

Оптоэлектронные и квантовые приборы и устройства

Лекция 9:

Твердотельные лазеры

В.М. Шандаров

**Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники**

Laser

Генераторы электромагнитного излучения оптического диапазона, использующие эффект индуцированного излучения, называются лазерами.

Слово **LASER** – это аббревиатура словосочетания:

Light

Amplification by

Stimulated

Emission of

Radiation.

Твердотельные лазеры

Это лазеры на основе ионных кристаллов. Активные среды - кристаллические диэлектрики с введенными в них активными ионами. Как правило, это ионы хрома (Cr^{3+}), неодима (Nd^{3+}) или других редкоземельных элементов.

Основные особенности твердотельных лазеров (по сравнению с газовыми).

а) Концентрация активных ионов в кристалле составляет от сотых долей % (активная примесь вводится в материал) до десятков % (она входит в состав кристалла). Эта концентрация значительно выше, чем в газовых средах. Поэтому в твердых активных средах достигаются более высокие населенности на рабочих уровнях и более высокие коэффициенты усиления и мощности излучения на единицу объема. Соответственно, возможно достижение высоких световых мощностей при очень малых размерах активных элементов.

Твердотельные лазеры

б) Для создания инверсии населенностей в твердотельных лазерах на ионных кристаллах используется оптическая накачка.

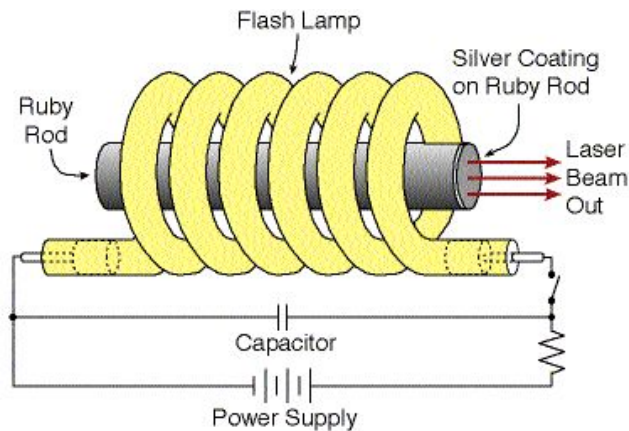
в) Энергетические уровни свободного иона и того же иона в кристалле существенно различаются. Их число у иона в кристалле больше, а положение по шкале энергии может отличаться от такового для свободного иона.

Влияние внутрикристаллических полей приводит к уширению энергетических уровней и даже к возникновению широких энергетических полос – зон.

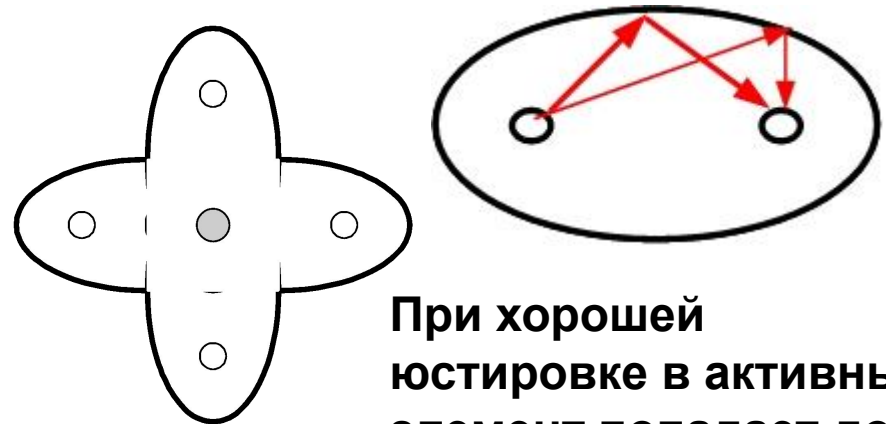
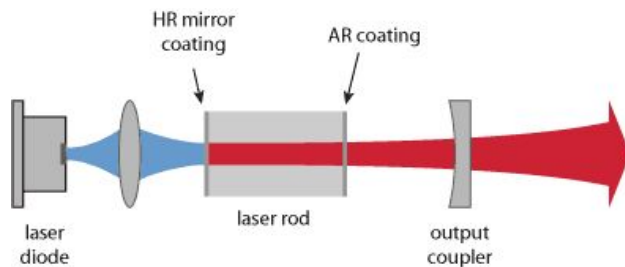
Для получения генерации используются переходы электронов между энергетическими уровнями незаполненных внутренних оболочек иона, для которых влияние внутрикристаллического поля сказывается слабо и эти уровни оказываются достаточно узкими.

