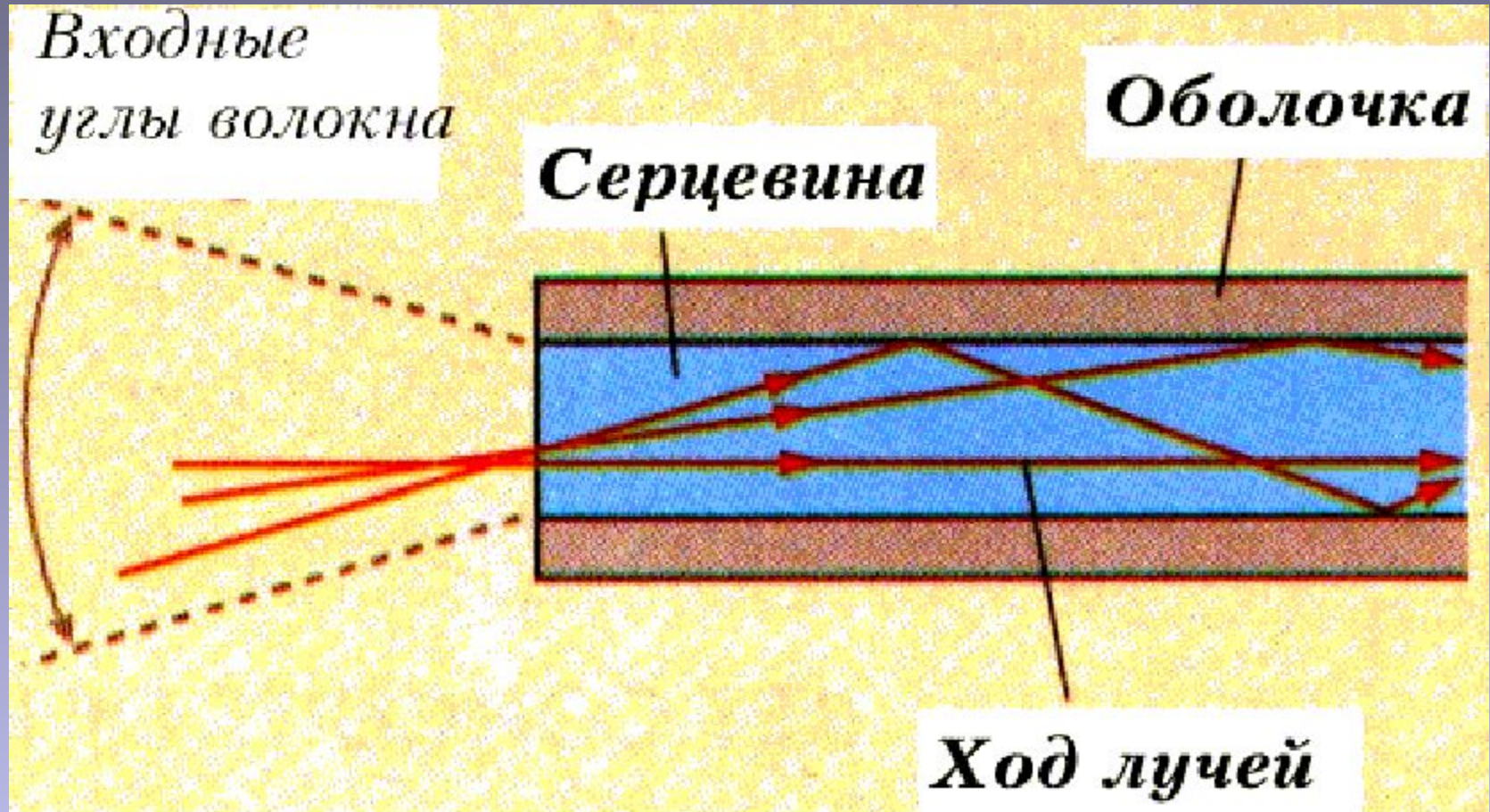
$$\theta_r = \arcsin\left(\frac{n_i \sin \theta_i}{n_r}\right)$$



# Влияние оболочки



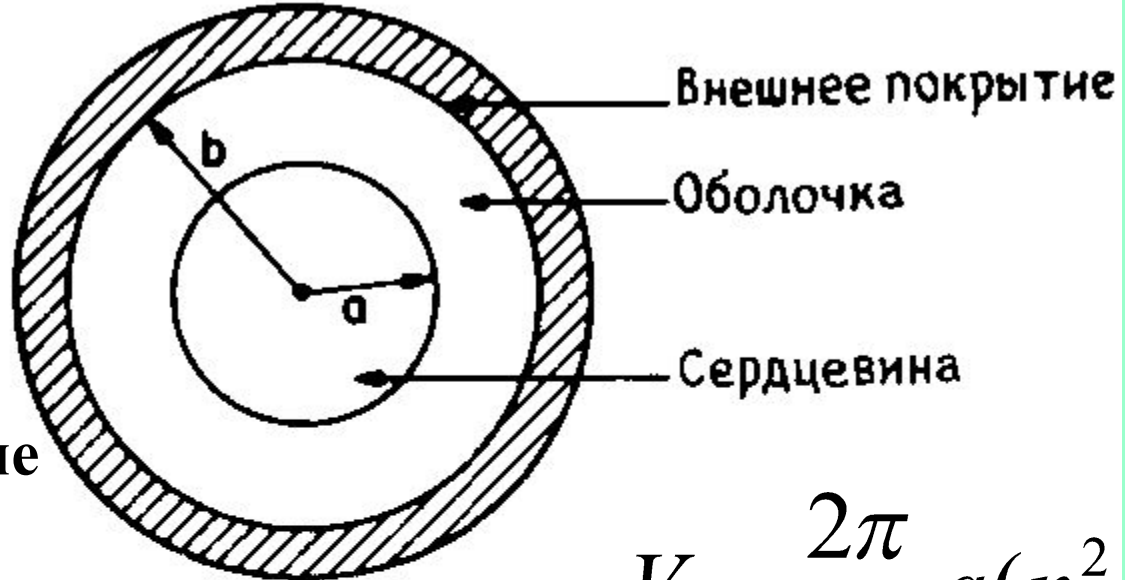
# Устройство простейшего оптического волокна



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

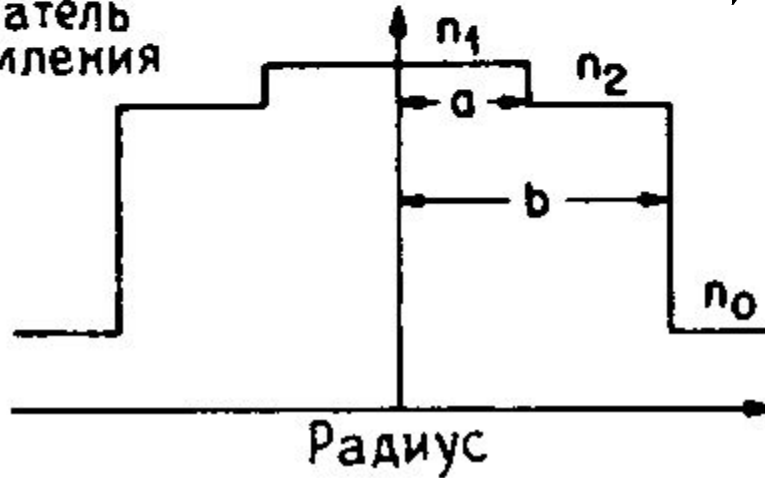
# Основные параметры волокон

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



Типичное значение  
 $\Delta \sim 0,03$

Показатель  
преломления



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

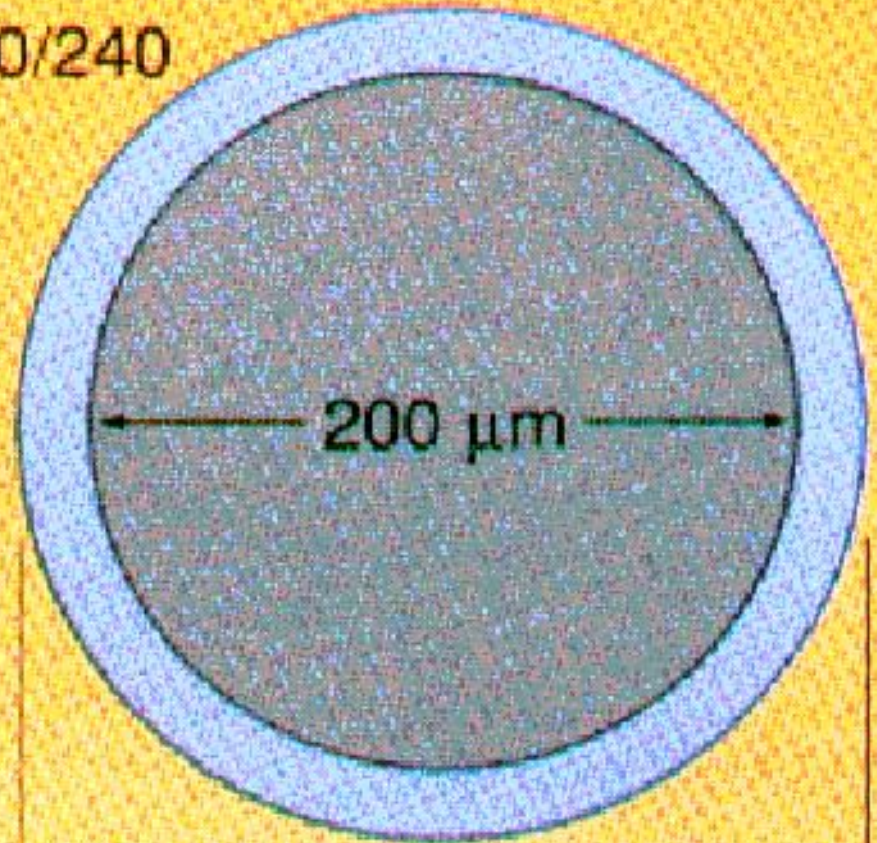
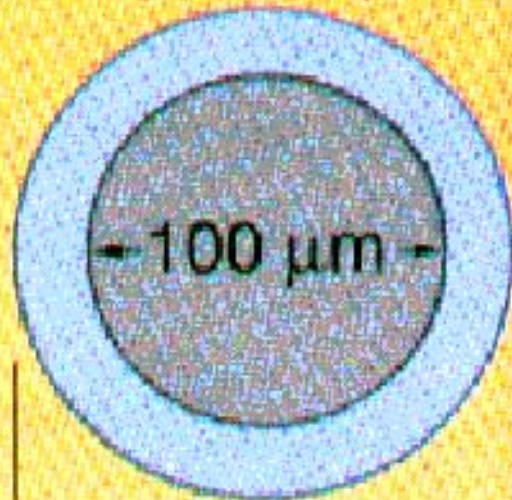
При  $V < 2,405$  волокно одномодовое ( $a = 2 \dots 10$  мкм)

