

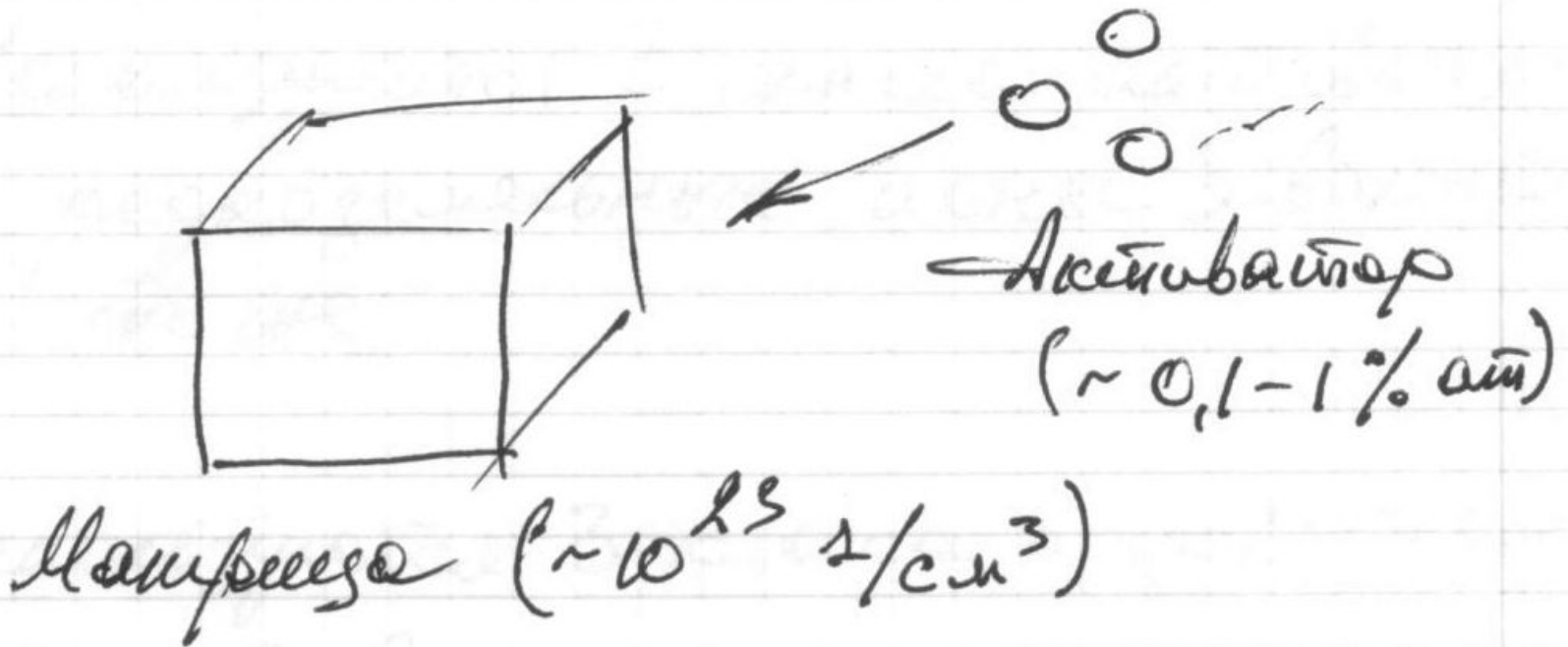
# Лекция 8

---

## *Активные среды твёрдотельных лазеров*

Физические основы создания твердотельных лазерных систем

## Активные среды твердотельных лазеров



# Активные среды твердотельных лазеров

---

## **Требования к матрице:**

Хорошие оптические св-ва (однородность, прозрачность на длинах волн генерации и накачки)

Хорошие механические св-ва (прочность, теплопроводность)

Технологичность производства

# Активные среды твердотельных лазеров

## Наиболее употребительные матрицы (и менее употребительные...)

Гранаты  $Y_3Al_5O_{12}$  YAG; ... Gd Ga Sc

Стекла = силикатные:

$Li_2O-2SiO_2$ ;  $Na_2O-MgO-4SiO_2$ ; ...

фосфатные:

$Na_2O-MgO-2P_2O_5$ ;

боратные ... германатные ... орторосфатные...

теллуридные...

Алюминаты:  $YAlO_3$

Вольфраматы  $CaWO_4$  молибдаты  $CaMoO_4$

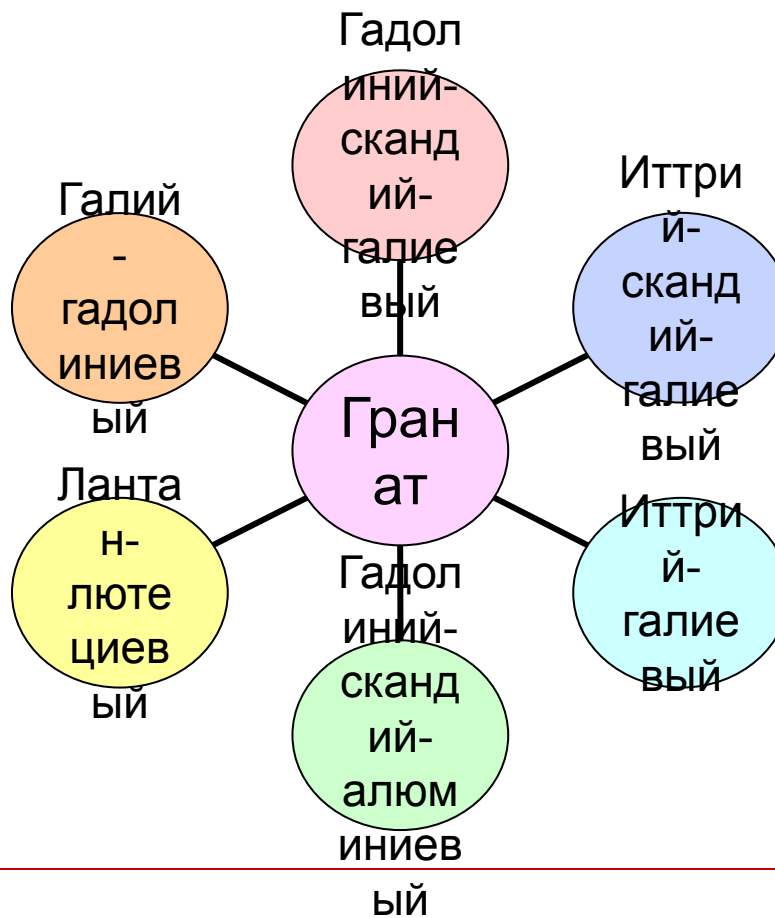
Фториды:  $CaF_2$ ;  $YLiF_4$  (YLF)

Керамики

# Активные среды твердотельных лазеров

## Наиболее употребительные матрицы (и менее употребительные...)

---



# Активные среды твердотельных лазеров

## Активаторы

---

### **Требования к активаторам:**

Развитый спектр поглощения (для ламповой накачки)

Правильная спектроскопическая схема (узкие линии люминесценции, большие времена жизни метастабильных уровней,...)

Способность входить в матрицу без отрицательных побочных эффектов (внесение оптических неоднородностей, тушение люминесценции, ...)

# Активные среды твердотельных лазеров

## Активаторы

---

Выделяются 3 класса активаторов:

- 2- и 3-валентные редкоземельные ионы (Pr Nd Sm Eu Gd Tb Dy Ho Er Tm Yb)
- ионы переходных металлов  $\text{Cr}^{3+}$  Ni Co
- ионы азота ( $\text{N}^+$ )



# Современная периодическая система элементов Д.И.Менделеева

Group 1 <b>Ia</b>	Group 2 <b>Ila</b>
<b>1 H</b> 1s <sup>1</sup> 1.00794 Hydrogen Водород	<b>2 He</b> 1s <sup>2</sup> 4.002602 Helium Гелий
<b>3 Li</b> [He]2s <sup>2</sup> 2s <sup>1</sup> 6.941 Lithium Литий	<b>4 Be</b> 2s <sup>2</sup> 9.012182 Beryllium Бериллий
<b>11 Na</b> [Ne]3s <sup>1</sup> 22.989770 Sodium Натрий	<b>12 Mg</b> 3s <sup>2</sup> 24.3050 Magnesium Магний
<b>19 K</b> [Ar]4s <sup>1</sup> 39.0983 Potassium Калий	<b>20 Ca</b> 4s <sup>2</sup> 40.078 Calcium Кальций
<b>37 Rb</b> [Kr]5s <sup>1</sup> 85.4678 Rubidium Рубидий	<b>38 Sr</b> 5s <sup>2</sup> 87.62 Strontium Стронций
<b>55 Cs</b> [Xe]6s <sup>1</sup> 132.90545 Caesium Цезий	<b>56 Ba</b> 6s <sup>2</sup> 137.327 Barium Барий
<b>87 Fr</b> [Rn]7s <sup>1</sup> 27 Francium Франций	<b>88 Ra</b> 7s <sup>2</sup> 226 Radium Радий

Атомная масса, относительная  
**75Re**  
Атомный номер. Обозначение  
Распределение электронов  
Температура плавления (°C)  
Температура кипения (°C)  
Электроотрицательность  
(по Полингу/по Аллреду и Рохову)  
Название  
Латинское название

186.207  
**75Re**  
[Xe] 4f<sup>14</sup>5d<sup>5</sup>6s<sup>2</sup>  
3180  
5627  
1.9/1.46  
**Rhenium**  
Рений  
*Rhenium*  
Latin name

Groups 1...18 IUPAC 1989  
Groups IA...VIIII...0 IUPAC 1970  
Группы 1...18 ИЮПАК, 1989  
Группы IA...VIIII...0 ИЮПАК, 1970

13 <b>Illa</b>	14 <b>Iva</b>	15 <b>Va</b>	16 <b>Via</b>	17 <b>VIIa</b>	18 <b>VIIla</b>
<b>5 B</b> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>1</sup> 10.811 Boron Бор	<b>6 C</b> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>2</sup> 12.011 Carbon Углерод	<b>7 N</b> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>3</sup> 14.00674 Nitrogen Азот	<b>8 O</b> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>4</sup> 15.9994 Oxygen Кислород	<b>9 F</b> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>5</sup> 18.9984032 Fluorine Фтор	<b>10 Ne</b> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>6</sup> 20.1797 Neon Неон
<b>13 Al</b> 3s <sup>2</sup> 3p <sup>1</sup> 26.981538 Aluminium (Aluminum) Алюминий	<b>14 Si</b> 3s <sup>2</sup> 3p <sup>2</sup> 28.0855 Silicon Кремний	<b>15 P</b> 3s <sup>2</sup> 3p <sup>3</sup> 30.973761 Phosphorus Фосфор	<b>16 S</b> 3s <sup>2</sup> 3p <sup>4</sup> 32.066 Sulphur Сера	<b>17 Cl</b> 3s <sup>2</sup> 3p <sup>5</sup> 35.4527 Chlorine Хлор	<b>18 Ar</b> 3s <sup>2</sup> 3p <sup>6</sup> 39.948 Argon Аргон
<b>19 K</b> [Ar]4s <sup>1</sup> 39.0983	<b>20 Ca</b> 4s <sup>2</sup> 40.078	<b>21 Sc</b> 3d <sup>1</sup> 4s <sup>2</sup> 44.955910	<b>22 Ti</b> 3d <sup>2</sup> 4s <sup>2</sup> 47.867	<b>23 V</b> 3d <sup>3</sup> 4s <sup>2</sup> 50.9415	<b>24 Cr</b> 3d <sup>5</sup> 4s <sup>1</sup> 51.9961
<b>25 Mn</b> 3d <sup>5</sup> 4s <sup>2</sup> 54.938046	<b>26 Fe</b> 3d <sup>6</sup> 4s <sup>2</sup> 55.845	<b>27 Co</b> 3d <sup>7</sup> 4s <sup>2</sup> 58.933200	<b>28 Ni</b> 3d <sup>8</sup> 4s <sup>2</sup> 58.6934	<b>29 Cu</b> 3d <sup>10</sup> 4s <sup>1</sup> 63.546	<b>30 Zn</b> 3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 65.39
<b>31 Ga</b> 3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>1</sup> 69.723	<b>32 Ge</b> 3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>2</sup> 72.61	<b>33 As</b> 3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>3</sup> 74.92160	<b>34 Se</b> 3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>4</sup> 78.96	<b>35 Br</b> 3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>5</sup> 79.904	<b>36 Kr</b> 3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>6</sup> 83.80
<b>49 In</b> 4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>1</sup> 114.818	<b>50 Sn</b> 4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>2</sup> 118.710	<b>51 Sb</b> 4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>3</sup> 121.760	<b>52 Te</b> 4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>4</sup> 127.60	<b>53 I</b> 4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>5</sup> 126.90447	<b>54 Xe</b> 4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>6</sup> 131.29
<b>81 Tl</b> 4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup> 6p <sup>1</sup> 204.3833	<b>82 Pb</b> 4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup> 6p <sup>2</sup> 207.2	<b>83 Bi</b> 4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup> 6p <sup>3</sup> 208.98038	<b>84 Po</b> 4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup> 6p <sup>4</sup> (210)	<b>85 At</b> 4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup> 6p <sup>5</sup> (210)	<b>86 Rn</b> 4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup> 6p <sup>6</sup> (222)
<b>90 Th</b> 6d <sup>2</sup> 7s <sup>2</sup> 232.0377	<b>91 Pa</b> 5f <sup>2</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup> 231.03688	<b>92 U</b> 5f <sup>3</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup> 238.02891	<b>93 Np</b> 5f <sup>4</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup> 237.04817	<b>94 Pu</b> 5f <sup>6</sup> 7s <sup>2</sup> 244.06422	<b>95 Am</b> 5f <sup>7</sup> 7s <sup>2</sup> 243.06138
<b>96 Cm</b> 5f <sup>7</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup> 247.0703	<b>97 Bk</b> 5f <sup>7</sup> 7s <sup>2</sup> 247.0703	<b>98 Cf</b> 5f <sup>10</sup> 7s <sup>2</sup> 251.0832	<b>99 Es</b> 5f <sup>11</sup> 7s <sup>2</sup> 252.0832	<b>100 Fm</b> 5f <sup>12</sup> 7s <sup>2</sup> 257.1037	<b>101 Md</b> 5f <sup>13</sup> 7s <sup>2</sup> 258.1037
<b>102 No</b> 5f <sup>14</sup> 7s <sup>2</sup> 259.1037	<b>103 Lr</b> 5f <sup>14</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup> 260.1037				

\* Element has no stable nuclides. For radioactive elements the value in parentheses refers to the number of nucleons (mass number) of the most stable isotope (IUPAC, 1995).  
\* Элемент не имеет устойчивых изотопов. Для него в скобках приведено значение массового числа (число нуклонов в ядре) наиболее долгоживущего изотопа (ИЮПАК, 1995).  
( ) Alternative english name  
[ ] American spelling of the element's name  
[ ] Альтернативное английское название  
[ ] Американское написание названия элемента

© P.C. Сайфуллин, А.Р.Сайфуллин, 2004  
© R.S.Saifullin, A.R.Saifullin, 2004



# Активные среды твердотельных лазеров

## Почему редкоземельные ионы?

Number	Element	Outermost electron shell					
54	Xenon, Xe	$4d^{10}$	—	$5s^2$	$5p^6$	—	—
59	Praseodymium, Pr	$4d^{10}$	$4f^3$	$5s^2$	$5p^6$	—	$6s^2$
60	Neodymium, Nd	$4d^{10}$	$4f^4$	$5s^2$	$5p^6$	—	$6s^2$
61	Promethium, Pm	$4d^{10}$	$4f^5$	$5s^2$	$5p^6$	—	$6s^2$
62	Samarium, Sm	$4d^{10}$	$4f^6$	$5s^2$	$5p^6$	—	$6s^2$
63	Europium, Eu	$4d^{10}$	$4f^7$	$5s^2$	$5p^6$	—	$6s^2$
64	Gadolinium, Gd	$4d^{10}$	$4f^8$	$5s^2$	$5p^6$	$5d$	$6s^2$
65	Terbium, Tb	$4d^{10}$	$4f^9$	$5s^2$	$5p^6$	—	$6s^2$
66	Dysprosium, Dy	$4d^{10}$	$4f^{10}$	$5s^2$	$5p^6$	—	$6s^2$
67	Holmium, Ho	$4d^{10}$	$4f^{11}$	$5s^2$	$5p^6$	—	$6s^2$
68	Erbium, Er	$4d^{10}$	$4f^{12}$	$5s^2$	$5p^6$	—	$6s^2$
69	Thulium, Tm	$4d^{10}$	$4f^{13}$	$5s^2$	$5p^6$	—	$6s^2$
70	Ytterbium, Yb	$4d^{10}$	$4f^{14}$	$5s^2$	$5p^6$	—	$6s^2$
71	Lutetium, Lu	$4d^{10}$	$4f^{14}$	$5s^2$	$5p^6$	$5d$	$6s^2$

# Активные среды твердотельных лазеров

## Экзотика

---

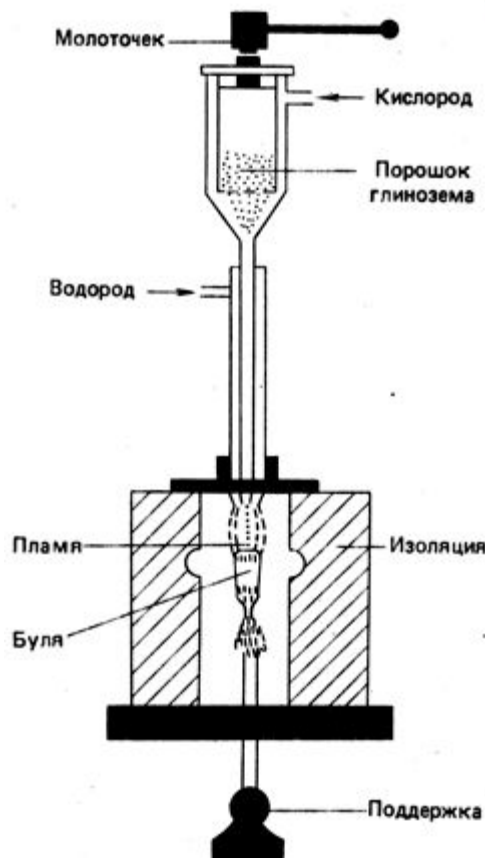
$\text{CaF}_2: \text{T}^{3+}$  (уровни  $5f$  экранируются  
уровнями  $6d$  и  $6f$ )

$\lambda = 2,6 \mu$

Нижний раб. уровень -  $550 \text{ см}^{-1} \Rightarrow$  крио!

# Активные среды твердотельных лазеров

## Методы выращивания кристаллов



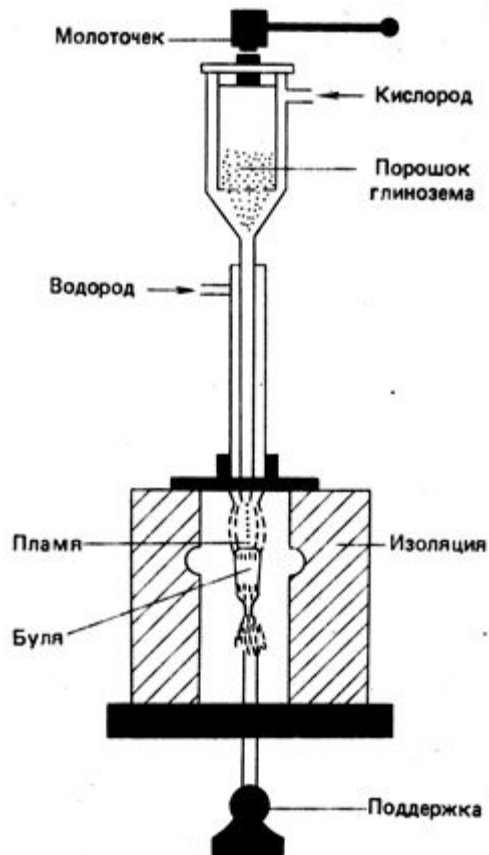
### Метод Вернейля (1902 г):

Просыпка порошковой шихты в трубчатую печь □ шихта расплавляется во время падения в кислородно-водородном пламени □ питание капли расплава на поверхности затравки.

**Преимущества:** отсутствие флюсов и тиглей. **Недостатки:** стехиометрия состава может нарушаться вследствие восстановления компонентов водородом и испарения летучих веществ. Скорость выращивания – несколько мм/час. Рубин.

