

Лазеры: общие принципы

И.И. Рябцев

В.И.Тельнов,
Лекции по современной экспериментальной физике
Новосибирский Государственный университет



Институт физики полупроводников СО РАН
Новосибирский государственный университет

И.И.Рябцев

ФИЗИКА ЛАЗЕРОВ
(обзорная лекция)

ЛАЗЕРЫ

Light **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation

1916 *A.Enstein* – постулат о вынужденном испускании света

1939 *В.А.Фабрикант* – предложение по усилению света

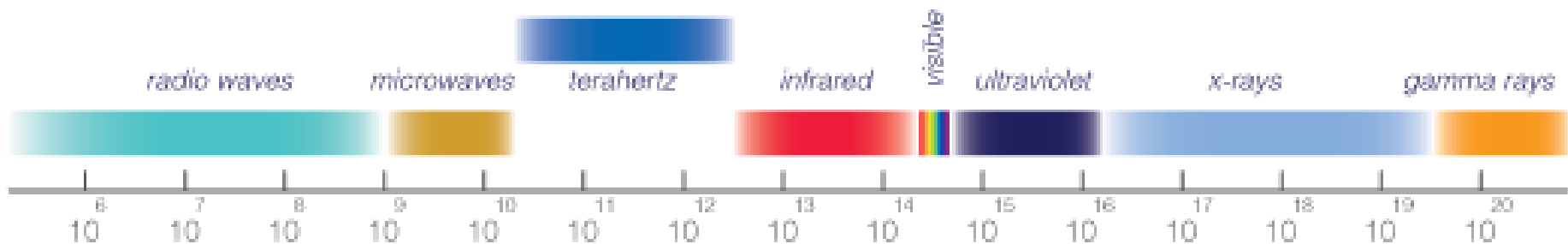
1953 *C.H.Townes* – импульсный мазер на аммиаке

1954 *Н.Г.Басов, А.М.Прохоров* – непрерывный мазер на аммиаке

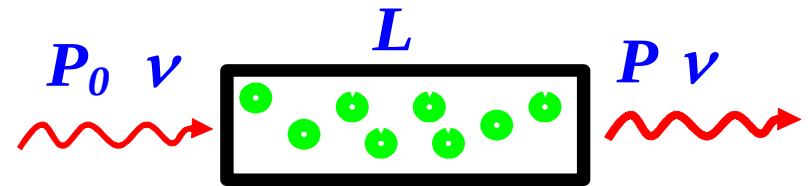
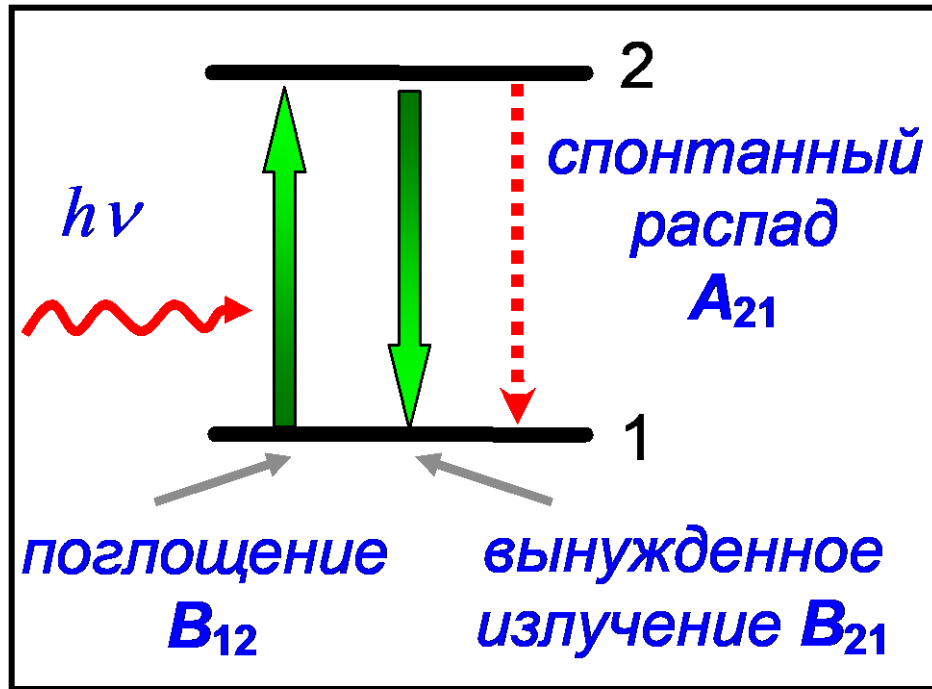
1958 *А.М.Прохоров* – предложение по открытому резонатору

1960 *Th.Maiman* – импульсный твердотельный рубиновый лазер

1961 *A.Javan, W.Bennett, D.Herriot* – непрерывный He-Ne лазер



ПРИНЦИП УСИЛЕНИЯ СВЕТА

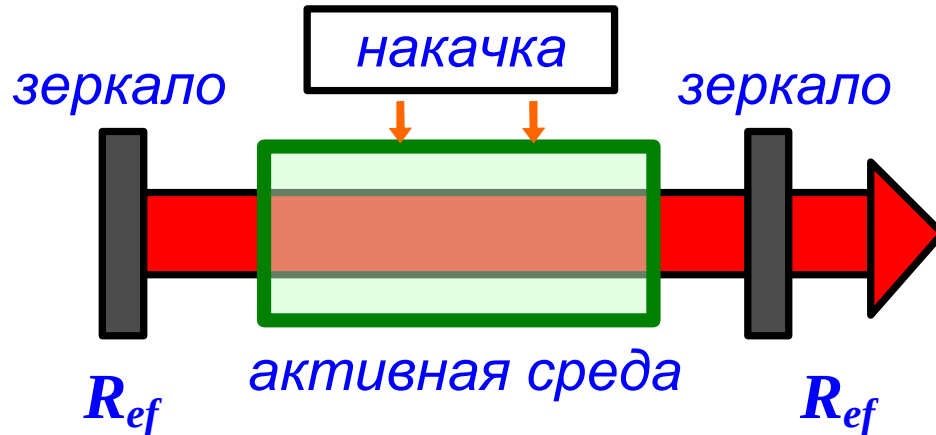


$$P = P_0 \exp(\alpha_v L)$$

$$\alpha_v = \frac{\lambda^2}{4} A_{21} \left(N_2 - \frac{g_2}{g_1} N_1 \right)$$

$$N_2 > \frac{g_2}{g_1} N_1 \quad \text{инверсия населенностей}$$

ОПТИЧЕСКИЙ КВАНТОВЫЙ ГЕНЕРАТОР (ЛАЗЕР)



Условие генерации
(самовозбуждения)

$$R_{ef}^2 \exp(2\alpha_v L) \geq 1$$

- превышение усиления
над потерями за обход

Насыщение усиления

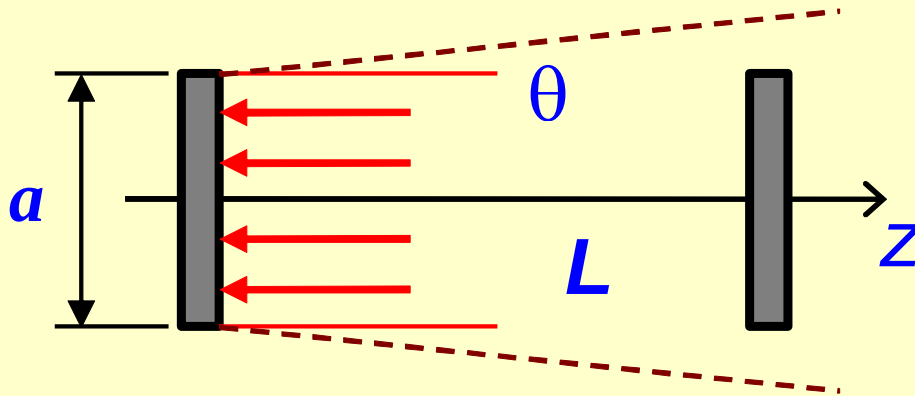
$$\alpha_v^H = \frac{\alpha_v^0}{1 + P / P_H}$$

Мощность генерации

$$P_\Gamma = P_H \left(\frac{\alpha_v^0 L}{1 - R_{ef}} - 1 \right)$$

ОТКРЫТЫЕ РЕЗОНАТОРЫ И СПЕКТР ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

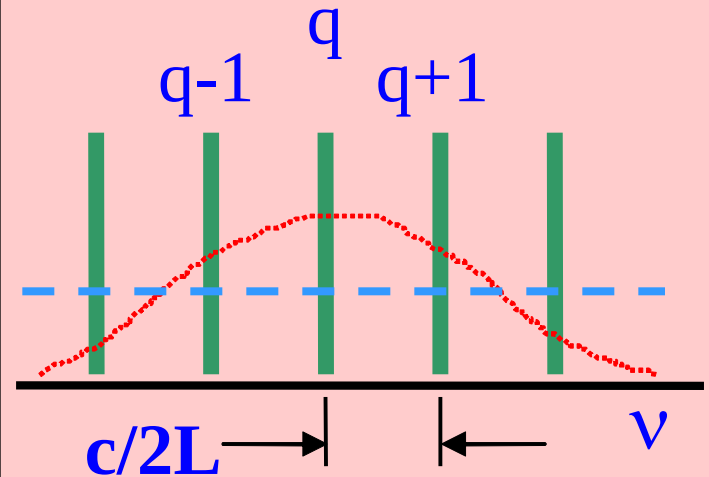
Резонатор Фабри-Перо



Угол дифракции $\theta = \lambda / a$

Дифракционные
потери $\sim \lambda L / a^2$

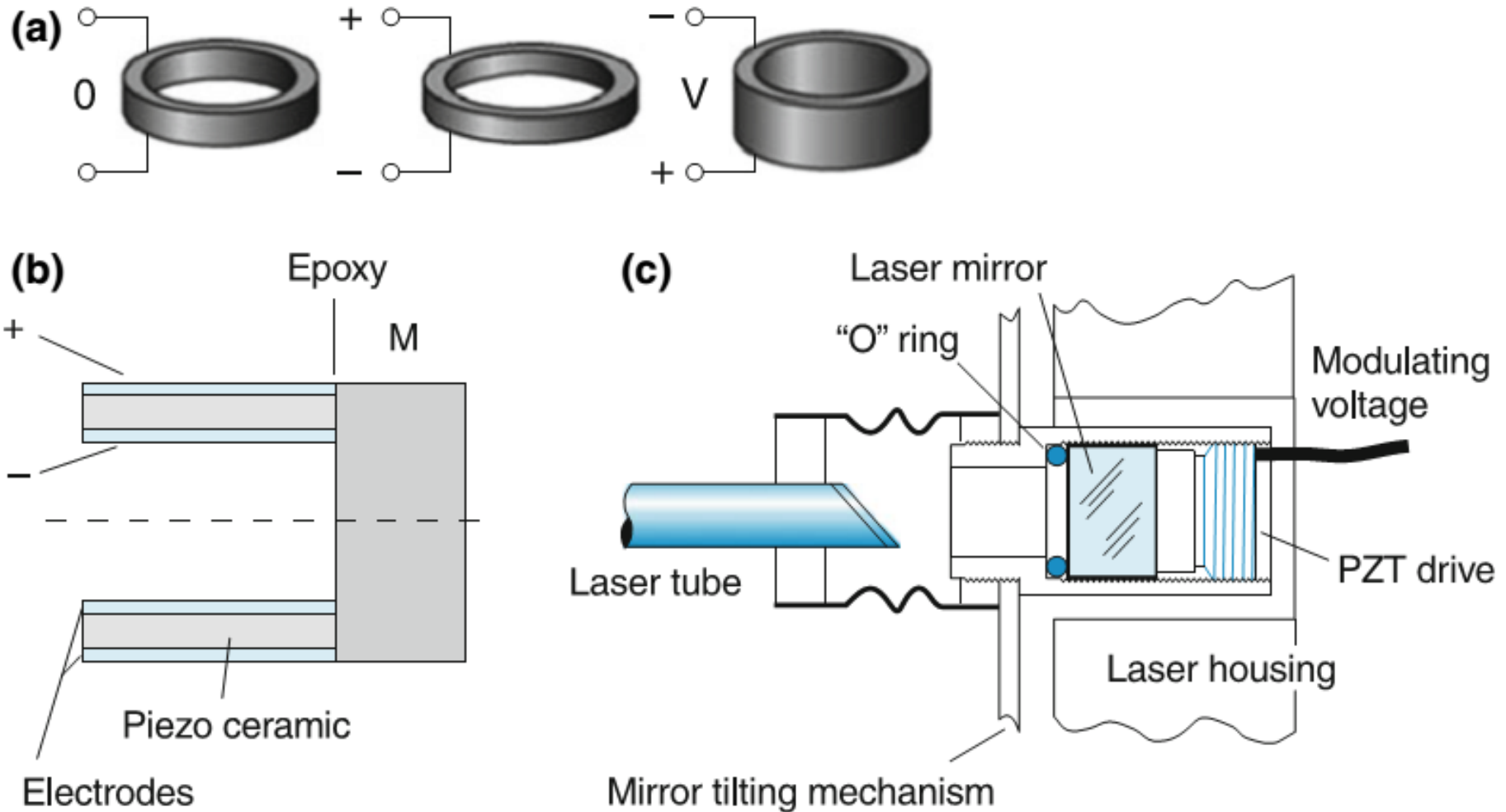
Спектр излучения



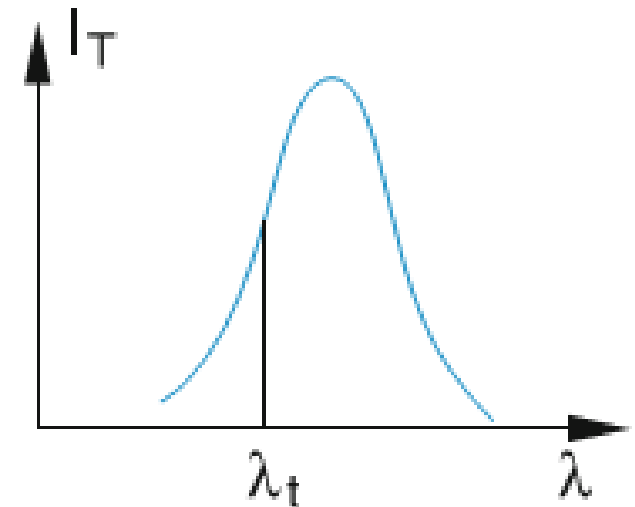
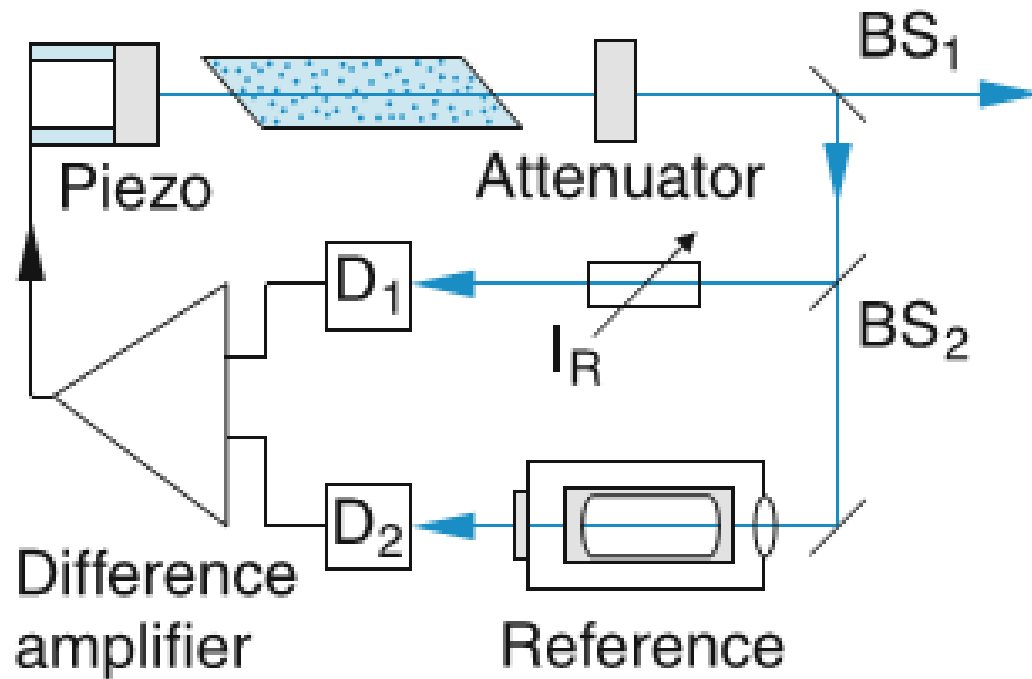
Частоты
продольных мод