# Основные типы волокон

*Многомодовые волокна  
со ступенчатым  
профилем показателя  
преломления*

200/240

100/140



140  $\mu\text{m}$

*Профиль  
показателя  
преломления*

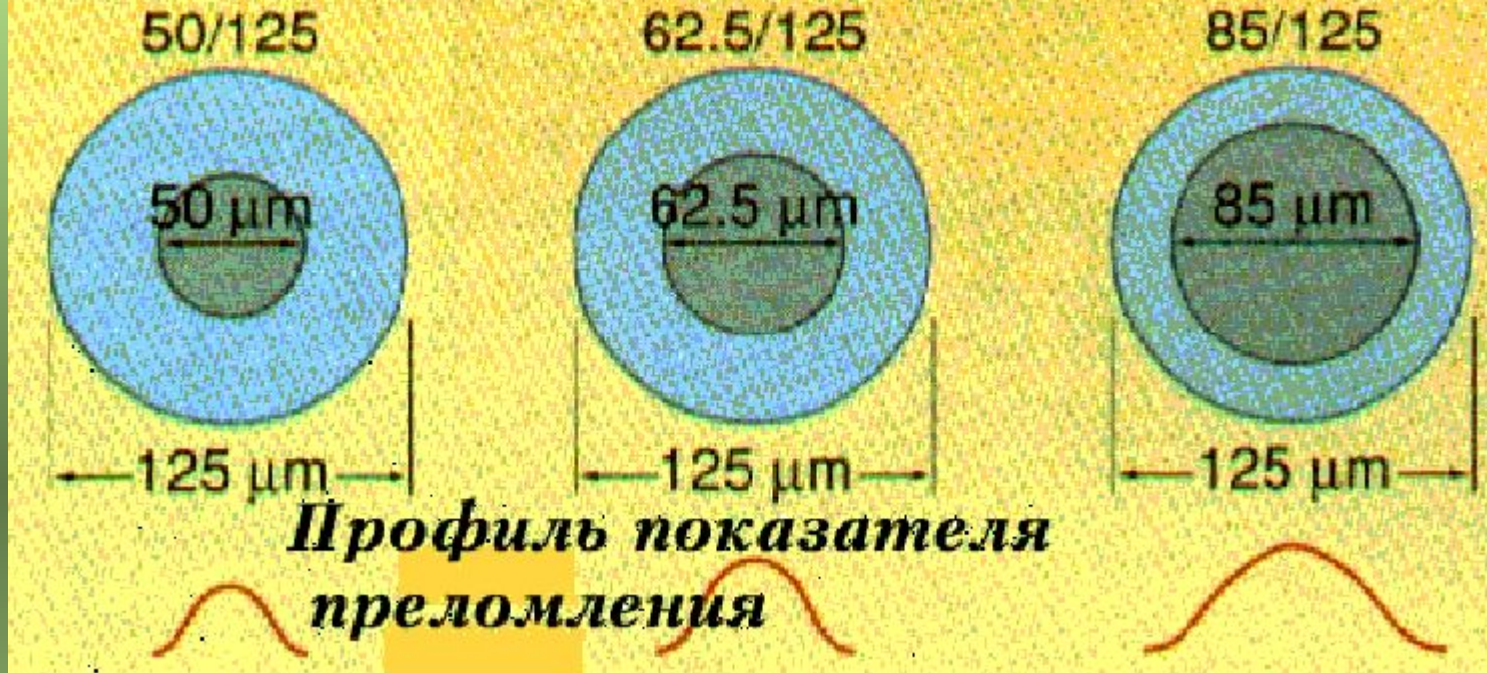
240  $\mu\text{m}$



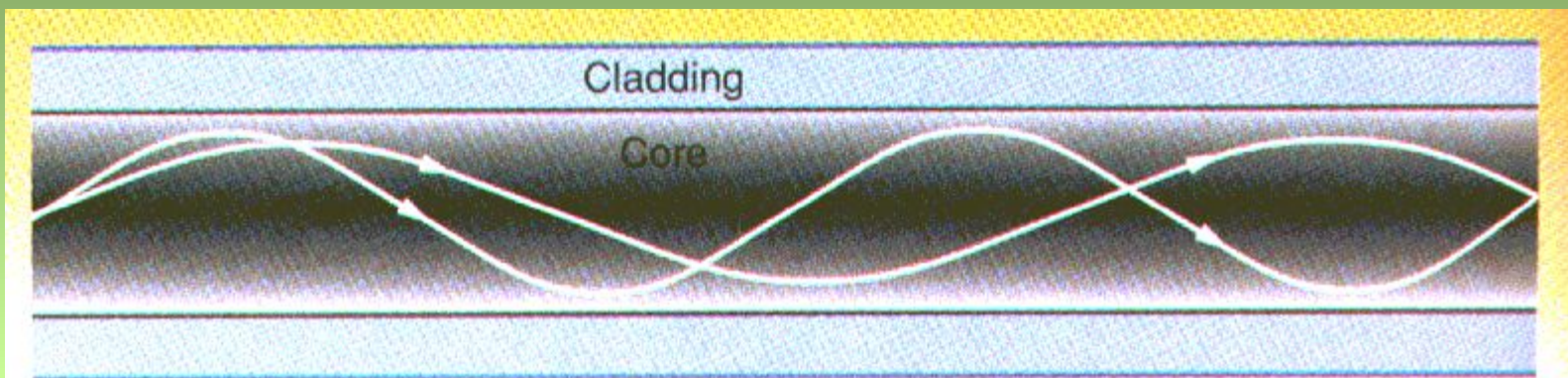


# Основные типы волокон

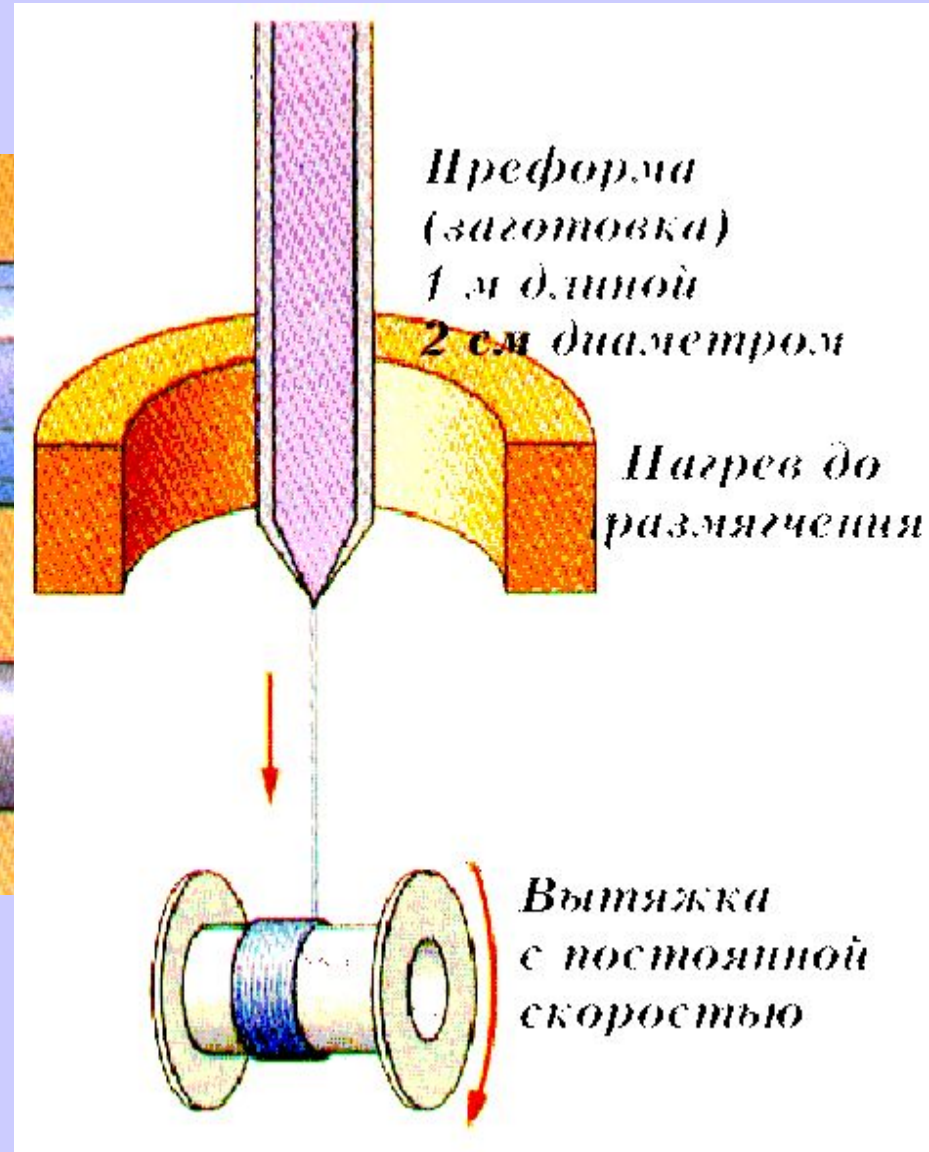
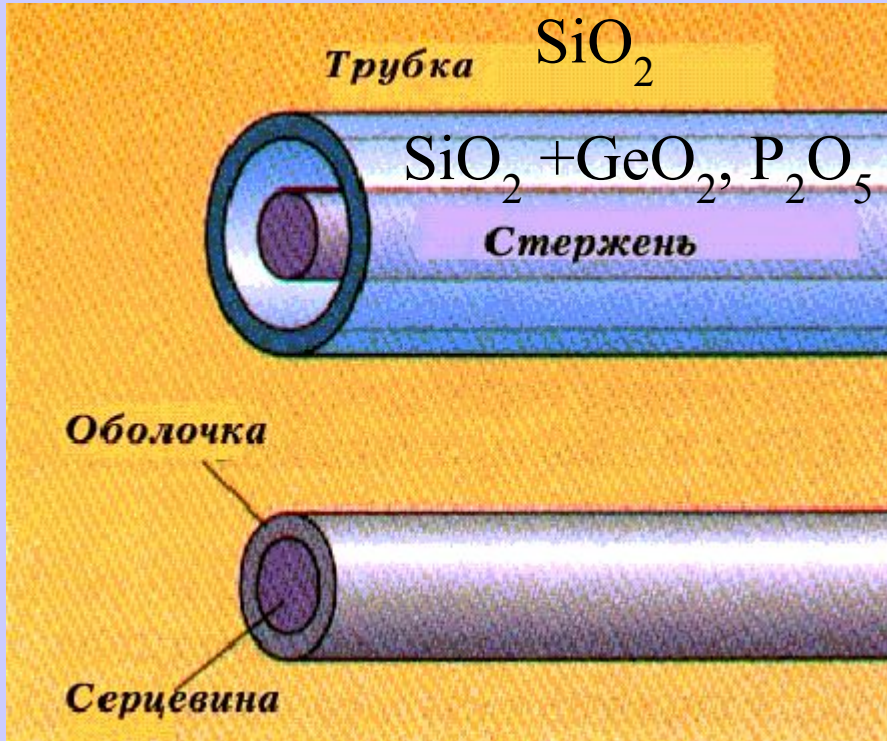