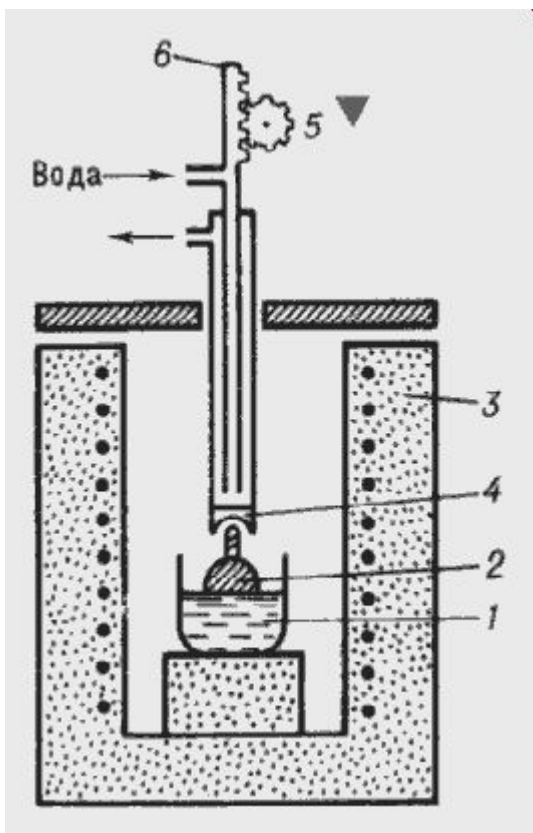
# Активные среды твердотельных лазеров

## Методы выращивания кристаллов



# Активные среды твердотельных лазеров

## Методы выращивания кристаллов



### Метод Чохральского (1916 г; промышл. с 1950):

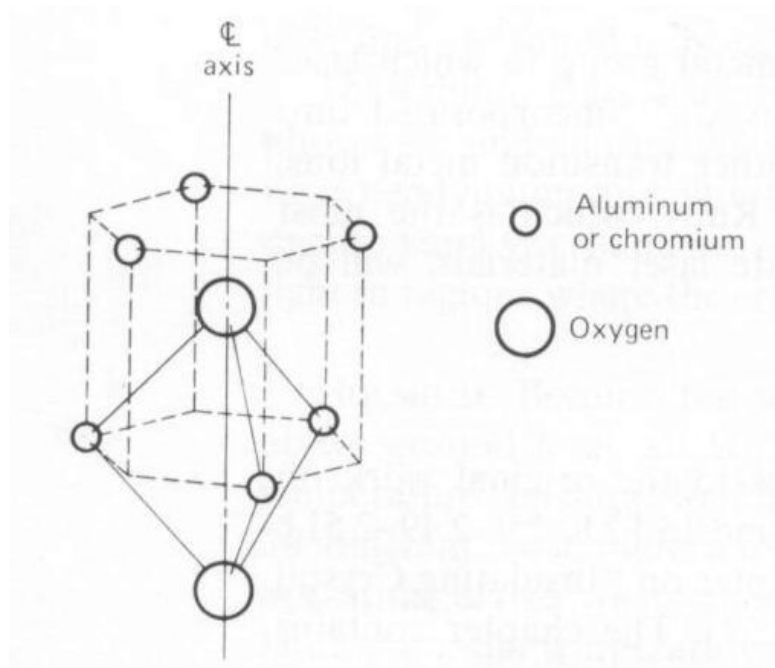
По методу Чохральского производят вытягивание вверх на затравку монокристалла из ванны (иридий!) с расплавом. Нагрев - СВЧ излучением. Для снятия возникающих напряжений используют дополнительную печь, через которую проходит выращиваемый кристалл и отжигается. Основной метод производства лазерных кристаллов.



# Активные среды твердотельных лазеров

## Рубин

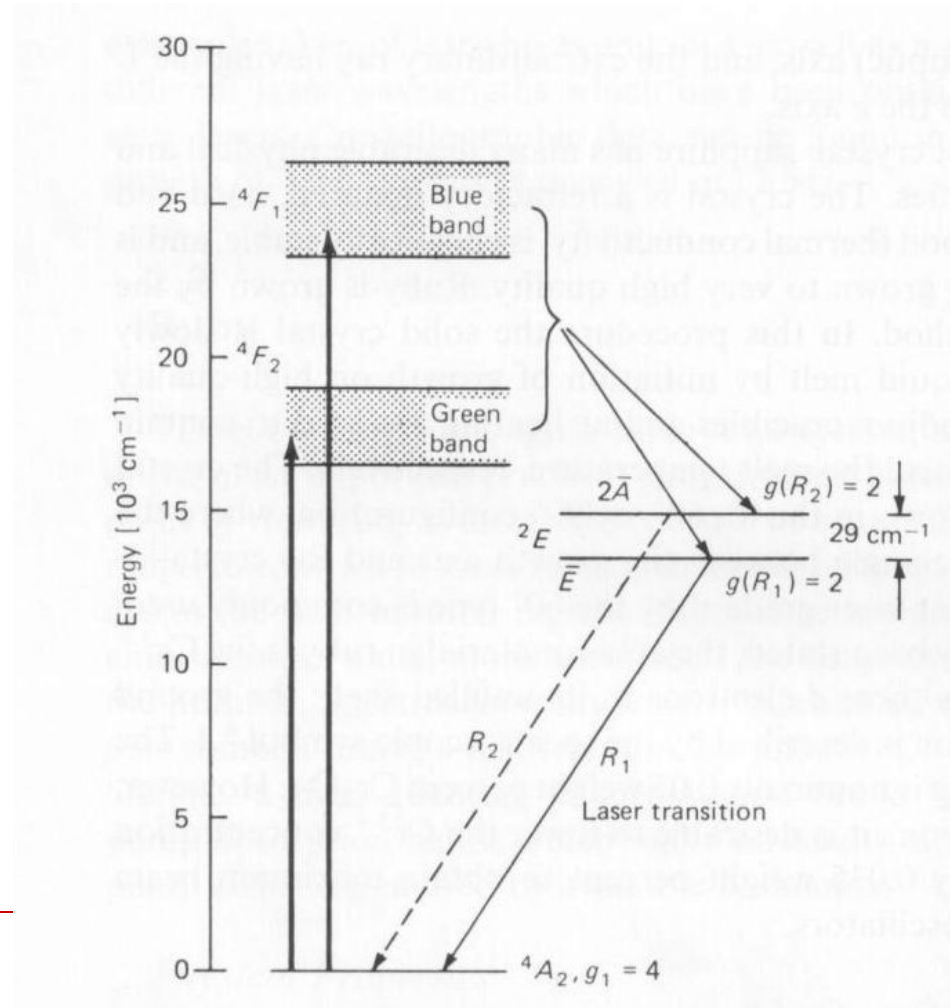
Впервые лазерное излучение было получено с помощью кристалла рубина:  
 $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}^{3+}$





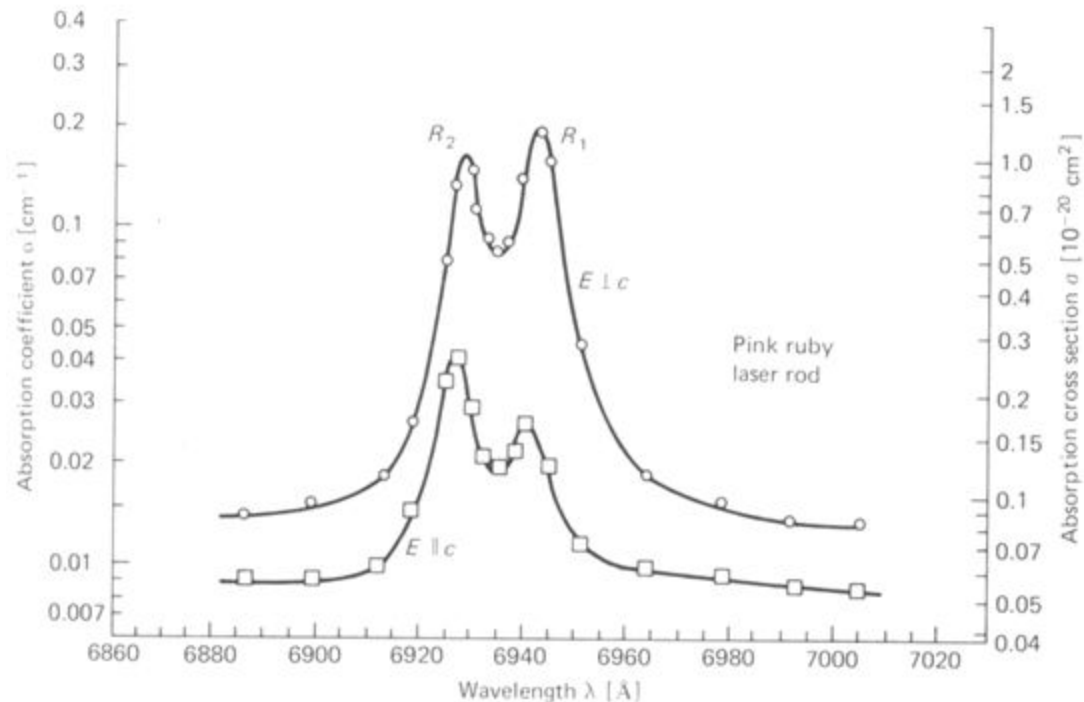
# Активные среды твердотельных лазеров

## Рубин



# Активные среды твердотельных лазеров

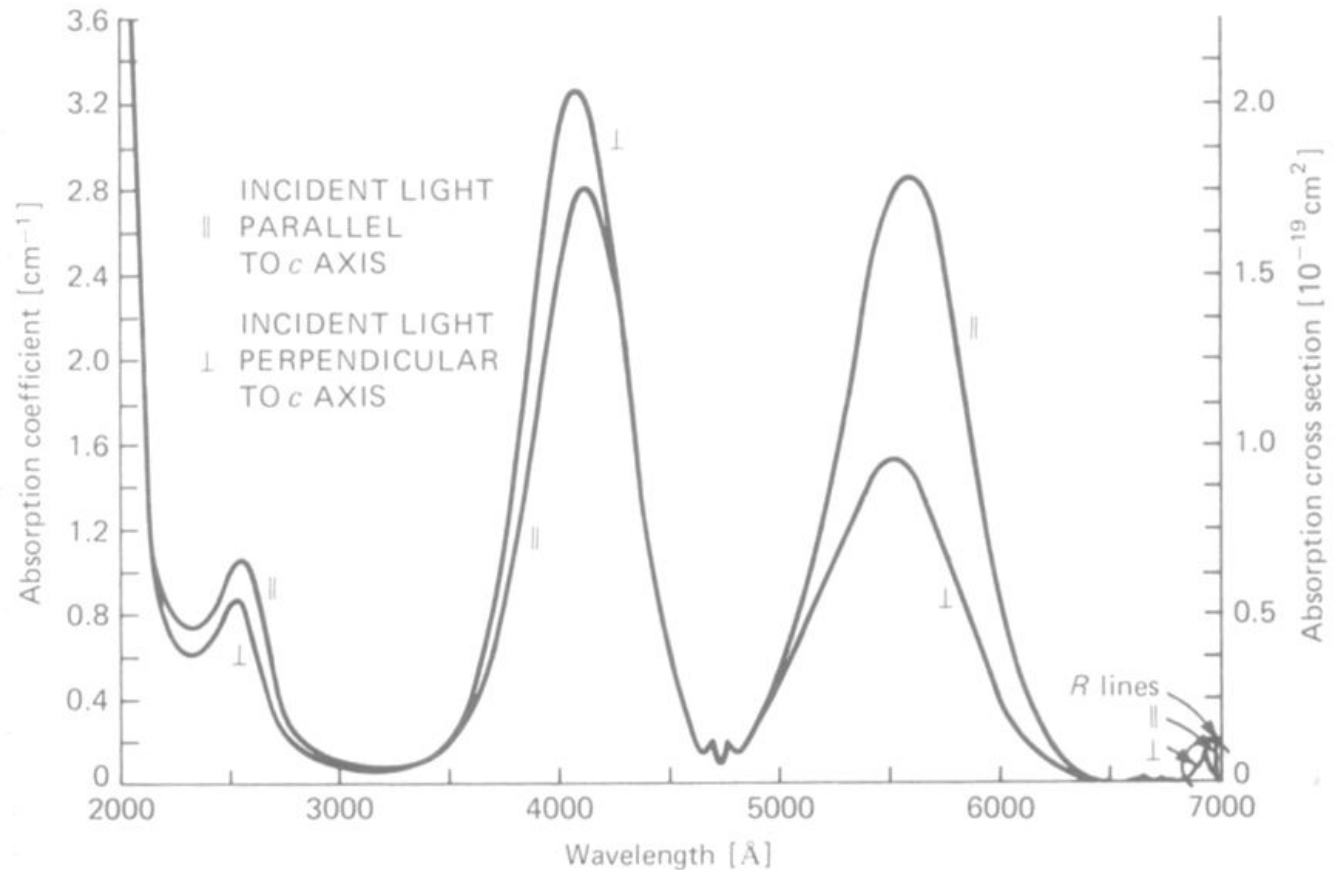
## Рубин



Absorption coefficient and cross section of  $R_1$  and  $R_2$  lines in ruby as a function of wavelength, incident beam polarized parallel ( $E \parallel c$ ) and orthogonal ( $E \perp c$ ) to  $c$  axis of crystal.  $\text{Cr}^{3+}$  concentration is  $1.58 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ .

# Активные среды твердотельных лазеров

## Рубин

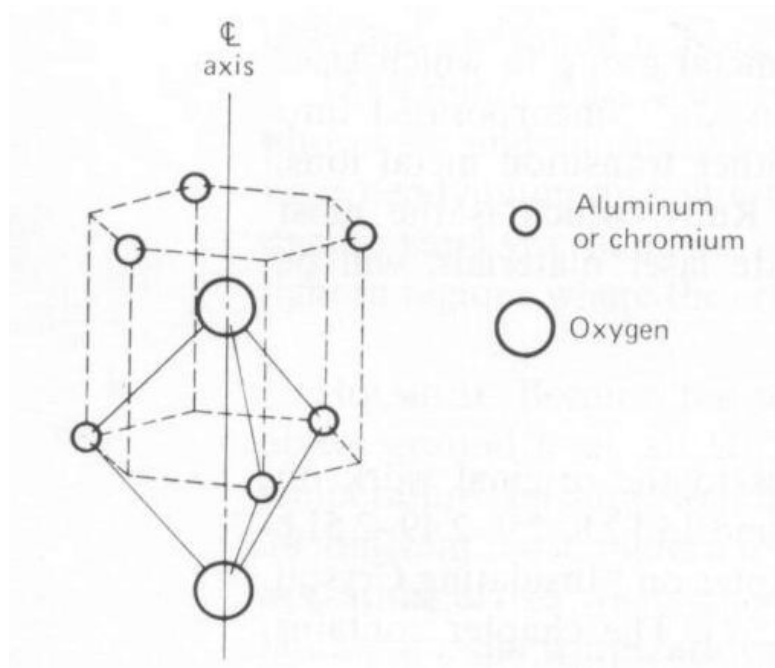


Absorption coefficient and cross section of ruby pump bands for unpolarized light as a function of wavelength.  $\text{Cr}^{3+}$  concentration is  $1.88 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ .

# Активные среды твердотельных лазеров

## Рубин

Впервые лазерное излучение было получено с помощью кристалла рубина:  
 $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}^{3+}$



Зачем беленькие концы?

# Активные среды твердотельных лазеров

---

## **YAG:Nd**

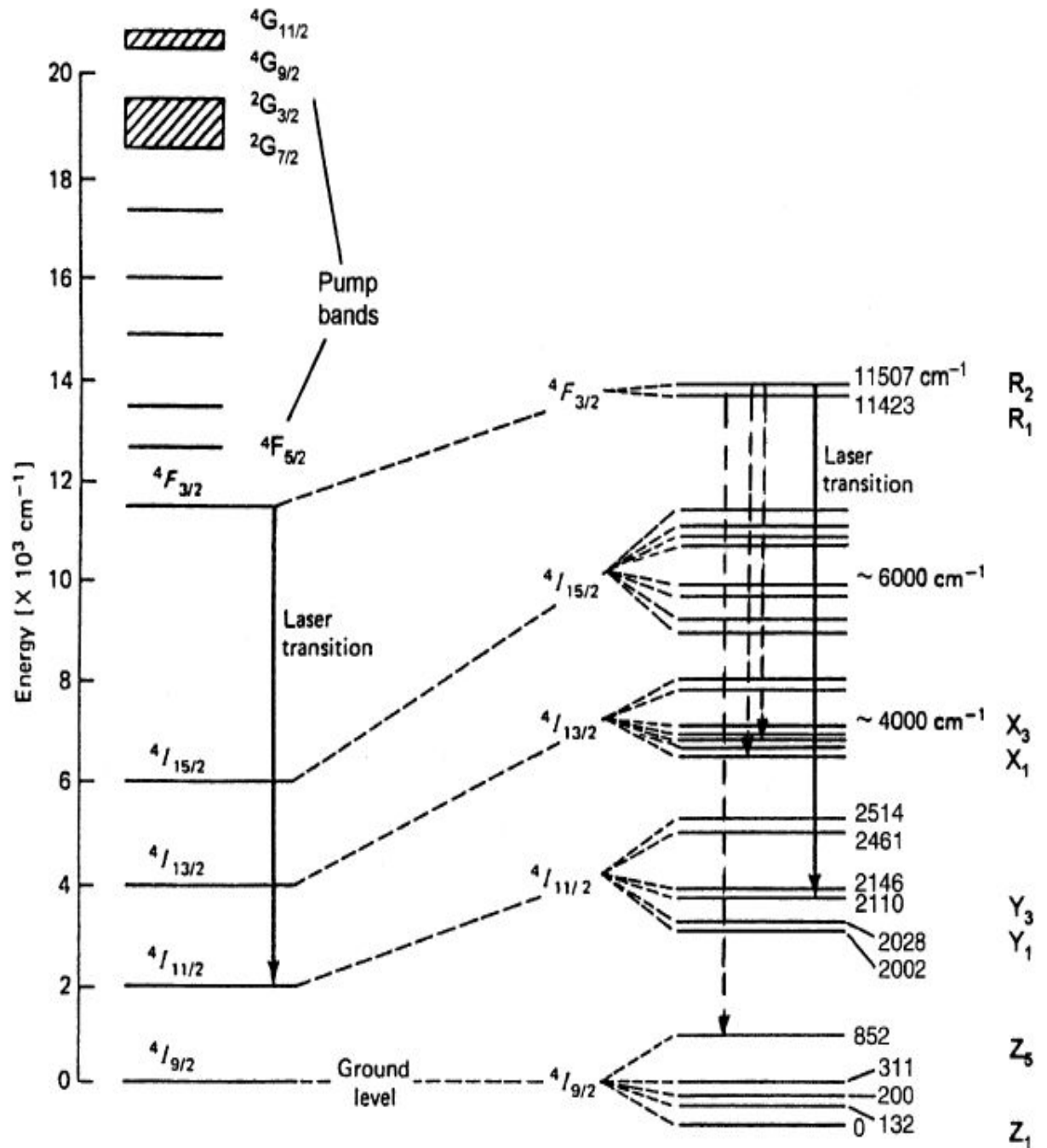
«Рабочая лошадка» в области применений твердотельных лазеров



