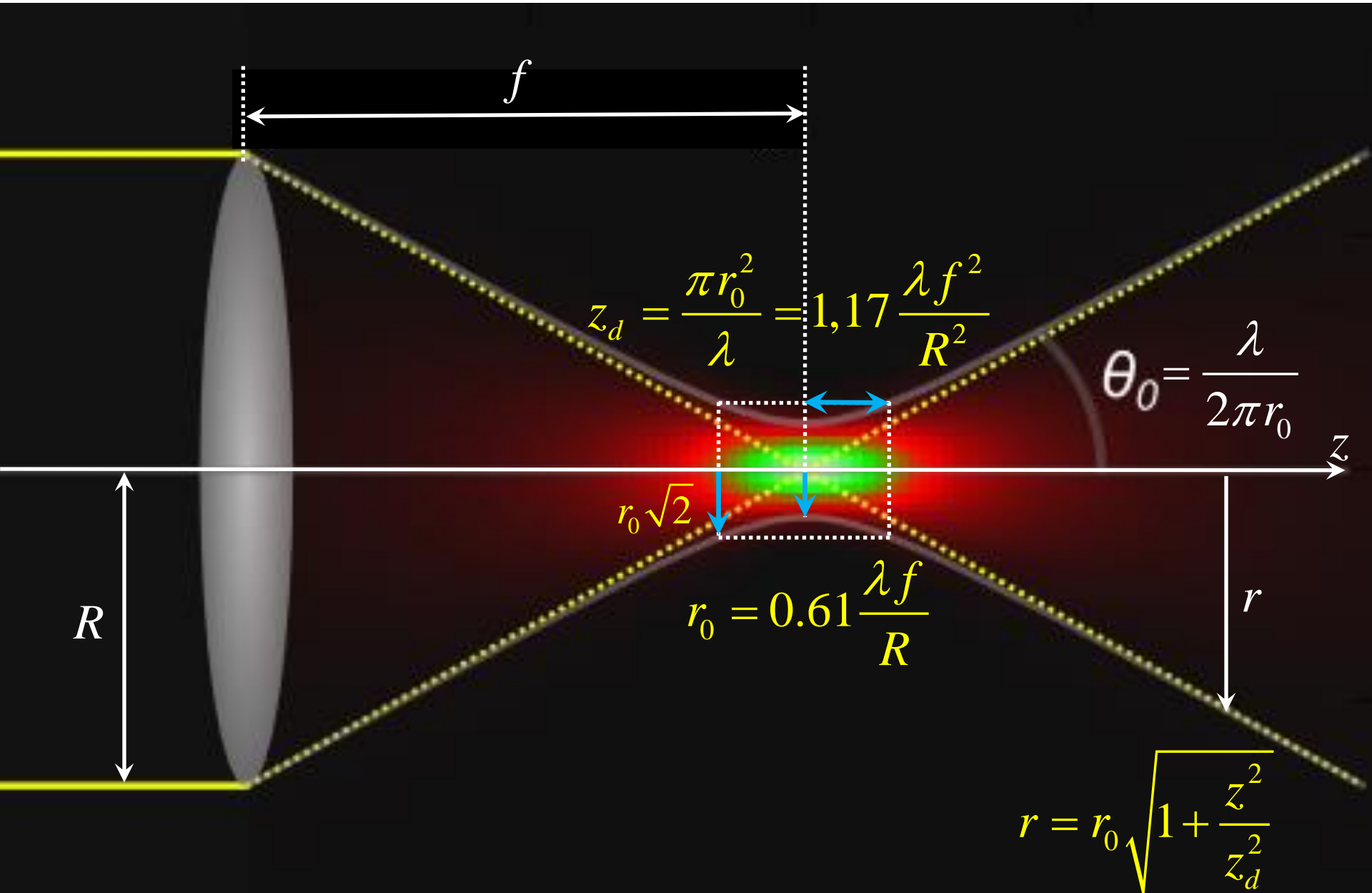


Фокусировка излучения с учётом дифракции



Разрешающая способность глаза

Диаметр рецепторов (колбочек и палочек) глаза – **2-4 мкм**

$$\Delta r \approx 0,61 \frac{\lambda}{R} f = 0,61 \frac{550 \cdot 10^{-9}}{1,5 \cdot 10^{-3}} 18 \text{ мм} \approx 4 \text{ мкм}$$

Угловая разрешающая способность глаза: $\theta_{\min} = 0,61 \frac{\lambda}{R} \approx 0,8'$

Оптические волокна и их применение

1870 г.

Угольные
электроды

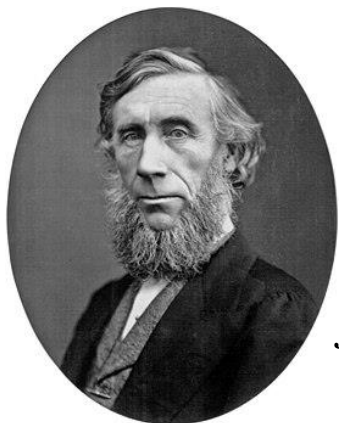
Вольтова
дуга

Линза

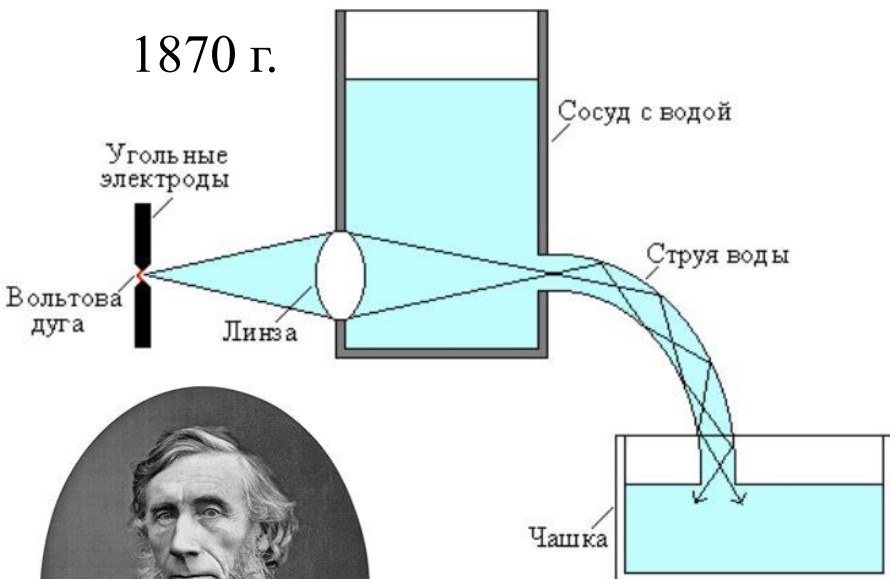
Сосуд с водой

Струя воды

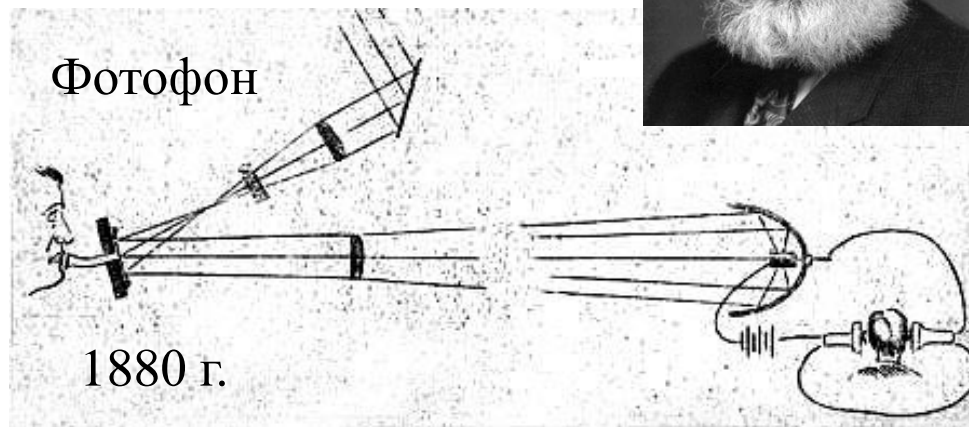
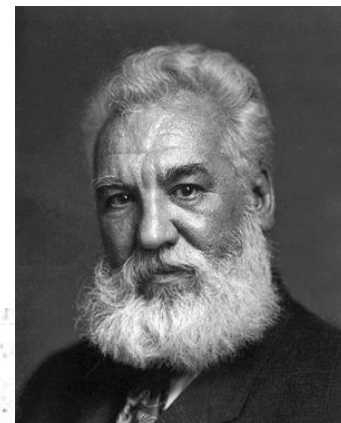
Чашка



John Tyndall
1820-1893

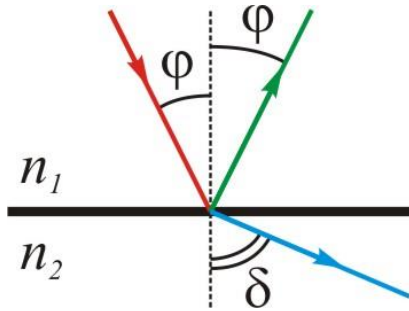


Alexander Graham Bell
1847-1922

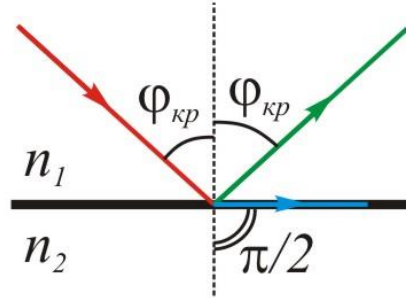


1954	Создание мазера
1962	Создание полупроводникового лазера и фотодиода
1970	Первое волокно от компании «Corning»
1973	Первое применение оптического волокна
1976	Коммерческое использование волокон

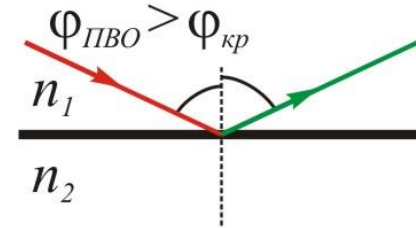
Полное внутреннее отражение в оптическом волокне