## Градиентные волокна



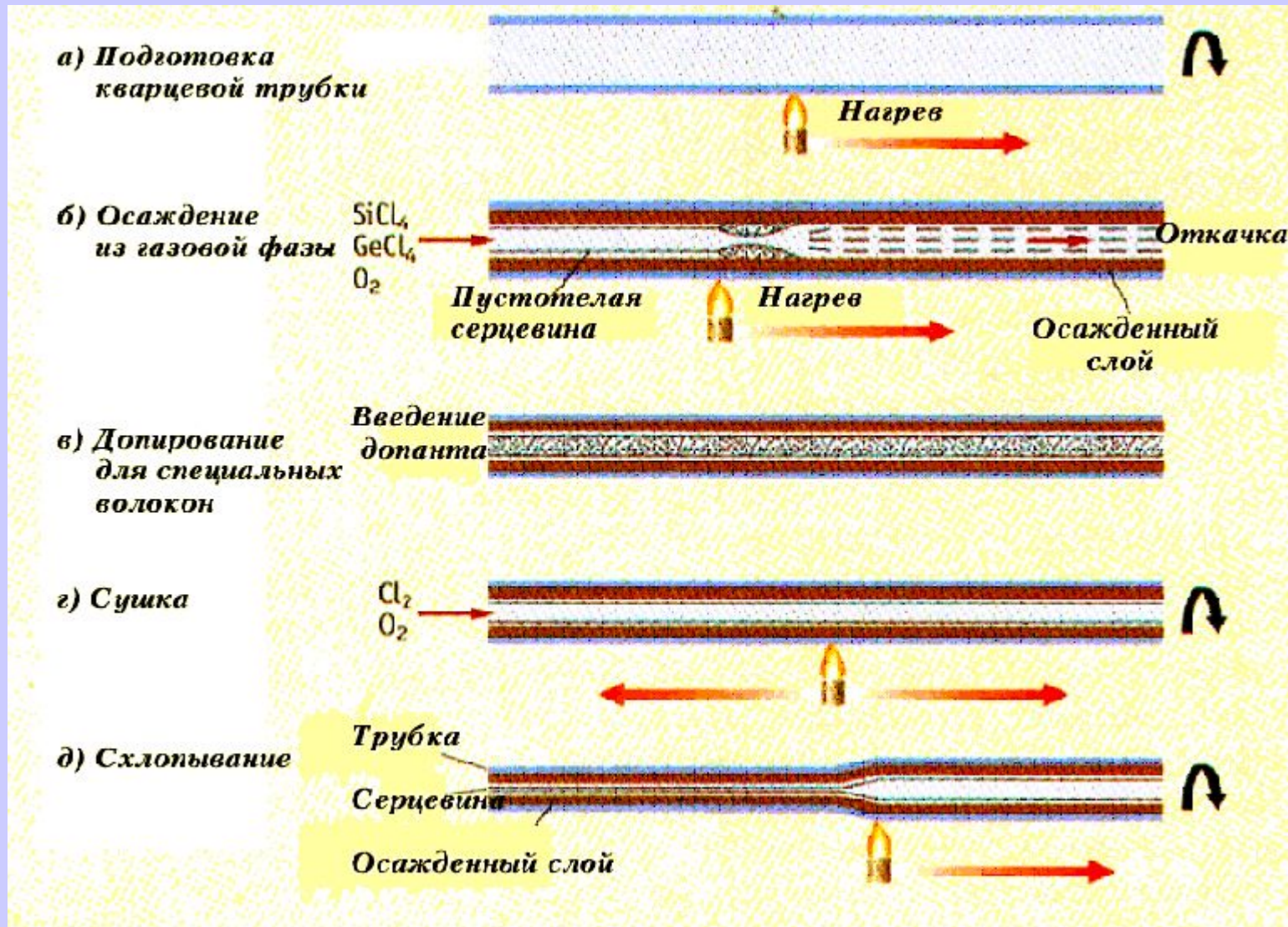
## Распространение света в градиентном волокне



# Материалы и изготовление



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



# Оптические потери в кварцевом волокне

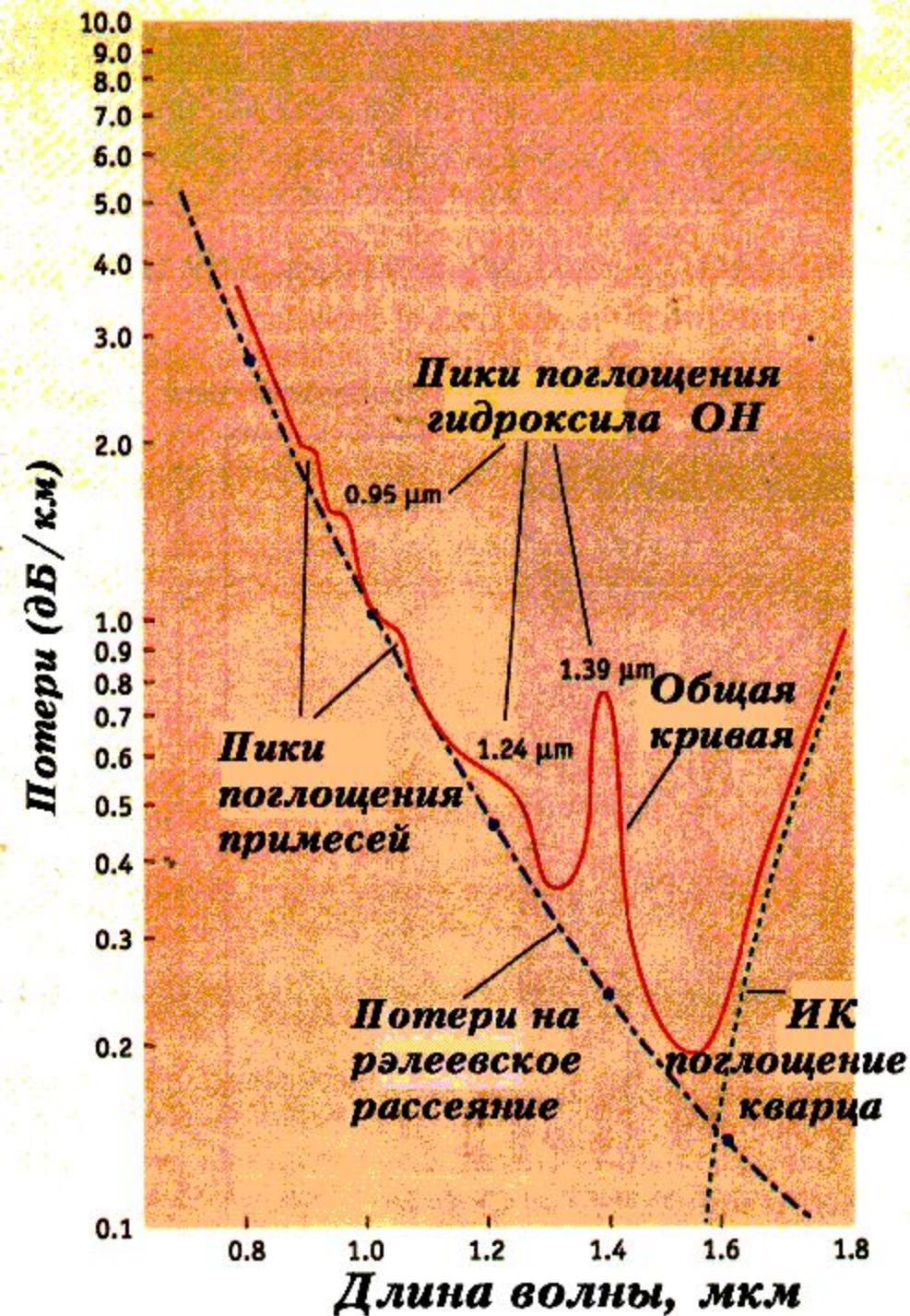
$$\alpha_{\text{дБ}} = -10 \log\left(\frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}}\right)$$