Спектр поглощения лазерных кристаллов состоит как из достаточно узких линий, так и может иметь широкие полосы поглощения.

Элементы накачки твердотельных лазеров



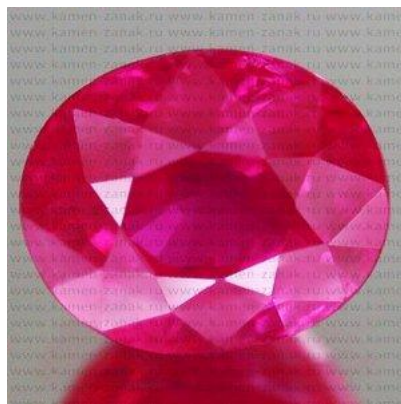
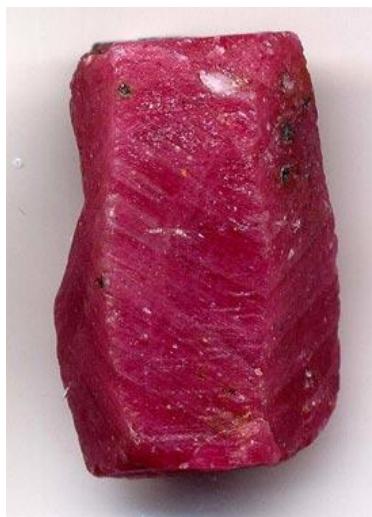
Первая попытка...



При хорошей юстировке в активный элемент попадает до 75% энергии излучения лампы...

Лазер на рубине

Лазер на кристалле рубина – первый твердотельный лазер. Создан в 1960 году, активная среда - кристалл ($\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}^{3+}$). Стандартные лазерные кристаллы содержат $\sim 0,05\% \text{Cr}^{3+}$ ($1,6 \cdot 10^{19}$ ионов/ см^3) и имеют бледно – розовую окраску.



Лазер на рубине

Красный цвет кристаллов рубина определяется наличием широких полос поглощения в синей и зеленой областях спектра. С увеличением концентрации хрома цвет кристалла меняется от бледно-розового (0,05% Cr^{3+}) до темно-красного ($\sim 1\%$ Cr^{3+}).

Физические свойства рубина – высокая твердость, высокая теплопроводность, показатель преломления $n=1,76$. Кристалл имеет ромбоэдрическую симметрию (ось симметрии третьего порядка совпадает с оптической осью кристалла).

Лазер на рубине

Диаметр активного рубинового элемента не должен превышать 2 см. Обычно применяют стержни диаметром около 1 см и длиной около 10 см. Как правило, выращивают кристаллы, оптическая ось c которых составляет угол 90° или 60° с осью стержня. Излучение такого кристалла и соответственно лазерное излучение линейно поляризованы с вектором E , перпендикулярным плоскости, проходящей через ось c и ось стержня.