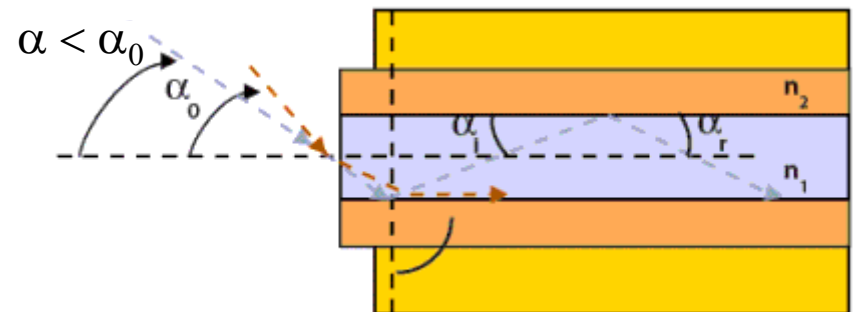
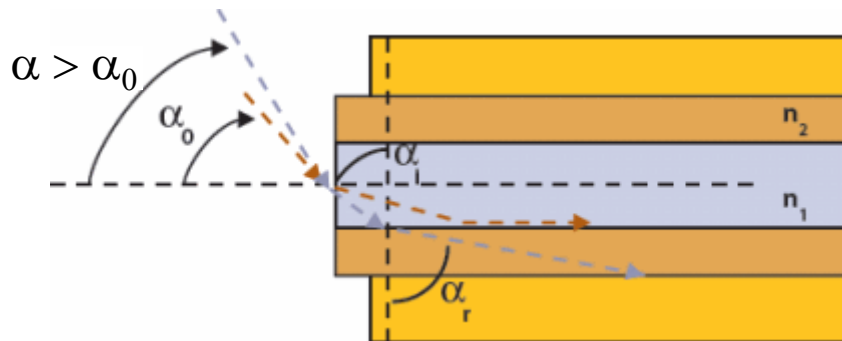
$$n_1 \sin \varphi = n_2 \sin \delta$$



$$\sin \varphi_{кр} = \frac{n_2}{n_1}$$



$$\varphi_{ПВО} \geq \varphi_{кр}$$

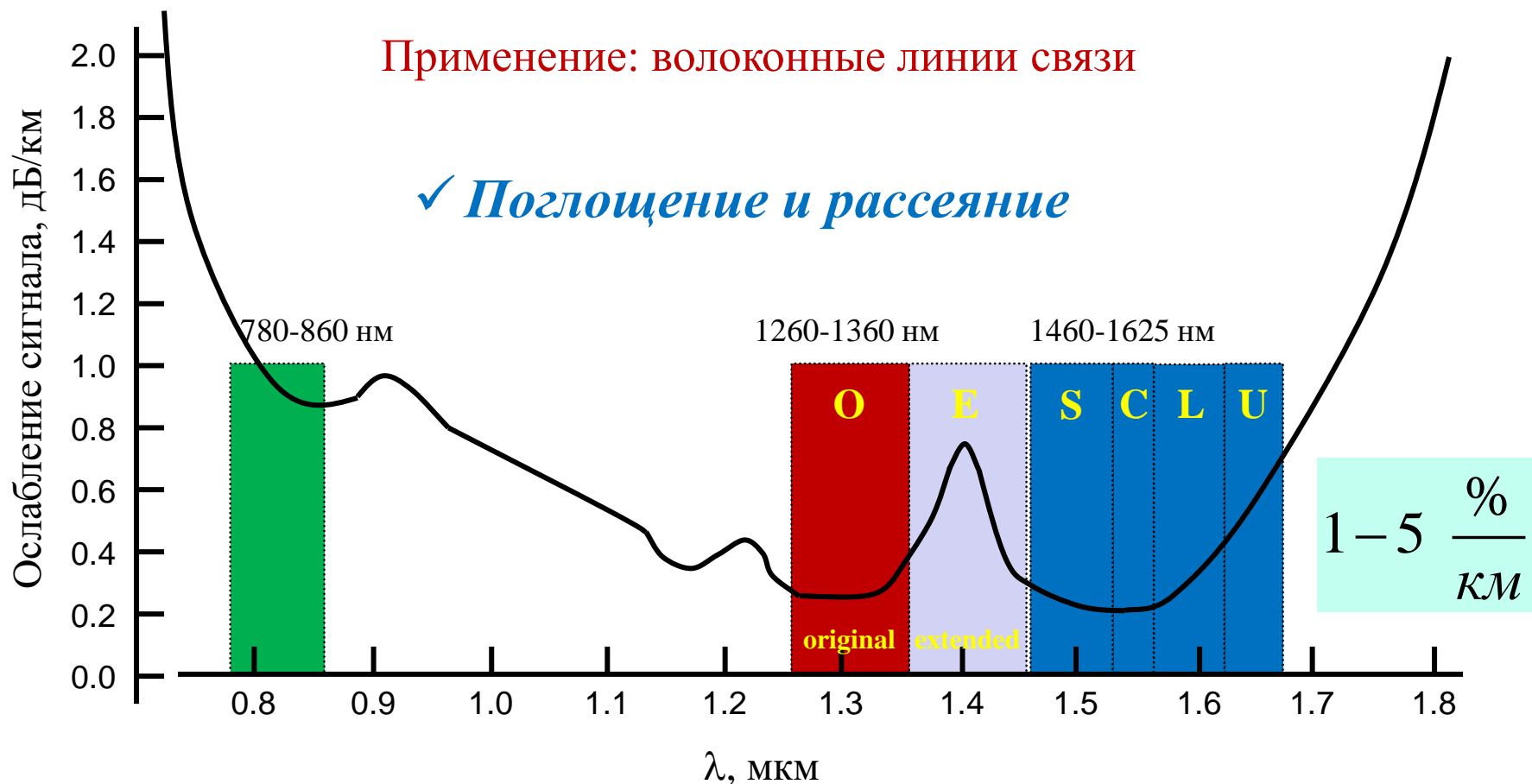


Применения оптических волокон

- Волоконные линии связи
- Подвод излучения к труднодоступным участкам
- Датчики давления, температуры, деформации и т.д.
- Биомеханика: протезы, экзоскелеты и т.д.
- Нейроинтерфейсы

.....

Источники искажений сигнала при передаче по линии связи

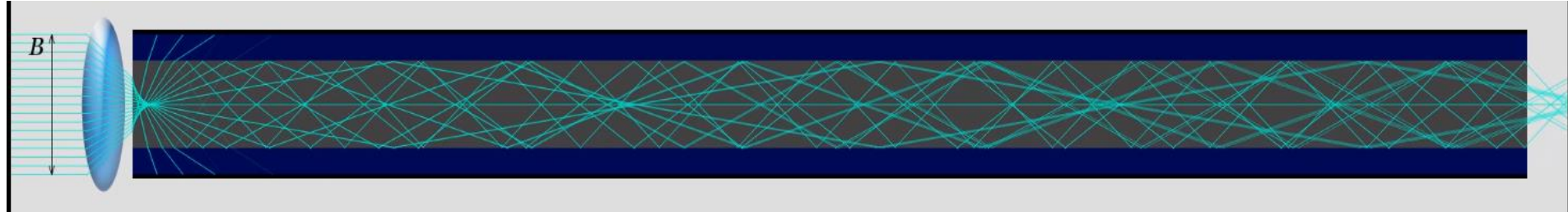


✓ Дисперсия

Межмодовая

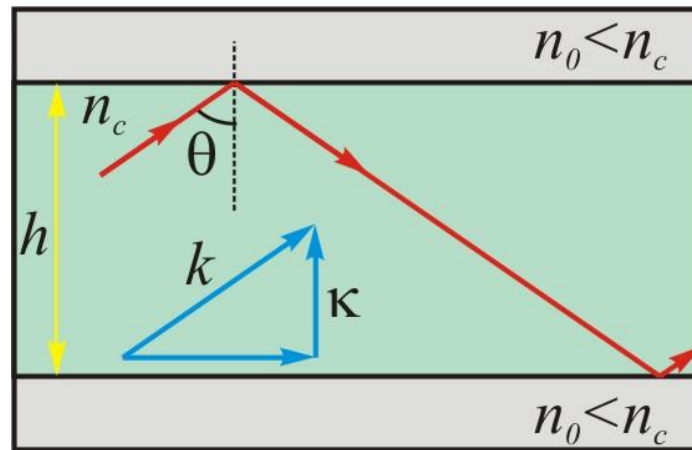
Хроматическая

Моды излучения в волокне



$$\vec{E} = \vec{E}_0 \cos(\omega t - \vec{k}\vec{r})$$

$$\begin{cases} 2\kappa h = 2\pi m \\ \kappa = k \cos \theta \\ \theta \geq \theta_{кр} \\ n_0 = n_c \sin \theta_{кр} \end{cases}$$



$$\cos \theta_m = \frac{\pi m}{hk}$$

$$m_{\max} = \left[\frac{2hn_c \cos \theta_{кр}}{\lambda} \right]$$

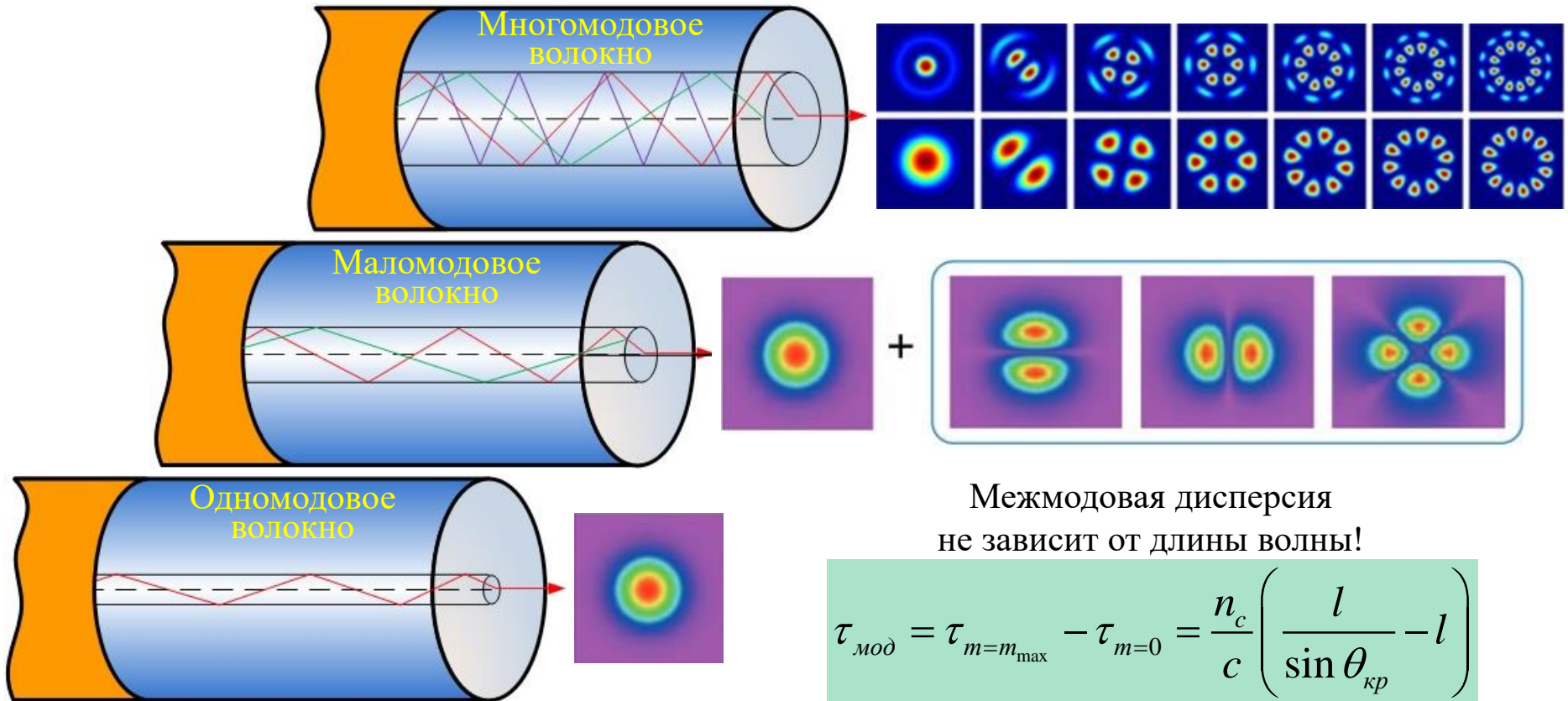
Пример:

$$\begin{cases} \lambda = 1300 \text{ нм} \\ n_0 = 1,474 \\ n_c = 1,479 \\ m_{\max} < 2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \theta_{кр} = 85^\circ \\ h < 10 \text{ мкм} \end{cases}$$