Рэлеевские потери

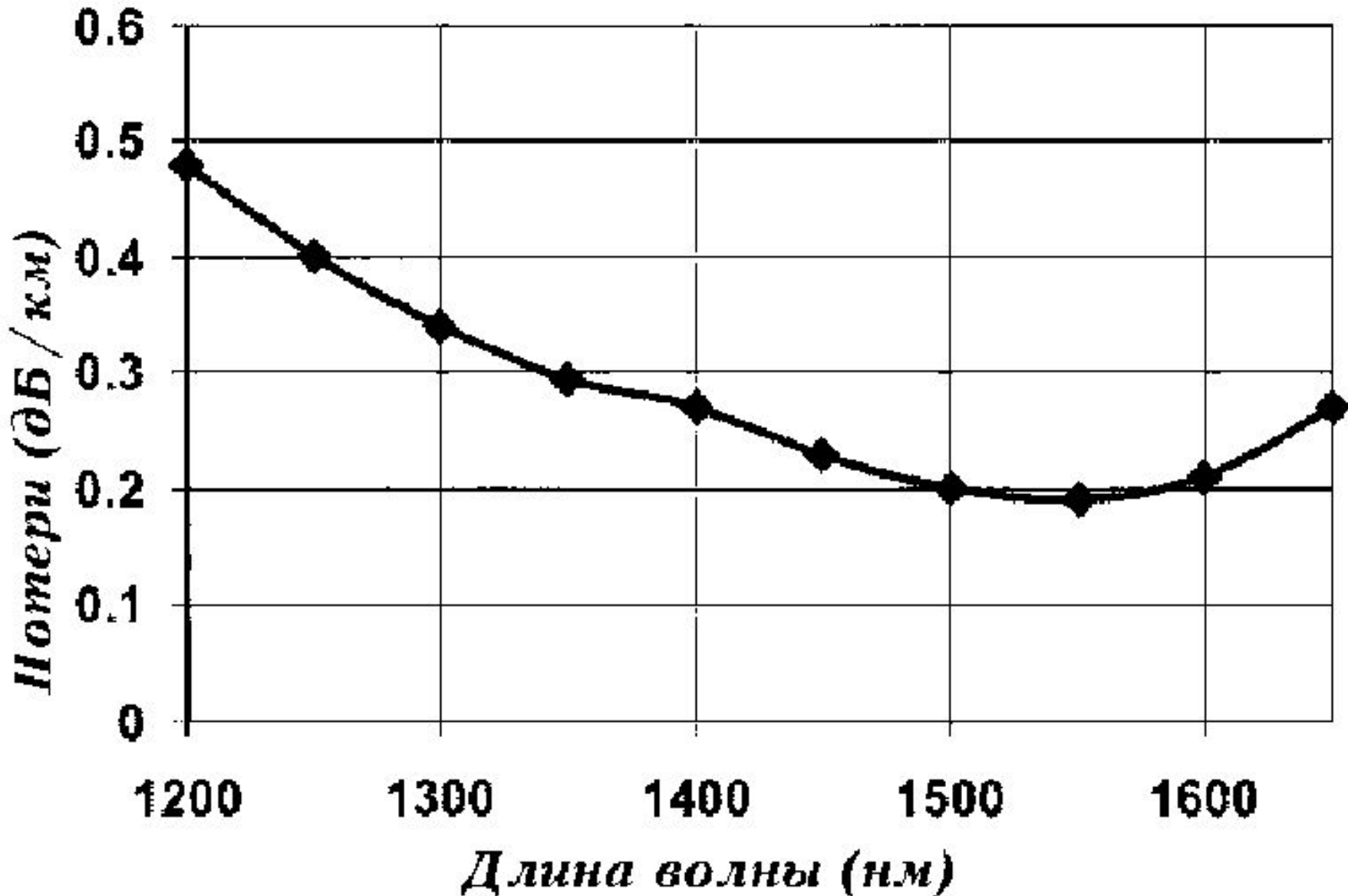
$$\alpha_R = C / \lambda^4$$

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

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



# 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

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

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

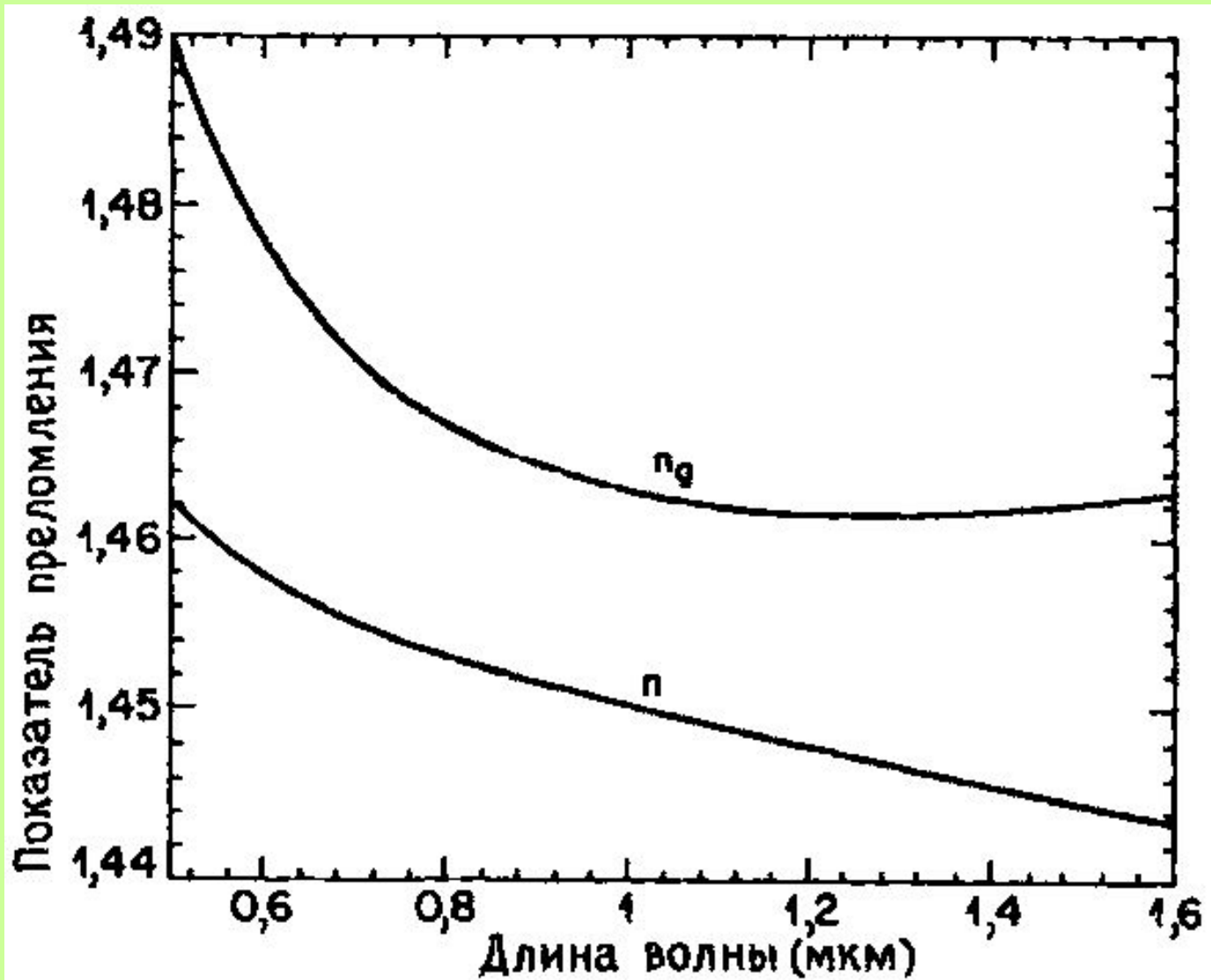
$$\beta_2 = \frac{1}{c} \left( 2 \frac{dn}{d\omega} + \omega \frac{d^2 n}{d\omega^2} \right) \approx \frac{\omega}{c} \frac{d^2 n}{d\omega^2} \approx \frac{\lambda^3}{2\pi c^2} \frac{d^2 n}{d\lambda^2},$$

