

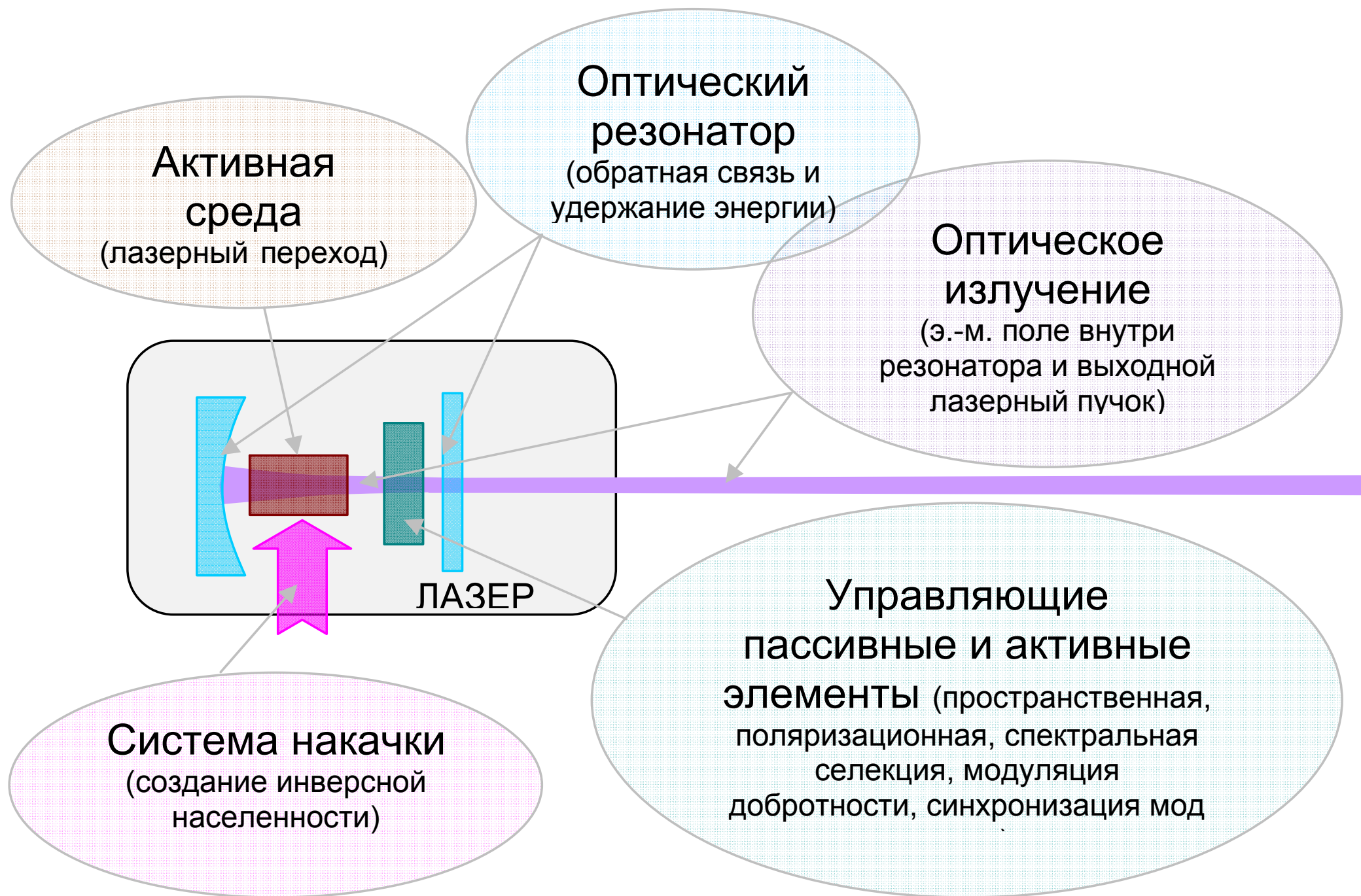
# СОВРЕМЕННЫЕ ЛАЗЕРЫ: новые грани света

## Лекция 11

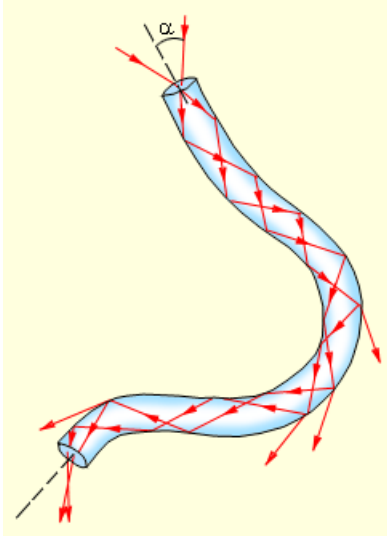
### ОПТИЧЕСКИЕ ВОЛОКНА И ВОЛОКОННЫЕ ЛАЗЕРЫ

Передача света по оптическому волноводу. Историческая справка. Основные параметры и типы оптических волокон. Одномодовые и многомодовые волокна. Ослабление света при распространении в волокне. Дисперсия оптических волокон. Изготовление оптических волокон. Активные волокна. Схема построения волоконного лазера. Основные компоненты волоконного лазера. Схемы накачки волоконных лазеров. Общая схема эрбиевого волоконного лазера. Общая схема иттербиевого волоконного лазера. Другие волоконные лазеры. Волоконные усилители. Рамановские волоконные усилители. Непрерывные и импульсные волоконные лазеры. Модуляция добротности. Синхронизация мод. Технологические применения.

# ЛАЗЕР: ПРИНЦИП РАБОТЫ И СОСТАВ



# Оптическое волокно. Конструкция. Историческая справка



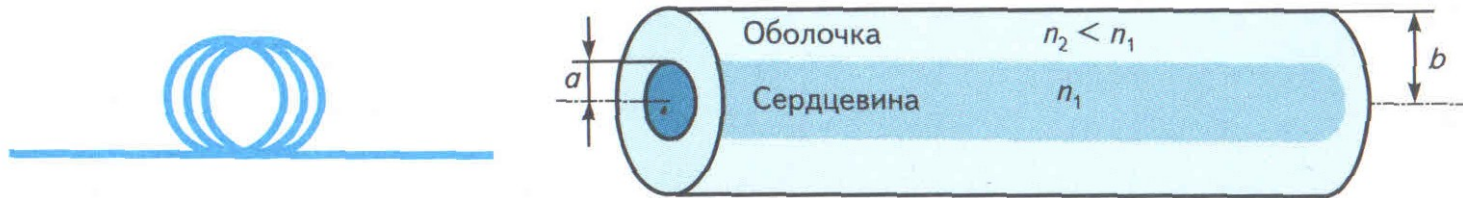
**Оптоволокно** ([оптоволоконный] световод) – провод из прозрачного материала, предназначенный для передачи оптических сигналов на большие расстояния с использованием явления полного внутреннего отражения  $n_1 > n_2$

**1934 г.** – патент США на телефонный аппарат, использующий импульсы света, передающиеся по круглым стеклянным стержням

**1970 г.** – коммерческий выпуск оптоволокна с минимально достижимыми потерями **17дБ/км**

**1972 г.** – минимально достижимые потери доведены до **4дБ/км**

**1983 г.** – коммерческий выпуск одномодового оптоволокна



Современные магистральные линии связи используют кварцевые волокна, как правило, диапазон **~1.55мкм**

В локальных линиях связи может наиболее часто использоваться диапазон **~1.35мкм**

Потери современных одномодовых кварцевых световодов (~1550 нм) уменьшены вплоть до **<0,15дБ/км**

В локальных и офисных линиях связи, в межблочных соединениях используется также диапазон **0.8мкм**

**Пластиковые** волокна: локальные, межблочные соединения

**Активные** лазерные волокна, волокна специальных типов ...

**Децибел: дБ, dB (10 Бел)**

Отношение значений энергетических величин (**мощность, энергия, плотность энергии, интенсивность** и т.п.)

Децибел:  $10 \lg \frac{P_2}{P_1}$

Бел:  $\lg \frac{P_2}{P_1}$

Увеличение/уменьшение энергетической величины на **1 Б (Бел)** означает её увеличение в  **$10^1=10$**  раз

Увеличение/уменьшение энергетической величины на **1 дБ** означает её увеличение в  **$10^{0.1} \approx 1,259$**  раза

Энергетические величины (энергия, мощность) пропорциональны квадратам силовых величин (давление, напряженность электрического поля, сила тока), поэтому для силовых величин децибел определяется как

$$20 \lg \frac{E_2}{E_1}$$

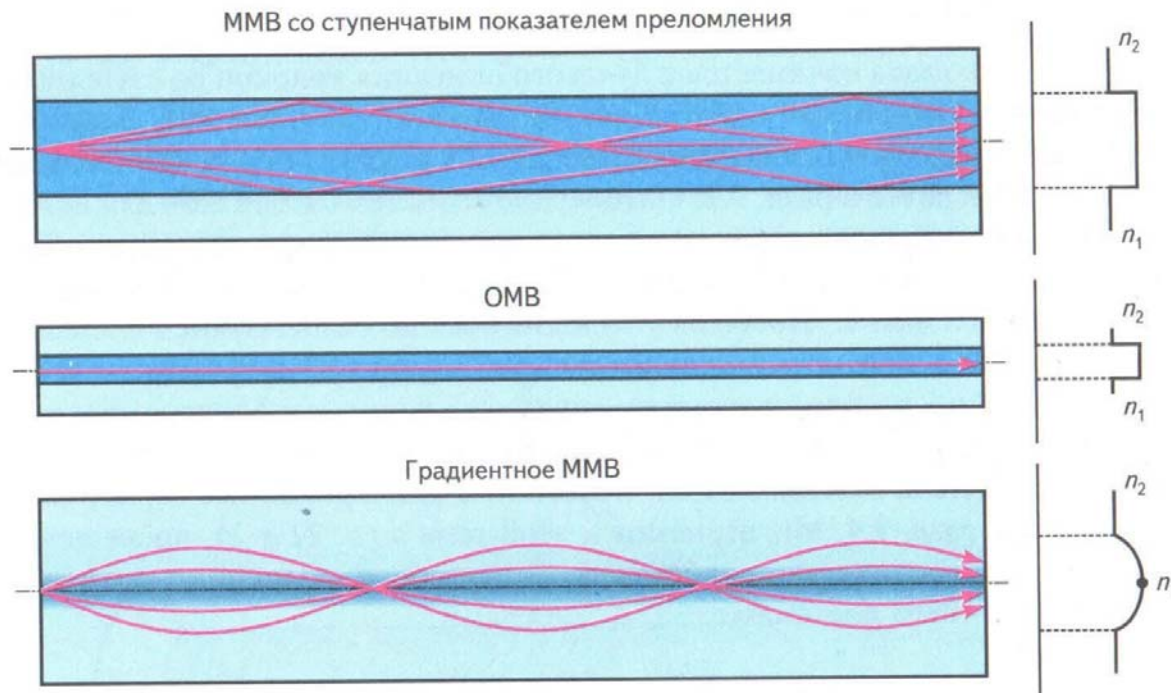
# Одномодовые и многомодовые волокна

Свет в волокне распространяется в виде мод

Каждая мода имеет свою постоянную распространения (волновое число) и групповую скорость.

В сердцевине может распространяться одновременно большое число мод

Если диаметр сердцевины достаточно мал, распространяется только одна мода.



**Многомодовое  
волокно**

**Одномодовое  
волокно**

Для ступенчатых **ММВ**:

$$\frac{2a}{2b} = \frac{50}{125}; \frac{62,5}{125}; \frac{85}{125}; \frac{100}{140}$$

Для **ОМВ**:  $\frac{2a}{2b} = \frac{8}{125}$

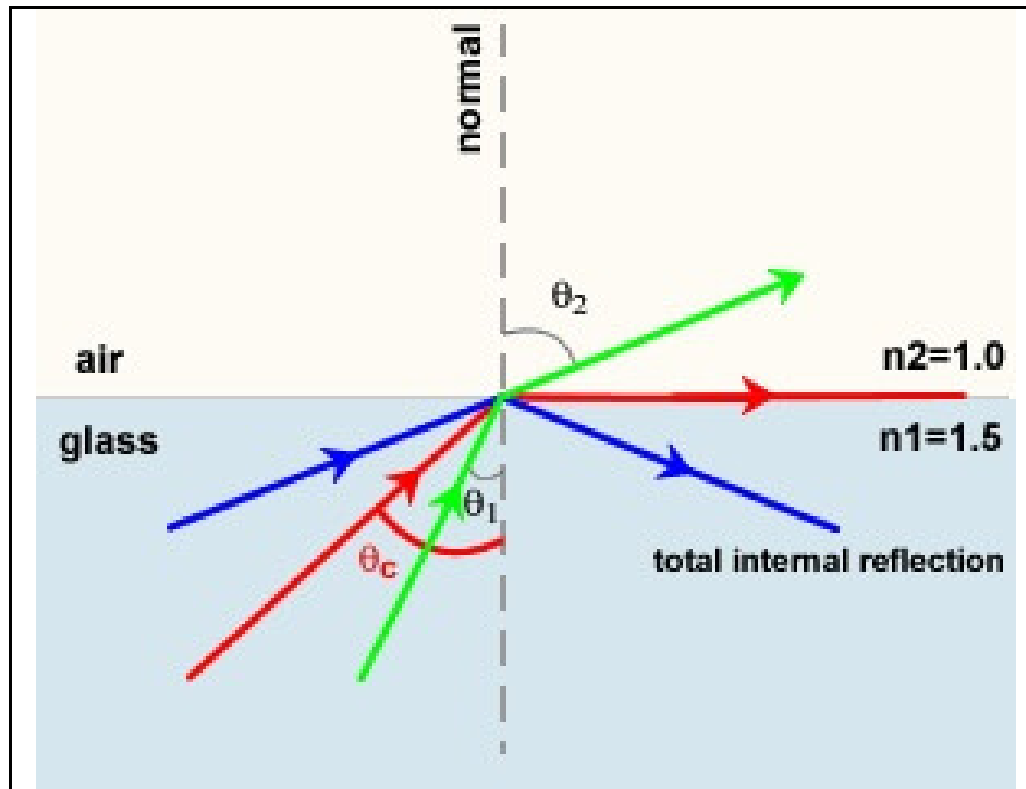
Для кварцевых **ОВ**, как правило:

$$n_1 = 1,479 \quad n_2 = 1,474$$

Относительная  
разность:

$$\Delta = \frac{n_2^2 - n_1^2}{2n_1} \approx \frac{n_2 - n_1}{n_1} \ll 1$$

## Критический угол



Луч направляется внутри сердцевины за счет полного внутреннего отражения, если угол падения на границу между сердцевиной и оболочкой превышает **критический**

**угол:**  $\theta_c = \arcsin \frac{n_2}{n_1}$  ;

$\bar{\theta}_c = \arccos \frac{n_2}{n_1}$  - угол, **дополнительный** к критическому



## Числовая апертура

Условие заведения луча из воздуха в волокно – *угол ввода*, при котором угол падения на границу сердцевины и оболочки в волокне не менее  $\theta_c$ , то есть:

$$\begin{aligned}\sin \theta_a &= n_1 \sqrt{1 - \cos^2 \bar{\theta}_c} = \\ &= \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \text{NA}\end{aligned}$$