$$\nu_q = q \frac{c}{2L}$$

Перестройка оптической частоты лазера с помощью зеркала на пьезоэлементе

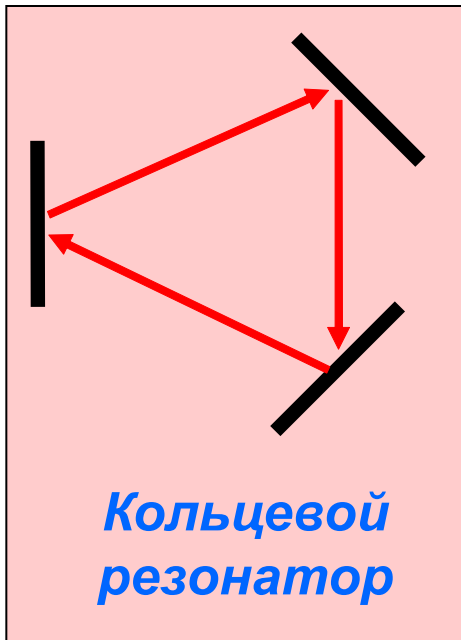


Стабилизация частоты лазера путем привязки к интерферометру Фабри-Перо

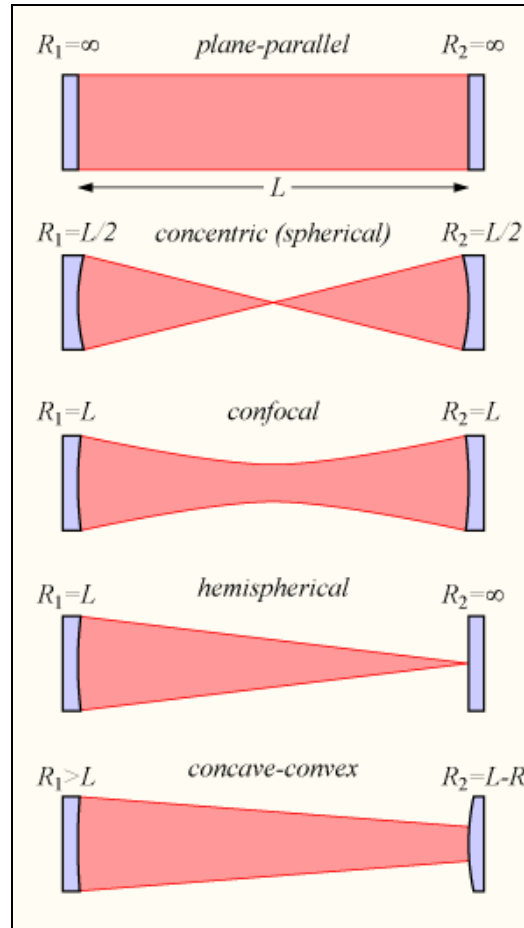


Типы резонаторов

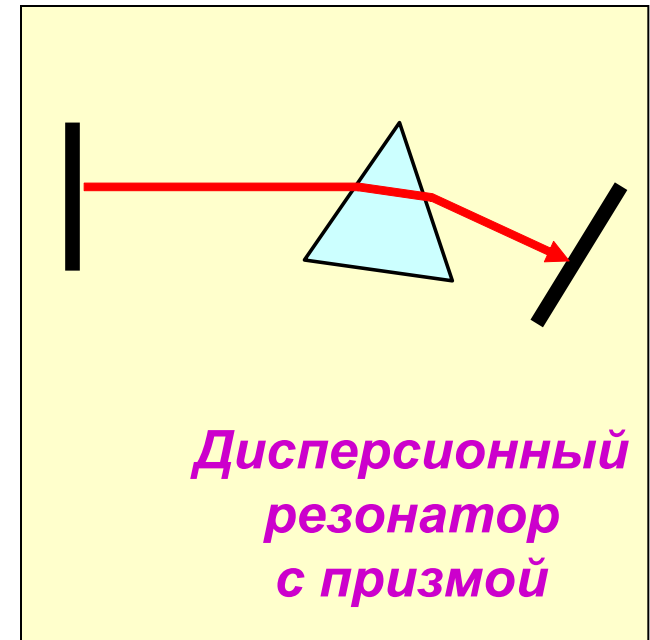
1. Линейные
2. Кольцевые



- 1'. Устойчивые
- 2'. Неустойчивые



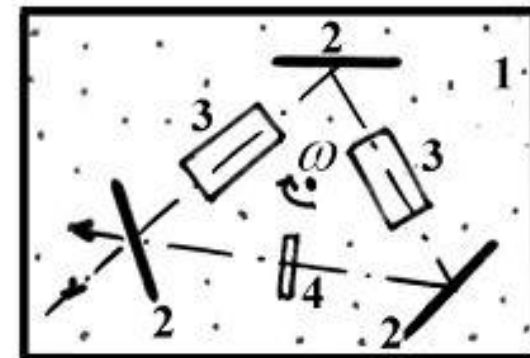
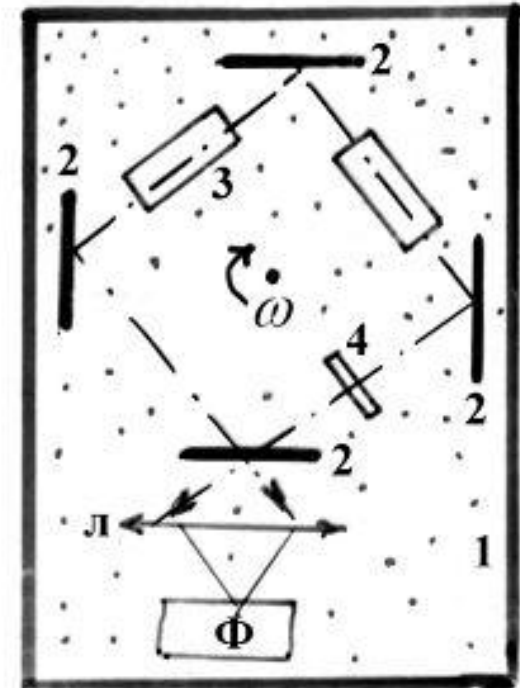
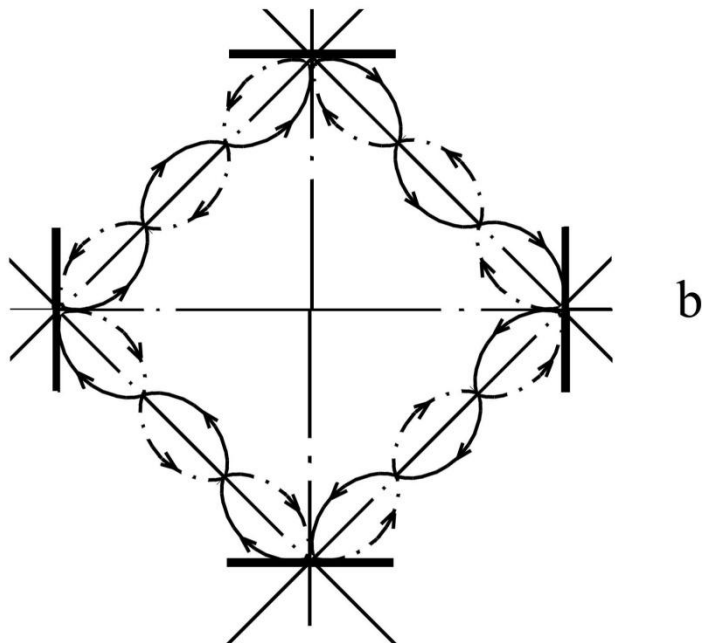
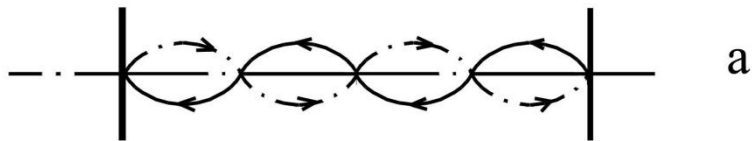
- 1''. Широкополосные
- 2''. Дисперсионные



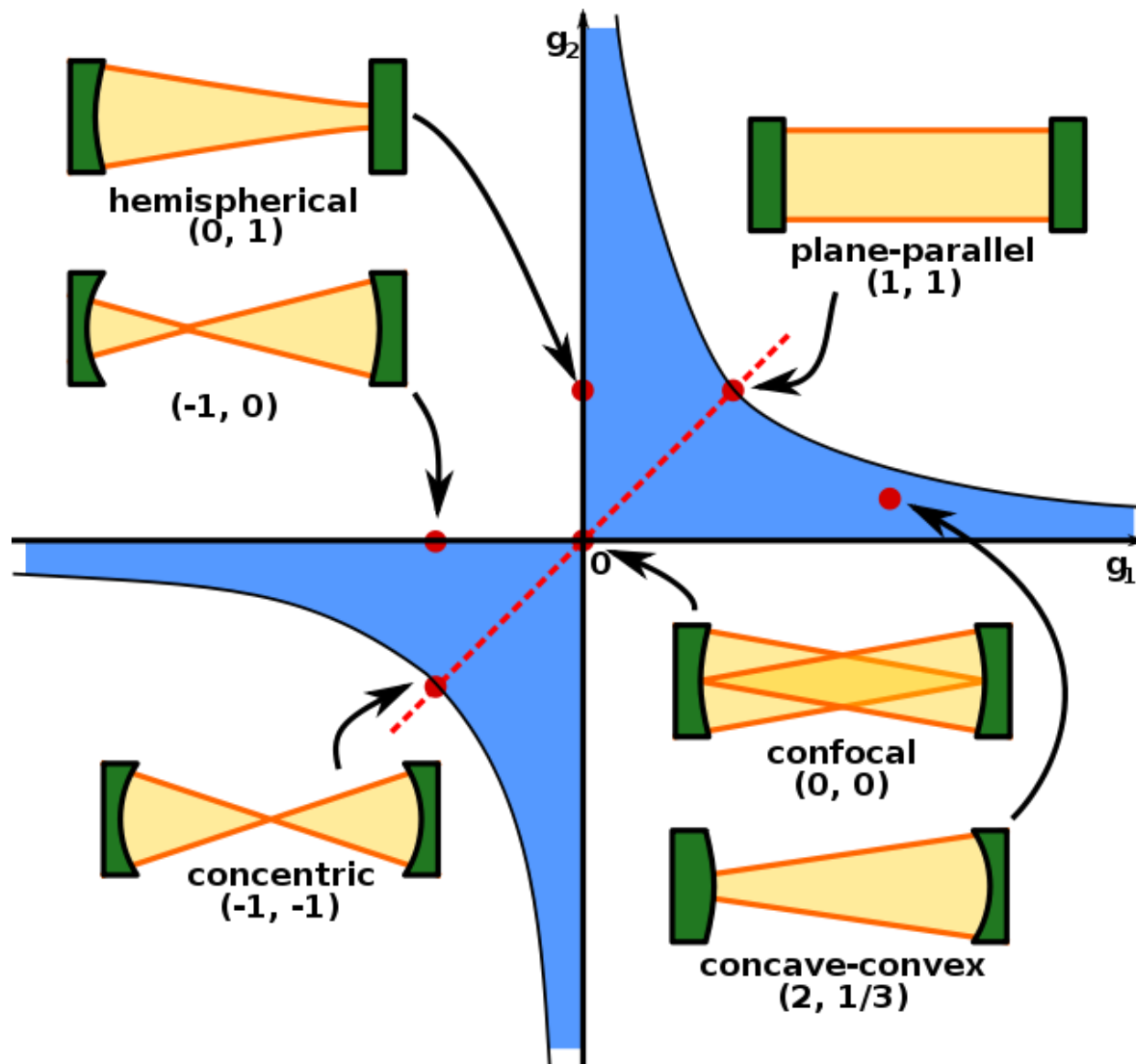
Линейные и кольцевые резонаторы

В линейном резонаторе образуется стоячая электромагнитная волна, стоящая вдоль оси резонатора.

В кольцевом резонаторе образуются две бегущие волны, движущиеся друг другу навстречу.



Области устойчивости линейных резонаторов

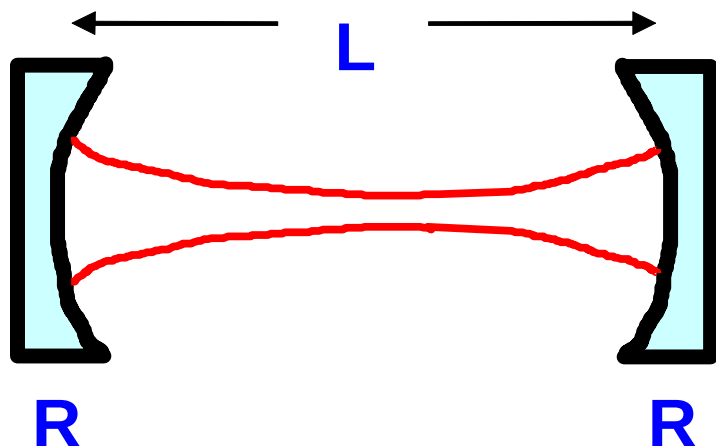


$$0 < \left(1 - \frac{L}{R_1}\right) \left(1 - \frac{L}{R_2}\right) < 1$$

$$g_1 = 1 - \frac{L}{R_1},$$

$$g_2 = 1 - \frac{L}{R_2}$$

Резонаторы со сферическими зеркалами

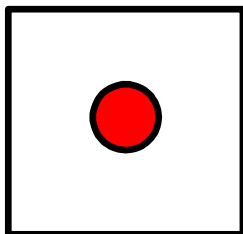


$L=2R$ концентрический

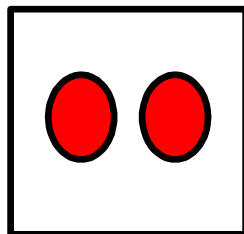
$L=R$ конфокальный

TEM_{mnq} моды поля

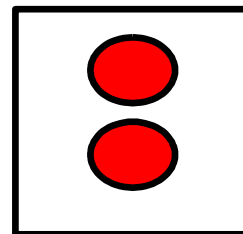
TEM_{00q}



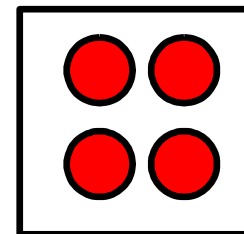
TEM_{10q}



TEM_{01q}



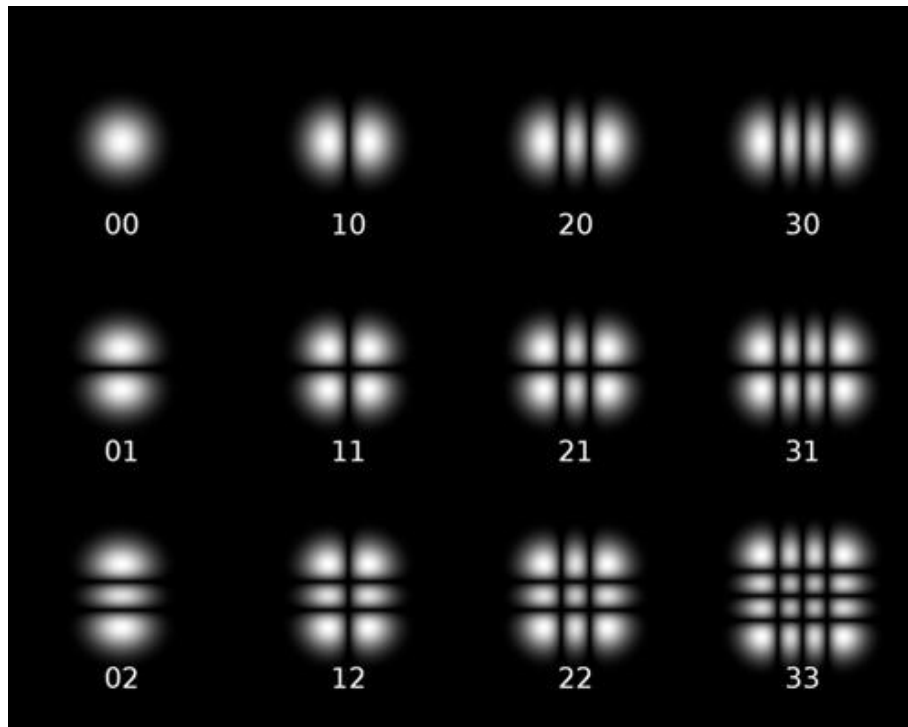
TEM_{11q}



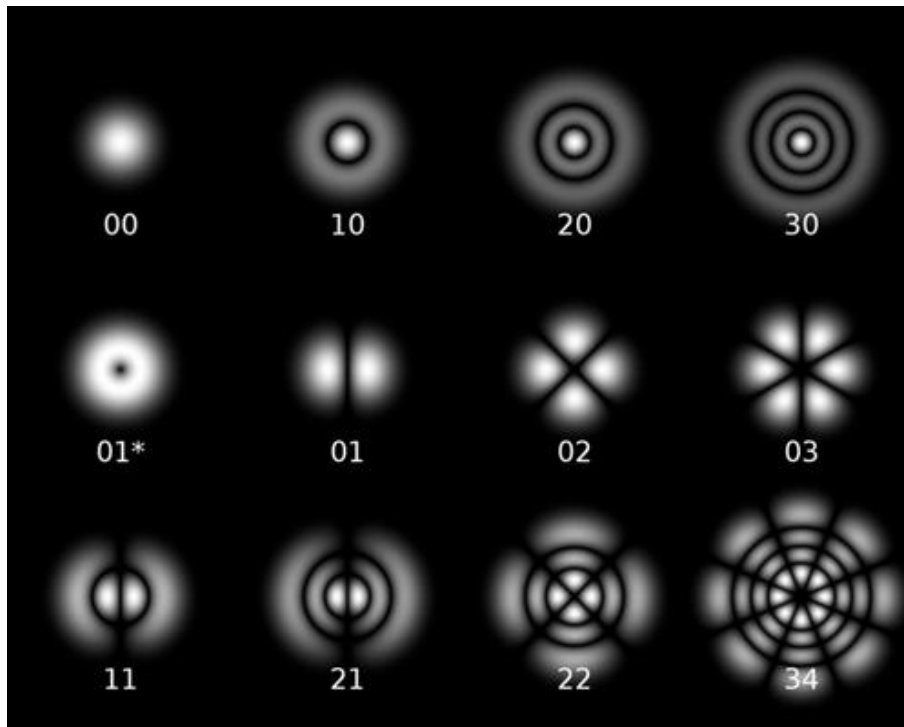
TEM_{00q} – Гауссов пучок с перетяжкой

$$w_0 = \sqrt{\frac{L\lambda}{2\pi}}$$

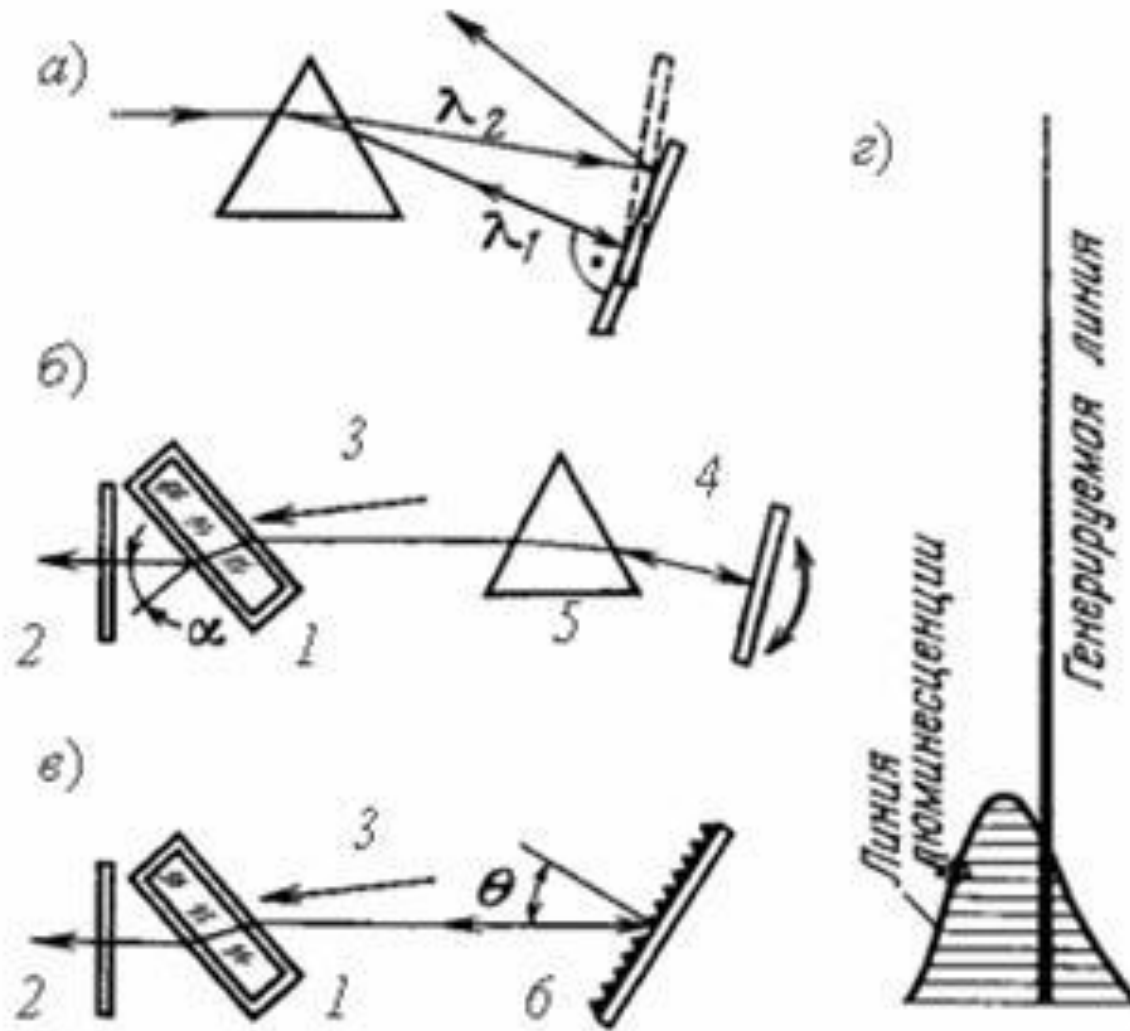
Поперечные моды резонатора с квадратными зеркалами