Дисперсионный параметр

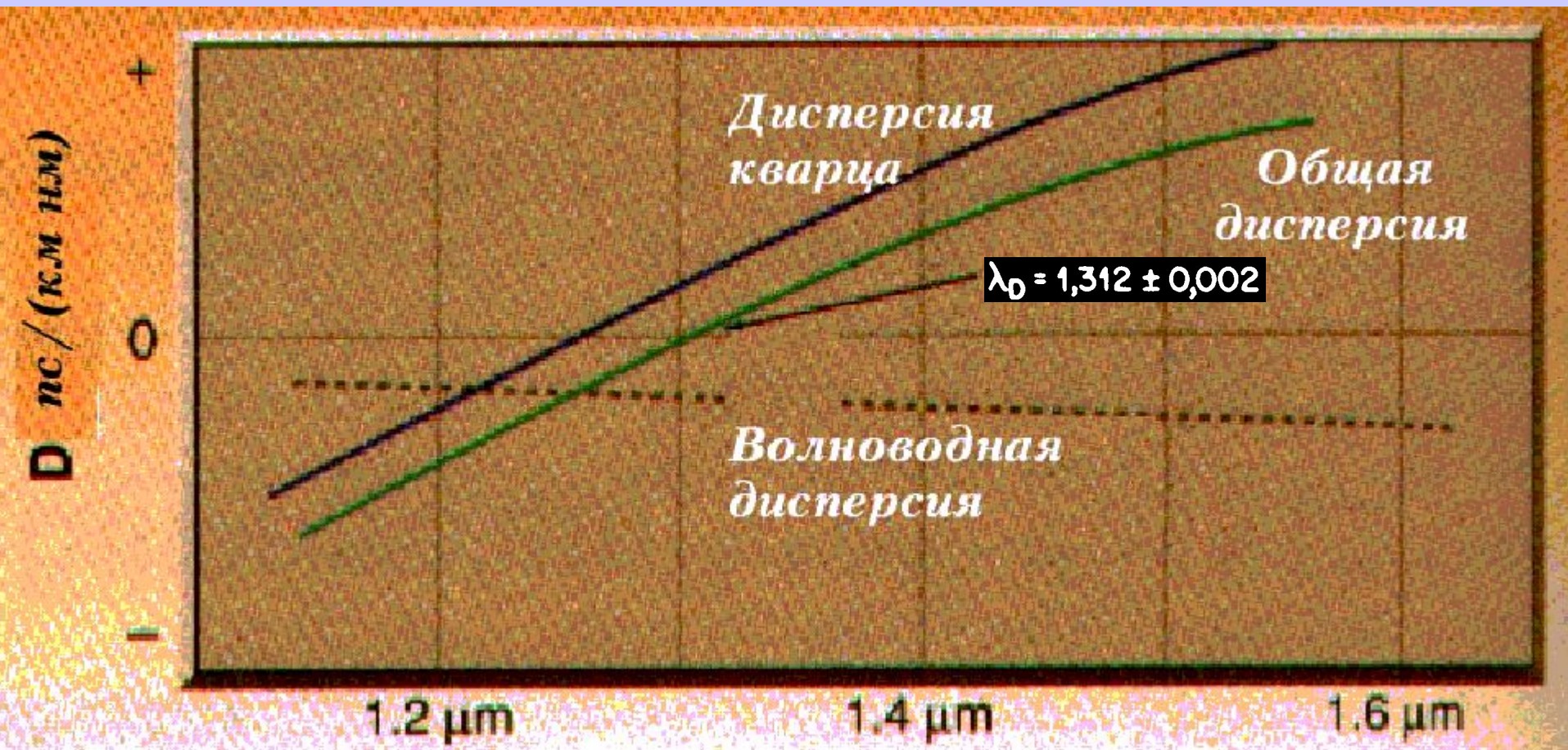
$$D = \frac{d\beta_1}{d\lambda} = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2 \approx -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n}{d\lambda^2}.$$

где  $n_g$  – групповой показатель преломления.

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

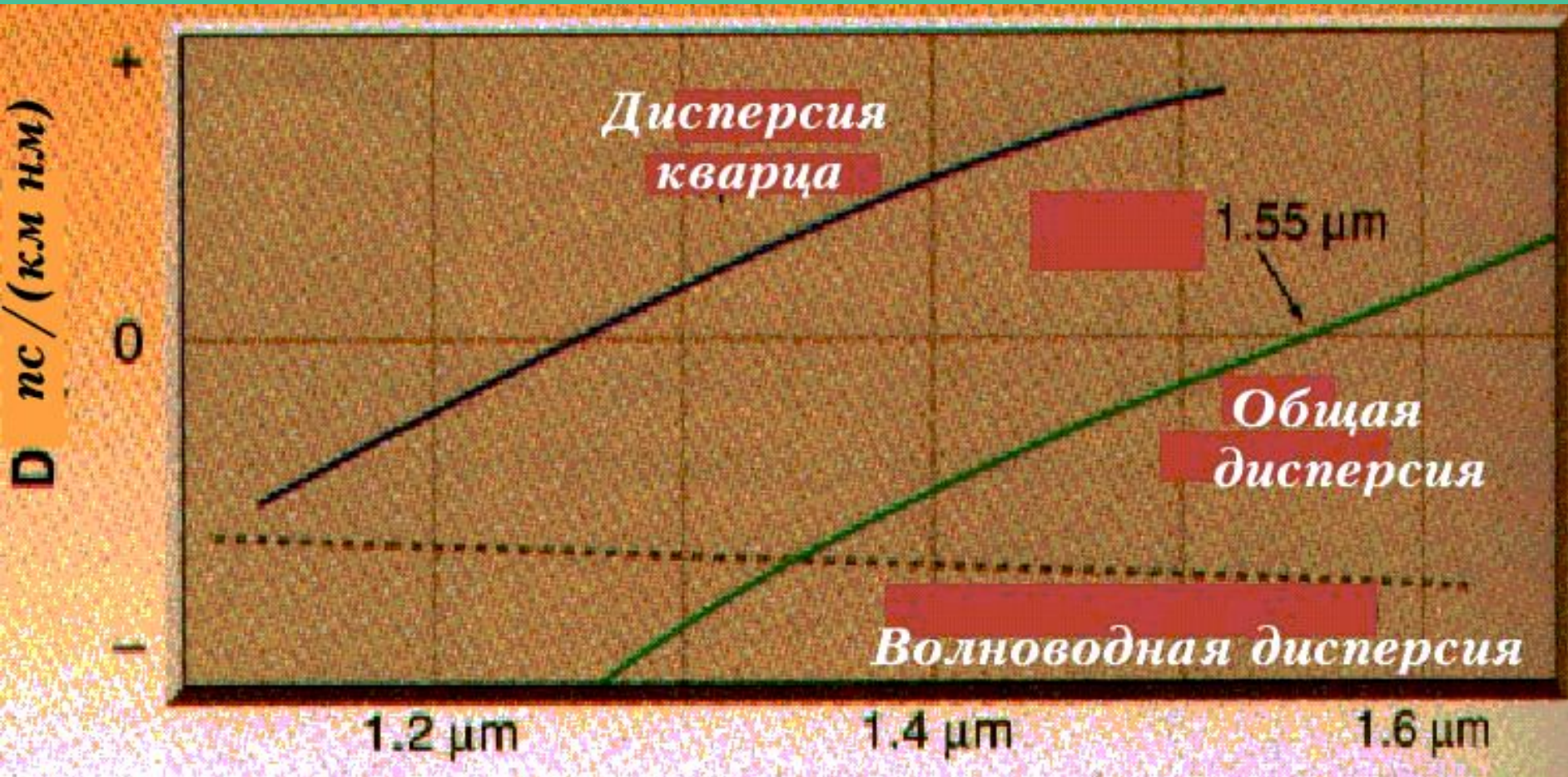


# Зависимость дисперсионного параметра $D$ одномодового волокна от длины волны





# Волокно со смещенной областью нулевой дисперсии к 1,55 мкм

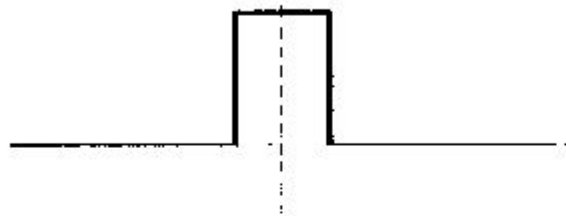


# Способы управления волноводной дисперсией

## Зависимости показателя преломления волокна от радиуса

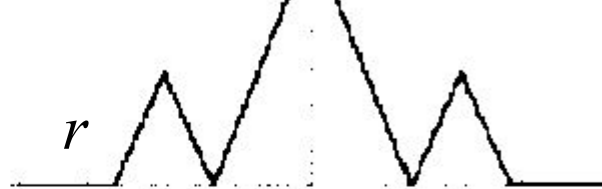
Волокно с одной оболочкой

$n$



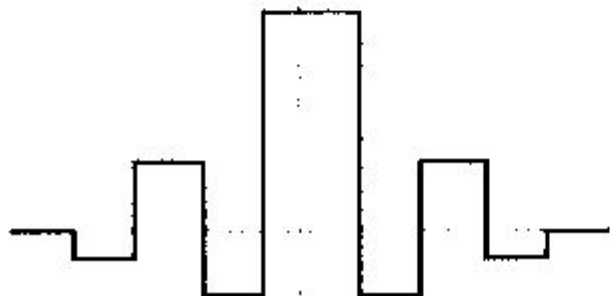
Волокно с двумя оболочками для сдвига дисперсии

