

СОВРЕМЕННЫЕ ЛАЗЕРЫ:

новые грани света

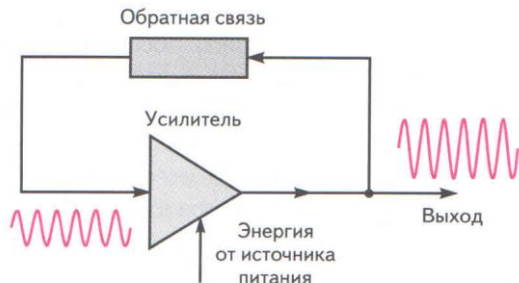
Лекция 4

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ УСТРОЙСТВЕ ЛАЗЕРА

Создание лазера. Состав и структура лазерного излучателя. Лазерные среды и лазерные переходы. Основные типы лазерных сред. Классификация лазеров

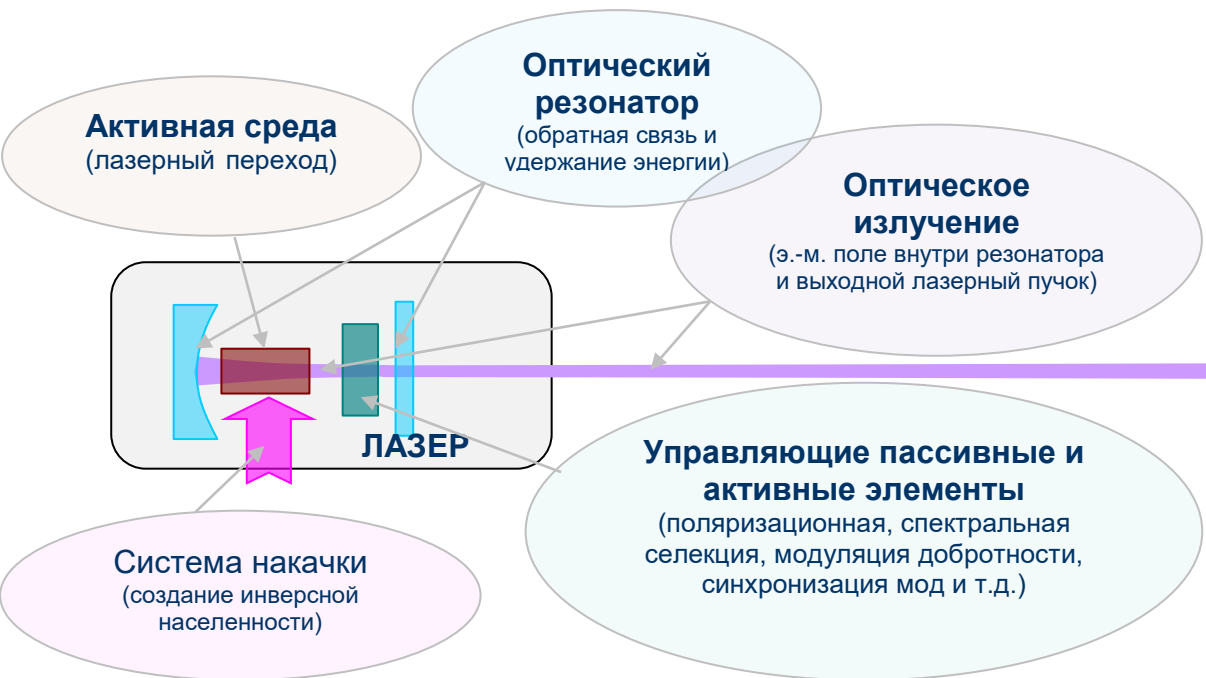
От лазерного усиления к лазерной генерации

Обобщенная схема генератора:



Лазер – генератор оптического излучения на основе:
резонансного оптического усилителя
с положительной обратной связью,
работающего (как правило) в условиях **насыщения**

ЛАЗЕР: принцип работы и состав



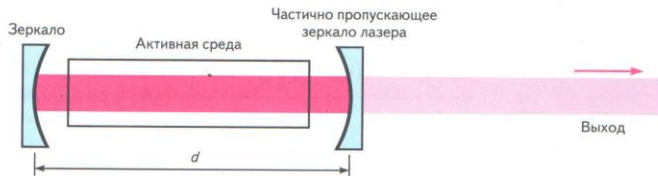
От лазерного усиления к лазерной генерации

Усиление при распространении излучения через **активную среду** за счет процесса **вынужденного** (индуцированного, стимулированного) **излучения**.