Число поперечных мод

$$m_{\max} = \left[\frac{2h}{\lambda} \sqrt{n_c^2 - n_0^2} \right]$$

Моды излучения в волокне. Межмодовая дисперсия

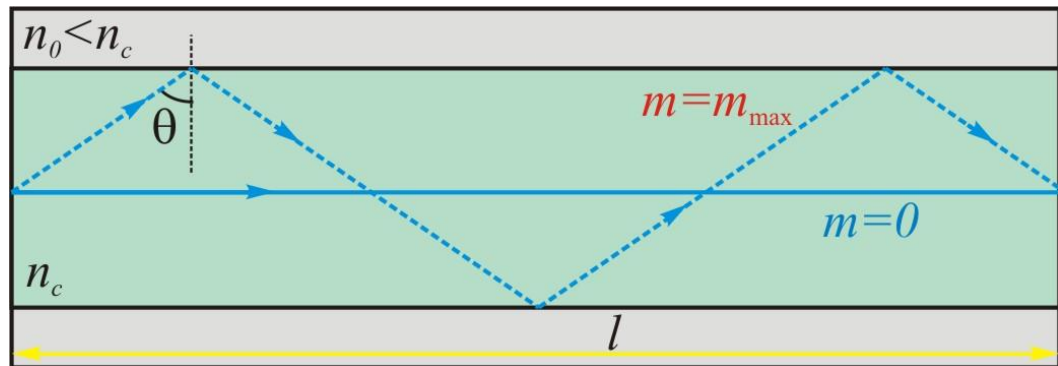


$$\tau_{\text{мод}} = \tau_{m=m_{\text{max}}} - \tau_{m=0} = \frac{n_c}{c} \left(\frac{l}{\sin \theta_{\text{кр}}} - l \right)$$

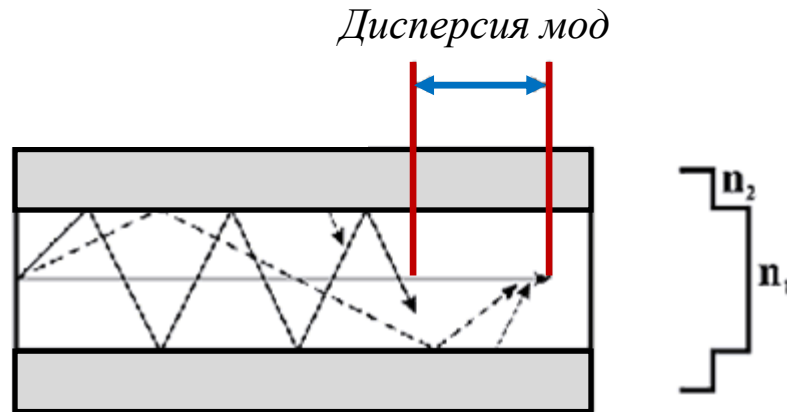
$$n_0 = 1,474; \quad n_c = 1,479$$

$$\frac{\tau_{\text{мод}}}{l} = \frac{n_c (n_c - n_0)}{c n_0} \approx 17 \frac{\text{нс}}{\text{км}}$$

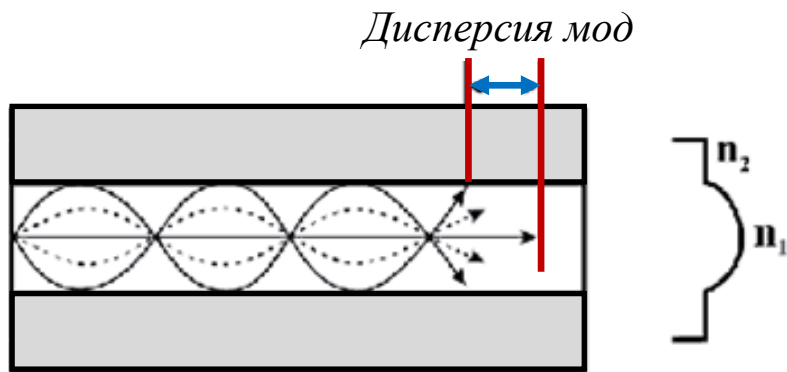
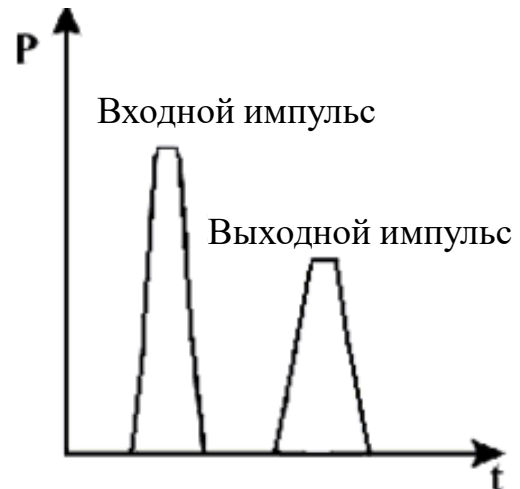
$$\tau_{\text{имп}} \approx 10 \text{ нс}$$



Минимизация межмодовой дисперсии



**Ступенчатое
многомодовое
волокно**



**Градиентное
многомодовое
волокно**

Хроматическая дисперсия

Основное ограничение на длину волоконно-оптического канала связи – дисперсия!



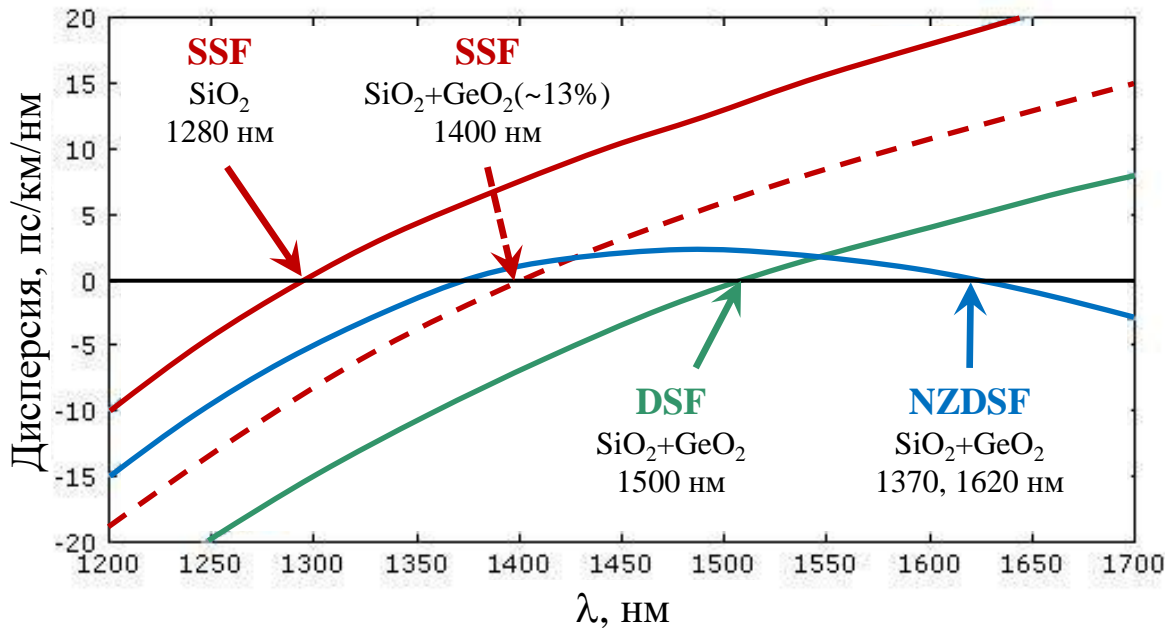
Хроматическая дисперсия – различие скоростей распространения спектральных составляющих сигнала.

Чем короче импульс на входе, тем плотнее можно сжать информацию. Но чем короче импульс, тем шире спектр, а чем шире спектр, тем больше дисперсионное расплывание.

Хроматическая дисперсия

Определяется дисперсионными характеристиками волокна (кварц и легирующие добавки) и профилями показателей преломления

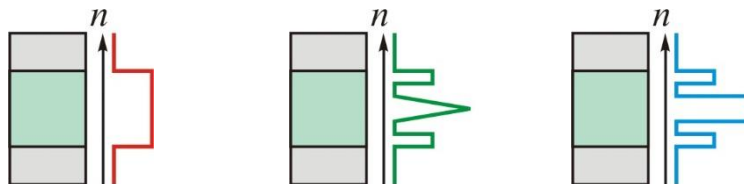
Волокно	Нулевая дисперсия	Потери	Расстояние между ретрансляторами
SSF – step index single mode	1280-1400 нм	0,3 дБ/км	100 км
DSF – dispersion-shifted single mode	1550 нм	0,2 дБ/км	200 км
NZDSF – non-zero dispersion-shifted single mode	1370, 1620 нм	0,2 дБ/км	200 км



$$\tau_{\text{имп}} \approx 10 \text{ пс}$$

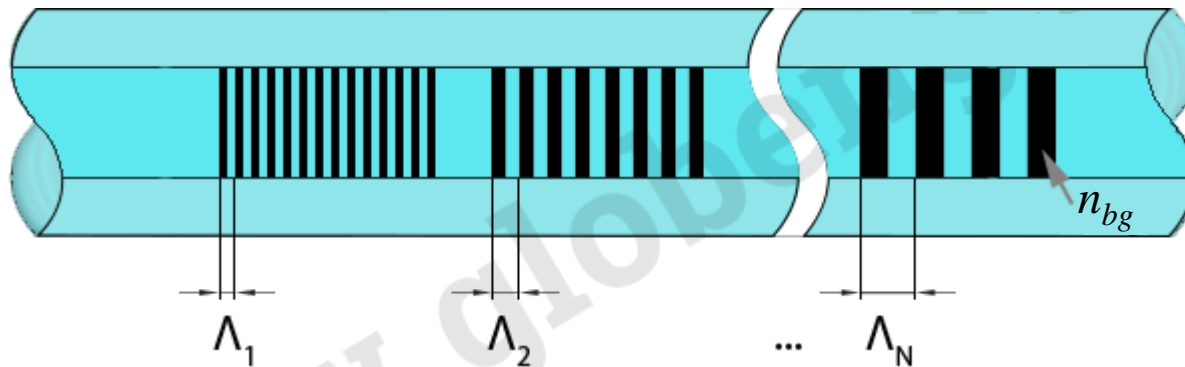
$$\frac{\tau_{\text{мод}}}{l} = \frac{n_c (n_c - n_0)}{c n_0} \approx 17 \frac{\text{пс}}{\text{км}}$$

$$\frac{\tau_{\text{хром}}}{l} = 2 \frac{n_c}{\text{км} \cdot \text{нм}} \cdot 0,5 \text{ нм} \approx 1 \frac{\text{пс}}{\text{км}}$$