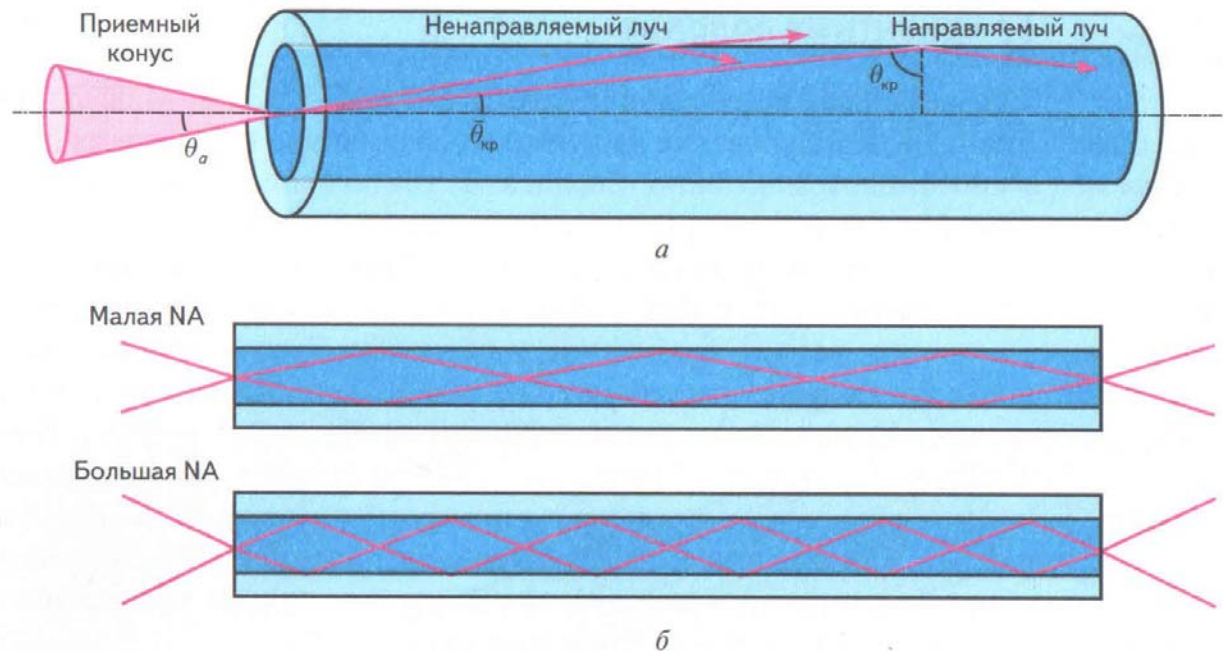
**Угол приема** волокна:

$$\theta_a = \arcsin \text{NA}$$

Здесь

$$\begin{aligned}\text{NA} &= \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \approx \\ &\approx n_1 \sqrt{2\Delta} \approx \sqrt{2\Delta n \cdot n_1}\end{aligned}$$

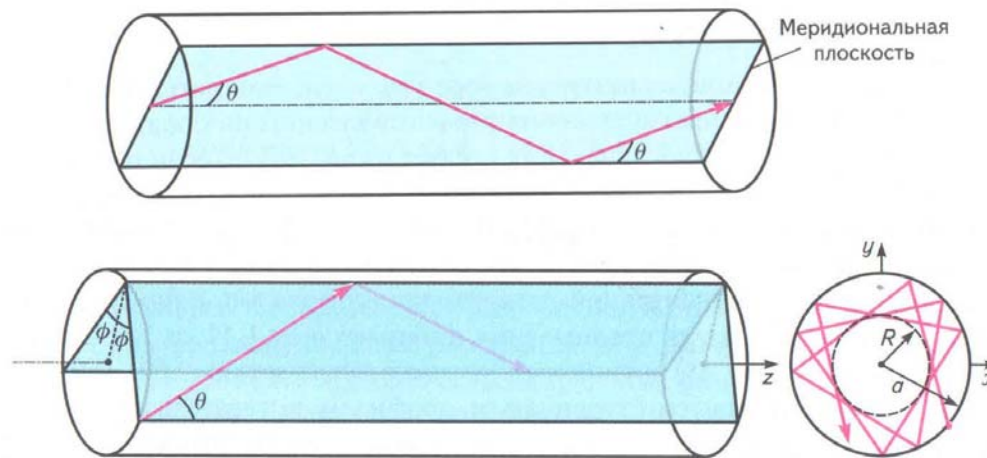
**NA - числовая апертура**, характеризует способность волокна собирать свет (**направляемые лучи**)



Например, при  $n_1 = 1,479$      $n_2 = 1,474$      $\text{NA} \approx \sqrt{2 \cdot 0,005 \cdot 1,479} \approx 0,122$

То есть,  $\theta_a \approx 0,122 \cdot 57,3 \approx 6,97^\circ$      $2\theta_a \approx 14^\circ$

# Меридиональные и косые лучи

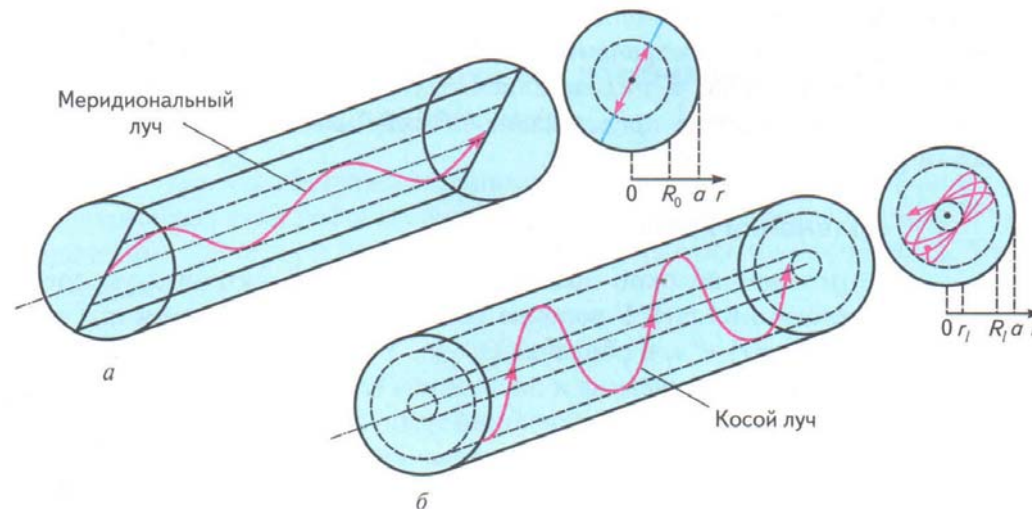


**Меридиональные лучи** – лежащие в плоскости, проходящей через ось волокна

**Косой луч** характеризуется плоскостью, содержащей его и параллельной оси волокна. Характеризуется углами  $\theta$ ,  $\phi$  и расстоянием  $R$  от содержащей луч плоскости до оси волокна

Траектория меридионального луча лежит в плоскости, проходящей через ось волокна.

Траектория косого луча – винтовая ломаная линия, лежащая внутри цилиндрического слоя с внутренним радиусом  $R$  и внешним радиусом  $a$

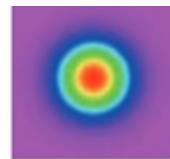
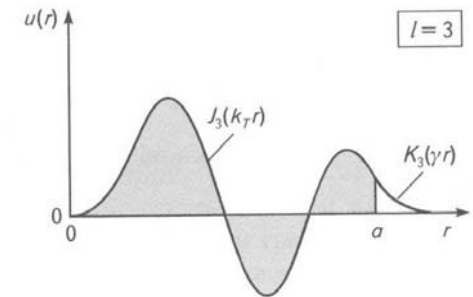
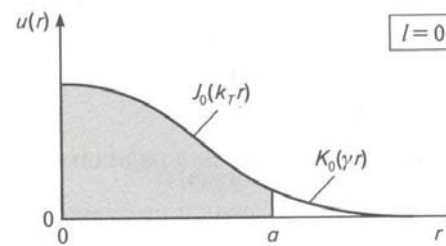
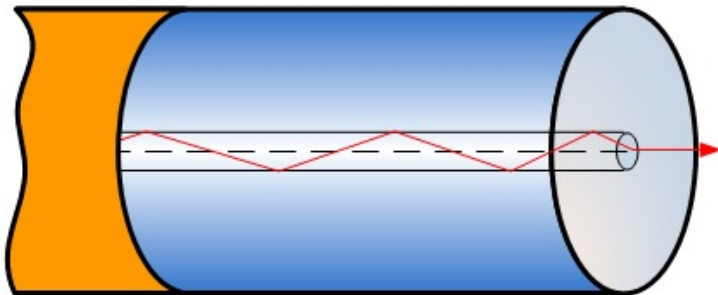


Ход меридионального и косого лучей в градиентном волокне



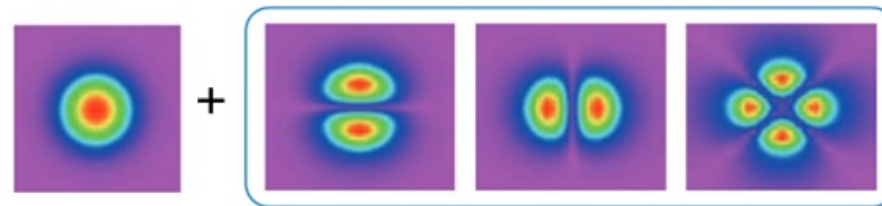
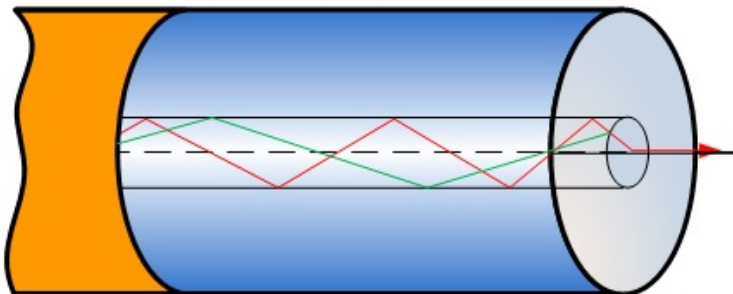
# Моды оптических волокон

Одномодовое волокно



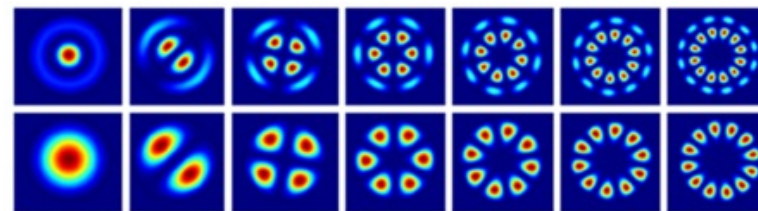
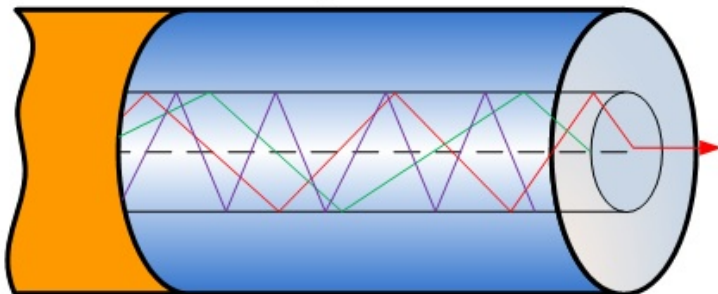
Основная мода

Маломодовое волокно



Несколько мод более высокого порядка

Многомодовое волокно



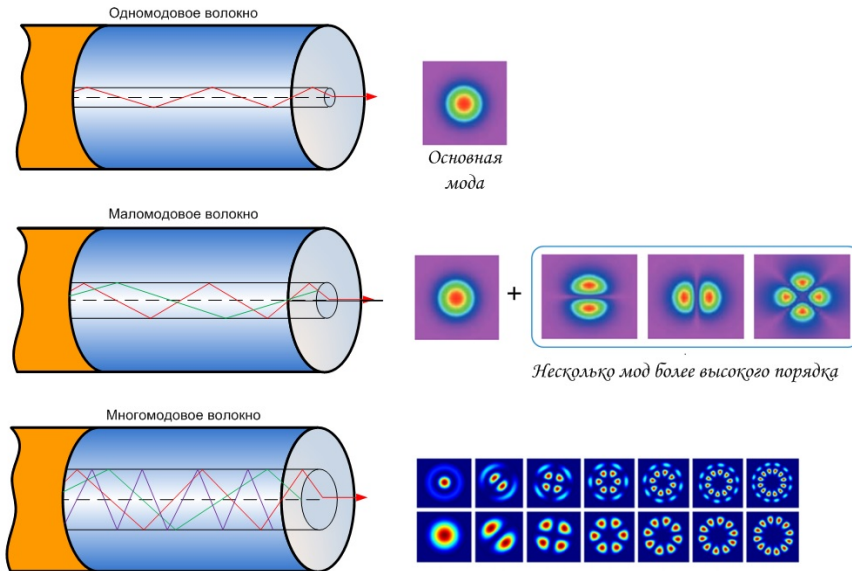
# Нормированная частота (*reference frequency*, параметр волокна $V$ )

Параметр волокна:

$$V = 2\pi \frac{a}{\lambda_0} NA$$

При  $V < 2,405$  все моды, кроме фундаментальной моды  $LP_{01}$  отсекаются и волокно действует как одномодовое. То есть, **условие одномодовости**:

$$V < 2,405$$

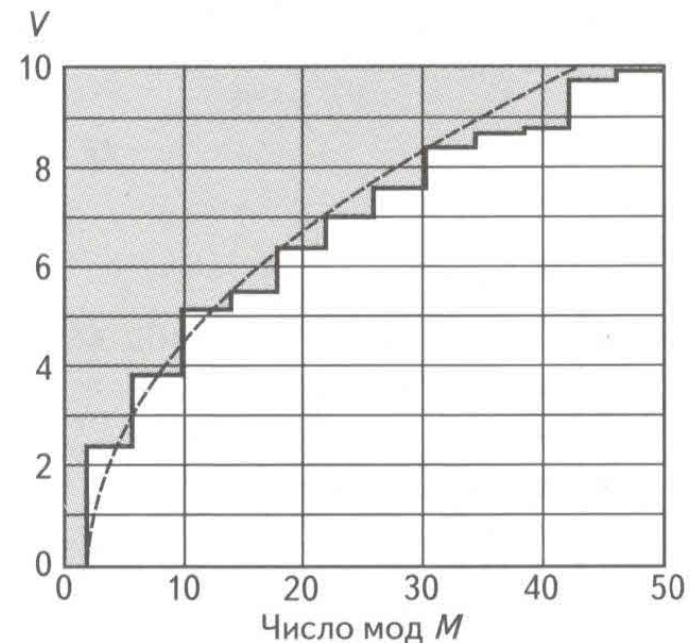


Соответственно, частота отсечки

основной моды: 
$$v_c = \frac{\omega_c}{2\pi} = \frac{1}{NA} \frac{c_0}{2,61a}$$

Если  $V \gg 1$ , число мод,

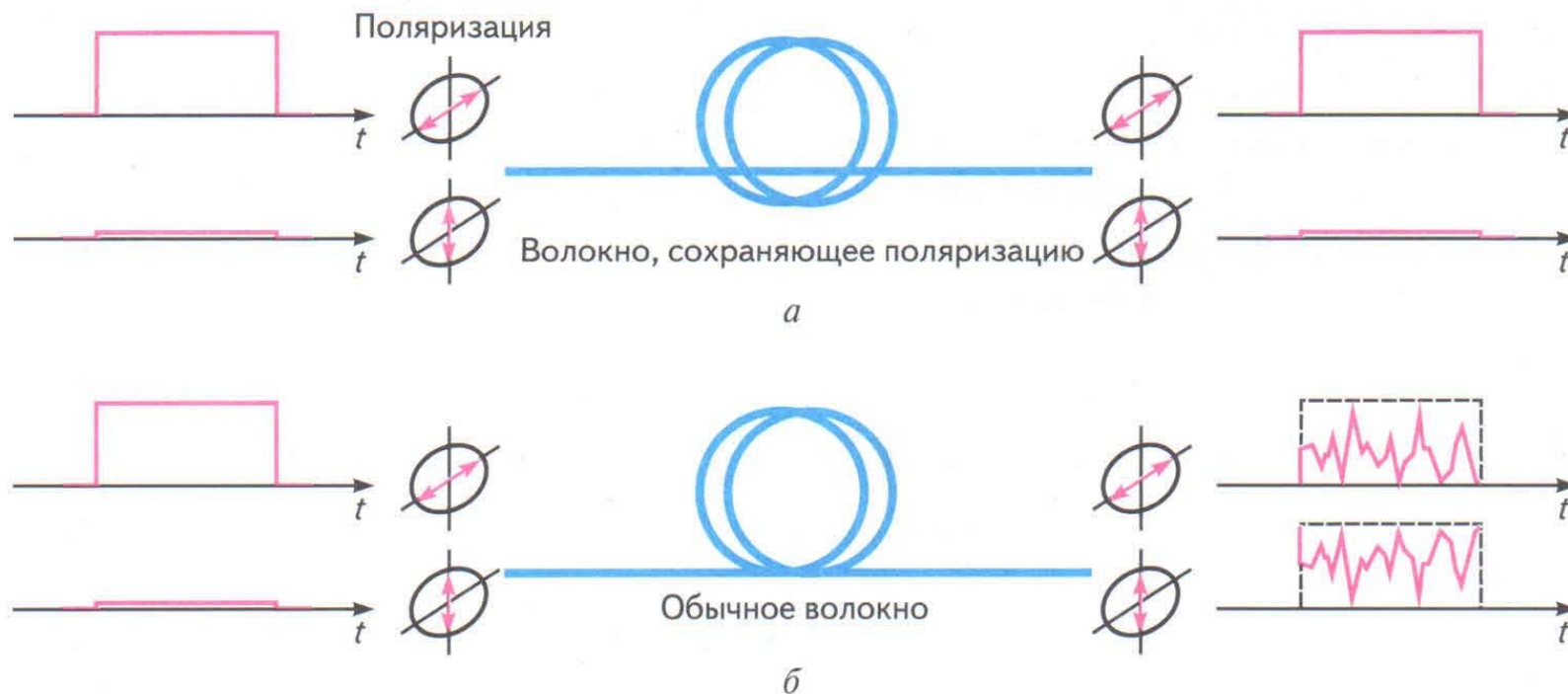
поддерживаемых волокном: 
$$M \approx \frac{4V^2}{\pi^2}$$



## Оптическое волокно с удержанием поляризации

Основная мода может содержать волны с двумя взаимно ортогональными поляризациями, имеющими одинаковую постоянную распространения и одинаковую групповую скорость.