Вынужденное излучение возникает при взаимодействии падающих фотонов и **резонансной** [активной] **среды**, имеющей **инверсную населенность**. Лазерная генерация осуществляется (как правило) на центральной (или близкой к ней) частоте **линии усиления** среды.

Подвод энергии в активную среду с созданием инверсной населенности осуществляется с помощью **системы накачки**.

Положительная [оптическая] обратная связь реализуется помещением активной среды в **оптический резонатор**. В качестве оптического резонатора, как правило, используется **резонатор** типа **Фабри-Перо**, состоящий из двух (или более) зеркал. Одно из зеркал делается **частично пропускающим**. Через него выводится **выходное излучение**.



Условие лазерной генерации. Стационарная генерация

Условие **генерации** – превосходство усиления над потерями.

Стационарная генерация реализуется, когда усиление в точности компенсирует потери



В результате совместного действия усиливающей активной среды, характеризующейся определенным спектром усиления, и резонатора, поддерживающего лишь определенные **частотные** и **пространственные** моды, осуществляется **частотная** и **пространственная** селекция генерируемого излучения.

На пути к созданию лазера: историческая справка



1916 год: – А.Эйнштейн предсказывает существование явления вынужденного излучения



1928 год: экспериментальное подтверждение Р. Ладенбургом и Г. Копферманном существования вынужденного излучения



1940 год: В. Фабрикантом и Ф. Бутаевой была предсказана возможность использования вынужденного излучения среды с инверсией населённости для усиления электромагнитного излучения

1950 год: А. Кастлер (Нобелевская премия по физике 1966 года) предлагает метод оптической накачки среды для создания в ней инверсной населённости



Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation

1954 год: первый микроволновой генератор — мазер на аммиаке (Ч. Таунс, Басов Н. Г. и Прохоров А. М. — Нобелевская премия по физике 1964 года). Роль обратной связи играл объёмный резонатор, размеры которого были порядка 12,6 мм

1958 год: Теоретическое обоснование А.Шавловым, Ч.Таунсом и независимо А.М.Прохоровым возможности использования явления вынужденного испускания в оптическом диапазоне. Предложено использовать не объёмный, а **открытый** резонатор типа Фабри-Перо

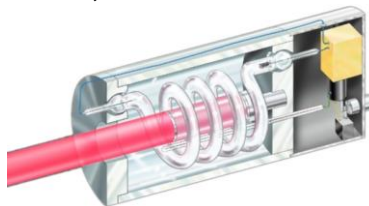
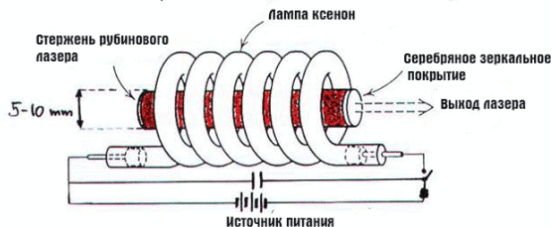


1960 год: Т. Мейман продемонстрировал работу первого оптического квантового генератора — лазера. Активная среда - кристалл искусственного рубина, резонатор образован серебряными зеркальными покрытиями на торцах кристалла, импульсный режим, длина волны 694,3 нм

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (Ч.Таунс?Г.Гудл?)