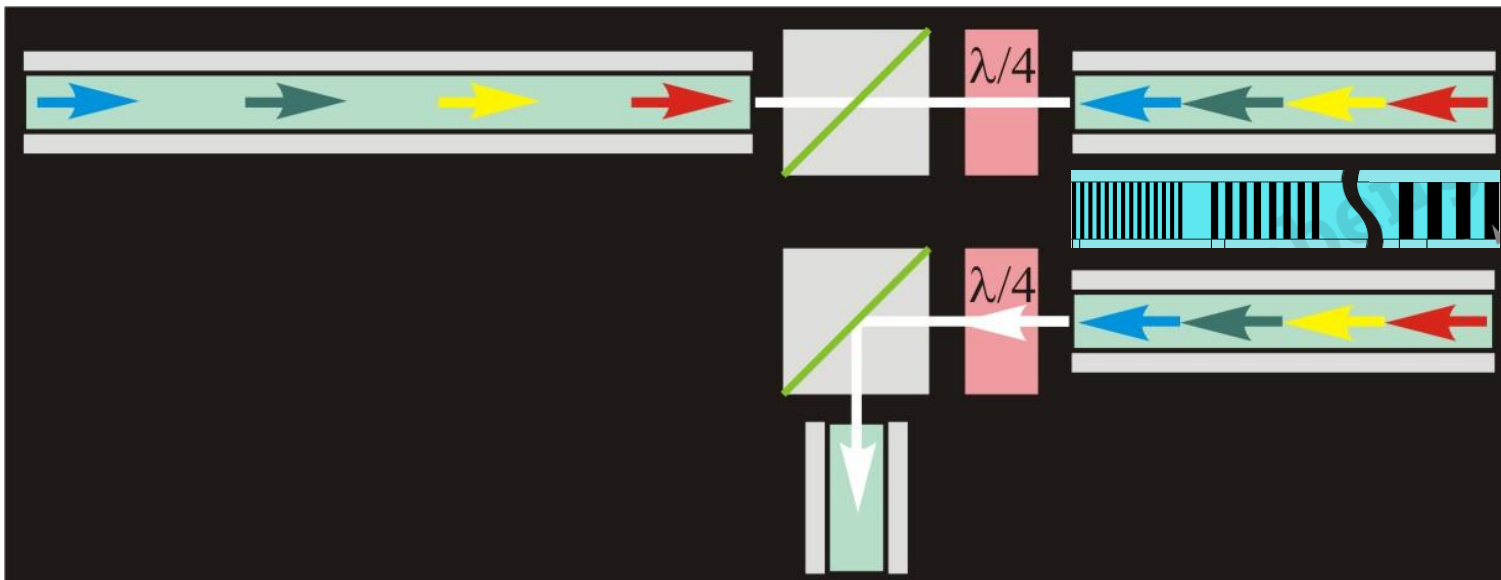


Компенсатор дисперсии

Брэгговская решётка с изменяющимся периодом d (FBG с чирпом)



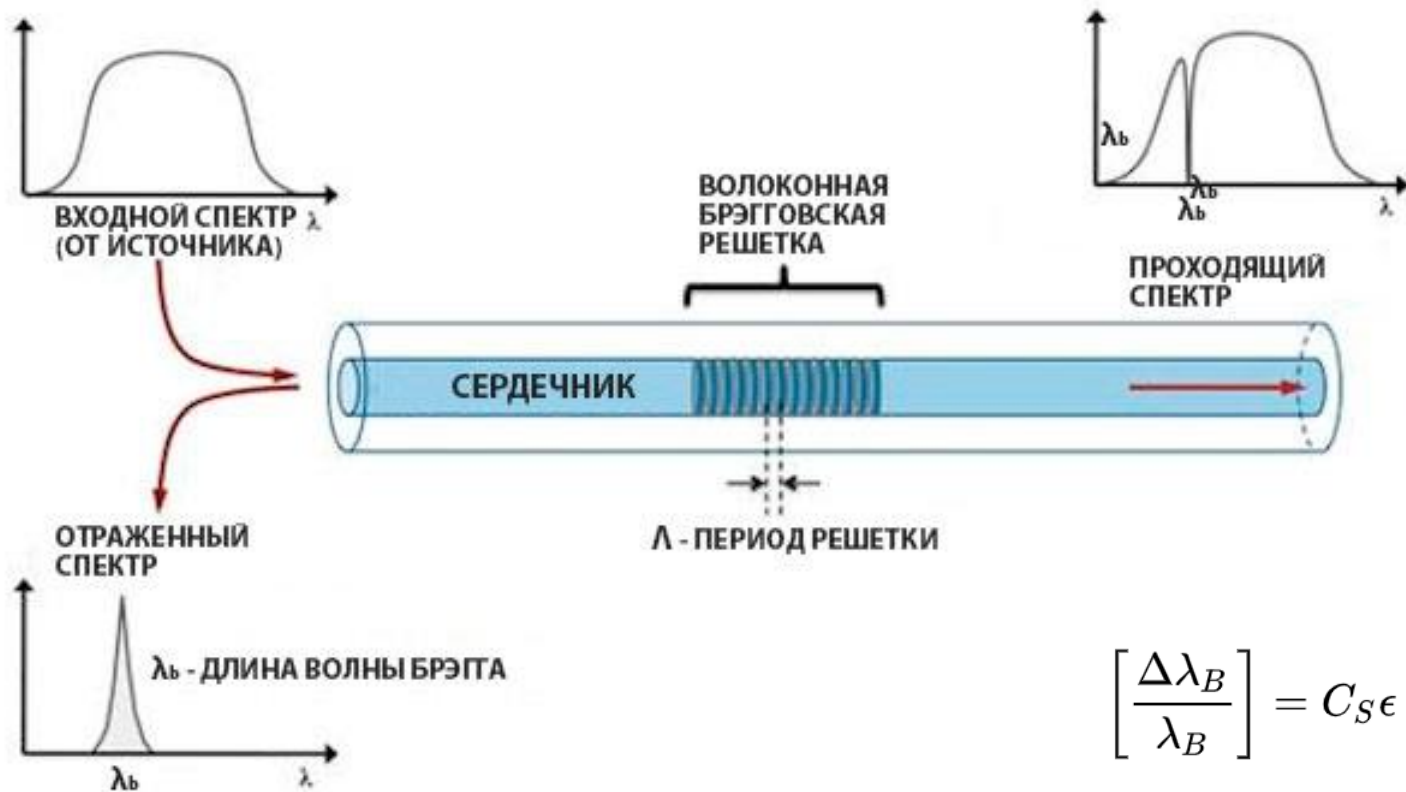
$$k_i \cdot 2\Lambda_i = 2\pi \Rightarrow \Lambda_i = \lambda_i / 2n_{bg}$$



$$\tau_{умн} \approx 10 \text{ пс}$$

$$\frac{\tau_{хром}}{l} \approx 1 \frac{\text{пс}}{\text{км}}$$

Биомеханика



$$\left[\frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} \right] = C_S \epsilon + C_T \Delta T$$

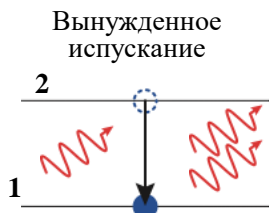
Применение: биомеханика
(протезы, экзоскелеты)

Принцип работы лазера

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

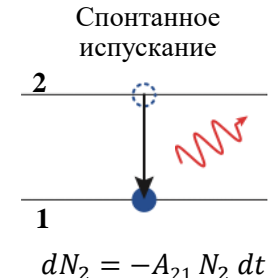
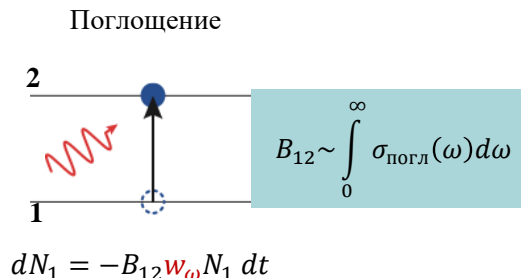
«усиление света посредством вынужденного излучения»

LASER – процесс! Более корректный термин используется в русском языке – ОКГ (оптический квантовый генератор)

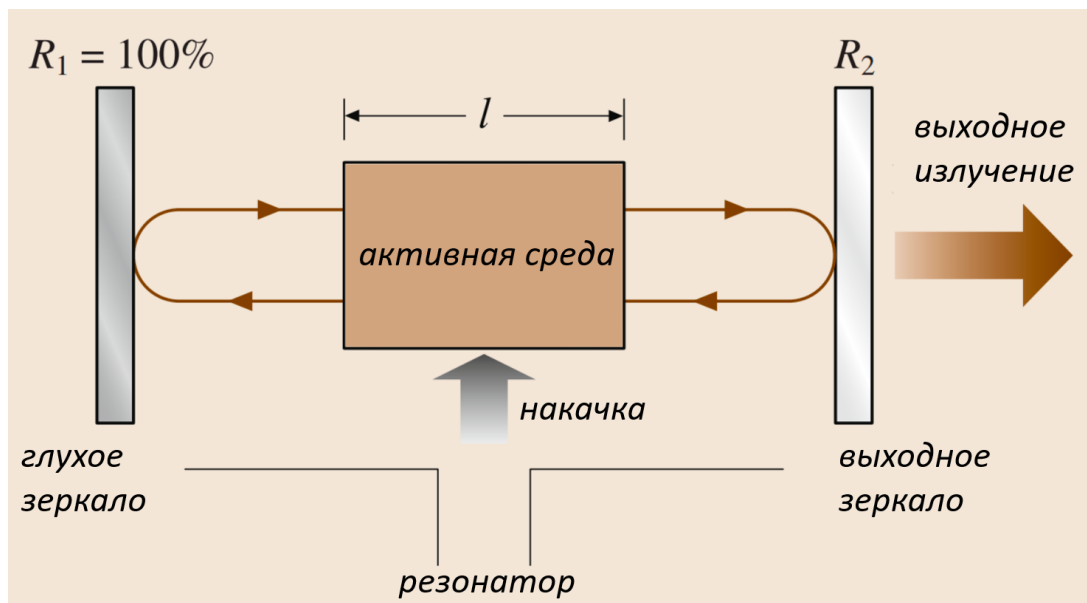


$$dN_2 = -B_{21} w_\omega N_2 dt$$

$$B_{21} \sim \int_0^\infty \sigma_{\text{эмис}}(\omega) d\omega$$



$\sigma_{\text{эмис}}$ – сечение вынужденных переходов
 $\Delta N = N_2 - N_1$ – инверсия населённостей