Поперечные моды резонатора с круглыми зеркалами



Резонаторы с дисперсионными элементами



Лазер на красителе с плавно перестраиваемой длиной волны:

- 1 – кювета с красителем;
- 2 – выходное зеркало резонатора;
- 3 – излучение накачки;
- 4 – поворачивающееся зеркало;
- 5 – призма;
- 6 – отражательная дифракционная решетка

ТИПЫ ЛАЗЕРОВ

1. Газовые лазеры
2. Твердотельные лазеры
3. Жидкостные лазеры
4. Плазменные лазеры
5. Рентгеновские лазеры
6. Лазеры с ядерной накачкой
7. Лазеры на свободных электронах

He-Ne, CO₂, N₂, XeCl

Nd:YAG, Al₂O₃:Ti³⁺, AlGaAs

Rhodamine 6G

Ar⁺⁺, Kr⁺⁺

Накачка

1. Оптическая
2. Газовый разряд
3. Инжекция электронов
4. Химическая
5. Газодинамическая

Режим генерации

1. Непрерывный
2. Импульсный

НЕПРЕРЫВНЫЕ ГАЗОРАЗРЯДНЫЕ ЛАЗЕРЫ НА ПЕРЕХОДАХ АТОМОВ И ИОНОВ

Активная среда - частично (тлеющий) или полностью (дуговой разряд) ионизованная плазма

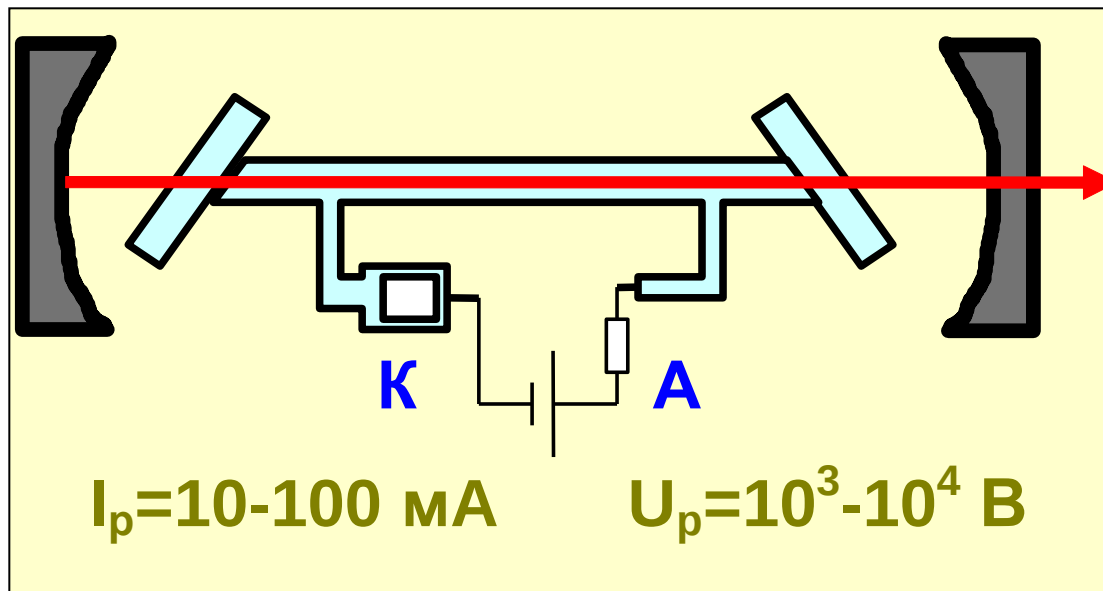
Инверсия населенностей

1. Атомные столкновения с передачей возбуждения
2. Селективное возбуждение электронным ударом

He-Ne лазер



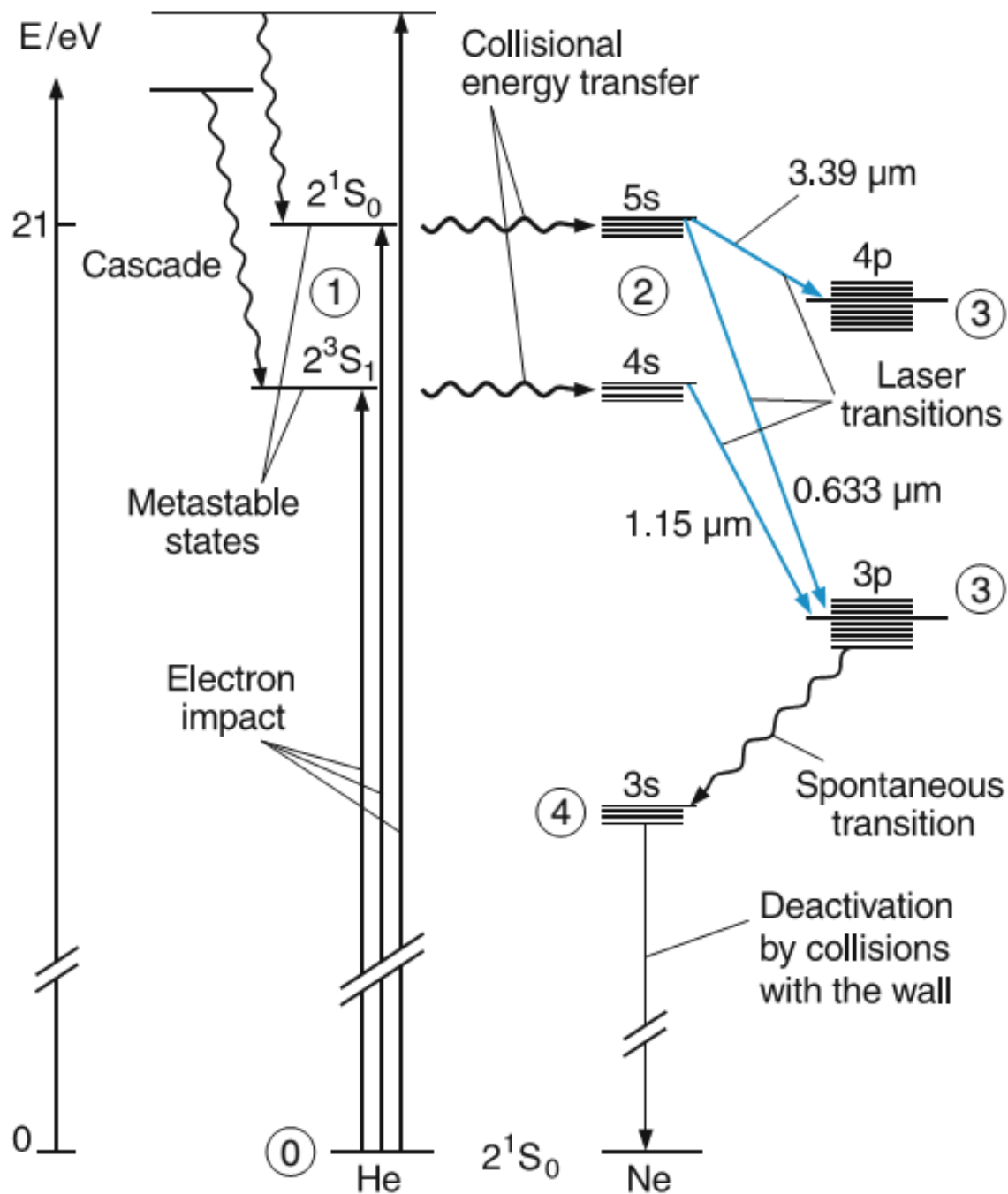
$\lambda = 0.633 \text{ мкм}$
 1.15 мкм
 3.39 мкм



He-Ne
He-Xe
He-Cd
He-Se
He-Zn

He-Ne лазер

$\lambda = 0.633 \text{ мкм}$
 1.15 мкм
 3.39 мкм



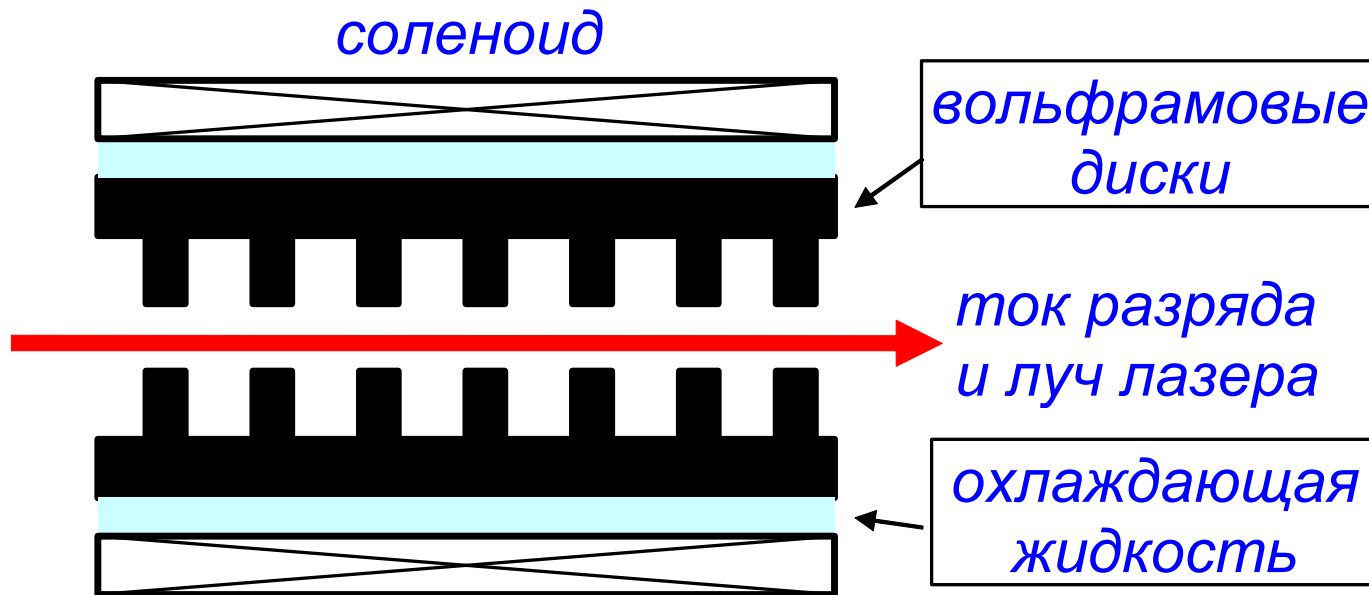
Мощные ионные лазеры

Дуговой разряд

$I_p = 10-500 \text{ A}$

$U_p = 300-500 \text{ В}$

$P_{эл} = 10-100 \text{ кВт}$



Аргоновый:

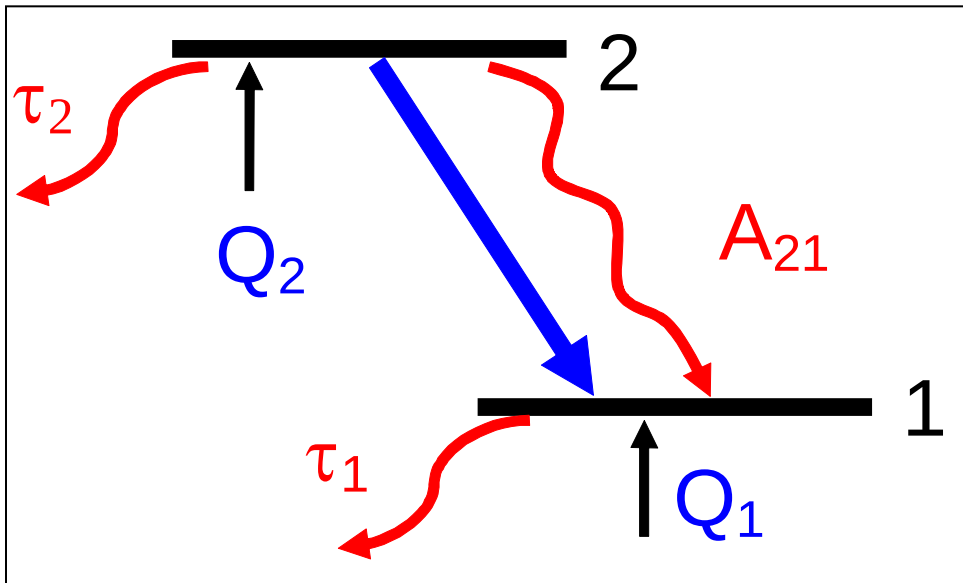
$\lambda = 514.5 \text{ нм}, 488.0 \text{ нм}$ $P_r = 5-500 \text{ Вт}$

Криптоновый:

$\lambda = 647.1 \text{ нм}$ $P_r = 1-10 \text{ Вт}$

ИМПУЛЬСНЫЕ ГАЗОВЫЕ ЛАЗЕРЫ

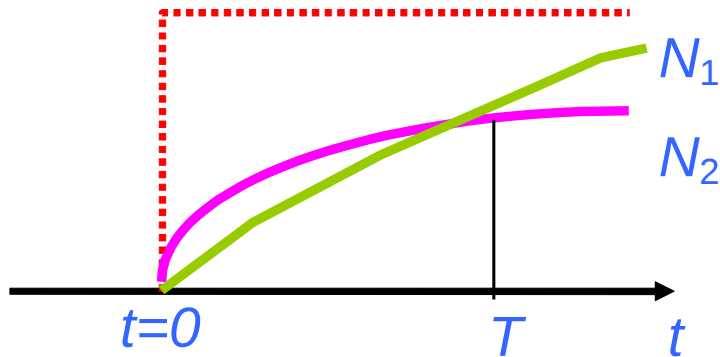
Нестационарный способ создания инверсии населенностей



$$\frac{dN_1}{dt} = Q_1 - \frac{N_1}{\tau_1} + N_2 A_{21}$$

$$\frac{dN_2}{dt} = Q_2 - \frac{N_2}{\tau_2} - N_2 A_{21}$$

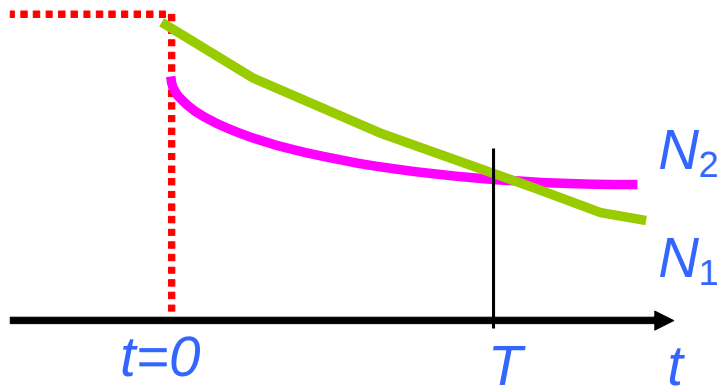
Генерация на переднем фронте импульса возбуждения (лазеры на самоограниченных переходах).



Для $Q_1 \ll Q_2$ инверсия возникает
до момента времени

$$T \leq 1/A_{21}$$

Генерация в послесвечении импульса возбуждения



$$T = \frac{\tau_1 \tau_2}{\tau_2 - \tau_1} \ln \left(\frac{Q_1 \tau_1}{Q_2 \tau_2} \right)$$

Основные типы импульсных газовых лазеров

Лазеры на парах металлов: **Cu** ($P=2-200$ Вт), **Sr**, **Ba**, **Eu**, **Ca**

Молекулярные лазеры: **N₂**, **H₂**

Экимерные лазеры:

	XeCl	KrF	ArF
λ , нм	308	248	194

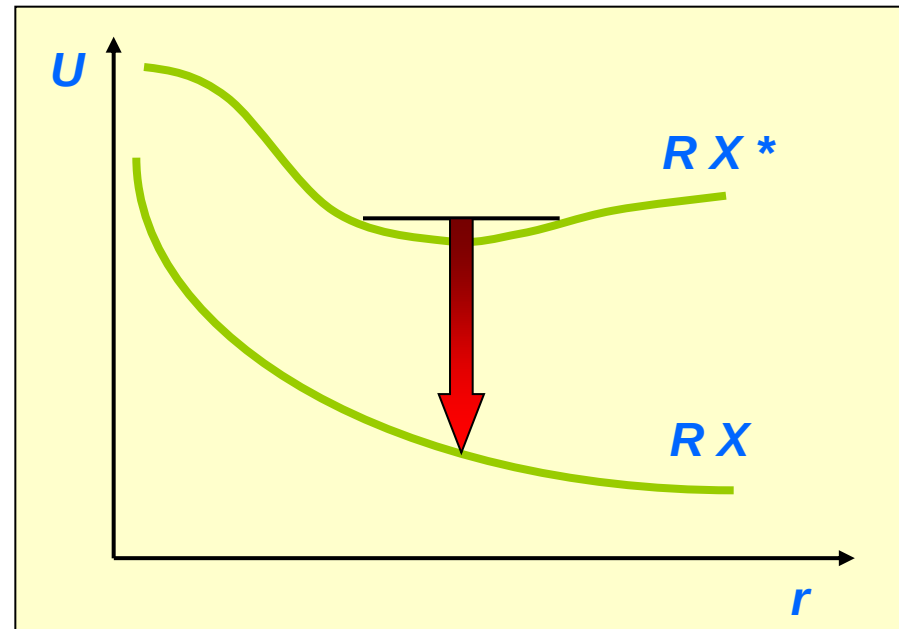
Гарпунная реакция



$E \sim 150$ Дж

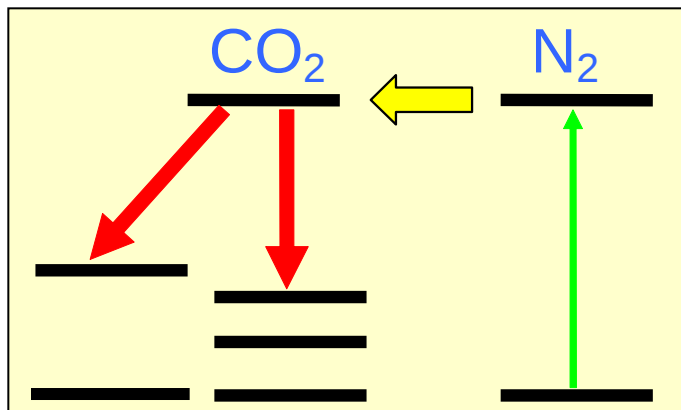
$P_{\text{ср}} \sim 200$ Вт

$P_{\text{имп}} \sim 10^7$ Вт



МОЛЕКУЛЯРНЫЕ ЛАЗЕРЫ

1. Лазеры на колебательно-вращательных переходах молекул в основном электронном состоянии
2. Лазеры на электрон-колебательных переходах



CO₂-лазер *S. Patel (1964 г.)*

Полосы усиления

$\lambda_0 = 10.6$ мкм

$\lambda_0 = 9.6$ мкм

P_{ген} до 10 кВт

Молекулы
CO₂, CO, N₂O,
H₂O, HCN

3. Молекулярные лазеры субмиллиметрового диапазона с ИК-накачкой.