Рубиновый лазер Т. Меймана

1960, 16 мая



694,3 нм
12 см x 300 г

*T.H.Maiman, Stimulated
Optical Radiation in Ruby.
Nature, v.187, August 6, 1960.*

Вслед за рубиновым лазером

1960, декабрь

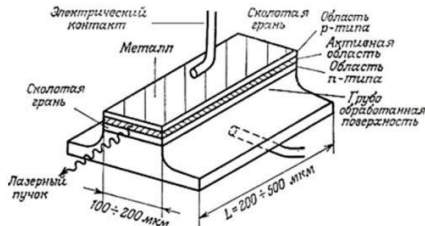
- **He-Ne-лазер**, 1.15 мкм – А.Джаван, В.Беннет

1961, 632.8 нм – Д.Уайт, Дж.Риджен



1962,

- **Полупроводниковый лазер на GaAs** - Р.Холл
- GaAsP** - Н.Холоньяк
- GaAs** - Басов, Крохин, Попов (ФИАН)



1961

- **Химический лазер**
- **Лазер на Nd:стекле**
- **Генерация второй гармоники в рубиновом лазере**

1962

- **Фабри-Перо для селекции мод в резонаторе**

1963

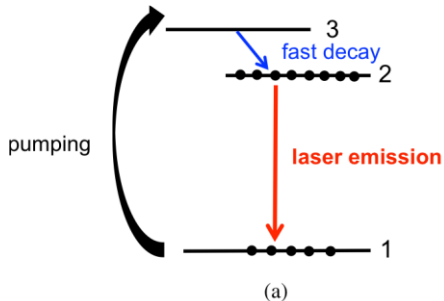
- **Перестраиваемые лазеры на переходных металлах Ni²⁺: MgF₂** (1.62...1.8 мкм)
- **Азотный лазер**
- **Двойные гетероструктуры для лазерных диодов**

1964

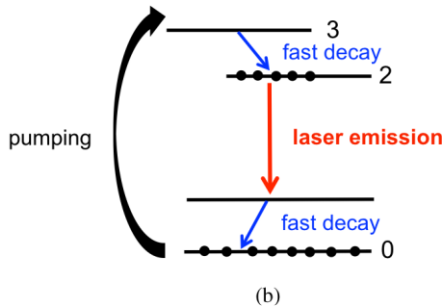
- **Nd:YAG-лазер**
- **Ar:Ion- лазер**
- **HCN-лазер (337мкм)**
- **Твердотельный лазер с диодной накачкой**
и т.д.

Схемы оптической накачки

а: Трехуровневая схема накачки



б: Четырехуровневая схема накачки



Основные типы лазеров

ВКР (Рамановские) -
лазеры

Рентгеновские лазеры

Полупроводниковые
лазеры

Твердотельные лазеры на
люминесцирующих
твёрдых средах
(диэлектрические кристаллы
и стекла)

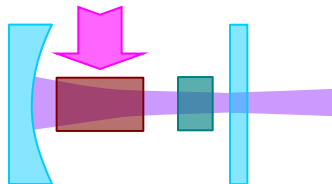
Волоконные лазеры

Вертикально-излучающие
диодные лазеры (VCSEL)

Газовые лазеры

Квантовые каскадные
лазеры (переходы между
слоями гетероструктуры
полупроводников)
Лазеры на квантовых
точках

Лазеры на красителях



Газодинамические лазеры

Эксимерные лазеры

Атмосферные лазеры

Химические лазеры

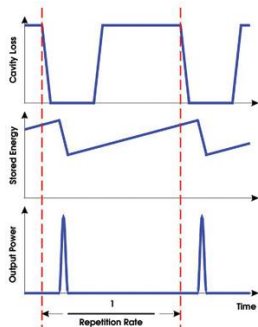
Лазеры на свободных
электронах

Классификация лазеров

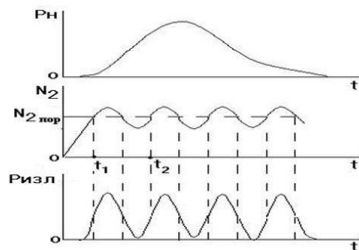
По режиму работы:

Свободная генерация

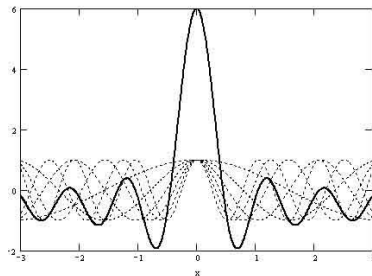
- непрерывная накачка
- импульсная накачка



Синхронизация мод



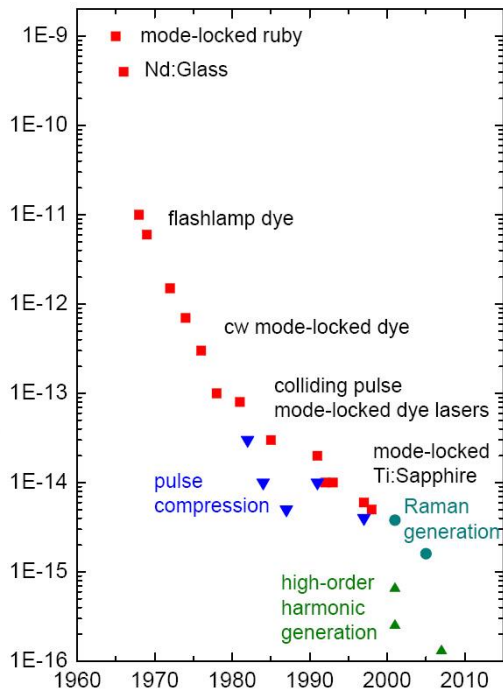
Модуляция добротности



По длине волны, энергии импульса и мощности

Классификация лазеров

По длительности импульсов

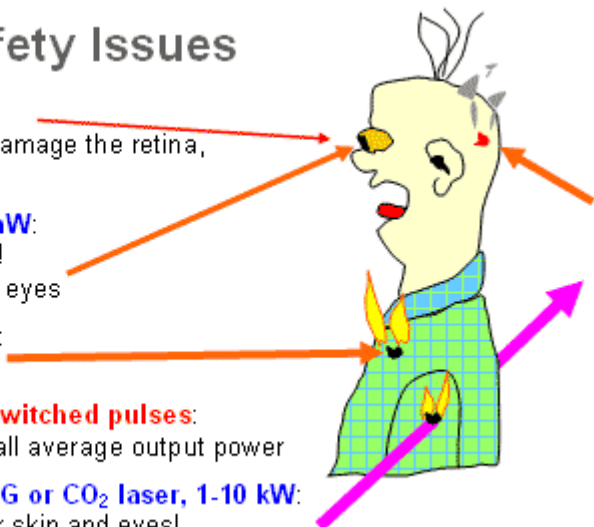


Классификация лазеров

По классу опасности

Laser Safety Issues

- **Laser pointer, 3 mW:**
rather bright; could quickly damage the retina,
but: blinking reflex helps
- **Small Nd:YAG laser, 100 mW:**
invisible – no blinking reflex!
⇒ rather dangerous for the eyes
- Larger **Nd:YAG laser, 10 W:**
burns skin and clothes
- Small **Nd:YAG laser** für **Q-switched pulses:**
very hazardous even for small average output power
- Industrial high power **Nd:YAG or CO₂ laser, 1-10 kW:**
for welding; not beneficial for skin and eyes!