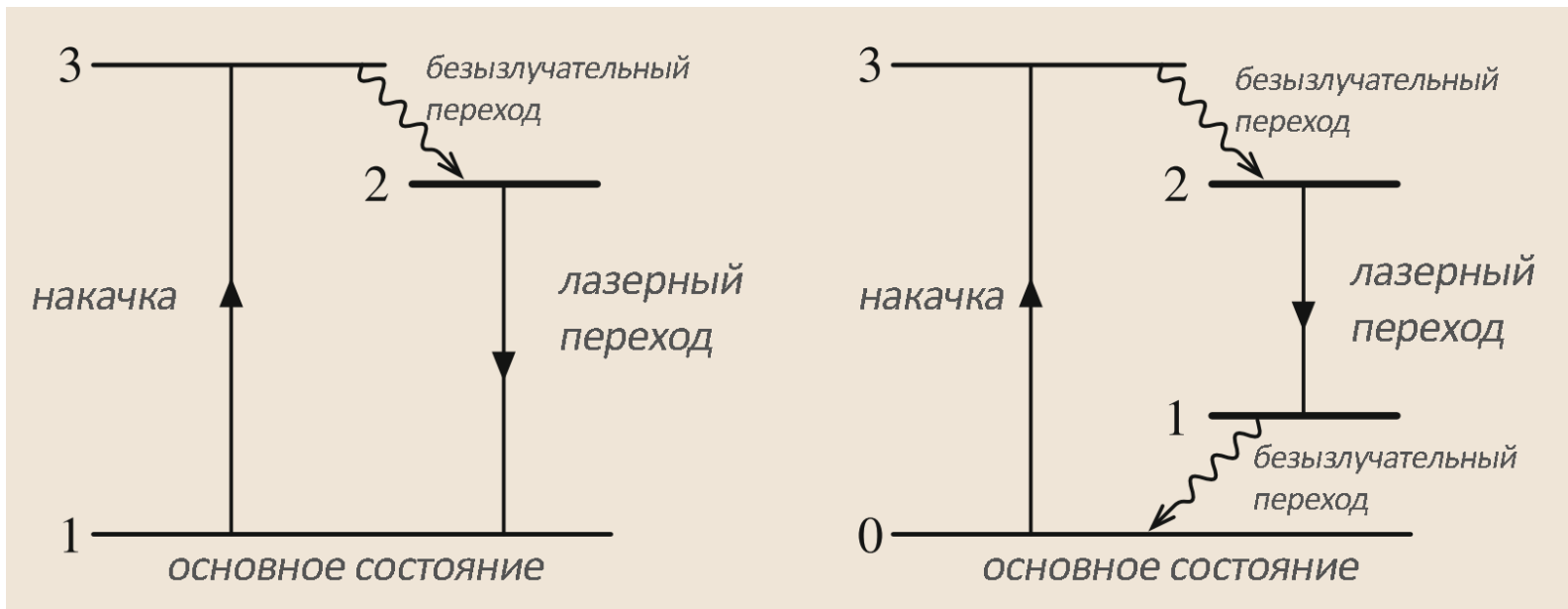


- Лазер – усиление затравочных фотонов
- Инверсия населённостей
- Активная среда, накачка, резонатор

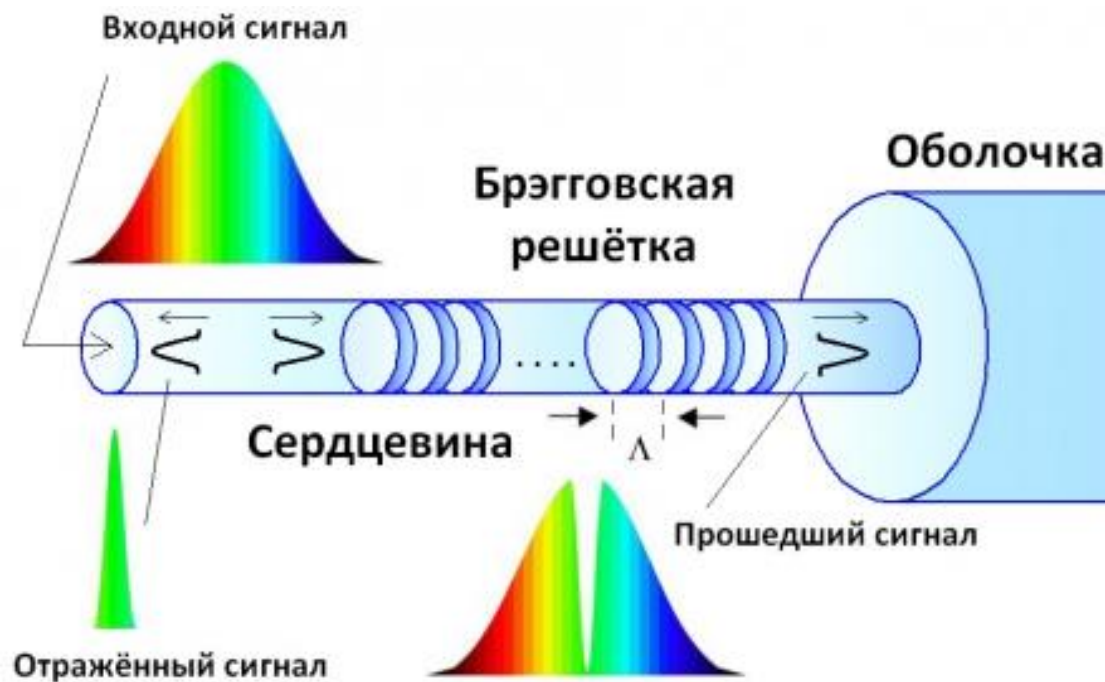
$$I = I_0 e^{\sigma_{\text{эмис}} l \Delta N}$$

Принцип работы лазера

Трёх- и четырёхуровневая схемы



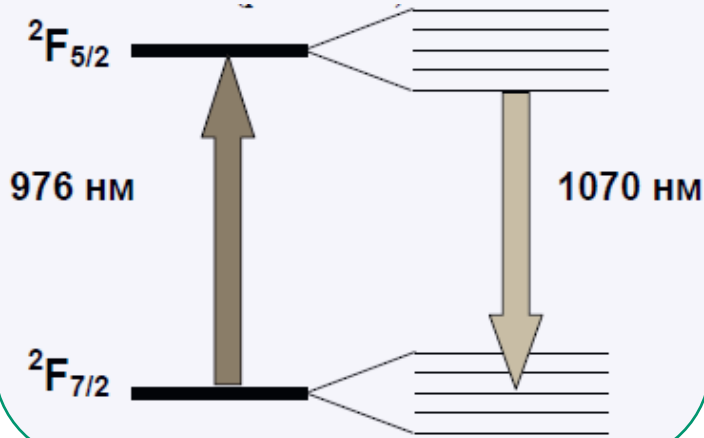
Волоконная решётка Брэгга (FBG – Fibre Bragg Grating) (DBG – Distributed Bragg Reflector)



$$2\Lambda = \frac{\lambda}{n}$$

Эрбиевые (Er) и иттербиевые (Yb) волоконные лазеры

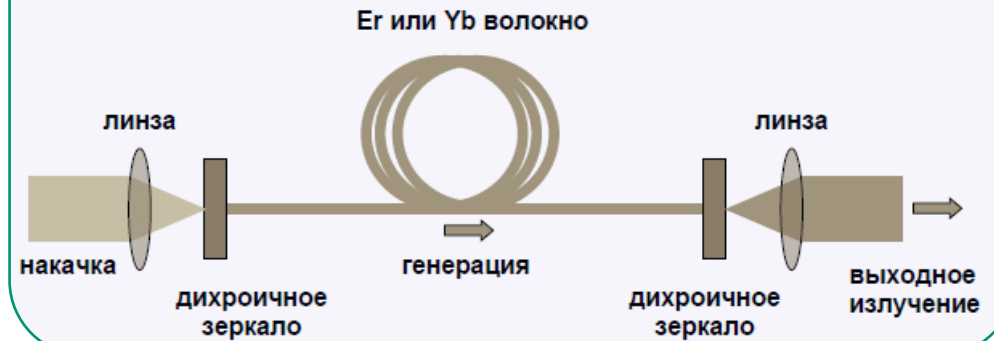
Четырёхуровневая схема активации ионов иттербия