# Активные $\text{Cr}^{3+}$

## YAG:Nd

«Рабочая лошадка» в области применений твердотельных лазеров

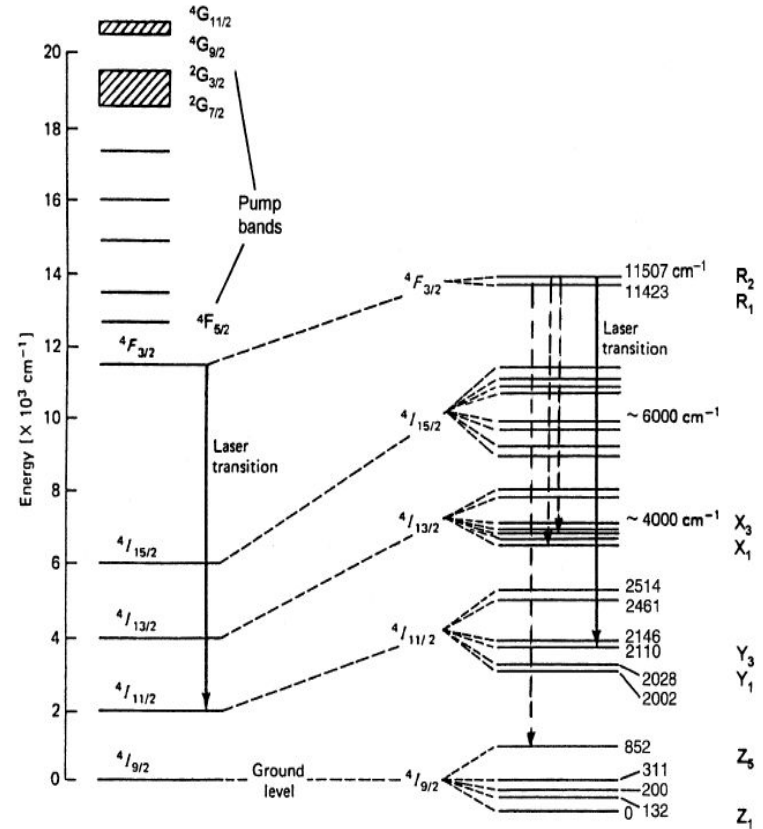




# Активные среды твердотел

## YAG:Nd

«Рабочая лошадка» в области применений твердотельных лазеров



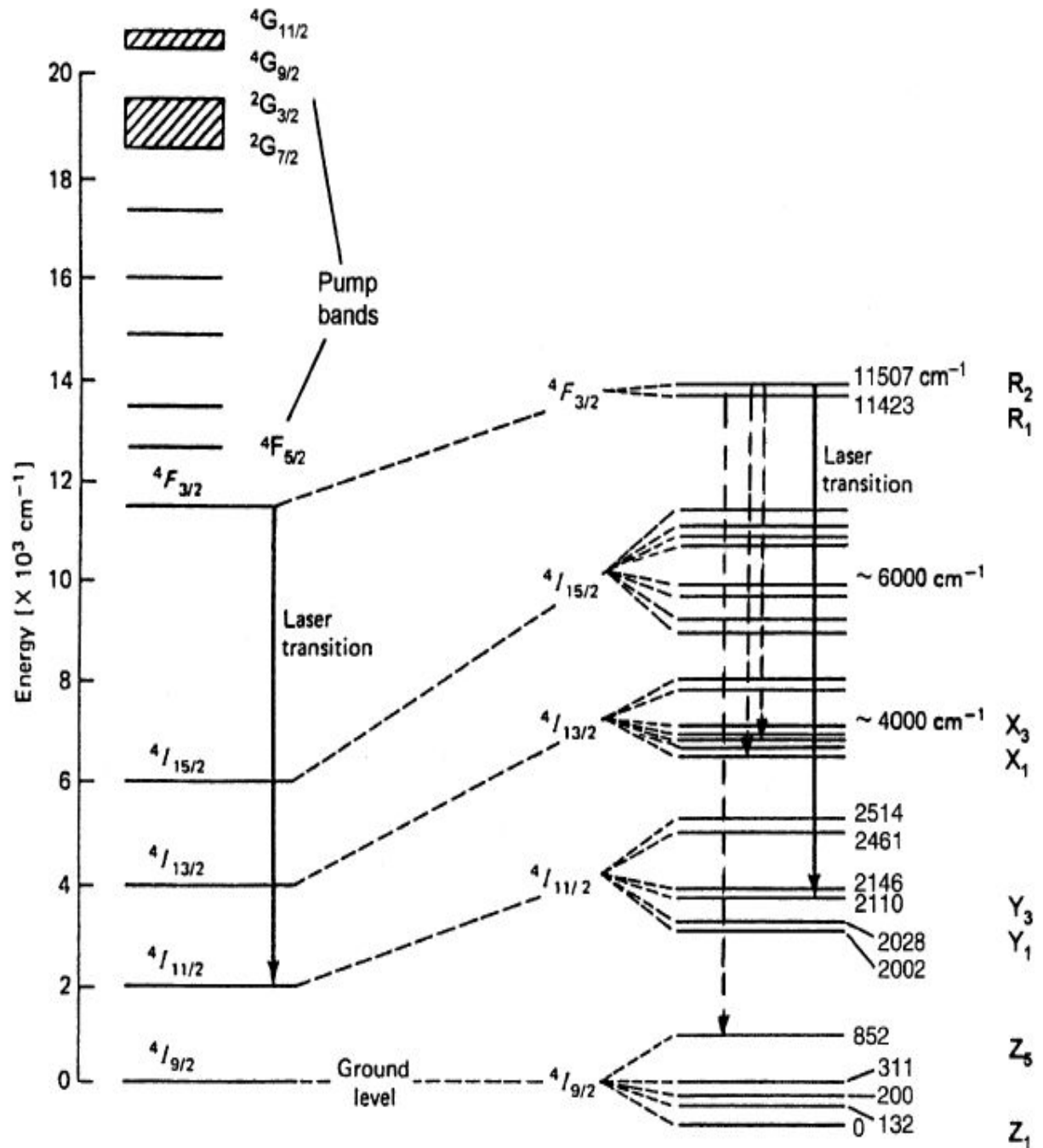
Wavelength (nm)	Transition	Cross section ( $10^{-19} \text{ cm}^2$ )
1064.1	${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}, (R_2 \rightarrow Y_3)$	<b>3,5</b>
1338.1	${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}, (R_2 \rightarrow X_3)$	1.0
1318.7	${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}, (R_2 \rightarrow X_1)$	0.95
946	${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}, (R_1 \rightarrow Z_5)$	0.5

# Активные сг

## YAG:Nd

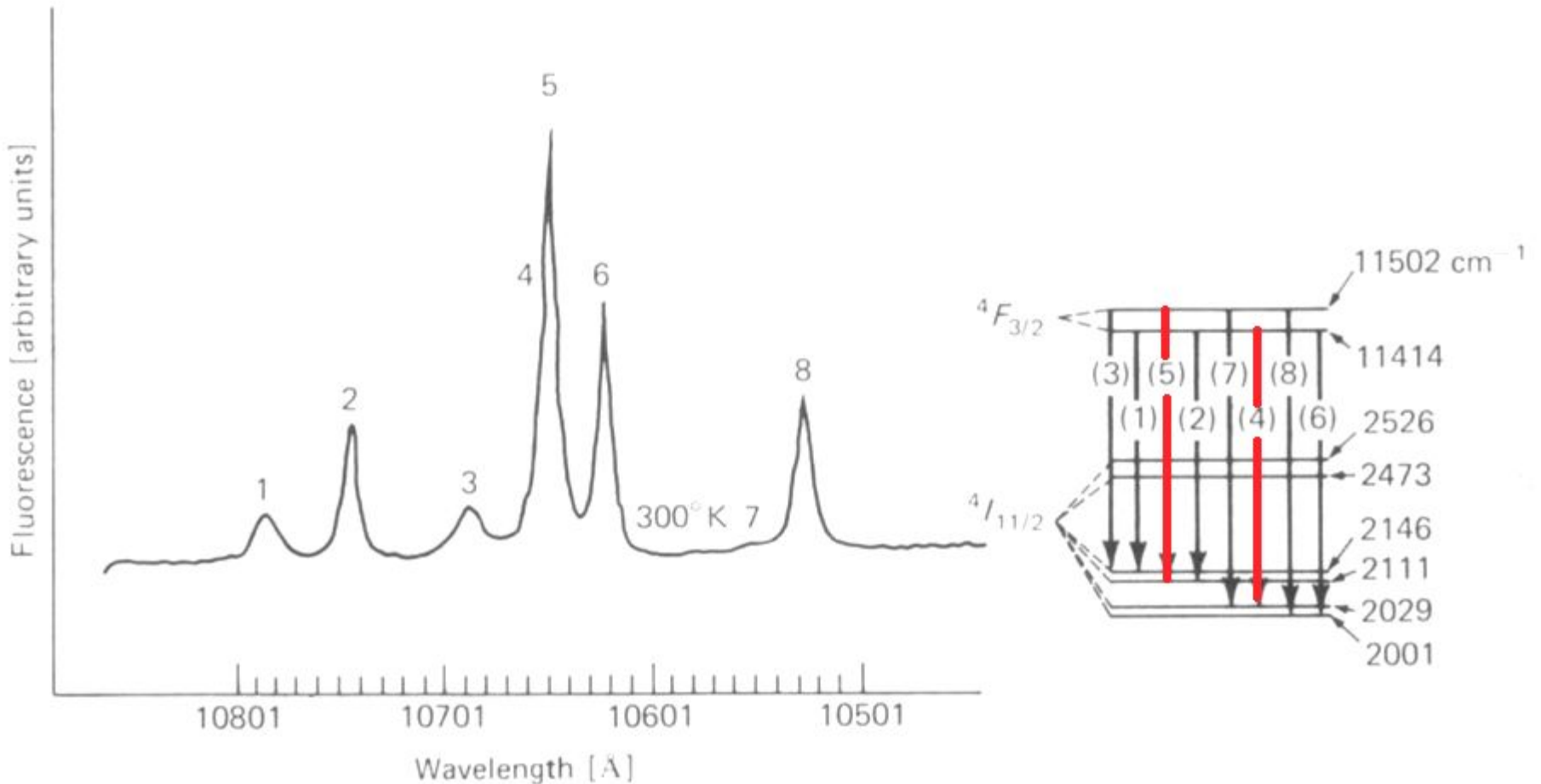
«Рабочая лошадка» в области применений твердотельных лазеров

При какой температуре населенность нижнего рабочего уровня станет 10% от концентрации?



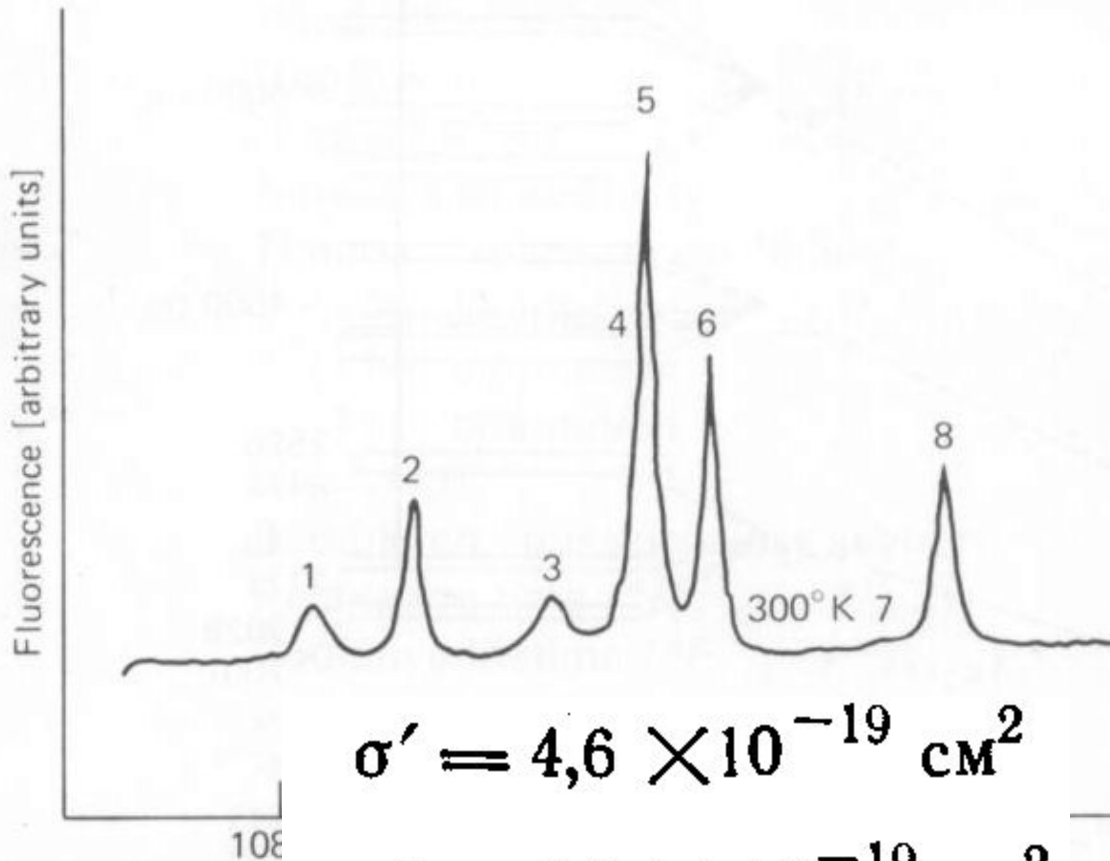
# Активные среды твердотельных лазеров

## YAG:Nd : люминесценция



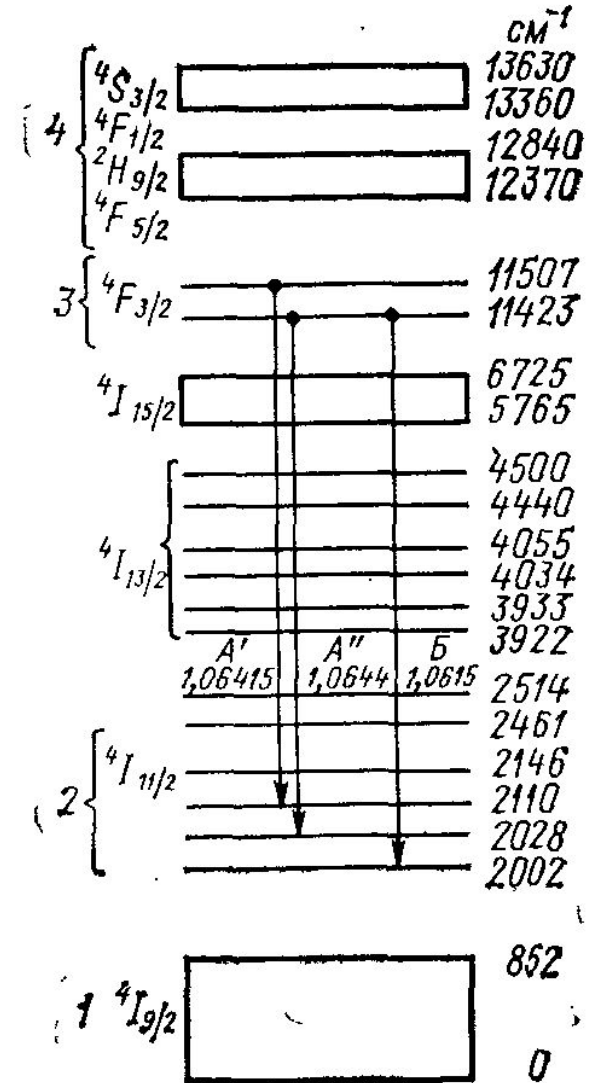
# Активные среды твердотельных лазеров

## YAG:Nd: люминесценция



$$\sigma' = 4,6 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$$

$$\sigma'' = 0,8 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$$

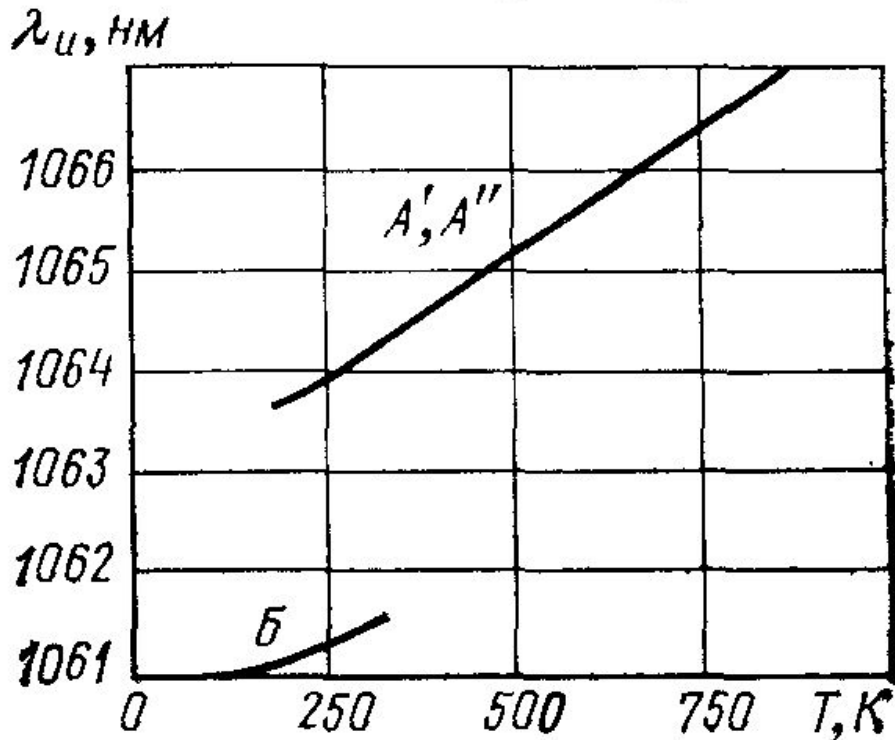


# Активные среды твердотельных лазеров

## YAG:Nd: температурная зависимость люминесценции

$$d\nu_{\text{л}}/dT \approx 5 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1} \text{ К}^{-1}$$

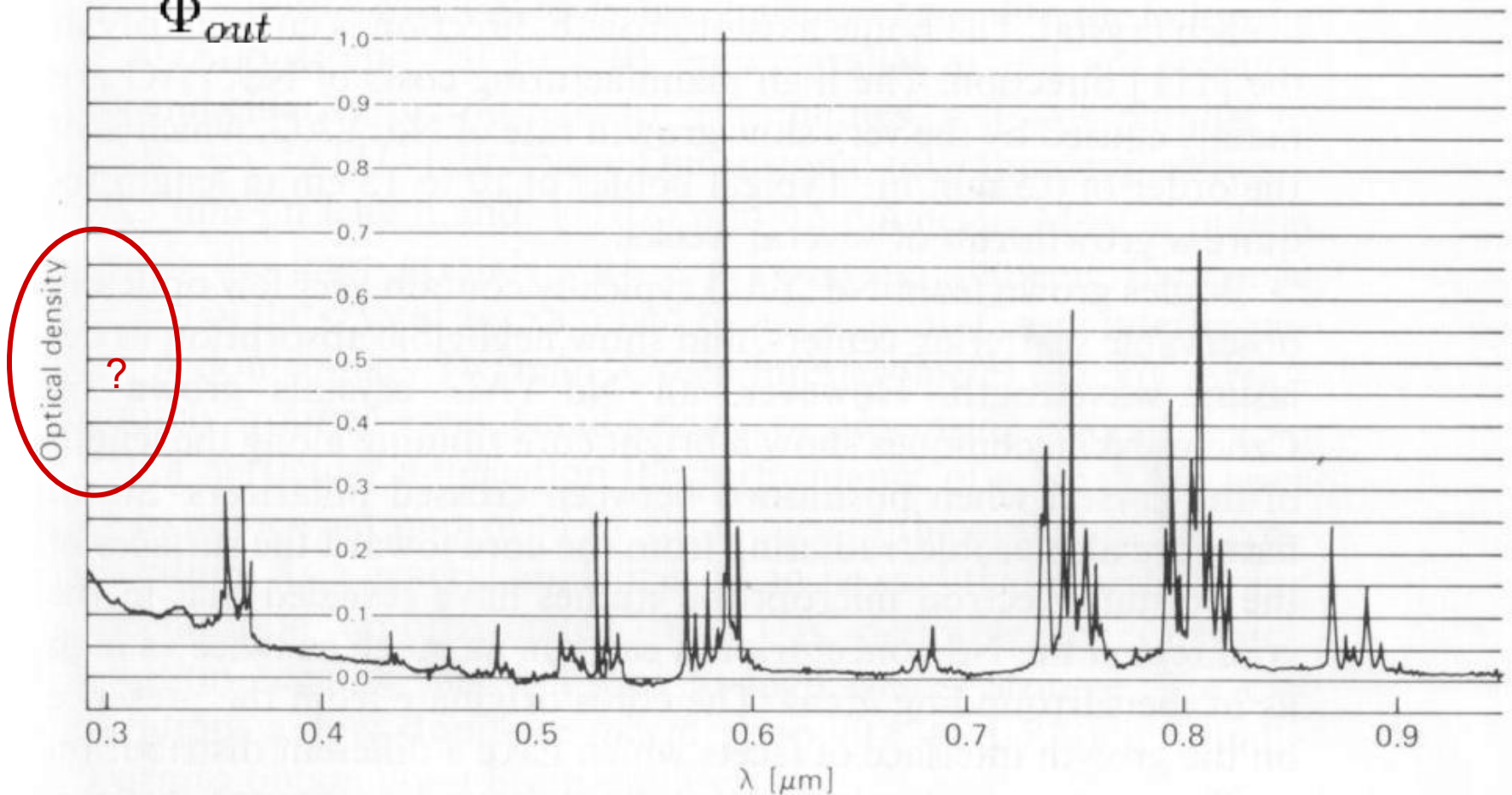
$$d(\Delta\nu_{\text{л}}/dT) \approx 1,8 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1} \text{ К}^{-1}$$