$r$

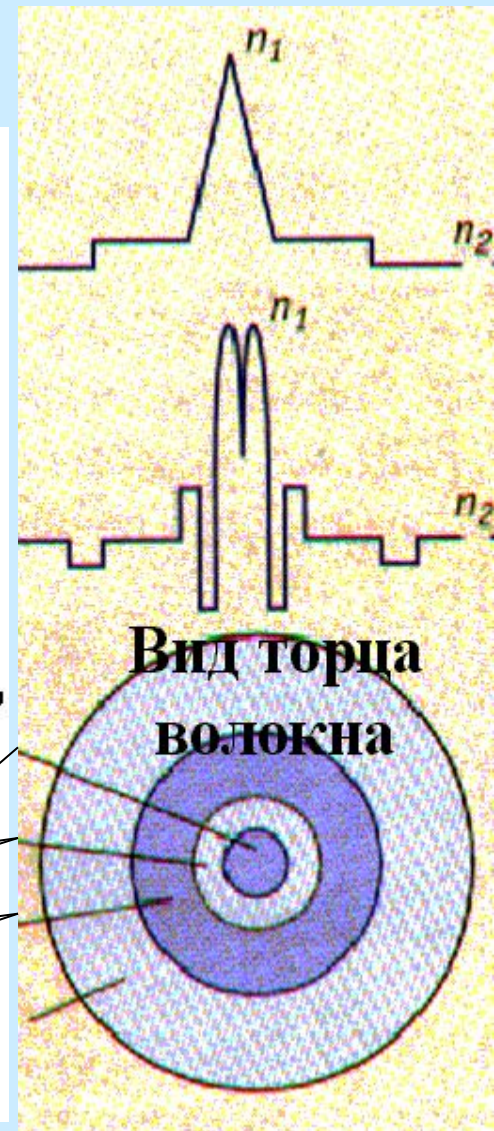
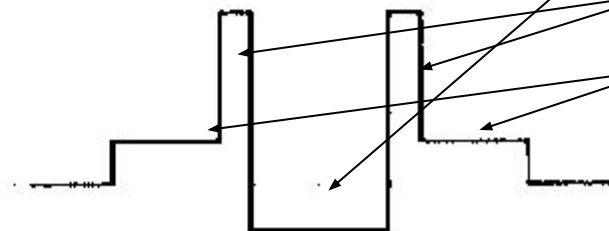


Волокна с четырьмя оболочками

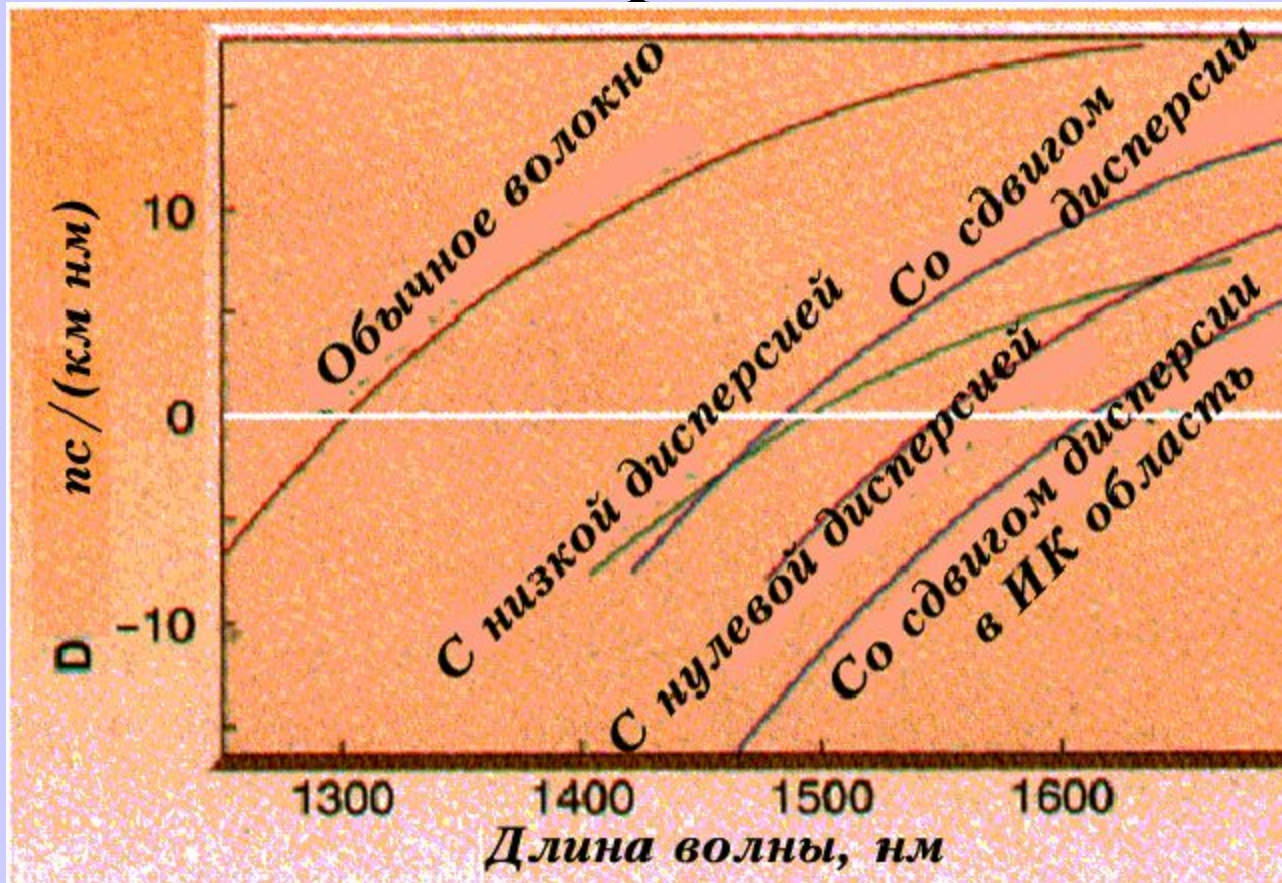
с низкой дисперсией (< 1 пс/(км нм))



с большой площадью сердцевины



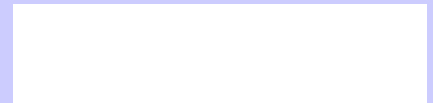
# Зависимость дисперсионного параметра D от длины волны для разных типов волокон



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

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

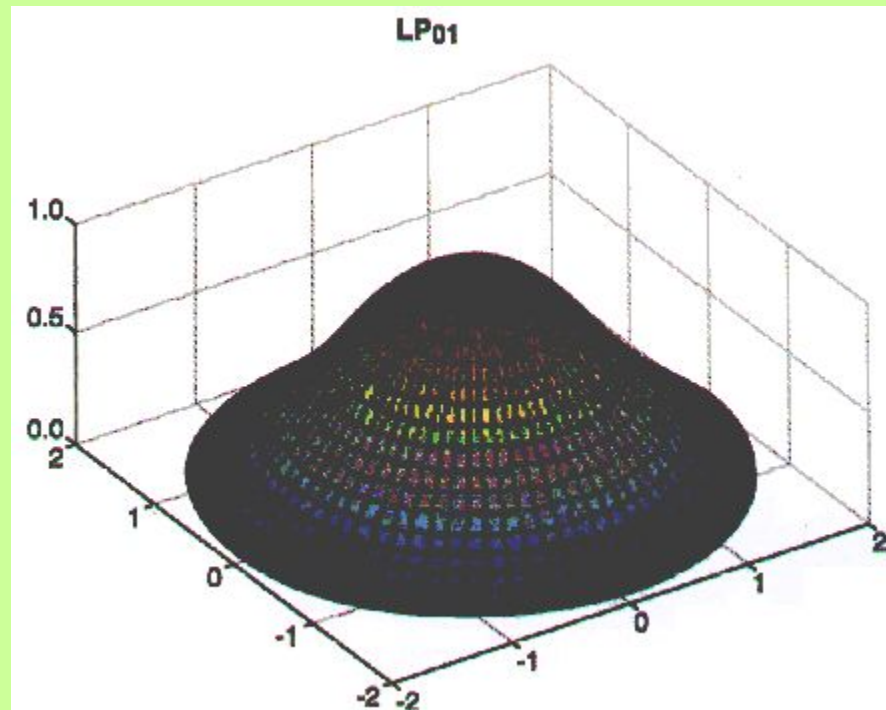
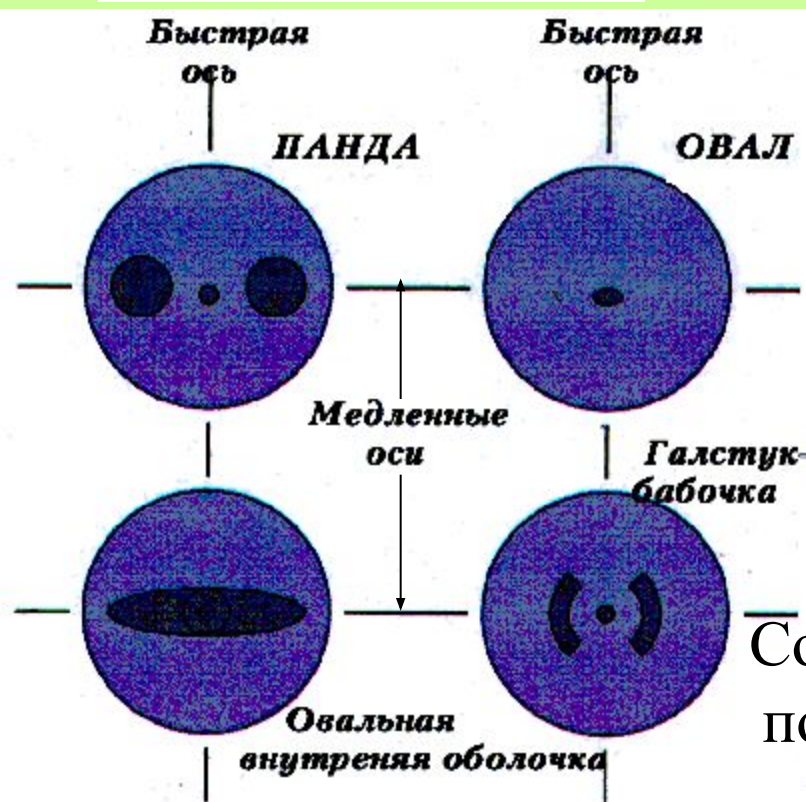
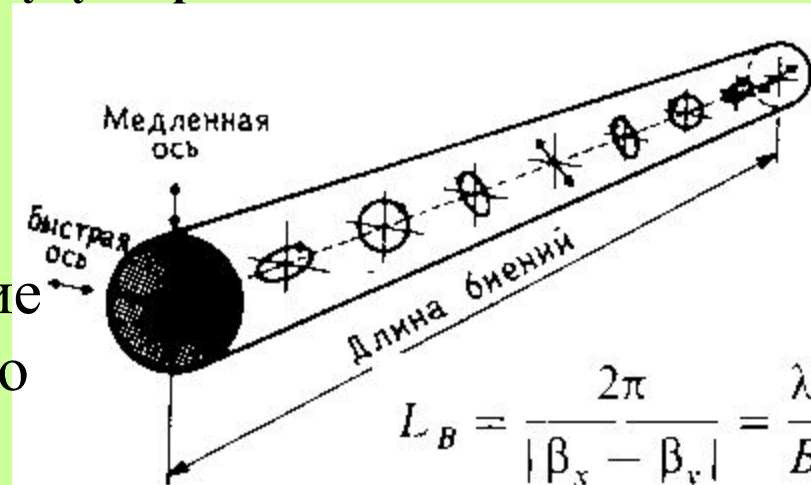