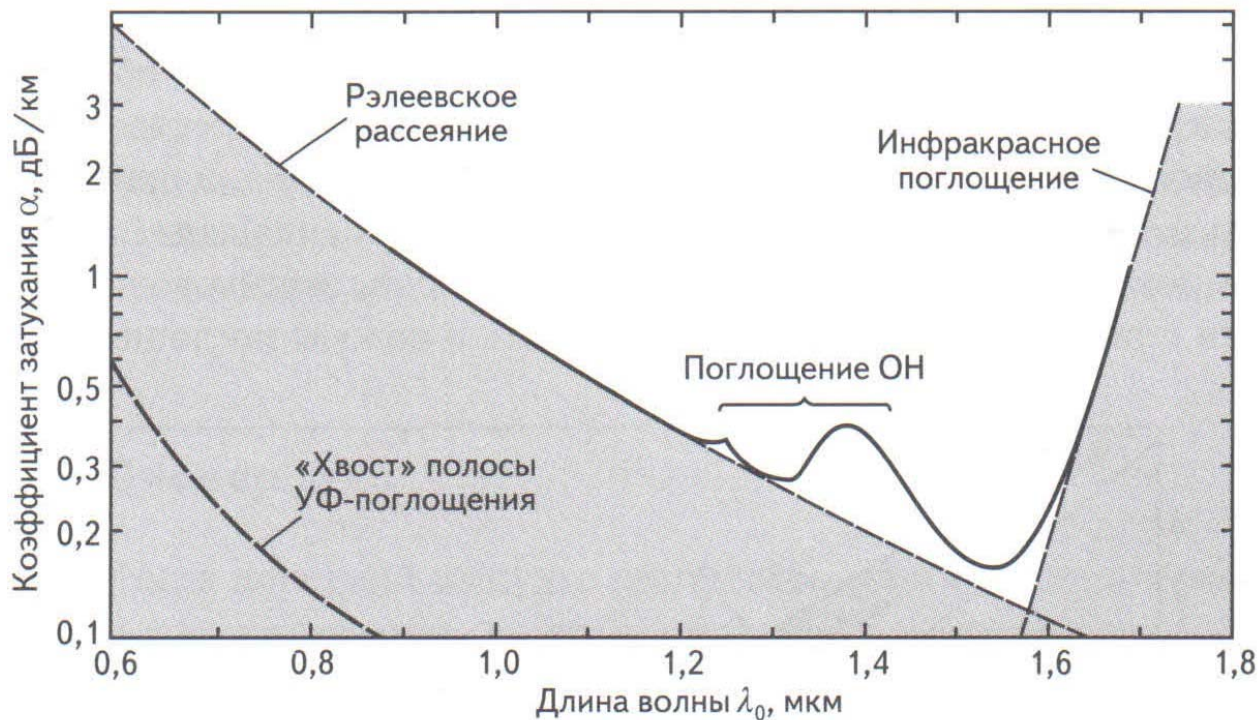
Из-за дефектов, напряжений, флуктуаций температуры источника света между двумя поляризациями может происходить перекачка энергии. Например, линейная на входе в волокно поляризация может превращаться в эллиптическую.



В устройствах интегральной оптики, в когерентной оптической связи, в сенсорах на основе интерферометрии требуется **удержание поляризации**. Это достигается нарушением аксиальной симметрии (создание эллиптического профиля, внесение анизотропии в показатель преломления, механические напряжения, изгиб и пр.)

# Ослабление света при распространении в волокне

Коэффициент поглощения плавленого кварца ( $\text{SiO}_2$ ) сильно зависит от длины волны. Причины – поглощение и рэлеевское рассеяние



Коэффициент затухания:

$$\alpha = \frac{1}{L} 10 \lg \frac{P(0)}{P(L)}$$

$$\frac{P(L)}{P(0)} = e^{-\alpha L}$$

УФ-поглощение – электронные и молекулярные переходы

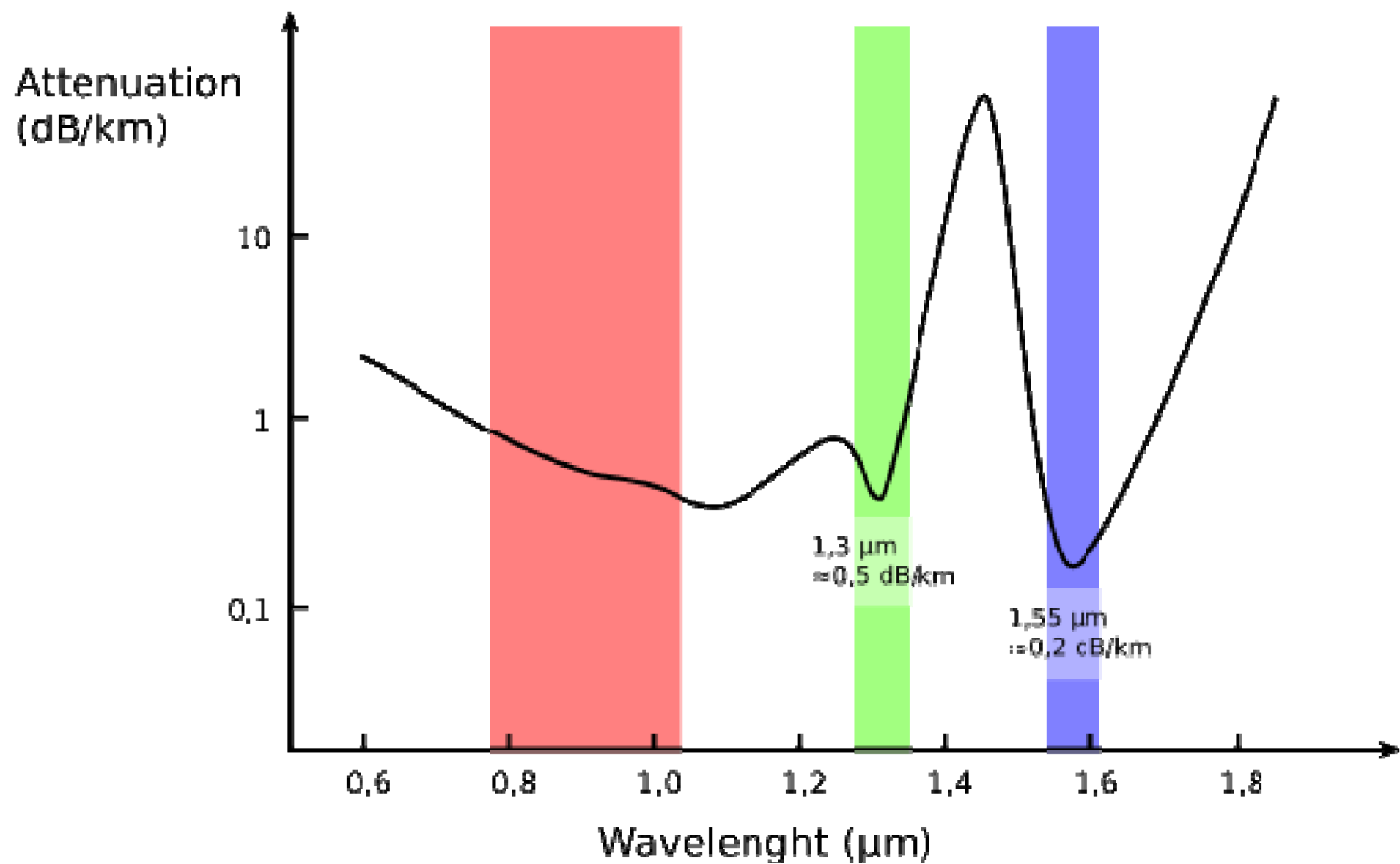
ИК-поглощение – колебательные переходы

Рэлеевское рассеяние – на случайных неоднородностях показателя преломления.

Интенсивность рассеяния убывает как  $1/\lambda_0^4$  (закон обратной четвертой степени Рэлея)

Два окна прозрачности в районе 1,3 мкм и 1,55 мкм.

## Окна прозрачности кварцевых волокон





## Дисперсия оптических волокон

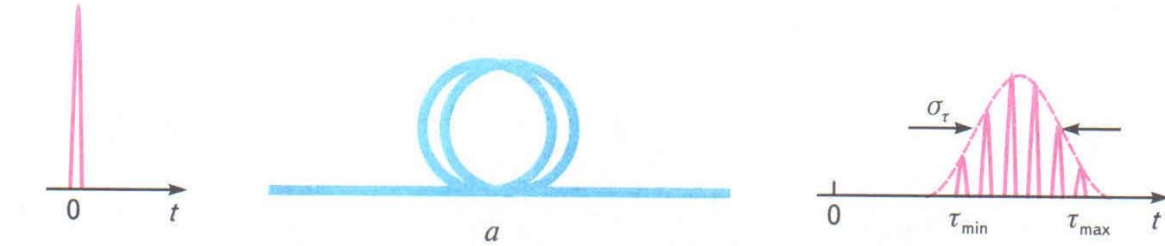
При распространении по оптическому волокну импульсы света испытывают расплывание, «рассеяние» во времени

Основные источники дисперсии в оптических волокнах:

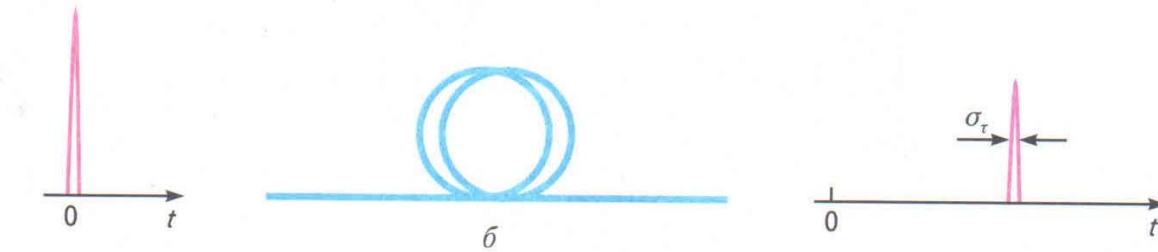
- модовая дисперсия (ММВ) В многомодовых волокнах из-за различия групповых скоростей различных мод (разные оптические пути различных мод)
- материальная дисперсия (ММВ, ОМВ) Зависимость скорости распространения (показателя преломления) от длины волны
- волноводная дисперсия (ОМВ) Зависимость распределения поля в волокне и, соответственно, распределения поля между сердцевинной и оболочкой, от отношения радиуса сердцевины к длине волны  $(a/\lambda_0)$
- поляризационно-модовая дисперсия (ММВ, ОМВ) Разница в скорости распространения поляризационных мод
- нелинейная дисперсия Зависимость показателя преломления от интенсивности света, самомодуляция фазы, солитонный режим

# Уширение короткого оптического импульса из-за дисперсии

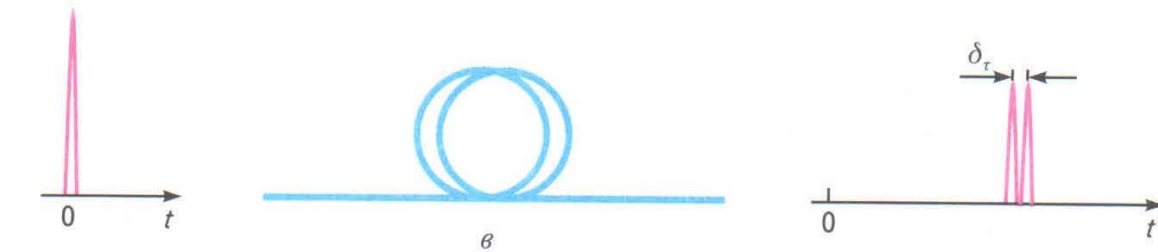
а – модовая дисперсия в  
многомодовом волокне



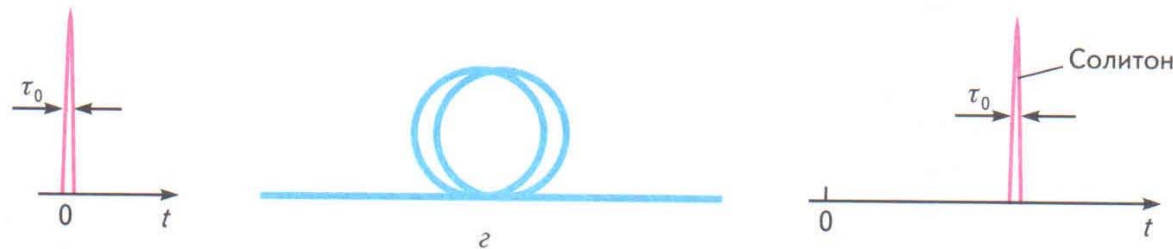
б – материальная и  
волноводная дисперсия в  
одномодовом волокне



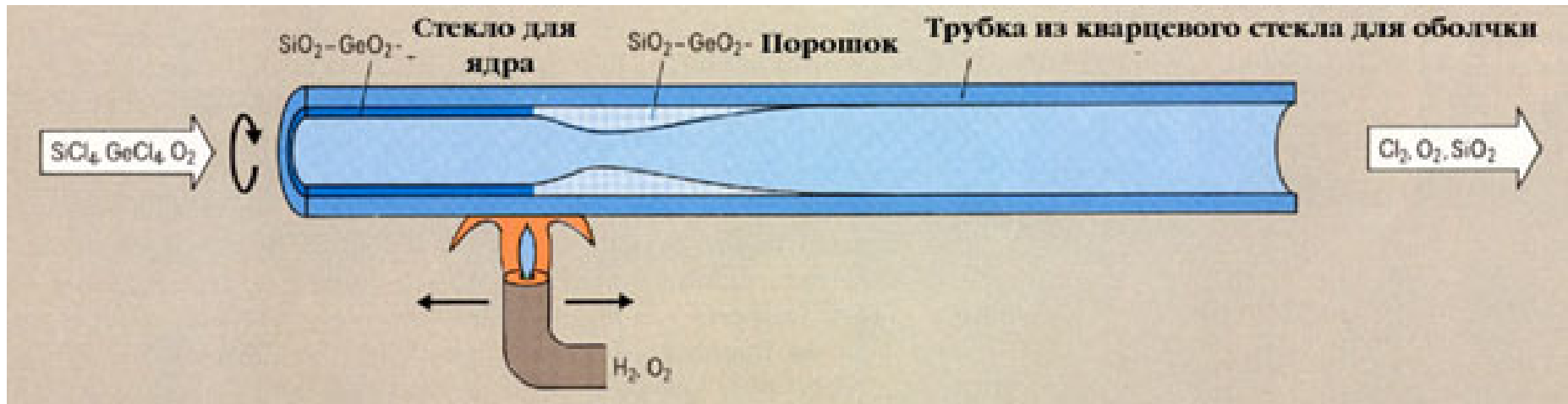
в – поляризационно-  
модовая дисперсия в  
одномодовом волокне