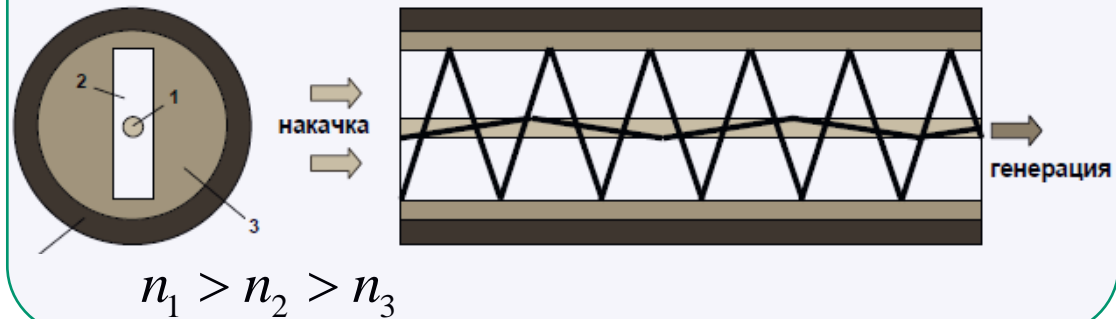
Современная схема волоконного лазера



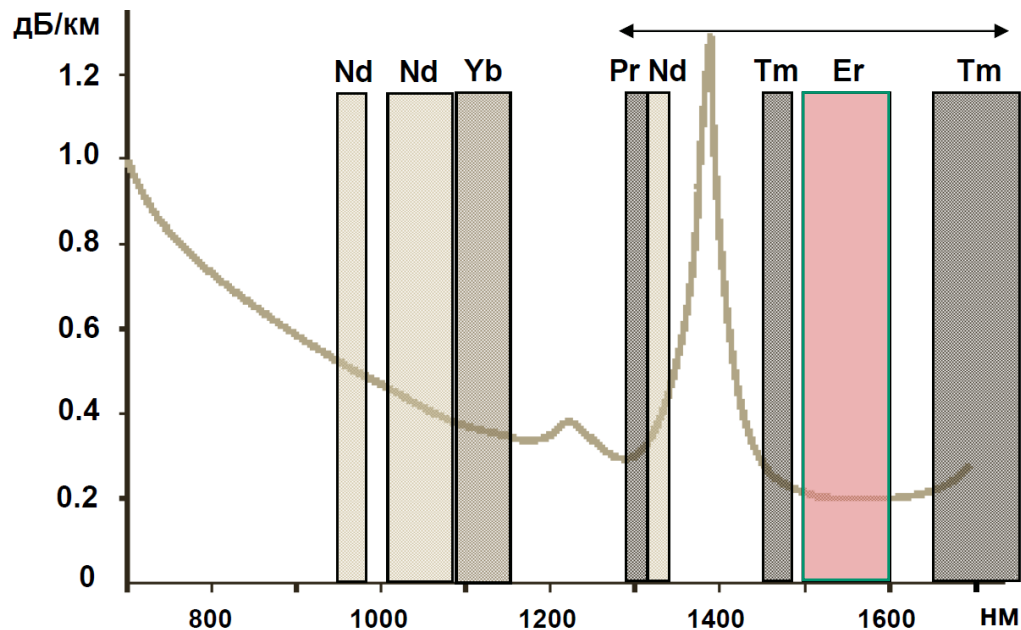
Первая схема волоконного лазера



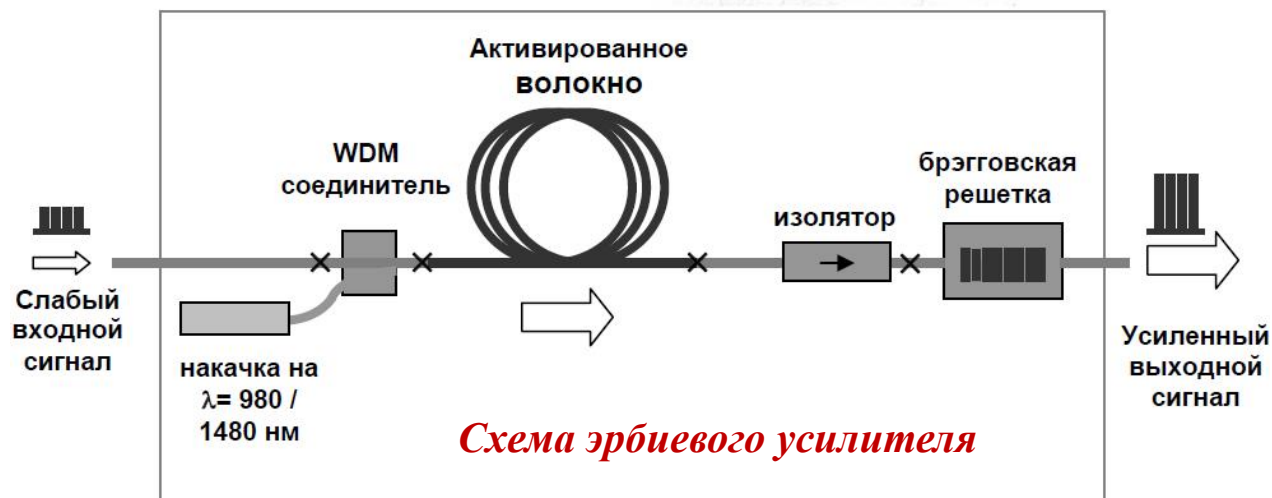
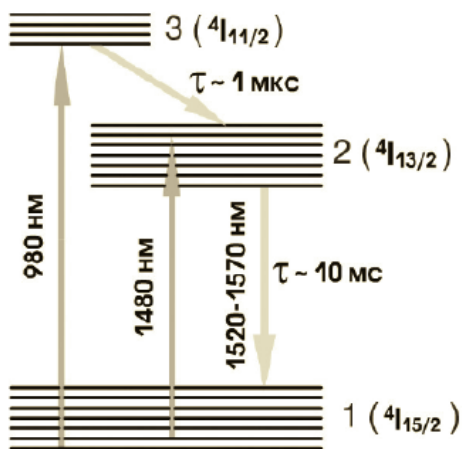
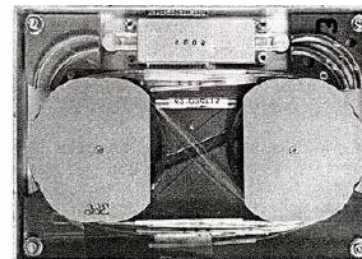
Двойная оболочка (Double cladding)



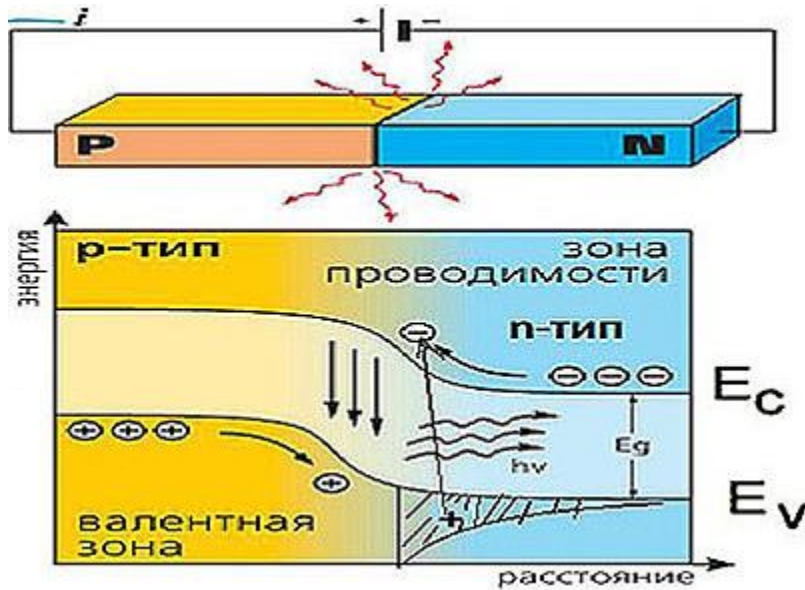
Эрбиевые усилители в волоконных линиях телекоммуникаций



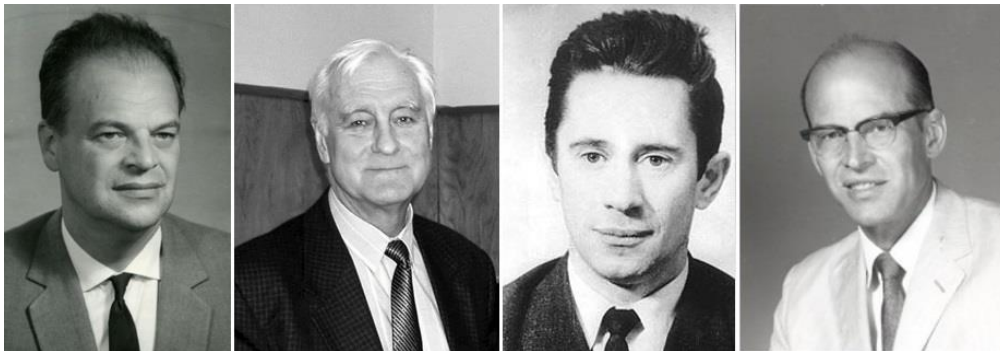
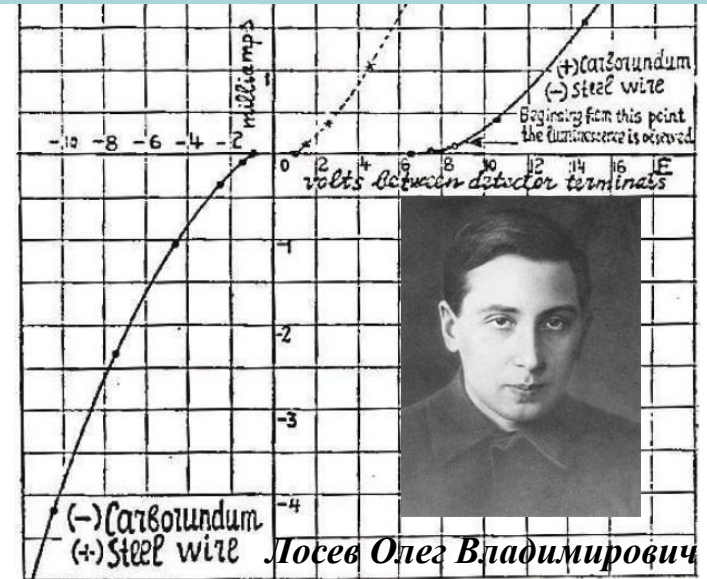
EDFA (Erbium doped fiber amplifier) – эффективны в области **1,5-1,6 мкм**, что соответствует рабочему окну с минимумом потерь в линии (0,2 Дб/км). На 100 км интенсивность сигнала уменьшается в 100 раз.



Полупроводниковый лазер



ВАХ светодиода на карбиде кремния (SiC)



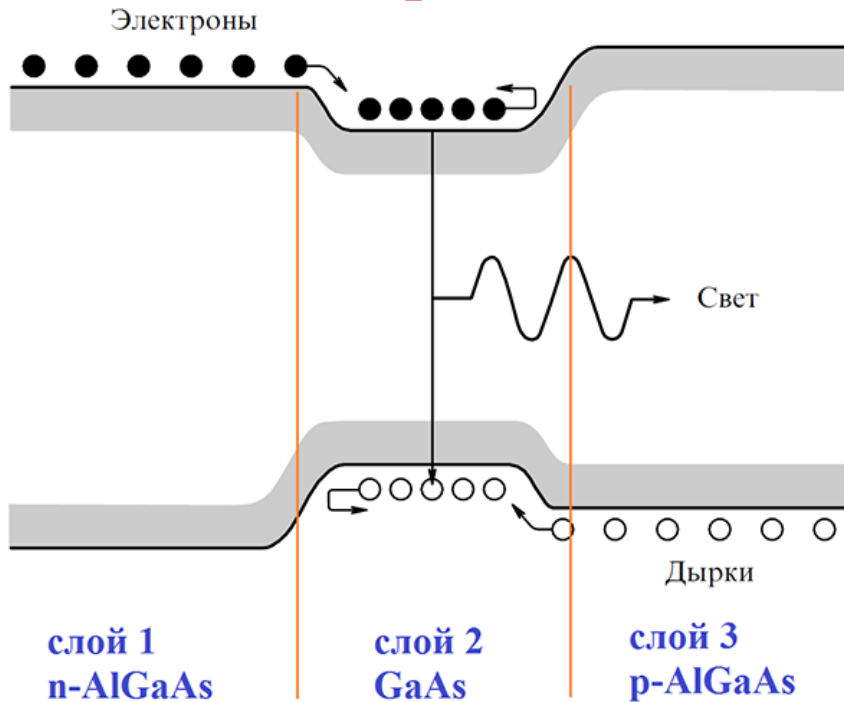
Николай Басов, Олег Крохин, Юрий Попов, Роберт Холл

Первые полупроводниковые светодиоды продемонстрированы в 1962 г.: ИК диод на GaAs – Жаком Панковым из RCA; красный диод на GaAsP – Ником Холоньяком из General Electric.

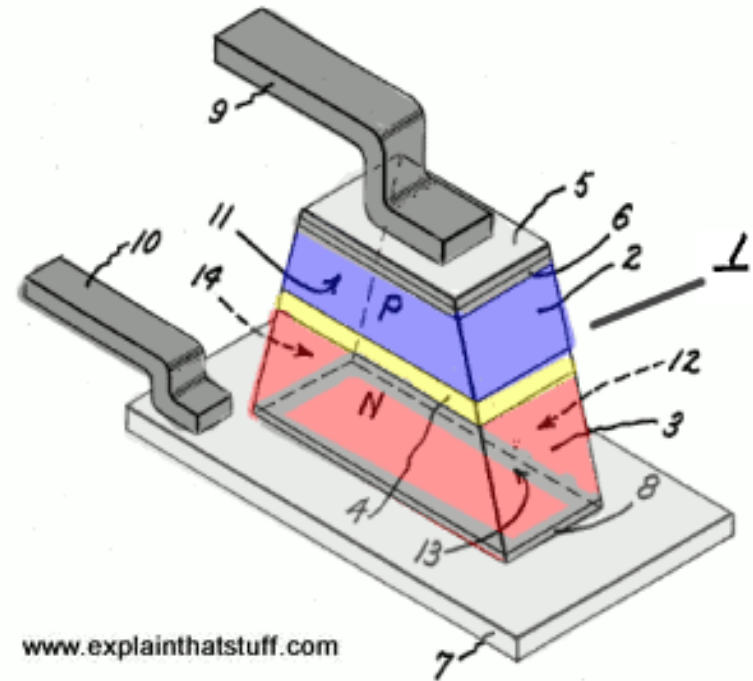
1962 г. – прорывной год для оптоэлектроники, сделан GaAs лазер в ФИАНе