Схема эволюции состояния поляризации света  
вдоль двулучепреломляющего световода.



Сохраняющие  
поляризацию  
волокна



# Нелинейные эффекты в волокнах

## Индукцированная поляризация

$$\mathbf{P} = \varepsilon_0 (\chi^1 \mathbf{E} + \chi^2 : \mathbf{E}\mathbf{E} + \chi^3 : \mathbf{E}\mathbf{E}\mathbf{E} + \dots)$$

где  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость вакуума,  $\chi^j$  ( $j = 1, 2, \dots$ ) – восприимчивость  $j$ -го порядка,  $\chi^j$  – 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

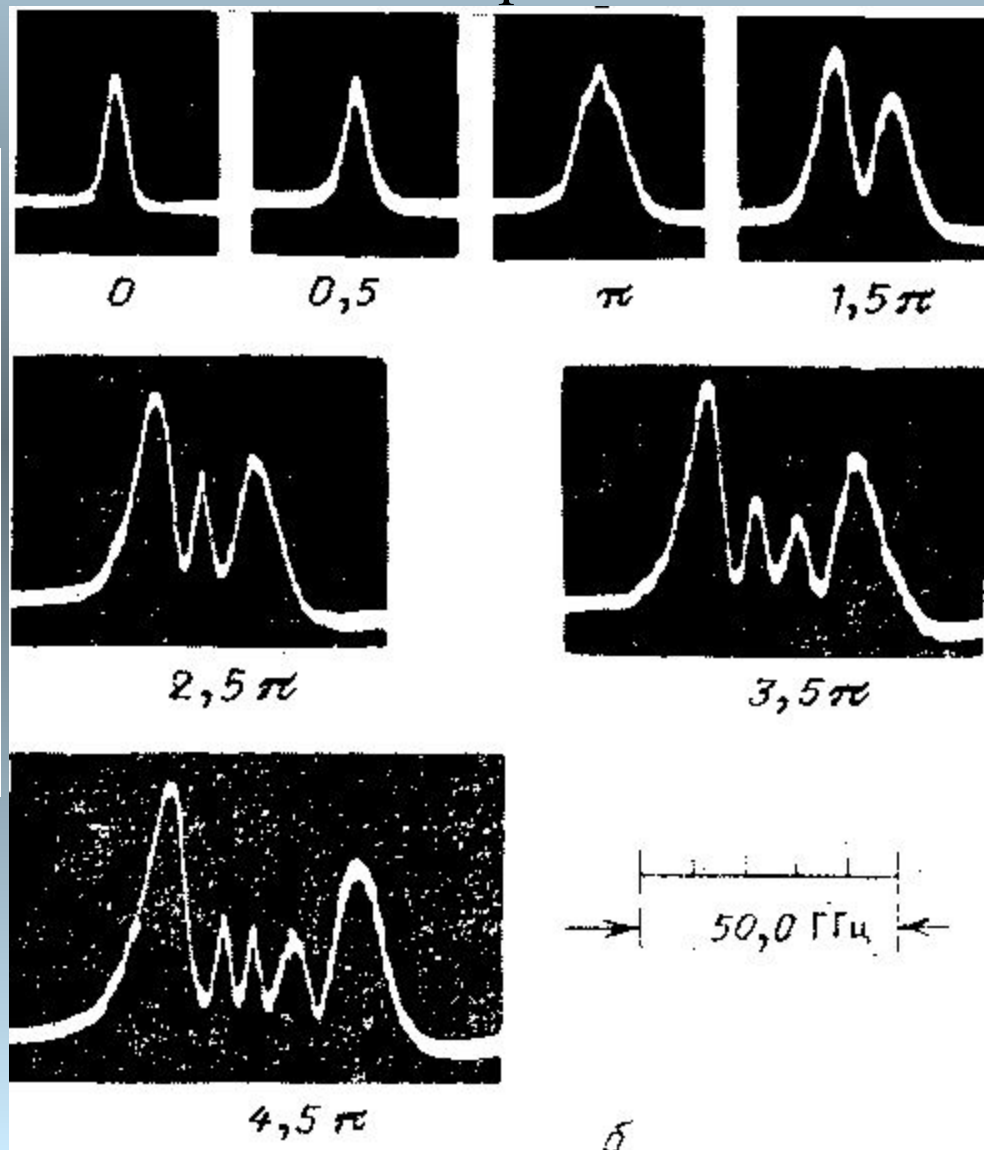
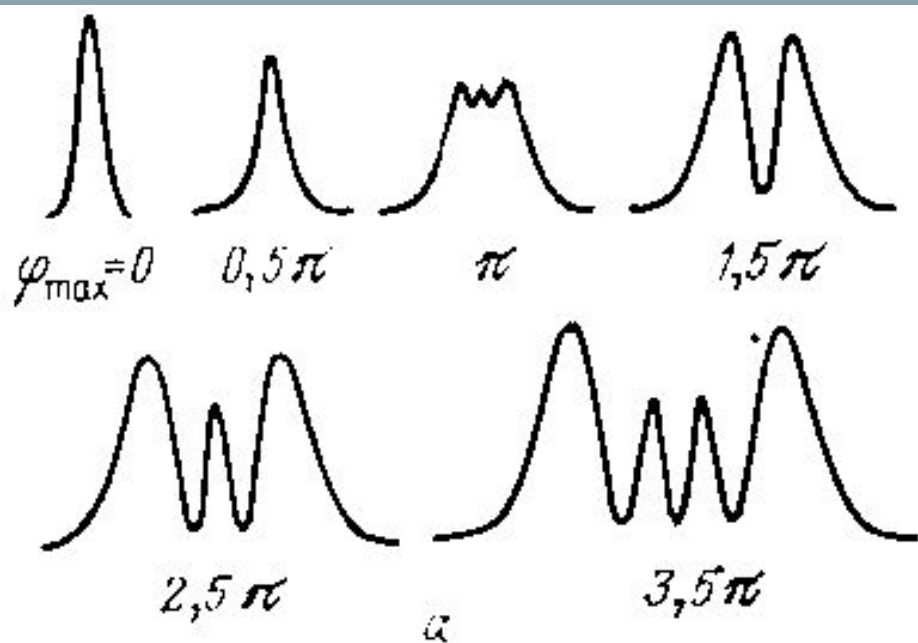
Нелинейный показатель преломления