г – распространение  
солитона в одномодовом  
волокне



# Изготовление оптических волокон



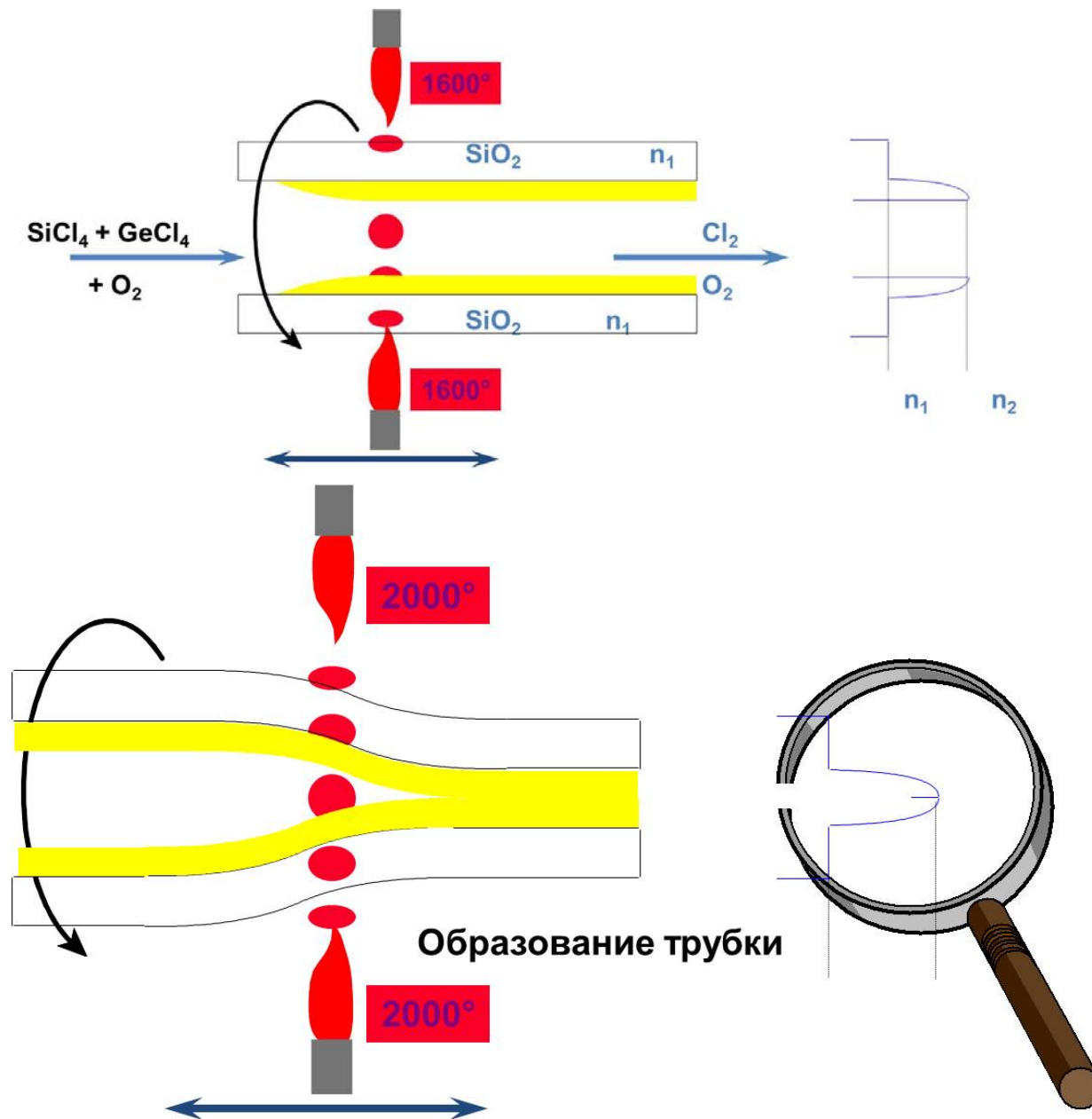
Получение заготовки для оптоволокна

## **MCVD - modified chemical vapor deposition**

Добавляемая примесь SiO<sub>2</sub> отложена слоями — начинающаяся со слоя стекла для оболочки оптического стекловолокна и оканчивающаяся слоем ядра волокна - на внутренней стороне вращающийся трубки которая нагрета до 1600<sup>0</sup> С внешней горелкой.

Осаждение происходит не в месте нагрева пламенем, а перед ним - там, куда пламя еще не дошло. На поверхности трубки образуется пористый слой окиси, и, двигаясь дальше, горелка его проплавляет - остекловывает. Так получается слой чистого стекла.

# Изготовление оптических волокон



Формирование  
сердцевины оптического  
волокна

# Изготовление оптических волокон

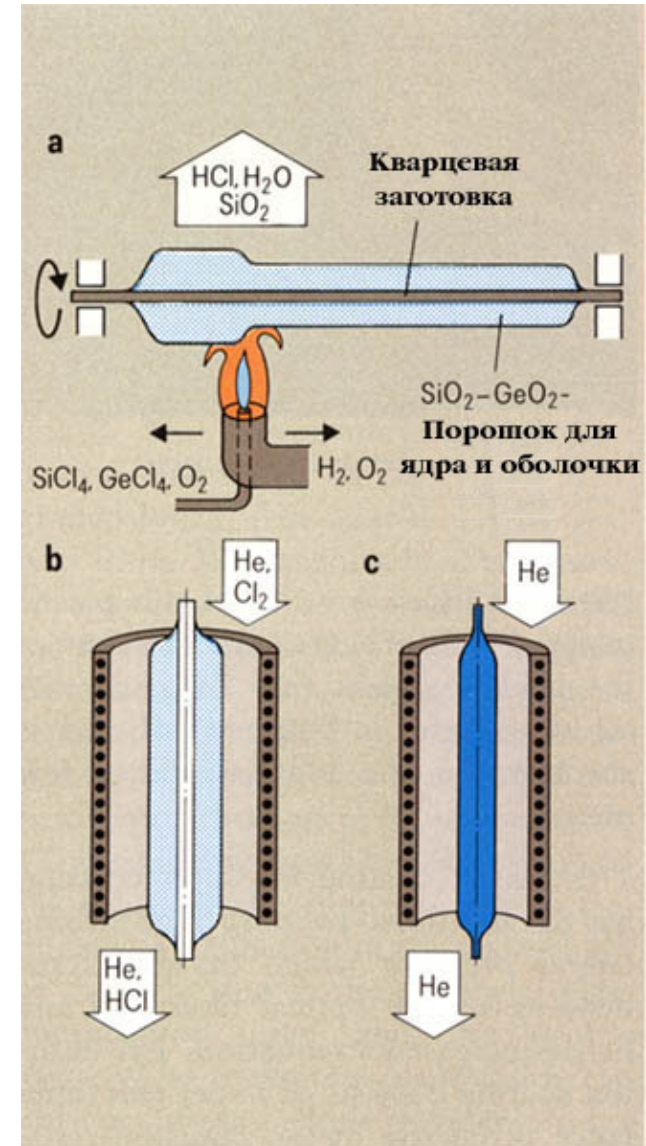
Получение заготовки для оптоволокна

## OVD-метод (outside vapor deposition)

а) Изготовление заготовки методом OVD б) С последующей сушкой в) и спеканием

Внешнее осаждение (в отличие от первого - внутреннего) - стекло осаждается на огнеупорный стержень прямо из пламени горелки, куда подаются хлориды исходных веществ.

Поскольку осаждение происходит в атмосфере пламени, в таком материале остается много воды, получившейся в результате окисления водорода. Поэтому, после того как центральный стержень вынимают, приходится продувать заготовку хлором, который экстрагирует воду. После этого заготовка остекловывается.





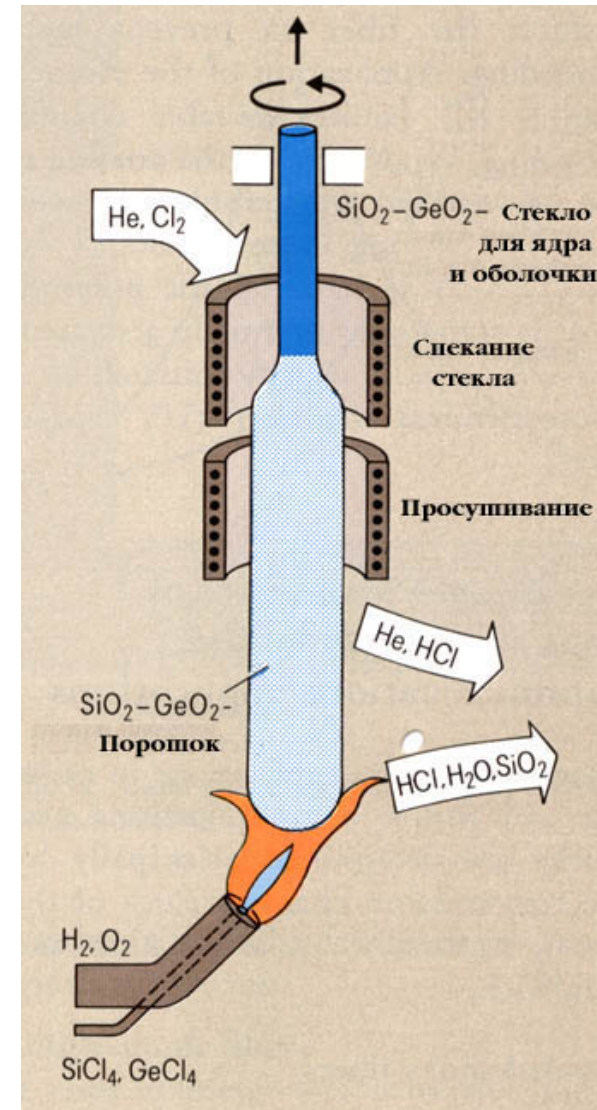
# Изготовление оптических волокон

## Получение заготовки для оптоволокна VAD-метод (axial vapor deposition)

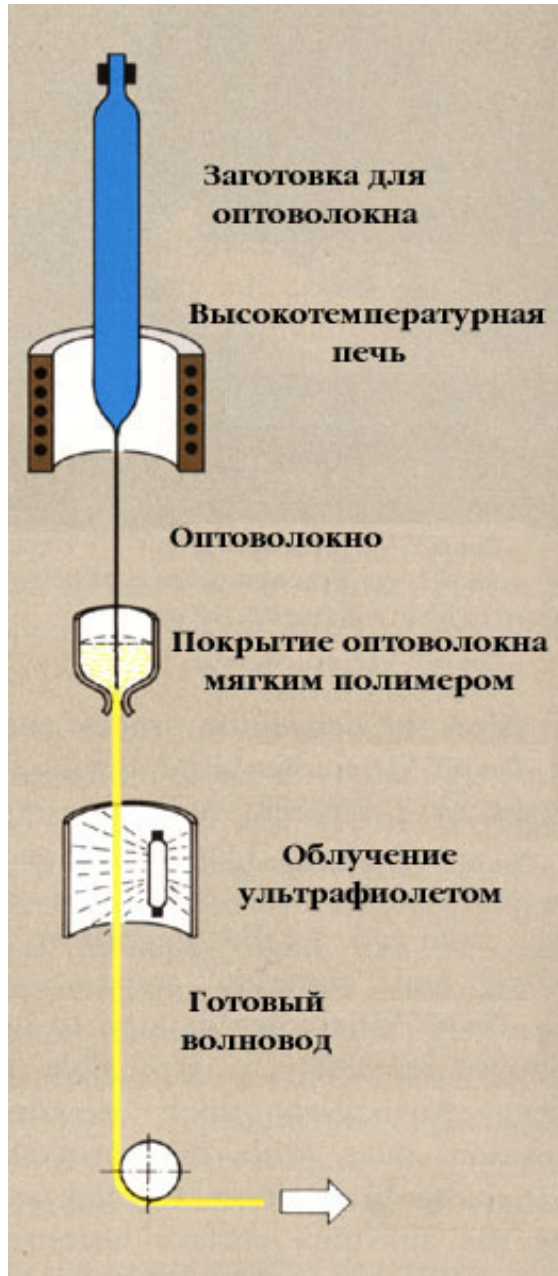
Заготовка растет из затравки, расположенной на определенном расстоянии выше пламени горелки, имеющей сложную слоевую структуру, как у рулета.

В середину пламени подают смесь хлоридов германия и кремния, затем слой буферного газа, потом только хлорид кремния для чистого стекла, потом опять буферный газ, и, в конце концов, на краю горелки, кислород с водородом - то, что, собственно говоря, и горит.

Позволяет получать заготовки неограниченной длины



# Изготовление оптических волокон



Установка для вытягивания волокна

## Активные лазерные волокна

Активные лазерные волокна способны усиливать или генерировать сигнал определенной частоты за счет легирования ионами редкоземельных металлов.

**Иттербиевые (Yb)** примеси дают усиление на длинах волн 1,06 - 1,3 мкм, а **эрбиевые (Er)** на длине волны ~1,5 мкм.

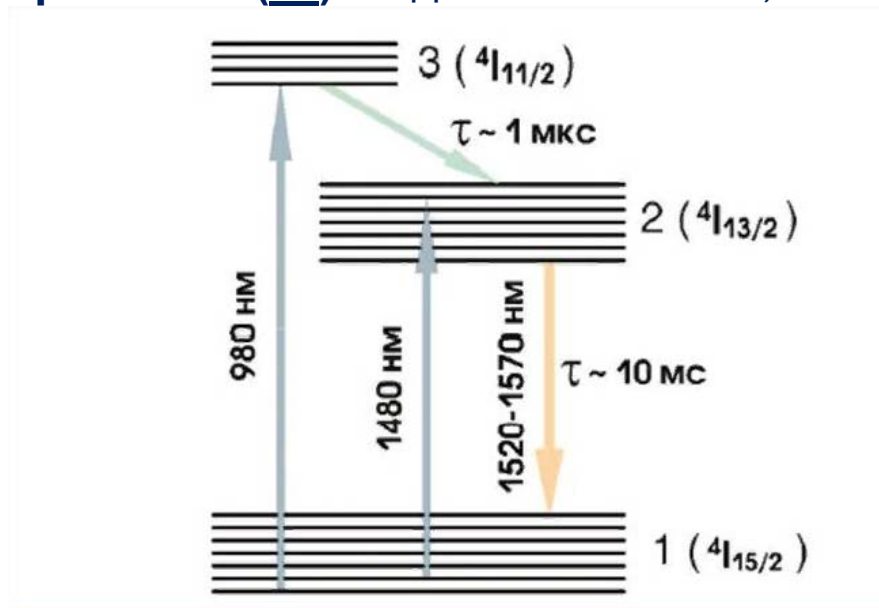


Схема уровней эрбия в кварцевом стекле

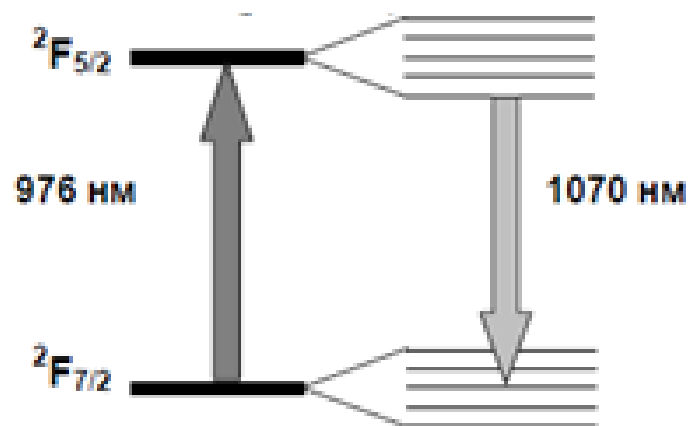
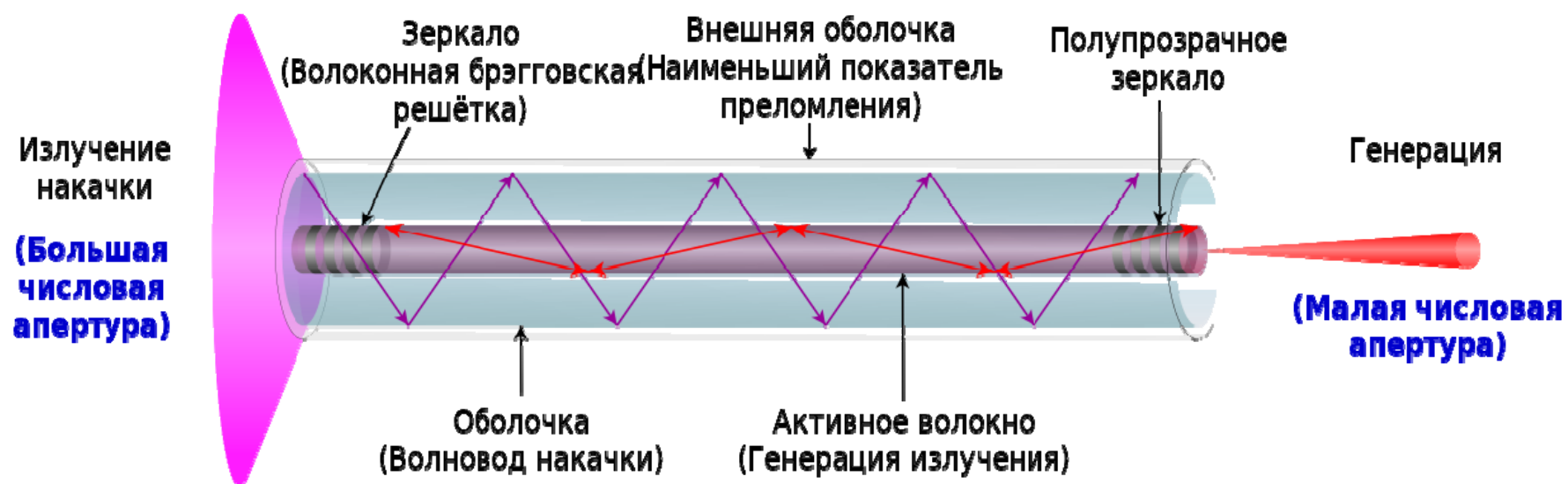