# Активные среды твердотельных лазеров

## YAG:Nd: поглощение

$$D = \lg \frac{\Phi_{in}}{\Phi_{out}}$$

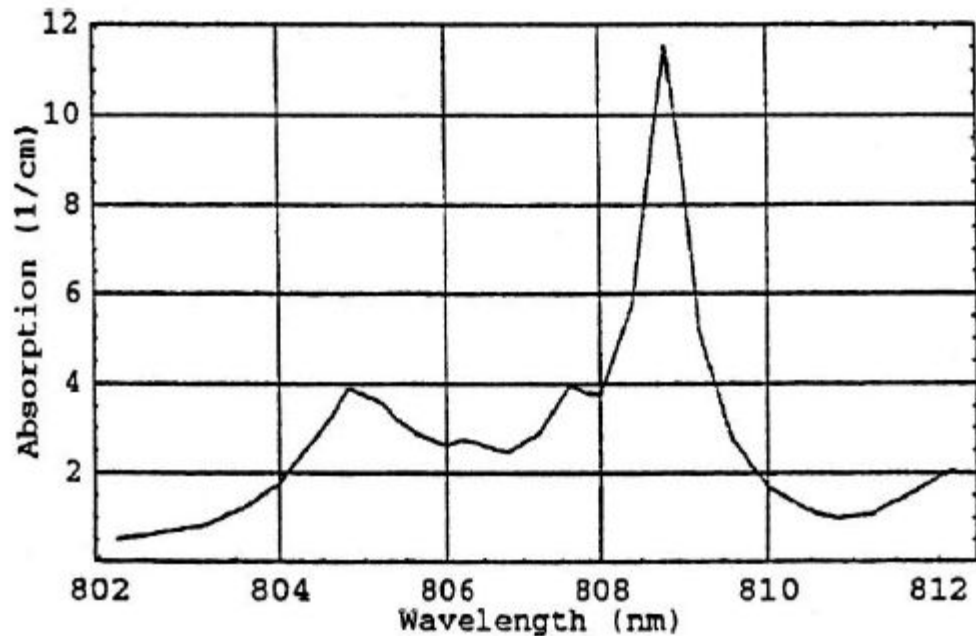




# Активные среды твердотельных лазеров

## YAG:Nd: поглощение вблизи 800 нм (diode pumping)

---

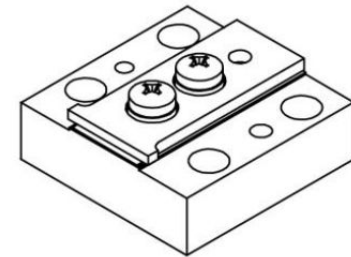
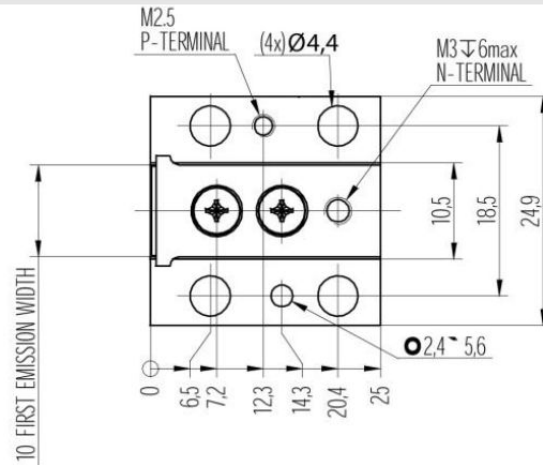
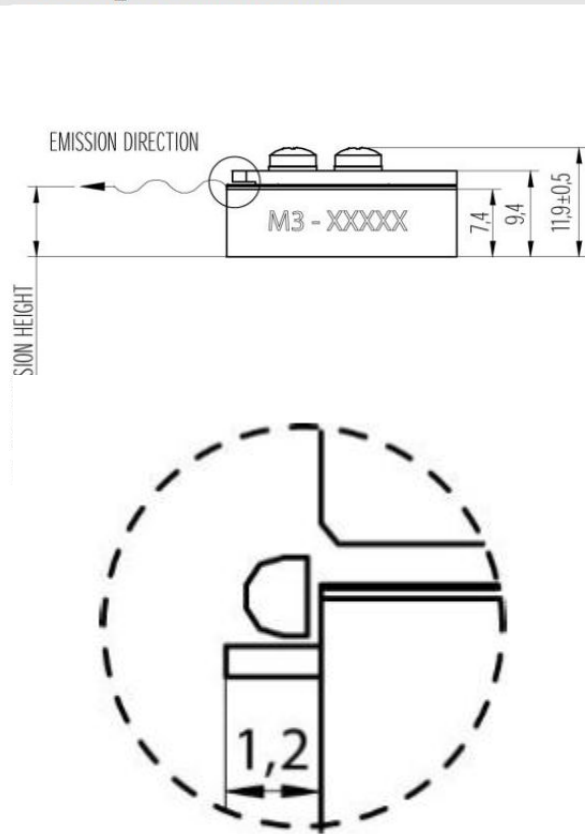


# Активные среды твердотельных лазеров

## Диодная накачка



### Package Dimension



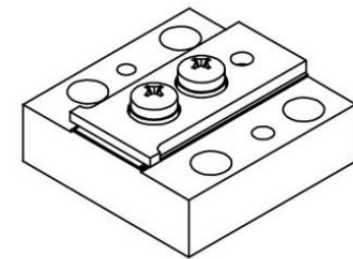
## Optical Parameters<sup>1</sup>

	Units	CW
Center Wavelength Range <sup>3</sup>	nm	808
Center Wavelength Tolerance	nm	±3
Output Power <sup>2</sup> (P <sub>OP</sub> )	W	40
Number of Emitters	#	19
Emitter Size	µm	150
Fill Factor	%	30
Spectral Width (FWHM)	nm	<3
Slope Efficiency	W/A	>1.15
Fast-Axis Divergence <sup>5</sup> (90%)	degree	<63
Slow-Axis Divergence (90%)	degree	<10
Wavelength Temp. Coefficient	nm/°C	~0.27

Pack

EMISS.

SLON HEIGHT



## Electrical Parameters<sup>1</sup>

Power Conversion Efficiency	%	>52
Threshold Current (I <sub>TH</sub> )	A	<8
Operating Current (I <sub>OP</sub> )	A	<46
Operating Voltage (V <sub>OP</sub> )	V	<1.90

## Thermal Parameters<sup>1</sup>

Operating Temperature Range <sup>4</sup>	°C	+20 to +30
Storage Temperature Range <sup>4</sup>	°C	0 to +55
Recommended Heatsink Capacity Per Bar	W	>70

Optical Parameters <sup>1</sup>	Units	CW
Center Wavelength Range <sup>3</sup>	nm	808
Center Wavelength Tolerance	nm	±3
Output Power <sup>2</sup> (P <sub>OP</sub> )	W	40
Number of Emitters	#	19
Emitter Size	µm	150
Fill Factor	%	30
Spectral Width (FWHM)	nm	<3
Slope Efficiency	W/A	>1.15
Fast-Axis Divergence <sup>5</sup> (90%)	degree	<63
Slow-Axis Divergence (90%)	degree	<10
Wavelength Temp. Coefficient	nm/°C	~0.27

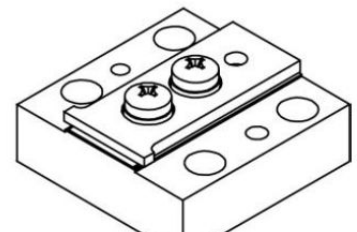
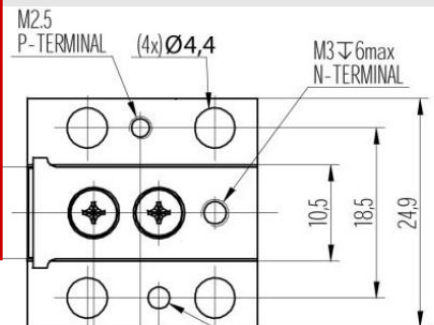


# вердотельных лазе

## Package

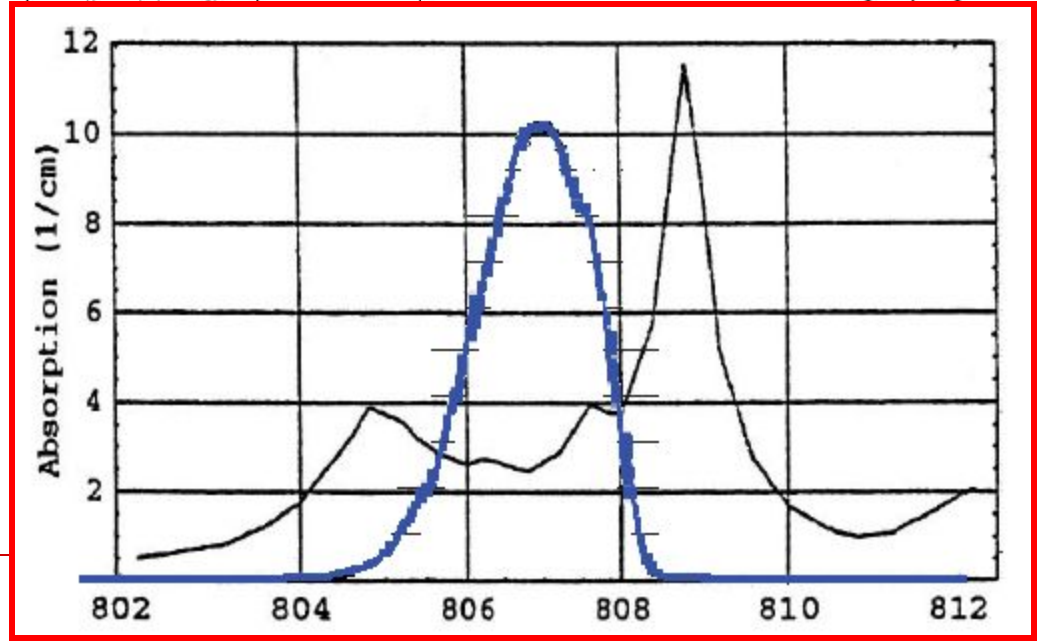
Electrical Parameters <sup>1</sup>		
Power Conversion Efficiency	%	>52
Threshold Current (I <sub>TH</sub> )	A	<8
Operating Current (I <sub>OP</sub> )	A	<46
Operating Voltage (V <sub>OP</sub> )	V	<1.90

Thermal Parameters <sup>1</sup>		
Operating Temperature Range <sup>4</sup>	°C	+20 to +30
Storage Temperature Range <sup>4</sup>	°C	0 to +55
Recommended Heatsink Capacity Per Bar	W	>70



EMISSION HEIGHT

10: FIRST EMISSION WIDTH





# Активные среды твердотельных лазеров

## YAG:Nd

«Рабочая лошадка» в области применений твердотельных лазеров

### Physical and optical properties of Nd:YAG

Chemical formula	Nd:Y <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub>
Weight % Nd	0.725
Atomic % Nd	1.0
Nd atoms/cm <sup>3</sup>	1.38 × 10 <sup>20</sup>
Melting point	1970 C
Knoop hardness	1215
Density	4.56 g/cm <sup>3</sup>
Rupture stress	1.3–2.6 × 10 <sup>3</sup> kg/cm <sup>2</sup>
Modulus of elasticity	3 × 10 <sup>3</sup> kg/cm <sup>2</sup>
Thermal expansion coefficient	
[100] orientation	8.2 × 10 <sup>-6</sup> C <sup>-1</sup> , 0–250 C
[110] orientation	7.7 × 10 <sup>-6</sup> C <sup>-1</sup> , 10–250 C
[111] orientation	7.8 × 10 <sup>-6</sup> C <sup>-1</sup> , 0–250 C
Linewidth	4.5 Å
Stimulated emission cross section	$\sigma_{21} = 2.7\text{--}8.8 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$
Relaxation time ( <sup>4</sup> I <sub>11/2</sub> → <sup>4</sup> I <sub>9/2</sub> )	30 ns
Radiative lifetime ( <sup>4</sup> F <sub>3/2</sub> → <sup>4</sup> I <sub>11/2</sub> )	550 μs
Spontaneous fluorescence lifetime	230 μs
Photon energy at 1.06 μm	$h\nu = 1.86 \times 10^{-19} \text{ J}$
Index of refraction	1.82 (at 1.0 μm)
Scatter losses	$\alpha_{sc} \approx 0.002 \text{ cm}^{-1}$

# Активные среды твердотельных лазеров

## YAG:Nd

### Thermal properties of Nd:YAG

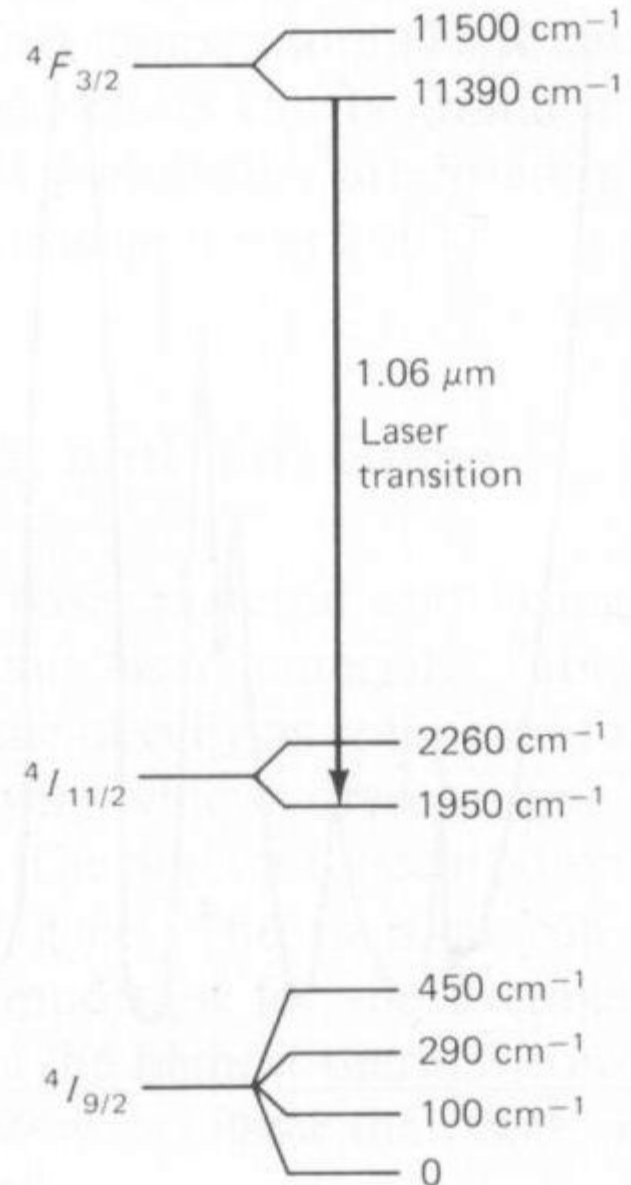
Property	Units	300 K	200 K	100 K
Thermal conductivity	$\text{W cm}^{-1} \text{K}^{-1}$	0.13	0.21	0.58
Specific heat	$\text{W s g}^{-1} \text{K}^{-1}$	0.59	0.43	0.13
Thermal diffusivity	$\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$	0.046	0.10	0.92
Thermal expansion	$\text{K}^{-1}$	7.5	5.8	4.25
$\partial n / \partial T$	$\text{K}^{-1}$	$7.3 \times 10^{-6}$	—	—



# Активные среды твердотел Nd стекло

---

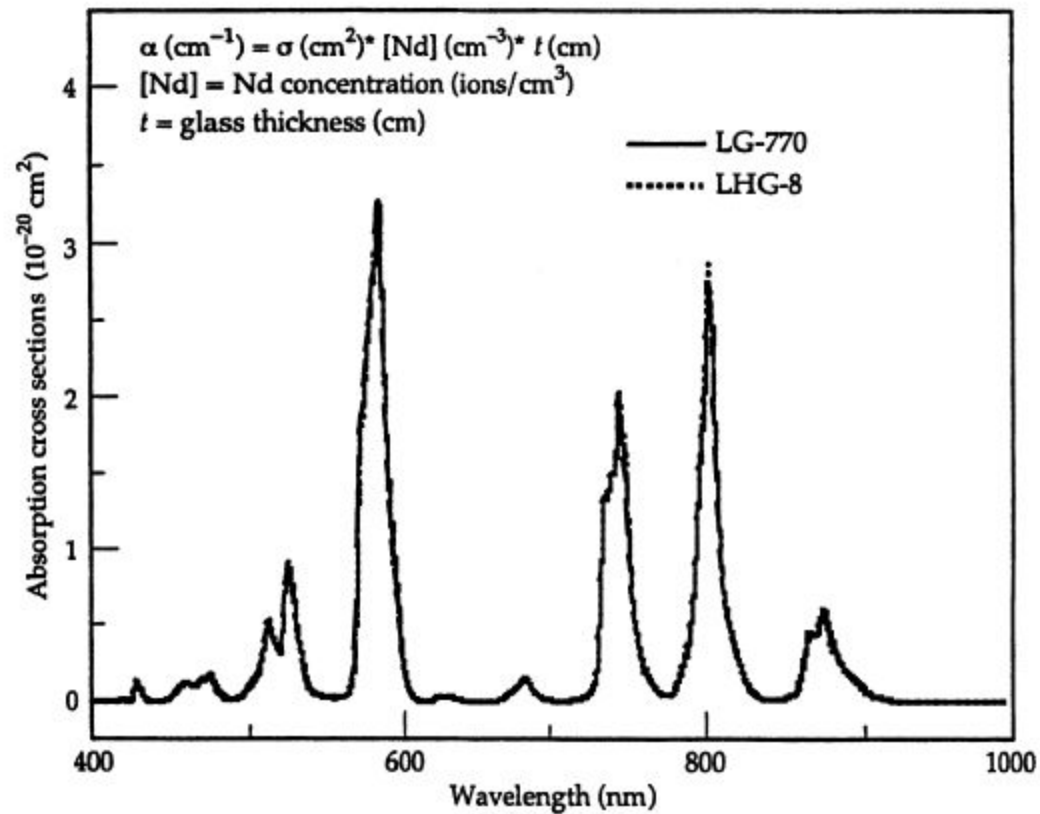
Преимущественная область применения – сверхмощные импульсные лазерные системы.



