

Источники Лазерного Излучения

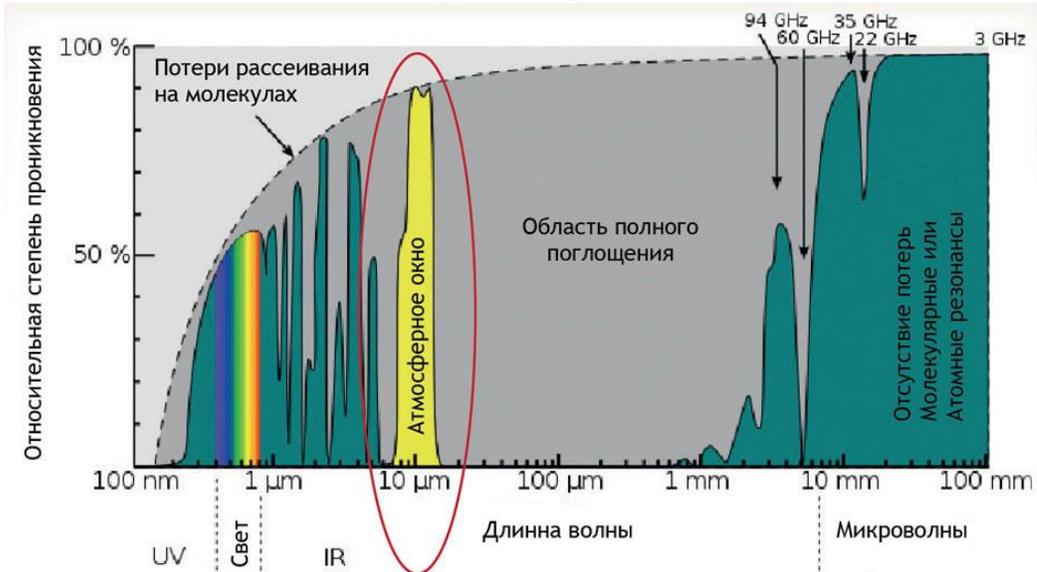
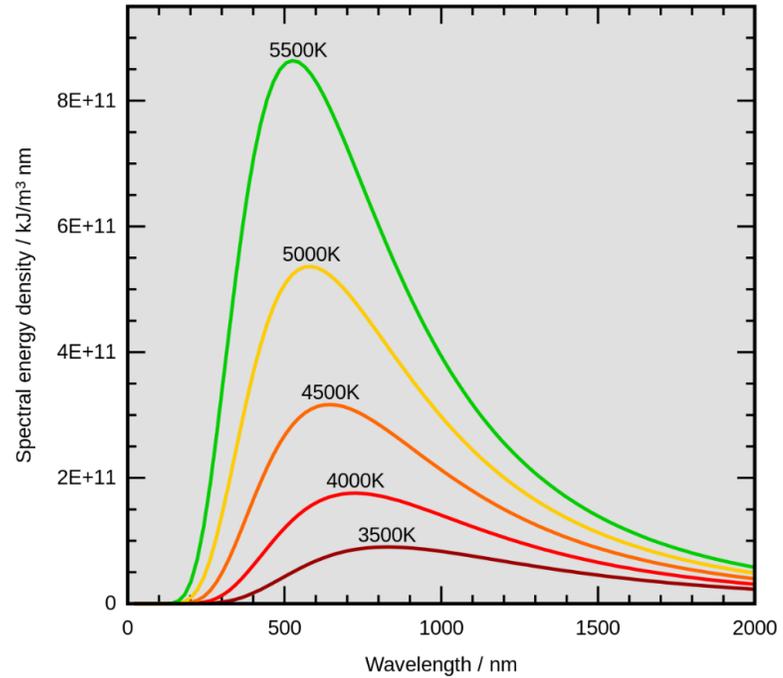
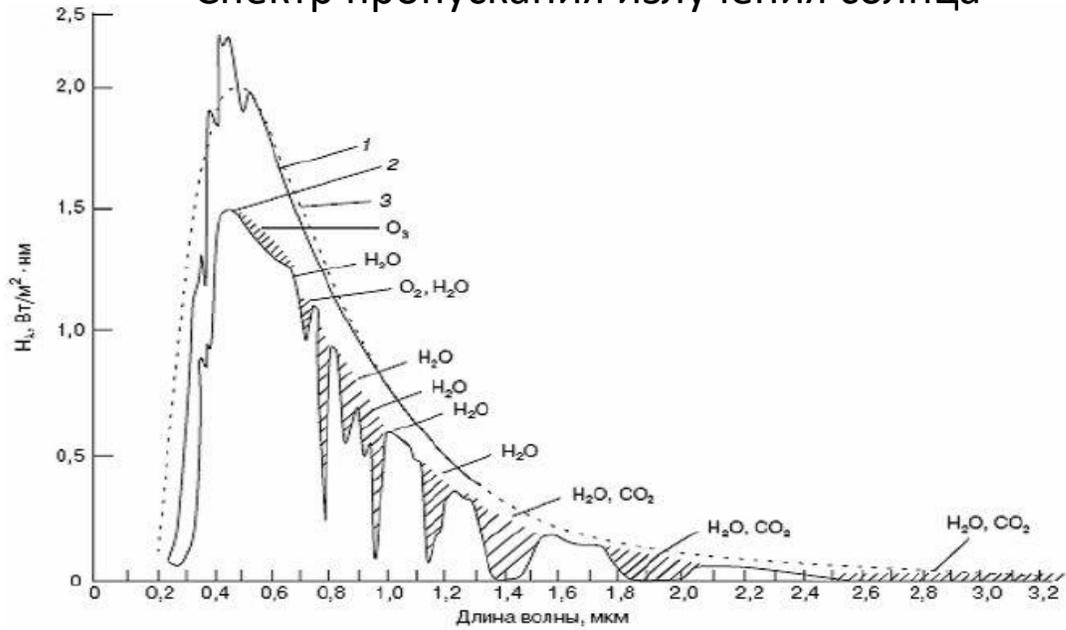
ЛАЗЕР,

LASER, *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* — «усиление света посредством вынужденного излучения»

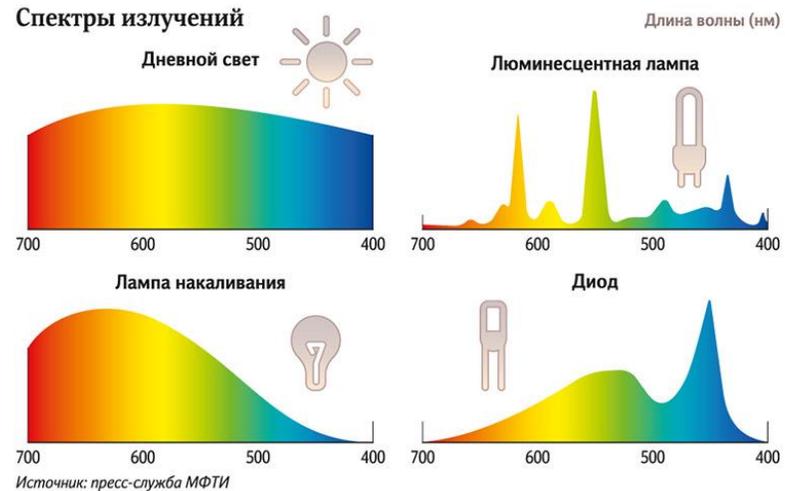
16 мая 1960 г.- запущен первый в мире ОПТИЧЕСКИЙ квантовый генератор – лазер на кристалле рубина $\lambda=694,3$ нм.

Световые источники

Спектр пропускания излучения солнца



Спектры излучений



- Лампы накаливания
- Газоразрядные лампы
- Диоды
- Лазеры

Поглощение с участием электронных уровней

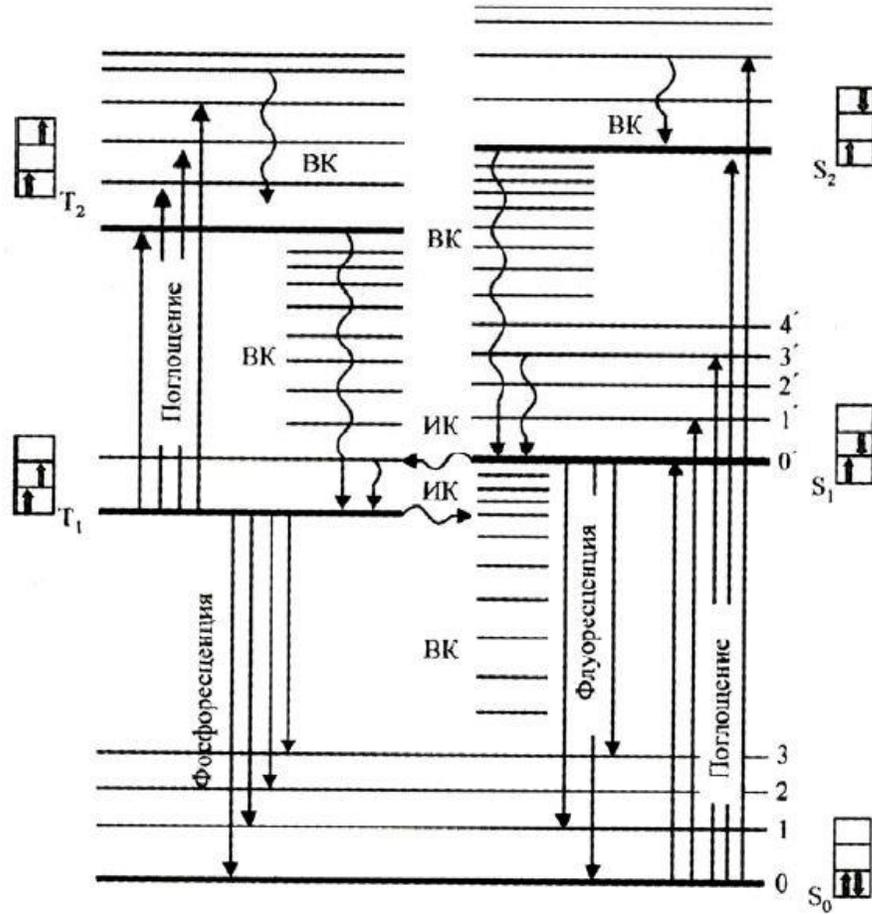
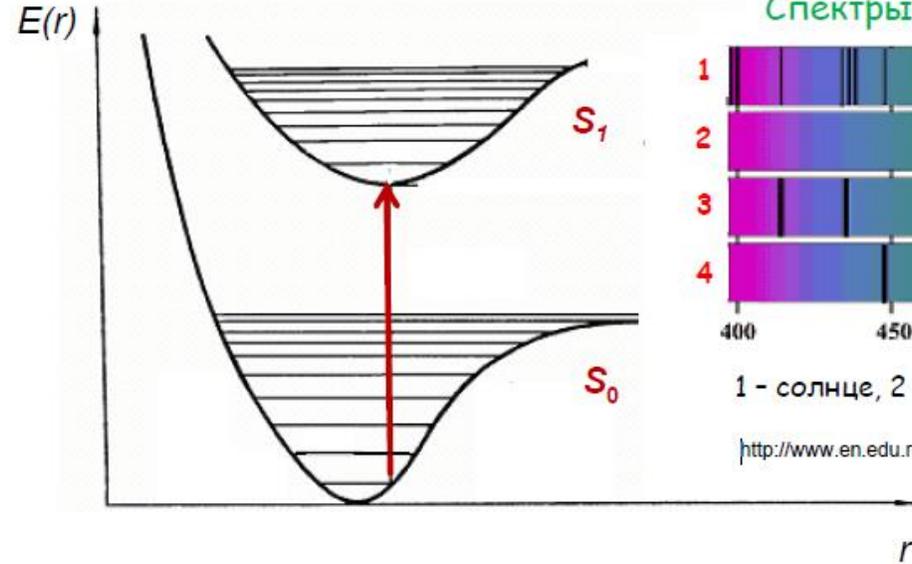
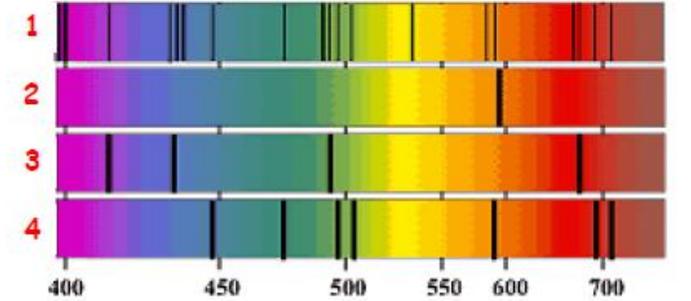


Схема Яблонского энергетических уровней молекул с сопряженными связями

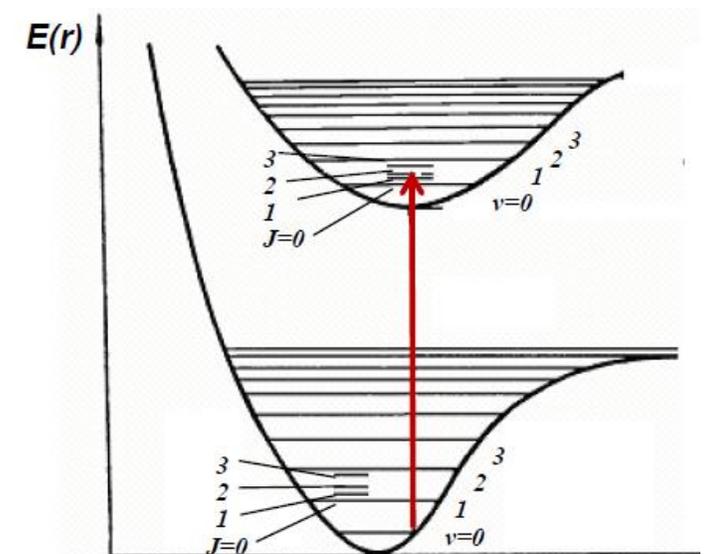
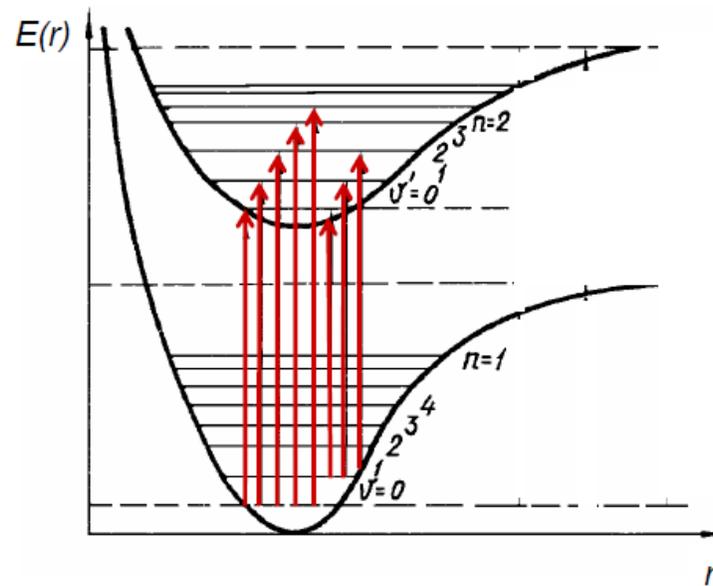


Спектры поглощения атомов



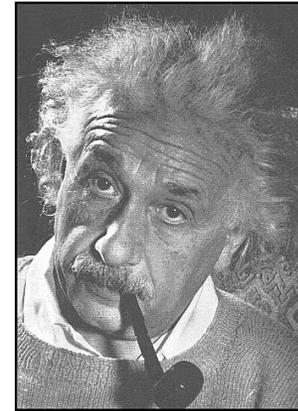
1 - солнце, 2 - натрий, 3 - водород, 4 - гелий

<http://www.en.edu.ru/publications/general/3134?catalogueId=513>



Список научных идей и событий

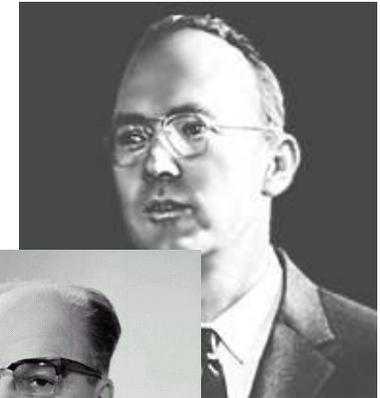
- 1900 г. М. Планк-Гипотеза о квантах излучения
- 1913 г. Н. Бор-Квантовая природа спектра излучения
- 1917 г. А. Эйнштейн-Выдвинута гипотеза о существовании вынужденного излучения
- 30-е годы Р. Ладенбург-Первые попытки экспериментального обнаружения стимулированного излучения в газовом разряде
- 1940 г. В.А. Фабрикант-Сформулированы условия экспериментального обнаружения стимулированного излучения в газовом разряде.
- 1950 г. Е. Парсел, Р. Паунд-Экспериментальное получение стимулированного излучения при инверсии ядерных спинов.
- 1951 г. В.А. Фабрикант, М.М. Вудынский, Ф.А. Бутаева-Зарегистрировано авторское свидетельство на способ усиления электромагнитного излучения с помощью стимулированного излучения.
- 1953-1954 г. Н.Н. Басов, А.М. Прохоров, Дж. Гордон Ч. Таунс, Х. Цайгер-Создание физических принципов мазеров. Получение генерации в сантиметровом диапазоне на молекулах аммиака NH_3 ($\lambda=1,25$ см).
- 1955 г. Н.Н. Басов, А.М. Прохоров-Идеи использования трехуровневой схемы и оптической накачки для получения инверсии
- 1957г. Н.Н. Басов-Предложение о создании лазера на полупроводниках
- 1960 г. Т. Мейман-Лазер на рубине
Джаван, Беннет, Эриот-Гелий-неоновый лазер
- 1964 г. Н.Н. Басов, А.М. Прохоров, Ч.Таунс-Нобелевская премия за «основополагающие работы в области квантовой радиофизики, которые привели к созданию генераторов и усилителей в радио и оптическом диапазоне длин волн (мазеров и лазеров)»



А. Эйнштейн



Н. Бор



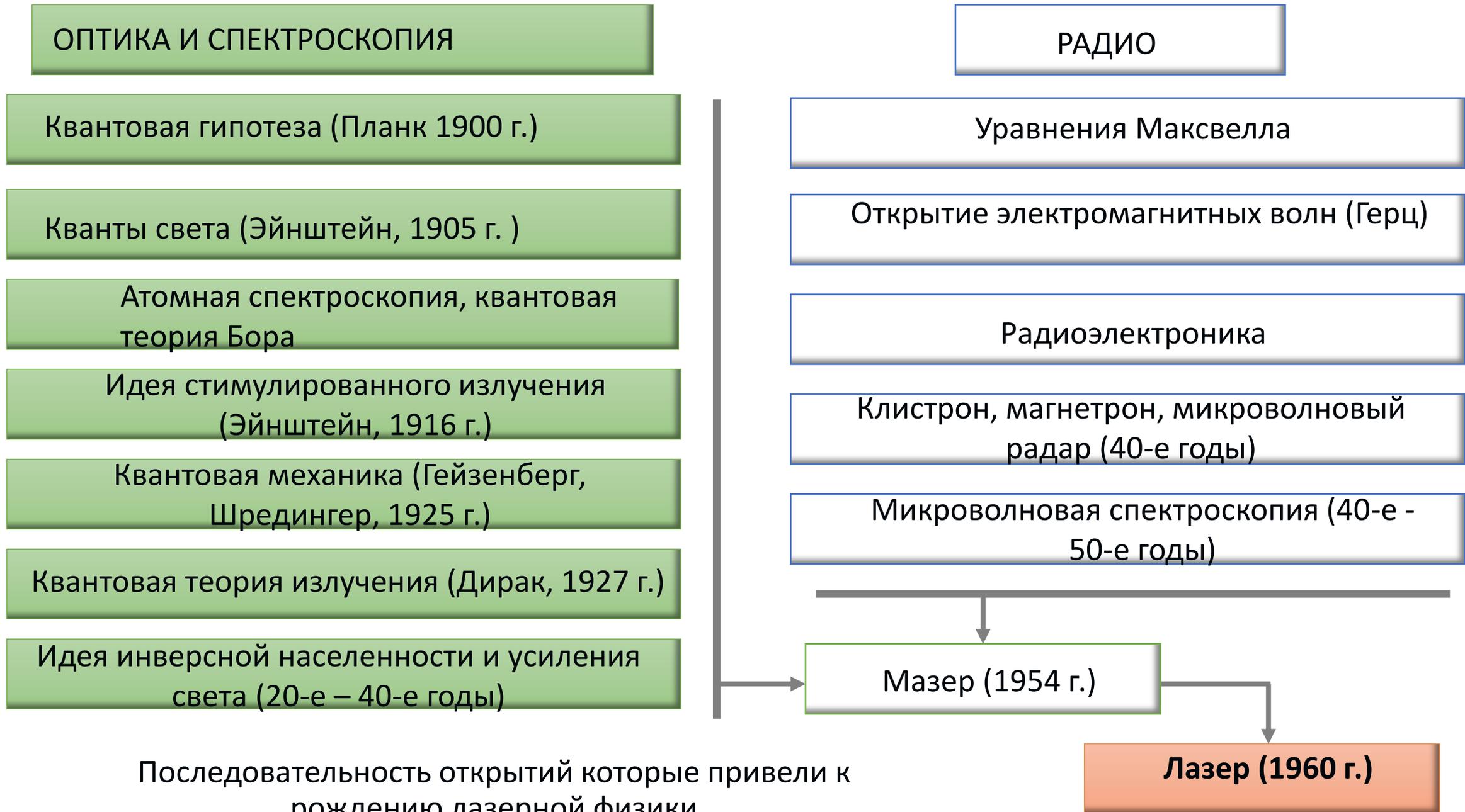
Ч.Х. Таунс



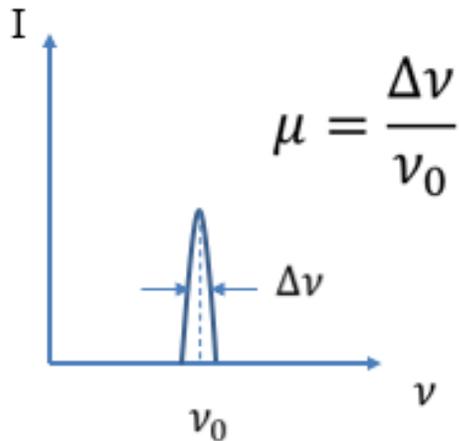
Н.Г. Басов

А.М. Прохоров

ИЗ ИСТОРИИ ЛАЗЕРНОЙ ФИЗИКИ



Степень монохроматичности



$\mu \ll 1$ – квазимонохроматичное излучение

$\lambda = 500 \text{ нм} \rightarrow \nu_0 = 6 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$

Типичная ширина спектра одночастотного лазера $\Delta\nu = 1 \text{ МГц}$

Достигнутая ширина спектра He-Ne лазера $\Delta\nu = 1 \text{ Гц}$

При этом для TiSa лазера $\lambda = 800 \text{ нм}$, $\Delta\lambda = 400 \text{ нм}$ (700-1100 нм)

$\mu \cong 10^{-9}$

$\mu \cong 10^{-15}$

$\mu \cong 0,5$

Абсорбционный фильтр $\mu = 10^{-1}$

Интерференционный фильтр $\mu = 10^{-2} - 10^{-3}$

Монохроматор $\mu = 10^{-4}$

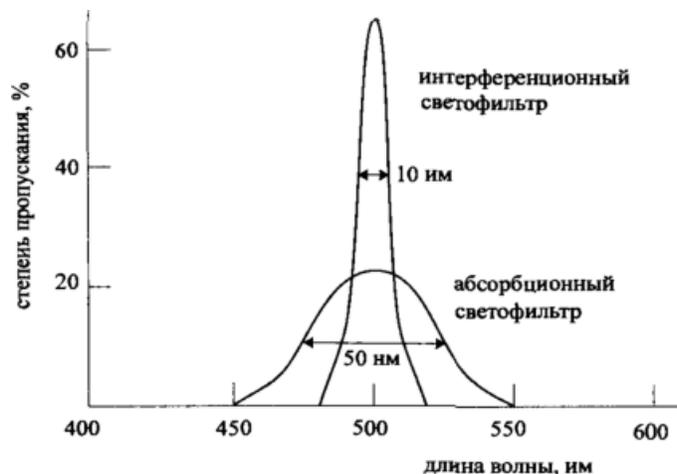
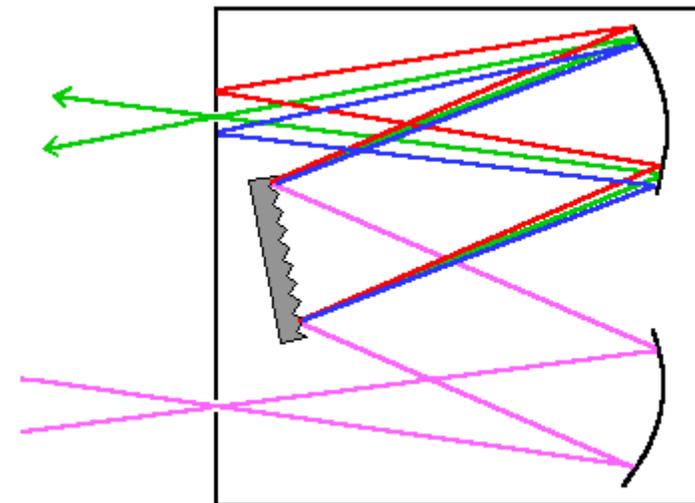
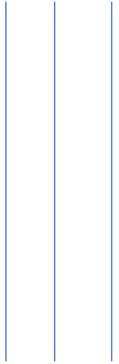