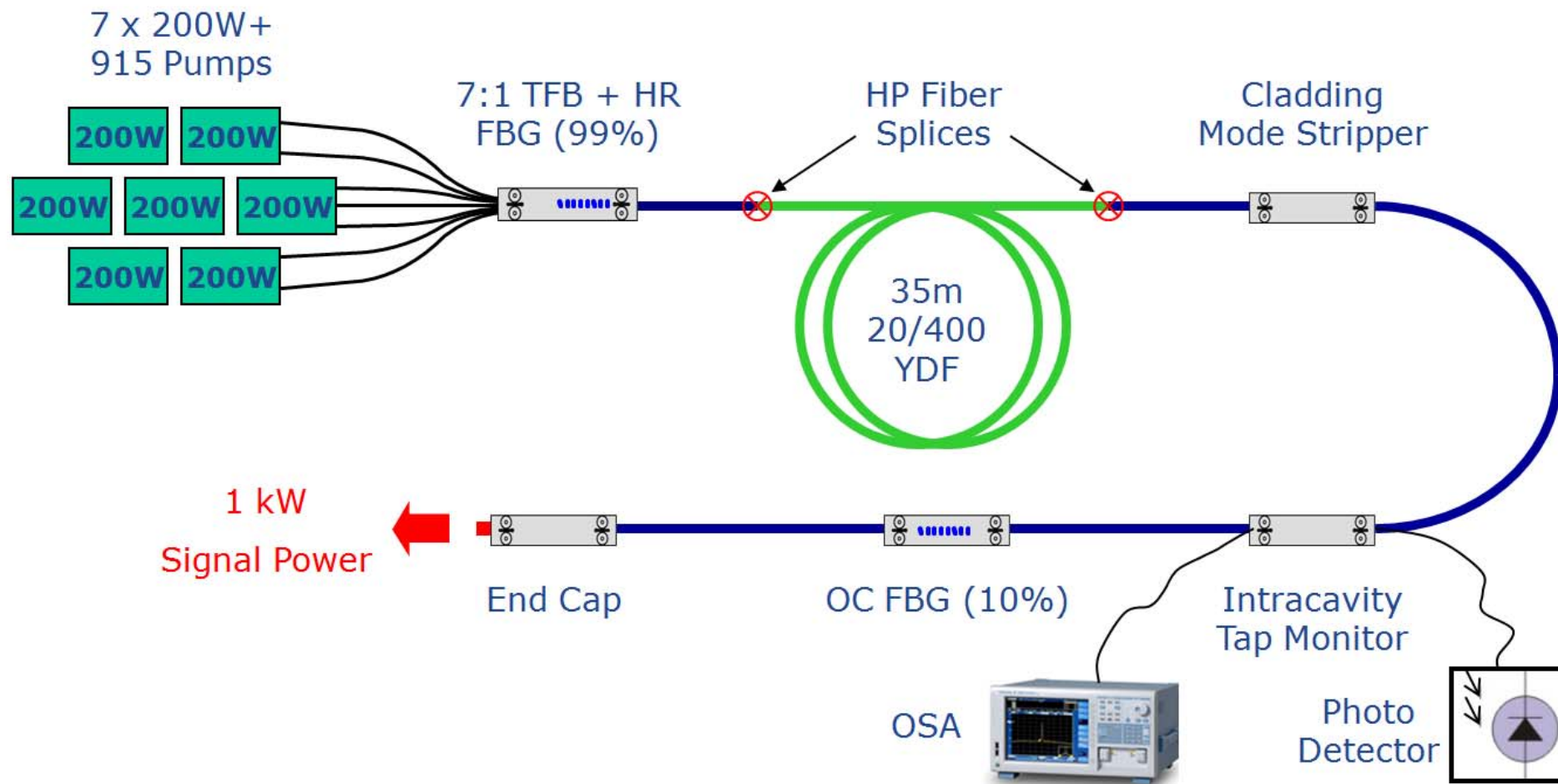
Схема уровней иттербия в кварцевом стекле

В начальный период развития волоконных лазеров в основном использовались волокна, легированные ионами Nd. Впоследствии их практически вытеснили лазеры на основе волокон, легированных Er (связь, измерительные системы) и Yb (технологические системы непрерывного действия, генерация пико- и фемтосекундных импульсов). Распространены также лазеры на основе волокон, легированных Tm, Ho и др.

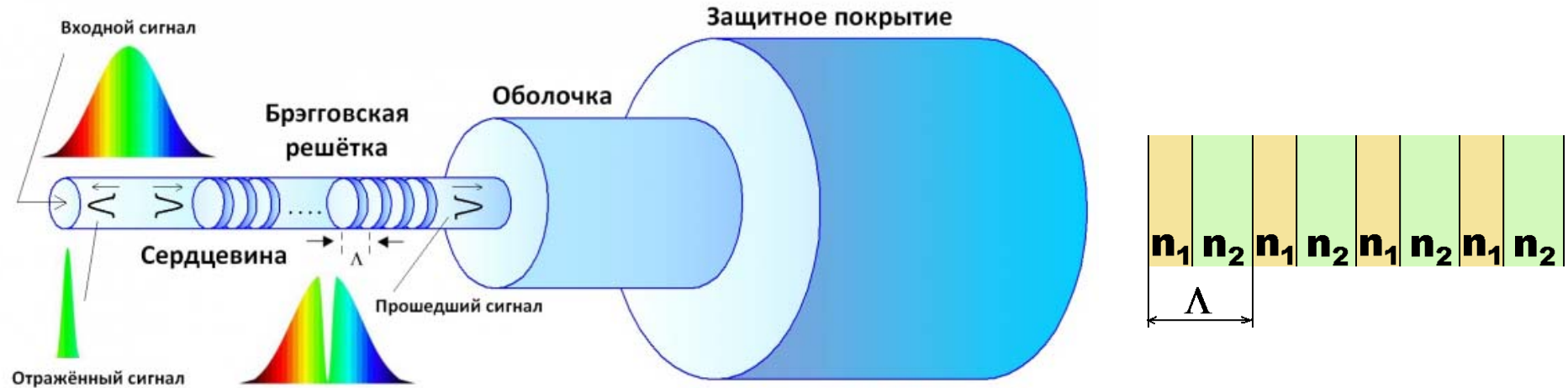
# Схема построения волоконного лазера



## Типичная схема волоконного лазера



# Внутриволоконные брэгговские решетки

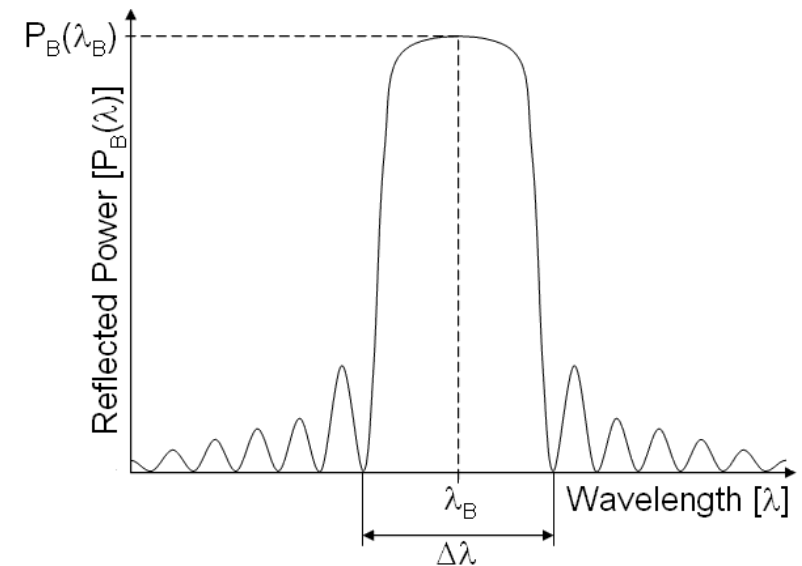


Схема, поясняющая работу внутриволоконной брэгговской решетки

Чередующиеся слои показателя преломления

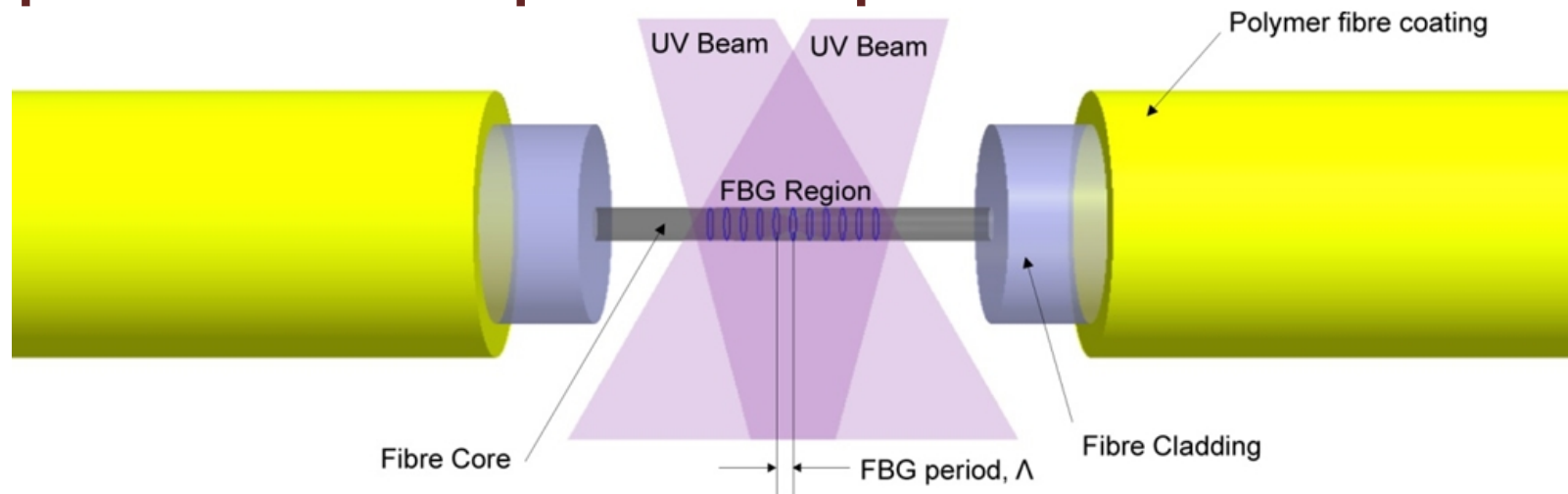
Форма спектра отражения брэгговской решетки

Отражение на длине волны  $\lambda_B = 2n\Delta$



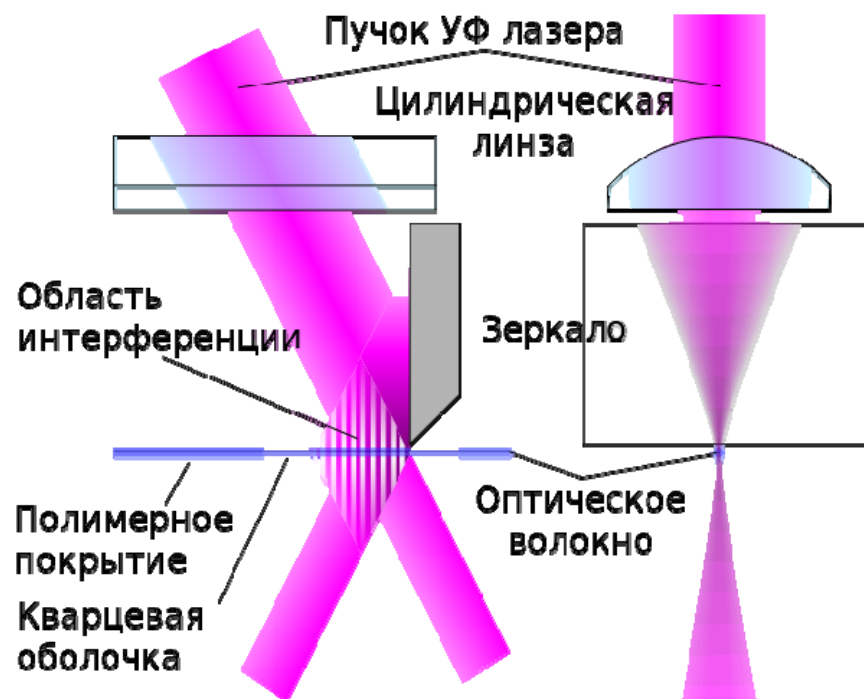


# Внутриволоконные брэгговские решетки



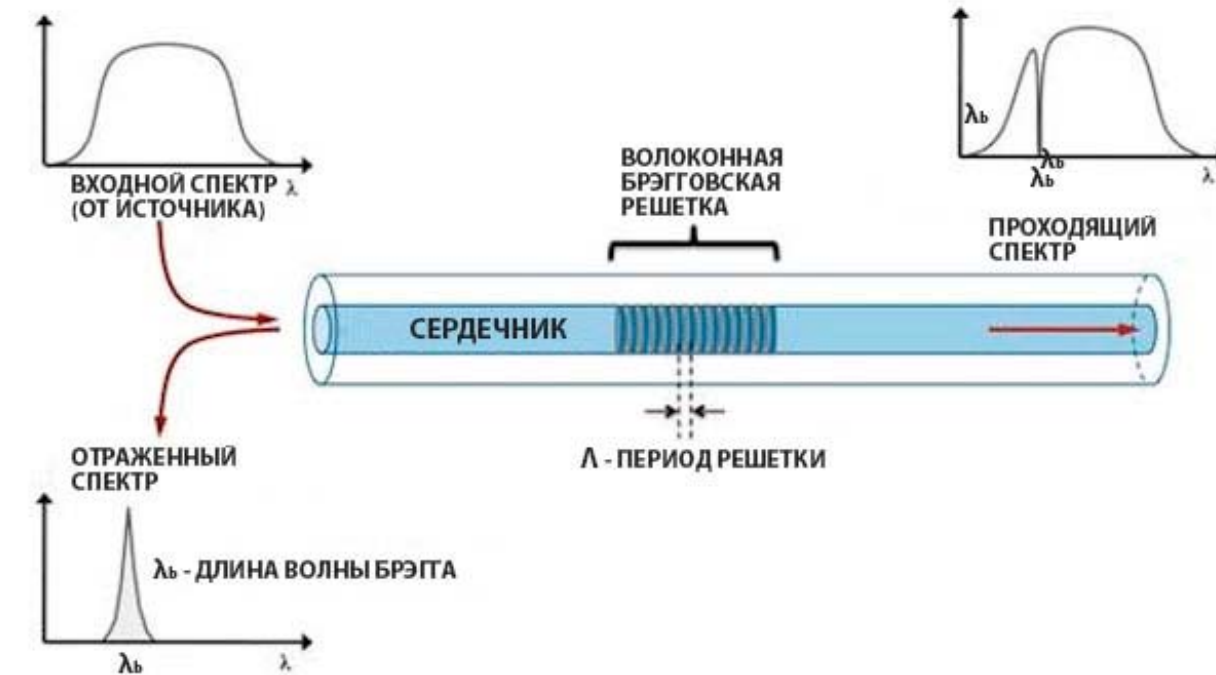
Нанесение решеток Брэгга с помощью УФ лазера