Лазер на рубине

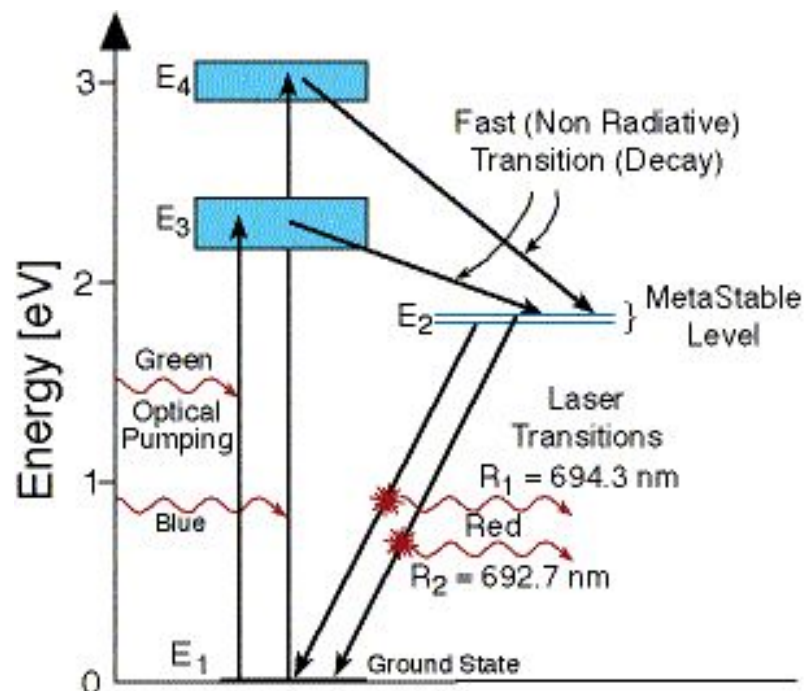


Схема энергетических уровней иона Cr^{3+} в рубине

Полосы поглощения E_3 и E_4 (зеленая и синяя) играют важную роль в процессе лазерной генерации. Ширина каждой из них $\sim 0,1 \text{ мкм}$.

Время жизни в возбужденном состоянии составляет $\sim 10^{-8} \text{ с}$.
Время жизни ионов Cr^{3+} на уровне E_2 определяется излучательными переходами и составляет $\sim 3 \cdot 10^{-3} \text{ с}$.

Лазер на рубине

Имеется **две линии люминесценции**, отвечающие переходам с подуровней верхнего рабочего уровня на основной. Это линия R_1 , ей соответствует длина волны излучения $\lambda=0,6943$ мкм, и линия R_2 с $\lambda=0,6929$ мкм (значения λ - для комнатной температуры).

Излучающая головка лазера состоит из активного элемента и лампы накачки, помещенных в эллиптический отражатель. Два зеркала образуют открытый резонатор. Они могут находиться непосредственно на торцах стержня, либо выполняются на отдельных кварцевых или стеклянных подложках. Зеркала могут быть посеребренными или выполненными в виде многослойных диэлектрических покрытий.

Лазер на рубине

а) Свободная генерация.

В режиме свободной генерации излучение рубинового лазера имеет следующие характеристики:

- длительность импульса излучения – около 1 мс;
- энергия – несколько Дж;
- пиковый режим генерации.

б) В режиме с модулированной добротностью:

Длительность импульса - $10^{-7} \div 10^{-9}$ с;

Мгновенная мощность - $10 \div 1000$ МВт.