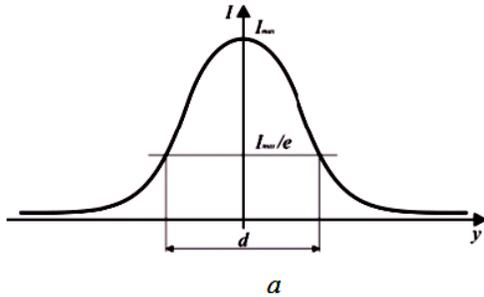
Схема Черни-Тейлора



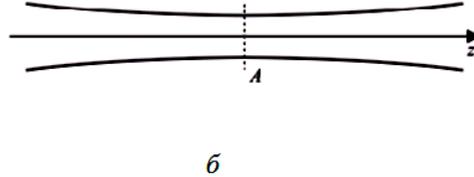
Направленность



Бесконечная в пространстве



Гауссова форма, ограниченность по сечению

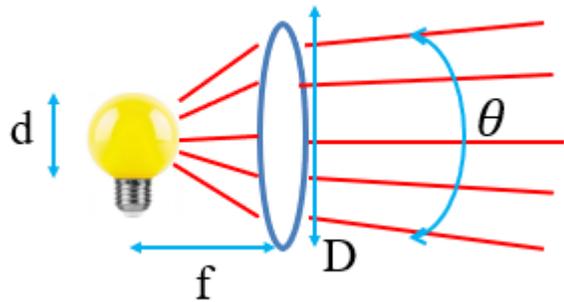


Расходимость пучка

$$\Theta = 2 \arctan\left(\frac{D_f - D_i}{2l}\right).$$

Расходимость гауссова пучка

$$\theta = \frac{\lambda}{\pi w}, \quad \omega - \text{перетяжка}$$



Расхождение $\theta \sim \frac{d}{f}$

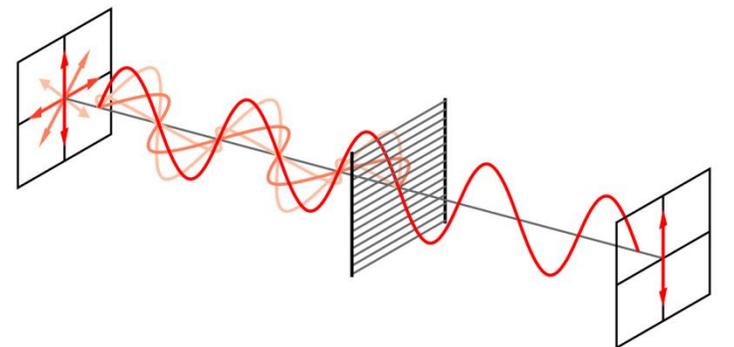
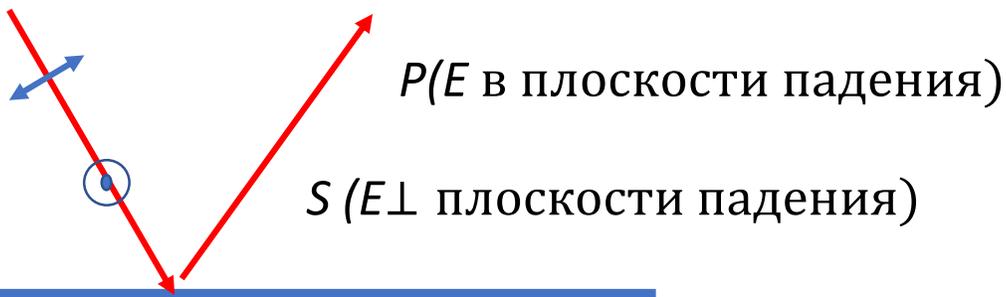
Для $d=1\text{ см}$ и $f=10\text{ см}$ $\Theta=0,1\text{ радиан} \cong 6^\circ$

Эффективность сбора $k = \frac{D^2}{16f^2}$

Для $D=10\text{ см}$ и $f=10\text{ см}$ $k=0,06$

Расходимость He-Ne лазера $10^{-3}\text{ радиан} = 0^\circ 03'$

Поляризация

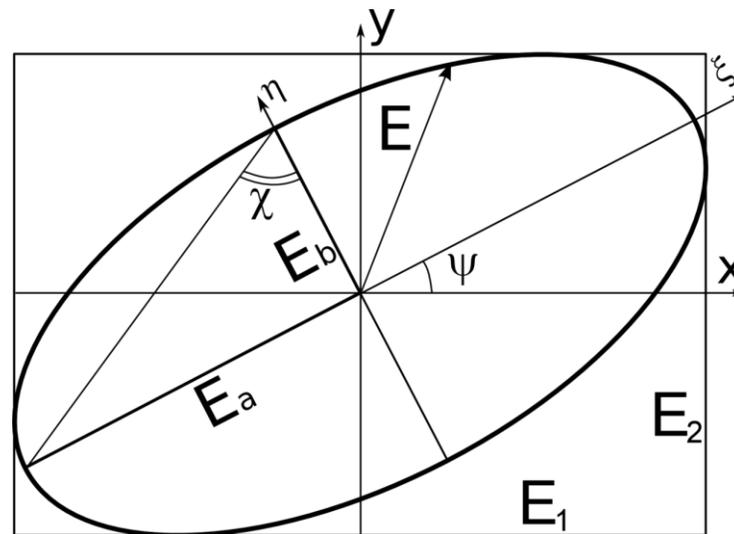


Пленка

Куб

Степень поляризации

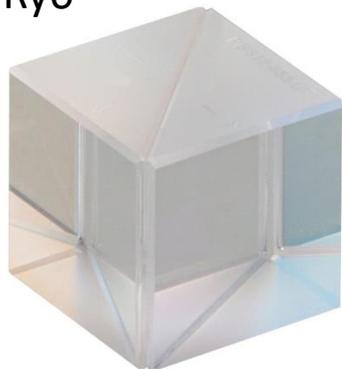
$$P = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}$$



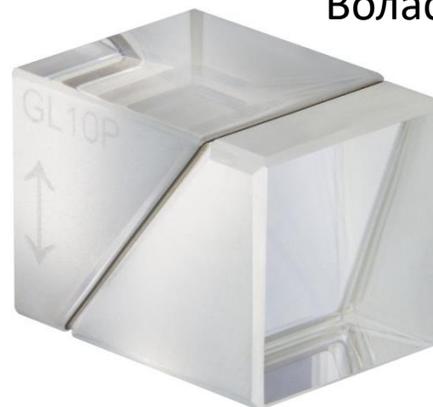
Воластон, Глан, Николя и др.



$P_{\text{дешевый}} = 10^{-2}$
 $P_{\text{дорогой}} = 10^{-5}$



$P_t = 10^{-3}$
 $P_r = 10^{-2}$



$P = 10^{-5} - 10^{-6}$

Когерентность временная

Колебания когерентны, если разность их фаз постоянна во времени, и при сложении колебаний получается колебание той же частоты.

$$G(r_1, r_2, \tau) = \langle U^*(r_1, t) \cdot U(r_2, t + \tau) \rangle = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T U^*(r_1, t) \cdot U(r_2, t + \tau) dt$$

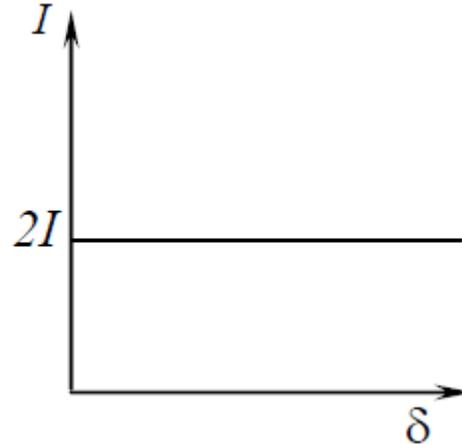
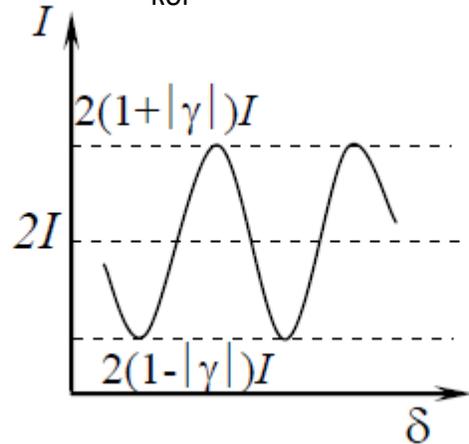
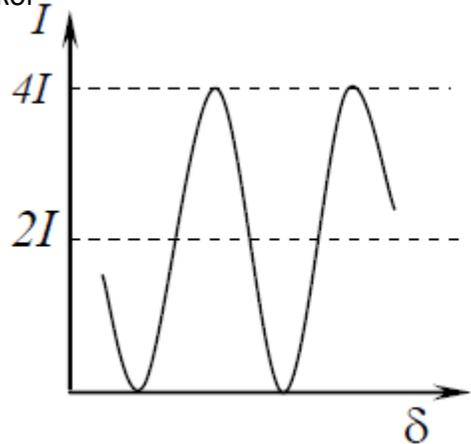
$$\gamma(r_1, r_2, \tau) = G(r_1, r_2, \tau) / G(r_1, r_2, 0) = G(r_1, r_2, \tau) / [I(r_1)I(r_2)]^{0.5}$$

$$\Delta t_{\text{ког}} = \frac{1}{\Delta \nu 2\pi} \quad l_{\text{ког}} = c * \Delta t_{\text{ког}}$$

HeNe лазер $\lambda=633\text{нм}$, $\Delta\nu=10^3\text{Гц}$ Ртутная лампа $\lambda=546\text{нм}$, $\Delta\nu=4*10^9\text{Гц}$

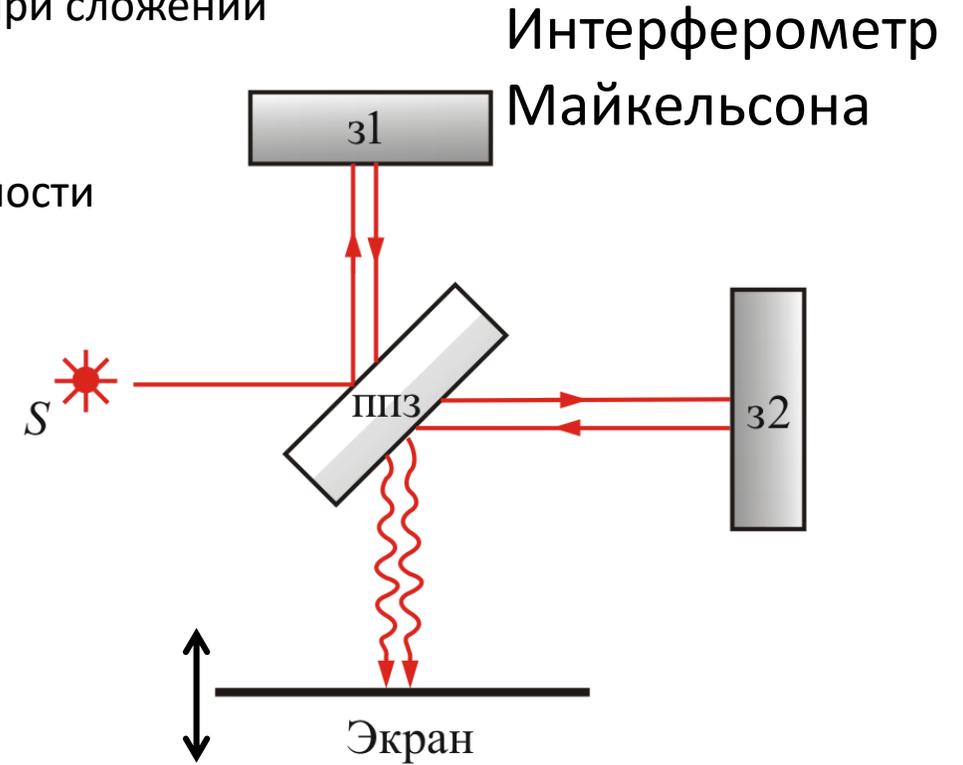
$l_{\text{ког}} = 50 \text{ км}$

$l_{\text{ког}} = 8 \text{ см}$



Степень когерентности

$$0 < |\gamma(r_1, r_2, \tau)| < 1$$



Распределение интенсивности в интерференционной картине, образованной двумя квазимонохроматическими пучками равной интенсивности I со степенью когерентности γ

Переходы между состояниями квантовой системы

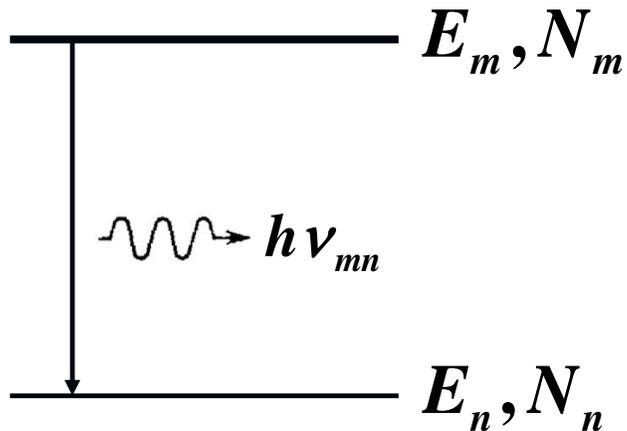
Излучательные

Безизлучательные

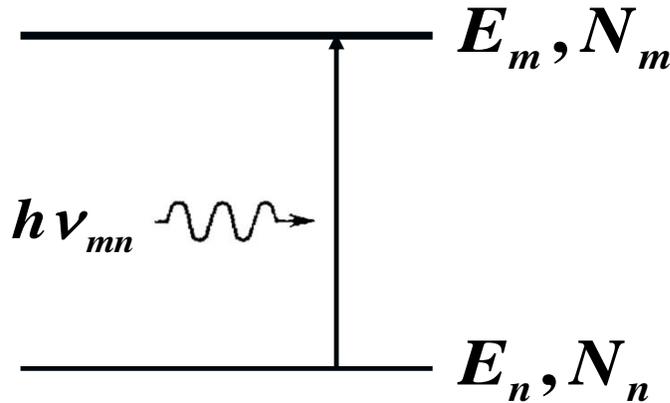
Спонтанное излучение

Вынужденное поглощение

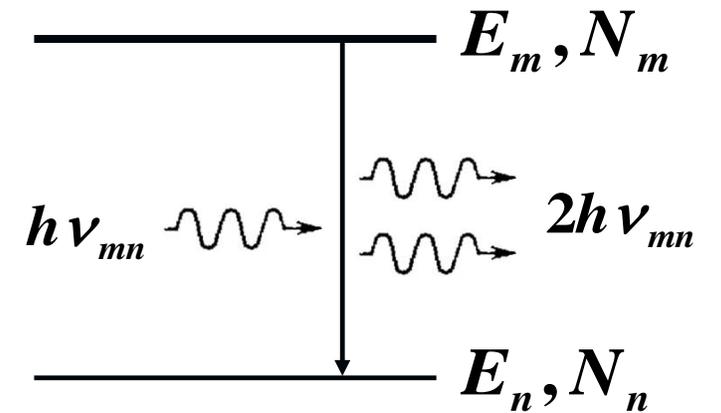
Вынужденное излучение



$$\frac{dN_m}{dt} = -A_{mn} N_m$$



$$\frac{dN_n}{dt} = -B_{nm} \rho(\nu_{nm}) N_n$$



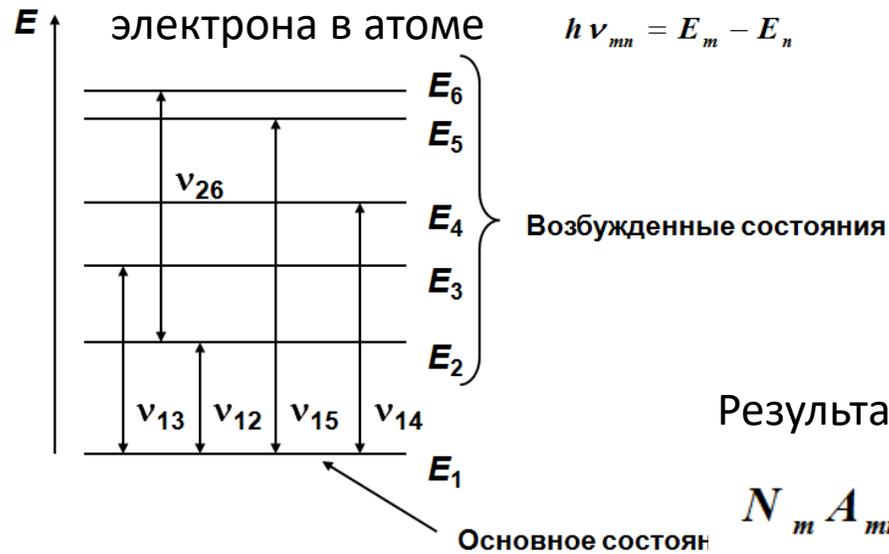
$$\frac{dN_m}{dt} = -B_{mn} \rho(\nu_{nm}) N_m$$

N_m, N_n – населенности уровней с энергиями E_m и E_n

$h\nu_{mn}$ – энергия испущенного или поглощенного фотона

Равновесие процессов

Структура уровней энергии



Населенности энергетических состояний

Соотношения между населенностями уровней в состоянии термодинамического равновесия

$$\frac{N_m}{N_n} = \frac{g_m}{g_n} \cdot \exp\left(-\frac{E_m - E_n}{kT}\right) \quad \frac{N_n}{g_n} > \frac{N_m}{g_m}$$

Результаты термодинамического вывода Эйнштейна

$$N_m A_{mn} + N_m B_{mn} \rho(\nu_{nm}) = N_n B_{nm} \rho(\nu_{nm})$$

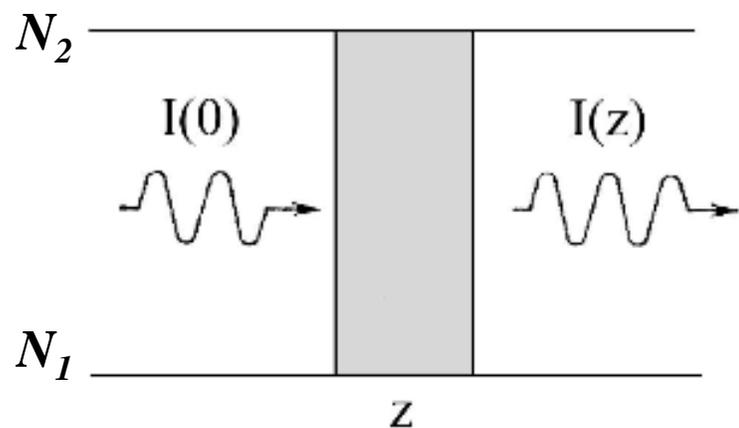
$$\rho(\nu_{nm}) = \frac{A_{mn}}{\frac{N_n}{N_m} B_{nm} - B_{mn}} = \frac{A_{mn}}{\frac{g_n}{g_m} B_{nm} \exp\left(\frac{h\nu_{nm}}{kT}\right) - B_{mn}}$$

$$\rho_\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \cdot \frac{h\nu}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1}$$

$$B_{nm} g_n = B_{mn} g_m \quad A_{mn} = B_{mn} \frac{8\pi h \nu_{nm}^3}{c^3}$$

$$W_{mn} = \left(\frac{8\pi h \nu_{nm}^3}{c^3} + \rho(\nu_{nm}) \right) B_{mn}$$

Инверсная населенность



$$I(z) = I(0) \cdot \exp(-\alpha z)$$

$$\frac{dI}{dz} = (B_{mn}N_m - B_{nm}N_n)\rho(\nu)$$

$$\alpha = -\frac{1}{I} \cdot \frac{dI}{dz}$$

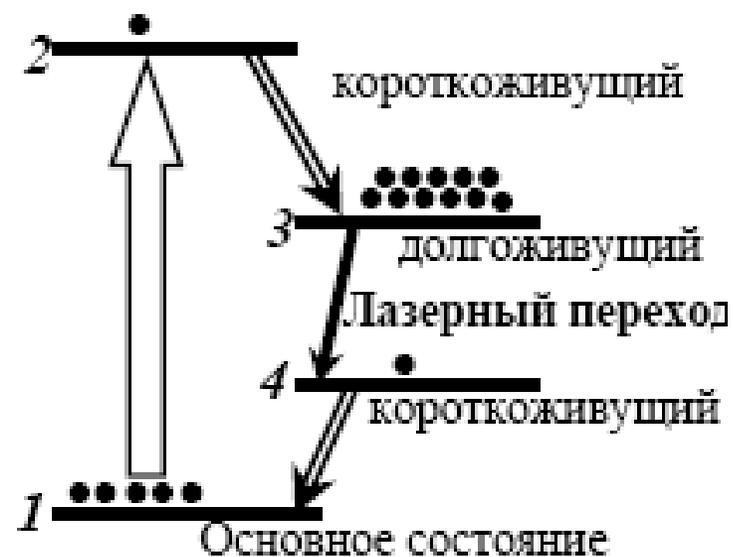
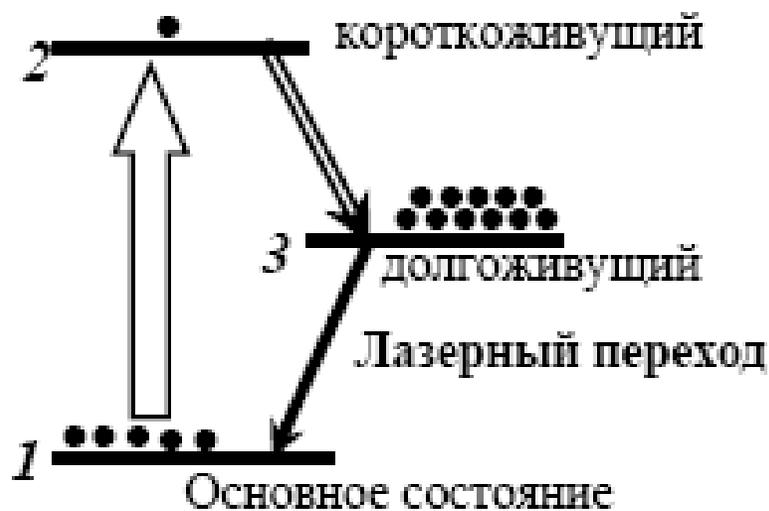
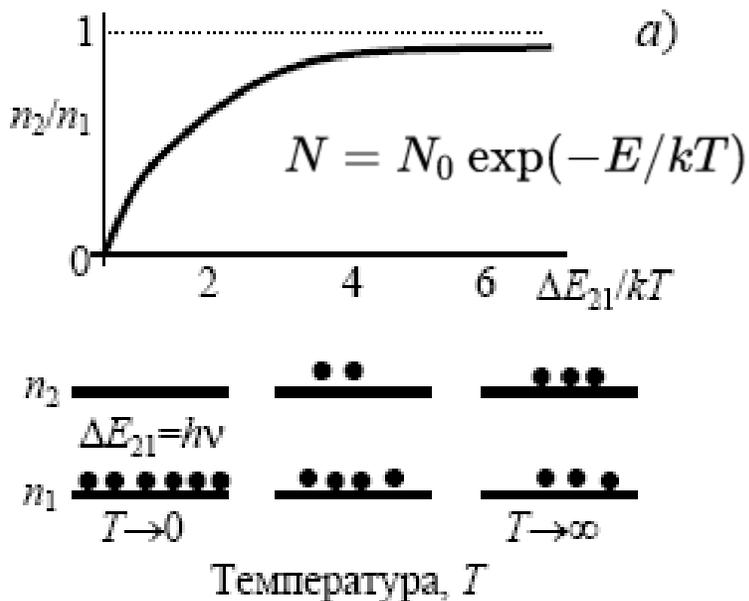
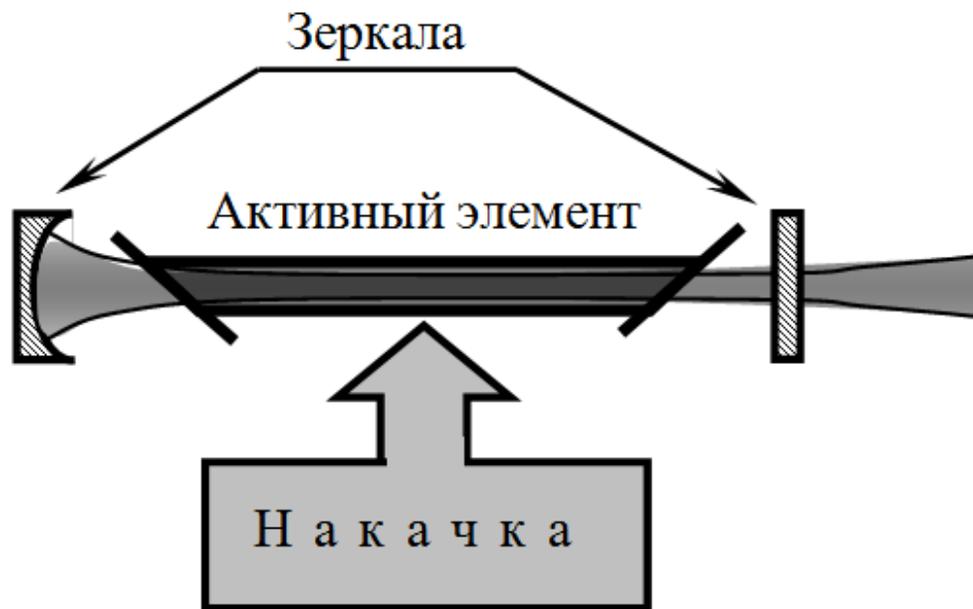


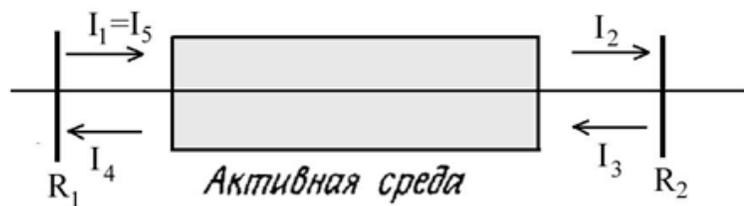
Схема устройства лазера



В качестве рабочей среды лазера используются различные агрегатные состояния вещества: твёрдое, жидкое, газообразное.

- Накачка в твердотельных лазерах она осуществляется за счёт облучения мощными газоразрядными лампами-вспышками.
- В газовых и жидкостных лазерах используется накачка электрическим разрядом.
- Накачка химических лазеров происходит посредством протекания в их активной среде химических реакций.
- Накачка полупроводниковых лазеров происходит под действием сильного прямого тока через р-п переход.