Использование интерферометра Ллойда для нанесения решеток Брэгга



# Внутриволоконные брэгговские решетки

## Волоконные датчики на основе брэгговских решеток

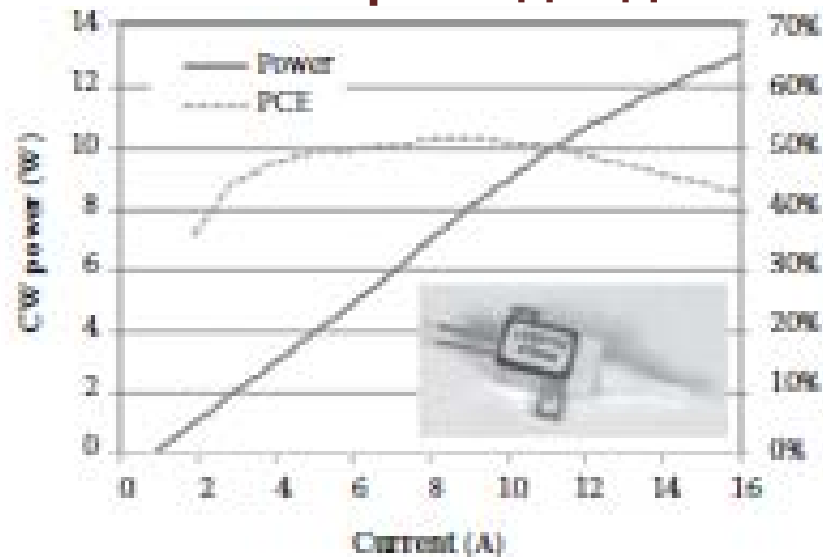


Период решетки  
меняется из-за  
растяжения волокна при  
наличии механических  
напряжений

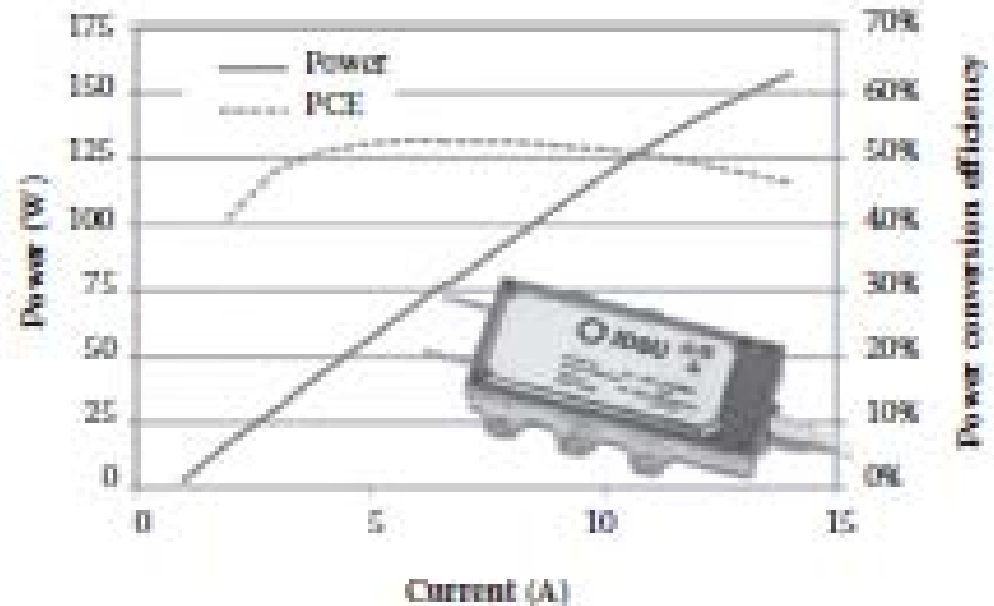
Волоконно-оптические  
тензодатчики



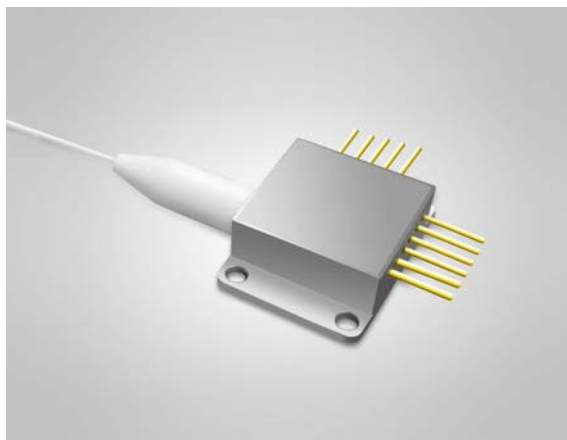
## Системы лазерной диодной накачки



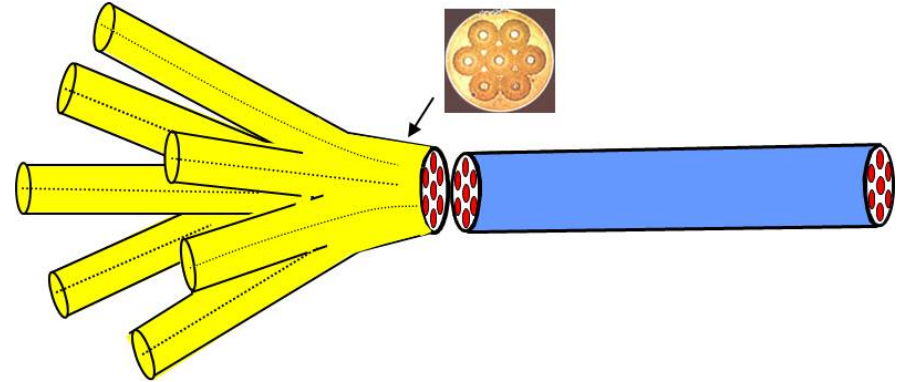
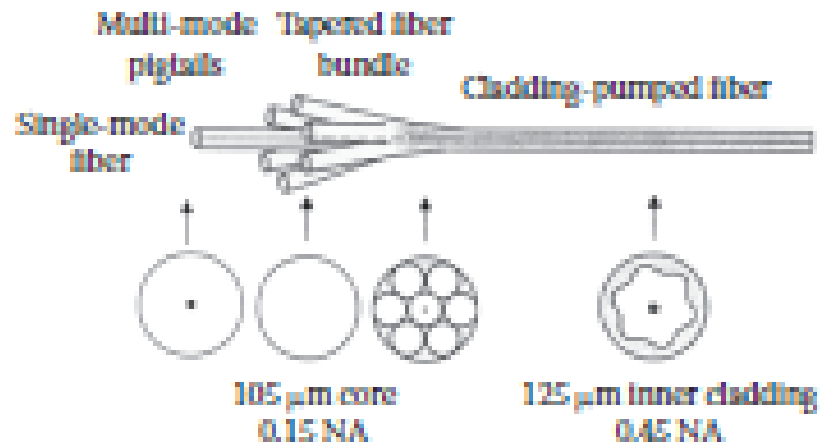
Одноэмитерный лазерный диод 12 Вт с волоконным выводом



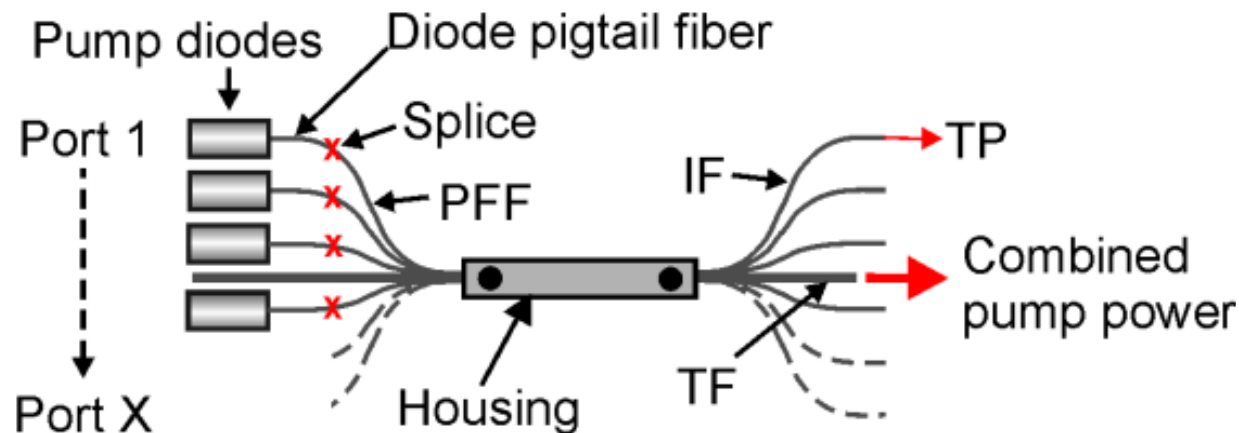
Многоэмитерная 150 Вт диодная лазерная сборка 12Вт с волоконным выводом



## Объединители накачки

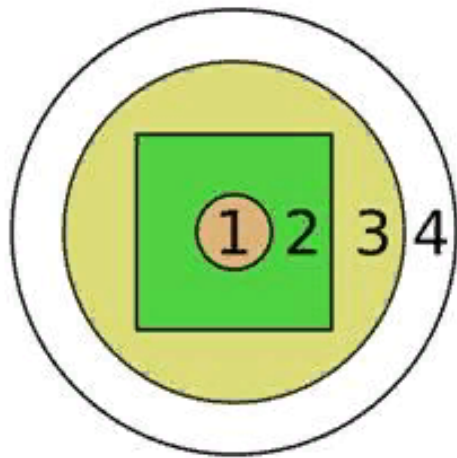


Объединитель накачки на основе TFB  
(tapered fiber bundle)



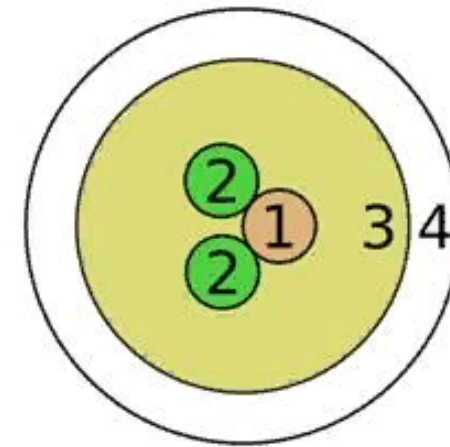
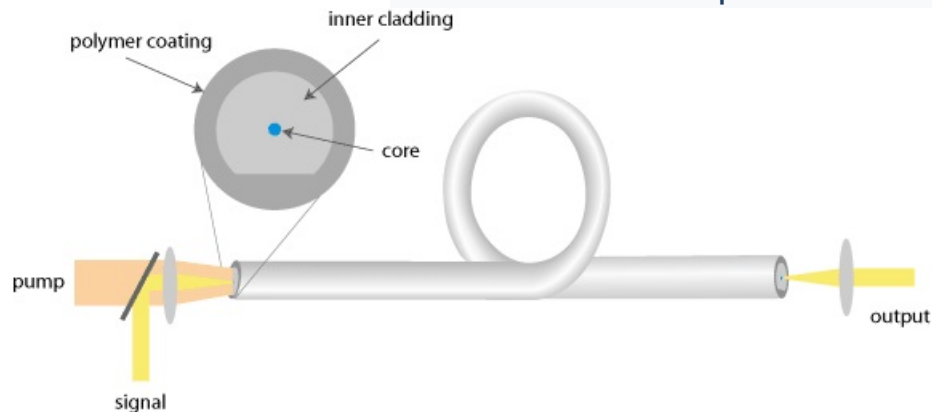
Fiber combiner with multiple pump ports, PFF: pump feeding fiber with a piece of coreless intermediate fiber (IF) as described in Fig. 1, TF: target fiber, TP: transmitted power

# Накачка волоконных лазеров



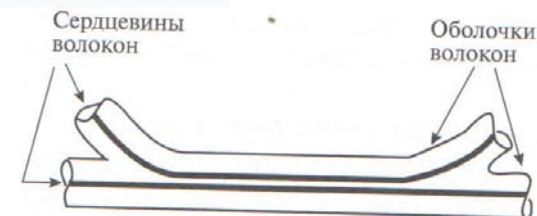
Накачка в оболочку  
Dual-clad fiber

1. Сердцевина, легированная редкоземельными ионами. 2. Волновод накачки. 3. Общая оболочка. 4. Защитная оболочка.

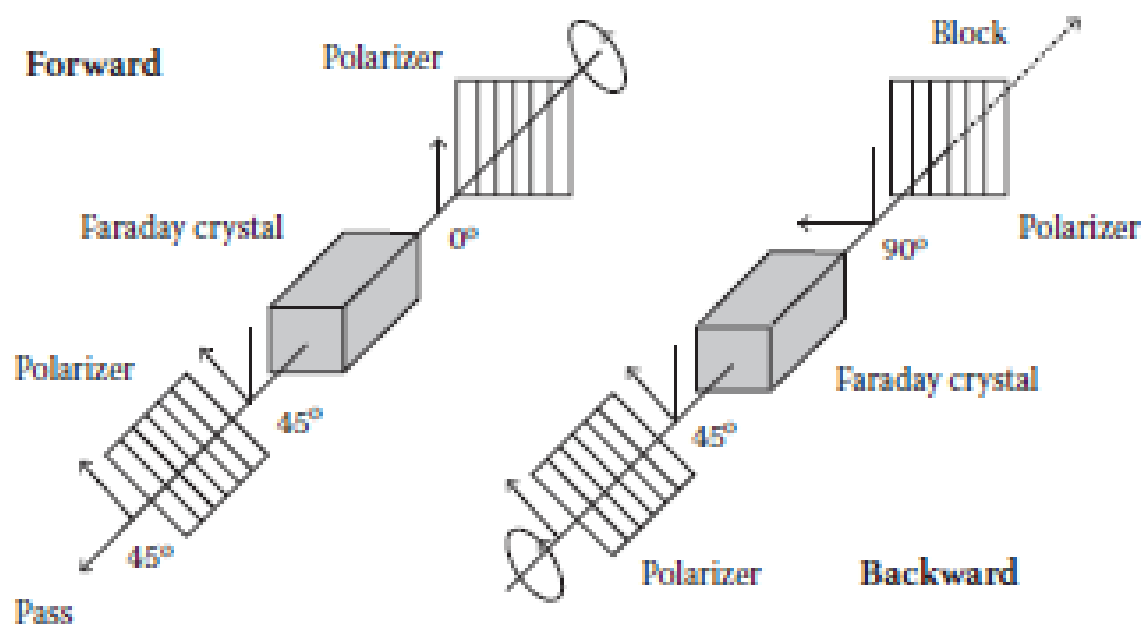
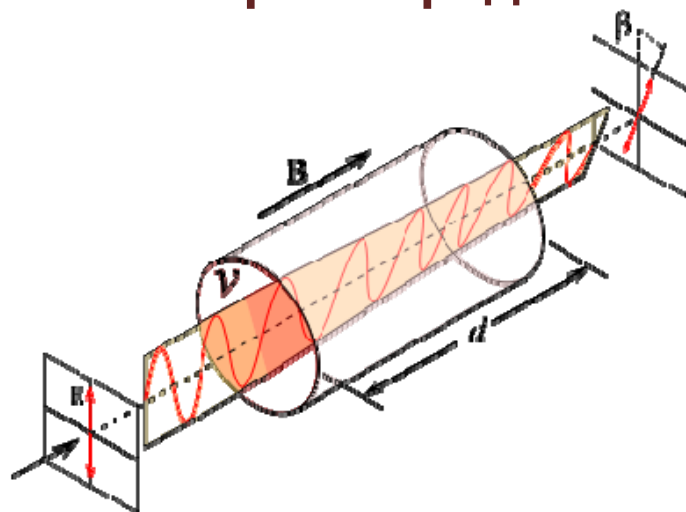


GTWave-технология

Волокна с сердцевинами 1 и 2 проплавляются до сильного сближения сердцевин. В этом случае нарушается условие полного внутреннего отражения и излучение накачки перетекает в активное волокно.