Молекулы

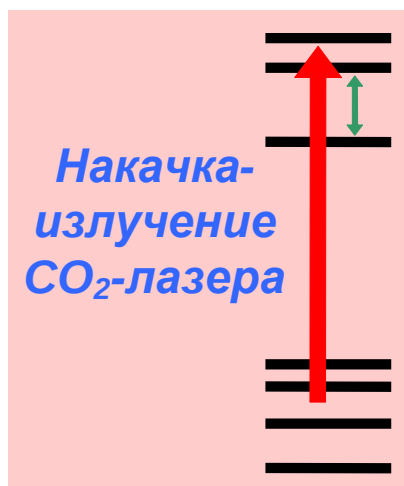
CH₃F **496 мкм**

CH₃OH **570.5 мкм**

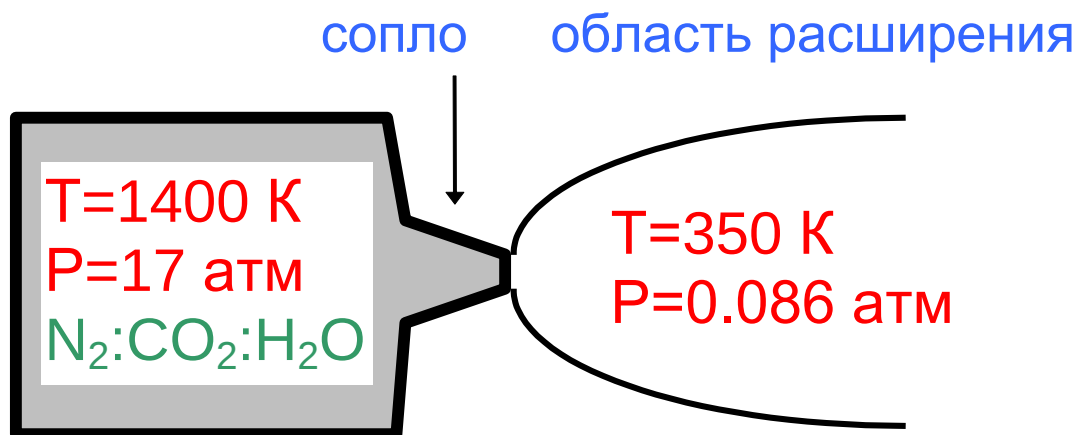
1.8 мм

H₂C:CHCl **634 мкм**

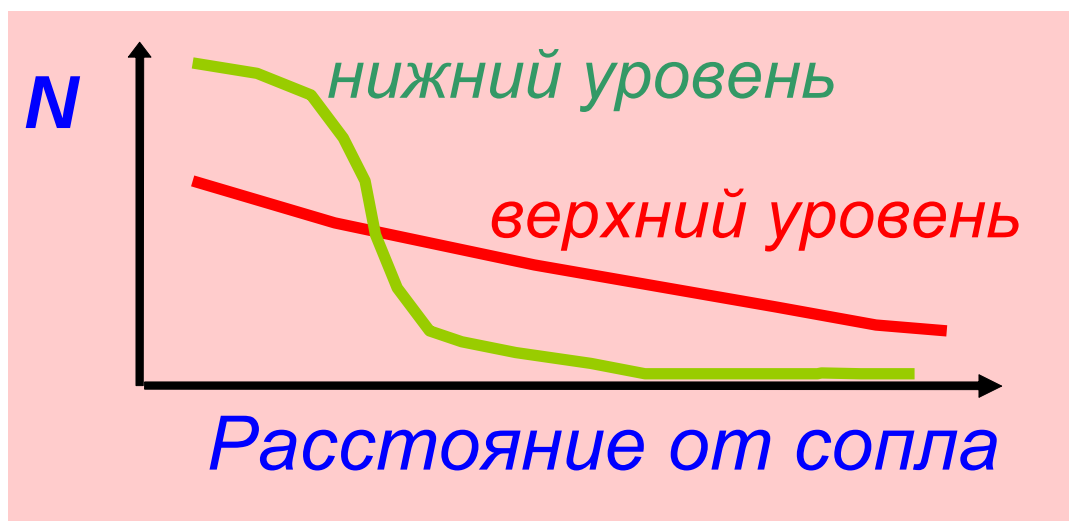
$\lambda = 12.5 -$
2000 мкм



ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЙ CO₂ ЛАЗЕР



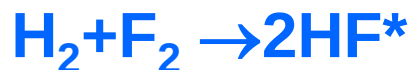
Расход смеси 10 кг/с



$P_r \sim 100\text{ кВт}$

ХИМИЧЕСКИЕ ЛАЗЕРЫ

Инверсия населенностей при цепных химических реакциях



Способы возбуждения

фотолиз



электронный удар



Необходима быстрая прокачка для удаления HF в основном состоянии и введения реагентов в зону усиления.

HF-лазер $\lambda=2.7$ мкм DF-лазер $\lambda=3.7$ мкм HBr, HCl, CO

Прямой химический лазер: $\text{D}_2 + \text{F}_2 \rightarrow 2\text{DF}^*$

С передачей возбуждения: $\text{D}_2 + \text{F}_2 + 2\text{CO}_2 \rightarrow 2\text{DF}^* + 2\text{CO}_2 \rightarrow 2\text{DF} + 2\text{CO}_2^*$

MIRACL $P_r \sim 400$ кВт 70 сек 1978 г.

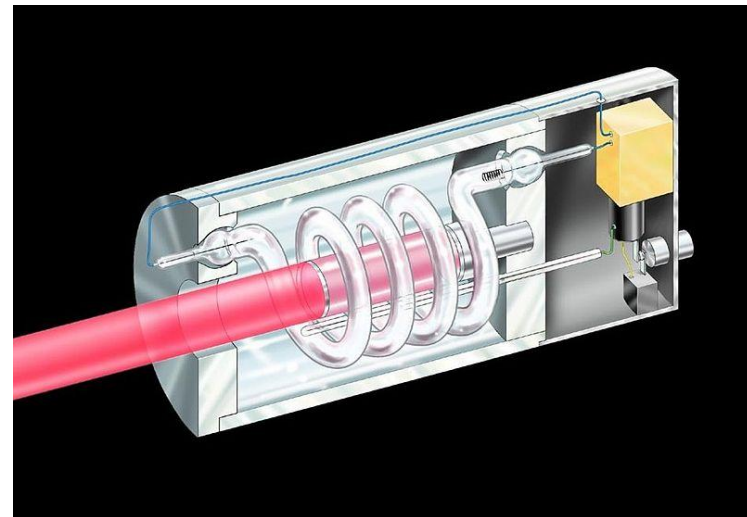
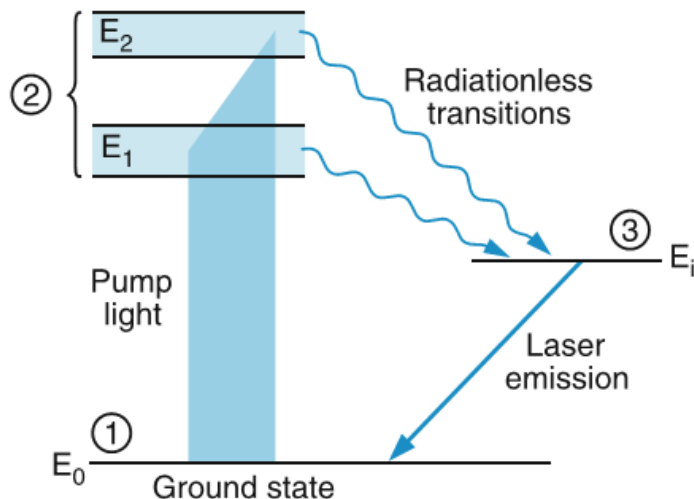
ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ ЛАЗЕРЫ НА ИОННЫХ КРИСТАЛЛАХ

1960

Th. Maiman

рубиновый лазер

$\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}^{3+}$



Активный элемент:

1. Диэлектрическая матрица - кристалл, стекло.

Al_2O_3 - сапфир

CaWO_4 - вольфрамат

CaMoO_4 - молибдат

$\text{Me}_3\text{Yt}_5\text{O}_{12}$ - гранаты

2. Активатор - примесный ион

Cr^{3+} , Nd^{3+} , Er^{2+} , Eu^{3+} , Ti^{3+} , Ni^{3+}

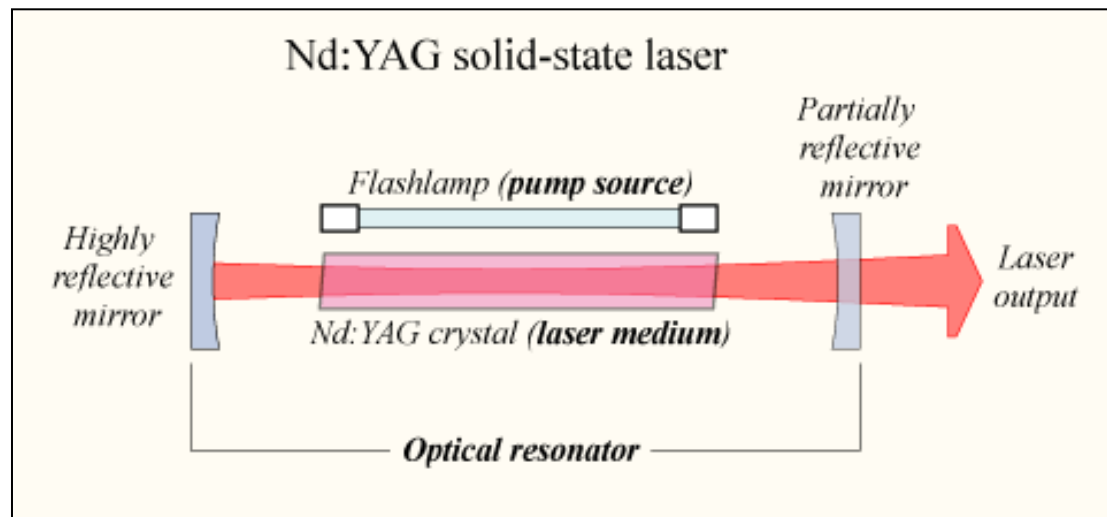
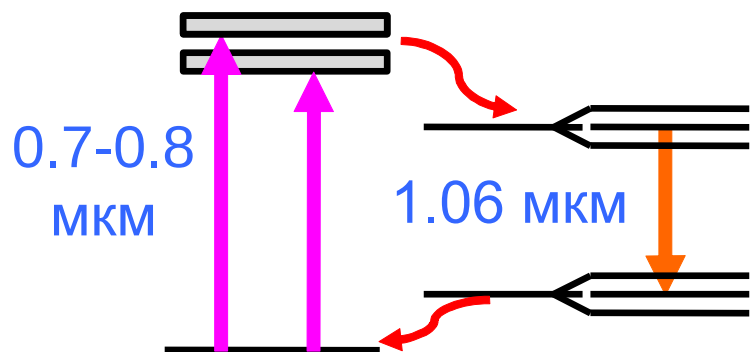
Метод возбуждения - оптическая накачка

1. Ксеноновые лампы высокого давления

2. Полупроводниковые AlGaAs лазеры

3. Твердотельные лазеры

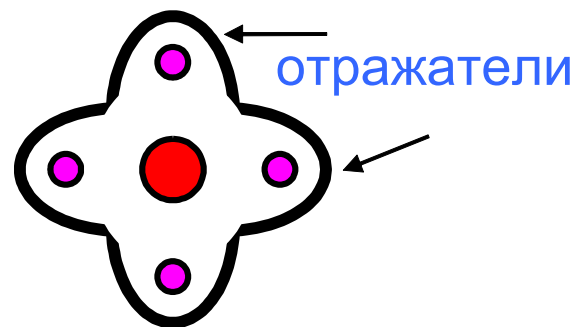
YAG:Nd³⁺ лазер



Параметры:

$E_{\text{имп}} \sim 100 \text{ кДж}$

$P_{\text{ср}} \sim 500 \text{ Вт}$



ДИНАМИКА ГЕНЕРАЦИИ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ЛАЗЕРОВ

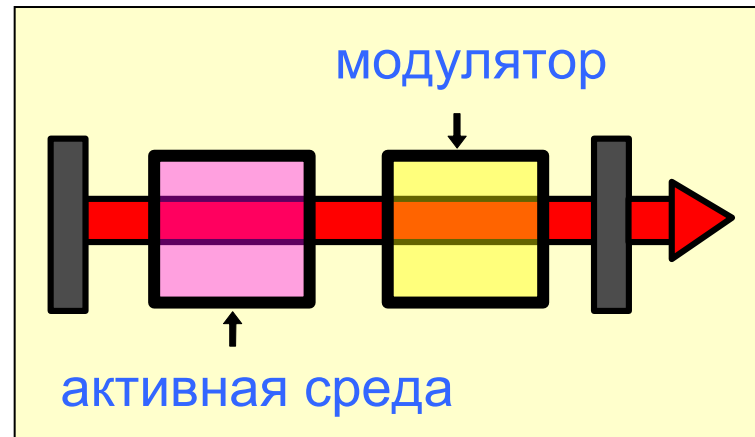
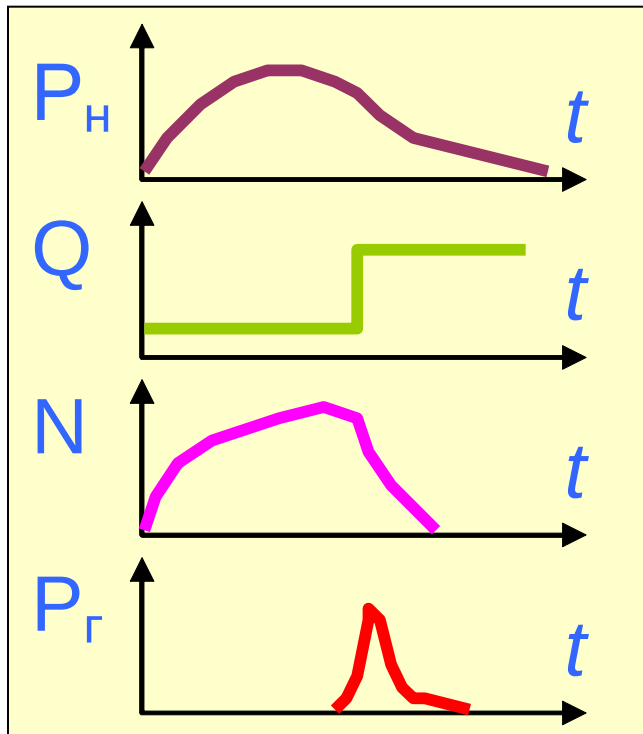
Долгоживущие возбужденные состояния - время накопления инверсии T_0 сравнимо с временем установления поля в резонаторе $T_{уст}$

Режимы генерации:

1. Свободная генерация

- а) регулярные затухающие ($T_{уст} < T_0$) и незатухающие ($T_{уст} > T_0$) пульсации
- б) пиковый режим (при флуктуациях параметров)

2. Генерация в режиме модулированной добротности (гигантские импульсы)

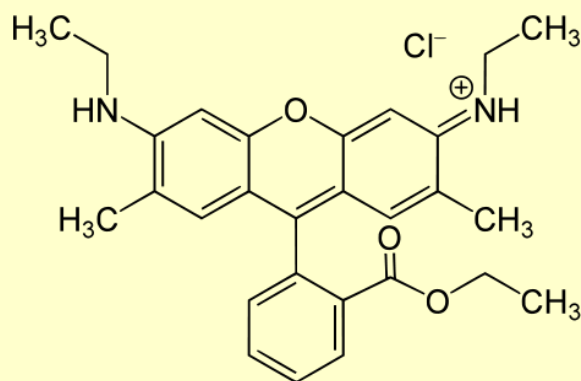
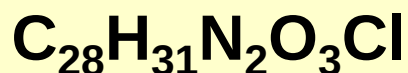


Модуляторы:

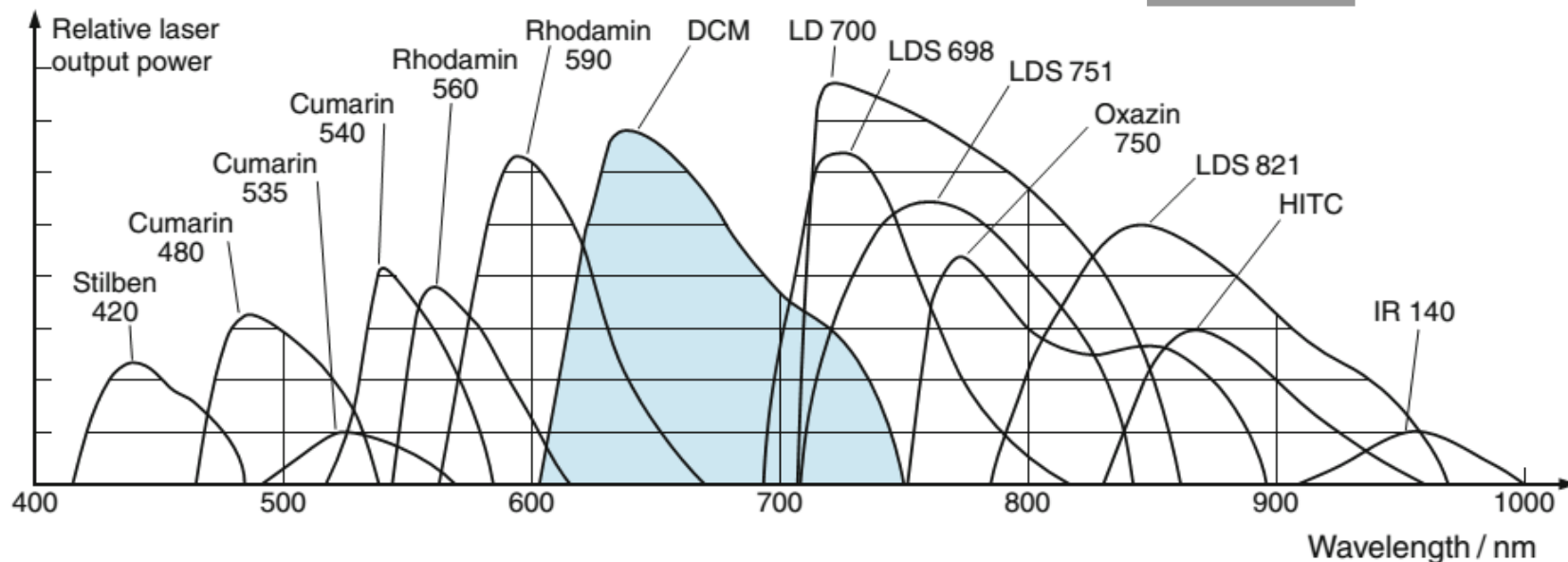
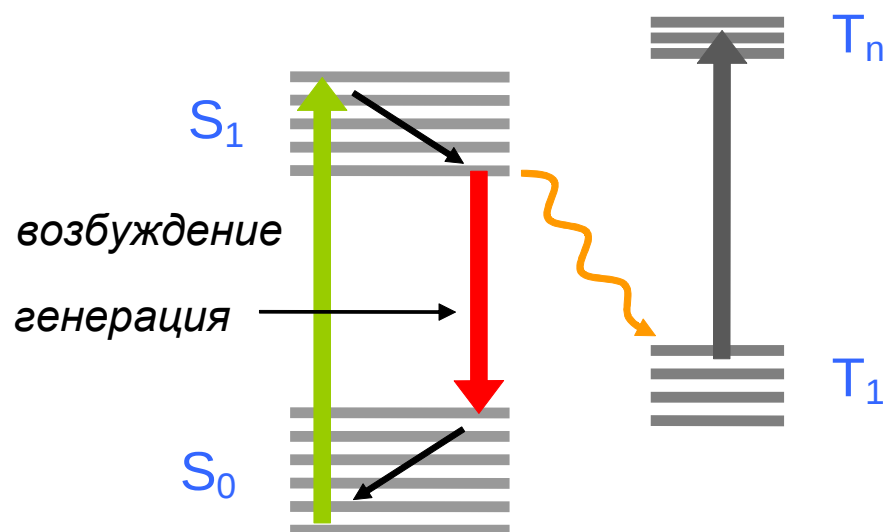
- Механическая система
- Электро-оптический затвор
- Акусто-оптический затвор
- Насыщающийся поглотитель

ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЕ ЛАЗЕРЫ НА РАСТВОРАХ ОРГАНИЧЕСКИХ КРАСИТЕЛЕЙ

Rhodamine 6G



Структура уровней



Линия усиления

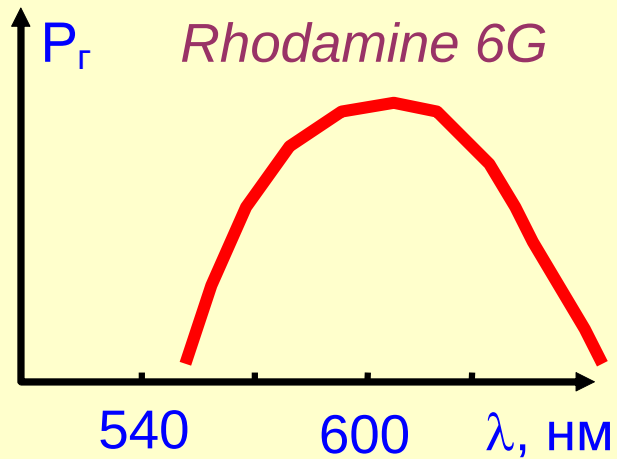
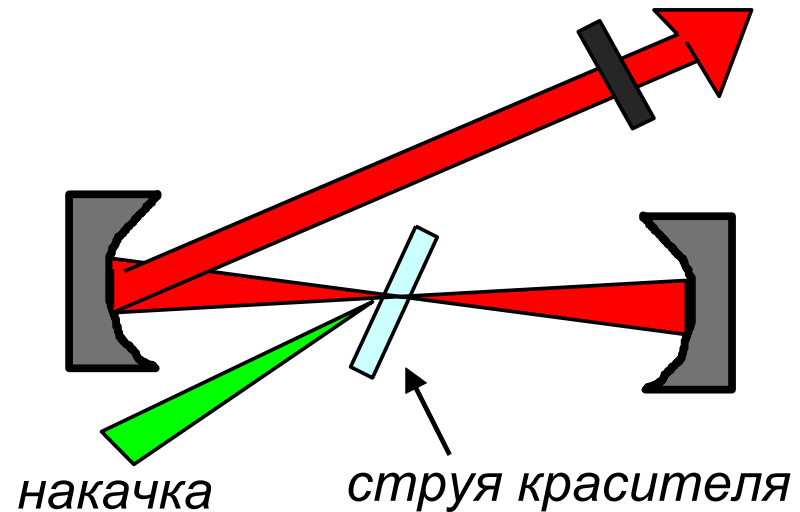
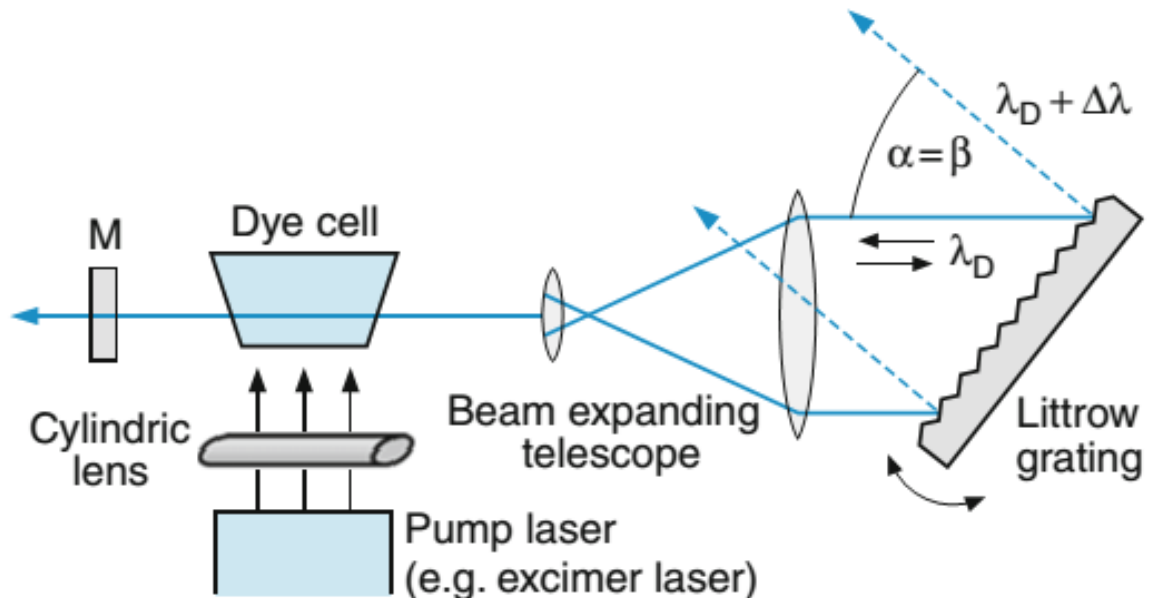


Схема резонатора

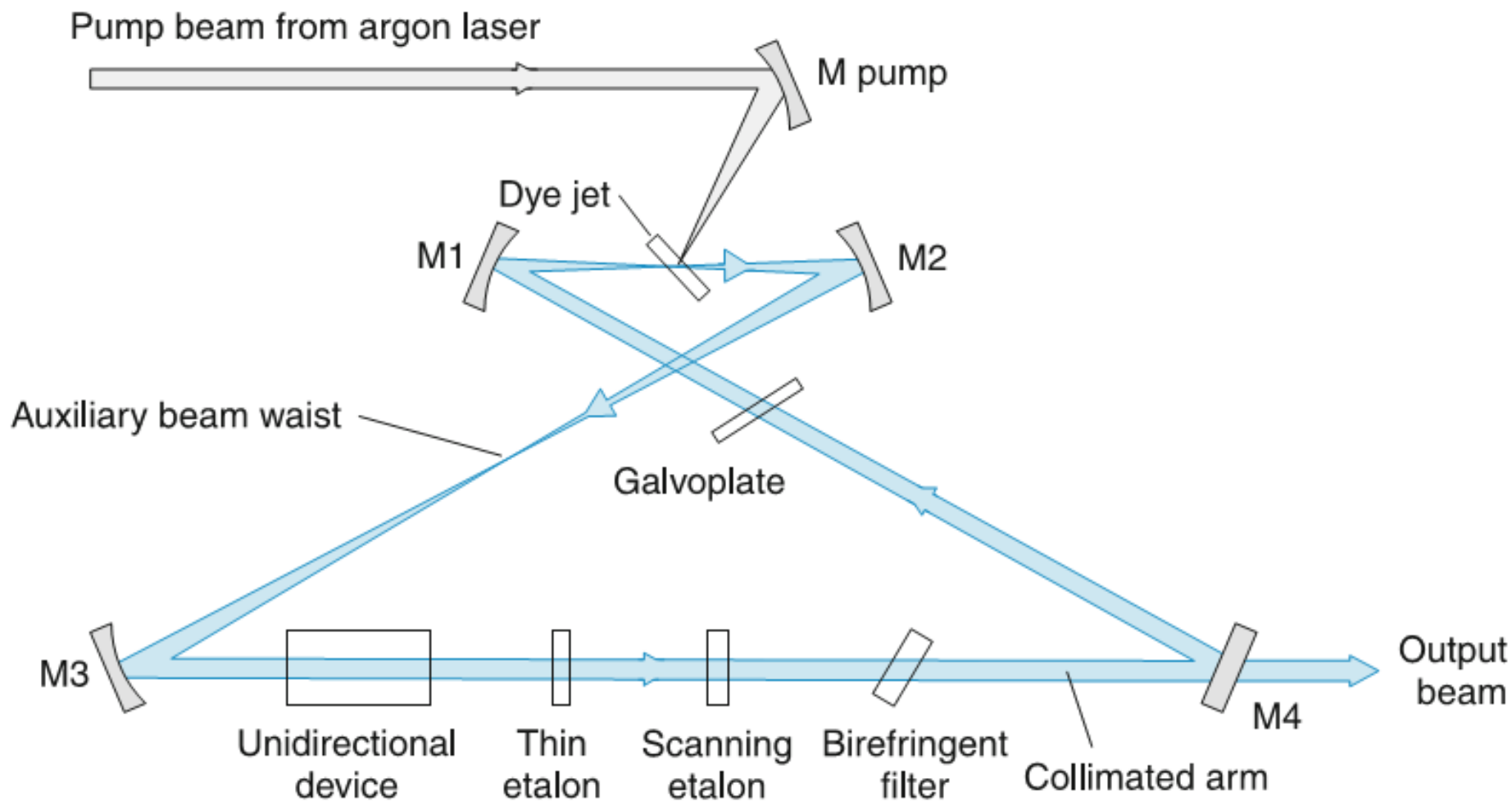


Оптическая накачка

- Ламповая
- Рубиновый лазер
- YAG:Nd³⁺ лазер и его гармоники
- N₂-лазер
- XeCl , KzF , ArF - эксимерные лазеры
- Ar⁺ , Kr⁺ - лазеры



Одночастотный кольцевой лазер на красителе

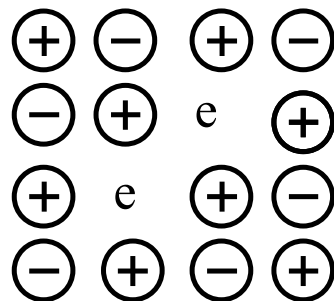


ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЕ ЛАЗЕРЫ НА ЦЕНТРАХ ОКРАСКИ (ЦО) В ЩЕЛОЧНО-ГАЛОИДНЫХ КРИСТАЛЛАХ

ЦО - точечные дефекты в кристаллах, связанные с анионными вакансиями.

F-центр - вакансия, захватившая электрон

F2- центры



Кристаллы

NaCl
KCl
LiF
RbCl
NaF

Генерирующие ЦО: F_2^+ F_2^- F_A F_B

Методы окрашивания:

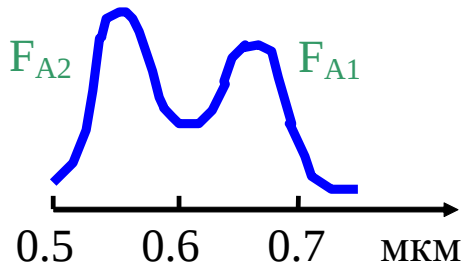
Аддитивное окрашивание

γ - облучение

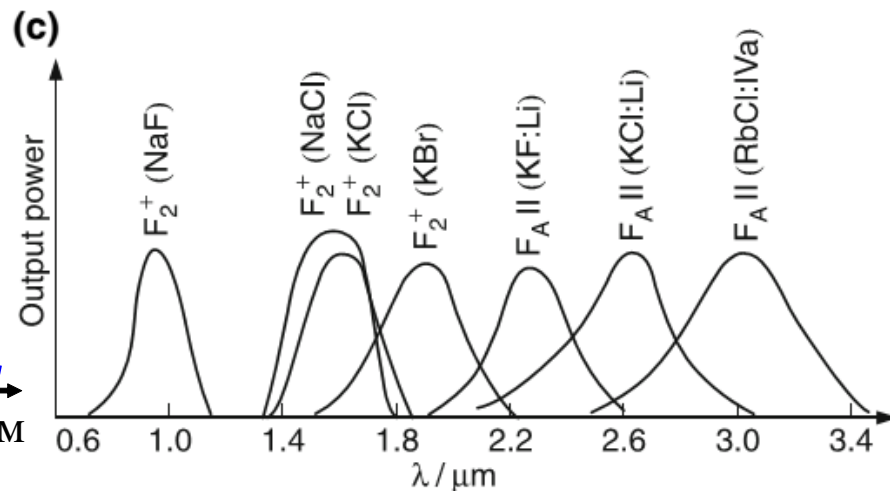
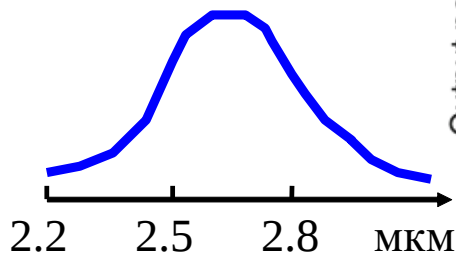
Электронное (энергия 2 МэВ)

Пример: KCl: Li

поглощение

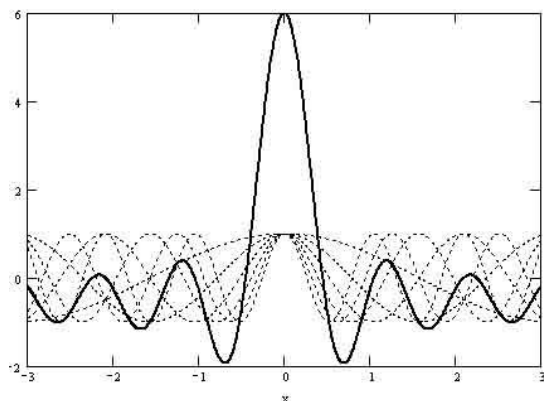
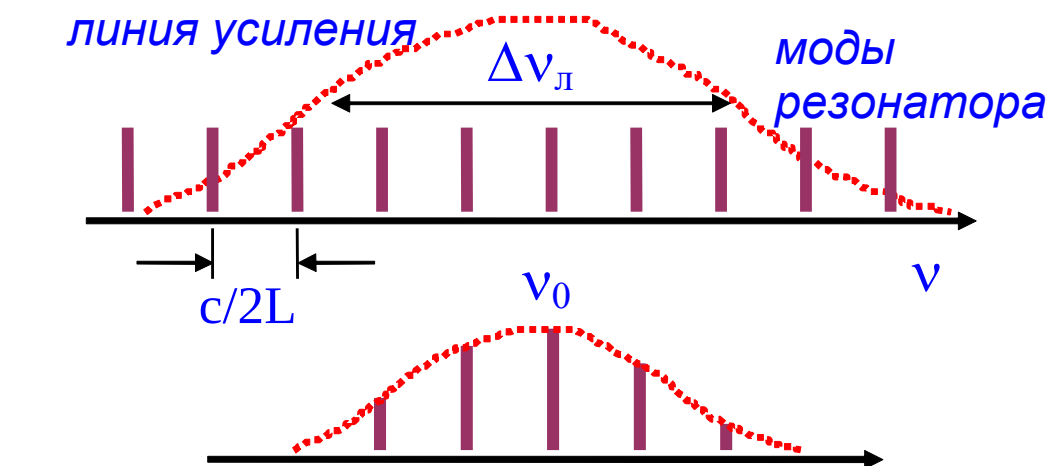


испускание

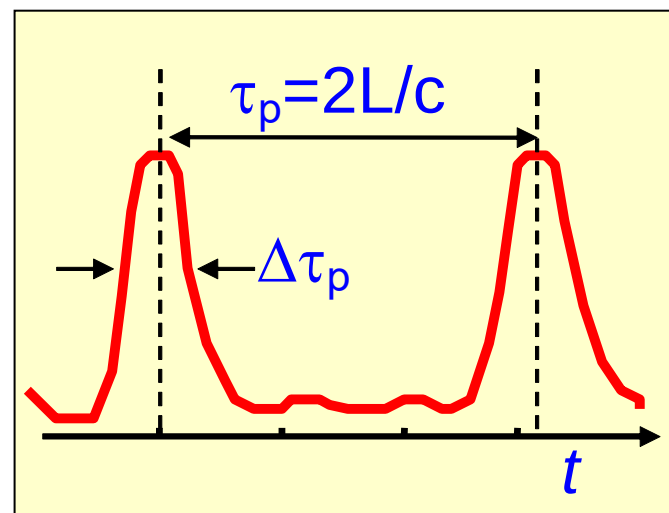


ГЕНЕРАЦИЯ СВЕРХКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ СВЕТА

Метод синхронизации мод



Сумма многих
синусоид с
фиксированной
разностью фаз дает
периодические
короткие импульсы