Коэффициент усиления



Генерация возникает, когда усиление активной среды компенсирует все потери:

$$I_2 = I_1 \exp(gL)$$

$$I_3 = I_2 R_2$$

$$I_4 = I_2 \exp(gL) = I_1 R_2 \exp(2gL)$$

$$I_5 = I_4 R_1 = R_1 R_2 \exp(2gL)$$

$$g_{\text{пор}} = \frac{1}{2L} \ln \left(\frac{1}{R_1 R_2} \right)$$

$$g = -\alpha = \sigma \left(N_n - \frac{g_n}{g_m} N_m \right)$$

Потери:

- Полезные;
- Распределенные;
- Дифракционные

Уширение спектральных линий: однородное уширение

Естественное уширение

Принцип неопределенности

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq h$$

Неопределенность частоты перехода между двумя уровнями

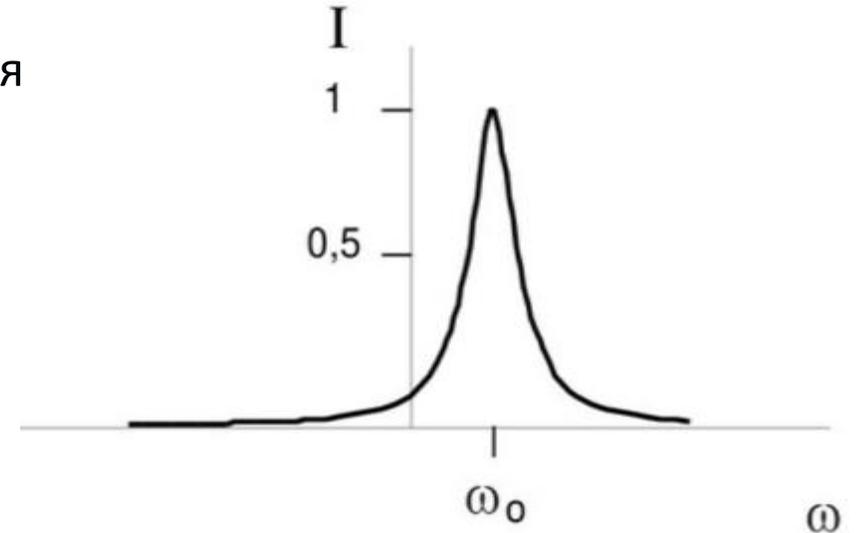
$$\delta\omega_{\omega_{max}-\omega_{min}} = \frac{\Delta E_i + \Delta E_i}{h}$$

Форма линии описывается функцией Лоренца

Время жизни m -го уровня

$$\tau_{mn} = \frac{1}{A_{mn}}$$

$$G(\omega) = \frac{A_{21}/2}{(\omega - \omega_0)^2 + (A_{21}/2)^2}$$



Столкновительное уширение

- Упругие взаимодействия-обмена энергией не происходит (линия не уширяется)
- Неупругие взаимодействия-сокращение времени жизни частиц на уровне до времени среднего пробега (уширение)

Проявляется при столкновении атома с другими атомами, молекулами, ионами, электронами, стенками резервуара и фононами решетки.

Доплеровское уширение

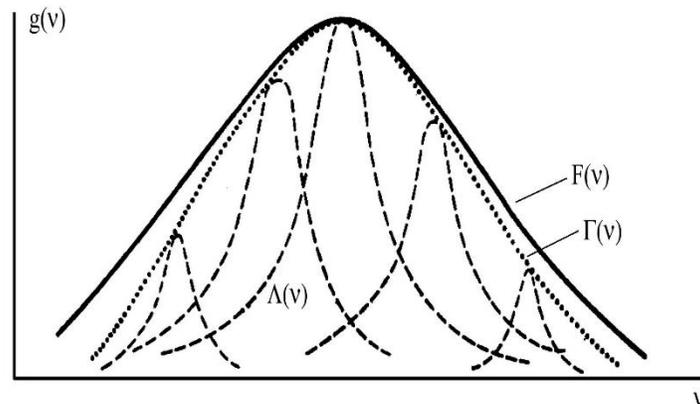
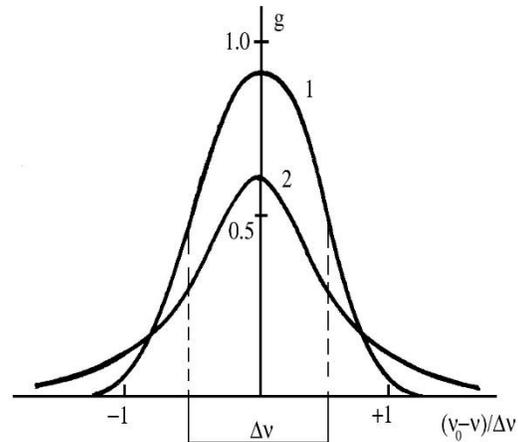
Эффект Доплера при малых скоростях : $v = v_0(1 \pm V/c)$

$W(V) = \sqrt{\frac{M}{2\pi kT}} \exp\left(-\frac{MV^2}{2kT}\right)$ Распределение
Максвелла по скоростям

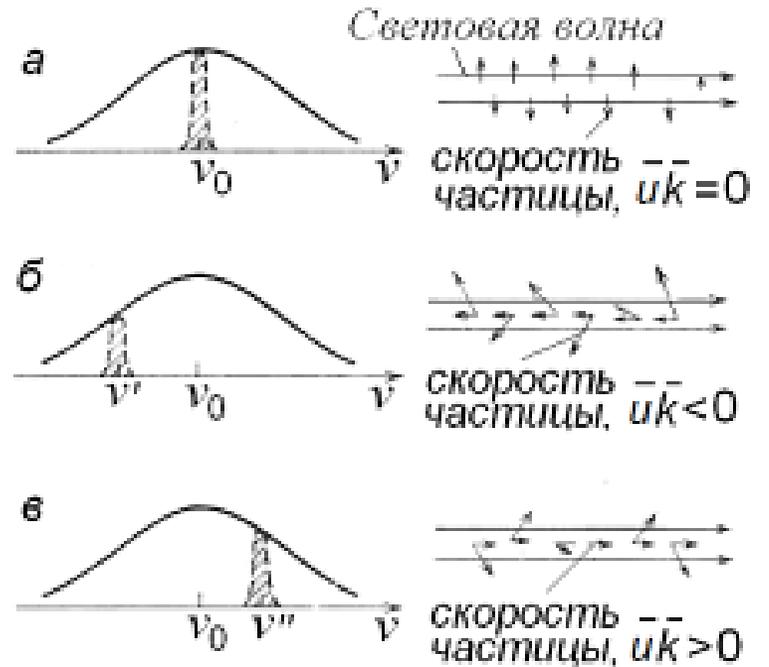
Нормированный Гаусов профиль интенсивности

$$\Gamma(v) = \frac{1}{\Delta v_T \sqrt{\pi}} \exp\left[-\left(\frac{v-v_0}{\Delta v_T}\right)^2\right], \quad \Gamma(v)dv = W(V)dV$$

$$\Delta v_T = v_0 u / c$$



V -скорость перемещения объекта относительно наблюдателя



Сравнение типов уширения

Тип уширения	Механизм	Газ	Жидкость	Твердое тело
Однородное	Естественное	1 кГц-10 МГц	мало	мало
	Столкновительное	5-10 МГц/Торр	200-300 см ⁻¹	10 см ⁻¹
Неоднородное	Доплеровское	50 МГц-1 ГГц	отсутствует	отсутствует
	Неоднородность локальных полей	отсутствует	500 см ⁻¹	1-500 см ⁻¹

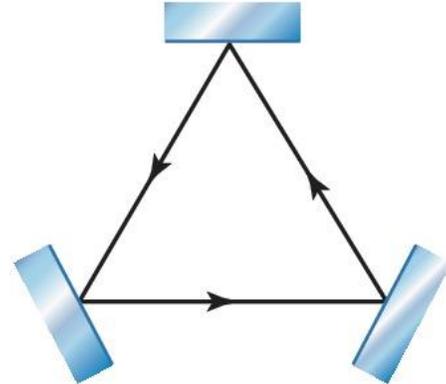
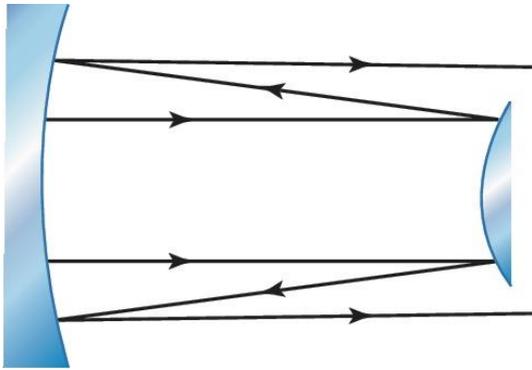
$$\nu(\text{Hz}) = \frac{3 \times 10^8}{0.01 \lambda(\text{cm})} = 3 \times 10^{10} \times k(\text{cm}^{-1}).$$

Оптические резонаторы

ОТКРЫТЫЙ РЕЗОНАТОР, колебательная система, состоящая из зеркал, удерживающих путём многократных отражений слабо затухающие электромагнитные колебания в ограниченном объёме пространства.

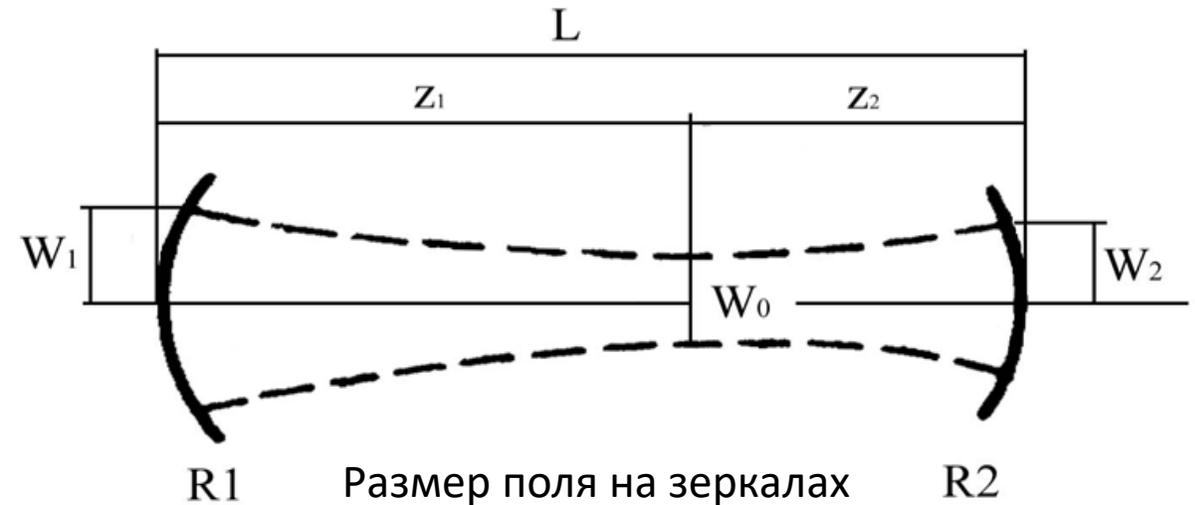
Причина отказа от закрытого резонатора:

При сохранении размеров порядка длины волны невозможно разместить активную среду



Неустойчивый открытый резонатор, составленный из большого вогнутого зеркала и малого выпуклого зеркала.

Трёхзеркальный открытый резонатор.



$$W_{1(2)}^4 = \left(\frac{2R_{1(2)}}{k} \right)^2 \cdot \frac{(R_{2(1)} - L)L}{(R_{1(2)} - L)(R_1 + R_2 - L)}$$

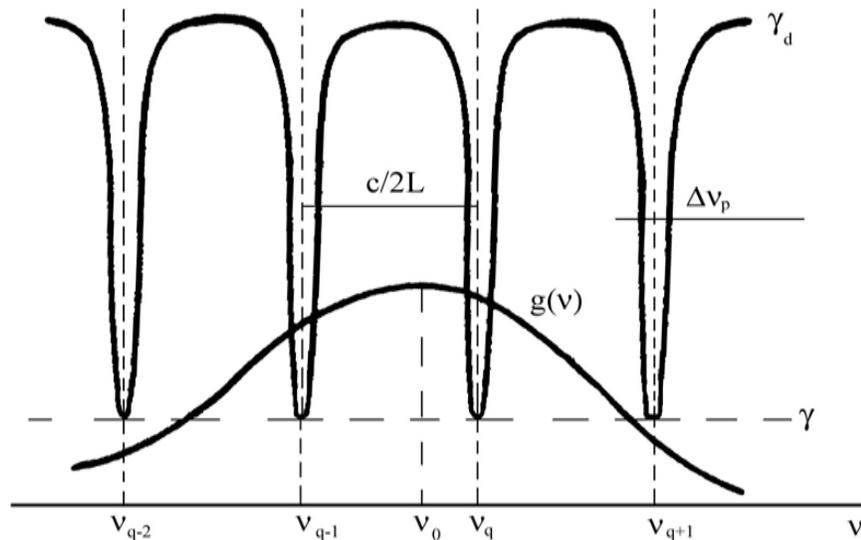
Моды резонатора

Моды резонатора

собственный вид колебания, распределение поля, которое сохраняется во времени неизменным в пространстве по амплитуде и фазе

Продольные моды

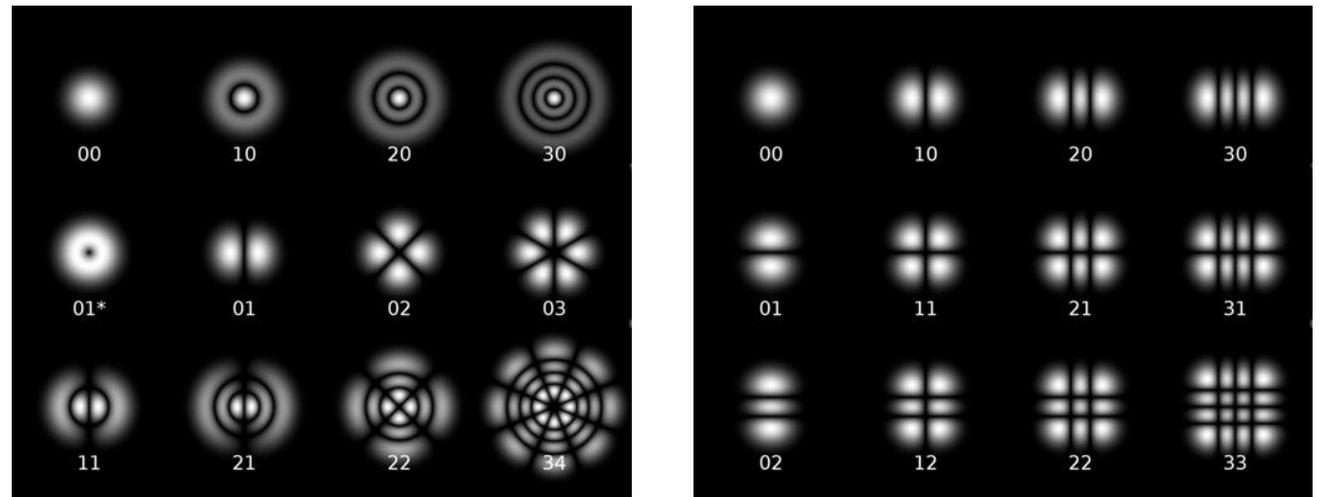
- Определяют спектр собственных частот резонатора
- Индекс продольных мод указывает, сколько полуволн укладывается между зеркалами: $q=2d/\lambda=1,2,3,\dots$ (λ – длина волны).



Спектральная полоса резонатора

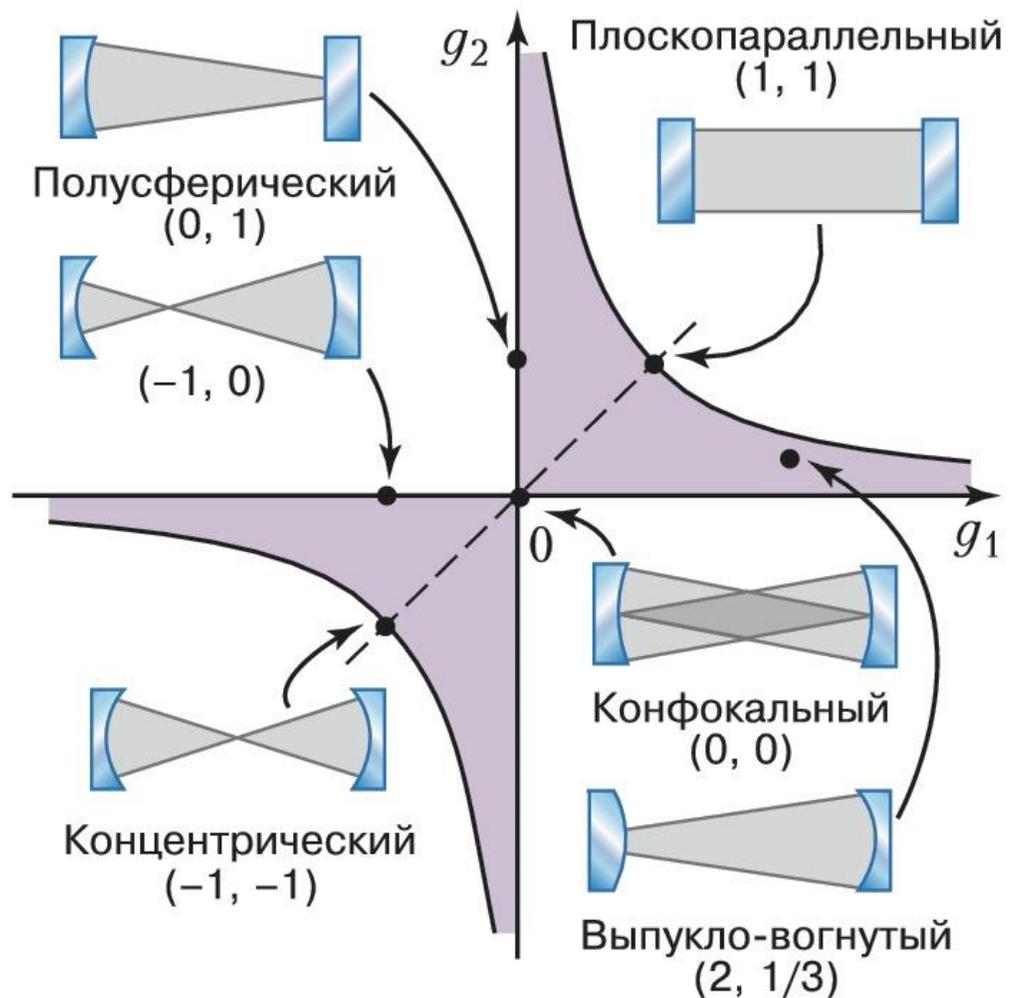
Поперечные моды

- описывают пространственное распределение поля в резонаторе.
- Индексы m и n показывают число нулей амплитуды колебаний по двум поперечным координатам.



Поперечные моды
сферические плоские зеркала

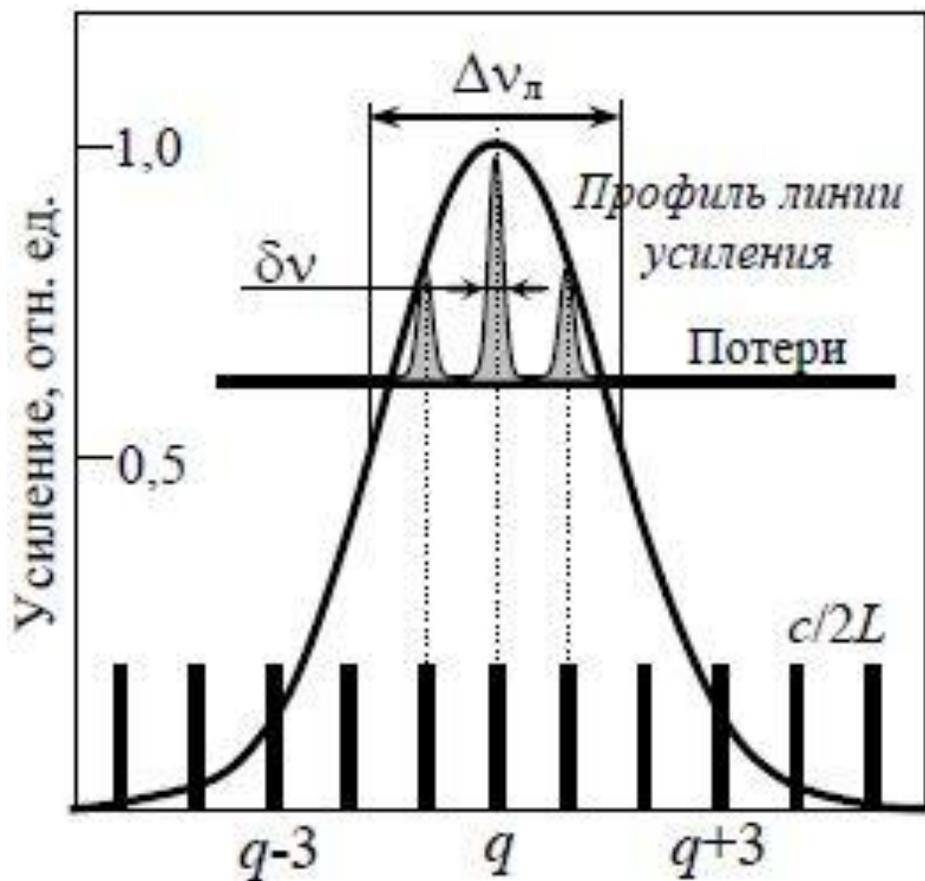
Диаграмма устойчивости резонатора



Резонатор называется неустойчивым, когда произвольный луч, последовательно отражаясь от каждого из зеркал, удаляется на неограниченно большое расстояние от оси резонатора. Наоборот, **резонатор, в котором луч остается в пределах ограниченной области, называется устойчивым.**

Типичные конфигурации открытых резонаторов и соответствующие им области устойчивости, ограниченные осями координат $g_1=1-d/R_1$ и $g_2=1-d/R_2$ и гиперболами $g_1 g_2=1$.

Развитие генерации



Из большого количества возможных собственных частот оптического резонатора возбуждаются только те, которые лежат в пределах линии усиления соответствующего лазерного перехода и усиление для которых превышает потери

Добротность колебательной системы, отношение энергии, запасённой в колебательной системе, к энергии, теряемой системой за один период колебания

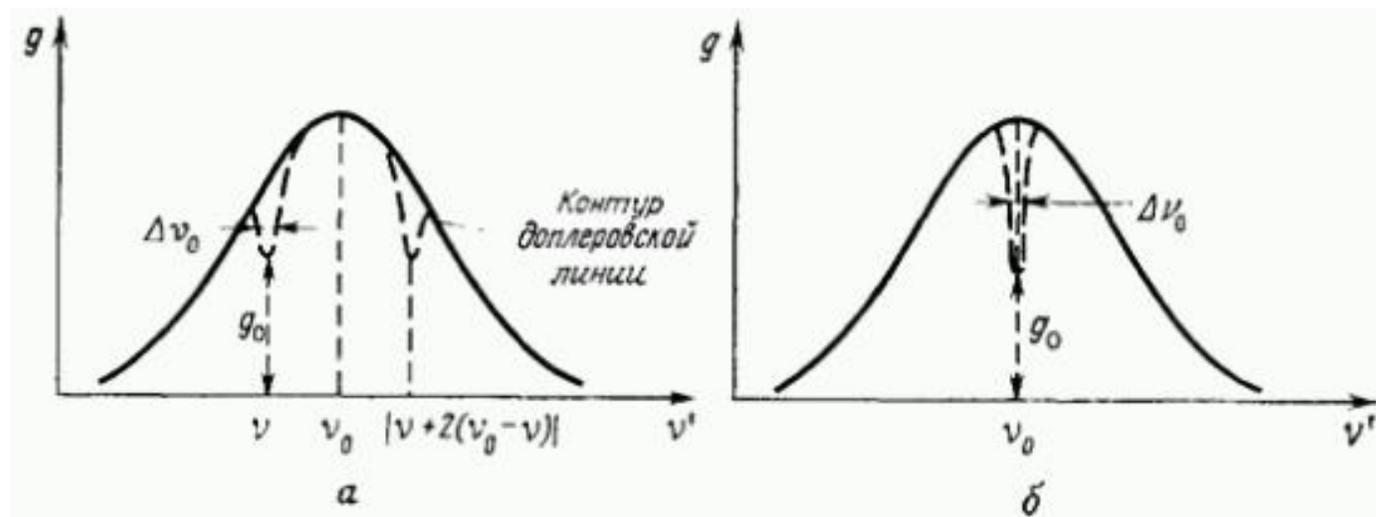
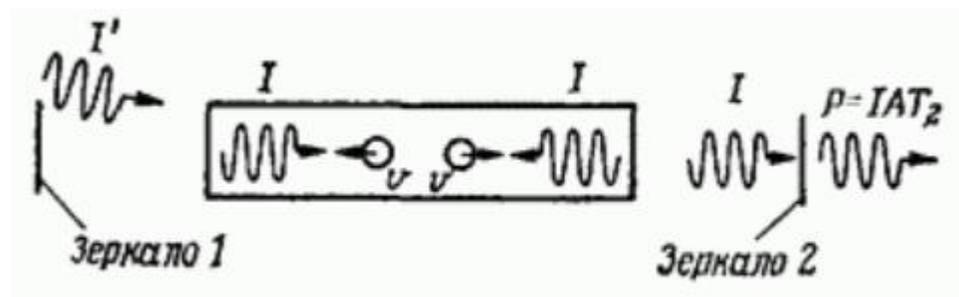
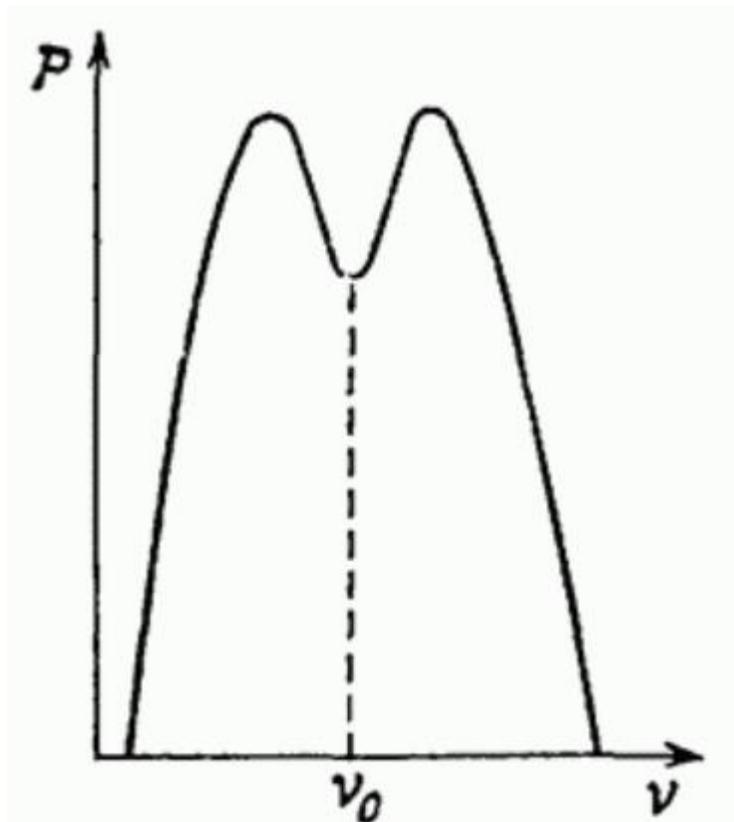
$$Q = \frac{\nu_p}{\Delta \nu_p}$$

← частота моды резонатора

← спектральная полоса резонатора

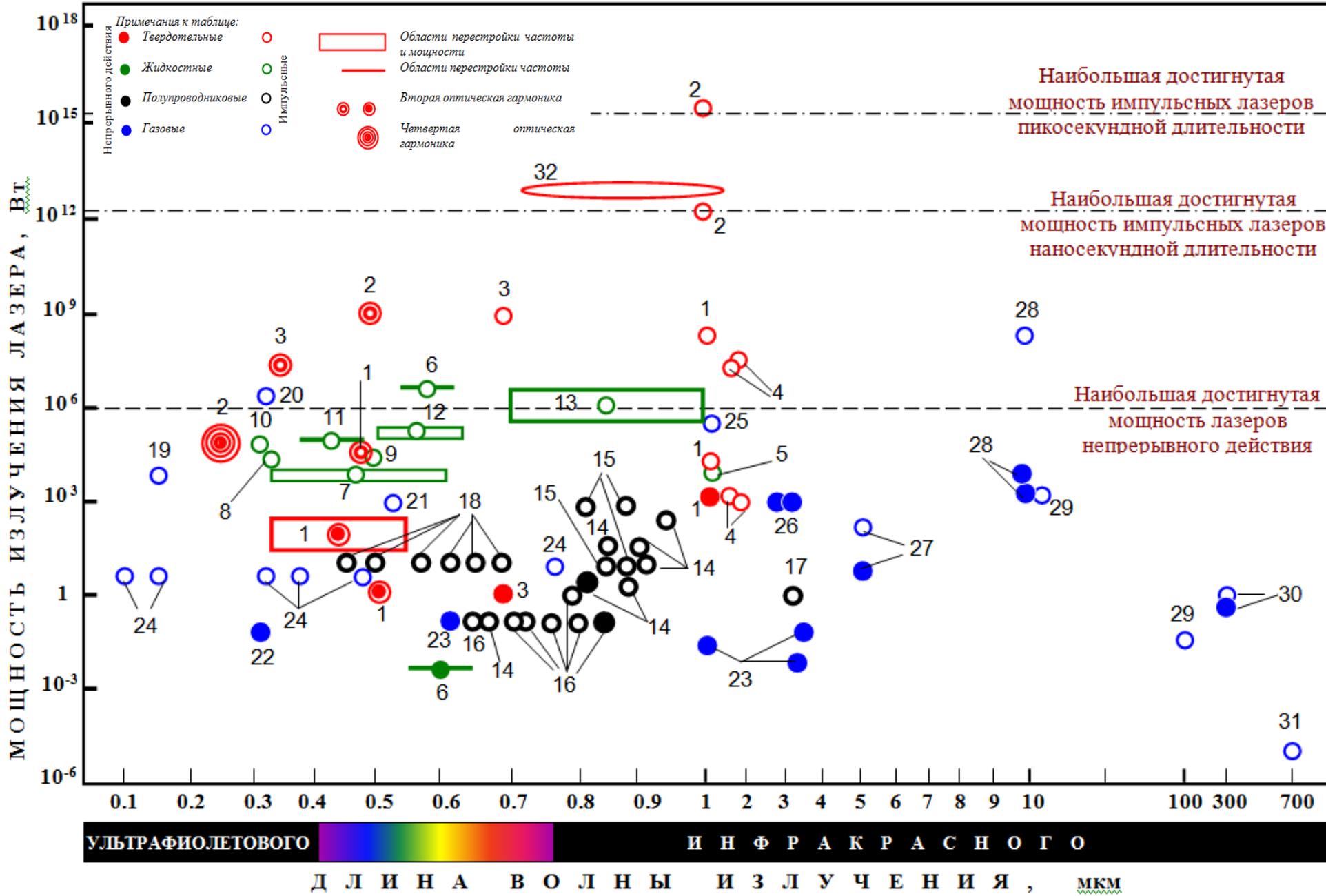
Провал Лэмба

Провал Лэмба — явление резонансного падения выходной мощности газового лазера в центре линии усиления. Впервые был предсказан Уиллисом Лэмбом в 1963 году.