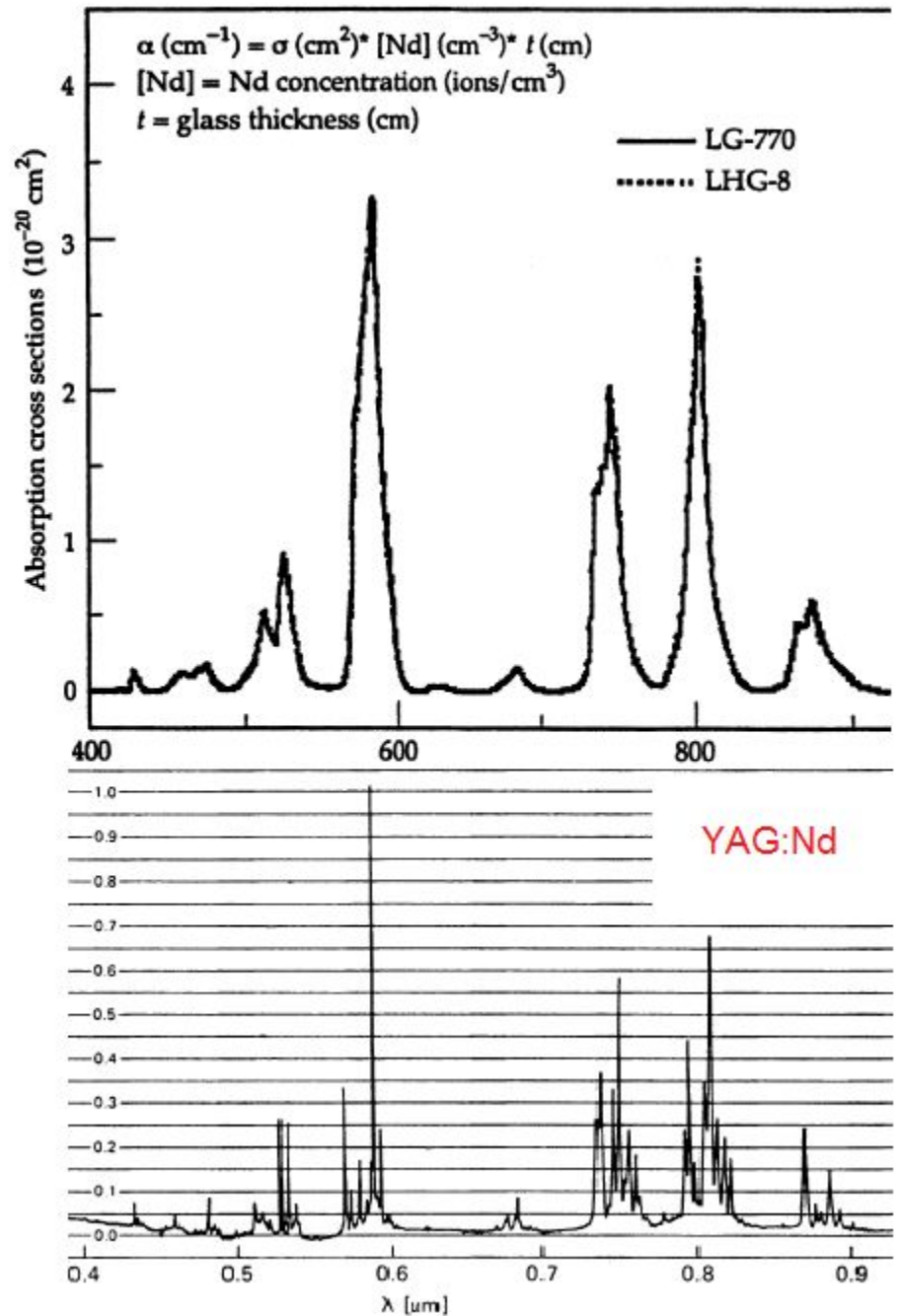
ΦиΞ Ак Nd	Spectroscopic properties	Glass type						TEM
		Q-246 Silicate (Kigre)	Q-88 Phosphate (Kigre)	LHG-5 Phosphate (Hoya)	LHG-8 Phosphate (Hoya)	LG-670 Silicate (Schott)	LG-760 Phosphate (Schott)	
	Peak wavelength (nm)	1062	1054	1054	1054	1061	1054	
	Cross section ( $\times 10^{-20}$ cm <sup>2</sup> )	2.9	4.0	4.1	4.2	2.7	4.3	
	Fluorescence lifetime (μs)	340	330	290	315	330	330	
	Linewidth FWHM (nm)	27.7	21.9	18.6	20.1	27.8	19.5	
	Density (gm/cm <sup>3</sup> )	2.55	2.71	2.68	2.83	2.54	2.60	
	Index of refraction (Nd)	1.568	1.545	1.539	1.528	1.561	1.503	
	Nonlinear coefficient ( $10^{-16}$ cm <sup>2</sup> /W)	3.74	2.98	3.48	3.10	3.78	2.90	
	$dn/dt(20 - 40^\circ\text{C})$ ( $10^{-6}/^\circ\text{C}$ )	2.9	-0.5	8.6	-5.3	2.9	-6.8	
	Thermal coefficient of optical path (20 - 40°C)( $10^{-6}/^\circ\text{C}$ )	+8.0	+2.7	+4.6	+0.6	8.0	—	
	Transformation point (°C)	518	367	455	485	468	—	
	Thermal expansion coefficient (20 - 40°C)( $10^{-7}/^\circ\text{C}$ )	90	104	86	127	92.6	138	
	Thermal conductivity (W/m °C)	1.30	0.84	1.19	—	1.35	0.67	
	Specific heat (J/g °C)	0.93	0.81	0.71	0.75	0.92	0.57	
	Knoop hardness	600	418	497	321	497	—	
	Young's modulus (kg/mm <sup>2</sup> )	8570	7123	6910	5109	6249	—	
	Poisson's ratio	0.24	0.24	0.237	0.258	0.24	0.27	

# Активные среды твердотельных лазеров

## Nd стекло: поглощение



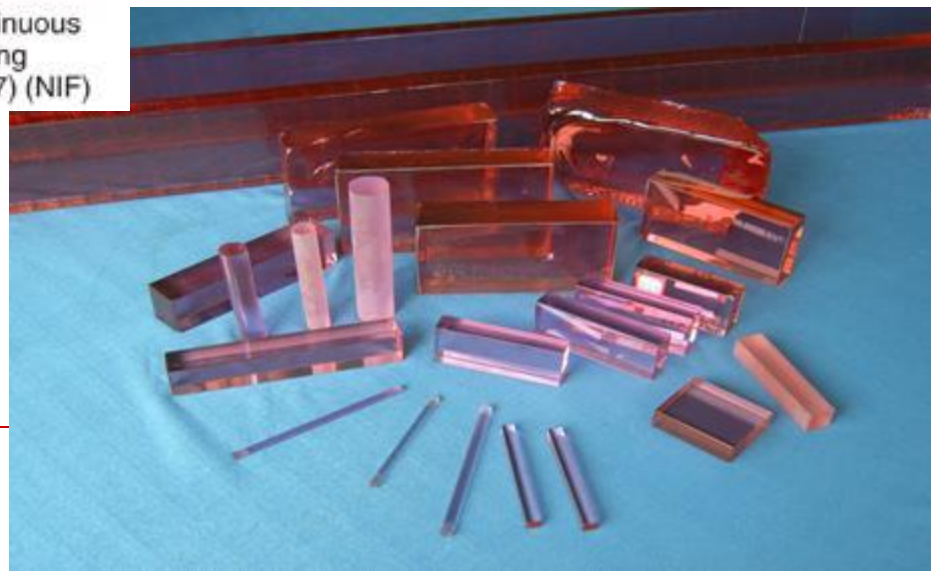
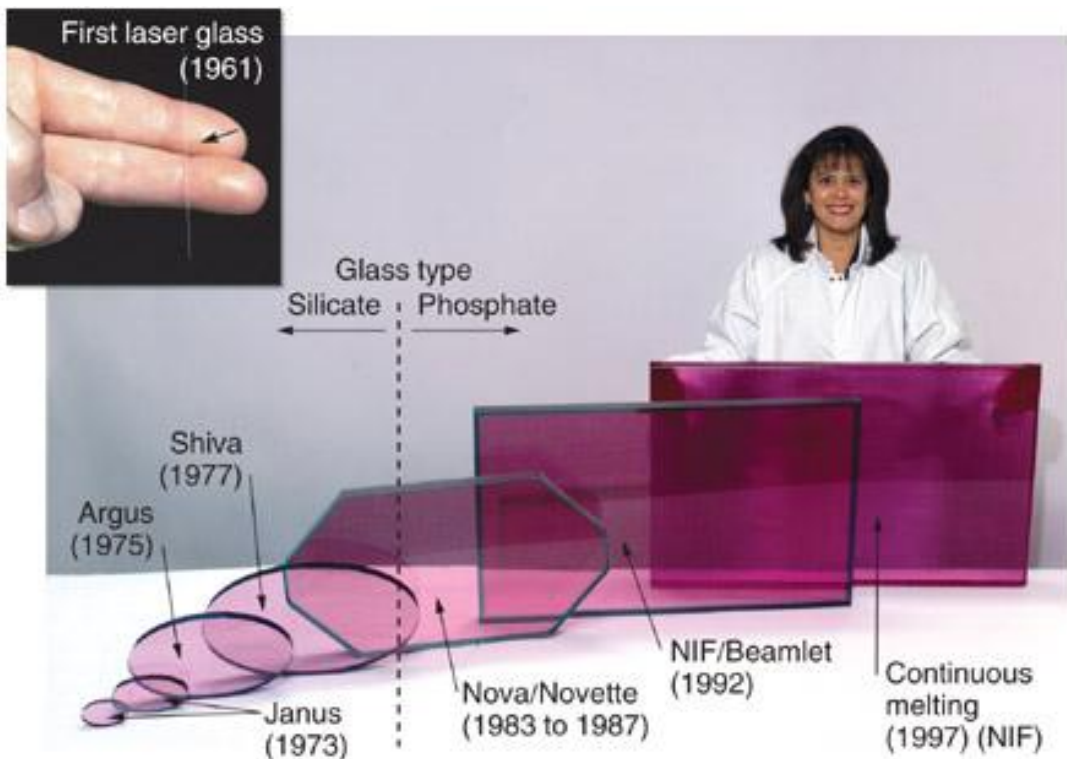
# Активные среды твердого Nd стекло: поглощение



# Активные среды твердотельных лазеров

## Nd стекло

---





# Активные среды твердотельных лазеров

## **Nd** стекло: система накачки мощного усилителя для ЛТС

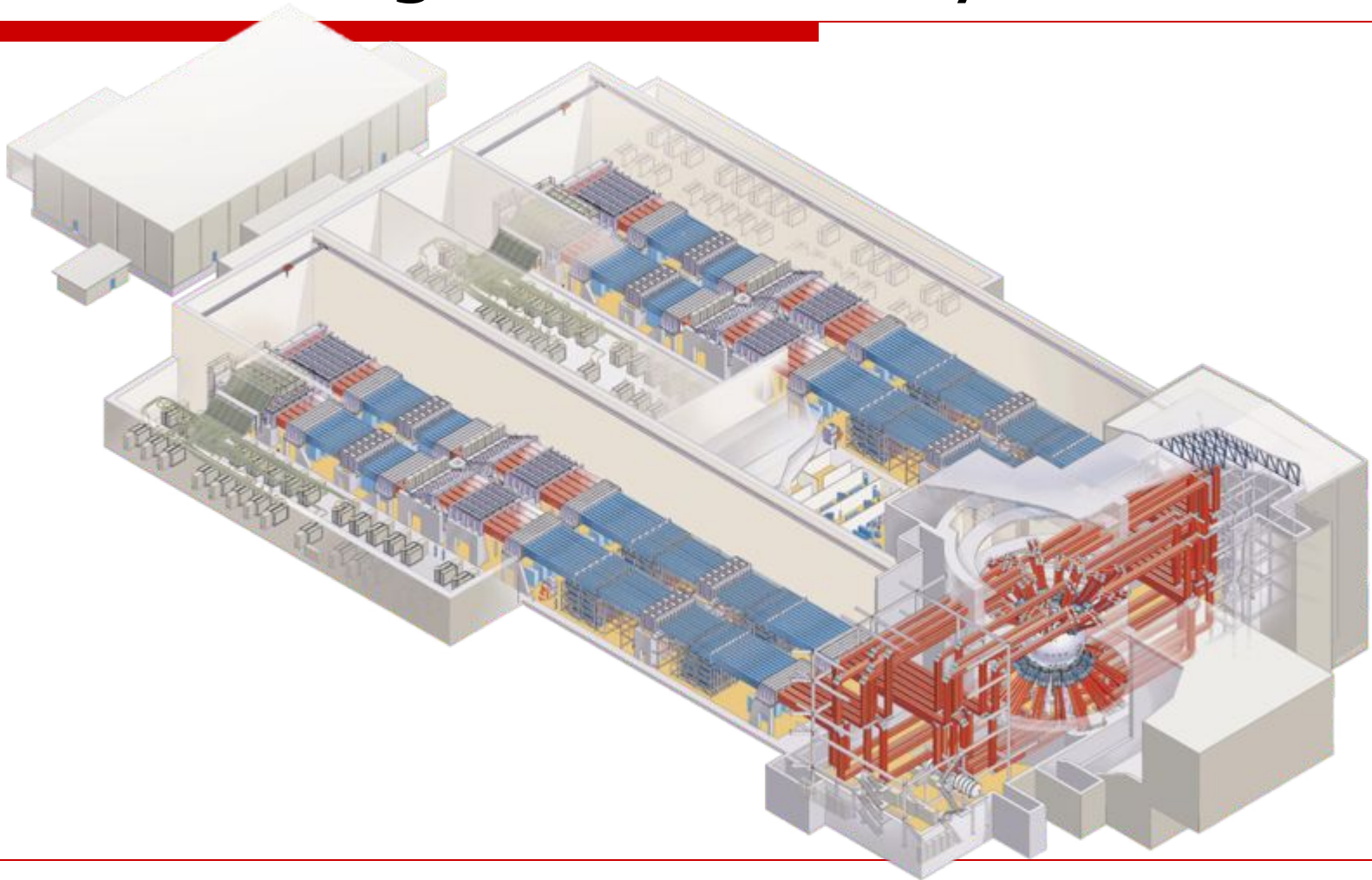
---





# National Ignition Facility at LLNL

---

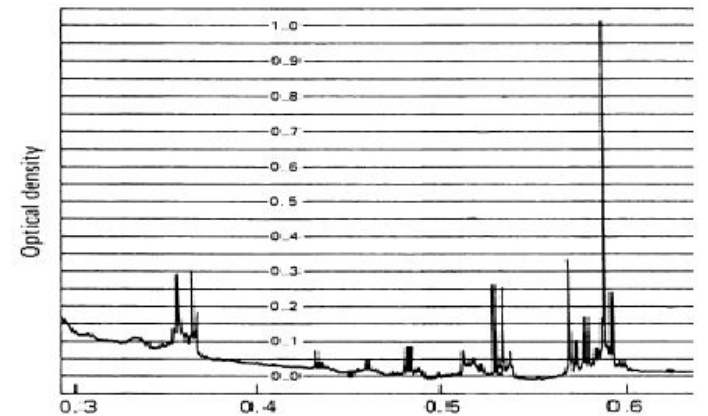
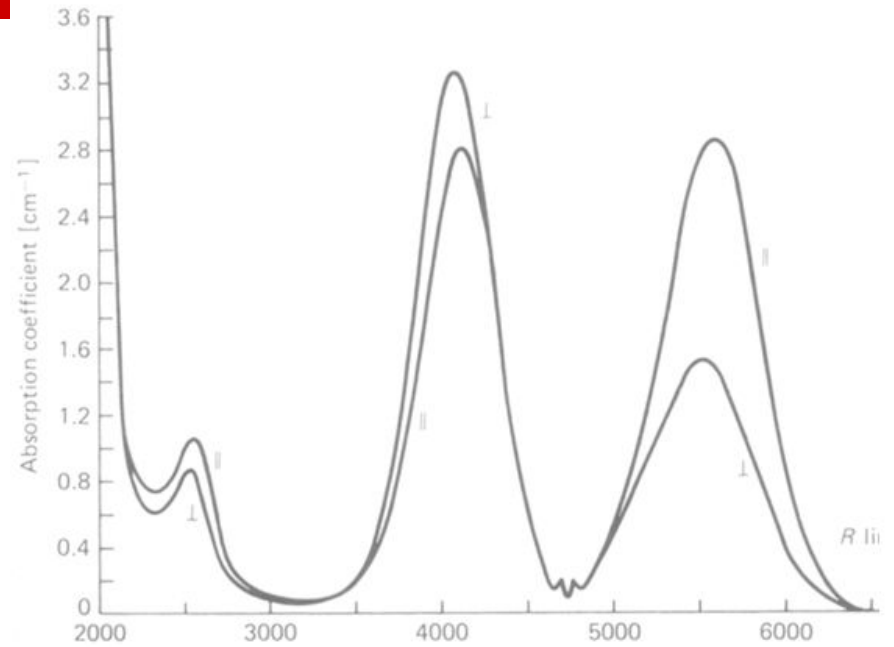


# Активные среды твердотельных лазеров

Соактивация – увеличение КПД при широкополосной накачке

Cr [3+]

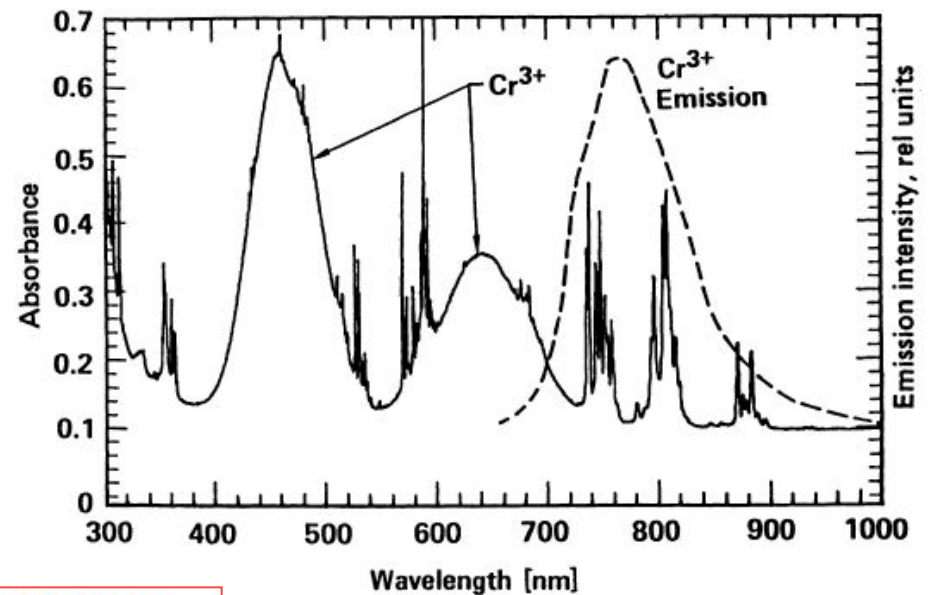
Nd[3+]



# Активные среды твердотельных лазеров

Соактивация – увеличение КПД при широкополосной накачке

## Nd:Cr:GSGG



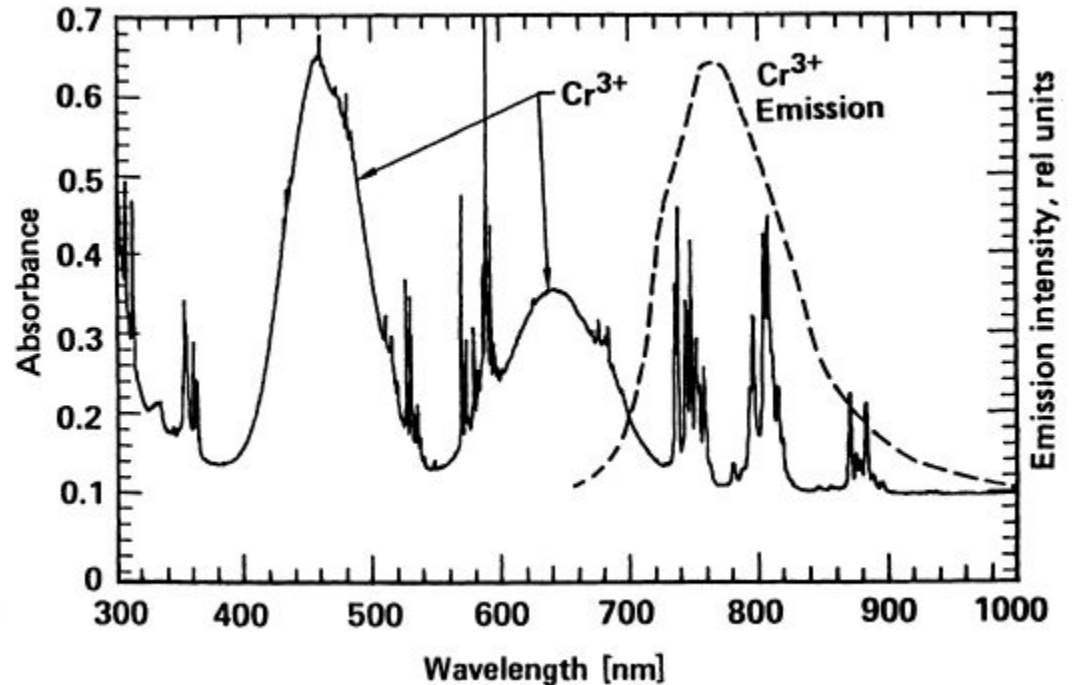
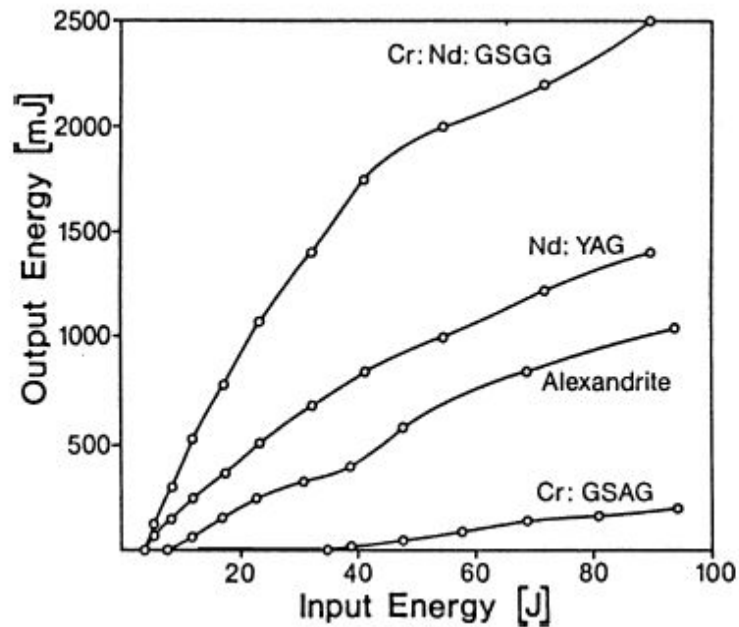
In Nd:Cr:YAG the  $\text{Cr}^{3+} \rightarrow \text{Nd}^{3+}$  transfer time of 6.2 ms

In Nd:Cr:GSGG the  $\text{Cr}^{3+} \rightarrow \text{Nd}^{3+}$  transfer time 17  $\mu\text{s}$   
shorter than the 230  $\mu\text{s}$  fluorescence decay time of  $\text{Nd}^{3+}$ .