Частота $\nu = 1/\tau_p = c/2L$

Длительность $\Delta\tau_p = 1/\Delta\nu_L$

50 фс – 100 пс

Техника синхронизации мод

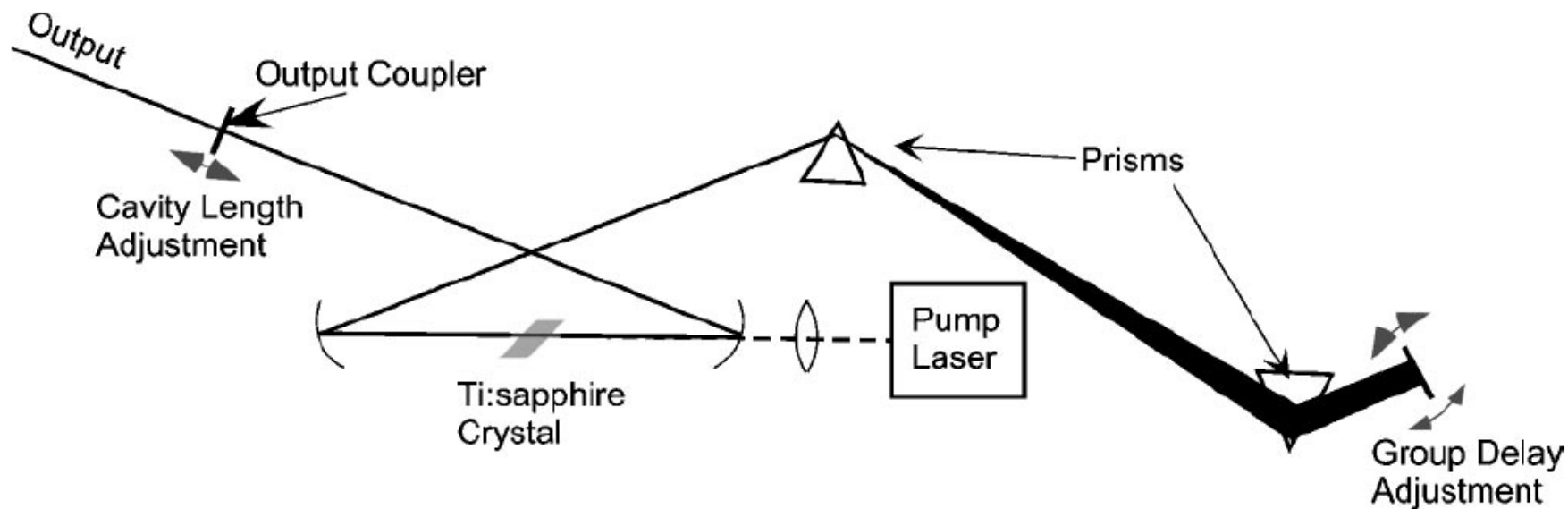
Активная с помощью акустооптических и электрооптических модуляторов

Пассивная с помощью насыщающихся поглотителей

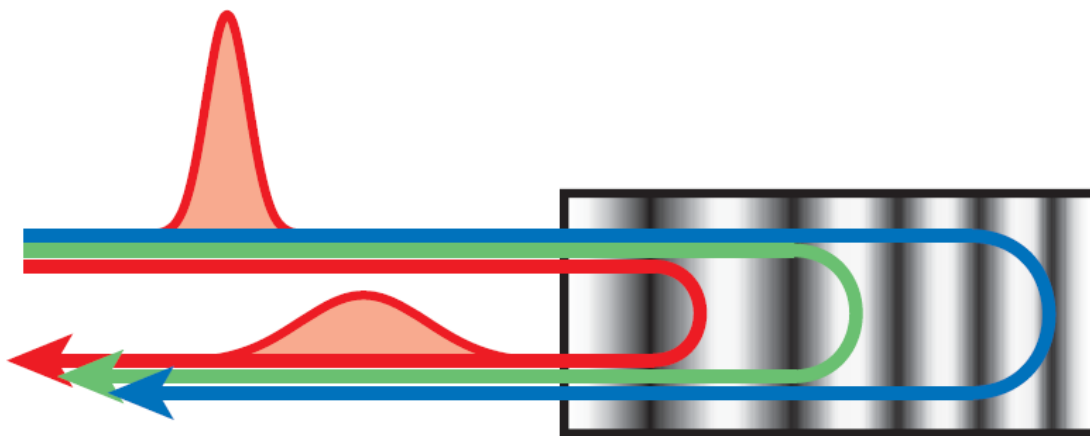
Пассивная с помощью линзы Керра (в твердотельных лазерах)

ГЕНЕРАЦИЯ СВЕРХКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ СВЕТА

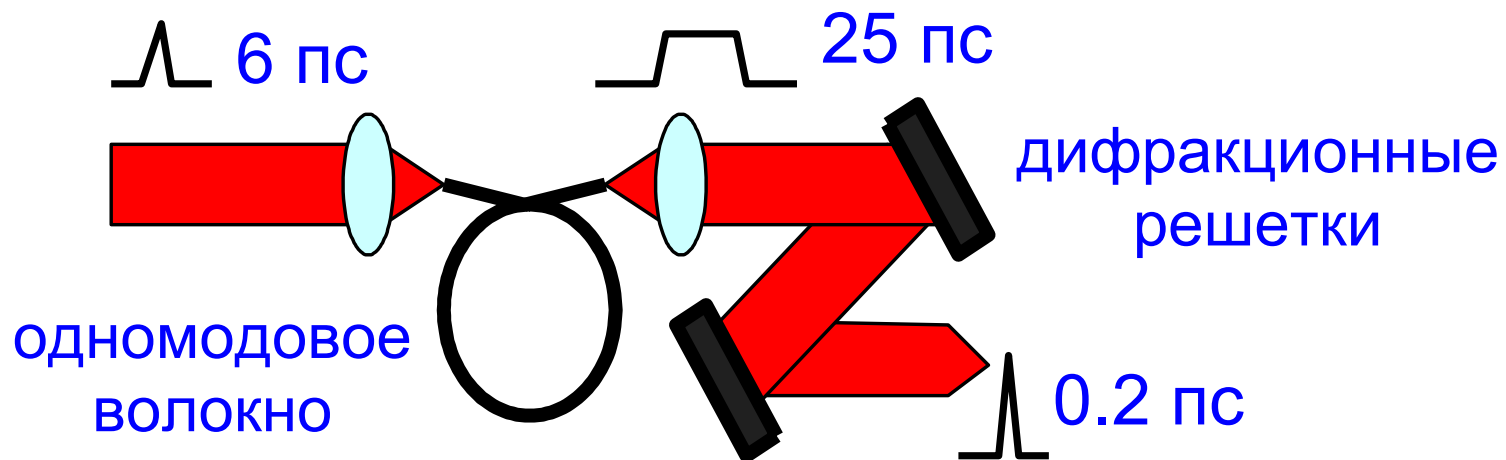
Титан-сапфировый лазер с линзой Керра



Чирпованные зеркала



Сжатие импульсов света

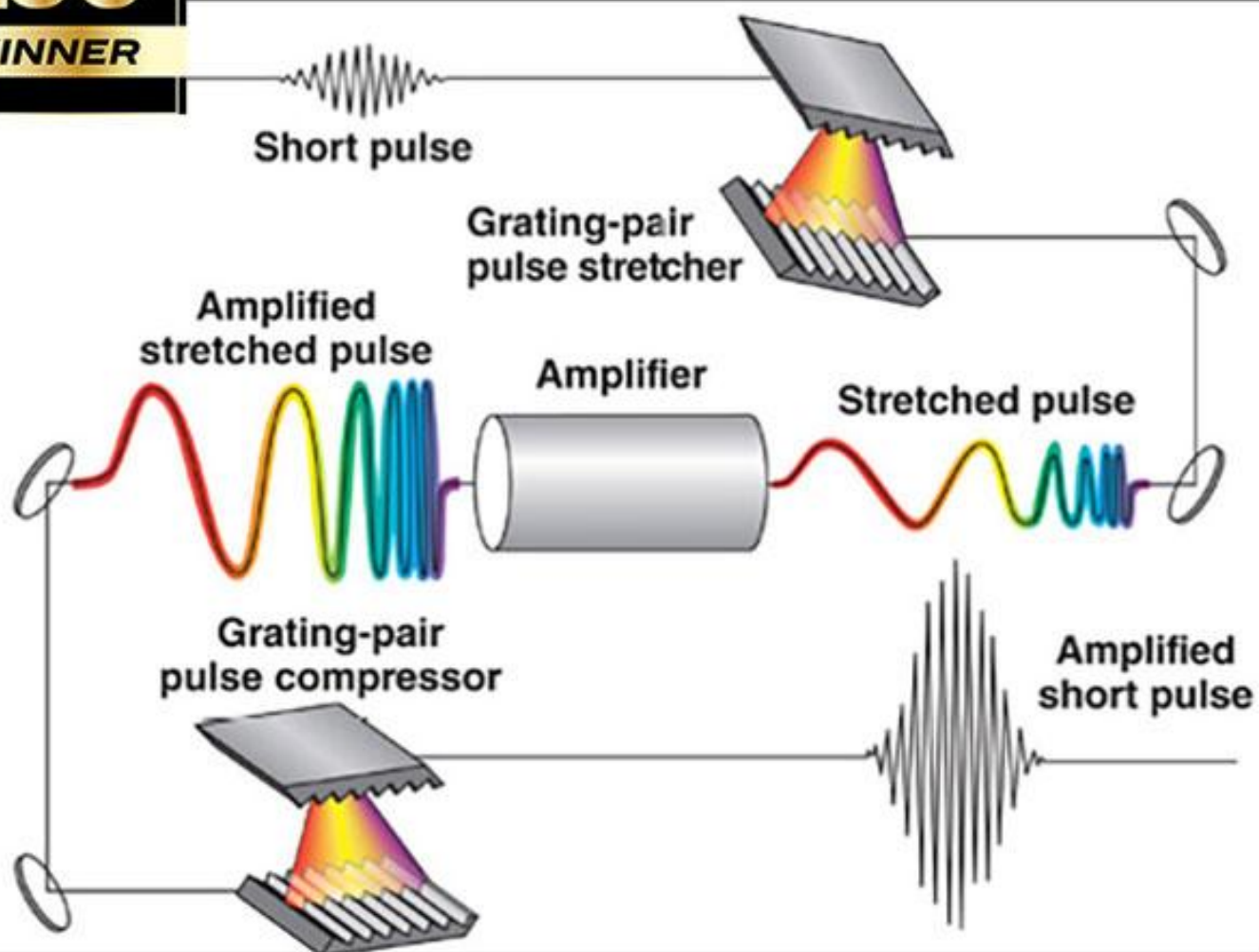


Униполярный
импульс
 $\tau \approx 3 - 4$ фс

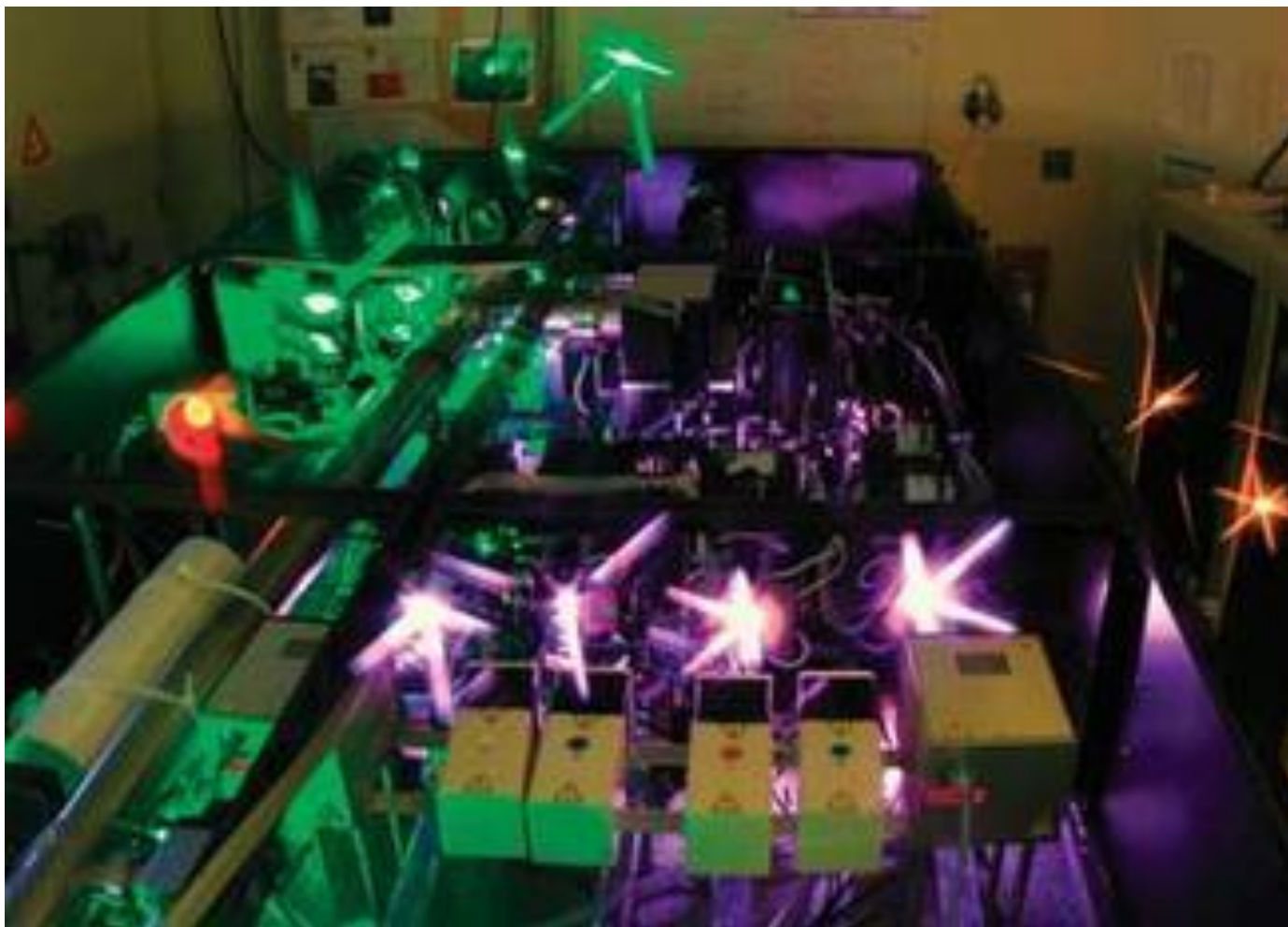


Усиление сверхкоротких импульсов света

2022
**R&D
100**
WINNER



Усиление сверхкоротких импульсов света

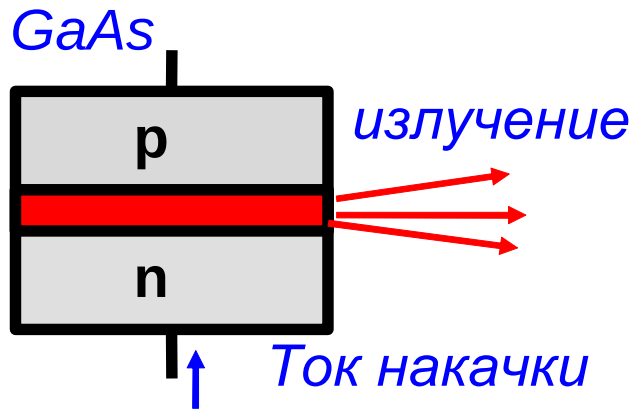


Hercules: $P \sim 300 \text{ ТВт}$ $\tau \sim 30 \text{ фс}$ $I \sim 10^{22} \text{ Вт/см}^2$

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ЛАЗЕРЫ

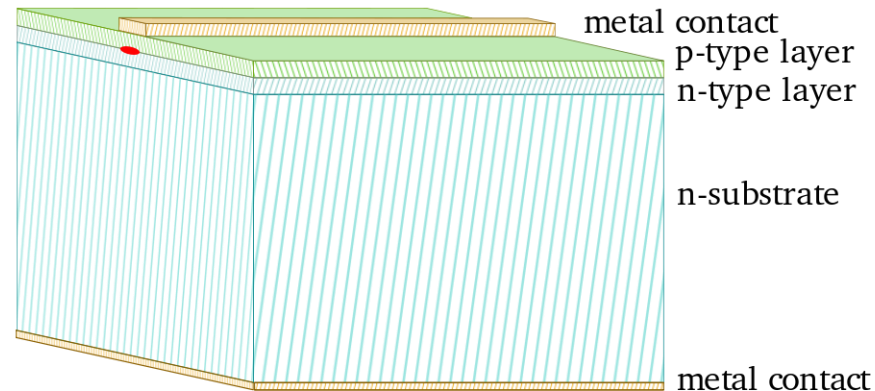
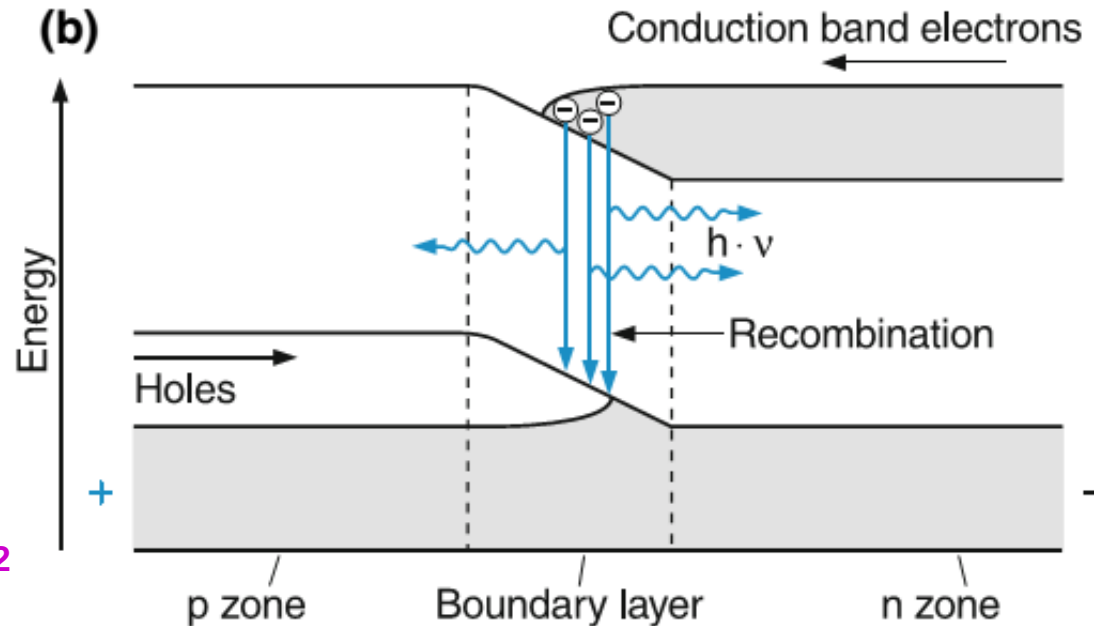
Рекомбинационное излучение (электроны и дырки)
при инжекции носителей в область p - n перехода.