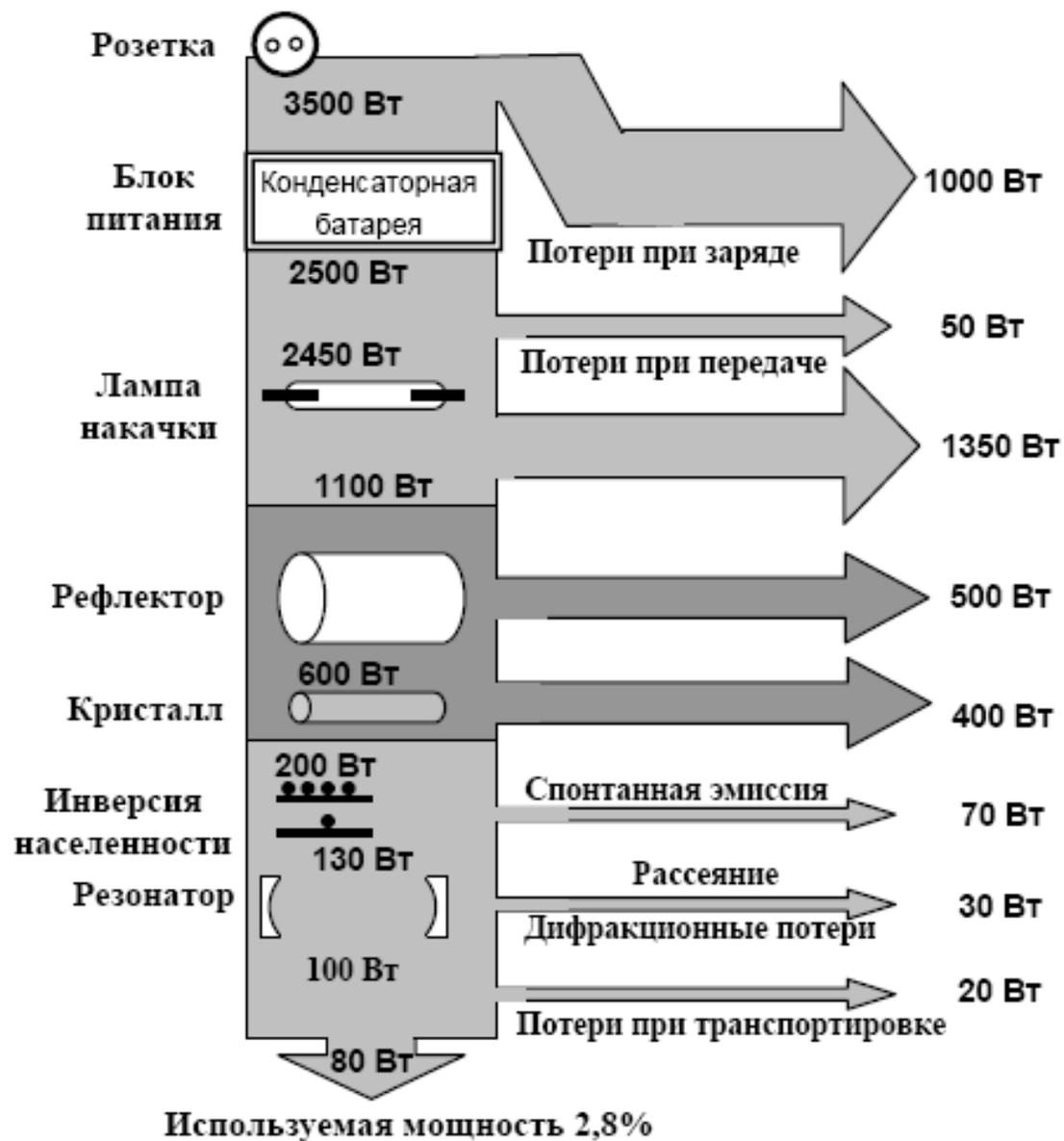


Дырки, выжигаемые в контуре линии усиления газового лазера, генерирующего на частоте ν и ν_0

СРЕДНЯЯ ДЛИНА ВОЛНЫ И МОЩНОСТЬ НАИБОЛЕЕ РАСПРОСТРАНЕННЫХ ТИПОВ ЛАЗЕРОВ



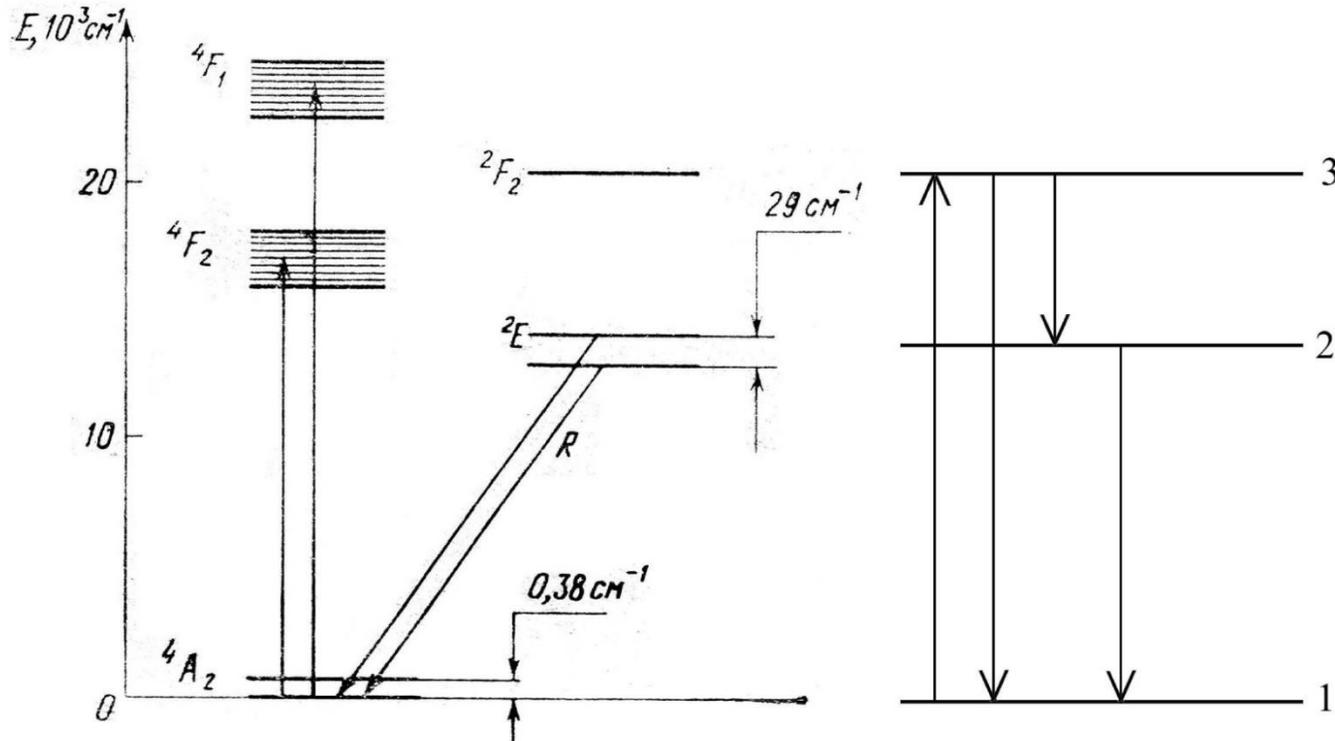
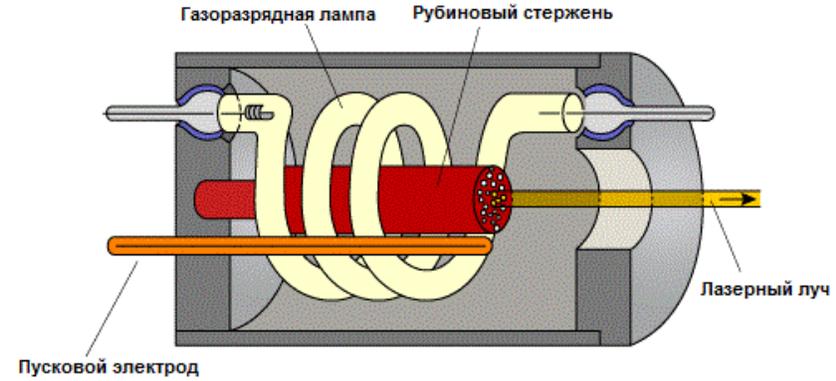
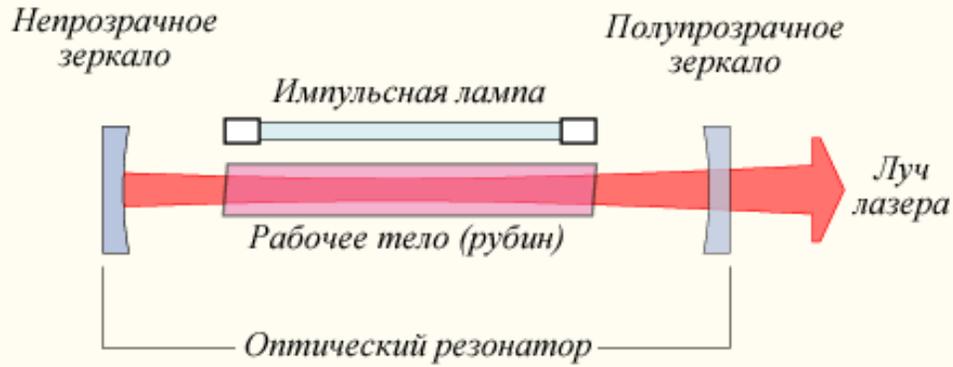
- Активные среды:
- 1 – алюмоитриевый гранат YAG с примесью Nd³⁺;
 - 2 – стекло с примесью Nd³⁺;
 - 3 – рубин Al₂O₃+Cr³⁺;
 - 4 – гранат (или стекло) с примесью Er;
 - 5 – неорганические жидкости с растворенной окисью Nd³⁺;
 - 6- родамин 6G;
 - 7 – сцинтилляторы;
 - 8 – Р – фенил;
 - 9 – метилумбеллиферон;
 - 10 – родамин 6GL;
 - 11 – кумарины;
 - 12 – арилоксазолы;
 - 13 – полиметилловые красители;
 - 14 – CaAs;
 - 15 – двойная гетероструктура GaAs с (GaAl)As;
 - 16 - (GaP)As;
 - 17 – InAs;
 - 18 – сплав Kd+Se+S;
 - 19 – H₂; 21 – N₂; 22 – пары Kd;
 - 23 – смесь He-Ne;
 - 24 – Ar (ионизованный);
 - 25 – пары I;
 - 26 – HF; 27 – CO; 28 – CO₂;
 - 29 – пары H₂O; 30 – пары HCN;
 - 31 – пары йодистого циана.



ТИПЫ ЛАЗЕРОВ



Рубиновый лазер



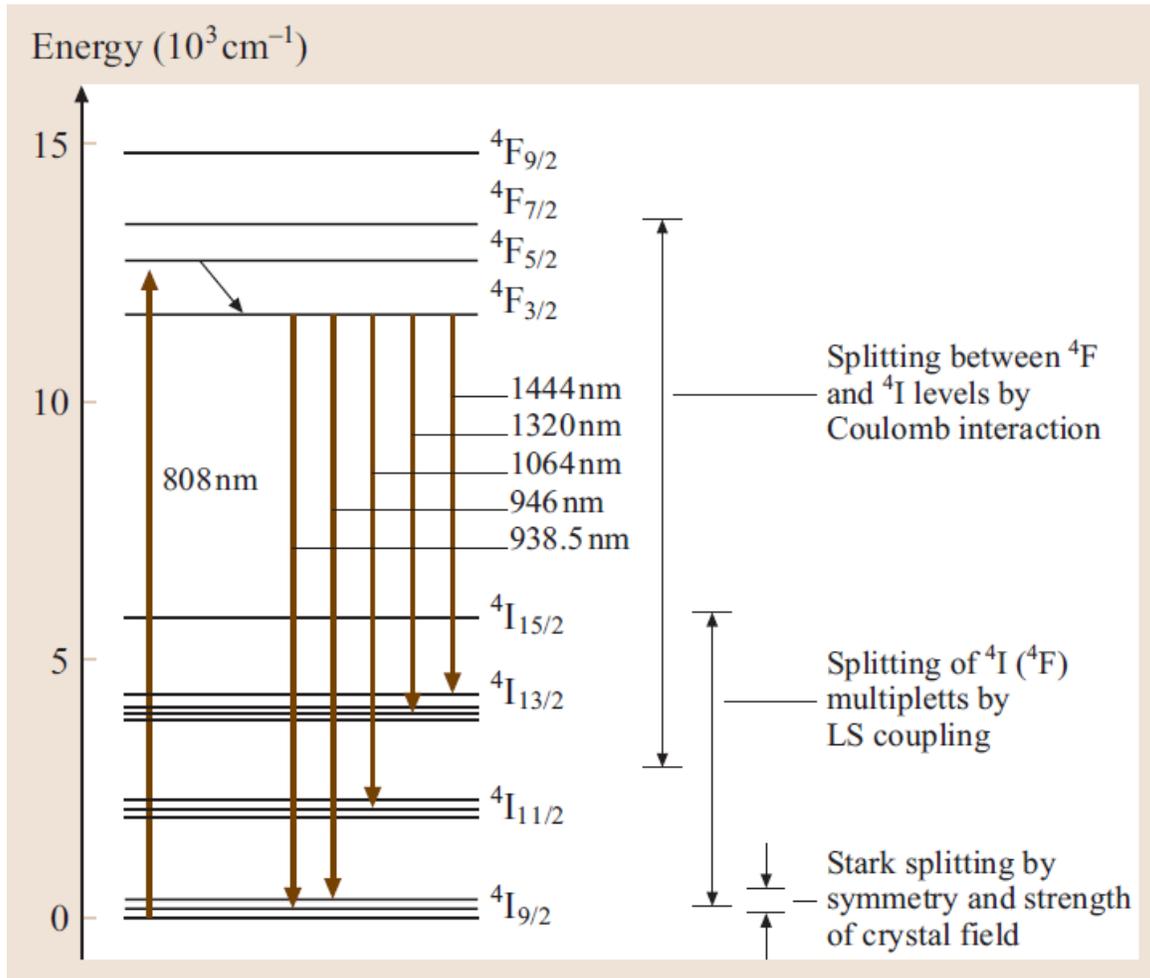
Генерация на 694,3 нм и 692,8 нм

Модуляция добротности: 10-20 нс, 10-50 МВт

Синхронизация мод: 10 пс, 1 ГВт

КПД 1-2%

Неодимовый лазер



Непрерывный режим: до 200 Вт,
Модуляция добротности: 10-20 нс, 50 МВт
Синхронизация мод: до 20 пс, ГВт

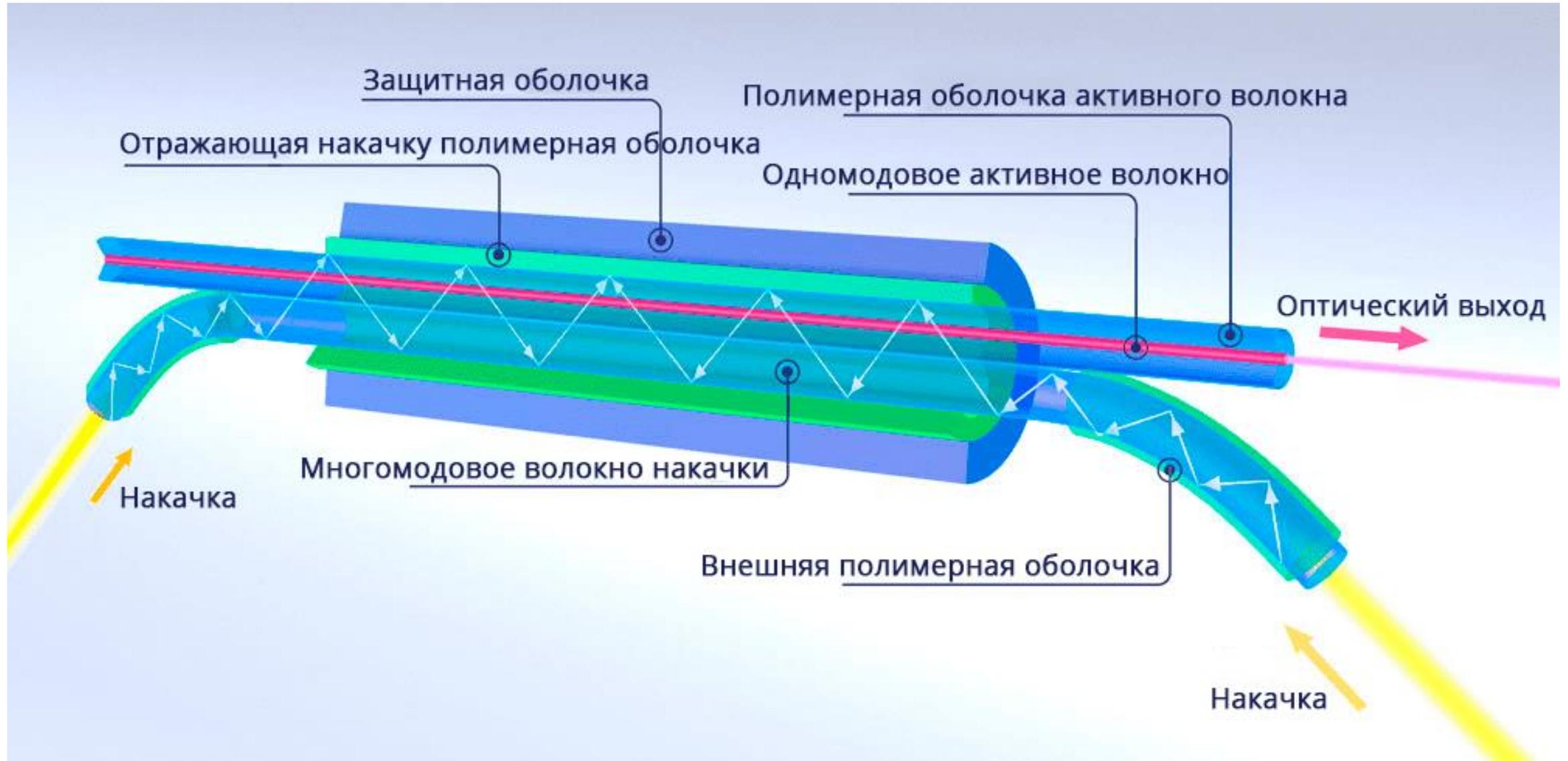
Поглощение
0,75, 0,81 и 0,88 мкм

Генерация
1444, 1320, 1064, 946, 938,5 нм

КПД 5%



Волоконные лазеры



Брэгговские решетки

Лазерный модуль

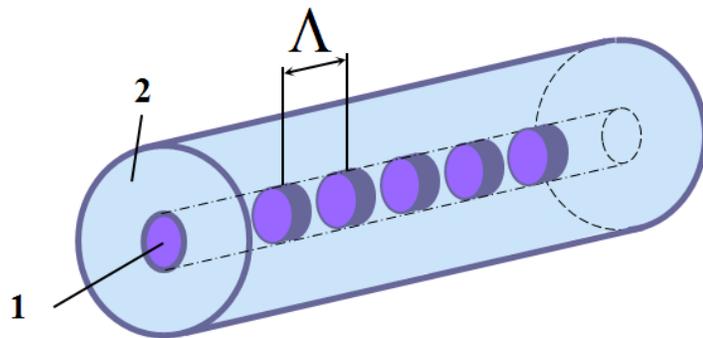
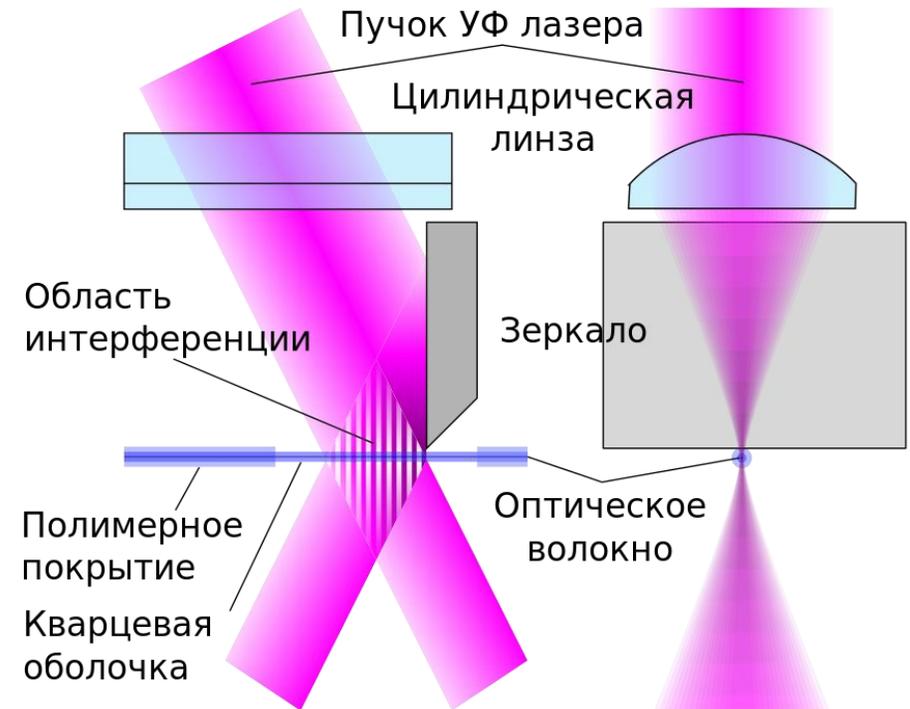