© Christine Kirchraß Paschotta

Иттрий-алюминиевый гранат с неодимом

Nd³⁺:YAG

Накачка **808 нм**: диодная, ламповая

Длина волны генерации:

1064,15 нм: $^4F_{3/2}$ - $^4I_{11/2}$ (с нижнего $^4F_{3/2}$ на третий снизу $^4I_{11/2}$)

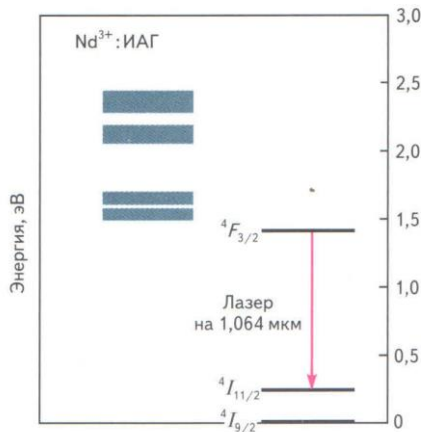
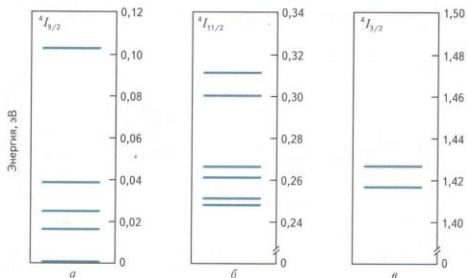
1122,38 нм: $^4F_{3/2}$ - $^4I_{11/2}$ (с нижнего $^4F_{3/2}$ на верхний $^4I_{11/2}$)

946 нм: ($^4F_{3/2}$ - $^4I_{9/2}$, квазитрехуровневая схема)

Лазеры наносекундных и пикосекундных импульсов (2-я, 3-я, 4-я гармоники), непрерывные лазеры

$n=1,82$

Термолинза



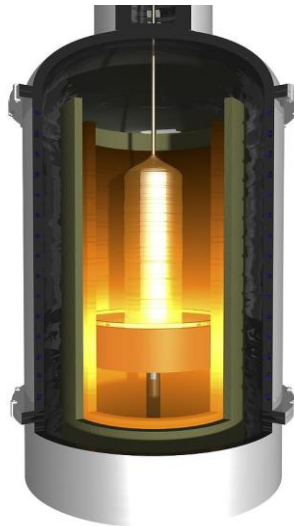
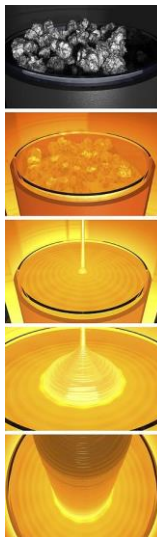
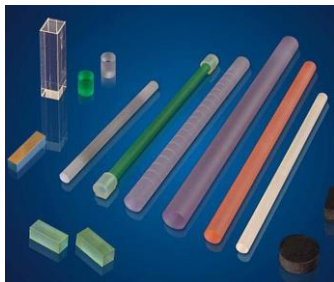
Энергетическая структура Nd³⁺:YAG

Тонкая структура уровней $^4I_{9/2}$ (а), $^4I_{11/2}$ (б) и $^4F_{3/2}$ (в), связанных с основными лазерными переходами

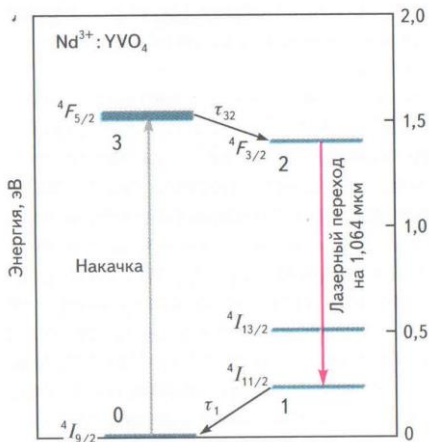
Выращивание лазерных кристаллов



Nd:YAG, содержание ионов Nd
около 1%



Ванадат иттрия с неодимом



$\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$

Накачка 808 нм: диодная

Длина волны генерации:

1,064 мкм ($^4F_{3/2}-^4I_{11/2}$)

1,34 мкм ($^4F_{3/2}-^4I_{13/2}$)

0,914 мкм ($^4F_{3/2}-^4I_{9/2}$)

$n=2,0$

Сечение перехода почти в 3 раза больше, и ширина линии в 1,5 раз больше, чем у $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$