Лазеры на p - n переходах

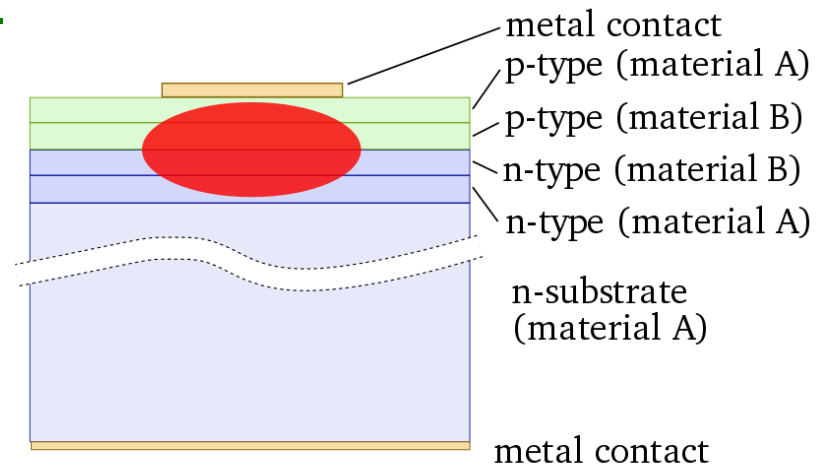
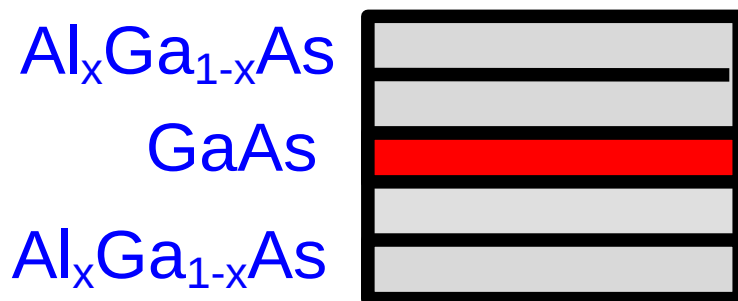


$\lambda = 0.84 \text{ мкм}$, $T = 77 \text{ K}$, $I = 20 \text{ кА/см}^2$

	λ , мкм
InP	0.9
InS	3.1
GaAs	0.84
GaSb	0.78
PbTe	6.5

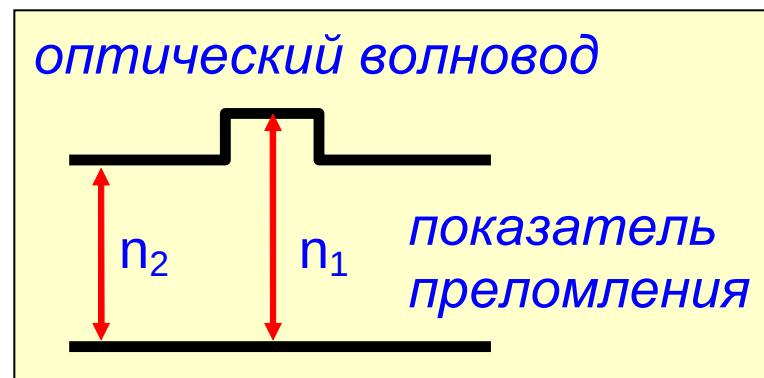


Лазеры на гетеропереходах



AlGaAs $\lambda = 0.85 \text{ мкм}$

InGaAsP $\lambda = 0.78\text{-}0.8 \text{ мкм}$
 $1.3\text{-}1.5 \text{ мкм}$



$I_{\text{пор}} = 20 - 50 \text{ мА}$

$P = 5 - 1000 \text{ мВт}$

Полупроводниковые лазеры с внешним резонатором

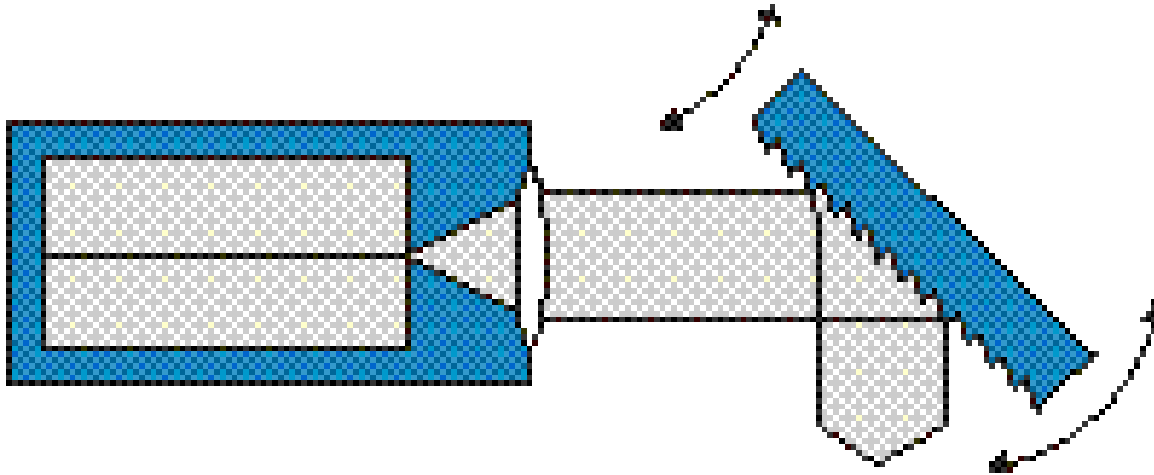


Схема
Литтрова

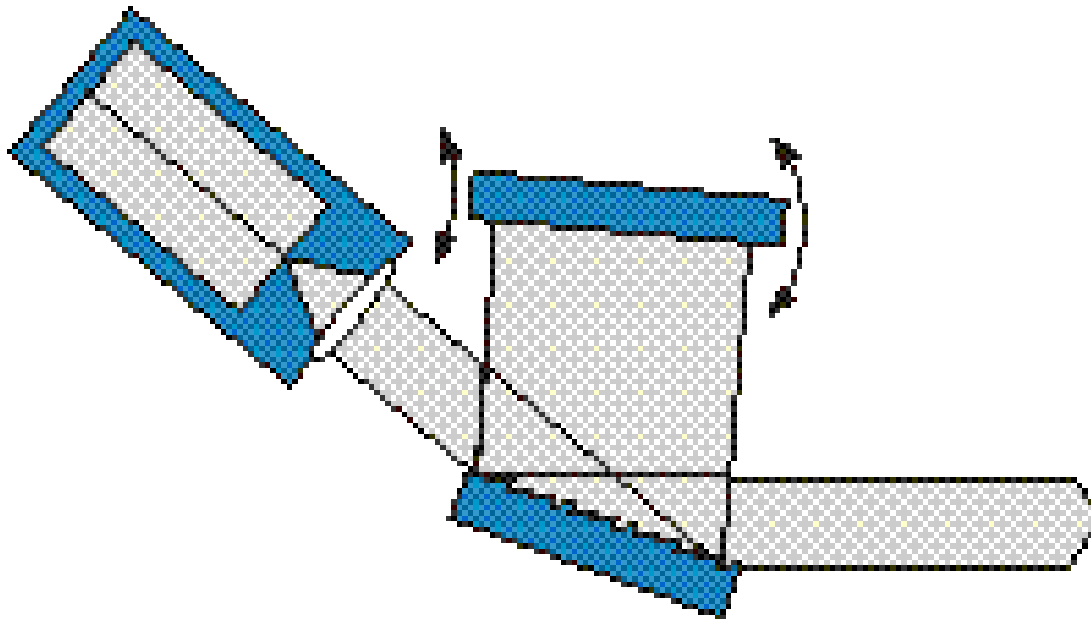
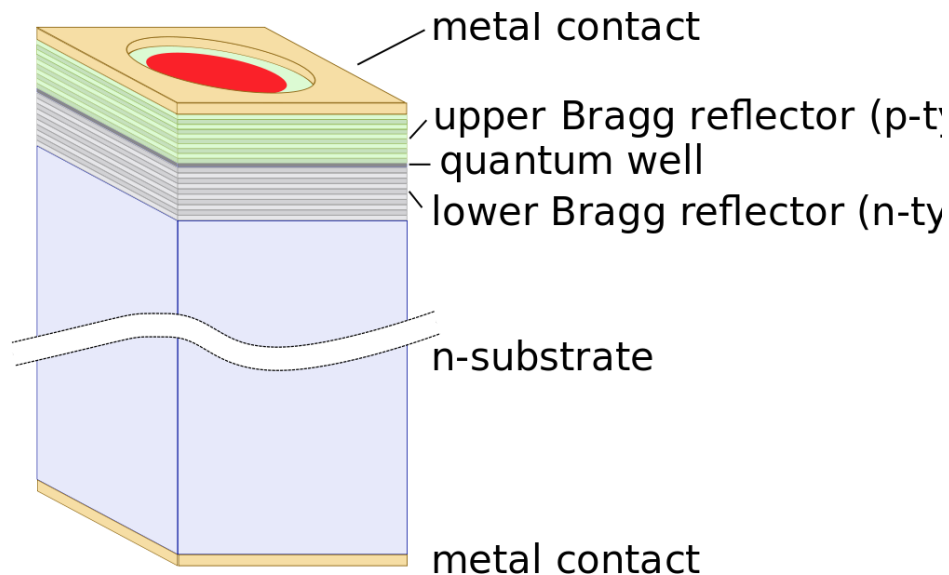


Схема
Литтмана

Лазер с вертикальным резонатором

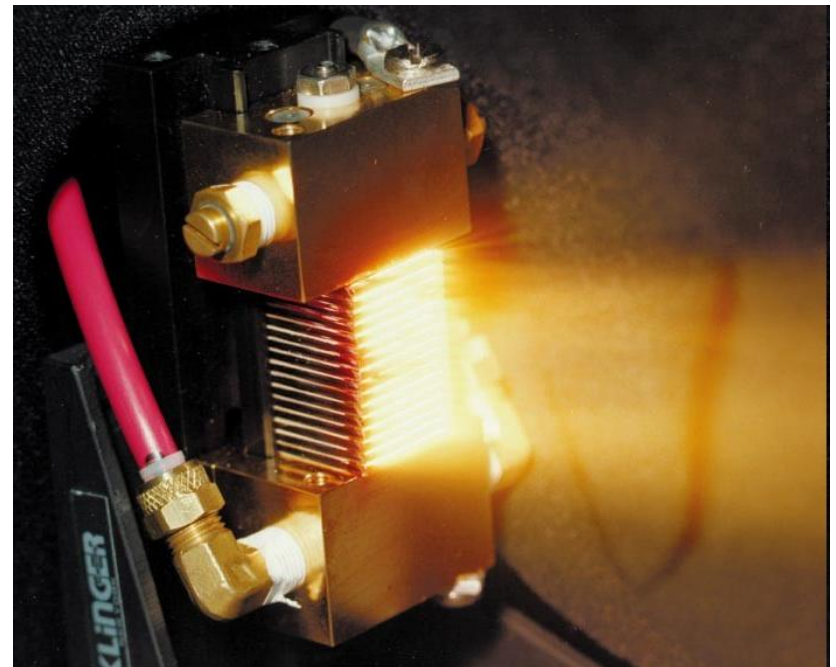


$$I_{\text{пор}} = 20 - 50 \text{ мкА}$$

$$P = 50 - 200 \text{ мкВт}$$

$$F_{\text{mod}} \text{ до } 50 \text{ ГГц}$$

Линейка лазерных диодов

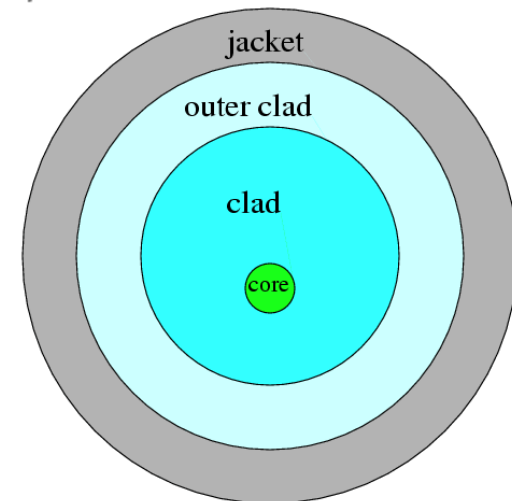
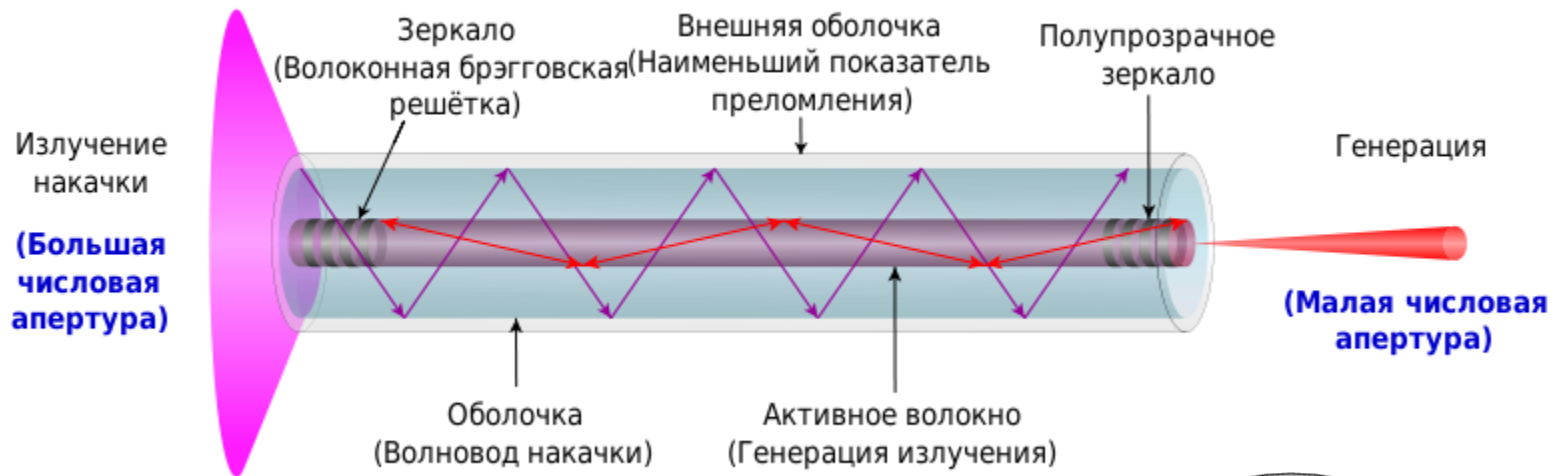


$$P = 10 - 1000 \text{ Вт}$$

ОПТОВОЛОКОННЫЕ ЛАЗЕРЫ

Активная среда – оптическое волокно, легированное редкоземельными ионами Er^{3+} , Nd^{3+} , Yb^{3+} , Tm^{3+} , Pr^{3+}

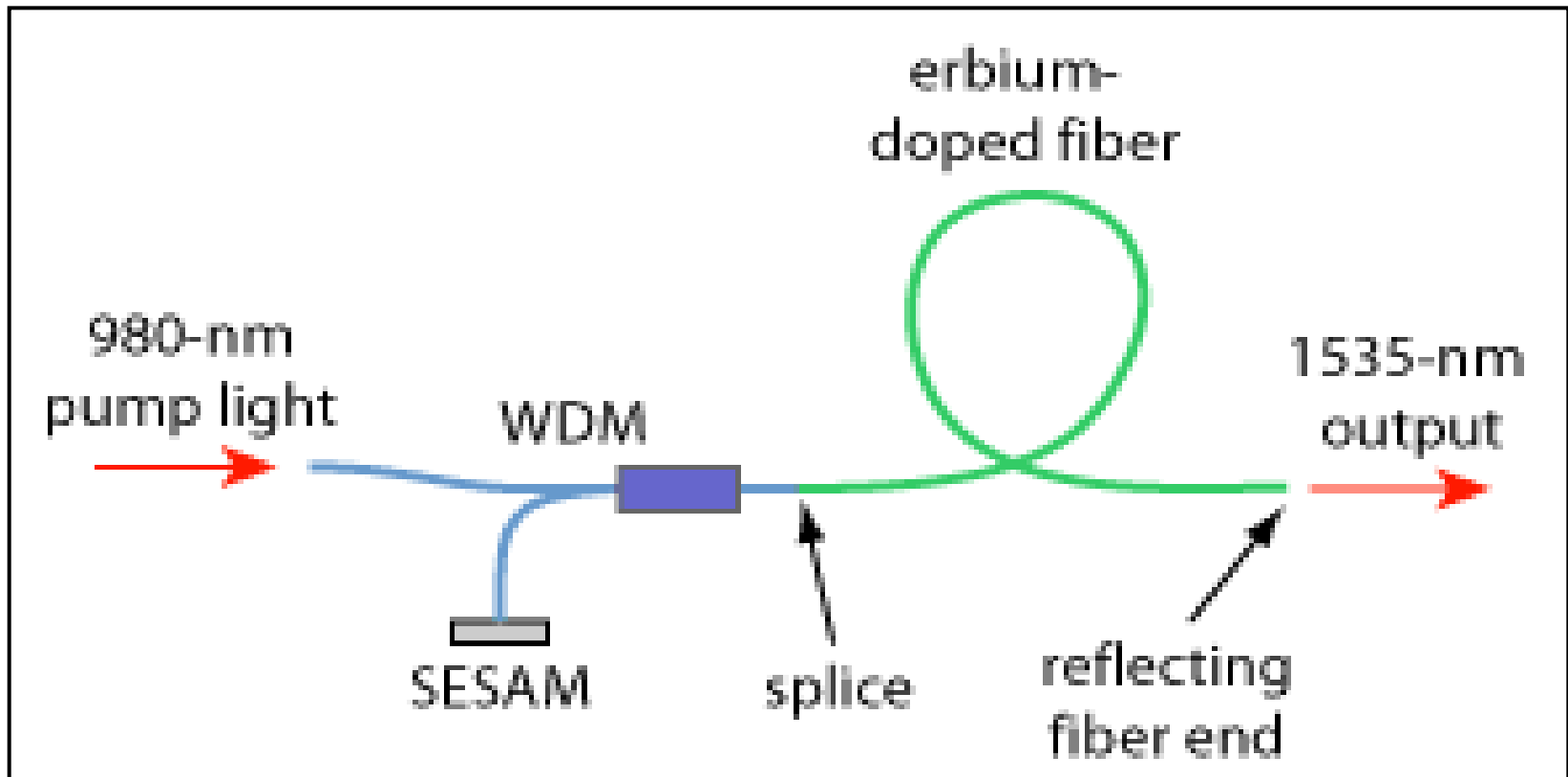
Накачка – мощные лазерные диоды



ОПТОВОЛОКОННЫЕ ЛАЗЕРЫ

Активная среда – оптическое волокно, легированное редкоземельными ионами Er^{3+} , Nd^{3+} , Yb^{3+} , Tm^{3+} , Pr^{3+}

Накачка – мощные лазерные диоды



$\lambda = 1 - 2 \text{ мкм}$

$P = 1 \text{ Вт} - 10 \text{ кВт}$

РЕНТГЕНОВСКИЙ ЛАЗЕР. ЛАЗЕРЫ С ЯДЕРНОЙ НАКАЧКОЙ.