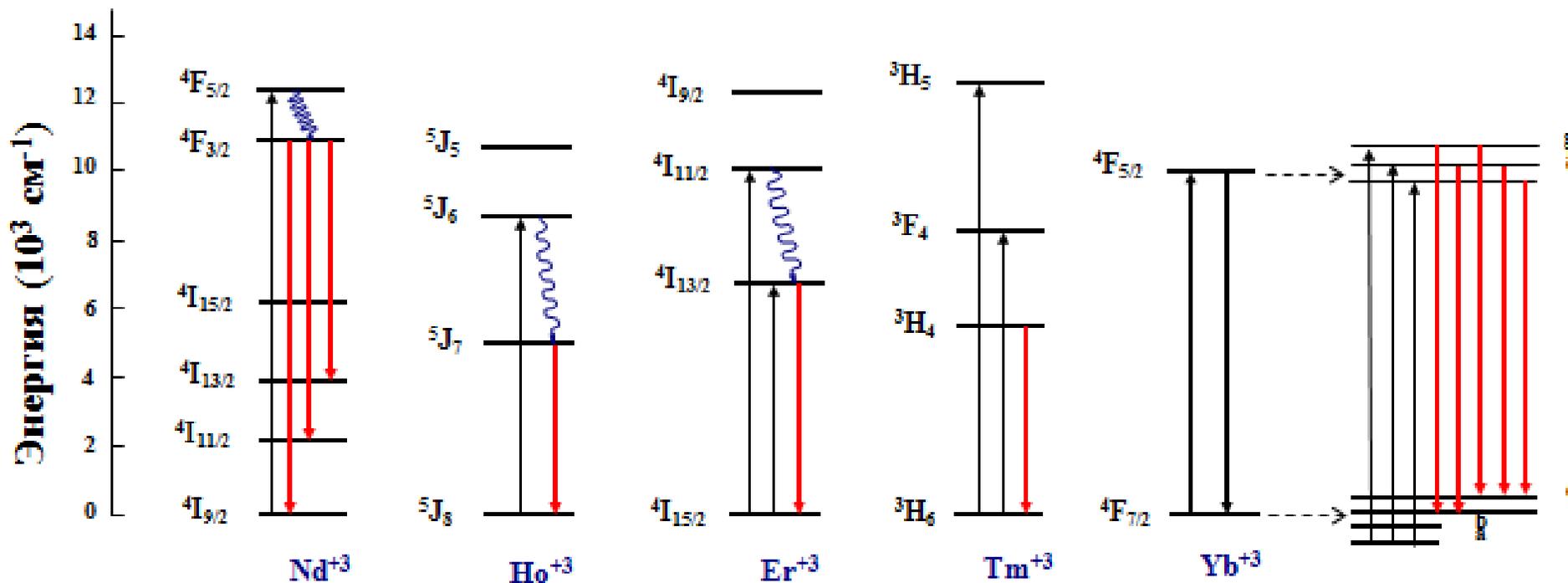
Схема волоконной решетки показателя преломления

- 1 – фоточувствительная сердцевина
- 2 – кварцевая оболочка

Типичные параметры брэгговской решетки:

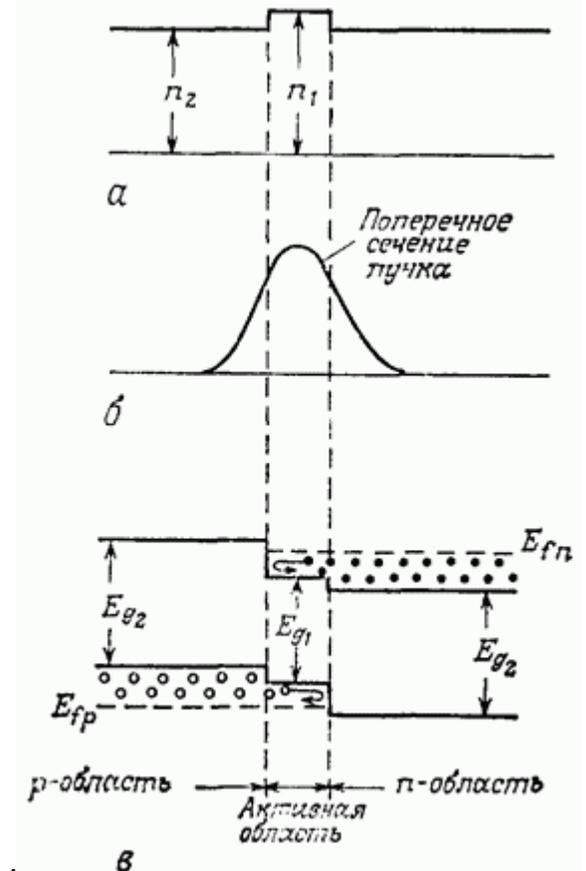
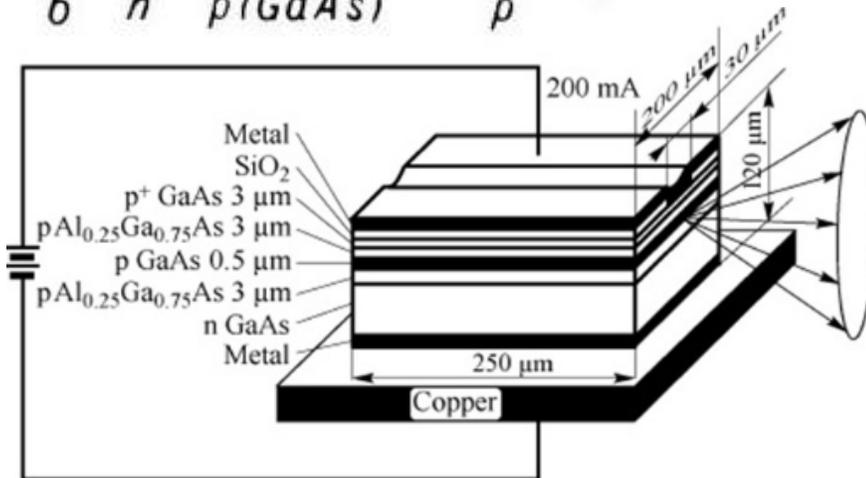
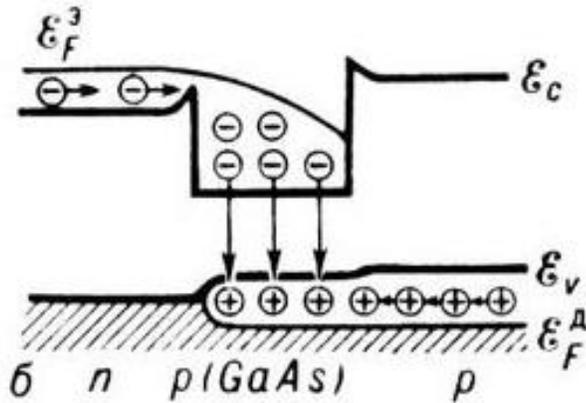
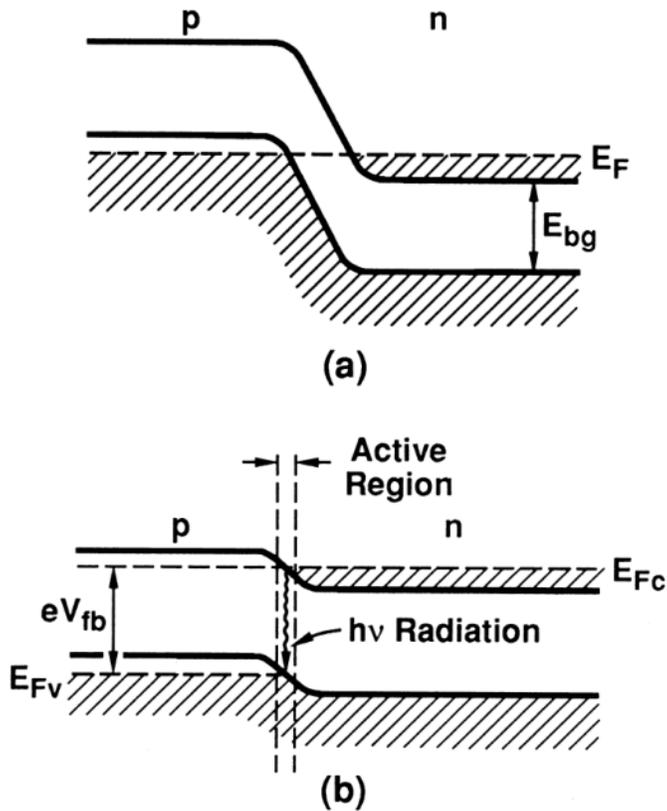
$$L = 5 \text{ мм}, \quad \delta_n = 8 \times 10^{-4}, \quad \Lambda = 0,4 \text{ мкм}$$
$$\rightarrow R \sim 0,99 \text{ на } \lambda = 1136 \text{ нм и } \Delta\lambda = 0,4 \text{ нм}$$

Схемы энергетических уровней ион редкоземельных элементов и используемые оптические переходы



Неодим (Nd ³⁺)	${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$ ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	$\lambda = 1,06 \text{ мкм}, 0,92 \text{ мкм}, 1,34 \text{ мкм}$
Гольмий (Ho ³⁺)	${}^5J_7 \rightarrow {}^5J_8$	$\lambda = 2 \text{ мкм}$
Эрбий (Er ³⁺)	${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$	$\lambda = 1,53 \div 1,6 \text{ мкм}$
Тулий (Tm ³⁺)	${}^3H_4 \rightarrow {}^3H_6$	$\lambda = 1,85 \div 2,1 \text{ мкм}$
Иттербий (Yb ³⁺)	${}^4F_{5/2} \rightarrow {}^4F_{7/2}$	$\lambda_1 = 0,978 \div 0,982 \text{ мкм}, 1,03 \div 1,2 \text{ мкм}$

Полупроводниковые лазеры



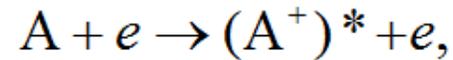
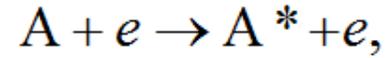
- Толщина активной области 1 мкм, однако поперечный размер лазерного пучка из-за дифракции больше.
- Пороговый ток должен быть большим (10^5 А/см), это приводит к возможности работать только в импульсном режиме.

- Показатель преломления центральной зоны значительно больше, что приводит к образованию волноводной структуры.
- Ширина запрещенной зоны E_1 меньше E_2 , поэтому на обоих переходах образуются энергетические барьеры, сдерживающие инжекционные электроны и дырки, а лазерный пучок почти не поглощается за пределами активной зоны

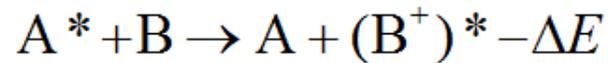
Электрическая накачка в газовых лазерах

Механизмы создания инверсной населенности в электрическом разряде

1. Непосредственное столкновение атома или молекулы с электроном:

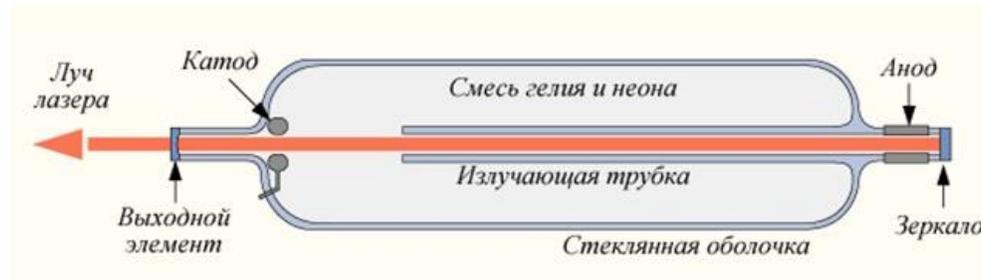
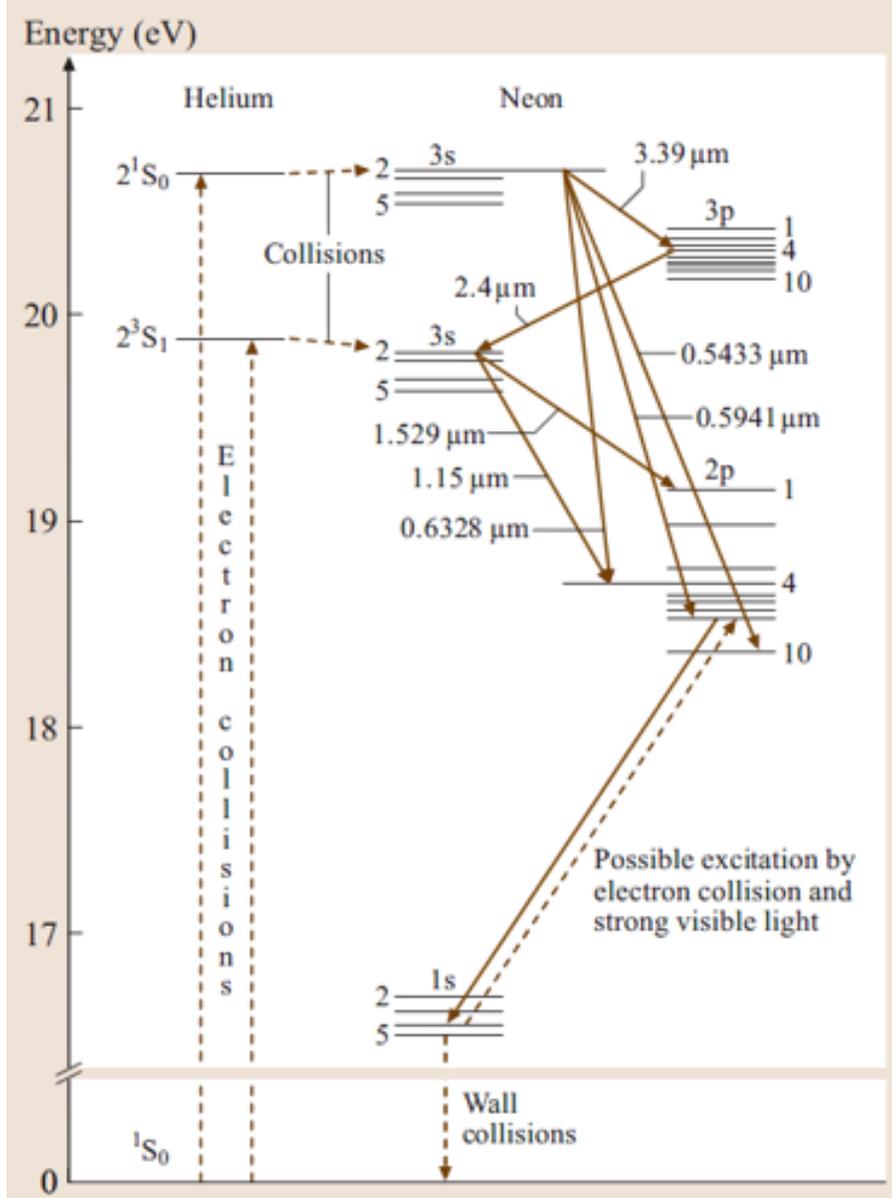


2. Резонансная передача энергии:



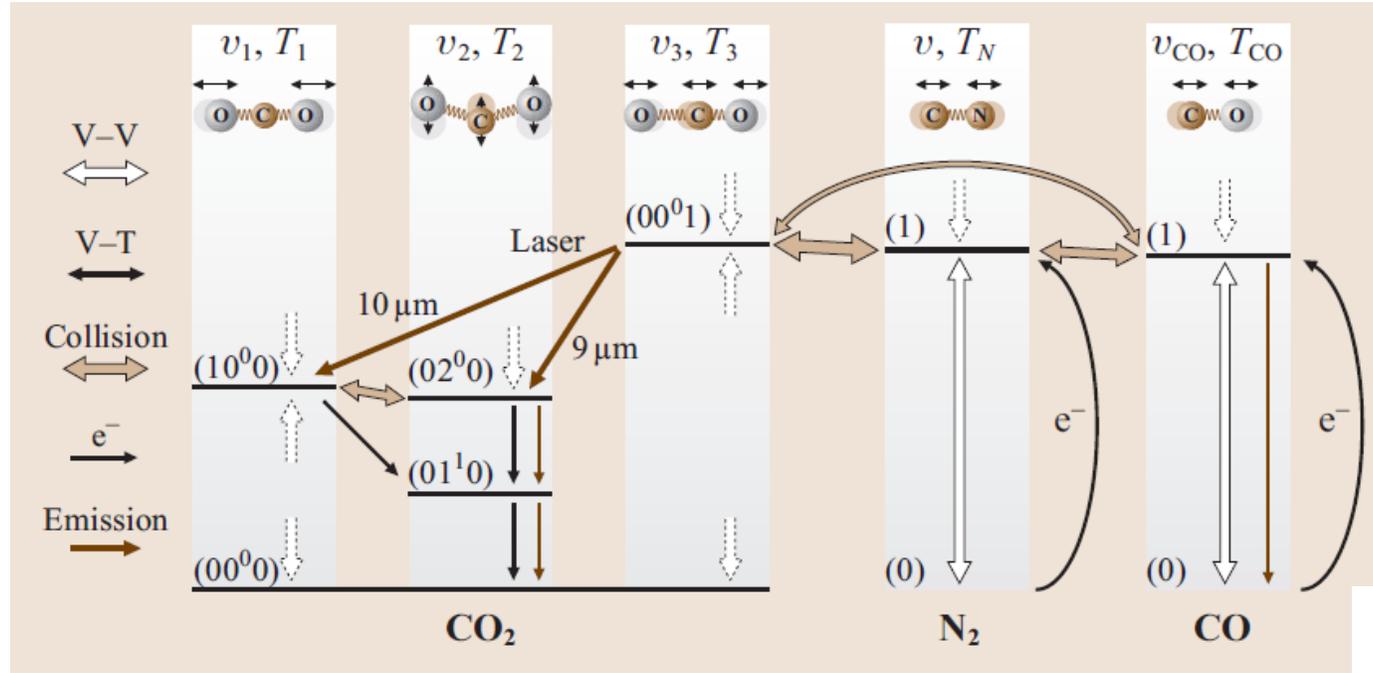
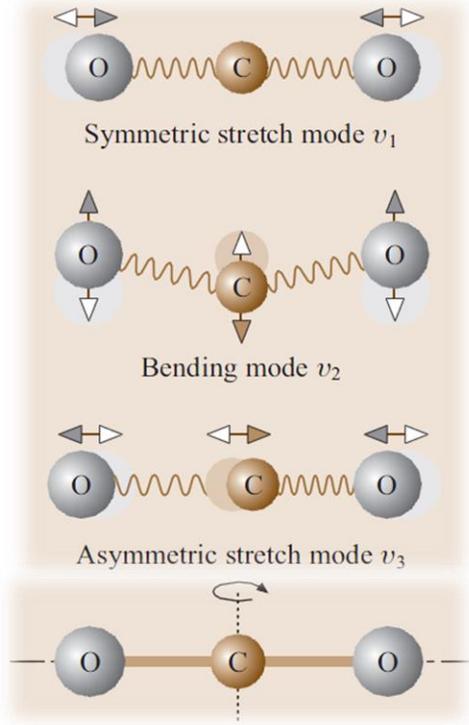
3. Столкновения нейтральных частиц газа с положительными ионами. Эффективность таких процессов невысока из-за большой инертности ионов (малой их скорости)

He-Ne лазер

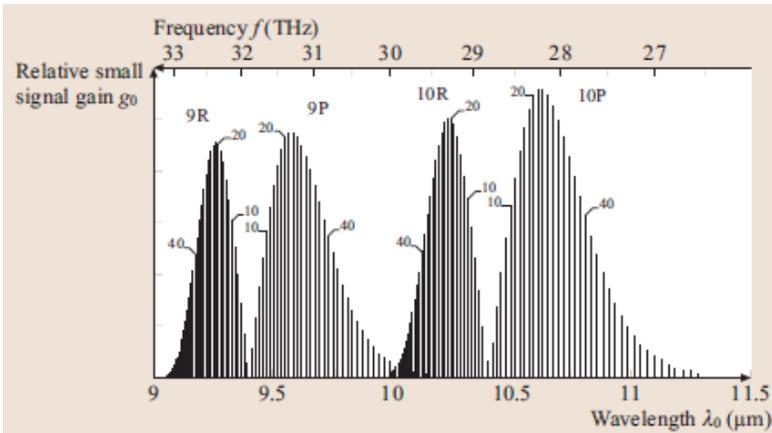


Wavelength (in air) (nm)	Transition	Gain (m^{-1})	Typical power (mW)
543.3	$3s_2-2p_{10}$	0.03	0.5–3.0
594.1	$3s_2-2p_8$		2.0
611.8	$3s_2-2p_6$	0.1	2.0
632.8	$3s_2-2p_4$	0.5	0.5–50
640.2	$3s_2-2p_2$		
1152.3	$2s_2-2p_4$		2.0
1523.1	$2s_2-2p_1$	4	1
3391.3	$3s_2-3p_4$	100	10

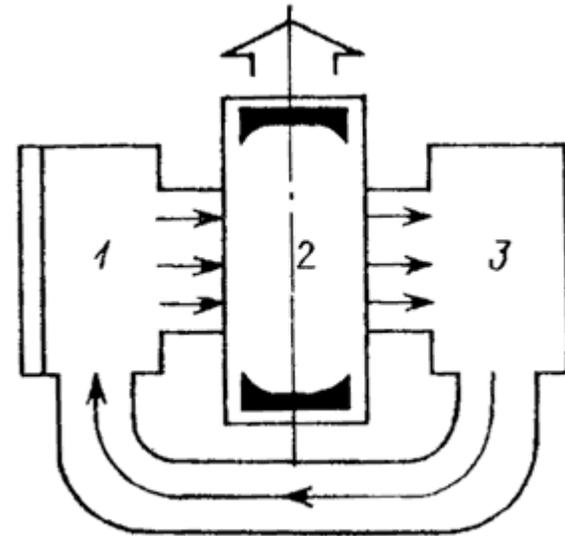
CO₂ лазер



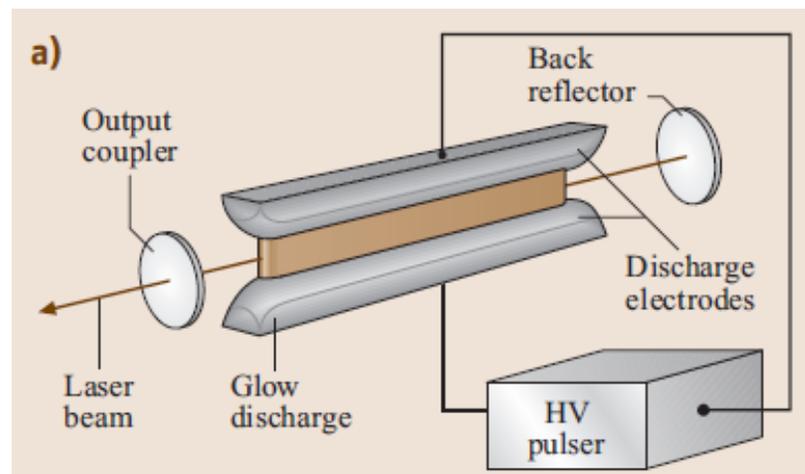
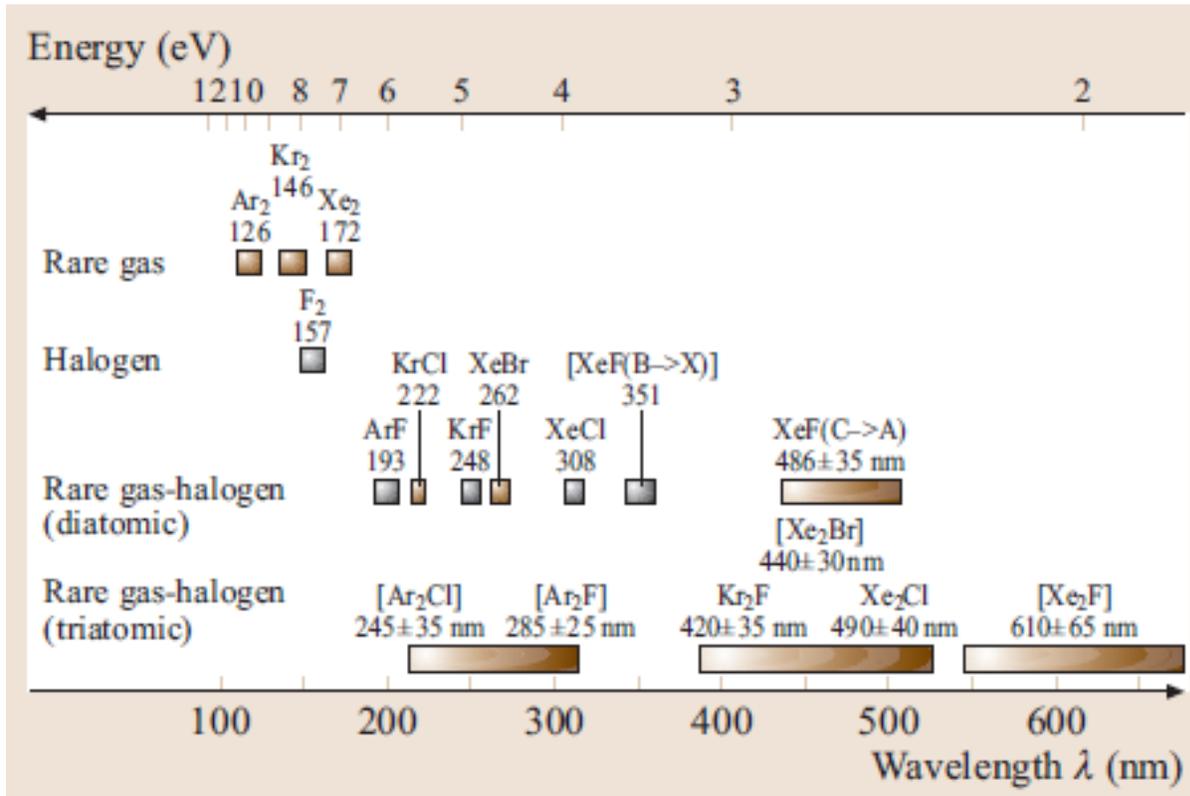
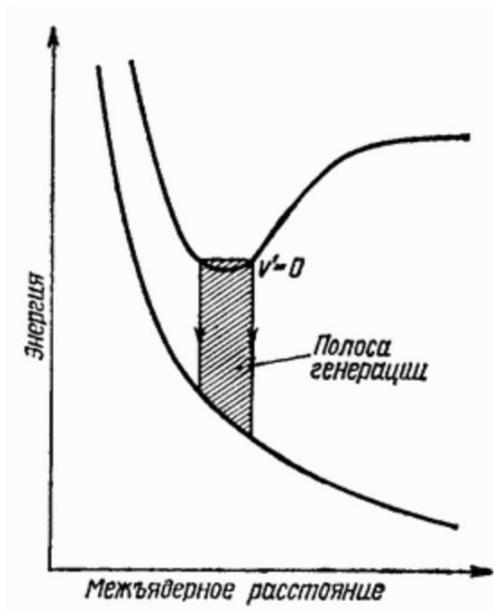
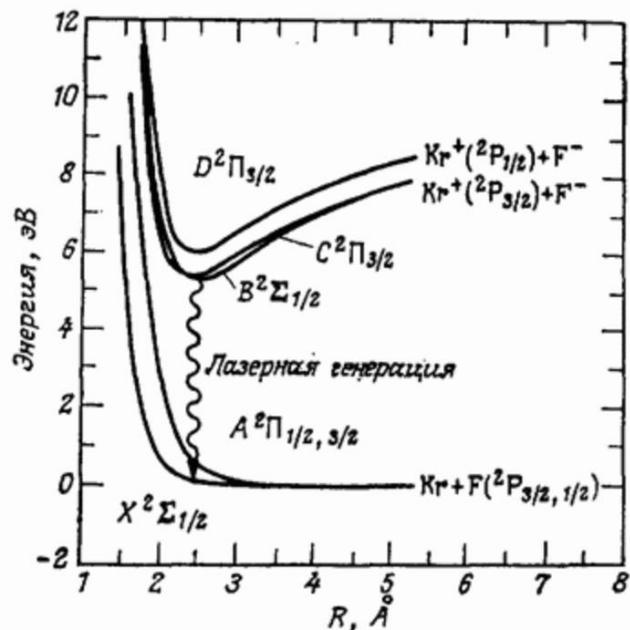
Длина волны 10 мкм, 9,6 мкм
 Непрерывный режим: до 500 кВт/м