Лазер на рубине

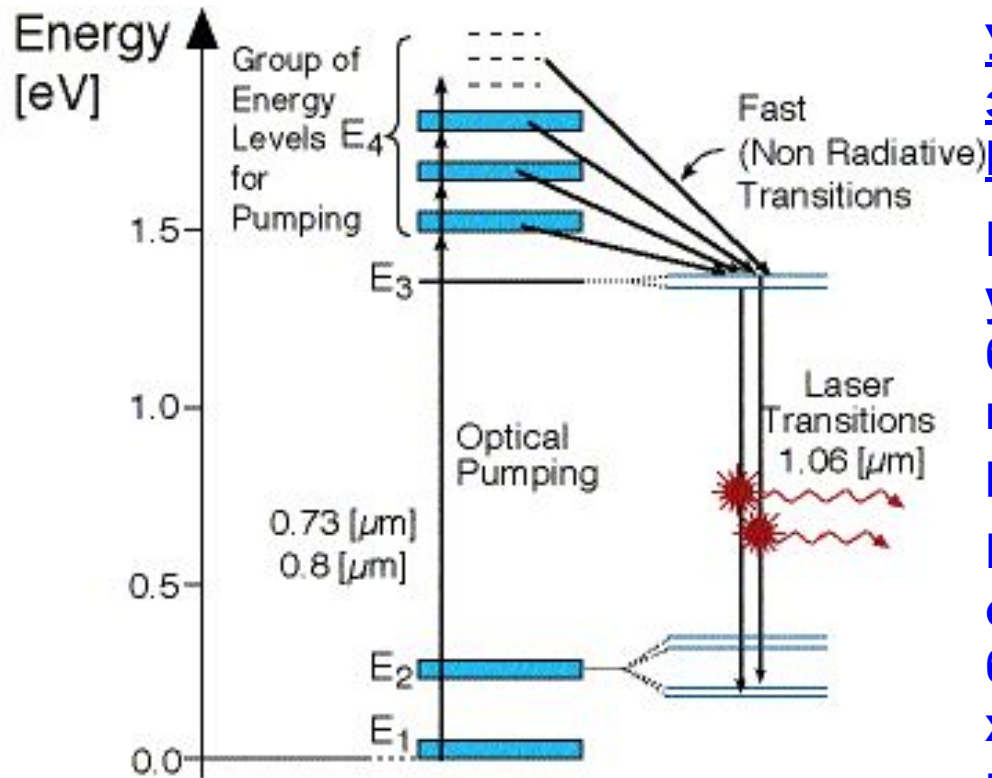


Crescendo CW - diode-pumped solid-state ruby laser. Available in 100- and 150-mW versions, it produces a pitch-perfect single-longitudinal-frequency linewidth of <1 MHz with a coherence length greater than 100 m. It exhibits near-perfect Gaussian beam performance coupled with <10 $\mu\text{rad}/^\circ$ C beam pointing stability and noise down to $<0.05\%$ rms.

Лазер на иттрий – алюминиевом гранате с неодимом (YAG:Nd³⁺)

Активный элемент - цилиндрический образец из монокристалла $Y_3Al_5O_{12}$, в котором часть ионов Y^{3+} замещена ионами Nd^{3+} (концентрация активной примеси, как правило, не превышает 3 ат. %).

Лазер на YAG:Nd³⁺



Упрощенная схема энергетических уровней иона Nd³⁺ в YAG

Полосы поглощения связаны с уровнем E₃ безызлучательными переходами с временем релаксации ~10⁻⁷ с.

Переходы с уровня E₂ в основное состояние – безызлучательные, характеризуются временем релаксации τ=10⁻⁹ с

Время жизни лазерного уровня (E₃) - τ=0,23 мс

Лазер на YAG:Nd³⁺

YAG:Nd³⁺ – лазеры могут генерировать излучение как в непрерывном, так и в импульсном режиме.

При работе в импульсном режиме для накачки используются
He лампы, в непрерывном – **Kr**.

Размеры активных элементов достигают 0,5×12 см.

Характеристики излучения:

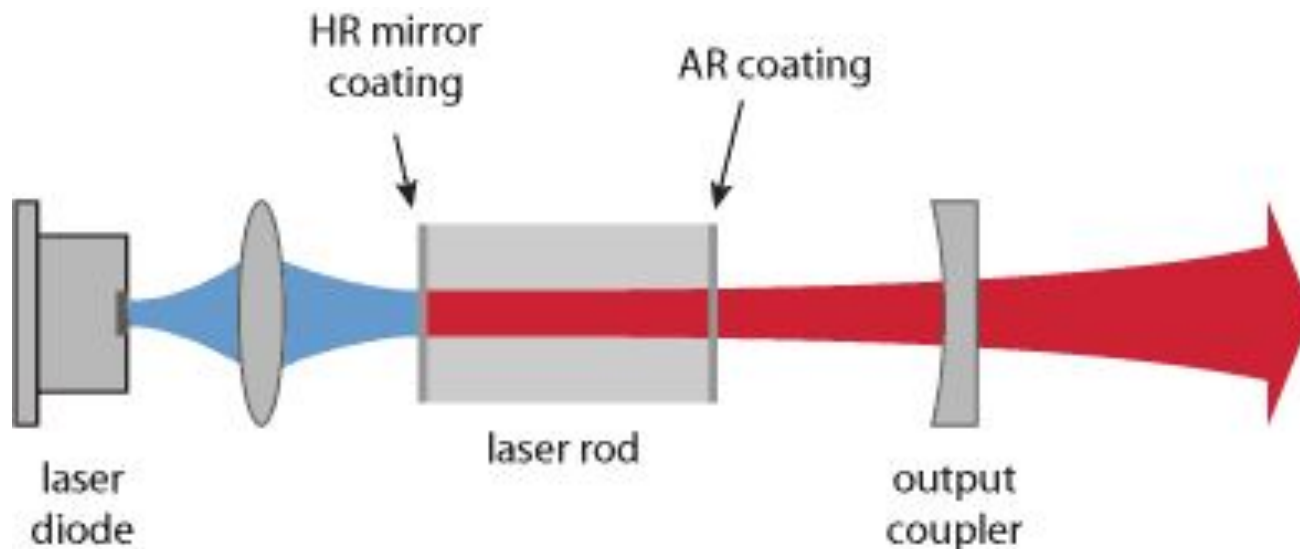
- 1) в непрерывном многомодовом режиме **P_{rad}** может достигать 500 Вт;
- 2) в импульсном режиме с частотой повторения импульсов 50 Гц средняя мощность может достигать величину до 200 Вт;
- 3) в режиме модулированной добротности мгновенная мощность в импульсе достигает до **50 МВт**;
- 4) коэффициент полезного действия лазеров с ламповой накачкой составляет до **3 %**.