Двойная гетероструктура (ДГС) (Ж.И. Алфёров, Р.Ф. Казаринов из ФТИ им. Иоффе)

**Снижение
рабочего тока
на порядки!**

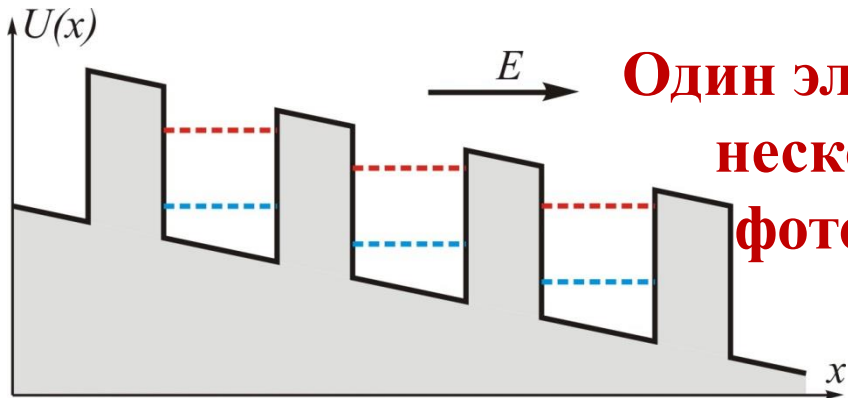
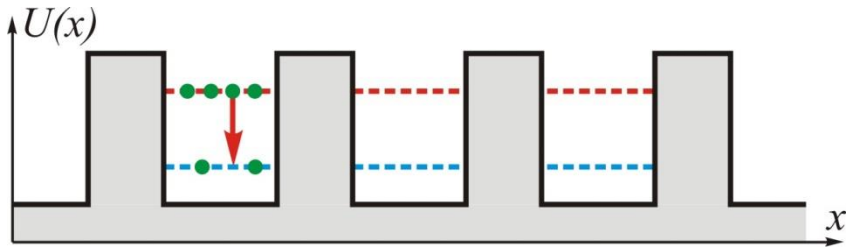


April 5, 1966 R. N. HALL 3,245,002
STIMULATED EMISSION SEMICONDUCTOR DEVICES

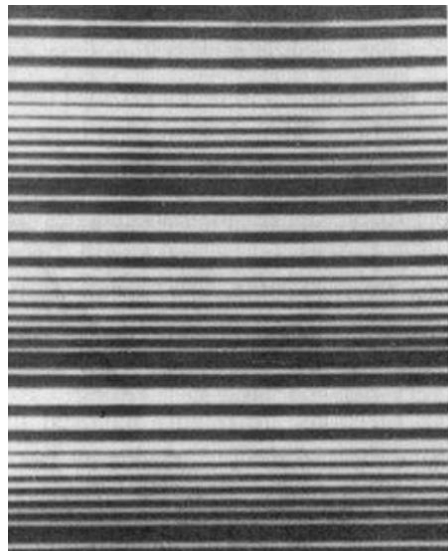
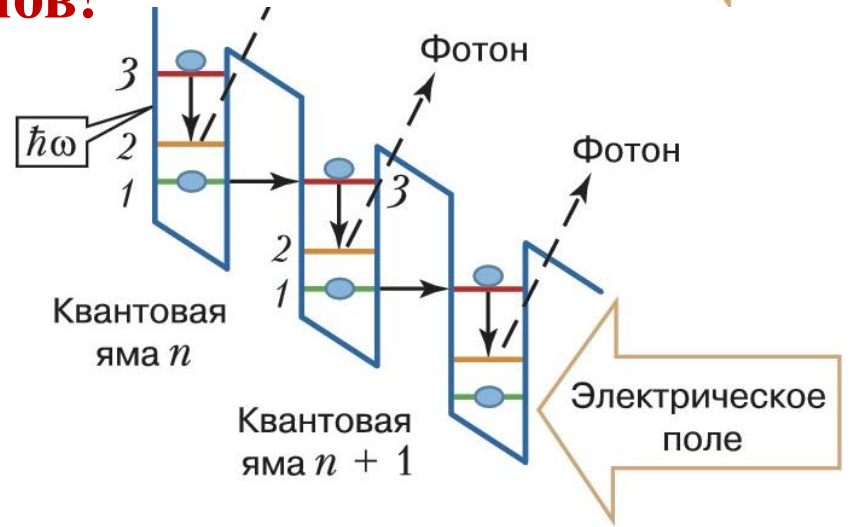
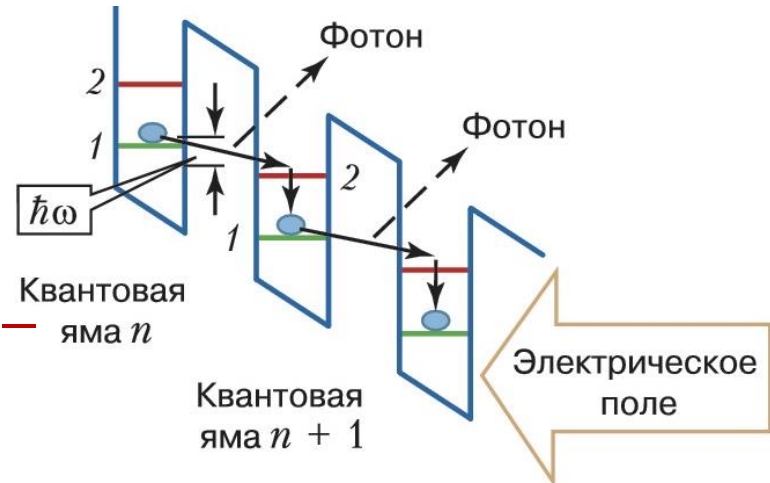


Лазерное излучение рождается в активном (жёлтом) слое, скол которого служит зеркалом резонатора!

Квантово-каскадные лазеры (Идея – Р.Ф. Казаринов и Р.А. Сурис, 1971 г.)



**Один электрон —
несколько
фотонов!**



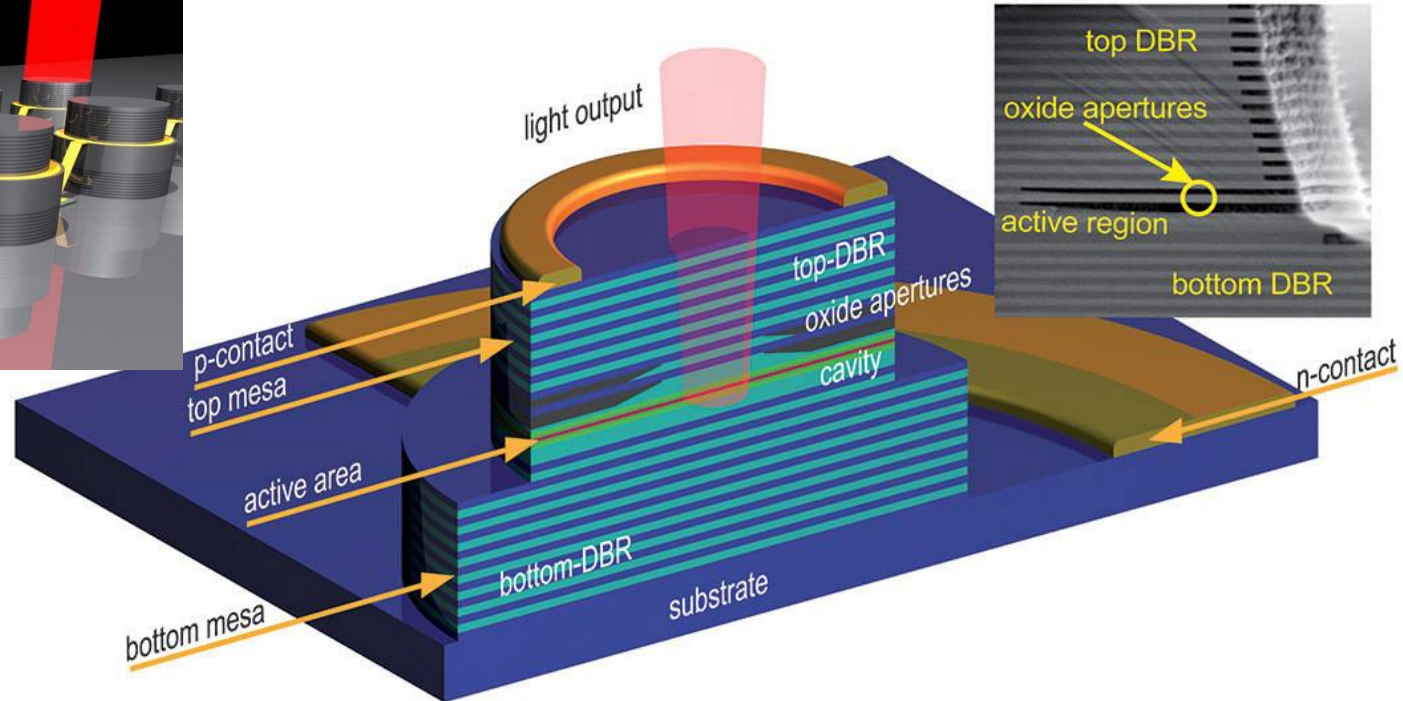
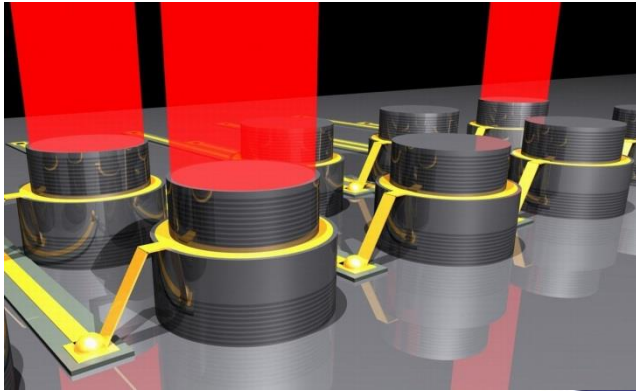
GaInAs Wells (Å)	AlInAs Barriers (Å)
8	35
35	30
28	30
Digital Grading	

$\lambda = 2,6-24 \text{ мкм},$
 $67-250 \text{ мкм}$

Впервые удалось Федерико Капассо и коллегам из AT&T в 1994 году!