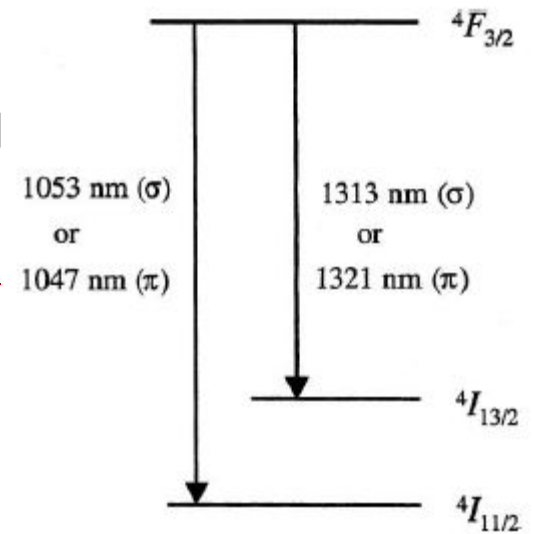
# Активные среды твердотельных лазеров

Соактивация – увеличение КПД при широкополосной накачке

---



# Активные среды твердотельных л



**Nd:YLF**



Index of Refraction		
Wavelength	$n_o$	$n_e$
350	1.473	1.491
525	1.456	1.479
262	1.485	1.511
1050	1.448	1.470
2065	1.442	1.464

Table 1 - $dn/dT$		
Wavelength	$E  c$	$E \perp c$
436 nm	$-2.44 \times 10^{-6} / ^\circ C$	$-0.54 \times 10^{-6} / ^\circ C$
578 nm	$-2.86 \times 10^{-6} / ^\circ C$	$-0.91 \times 10^{-6} / ^\circ C$
1.06 $\mu m$	$-4.30 \times 10^{-6} / ^\circ C$	$-2.00 \times 10^{-6} / ^\circ C$



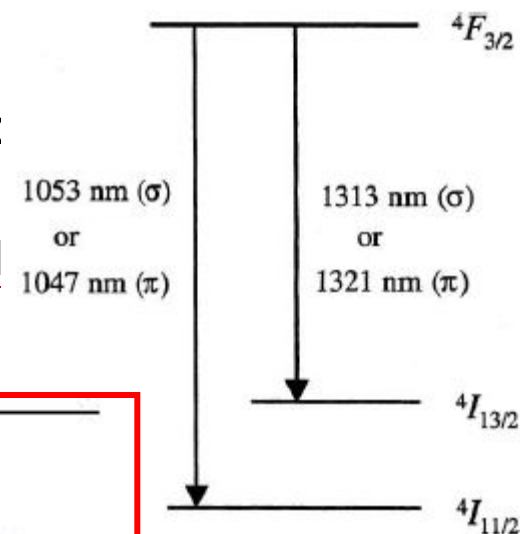
# Физические основы создания твердотельных

## Активные среды твердотельных л

### Nd:YLF



Lasing wavelength (nm)	1053 ( $\sigma$ ) 1047 ( $\pi$ )
Index of refraction, $\lambda = 1.06\mu\text{m}$	$n_o = 1.4481$ $n_e = 1.4704$
Fluorescent lifetime	480 $\mu\text{s}$
Stimulated emission	$1.8 \times 10^{-19}(\pi)$
Cross section ( $\text{cm}^2$ )	$1.2 \times 10^{-19}(\sigma)$
Density ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	3.99 (undoped)
Hardness (Mohs)	4-5
Elastic modulus ( $\text{N}/\text{m}^2$ )	$7.5 \times 10^{10}$
Strength ( $\text{N}/\text{m}^2$ )	$3.3 \times 10^7$
Poisson's ratio	0.33
Thermal conductivity ( $\text{W}/(\text{cm K})$ )	0.06
Thermal expansion coefficient ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ )	$a$ axis: $13 \times 10^{-6}$ $c$ axis: $8 \times 10^{-6}$
Melting point ( $^{\circ}\text{C}$ )	825



Refractive Index	
	ne
	1.491
	1.479
	1.511
	1.470
	1.464

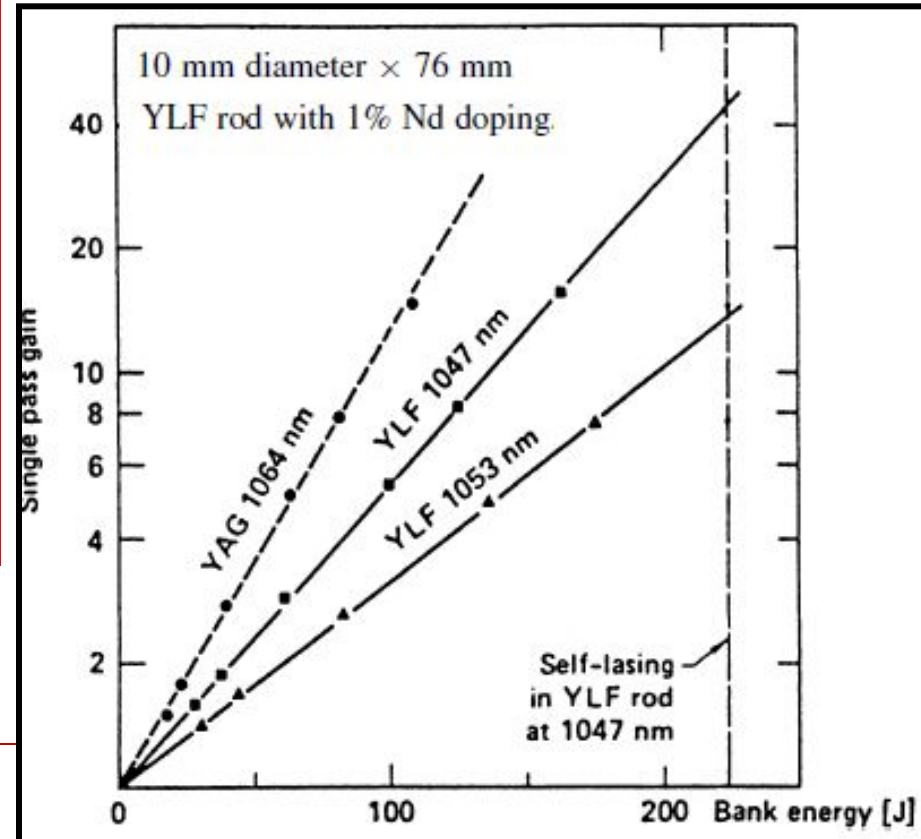
Thermal Expansion	
	E/c
5 / $^{\circ}\text{C}$	$-0.54 \times 10^{-6} / ^{\circ}\text{C}$
1.06 $\mu\text{m}$	$-0.91 \times 10^{-6} / ^{\circ}\text{C}$
	$-2.00 \times 10^{-6} / ^{\circ}\text{C}$

578 nm	$-2.86 \times 10^{-6} / ^{\circ}\text{C}$
1.06 $\mu\text{m}$	$-4.30 \times 10^{-6} / ^{\circ}\text{C}$



## Активные среды твердотельных лазеров

Lasing wavelength (nm)	1053 ( $\sigma$ ) 1047 ( $\pi$ )
Index of refraction, $\lambda = 1.06\mu\text{m}$	$n_0 = 1.4481$ $n_e = 1.4704$
Fluorescent lifetime	480 $\mu\text{s}$
Stimulated emission	$1.8 \times 10^{-19}(\pi)$
Cross section ( $\text{cm}^2$ )	$1.2 \times 10^{-19}(\sigma)$
Density ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	3.99 (undoped)
Hardness (Mohs)	4-5
Elastic modulus ( $\text{N}/\text{m}^2$ )	$7.5 \times 10^{10}$
Strength ( $\text{N}/\text{m}^2$ )	$3.3 \times 10^7$
Poisson's ratio	0.33
Thermal conductivity ( $\text{W}/(\text{cm K})$ )	0.06
Thermal expansion coefficient ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ )	$a$ axis: $13 \times 10^{-6}$ $c$ axis: $8 \times 10^{-6}$
Melting point ( $^{\circ}\text{C}$ )	825



# Лекция 9

---

*Активные среды  
твердотельных  
лазеров  
(продолжение)*

$$\text{Nd:YAG: } \sigma = 3,5 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$$
$$\tau = 230 \mu\text{s}$$

к лазерных систем

## АКТИВНЫЕ СРЕДЫ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ЛАЗЕРОВ

### Nd:YVO<sub>4</sub>

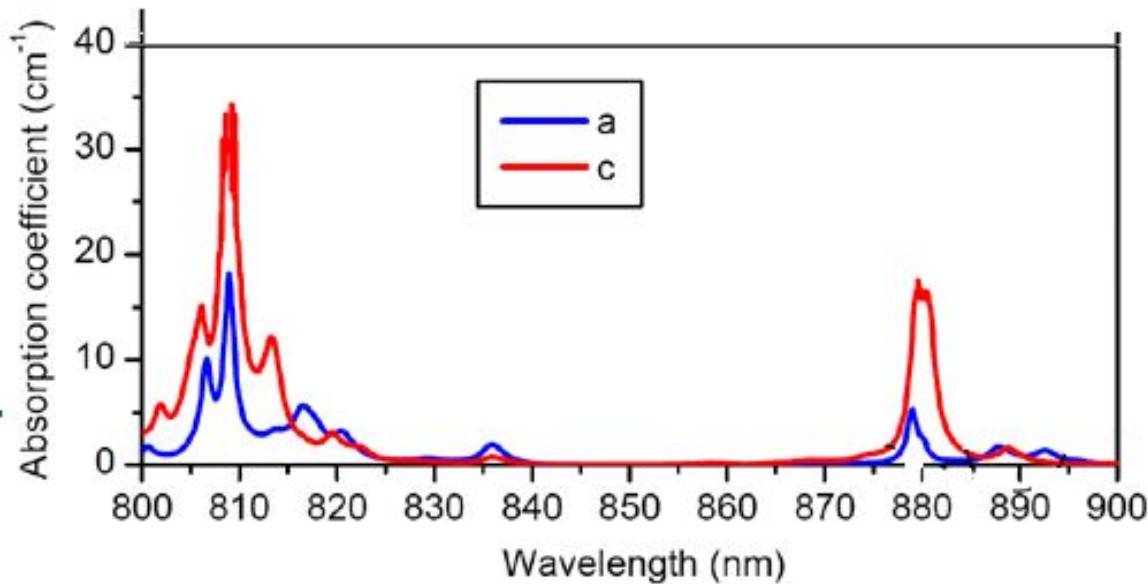
Laser cross section	$15.6 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$
Laser wavelength	1064.3 nm
Linewidth	0.8 nm
Fluorescence lifetime	100 $\mu\text{s}$
Peak pump wavelength	808.5 nm
Peak absorption coefficient at 808 nm ( $\text{cm}^{-1}$ )	34 ( $\pi$ polarization) 10 ( $\sigma$ polarization)
Nd doping	1% (atomic Nd)
Thermal conductivity	0.05 W/cm K

Nd:YAG : 0.13

# Физические основы создания твердотельных лазерных систем

## Активные среды твердотельных лазеров

### Nd:YVO<sub>4</sub>



Laser cross section	$15.6 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$
Laser wavelength	1064.3 nm
Linewidth	0.8 nm
Fluorescence lifetime	100 $\mu\text{s}$
Peak pump wavelength	808.5 nm
Peak absorption coefficient at 808 nm ( $\text{cm}^{-1}$ )	34 ( $\pi$ polarization) 10 ( $\sigma$ polarization)
Nd doping	1% (atomic Nd)
Modulus of elasticity	133 Gpa
Tensile strength	53 MPa
Thermal conductivity	0.05 W/cm K
Poisson ratio	0.23
Knoop hardness	480 kg/mm <sup>2</sup>

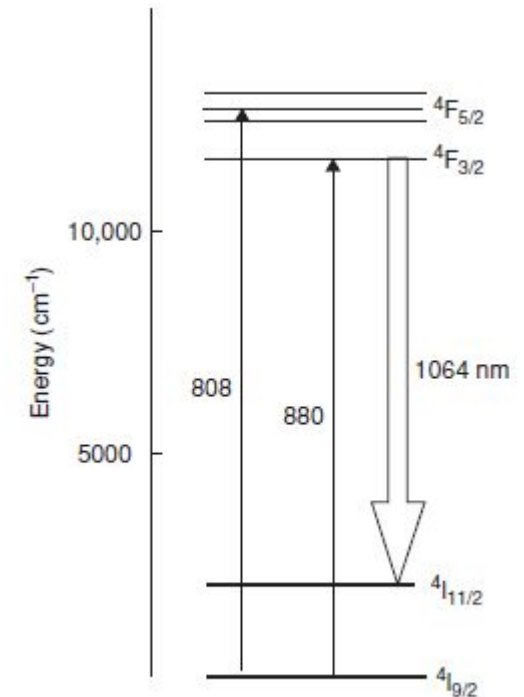
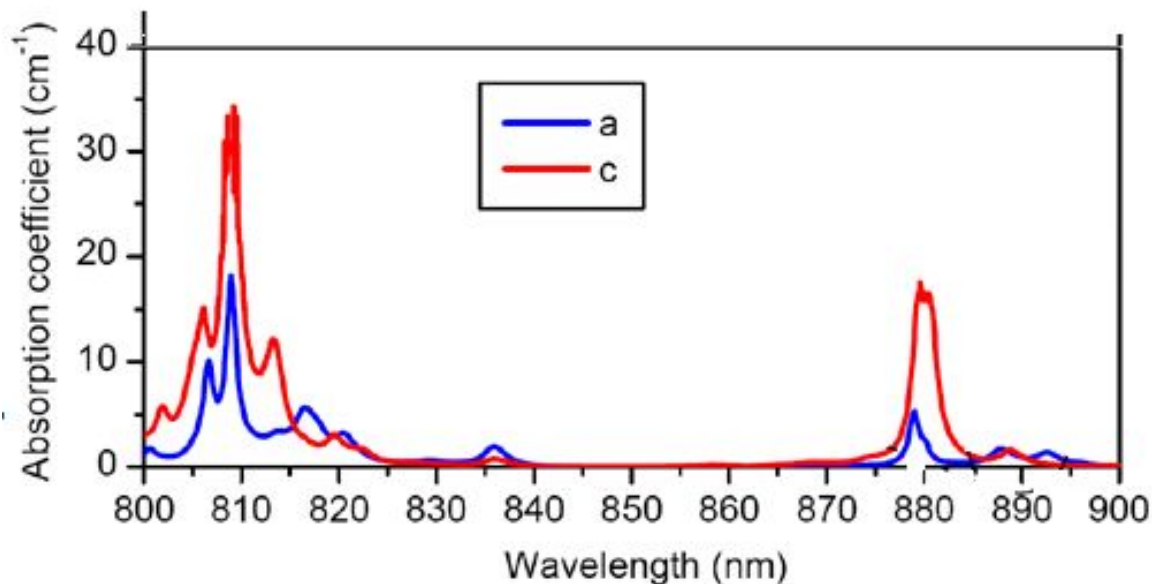


# Физические основы создания твердотельных лазерных систем

## Активные среды твердотельных лазеров

Pumping at the longer wavelength increases the quantum defect efficiency (Stokes factor  $\eta_s$ ) from 0.76 to 0.83.

An optical-to-optical slope efficiency of 75% with pumping at 880 nm was reported for a 1 mm thick Nd:YVO<sub>4</sub> crystal doped at 1%





**ASN**  
INTERNATIONAL

HAS DESIGNATED  
YTTERBY MINE  
AN HISTORICAL LANDMARK

Four periodic elements — Yttrium, Terbium, Erbium,  
and Ytterbium — were isolated from the black stone  
gadolinite mined here, and were named after the  
Ytterby Mine.

1989

Energy Levels (cm<sup>-1</sup>)

24  
22  
20  
18  
16  
14  
12000  
10000  
8000  
6000  
4000  
2000  
0



# Физические основы создания те

## Активные среды твердо

YAG:Er с высокой концентрацией Er

медицинские применения

Стекла с невысокой концентрацией Er (соактивация Yb)

Eye-safe lasers

E (cm<sup>-1</sup>)

20000

10000

10000

5000

0

<sup>4</sup>F<sub>7/2</sub>

<sup>2</sup>H<sub>11/2</sub>  
<sup>4</sup>S<sub>3/2</sub>

<sup>4</sup>F<sub>9/2</sub>

<sup>4</sup>I<sub>9/2</sub>

<sup>4</sup>I<sub>11/2</sub>

<sup>4</sup>I<sub>13/2</sub>

<sup>4</sup>I<sub>15/2</sub>

480 to 530 nm

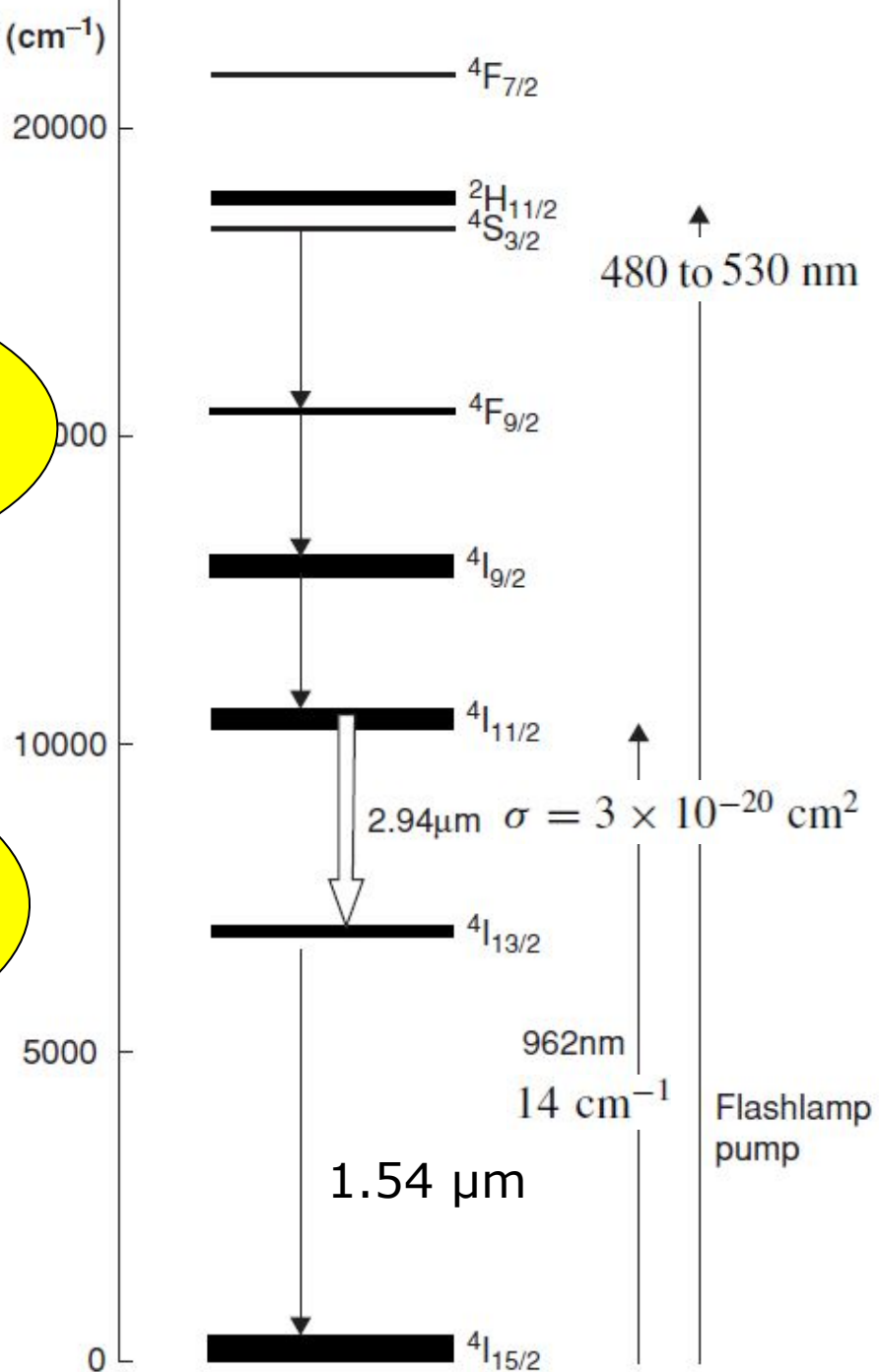
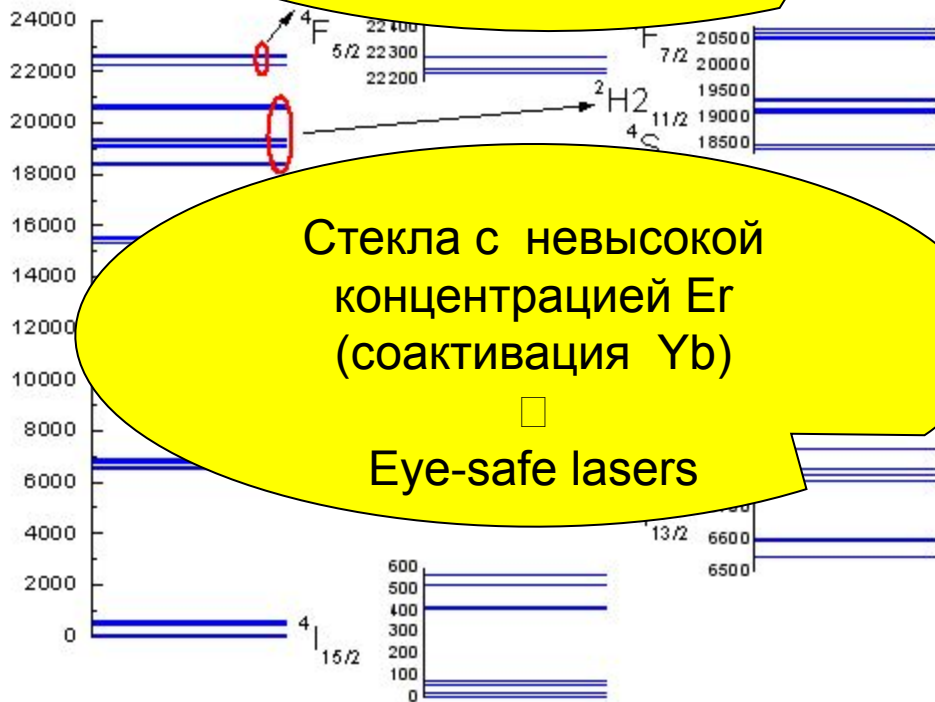
2.94 μm  $\sigma = 3 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$