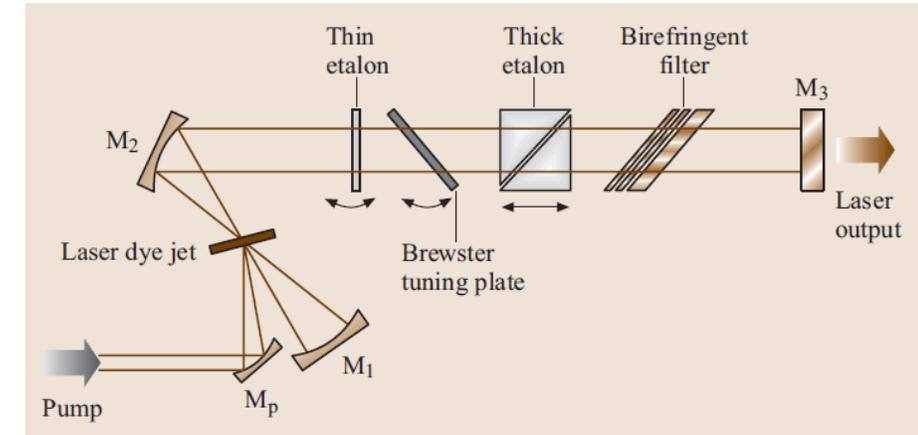
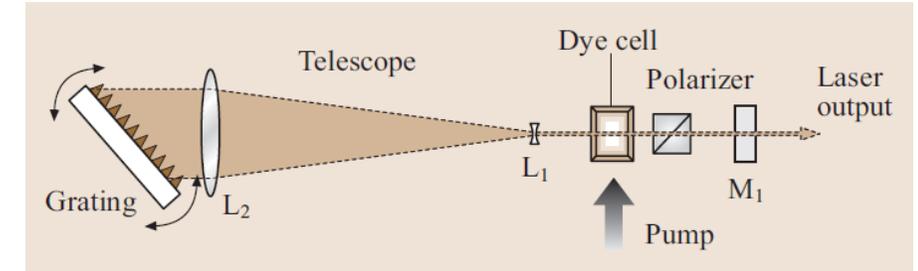
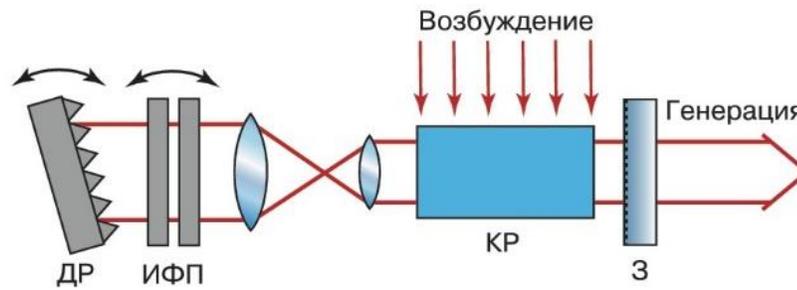
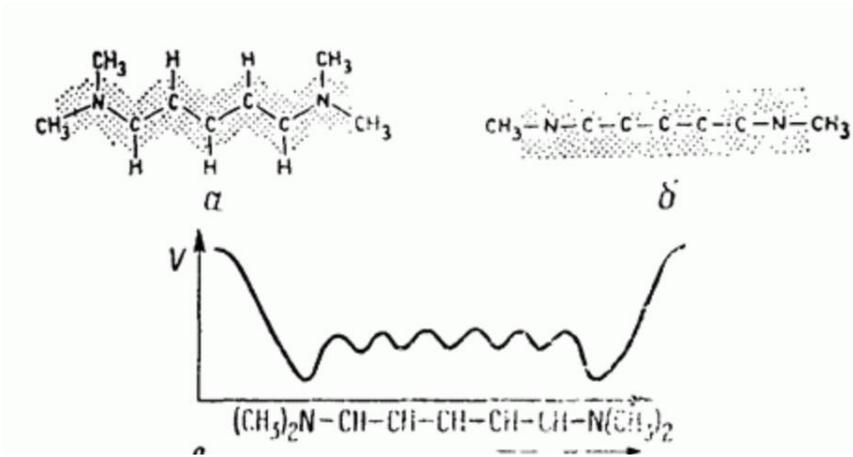
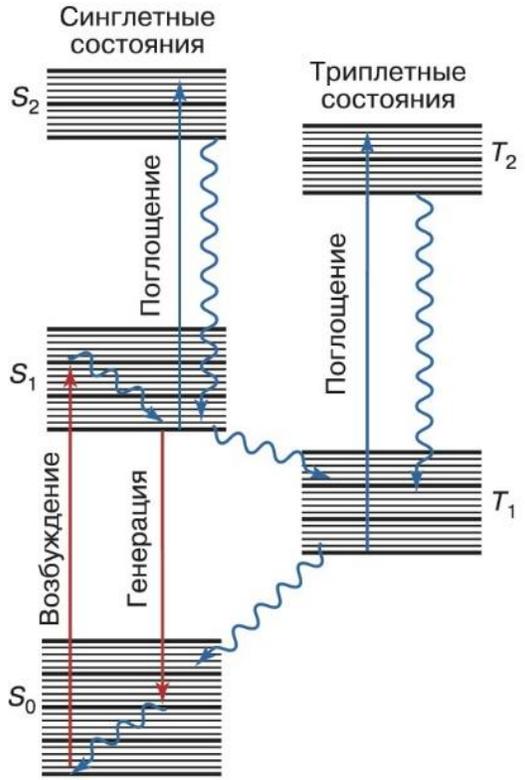
Composition						
He	N ₂	CO ₂	CO	O ₂	Xe	H ₂
65.5	29	5.5				
65	19	4	6	3	3	
80.8	15	4				0.2



Экимерные лазеры



Лазеры на красителях

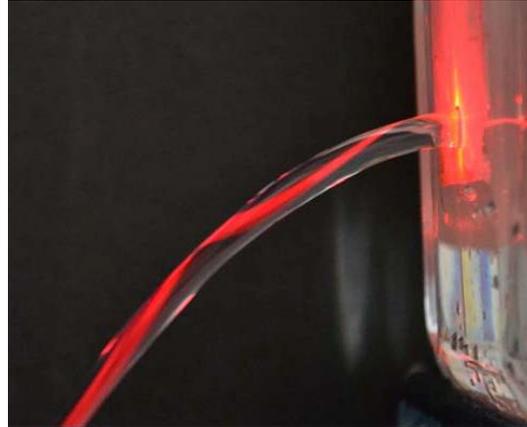
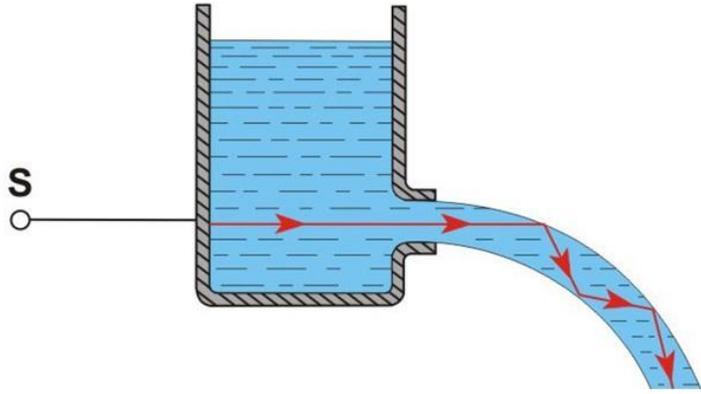


Краситель	Центр линии люминесценции, нм	Рабочая область лазера, нм	Область накачки, нм
Кумарин 6	538	521—551	458—514
Родамин 110 (R110)	570	540—600	458—514
Кумарин 7	535	505—565	400—420
Кумарин 2	450	435—485	340—365
Кумарин 1	470	450—495	350—365
Флуоресцин	552	538—573	458—514

Оптические волокна и компоненты

Оптические волокна

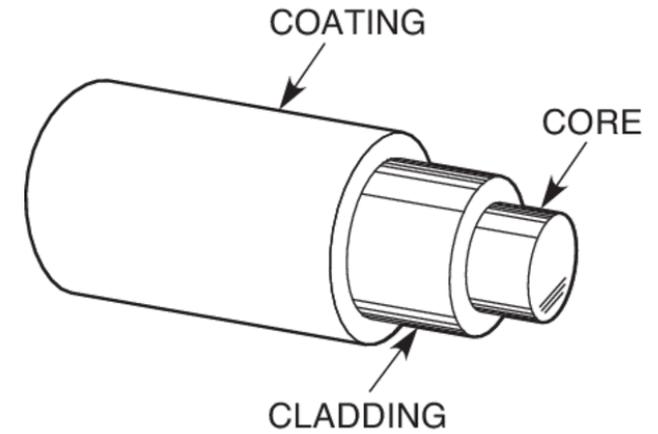
Демонстрация, John Tyndall



Наблюдение в воде



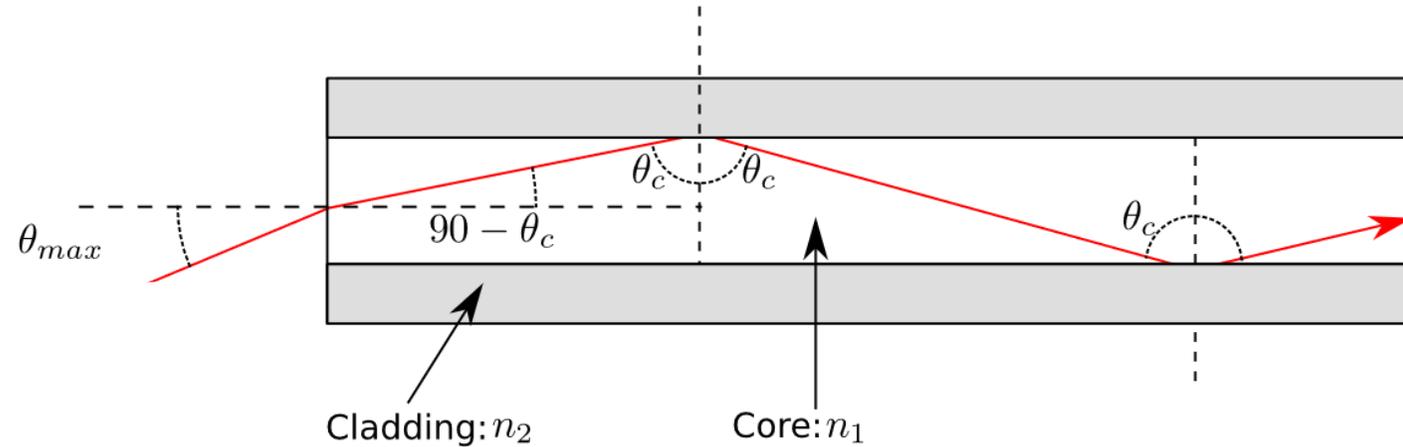
OPTICAL FIBER



Параметры сердцевины/оболочки, мкм

8/125; 50/125; 62,5/125;

85/125; 100/140



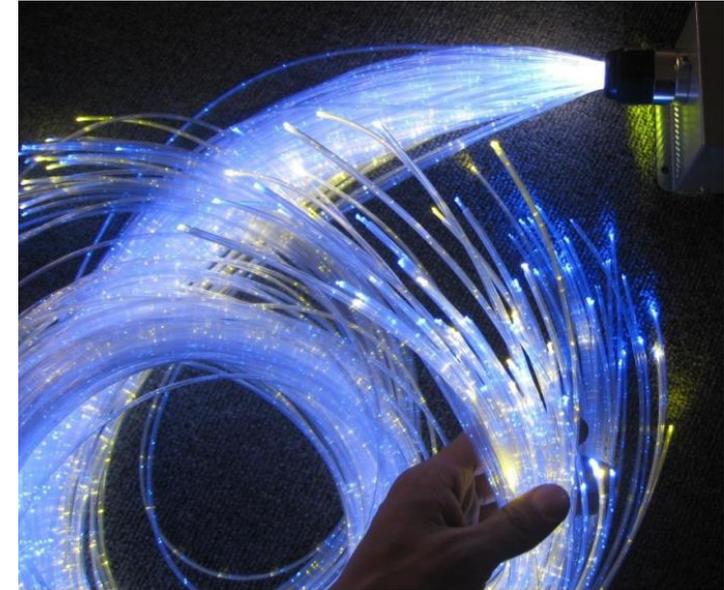
Оптические волокна

Материал изготовления:

- стекло;
- стекло с пластиковой оболочкой (PCS);
- пластиковые.

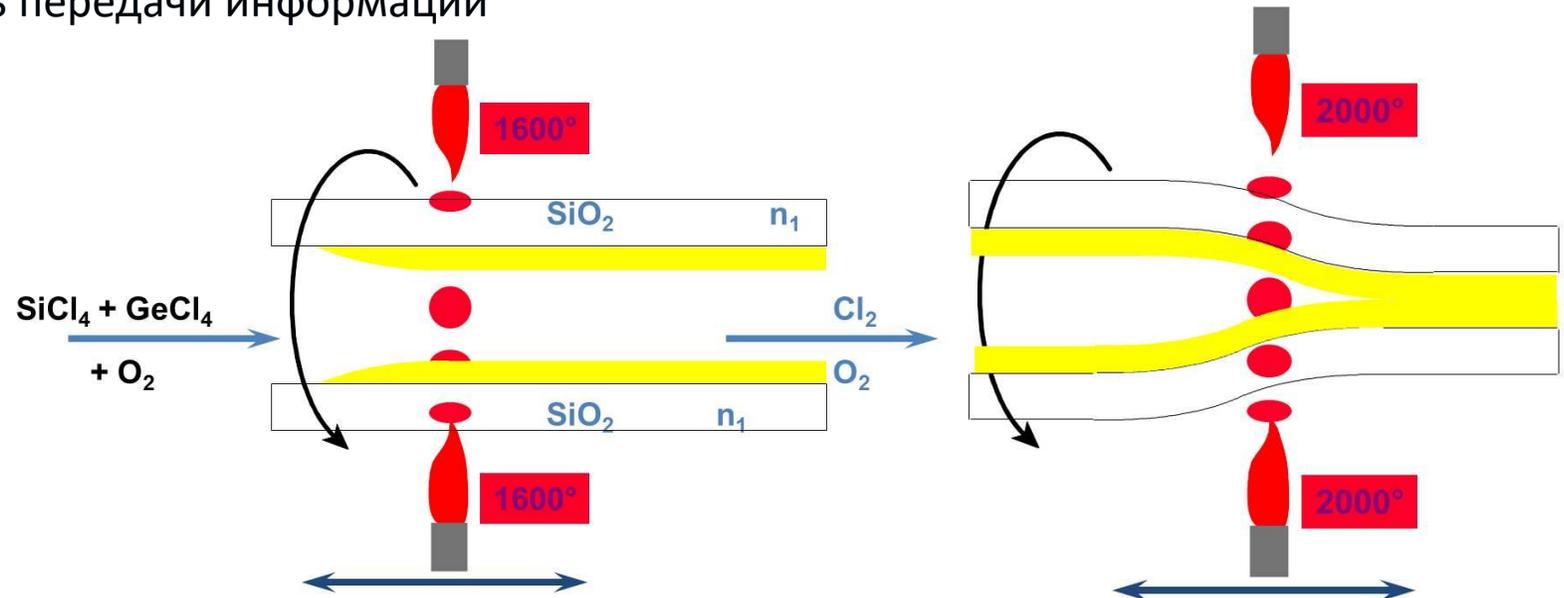
Достоинства оптических волокон

- Малое погонное затухание
- Помехозащищенность
- Оптические кабели имеют меньшие габариты и вес
- Исключительно высокая скорость передачи информации



В стеклянном волокне n меняется с помощью легирования:

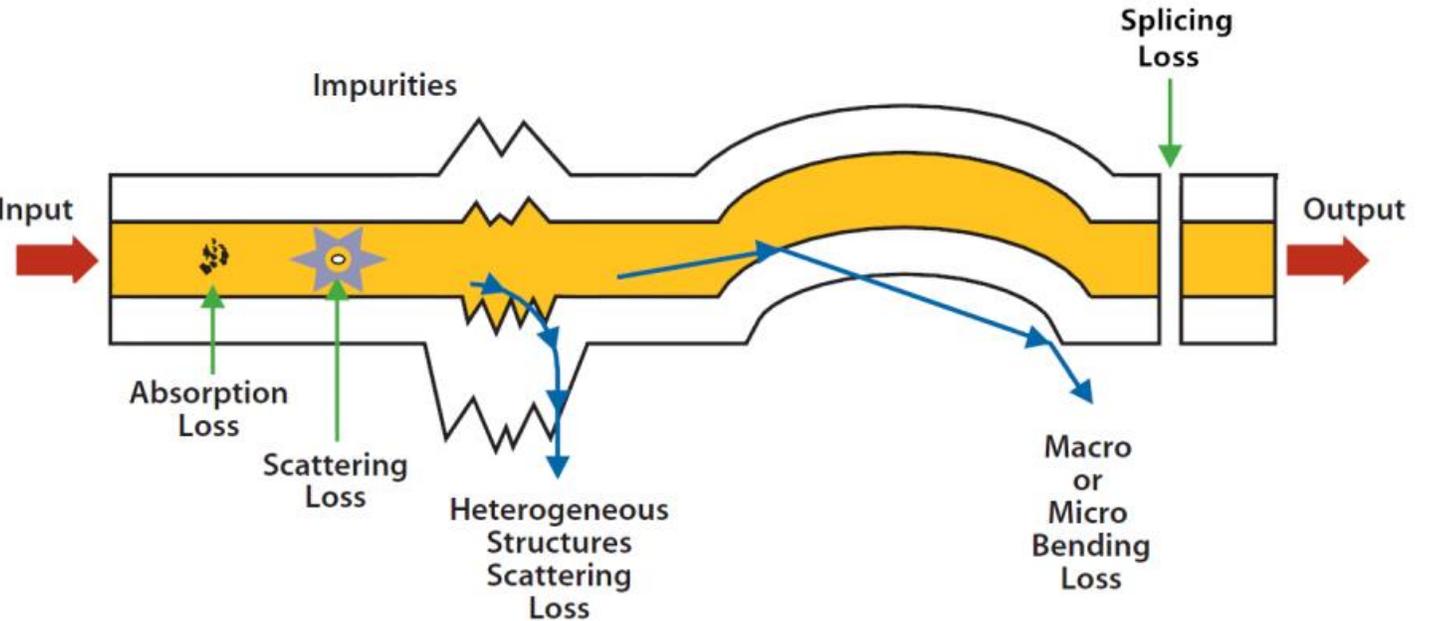
- B_2O_3 , F – уменьшают n ;
- GeO_2 , P_2O_5 – увеличивают n .



Потери в оптическом волокне

$$P_{out} = P_{in} \cdot \exp(-\alpha L)$$

$$\alpha_{dB/km} = -\frac{10}{L} \cdot \log\left(\frac{P_{out}}{P_{in}}\right)$$



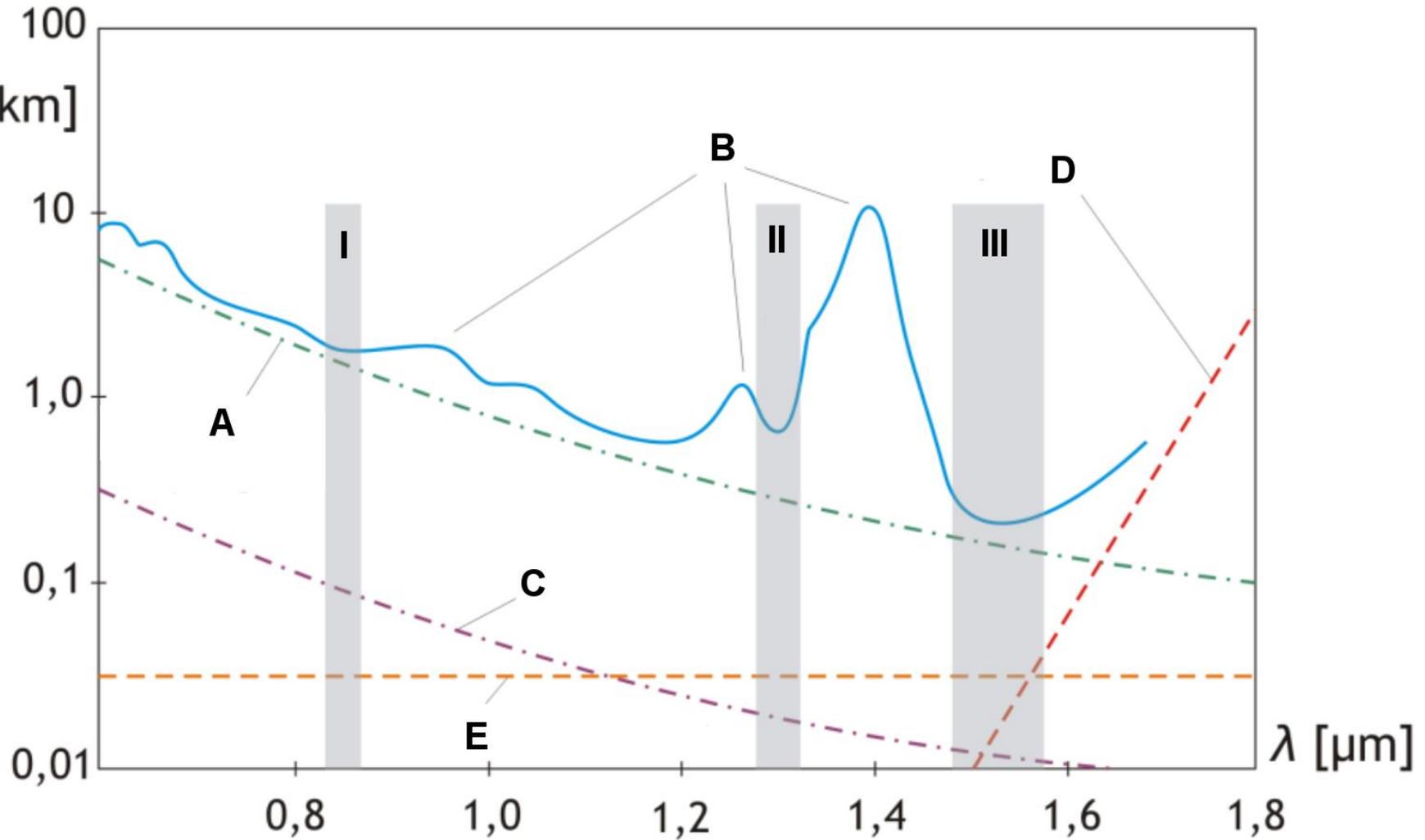
Уменьшение мощности сигнала при распространении его по волокну

- dBm - это децибелы относительно милливатта (mW)
- Absorption Loss-часть энергии поглощается примесями в волокне
- Потери из-за рассеивания- рассеивание на неоднородностях оптического волокна (Rayleigh scattering)
- Рассеивание на поверхности сердцевина-оболочка. Вызывает перемешивание мод (mode coupling) или смешением мод (mode mixing).
- Потери из-за изгибов волокна возникают, лишь когда величина изгиба заставляет лучи света падать под углом меньше критического.

Параметры затухания

- I II III – transmission windows
- A – Rayleigh scattering
- B – Hydroxyl ion absorption
- C – UV absorption
- D – IR absorption
- E – Fiber losses

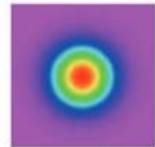
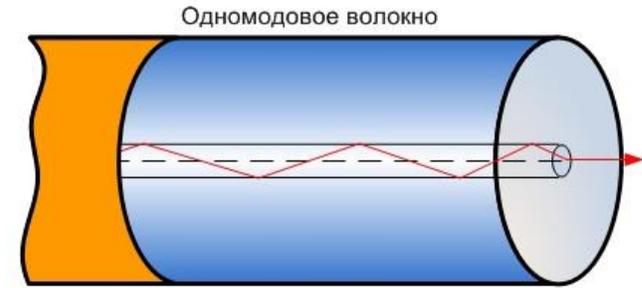
$$\alpha_R = C / \lambda^4$$



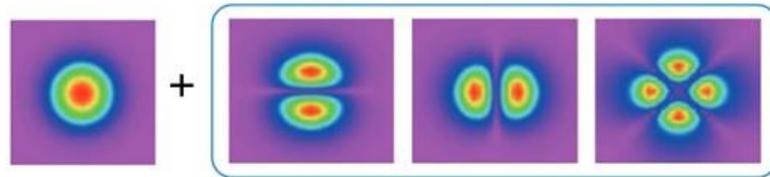
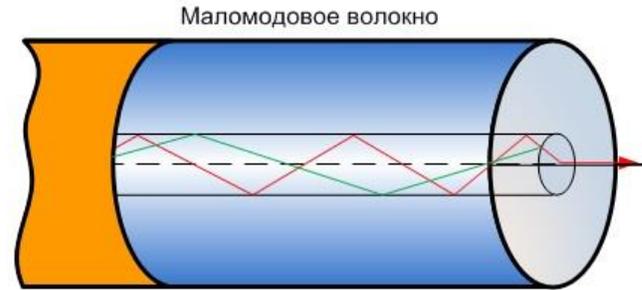
Моды в оптическом волокне

Число мод зависит от соотношения диаметра сердечника световода и длины волны.