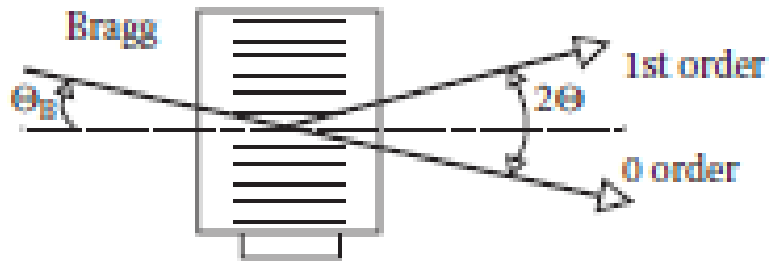


# Изоляторы Фарадея

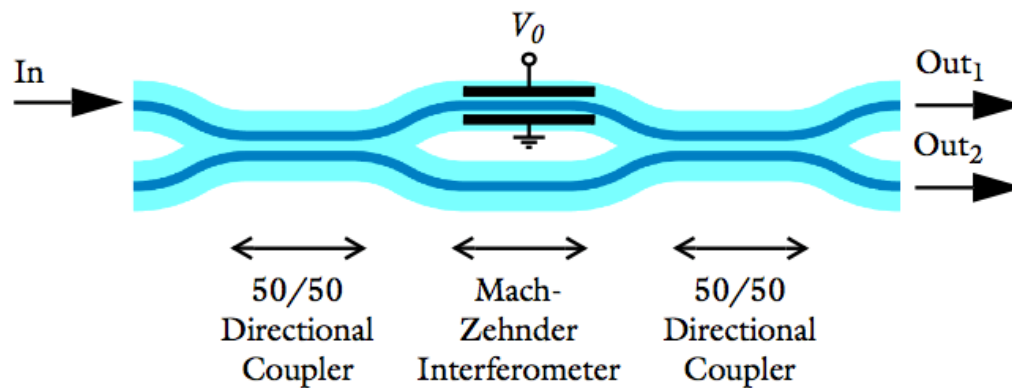
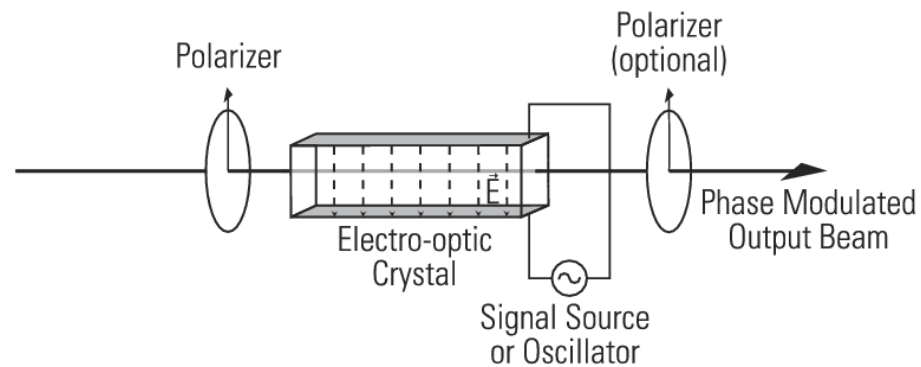




## Acousto-optic modulators



## Electro-optic modulators

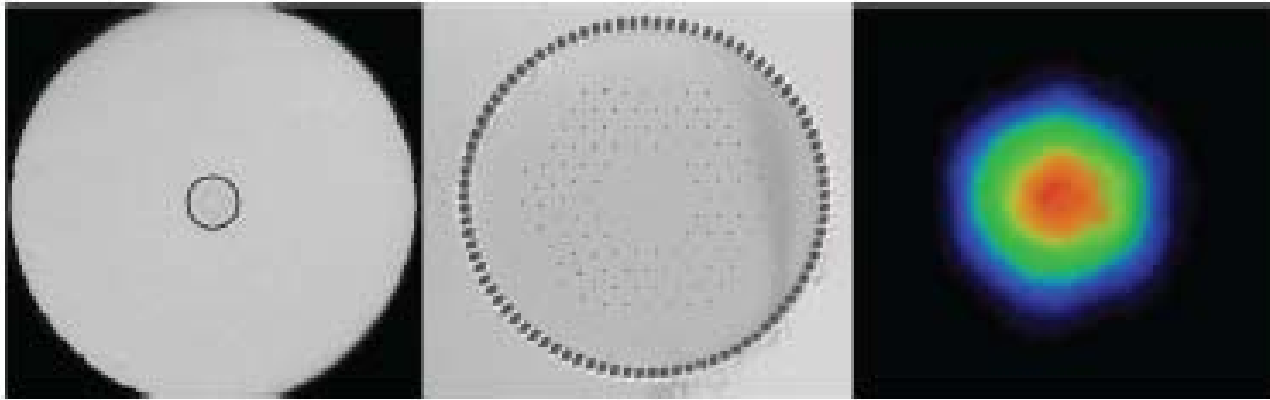


Амплитудный и фазовый  
модуляторы

Модулятор на основе  
интерферометра Маха-Цандера

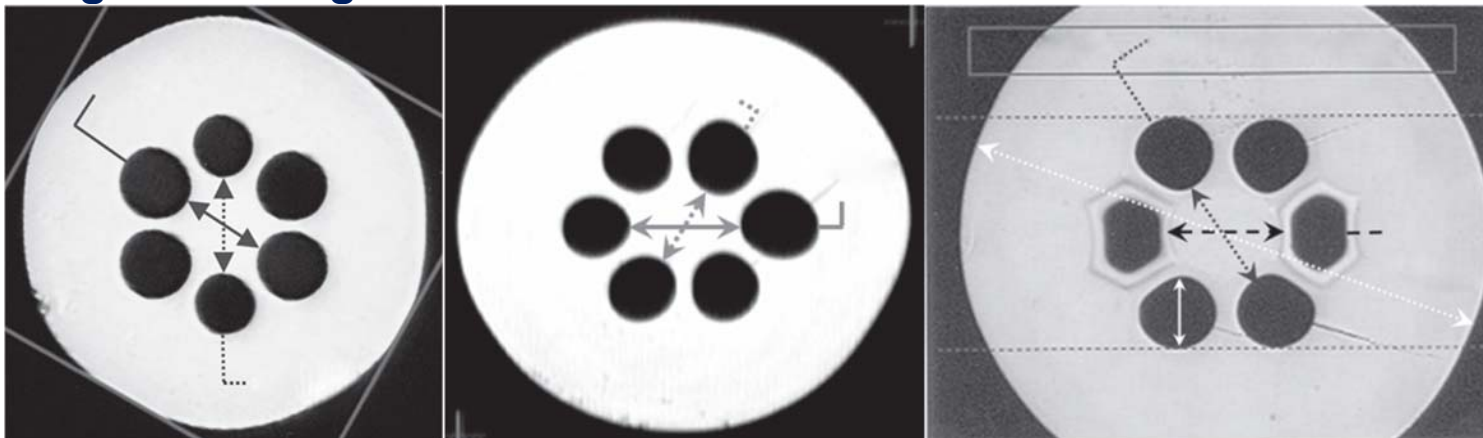
## Продвинутые волоконные технологии

### Active large core Photonic Cristal Fibers



Microscope image of the extended-mode-area rod-type PCF, SEM-picture of the microstructured region, and measured near-field intensity profile of the 60- $\mu\text{m}$  core fiber.

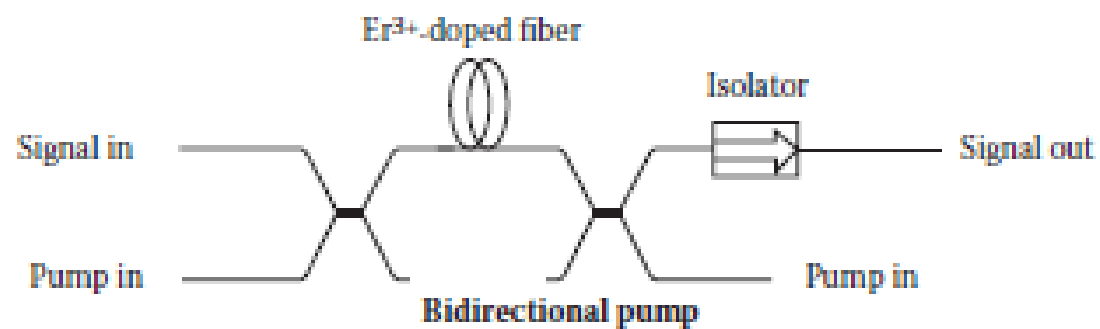
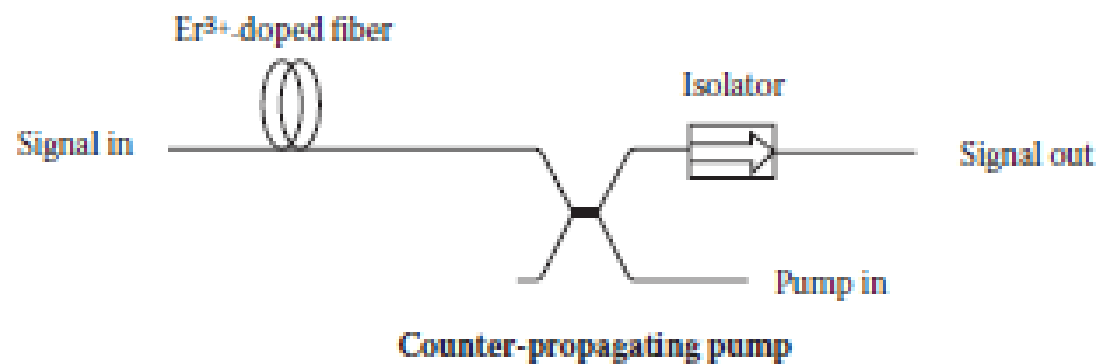
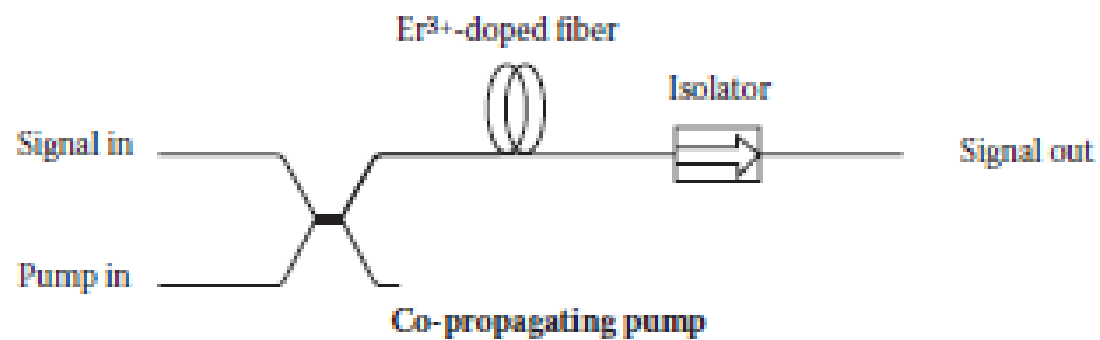
### All-glass leakage channel fibers



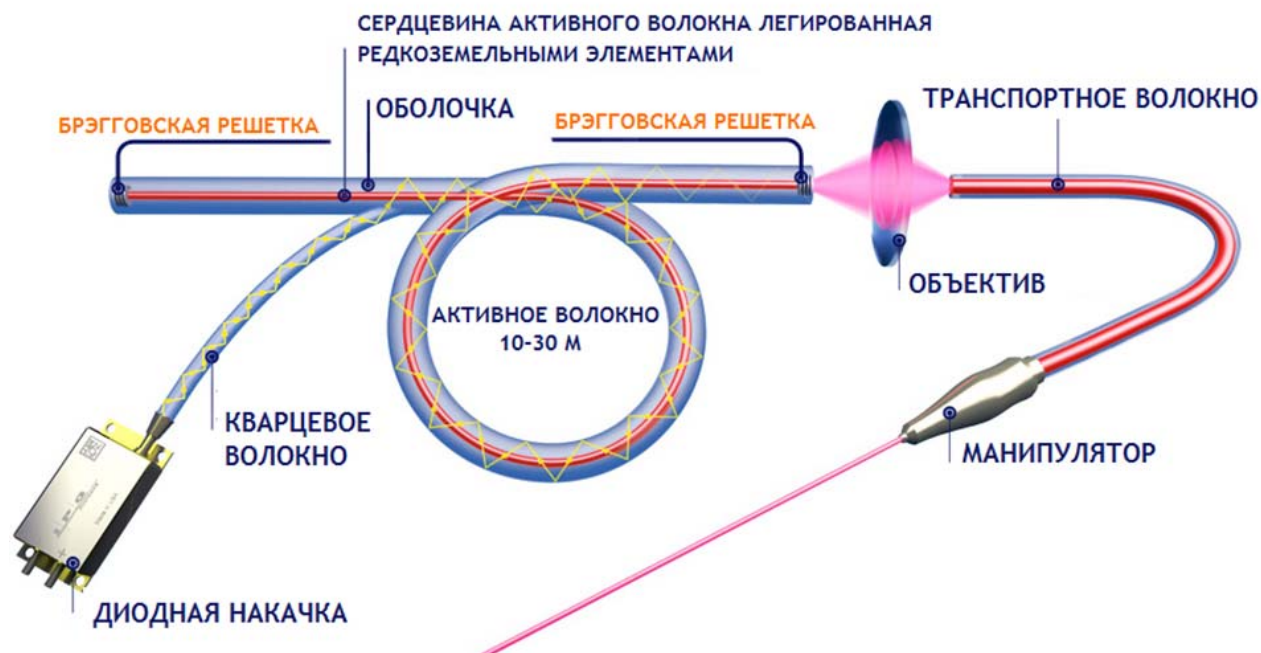
The LCF used in the first demonstration [7] (left), the first ytterbium-doped LCF (center) [33]

(c2006 OSA), and the first ytterbium-doped PM LCF (right) [34]. Fluorinedoped silica can be used to replace air holes in the LCFs