Твердотельные лазеры с диодной накачкой

Использование полупроводниковых лазеров в качестве источников накачки твердотельных лазеров позволило существенно уменьшить их размеры и повысить к.п.д.

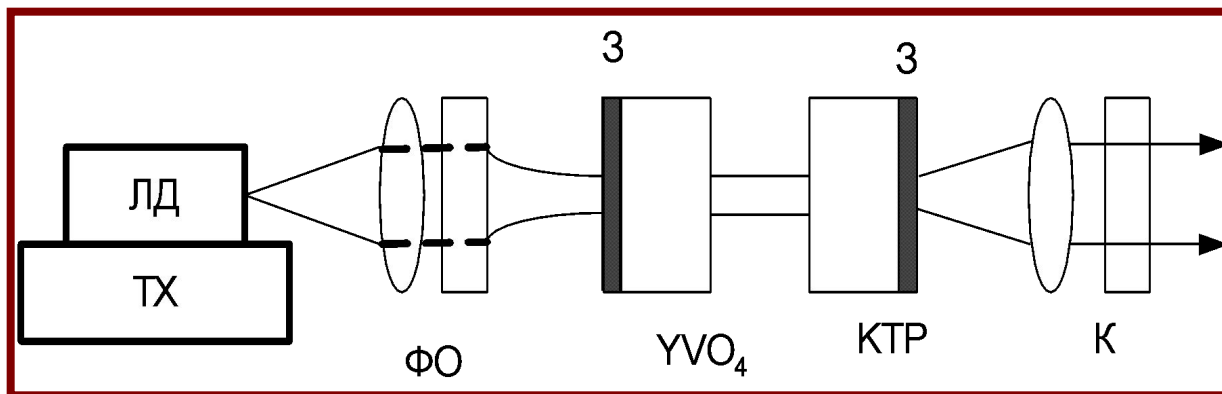
В качестве активной примеси в лазерных материалах наиболее широко используется неодим. Для его ионов характерно наличие полосы поглощения вблизи длины волны 0,8 мкм, что хорошо согласуется с длиной волны излучения **AlGaAs** лазеров.

Твердотельные лазеры с диодной накачкой



В качестве активных сред применяются Nd:YAG, Nd:YVO₄ (ванадат иттрия), Nd:LSB (скандоборат лантана).