962 nm

14 cm<sup>-1</sup>

Flashlamp pump

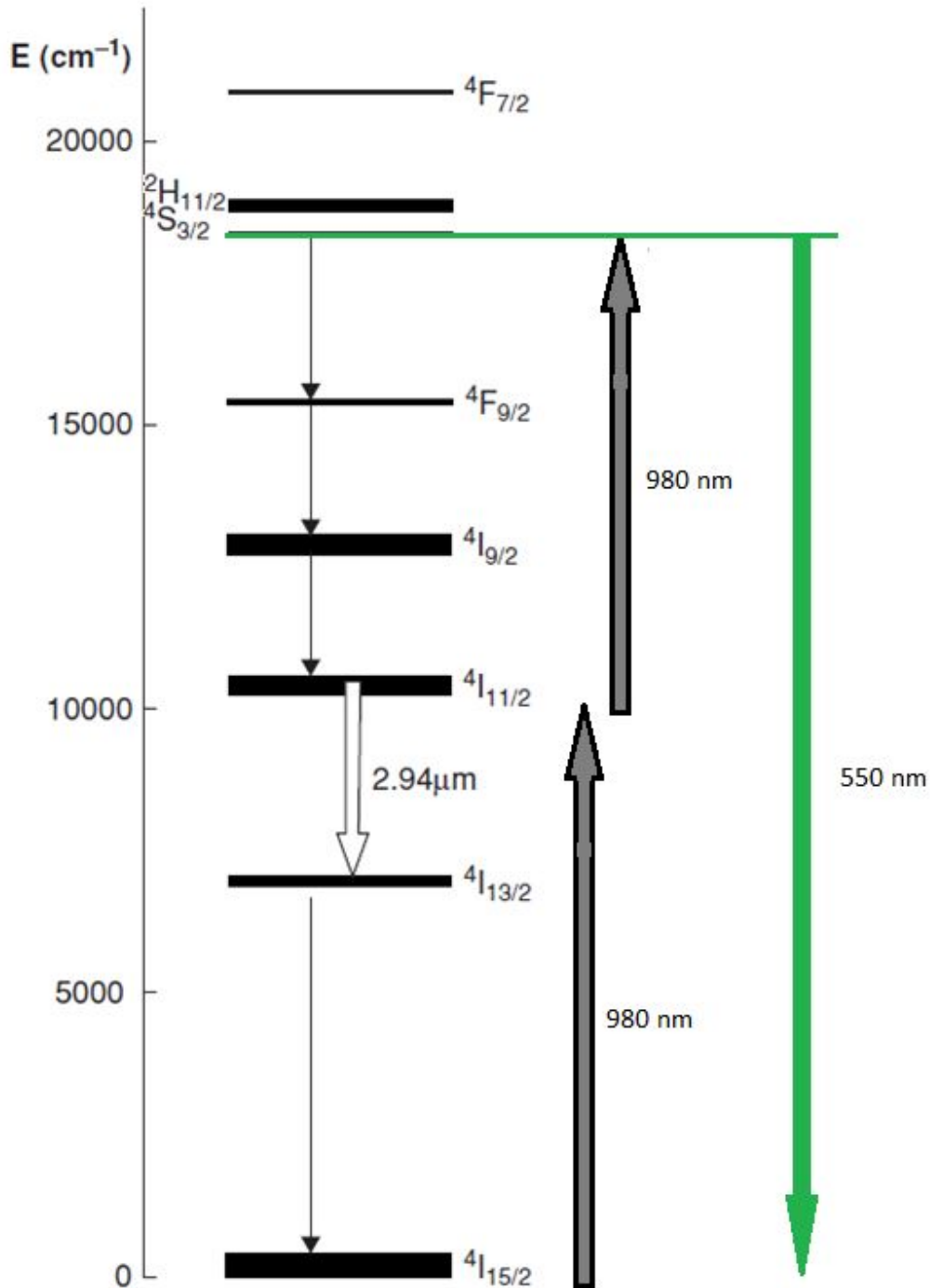
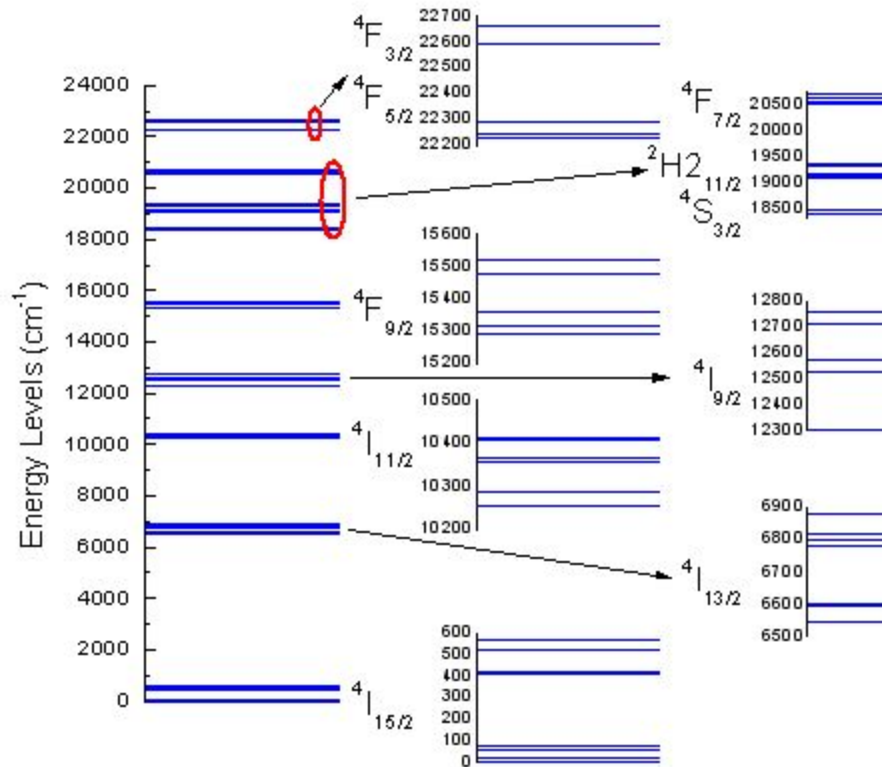
1.54 μm



Физические основы создани

# Активные среды твер

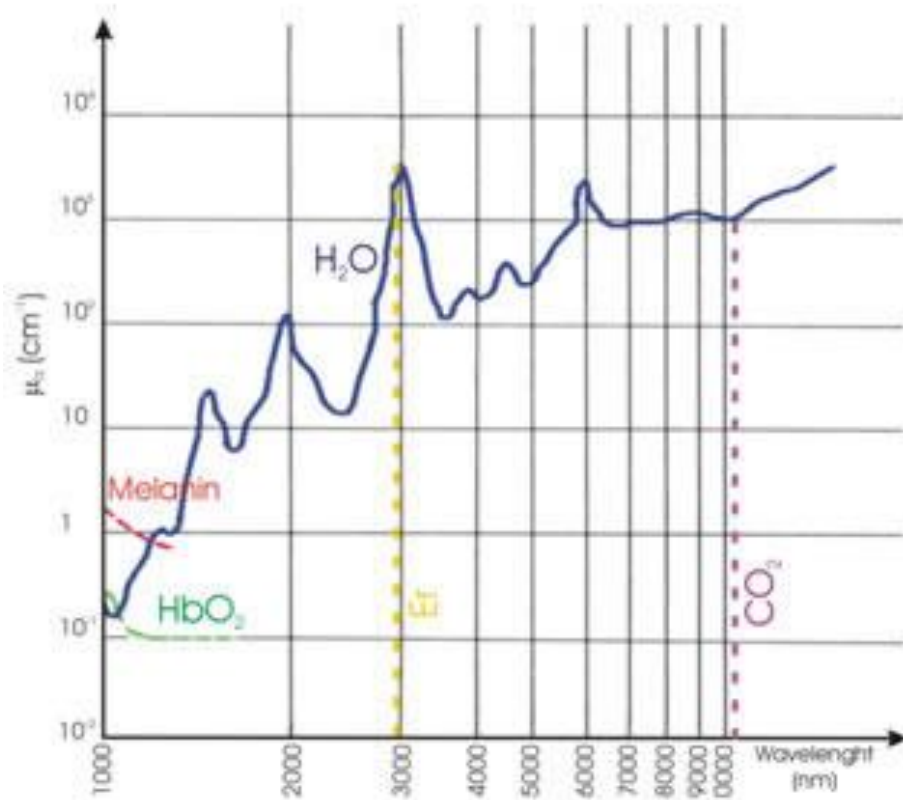
## Er:YAG



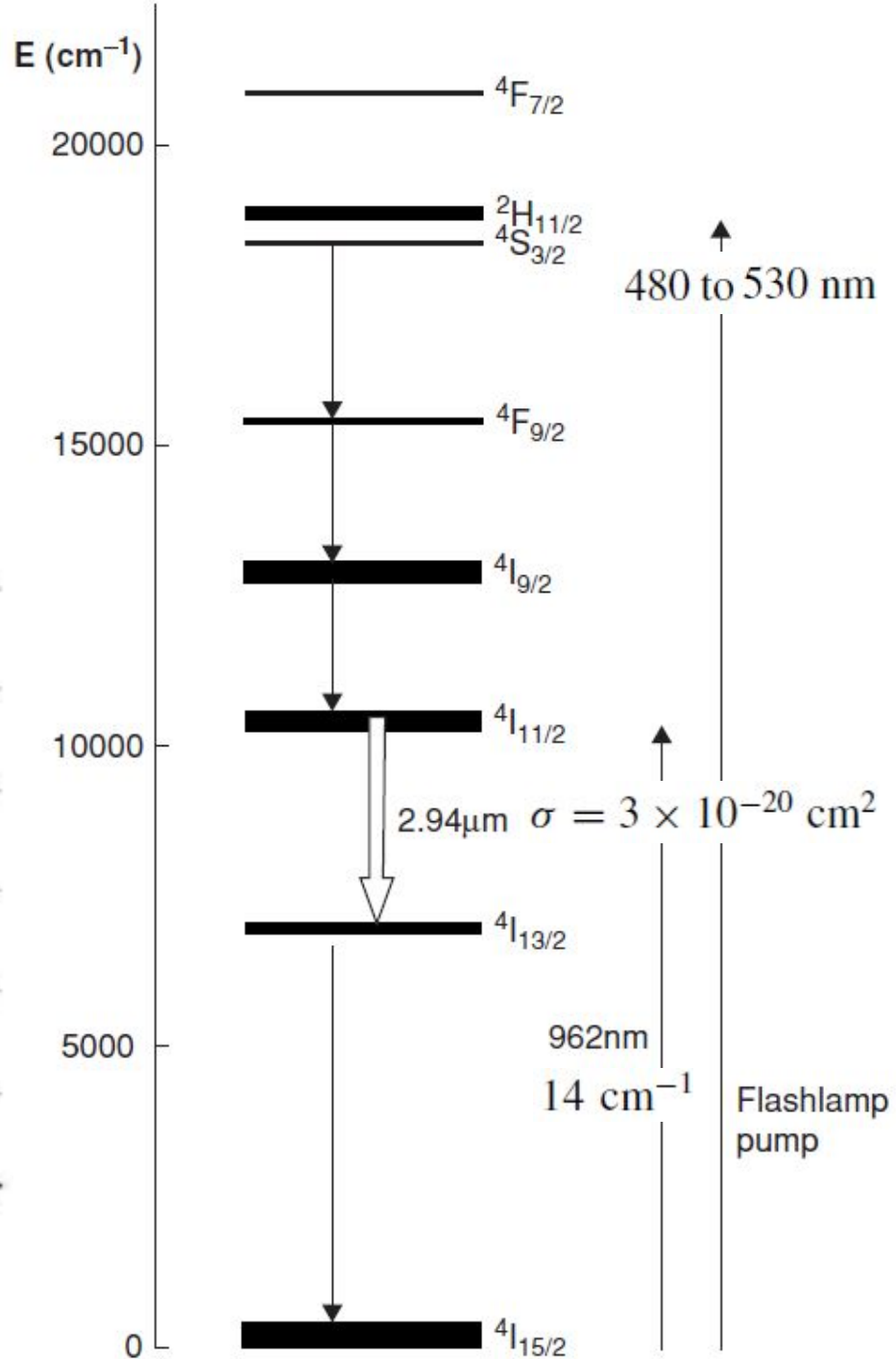
Физические основы создания те

# Активные среды твердо

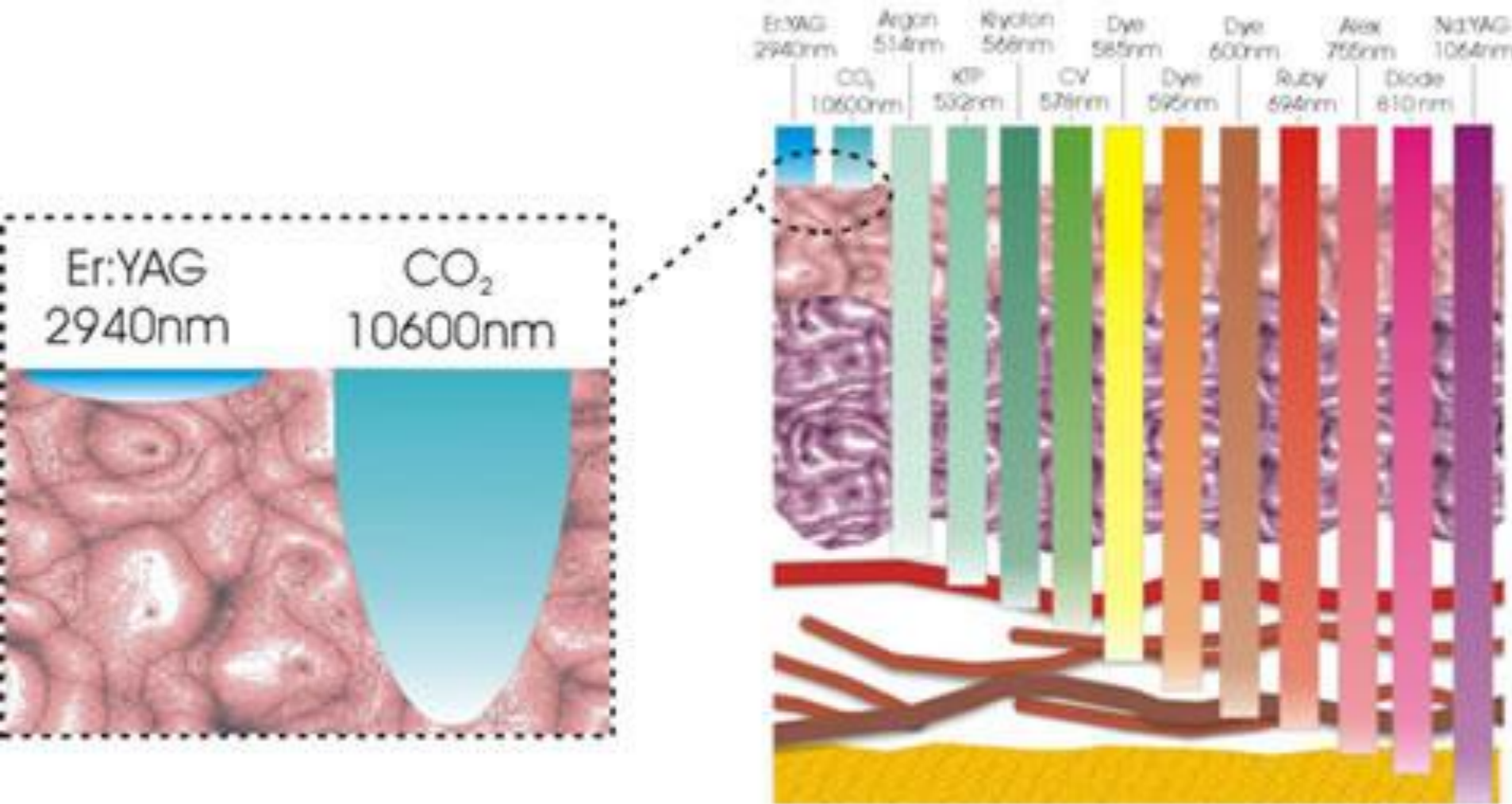
## Er:YAG



Trend of the water absorption coefficient in the infrared wavelength



# Физические основы создания твердотельных лазерных систем



Penetration depth through the skin tissue of different lasers.