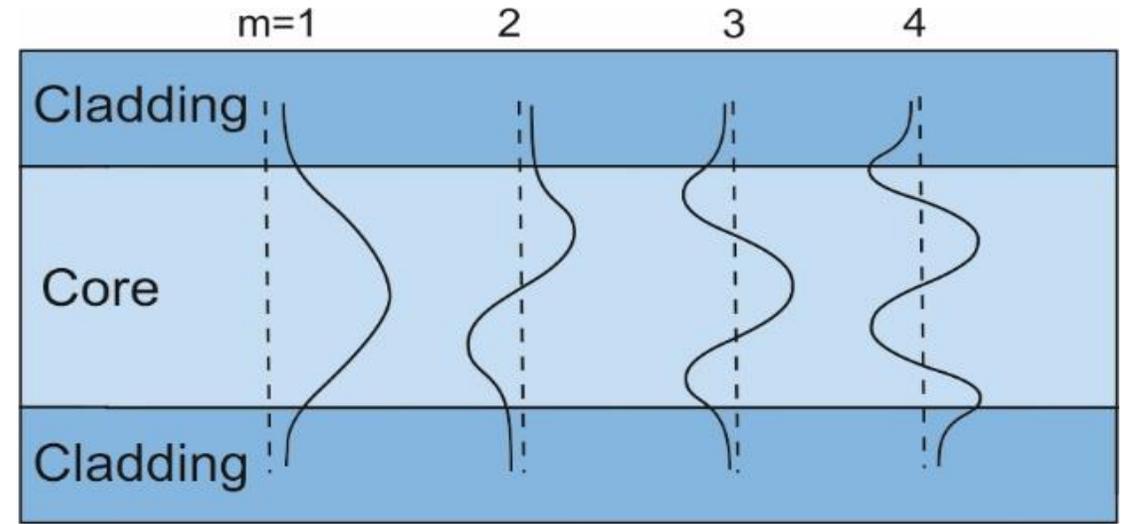
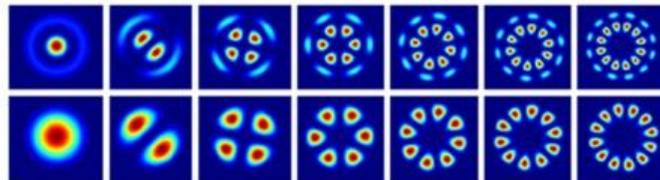
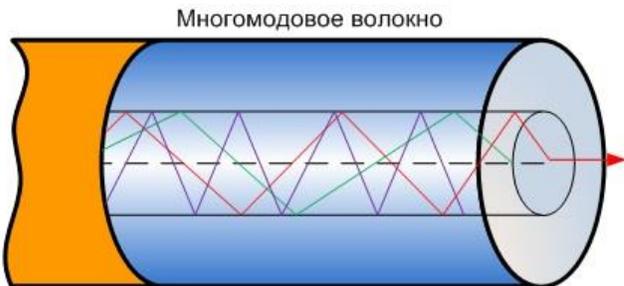
$$V \equiv (2\pi a / \lambda) \sqrt{n_c^2 - n_0^2}$$



Основная мода

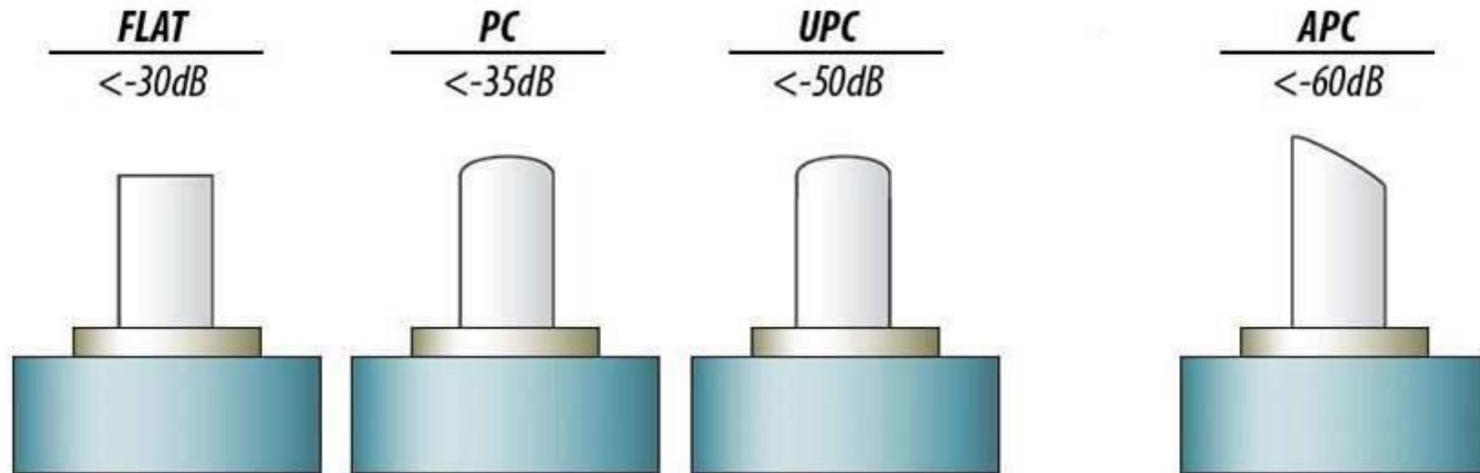


Несколько мод более высокого порядка



Оптическая мода представляет собой вид (конфигурацию) световой волны, характеризуемую определенным пространственным распределением светового поля по сечению оптоволоконной системы, имеющий определенную собственную частоту (длину волны) и распространяющийся со своей скоростью.

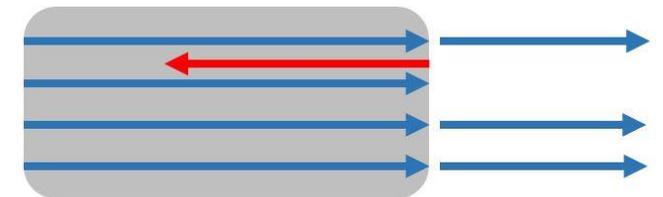
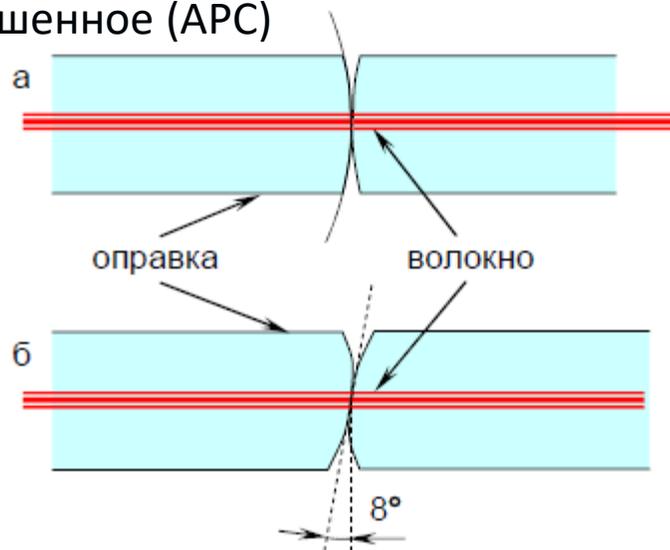
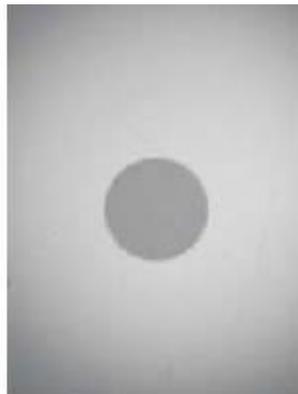
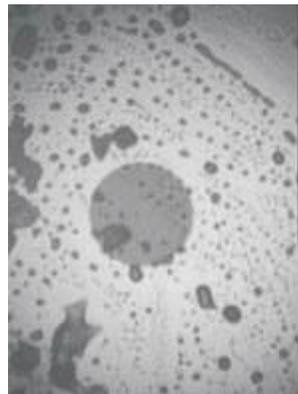
Типы полировок волокна



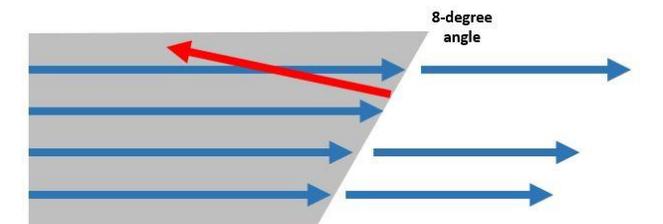
Разъемные соединения оптических волокон:

а – прямое стыковое (PC),

б – скошенное (APC)



UPC

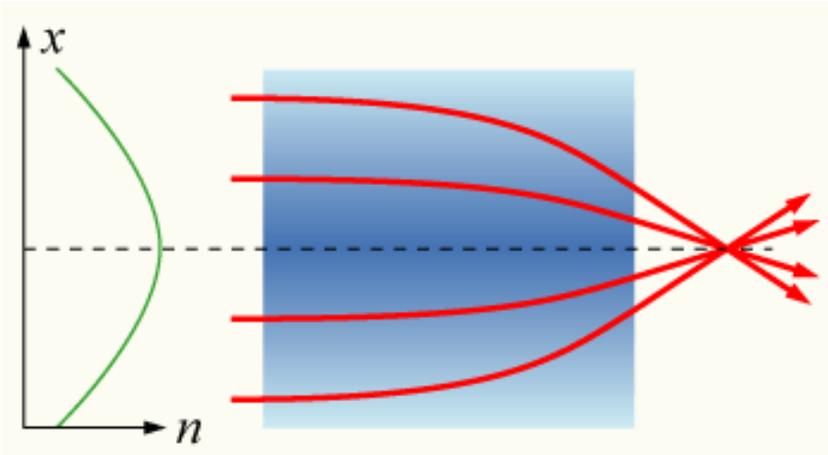


APC

Ввод/вывод излучения

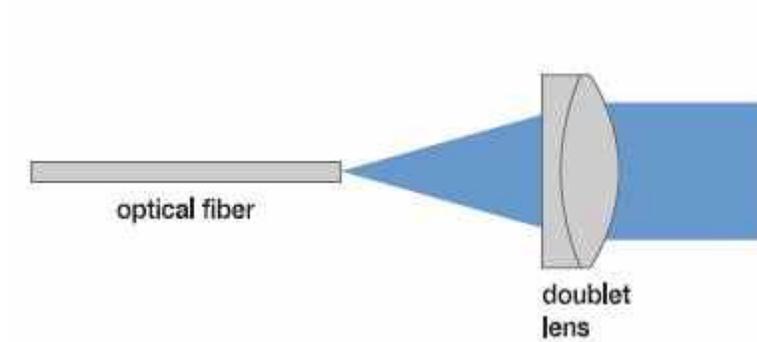
Градиентные линзы

Управление светом осуществляется не толщиной стекла, а переменной оптической плотностью

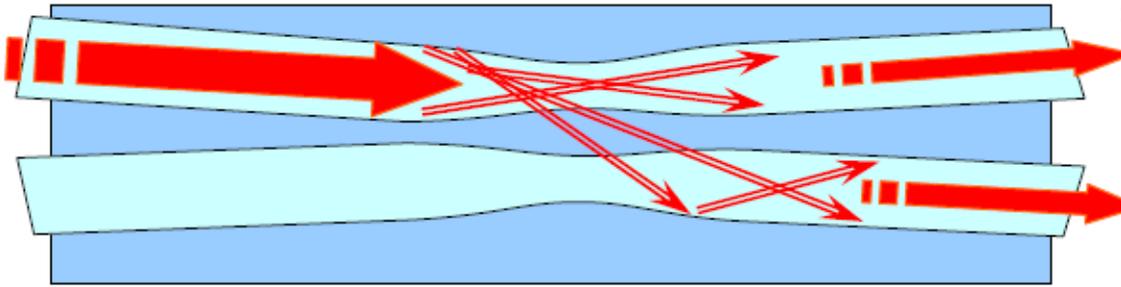


Коллиматоры

Управление светом осуществляется с помощью комбинаций линз.



Опволоконные разветвители

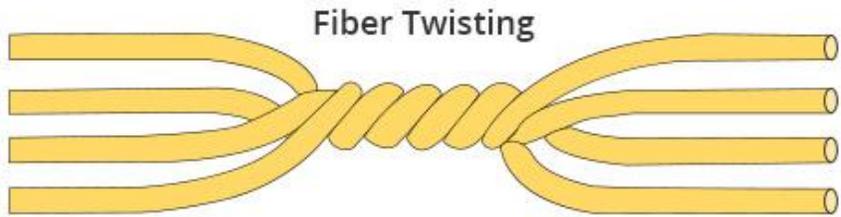


Существует два типа опволоконных сплиттеров, если их классифицировать по технологии изготовления:

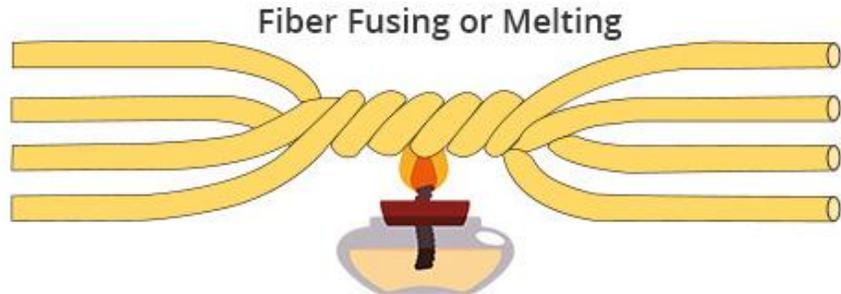
FBT - сплиттер с плавленым контуром.

PLC - плоский светоделитель.

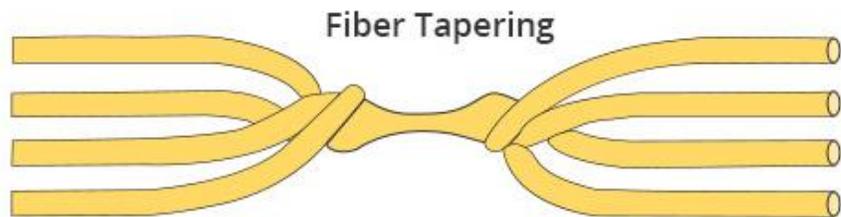
Fused Biconic Tapered



Fiber Twisting

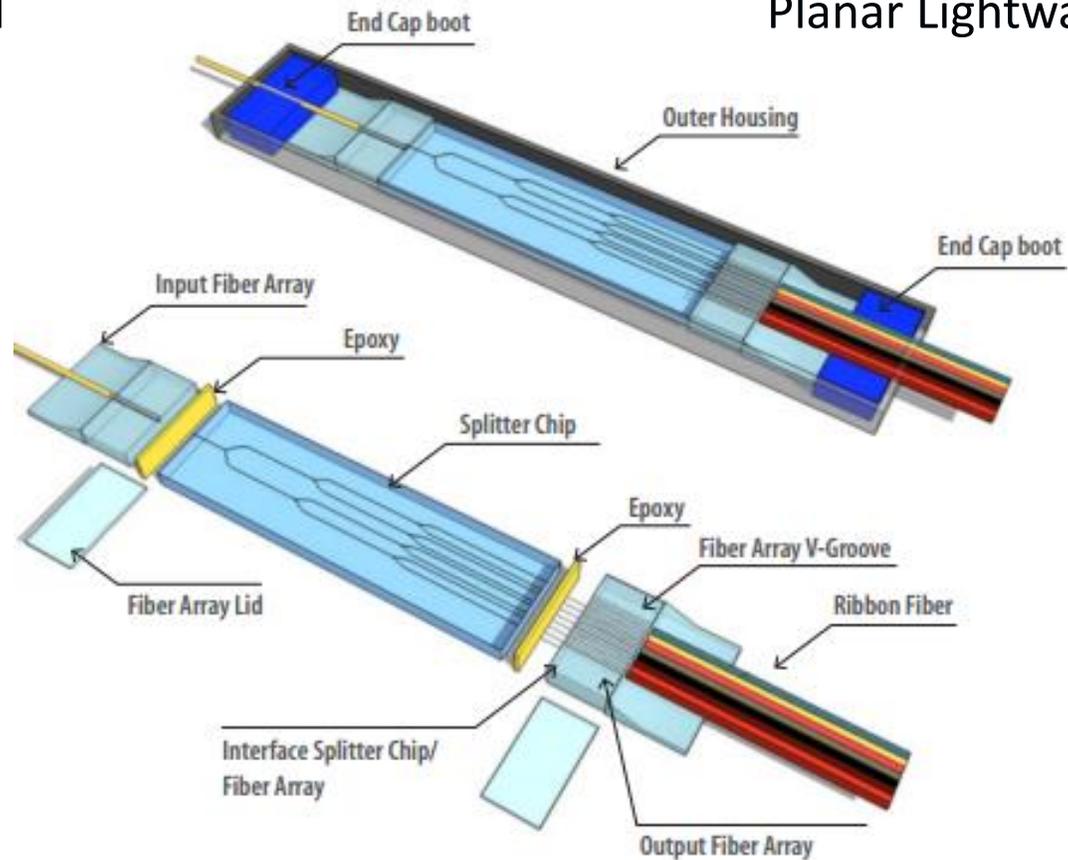


Fiber Fusing or Melting



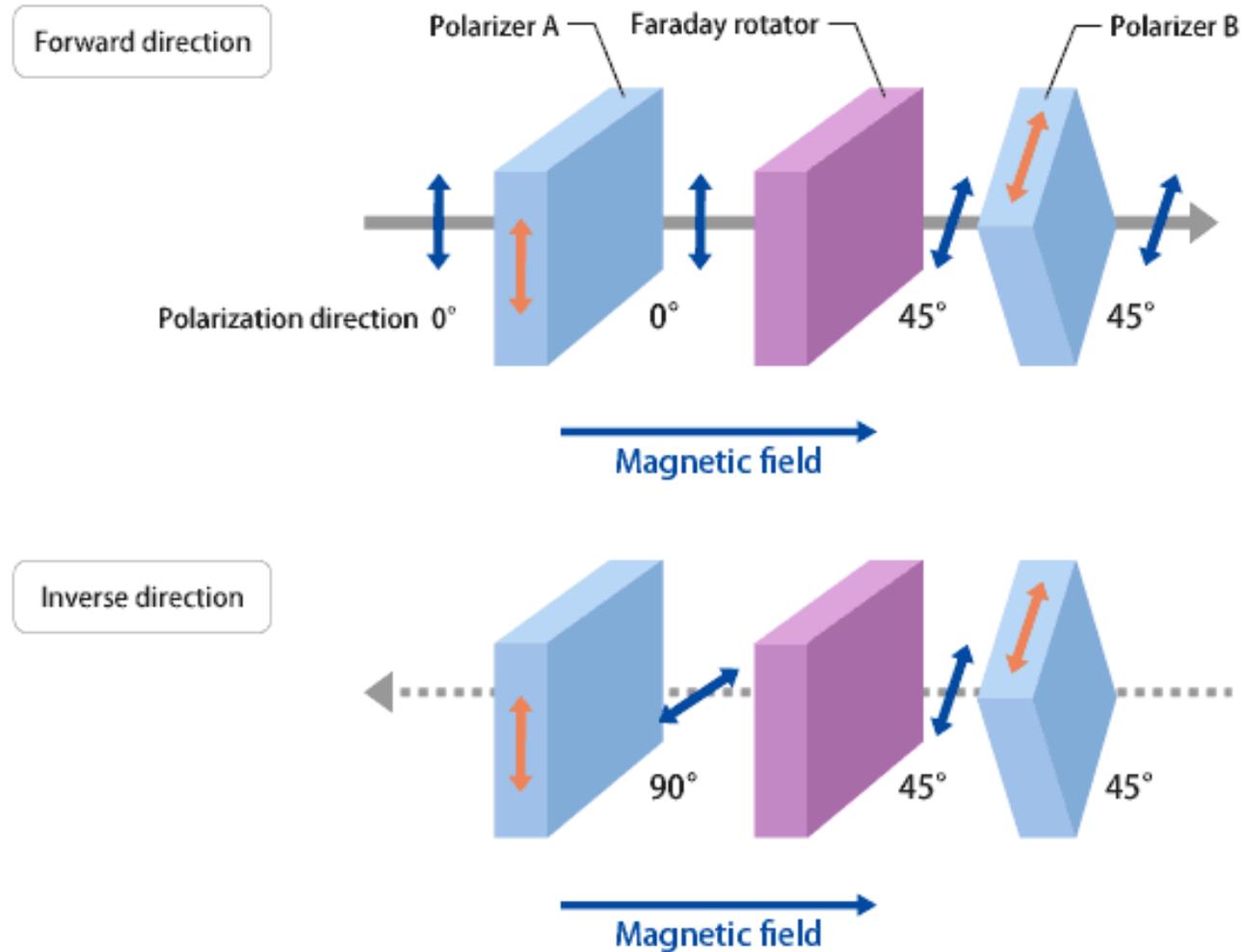
Fiber Tapering

Planar Lightwave Circuit



Оптоволоконные разветвители

Оптический изолятор построен на эффекте Фарадея. Он позволяет проходить излучению только в одну сторону.

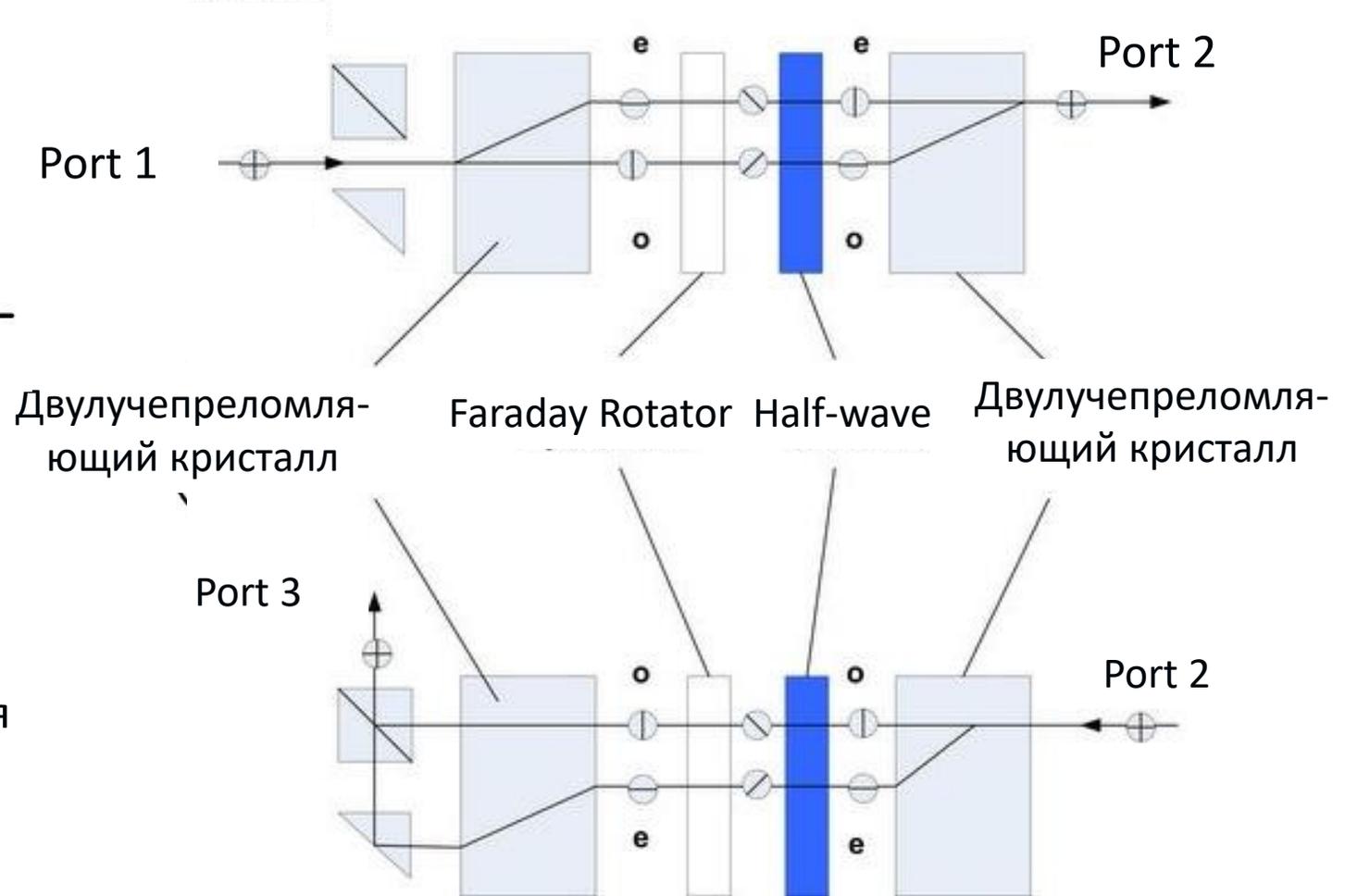


Оптический циркулятор

Свет, поступающий в любой порт, выходит из следующего.



Свет входит в порт 1, излучается из порта 2, но если часть излучаемого света отражается обратно в циркулятор, он не выходит из порта 1, а вместо этого выходит из порта 3



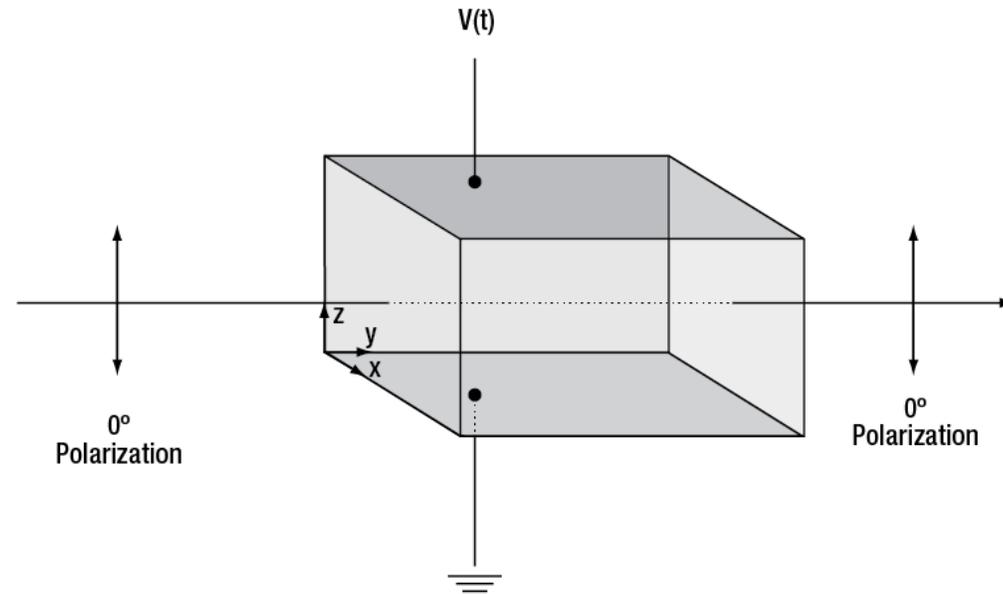
Фазовый электрооптический модулятор

Фазовый модулятор ЕО применяет управляемый напряжением сдвиг фазы света, не влияя на его поляризацию. Входной свет линейно поляризован и выровнен с оптической осью (параллельной оси z на этой диаграмме) кристалла.

Модуляция $n_{||}$ контролирует фазовую модуляцию света; значение n_{\perp} нет.

$$\Delta\varphi = \frac{\pi}{\lambda} n^3 r E L$$

V_{π} называется полуволновым напряжением и определяется как напряжение, необходимое для сдвига выходной фазы на пи радианы.