Виксель (VCSEL)

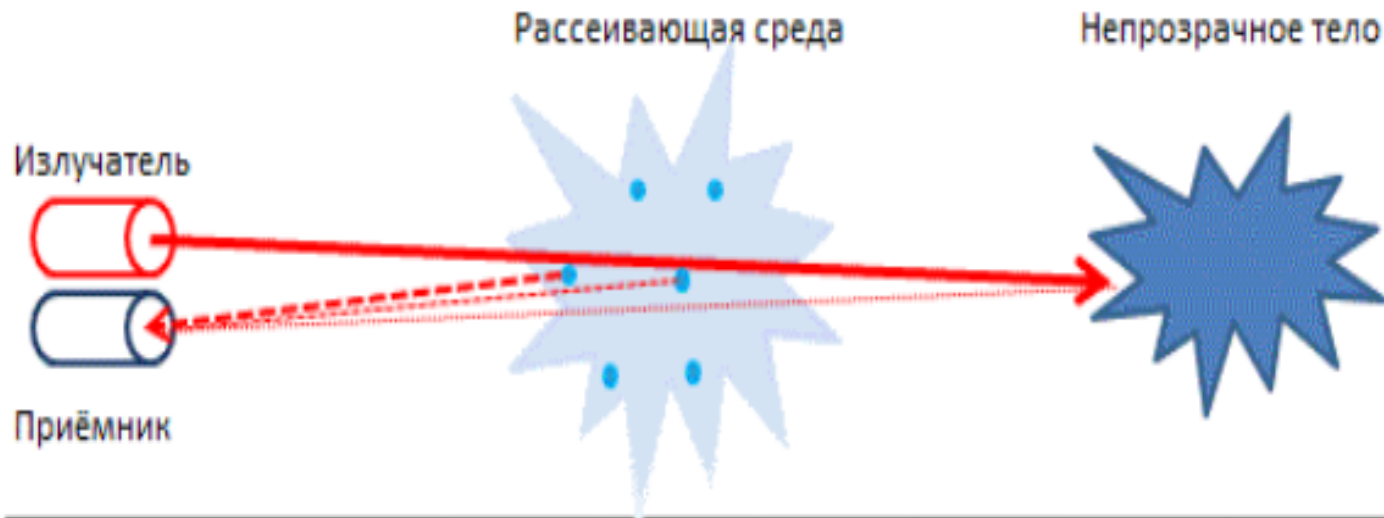
Vertical Cavity Surface Emitting Laser (Кеничи
Ига, Токио, 1977)



- ✓ низкий рабочий ток
- ✓ высокое быстродействие
- ✓ изготовление зеркал и активной среды за один этап техпроцесса
- ✓ создание матрицы диодов на одном кристалле за один этап техпроцесса

Сейчас VCSEL – основа телекоммуникаций для передачи данных со скоростью 10 Гбит/с.

Принцип действия LiDAR (Light Detection And Ranging)



Расстояние до цели	1 м	10 м	100 м	1 км	10 км	100 км
Время отклика	6.7 нс	67 нс	0.67 мкс	6.7 мкс	67 мкс	0.67 мс

Принцип действия LiDAR (Light Detection And Ranging)

Последовательность действий

- ✓ Стреляем лазерным импульсом
- ✓ Ждём детектирования рассеянного сигнала
- ✓ Измеряем время между излучением и детектированием (τ)
- ✓ Рассчитываем расстояние (R)
- ✓ Проводим геолокацию
- ✓ Обработываем данные

Показатель преломления воздуха зависит от температуры, давления и влажности.

$$\langle n \rangle = 1,0002646$$

$$\tau = 6563,7 \text{ нс}$$

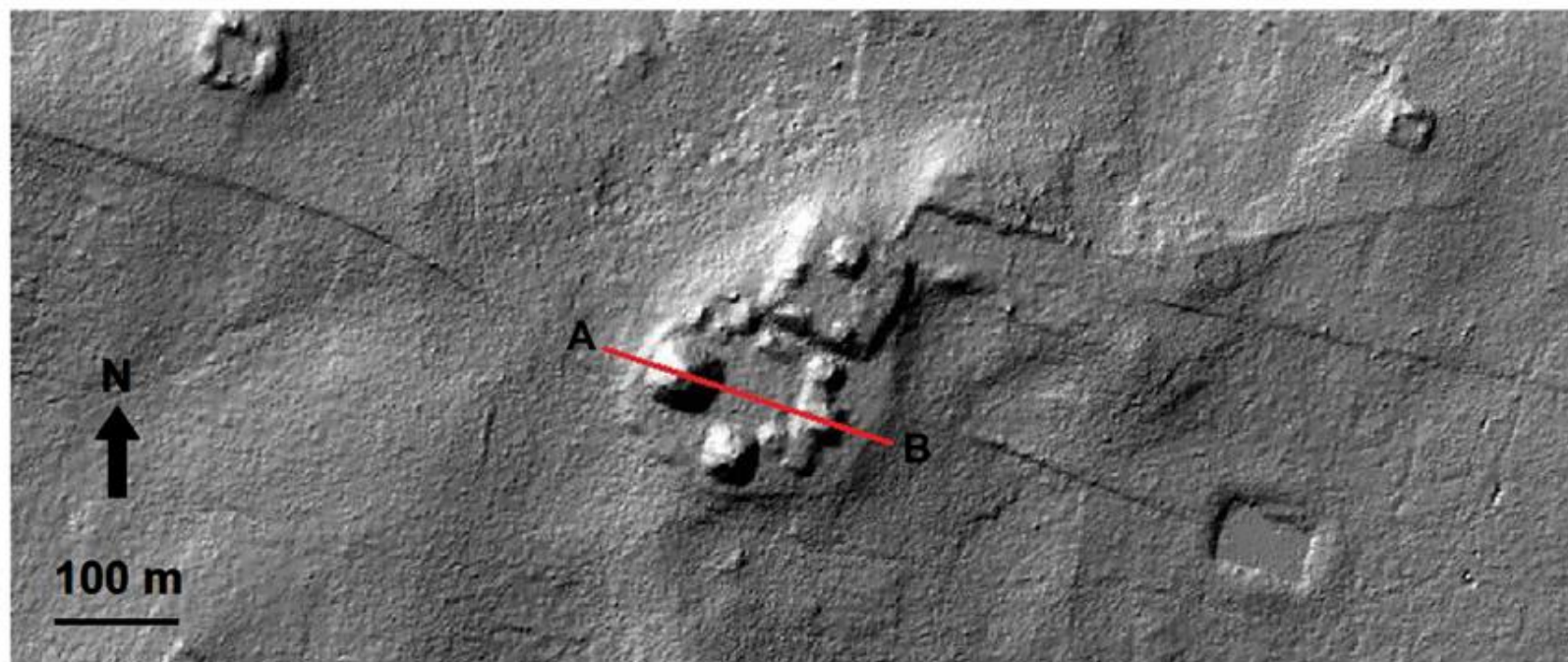
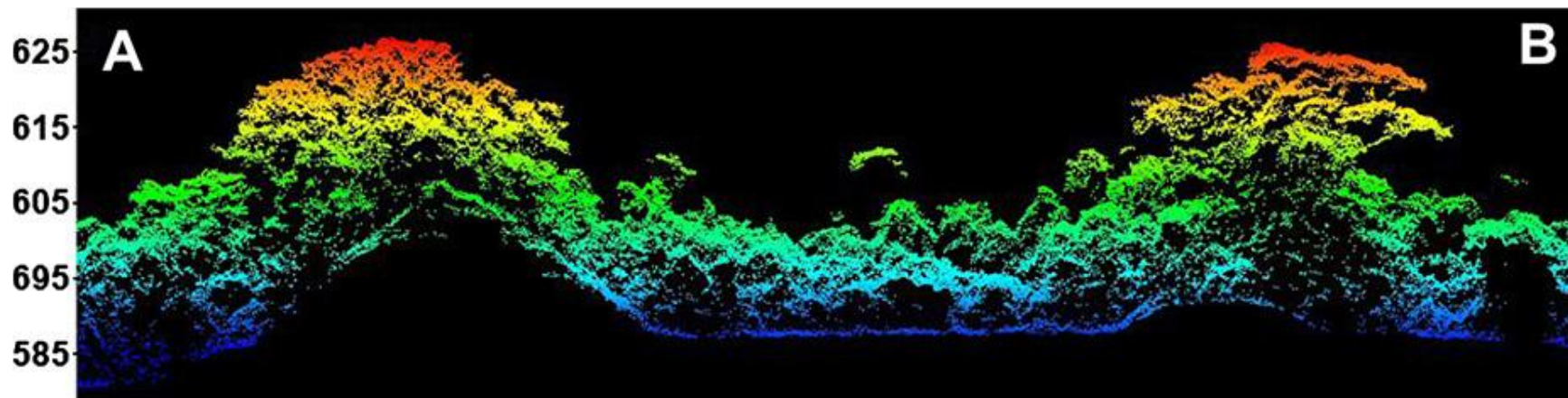
$$c = 299\,792\,458 \text{ м/с}$$

$$R = \frac{c}{n} \cdot \frac{\tau}{2} = 983,61 \text{ м}$$

Разрешение метода ΔR определяется длительностью лазерного импульса $\Delta \tau$

$$\Delta R = \frac{c}{n} \cdot \frac{\Delta \tau}{2} = 1,5 \text{ м}$$

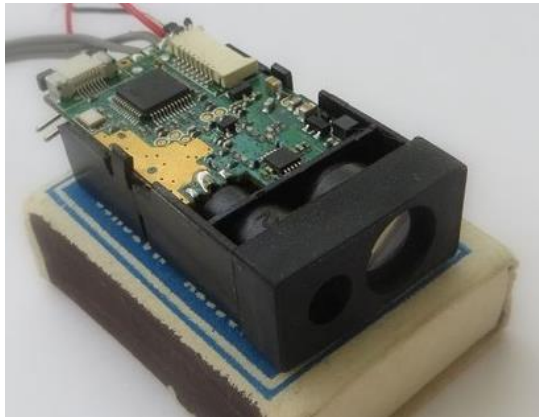
Возможности исследования культуры Майя с помощью LiDAR



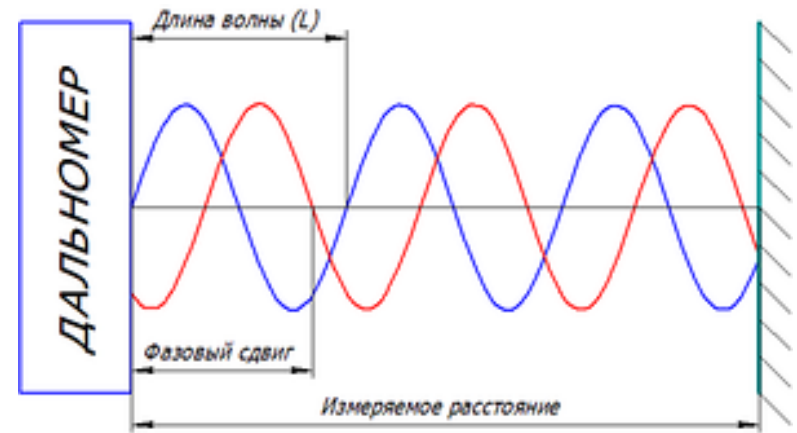
LiDAR Cross-Section of the tree canopy and mounds at the Cahal Pichik Terminus.

Arlen F. Chase et al. PNAS 2012;109:32:12916-12921

Лазерная рулетка



В основном используется фазовый, а не импульсный метод измерения расстояния.



В фазовом методе непрерывное лазерное излучение (500-1100 нм) амплитудно-модулируется сигналом заданной частоты ($f < 500$ МГц). Фаза отражённого излучения сравнивается с фазой исходного сигнала.

Расстояние определяется по формуле:

$$2kD = \varphi \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 2D = \lambda \cdot \frac{\varphi}{2\pi} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow D = \frac{c}{2f} \cdot \frac{\varphi}{2\pi}$$

$$D \approx \frac{3 \cdot 10^8}{2 \cdot 150 \cdot 10^6} \cdot \frac{\pi}{2\pi \cdot 180} \approx 3 \text{ мм}$$