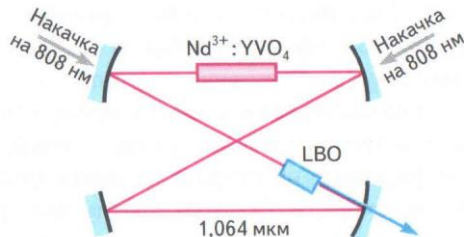


Схема лазера с диодной накачкой и внутрирезонаторным преобразованием во 2-ю гармонику

Иттрий-алюминиевый гранат с иттербием

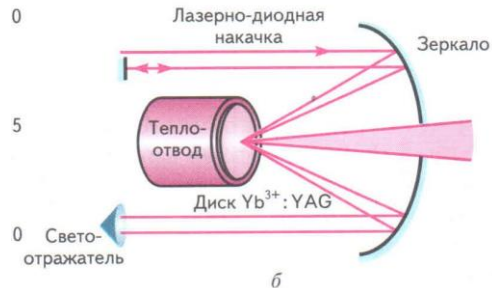
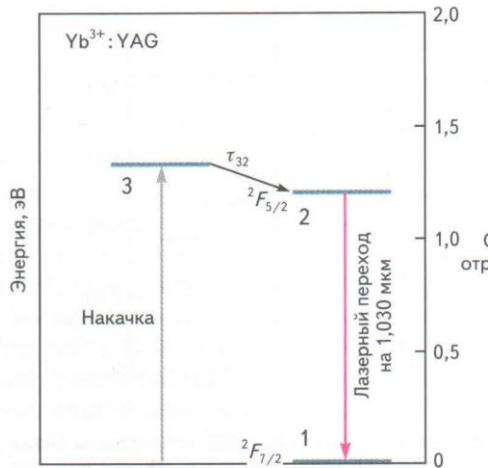


Схема дискового лазера (одночастотного, одномодового)

$\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$

Накачка **940 нм**: диодная

Длина волны генерации:

1,030 мкм ($^2F_{5/2}-^2F_{7/2}$)

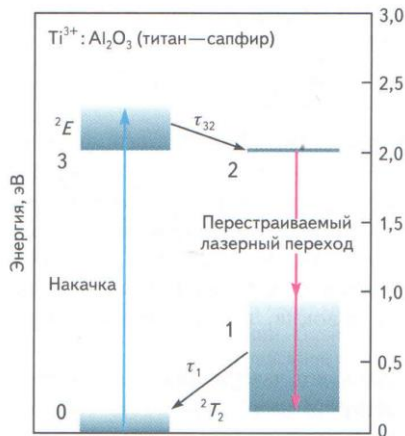
Малая величина квантового дефекта

$n=1,82$

Высокая степень легирования (до 25%)

Высокие средние мощности (сотни ватт)

Титан-сапфир



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

Накачка: 2-я гармоника $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$, $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ или Ar^{+} -лазер

Широкая зона вибронных (из-за воздействия колебаний решетки) состояний, поэтому возможность перестройки длины волны и синхронизации мод.

Верхние уровни зоны заселены слабо, поэтому практически четырехуровневая схема

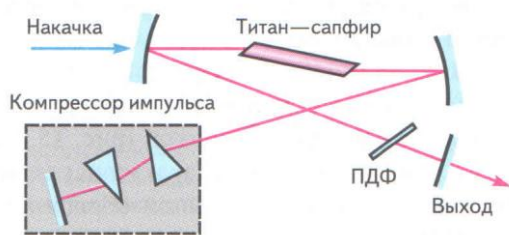


Схема Тi-сапфирового лазера с синхронизацией мод.

Самосинхронизация мод на керровской линзе
Призмный компенсатор дисперсии
Поворотный двулучепреломляющий фильтр для перестройки длины волны

Генерация в широком диапазоне длин волн: от 700 до 1050 нм

До 5 Вт средней мощности

Импульсы длительностью до 10 фс на входе лазера

50 нДж / 80 МГц / 1МВт (пиковая мощность)