## Общая схема эрбиевого волоконного усилителя

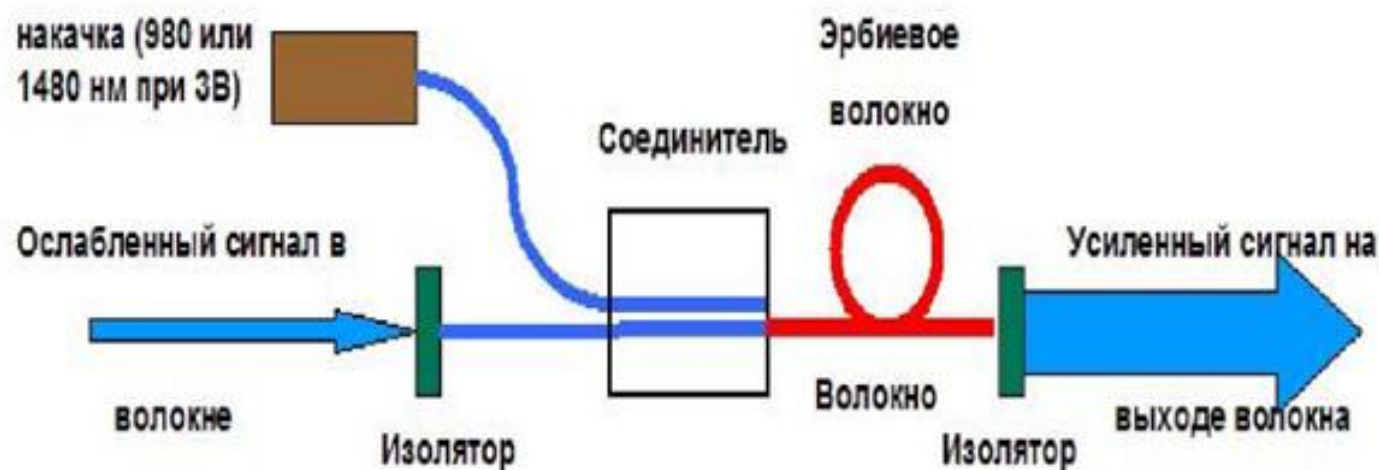


# Общая схема иттербиевого волоконного лазера



10-кВт непрерывный иттербиевый лазер IPG Photonics

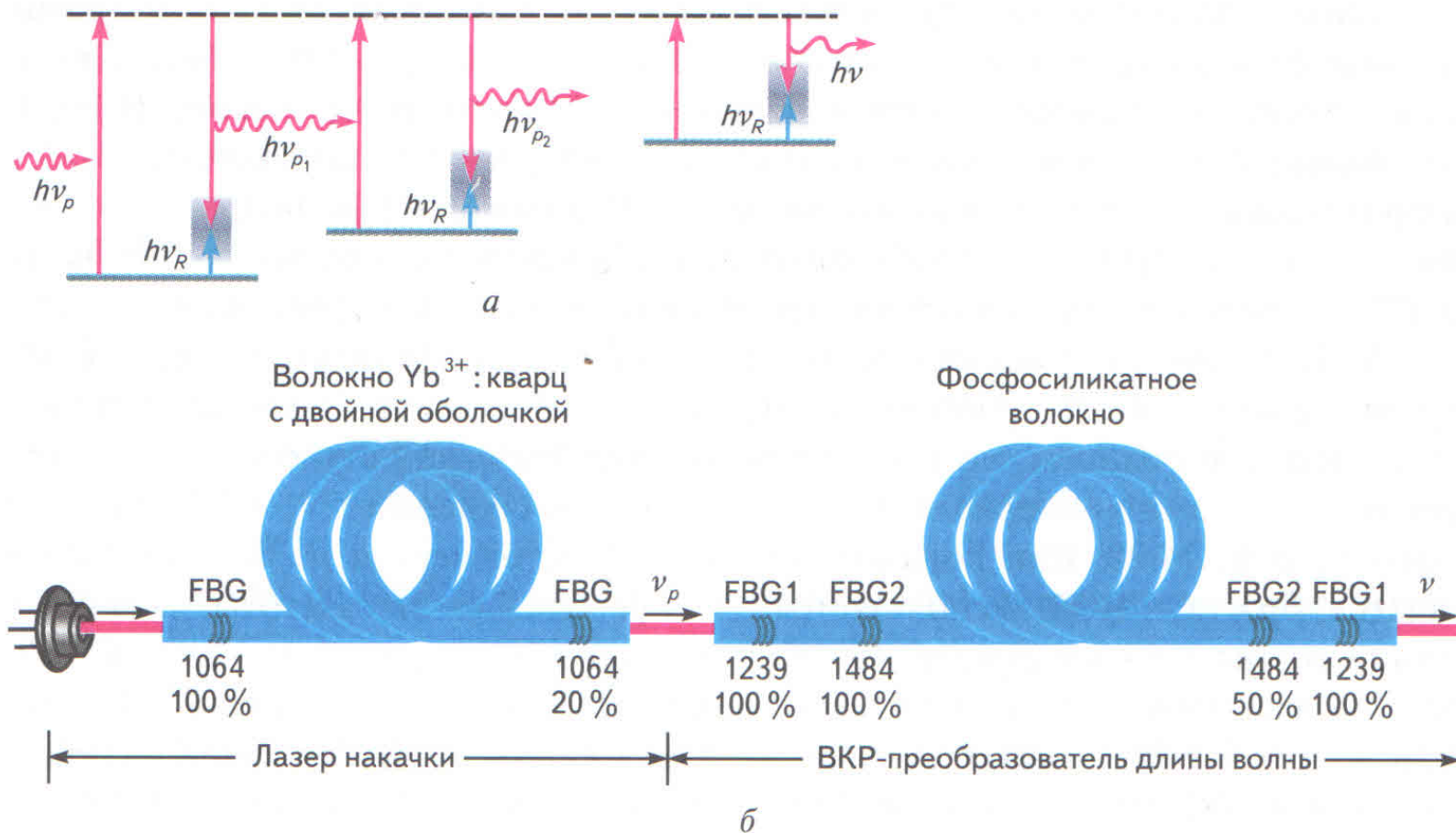
## Волоконные усилители



### Photon conversion efficiencies

| Active element          | Output          | Pump bands       | Photon conversion    |
|-------------------------|-----------------|------------------|----------------------|
| Neodymium (solid-state) | 1064 to 1088 nm | 808 nm           | 76%                  |
| Ytterbium               | 1030 to 1100 nm | 910, 940, 975 nm | Over 90% at 940/1030 |
| Erbium                  | 1550 nm band    | 980 and 1480 nm  | 95% or 63%           |
| Yb-Er                   | Erbium          | Ytterbium        |                      |
| Thulium                 | 1750 to 2100 nm | 793 nm           | 2 out/1 in           |

# Рамановские волоконные усилители



(а) Каскад стоксовых сдвигов

(б) Схема ВКР лазера на фосфосиликатном волокне

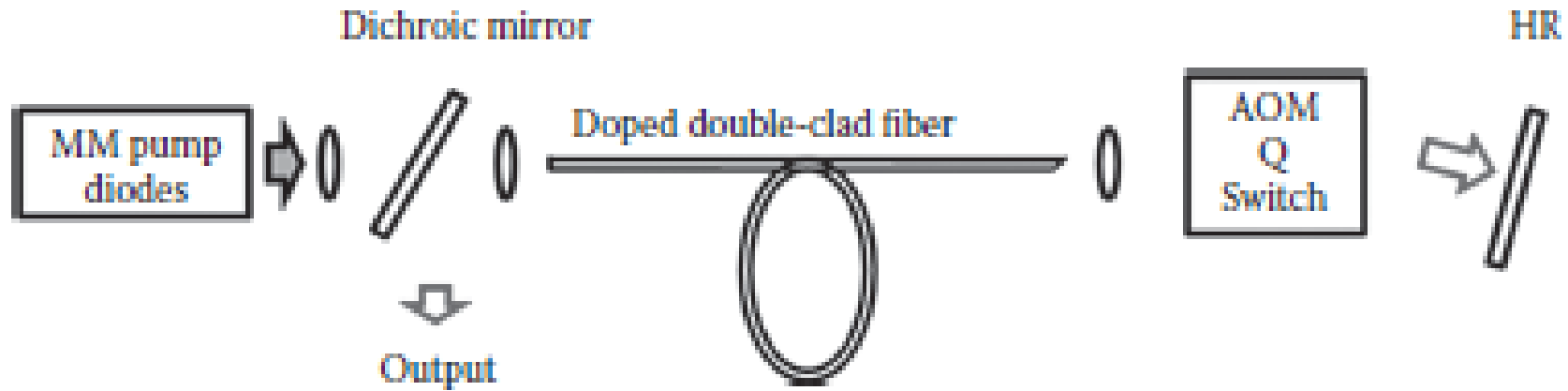
ВКР-лазер может работать в качестве усилителя на требуемой частоте, если соответствующим образом подобрать частоту накачки



## Другие волоконные лазеры, лазеры с длиной волны $\sim 2$ мкм и в среднем ИК

Тm-лазер  
Ho-лазер

## Модуляция добротности



A typical scheme for a Q-switched fiber laser. AOM: acousto-optic modulator

## Синхронизация мод

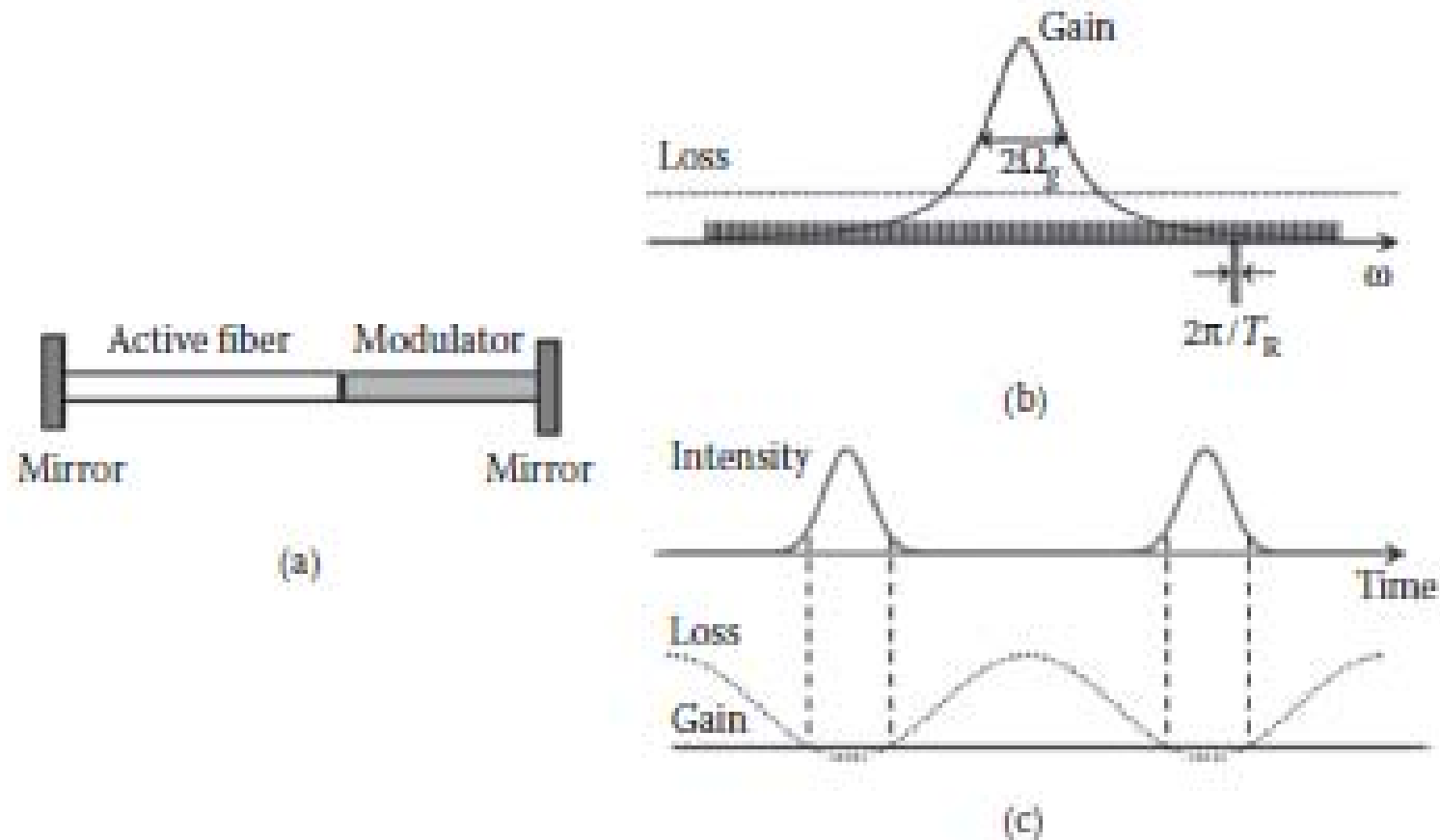
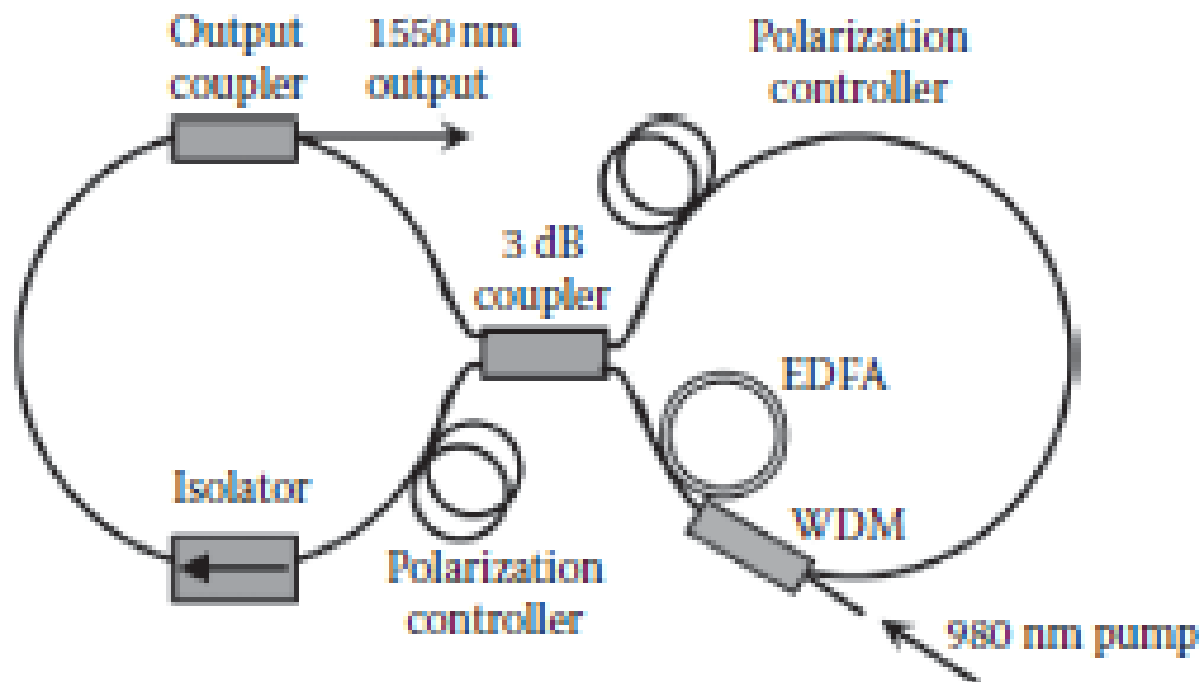
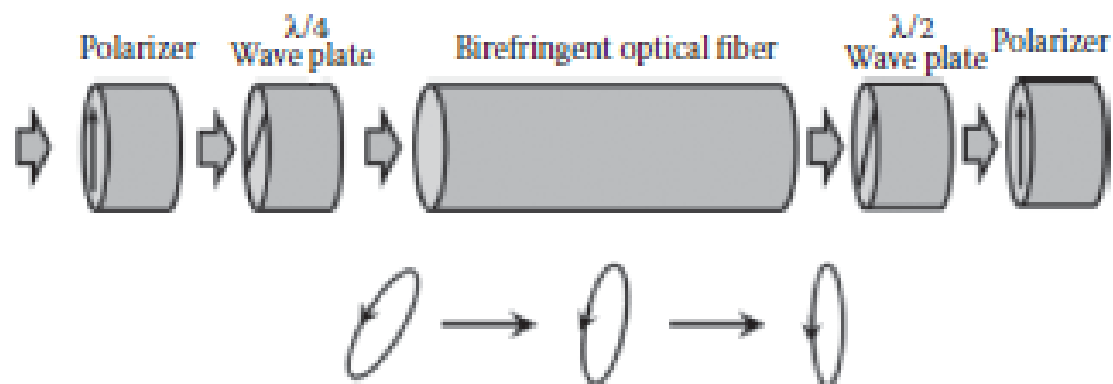


Illustration of (a) an actively mode-locked fiber laser, (b) longitudinal modes, gain and loss in the frequency domain, and (c) pulse intensity, gain and loss in the time domain.

## Волоконные лазеры сверхкоротких импульсов



A typical figure-8 fiber laser.



An example of a saturable absorber based on nonlinear elliptic polarization rotation.

**Нелинейно-оптические эффекты. Самомодуляция. Солитоны**

**Спасибо за внимание?**