Твердотельные лазеры с диодной накачкой и удвоением частоты

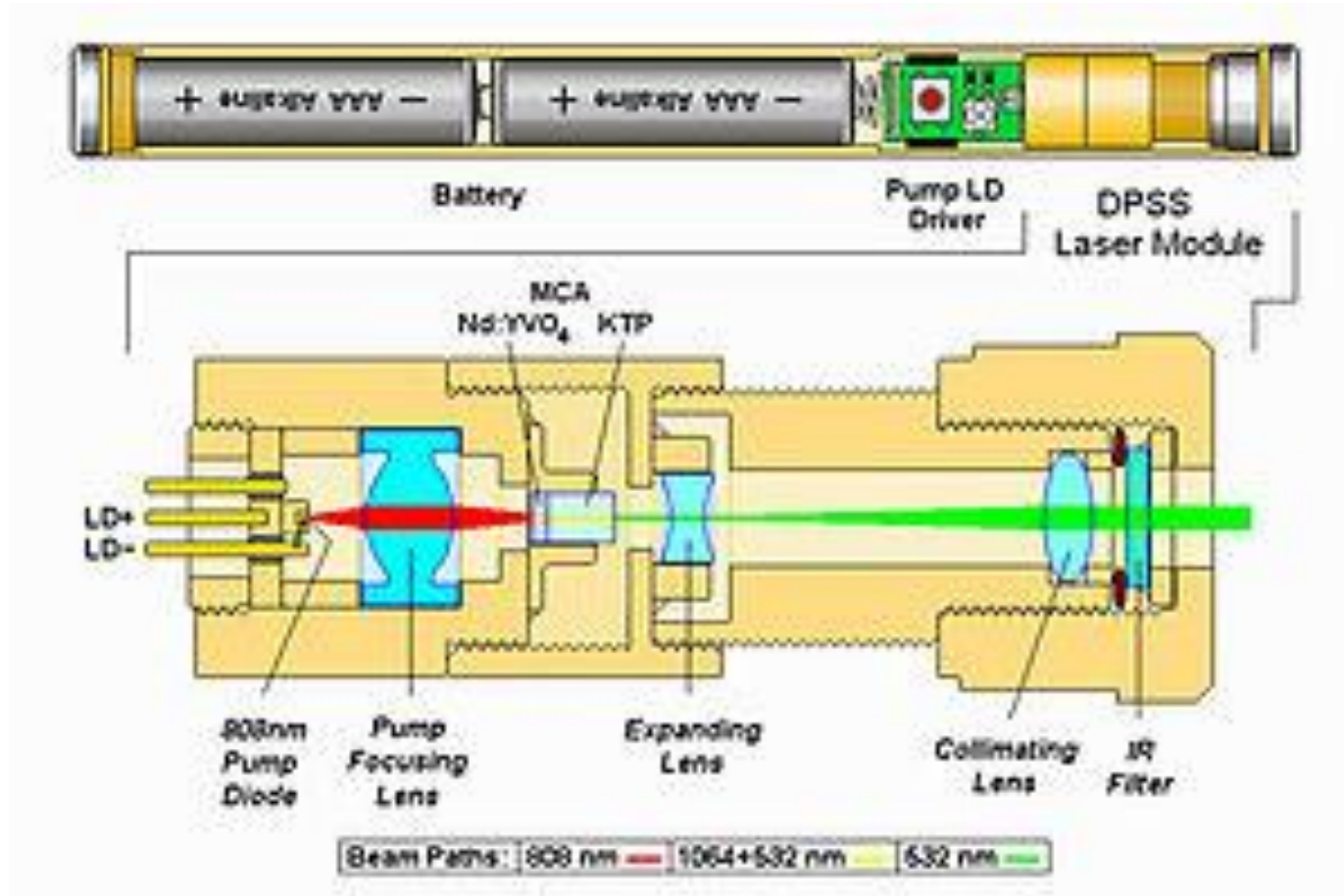


Типичная конструкция лазера с диодной накачкой, генерирующего излучение с длиной волны 0,53 мкм.

Твердотельные лазеры с диодной накачкой и удвоением частоты

Излучение лазерного диода (ЛД) с $\lambda=0,81$ мкм с помощью фокусирующей оптики (ФО) вводится через торец в активный кристалл (YVO_4). Зеркало (З) прозрачно для излучения накачки, но обладает высоким коэффициентом отражения для излучения с $\lambda=1,06$ мкм. В оптический резонатор помещен нелинейный кристалл КТР (титанил - фосфат калия), осуществляющий удвоение частоты. Второе зеркало резонатора прозрачно для излучения с $\lambda=532$ нм и хорошо отражает на основной гармонике. Выведенное из резонатора излучение с удвоенной частотой коллимируется оптической системой (К). Термохолодильник (ТХ), в качестве которого используется элемент Пелтье, необходим для стабилизации длины волны излучения полупроводникового лазера.

Твердотельные лазеры с диодной накачкой и удвоением частоты



**Спасибо за
внимание!**