Проблемы генерации коротковолнового излучения:

1. Коэффициент усиления $\alpha_0 \sim \lambda^3 Q_2$

Уменьшение длины волны должно сопровождаться увеличением скорости накачки:

$$\lambda \cong 10 \text{ \AA} \quad \alpha_0 \sim 1 \text{ см}^{-1} \quad Q_2 \cong 10^{21} \text{ ат/с}$$

2. Проблема зеркал

Активная среда:

- Лазерная плазма $E \sim 10^{13} \text{ Дж}$ $\tau \sim 1 \text{ нс}$ $W \sim 5 \cdot 10^{13} \text{ Вт/см}^2$
 Se XXIV $\lambda = 203 \text{ и } 209 \text{ \AA}$ $\alpha \sim 700$
- Плотный газ с накачкой продуктами ядерного взрыва

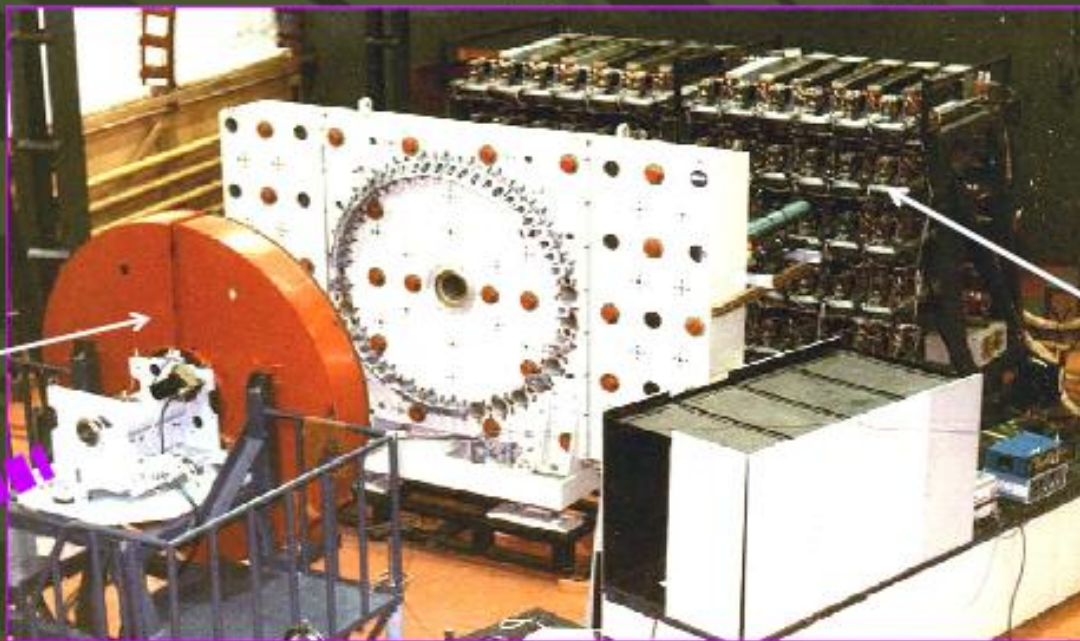
Экспериментальная лазерная установка на стекле с неодимом "Тандем"



Ю.Кружилин

Оптический
синхронный
переключатель

Выходной
Луч



Ю.Калинин

60 лазерных
модулей



Первая в мире лазерная установка на неодимовом стекле
со **СРЕДНЕЙ** мощностью ≥ 100 КВт (2-3 сек)

- Энергия импульса каждого канала – 1,5 2 КДж
- Лазеры «стреляют» поочередно по общей оси и переключаются вращающимся синхронизированным оптическим коммутатором.
- Частота повторения импульсов – 100 Гц
- Средняя мощность излучения - ~ 150 КВт в течение 2-3 сек.
- Питание от промышленной сети– 6 КВ 10 МВт 50 Гц **без накопителя**
- Создана ЦКБ "Астрофизика", и Лазерным центром "Радуга" - 1982





Позиционный
комплекс



High Energy Laser Mobile Demonstrator - HEL MD мощностью 10 кВт

МЕТОДЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЧАСТОТЫ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

1. Генерация оптических гармоник

$$P(t) = \varepsilon_0 [\chi^{(1)} E(t) + \chi^{(2)} E^2(t) + \chi^{(3)} E^3(t) + \dots].$$

а) в нелинейно-оптических кристаллах

LiNbO₃ , LiJO₃ , KDP , КТР , ВВО

б) в плотных газах и парах металлов

гармоники высокого порядка $k \sim 40$

$$E_{2\omega} \sim E_{\omega}^2 \frac{\sin(\Delta k L / 2)}{\Delta k L / 2},$$

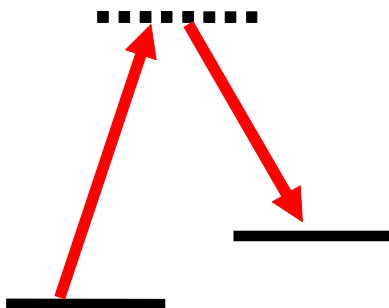
$$I_{n\omega} \sim I_{\omega}^n$$

2. Генерация суммарных и разностных частот

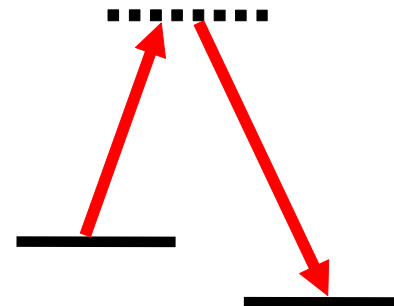
3. Вынужденное комбинационное рассеяние

H₂ и N₂ при высоком давлении

а) **Стоксово** рассеяние



б) **Антистоксово** рассеяние



ПРЕДЕЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЛАЗЕРОВ

Длина волны

$\lambda = 100 \text{ нм} - 2 \text{ мм}$

Монохроматичность

$\Delta\nu/\nu \sim 10^{-16}$ (твердотель. лазеры)

Воспроизводимость частоты

$2 \cdot 10^{-16}$ (твердотель. лазеры)

Непрерывная мощность

$10^5 - 10^6 \text{ Вт}$ (CO₂ лазер)

Импульсная мощность

10^{14} Вт (YAG:Nd лазер)

Энергия в импульсе

10^5 Дж (YAG:Nd лазер)

Длительность импульса

$3 \cdot 10^{-15} \text{ с}$ (Al₂O₃:Ti³⁺ лазер)

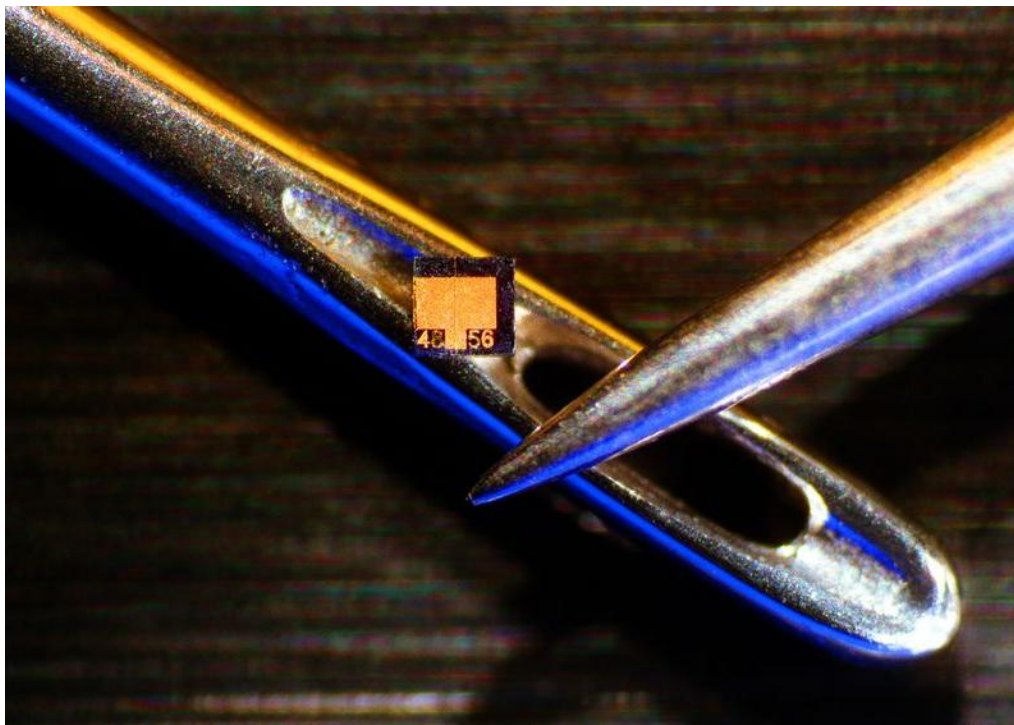
Частота следования импульсов

50 ГГц (ЛВР)

КПД

70% (полупроводниковые лазеры)

> 100% (химические лазеры)



National Ignition Facility (Ливермор, США)

копировано из GoogleEarth

Неодимовый лазер

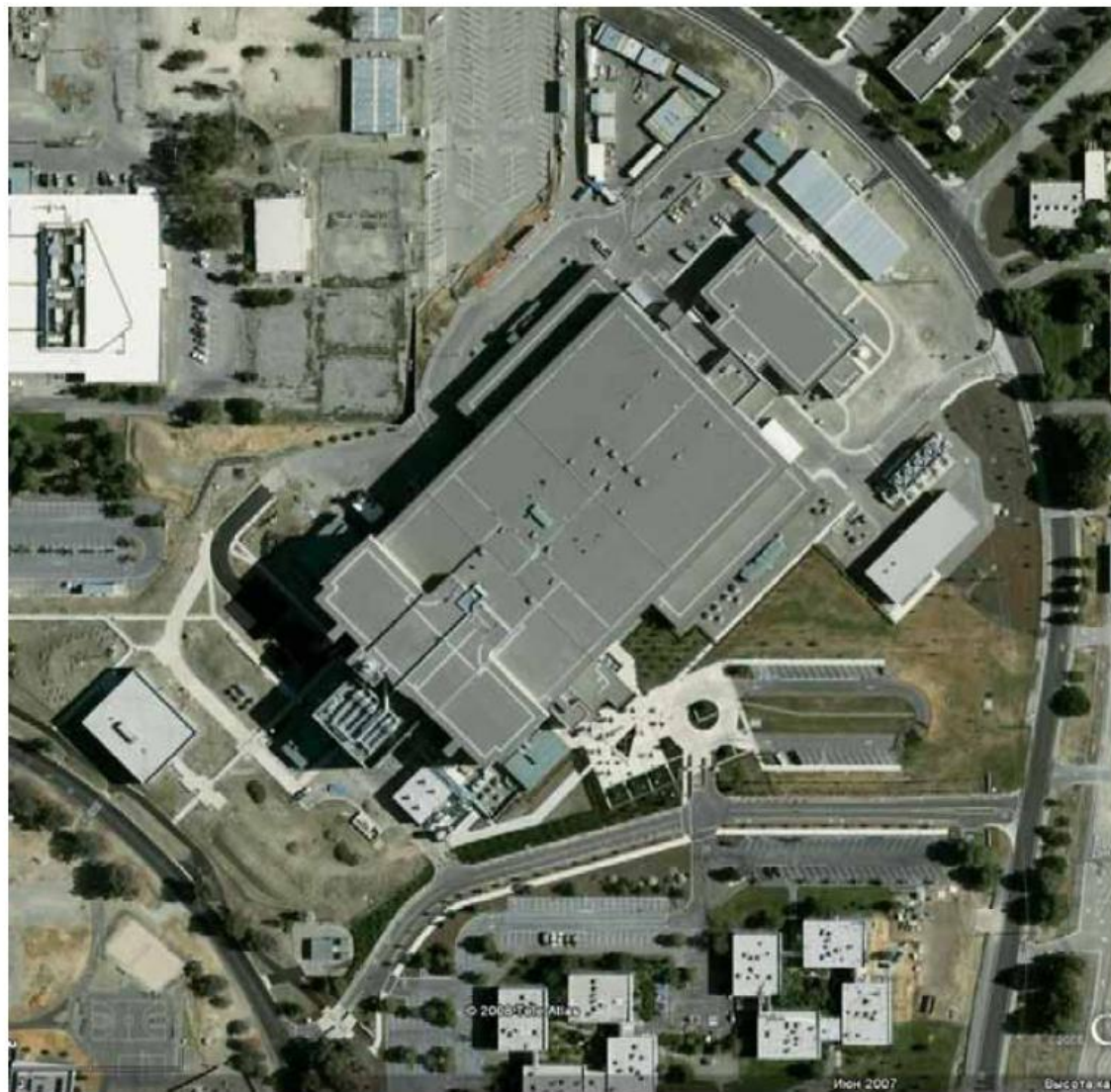
- 192 лазерных луча
- мощность 500 ТВт
- энергия 2.03 МДж (08.2012)
- на мишени 1.875 МДж
- длительность 3-4 нс.
- лучи 40x40 см
- 3ω (0.35 мкм)
- повторяемость канала <1%

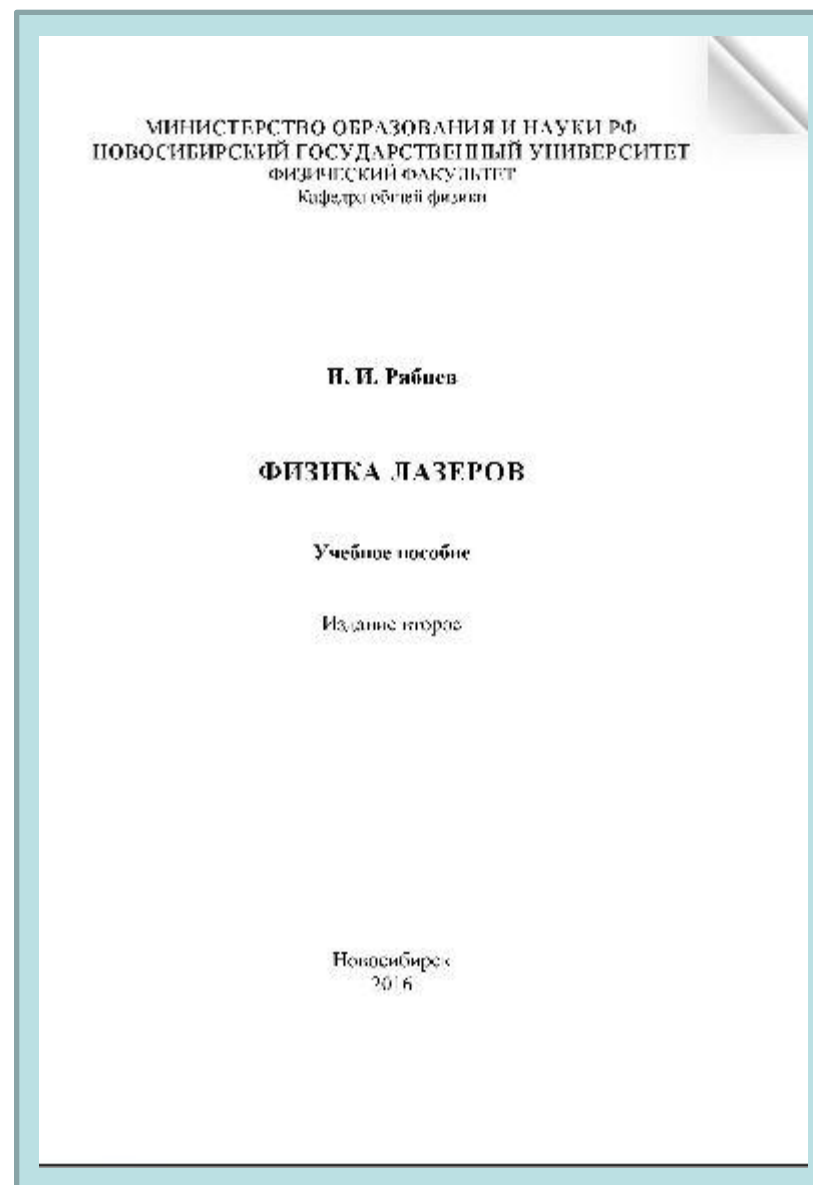
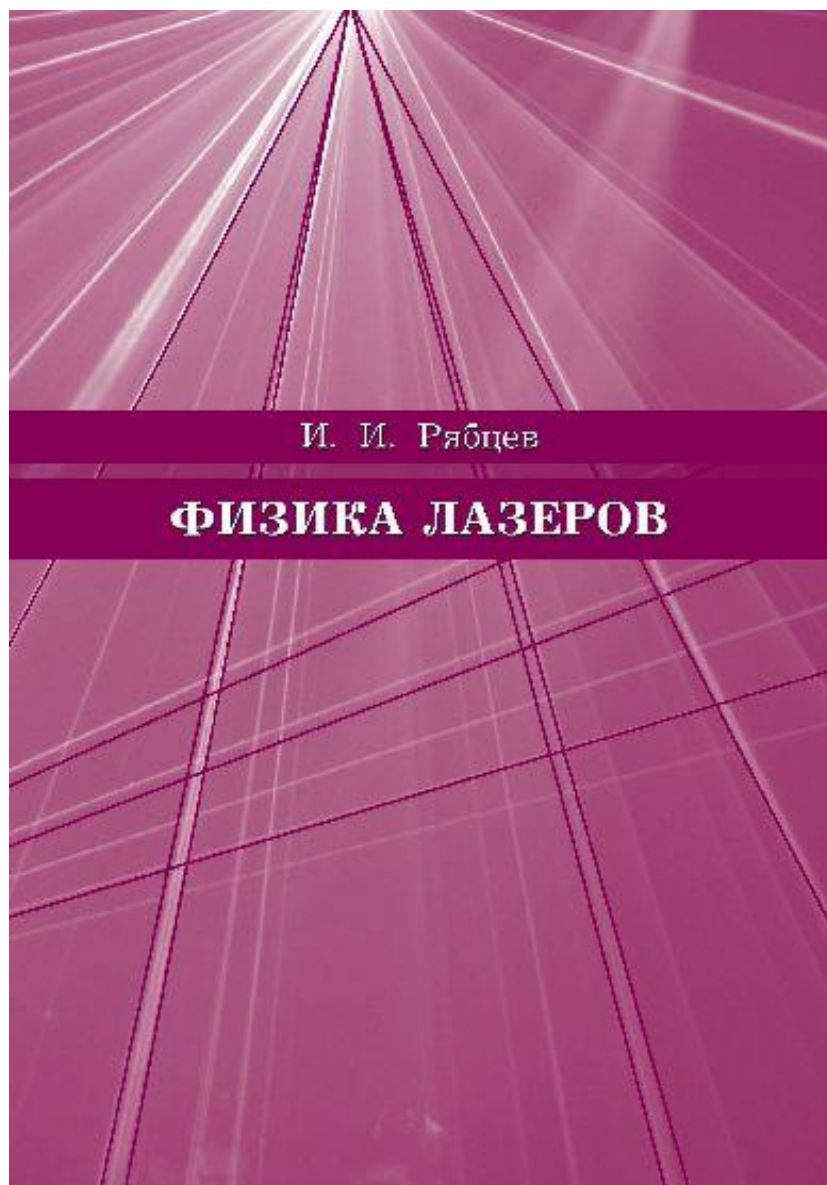
Статус: 29 мая 2009 г.
введён в эксплуатацию,

Эксперименты с мишенью:
6 октября 2010 г. –
1 МДж, криогенная мишень

03 апреля 2014 – получено
26 кДж т/ядерной энергии

стоимость ~4 G\$





МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
Кафедра общей физики

И. И. Рябцев

ФИЗИКА ЛАЗЕРОВ

Учебное пособие

Издание второе

Новосибирск
2016