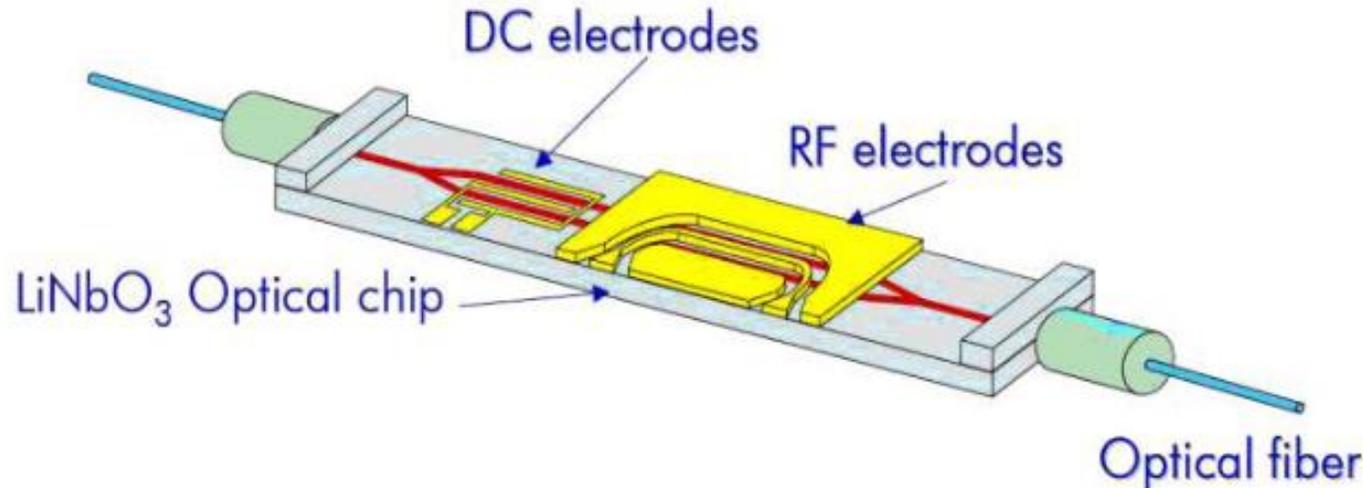


Амплитудный электрооптический модулятор

Электрооптические модуляторы Маха–Цендера–модуляторы интенсивности интерферометрического типа

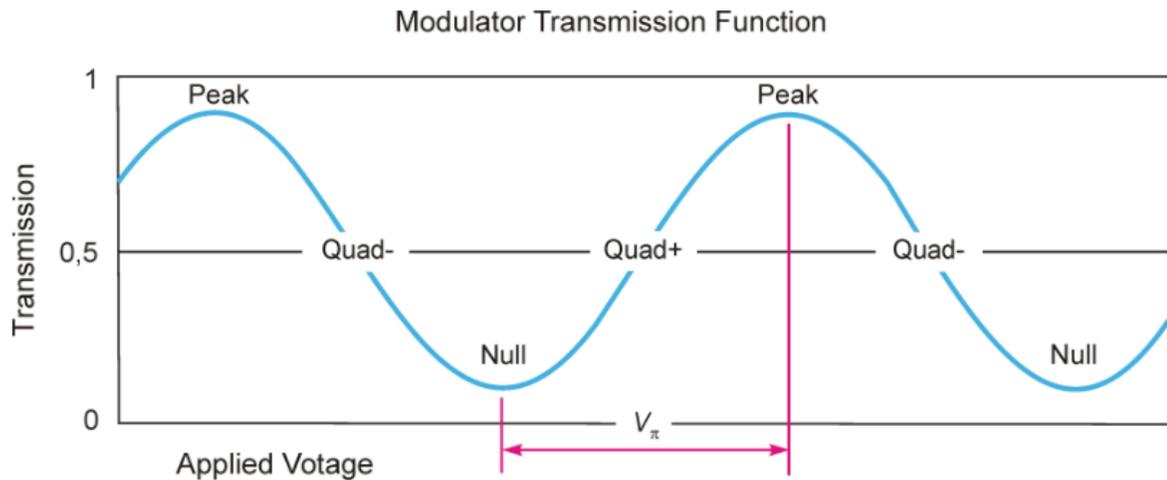
Передаточная функция интенсивности модулятора от приложенного к электродам напряжения $V(t)$

$$I_{\text{out}}(t) = T_{\text{mod}} \frac{I_{\text{in}}}{2} \left[1 + \cos \left(\frac{\pi}{V_{\pi}} V(t) - \varphi \right) \right]$$



Интегрально-оптический СВЧ-модулятор Маха–Цендера: *LiNbO₃ Optical chip*–кристаллическая подложка (электрооптический кристалл); *DC electrodes*–DC-электроды смещения; *RF electrodes*–СВЧ-электроды в виде копланарной линии бегущей волны; *Optical fiber*–оптическое волокно

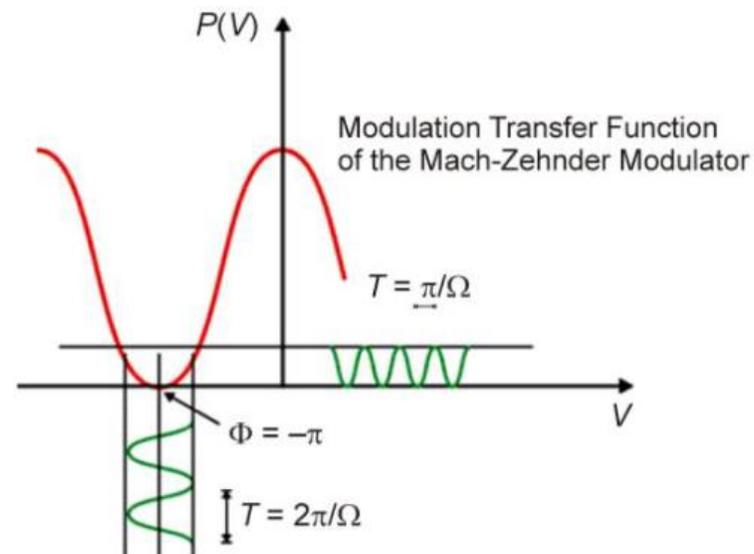
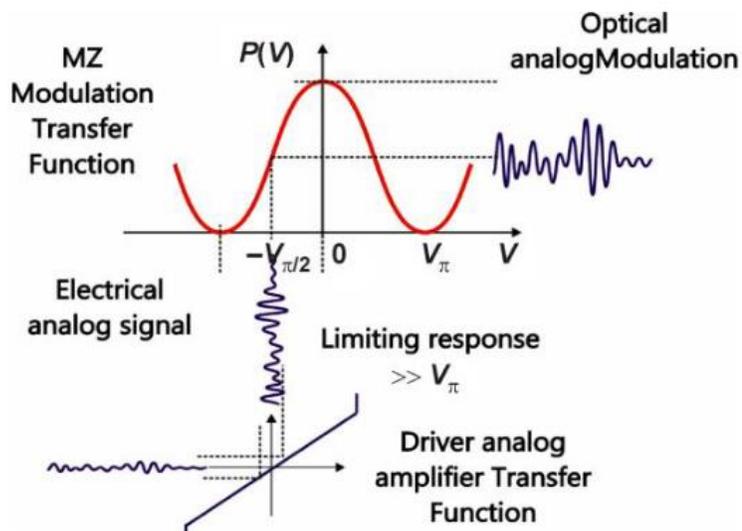
Амплитудный электрооптический модулятор



Передаточная функция модулятора Маха–Цендера

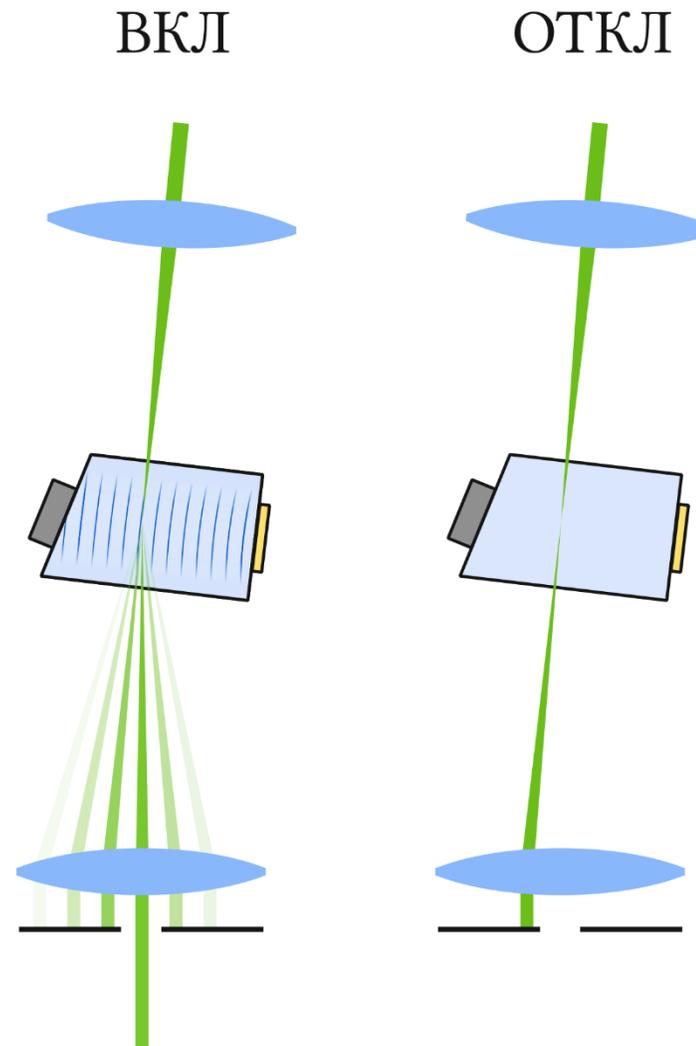
Аналоговая модуляция в рабочей точке квадратуры QUAD+

Аналоговая модуляция в рабочей точке MIN

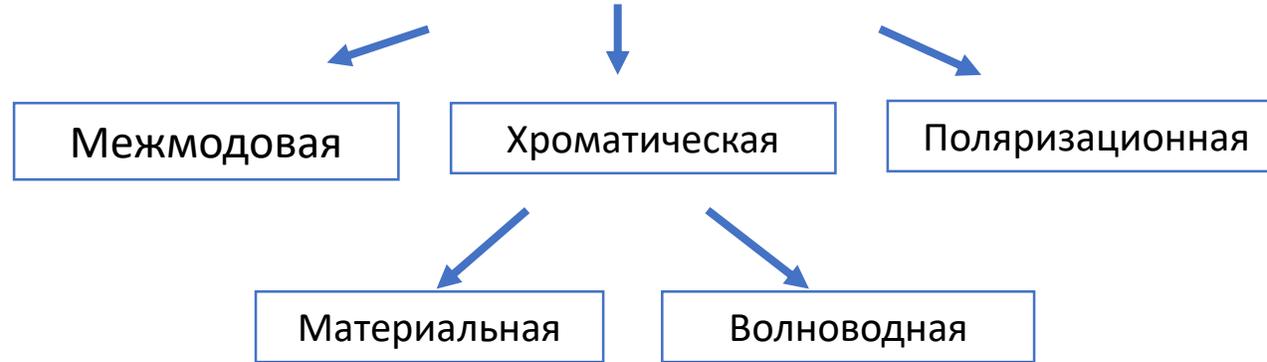


Акустооптический модулятор

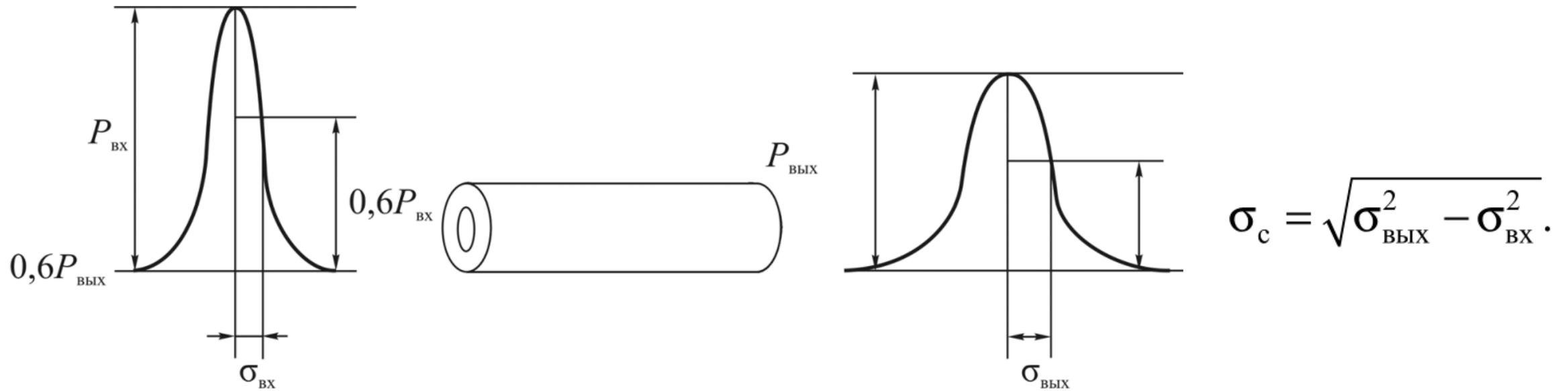
Устройство для изменения интенсивности пропускаемого света, вследствие его дифракции на решётке, образуемой в стекле в результате пространственной модуляции показателя преломления акустической волной.



Дисперсия

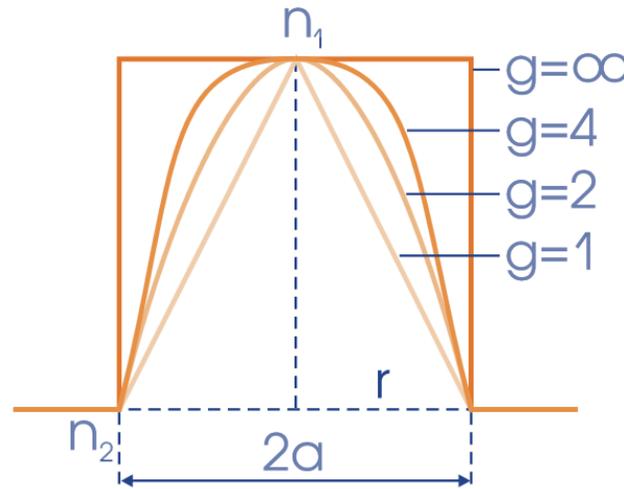
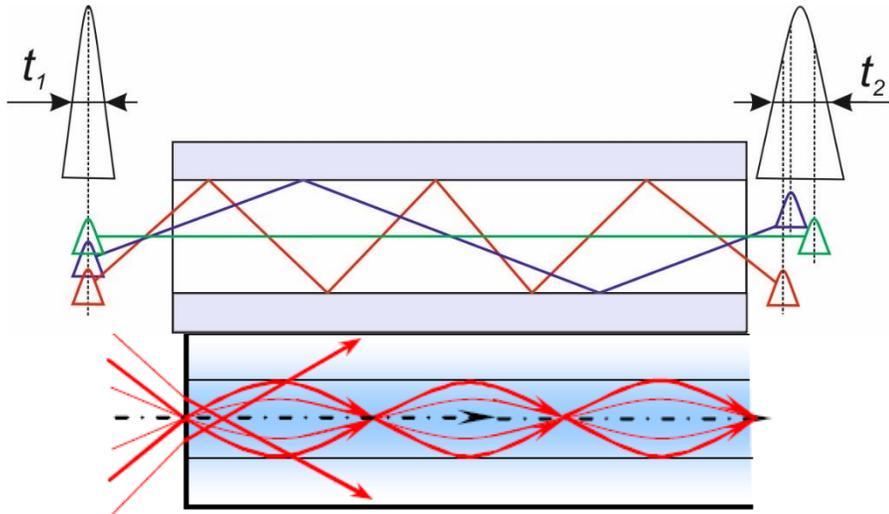


Дисперсия оптического волокна – уширение оптических импульсов – имеет размерность времени



Межмодовая дисперсия

Межмодовую дисперсию можно выразить как увеличение групповой задержки высших мод по отношению к основной при прохождении короткого импульса через единицу длины волновода, чаще в пикосекундах на километр.



$$n(r) = n_1 \left[1 - \Delta \left(\frac{r}{a} \right)^g \right] \quad \text{при } r < a$$

$$\Delta = \frac{NA^2}{2n_2^2} = \frac{n_2^2 - n_1^2}{2n_2^2}$$

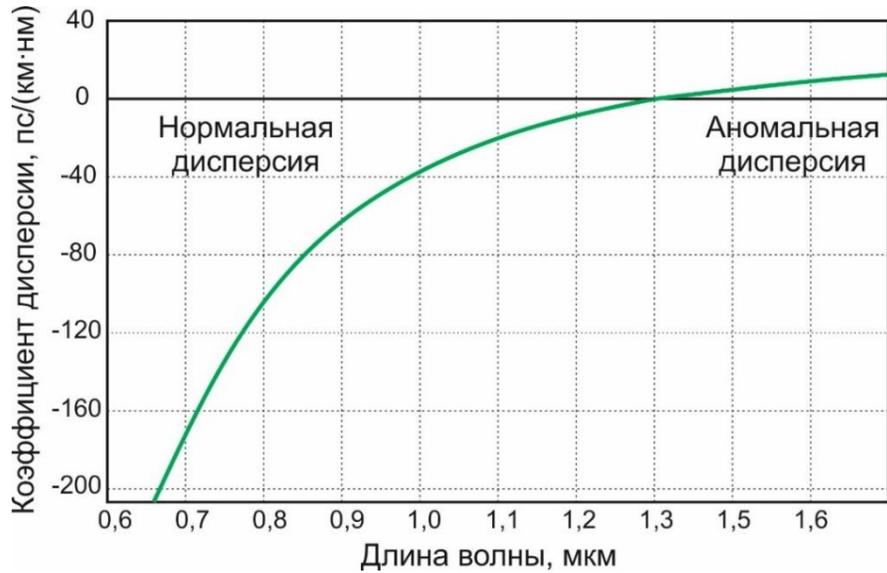
Модовая дисперсия может быть уменьшена тремя путями:

- изменением профиля показателя преломления, то есть использованием градиентного волокна;
- уменьшением диаметра сердцевины;
- подавлением мод высшего порядка.

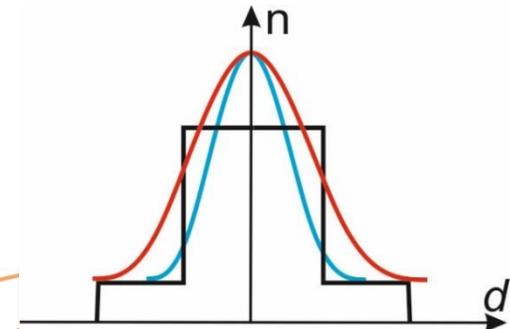
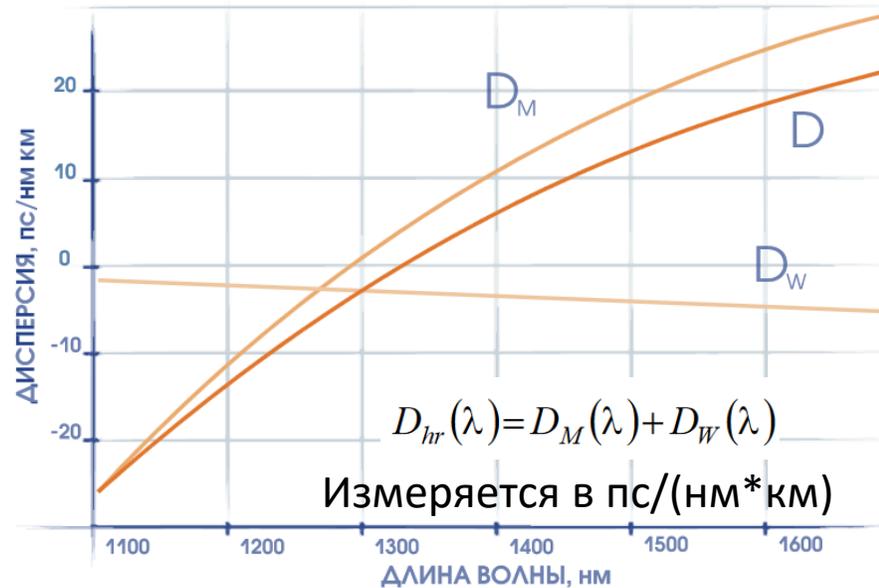
Хроматическая дисперсия

Материальная дисперсия – это дисперсия, обусловленная зависимостью показателя преломления от длины волны

Волноводная дисперсия – дисперсия связанная с изменением эффективного показателя преломления моды из-за распространения света в оболочке волокна.



Распределение интенсивности моды с большей и меньшей длиной волны

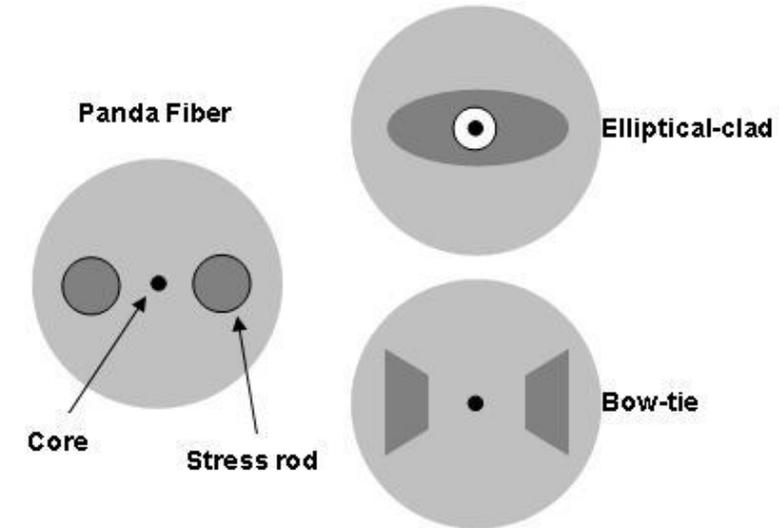
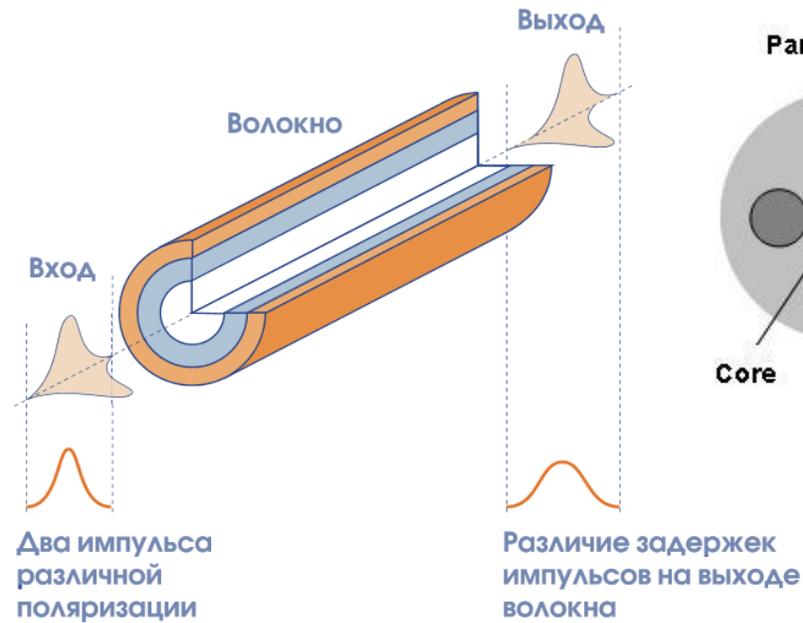
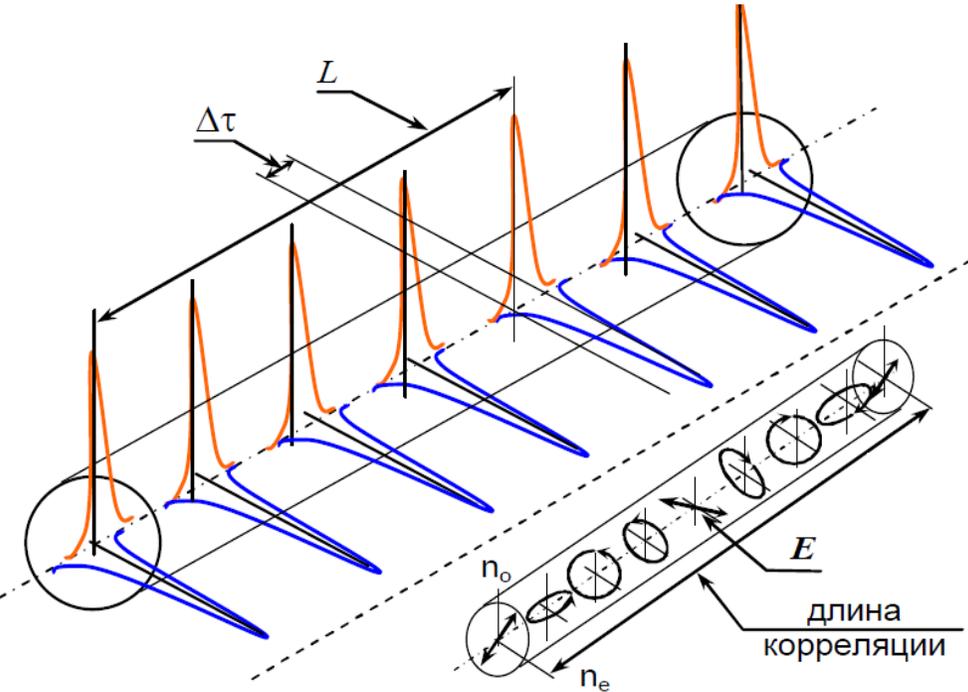


$$\tau_M(\Delta\lambda, l) = \Delta\lambda \cdot l \cdot \frac{\lambda}{c} \cdot \frac{d^2 n}{d\lambda^2} = \Delta\lambda \cdot l \cdot D_M(\lambda)$$

$$\tau_W(\Delta\lambda, l) = \Delta\lambda \cdot l \cdot \frac{\lambda}{c} \cdot \frac{2n_1^2 \Delta}{c\lambda} = \Delta\lambda \cdot l \cdot D_W(\lambda)$$

Поляризационная дисперсия

Разделение мод, а точнее их задержка друг относительно друга (в пс), на выходе из волоконного световода называется поляризационной модовой дисперсией



Типы РМ волокон

D_{PMD} – это параметр дисперсии с типичными значениями, находящимися в диапазоне $0.1-1 \text{ пс/км}^{1/2}$.