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

# Спектральное уширение в волокне вследствие фазовой самомодуляции

Эксперимент

Расчет

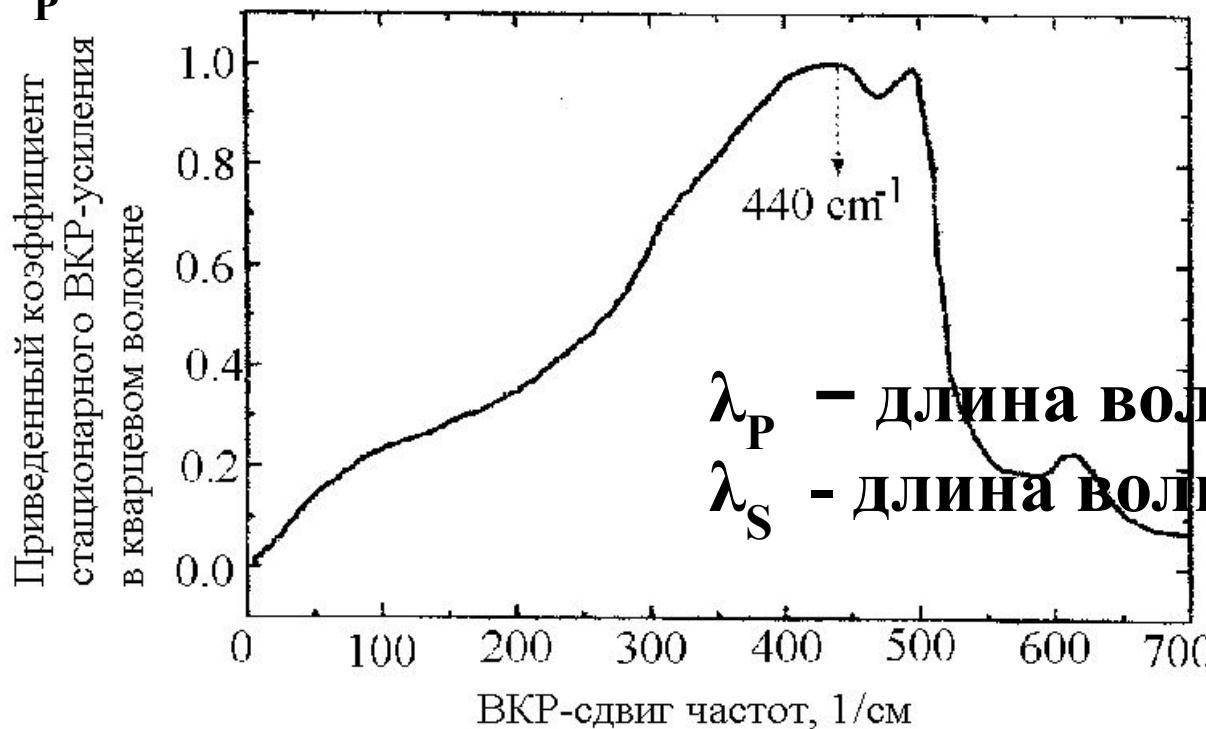


# Нелинейные эффекты в волокнах

## Вынужденные рассеяния ВКР и ВРМБ.

ВКР – вынужденное комбинационное рассеяние

ВРМБ – вынужденное рассеяние Манделъштама-Бриллюэна



# Уравнение для начального роста стоксовой волны

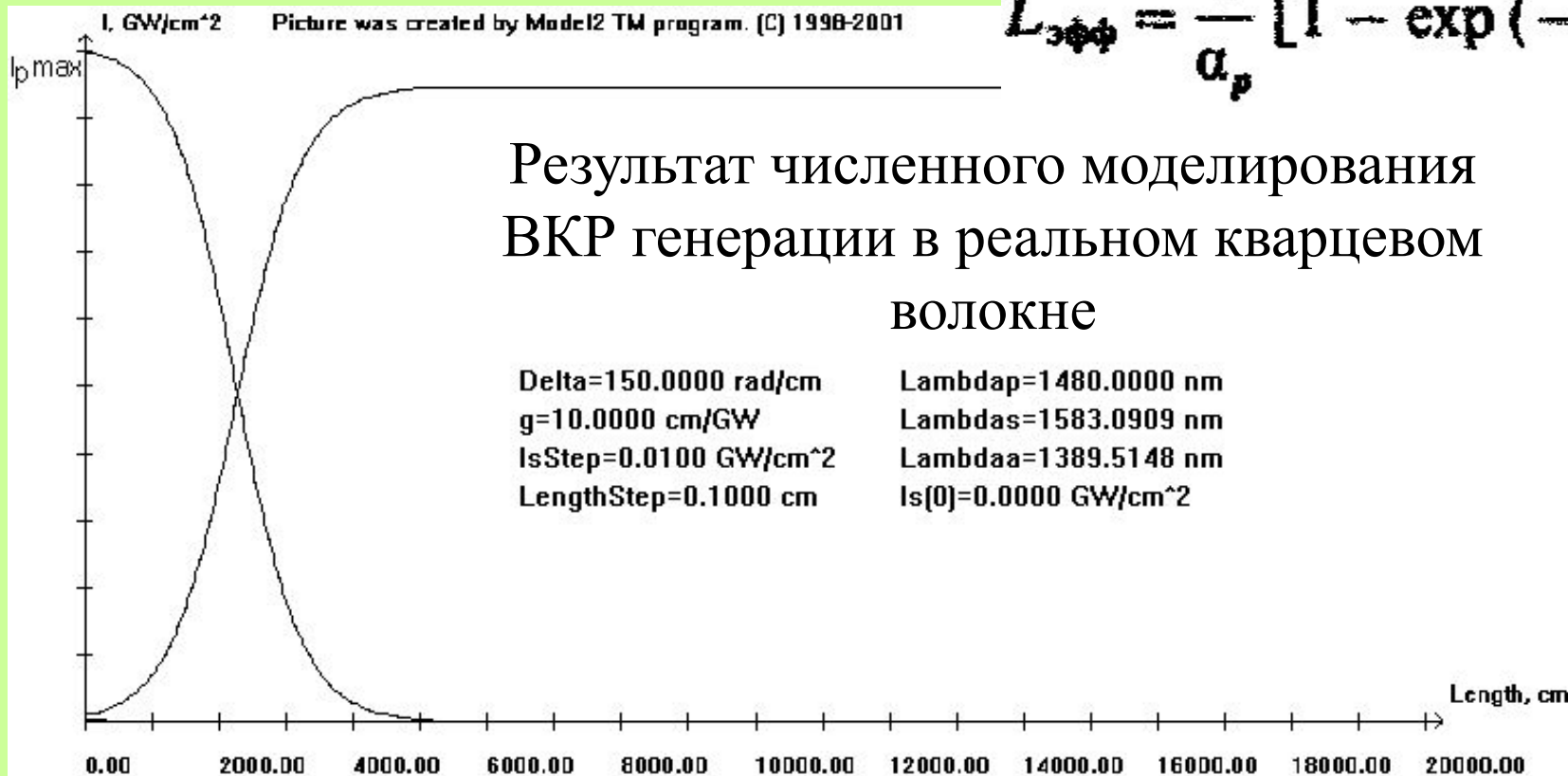
$$\frac{dI_s}{dz} = g_R I_p I_s - \alpha_s I_s$$

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

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

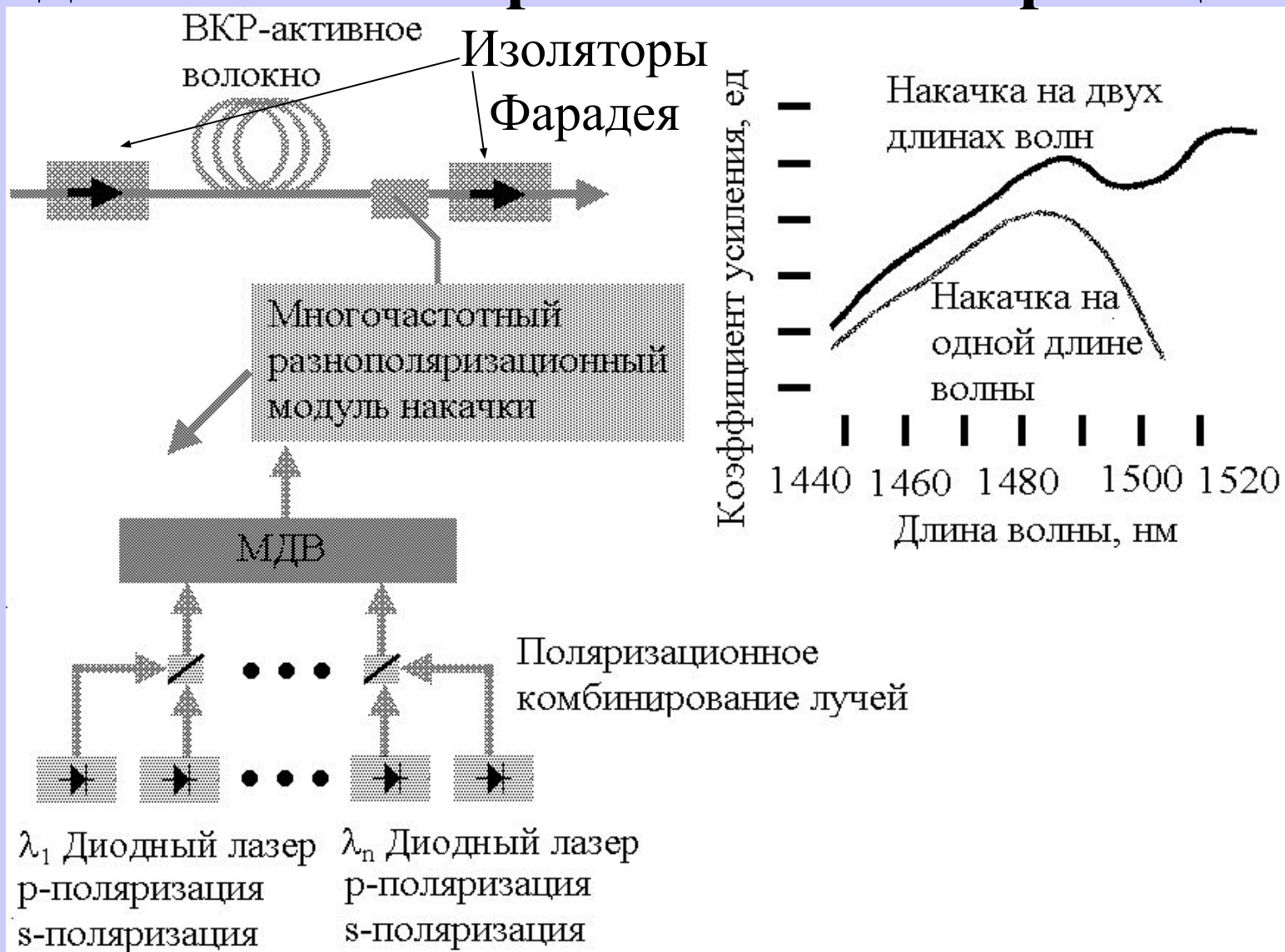
## Решение в приближении заданной накачки

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





# 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»