# Ablative Erbium Yag Laser

Removal of moles

M



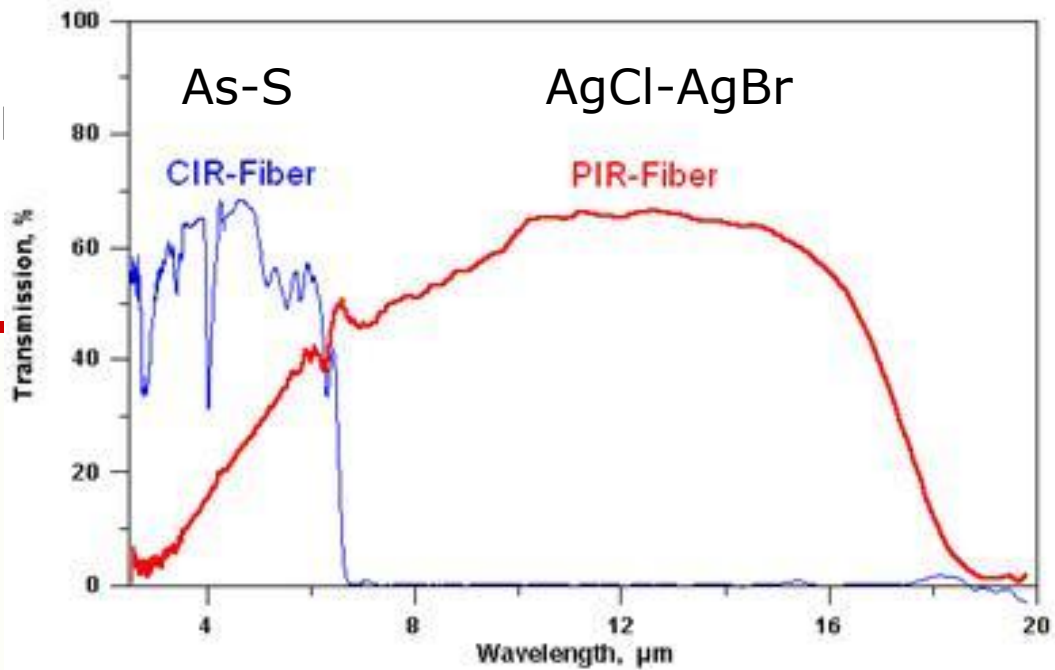
Before



After



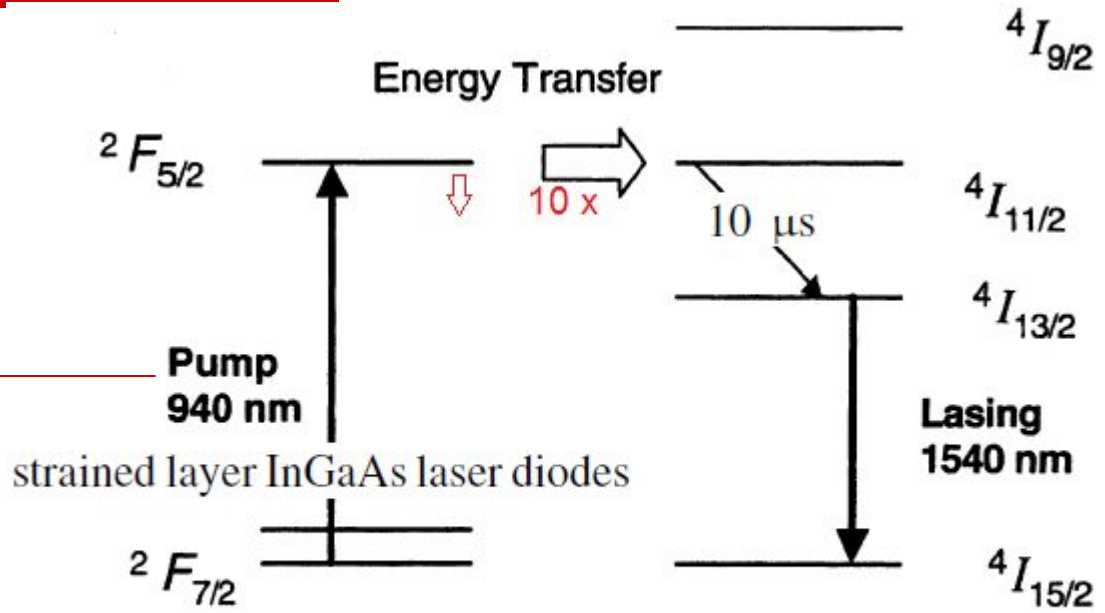
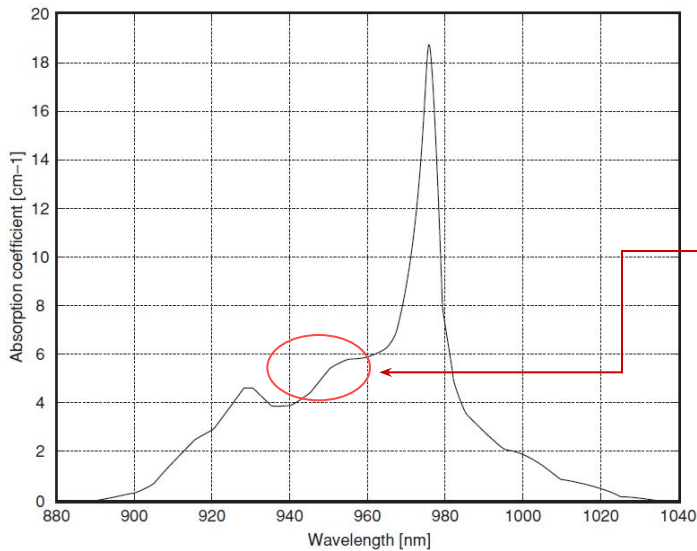
# Проблема доступа операционному



# Физические основы создания твердотельных лазерных систем

## Активные среды твердотельных лазеров

### Er:Yb-стекло



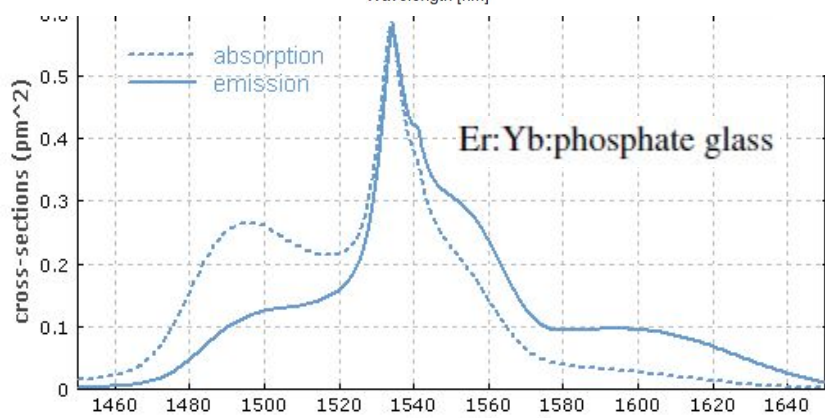
Pump  
940 nm  
strained layer InGaAs laser diodes

Lasing  
1540 nm

Yb<sup>3+</sup>

Er<sup>3+</sup>

Emission wavelength	1.54 μm
Fluorescent lifetime	8 ms
Index of refraction at 1.54 μm	1.531
$dn/dT$	$63 \times 10^{-7} / ^\circ\text{C}$
Thermal expansion ( $\alpha$ )	$124 \times 10^{-7} / ^\circ\text{C}$
Thermo-optic coefficient (W)	$-3 \times 10^{-7} / ^\circ\text{C}$



Er:Yb:phosphate glass



- Compact, just 96mm x 50mm x 32mm
- Lightweight <110g
- Easily integrated
- Versatile mechanical mounting arrangement
- Rugged design
- Measurement range <8m to 4Km
- High accuracy
- Eye safe 1550nm wavelength

- Homeland security
- Multifunction image sensors
- Civil engineering
- Automotive & industrial metrology
- Object tracking

## Options

- Windows PC Starter kit
- Integrated day camera

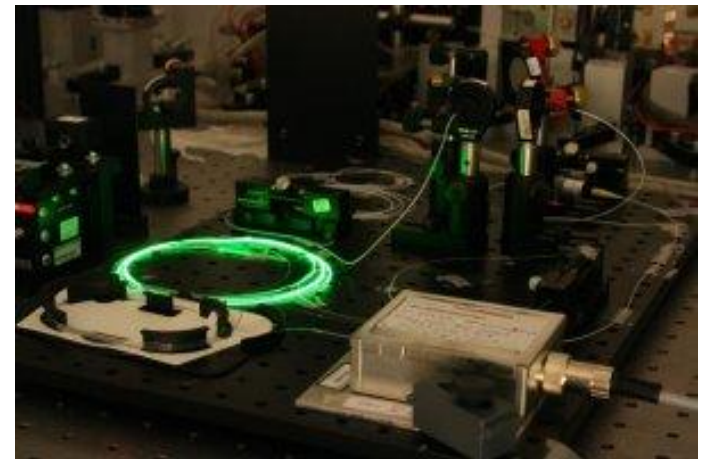
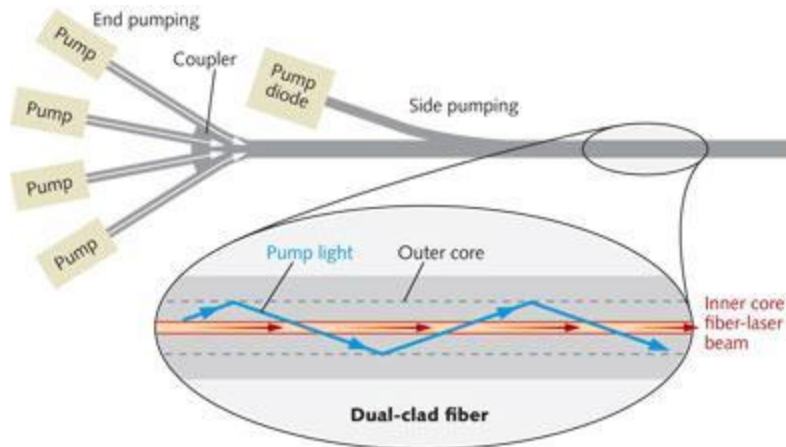
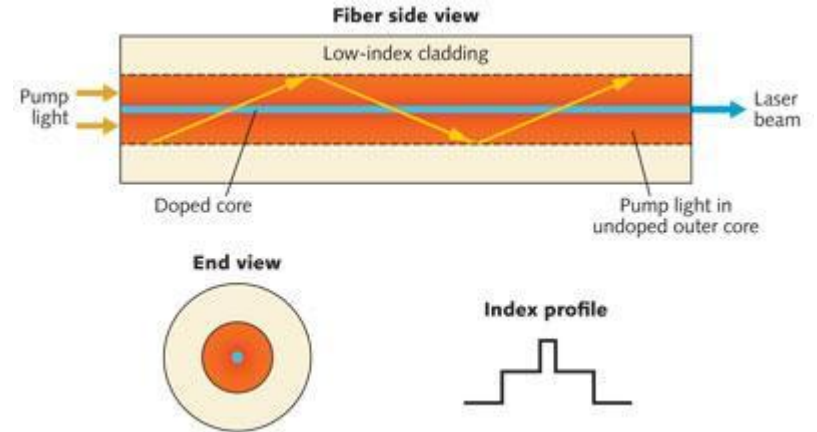


# Физические основы создания твердотельных лазерных систем

## Активные среды твердотельных лазеров

### Волоконные усилители

(Er Doped Fiber Amplifiers, EDFA)



# Современная периодическая система элементов Д.И.Менделеева

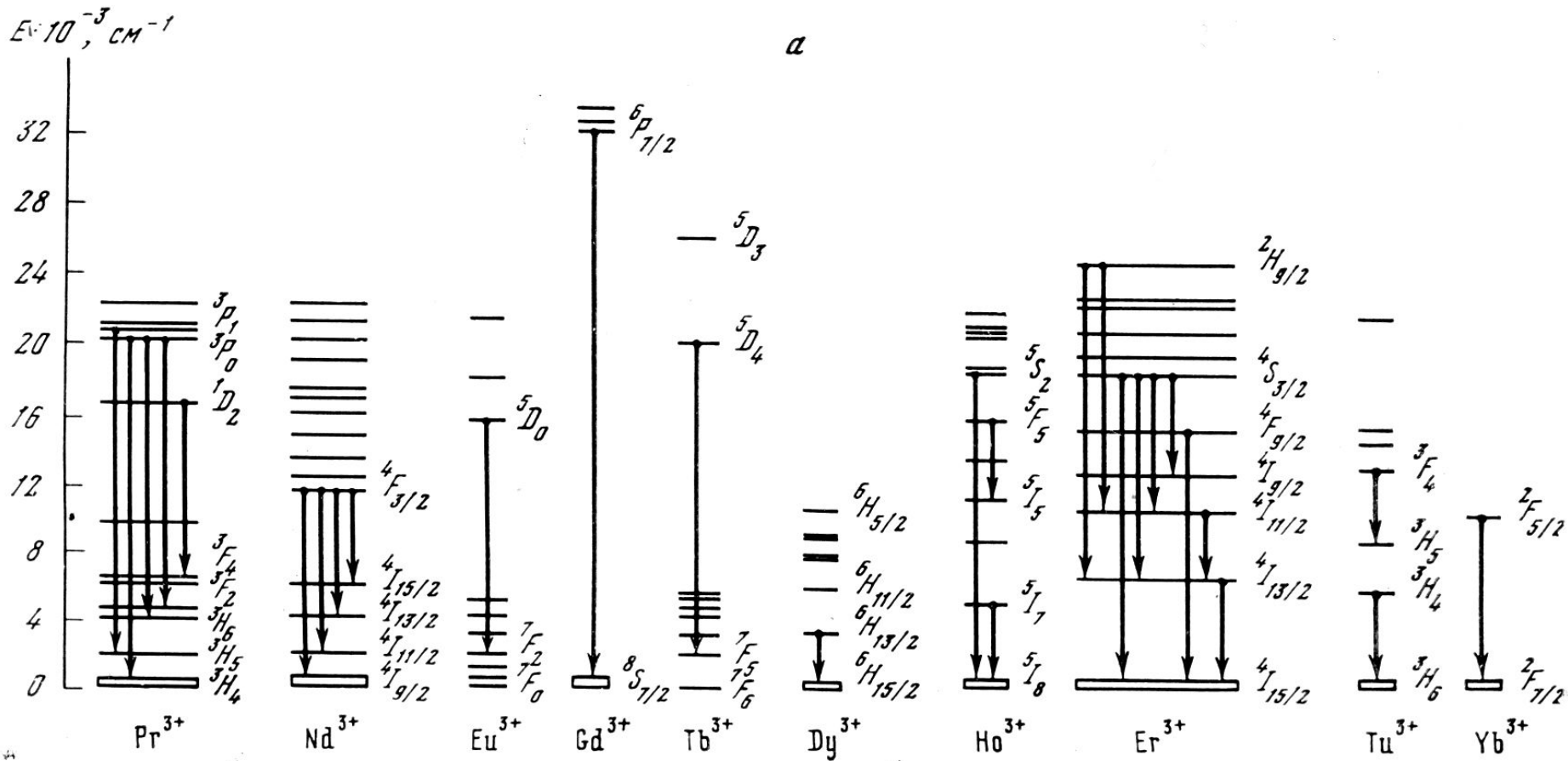
Group 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Ia	IIa	IIIB	IVB	VB	VIB	VIIb	VIII	VIII	VIII	IB	IIB	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	0
1 1s <sup>1</sup> Hydrogen Водород	2 1s <sup>2</sup> Helium Гелий											13 10.811 5 2s <sup>2</sup> 2p <sup>1</sup> Boron Бор	14 12.011 6 2s <sup>2</sup> 2p <sup>2</sup> Carbon Углерод	15 14.00674 7 2s <sup>2</sup> 2p <sup>3</sup> Nitrogen Азот	16 15.9994 8 2s <sup>2</sup> 2p <sup>4</sup> Oxygen Кислород	17 18.9984032 9 2s <sup>2</sup> 2p <sup>5</sup> Fluorine Фтор	18 19.9984 10 2s <sup>2</sup> 2p <sup>6</sup> Neon Неон
3 [Ne]3s <sup>1</sup> Sodium Натрий	4 [Ne]3s <sup>2</sup> Magnesium Магний	5 [Ar]3d <sup>1</sup> 4s <sup>1</sup> Scandium Скандий	6 [Ar]3d <sup>2</sup> 4s <sup>2</sup> Titanium Титан	7 [Ar]3d <sup>3</sup> 4s <sup>2</sup> Vanadium Ванадий	8 [Ar]3d <sup>4</sup> 4s <sup>2</sup> Chromium Хром	9 [Ar]3d <sup>5</sup> 4s <sup>1</sup> Manganese Марганец	10 [Ar]3d <sup>6</sup> 4s <sup>2</sup> Iron Железо	11 [Ar]3d <sup>7</sup> 4s <sup>2</sup> Cobalt Кобальт	12 [Ar]3d <sup>8</sup> 4s <sup>2</sup> Nickel Никель	13 [Ar]3d <sup>9</sup> 4s <sup>1</sup> Copper Медь	14 [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>1</sup> Zinc Цинк	15 [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>1</sup> Gallium Галлий	16 [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>2</sup> Germanium Германий	17 [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>3</sup> Arsenic Мышьяк	18 [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>4</sup> Selenium Селен	19 [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>5</sup> Bromine Бром	20 [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>6</sup> Krypton Криптон
11 [Ne]3s <sup>1</sup> Sodium Натрий	12 [Ne]3s <sup>2</sup> Magnesium Магний	13 [Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>1</sup> Aluminum Алюминий	14 [Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>2</sup> Silicon Кремний	15 [Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>3</sup> Phosphorus Фосфор	16 [Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>4</sup> Sulphur Сера	17 [Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>5</sup> Chlorine Хлор	18 [Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>6</sup> Argon Аргон										
19 [Ar]4s <sup>1</sup> Potassium Калий	20 [Ar]4s <sup>2</sup> Calcium Кальций	21 [Ar]3d <sup>1</sup> 4s <sup>2</sup> Scandium Скандий	22 [Ar]3d <sup>2</sup> 4s <sup>2</sup> Titanium Титан	23 [Ar]3d <sup>3</sup> 4s <sup>2</sup> Vanadium Ванадий	24 [Ar]3d <sup>4</sup> 4s <sup>2</sup> Chromium Хром	25 [Ar]3d <sup>5</sup> 4s <sup>1</sup> Manganese Марганец	26 [Ar]3d <sup>6</sup> 4s <sup>2</sup> Iron Железо	27 [Ar]3d <sup>7</sup> 4s <sup>2</sup> Cobalt Кобальт	28 [Ar]3d <sup>8</sup> 4s <sup>2</sup> Nickel Никель	29 [Ar]3d <sup>9</sup> 4s <sup>1</sup> Copper Медь	30 [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>1</sup> Zinc Цинк	31 [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>1</sup> Gallium Галлий	32 [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>2</sup> Germanium Германий	33 [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>3</sup> Arsenic Мышьяк	34 [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>4</sup> Selenium Селен	35 [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>5</sup> Bromine Бром	36 [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>6</sup> Krypton Криптон
37 [Kr]5s <sup>1</sup> Rubidium Рубидий	38 [Kr]5s <sup>2</sup> Strontium Стронций	39 [Kr]4d <sup>1</sup> 5s <sup>2</sup> Yttrium Иттрий	40 [Kr]4d <sup>2</sup> 5s <sup>2</sup> Zirconium Цирконий	41 [Kr]4d <sup>3</sup> 5s <sup>2</sup> Niobium Нобий	42 [Kr]4d <sup>4</sup> 5s <sup>1</sup> Molybdenum Молибден	43 [Kr]4d <sup>5</sup> 5s <sup>1</sup> Technetium Технеций	44 [Kr]4d <sup>6</sup> 5s <sup>1</sup> Ruthenium Рутений	45 [Kr]4d <sup>7</sup> 5s <sup>1</sup> Rhodium Родий	46 [Kr]4d <sup>8</sup> 5s <sup>1</sup> Palladium Палладий	47 [Kr]4d <sup>9</sup> 5s <sup>1</sup> Silver Серебро	48 [Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>1</sup> Cadmium Кадмий	49 [Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 4p <sup>1</sup> Indium Индий	50 [Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 4p <sup>2</sup> Tin Олово	51 [Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 4p <sup>3</sup> Antimony Сурьма	52 [Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 4p <sup>4</sup> Tellurium Теллур	53 [Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 4p <sup>5</sup> Iodine Йод	54 [Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 4p <sup>6</sup> Xenon Ксенон
55 [Xe]6s <sup>1</sup> Caesium Цезий	56 [Xe]6s <sup>2</sup> Barium Барий	57 [Xe]4f <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup> Lanthanum Лантан	58 [Xe]4f <sup>2</sup> 6s <sup>2</sup> Cerium Церий	59 [Xe]4f <sup>3</sup> 6s <sup>2</sup> Praseodymium Прозеродимий	60 [Xe]4f <sup>4</sup> 6s <sup>2</sup> Neodymium Неодимий	61 [Xe]4f <sup>5</sup> 6s <sup>2</sup> Promethium Прометий	62 [Xe]4f <sup>6</sup> 6s <sup>2</sup> Samarium Самарий	63 [Xe]4f <sup>7</sup> 6s <sup>2</sup> Europium Европий	64 [Xe]4f <sup>8</sup> 6s <sup>2</sup> Gadolinium Гадолий	65 [Xe]4f <sup>9</sup> 6s <sup>2</sup> Terbium Тербий	66 [Xe]4f <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup> Dysprosium Диспрозий	67 [Xe]4f <sup>11</sup> 6s <sup>2</sup> Holmium Гольмий	68 [Xe]4f <sup>12</sup> 6s <sup>2</sup> Erbium Эрбий	69 [Xe]4f <sup>13</sup> 6s <sup>2</sup> Thulium Тульмий	70 [Xe]4f <sup>14</sup> 6s <sup>2</sup> Ytterbium Иттербий	71 [Xe]4f <sup>14</sup> 6s <sup>2</sup> 6p <sup>1</sup> Lutetium Лютеций	
87 [Rn]7s <sup>1</sup> Francium Франций	88 [Rn]7s <sup>2</sup> Radium Радий	89 [Rn]5f <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup> Actinium Актиний	90 [Rn]5f <sup>2</sup> 7s <sup>2</sup> Thorium Торий	91 [Rn]5f <sup>3</sup> 7s <sup>2</sup> Protactinium Протактиний	92 [Rn]5f <sup>4</sup> 7s <sup>2</sup> Uranium Уран	93 [Rn]5f <sup>5</sup> 7s <sup>2</sup> Neptunium Нептуний	94 [Rn]5f <sup>6</sup> 7s <sup>2</sup> Plutonium Плутоний	95 [Rn]5f <sup>7</sup> 7s <sup>2</sup> Americium Америций	96 [Rn]5f <sup>8</sup> 7s <sup>2</sup> Curium Кюрий	97 [Rn]5f <sup>9</sup> 7s <sup>2</sup> Berkelium Берклий	98 [Rn]5f <sup>10</sup> 7s <sup>2</sup> Californium Калифорний	99 [Rn]5f <sup>11</sup> 7s <sup>2</sup> Einsteinium Эйнштейний	100 [Rn]5f <sup>12</sup> 7s <sup>2</sup> Fermium Фермий	101 [Rn]5f <sup>13</sup> 7s <sup>2</sup> Mendelevium Менделеев	102 [Rn]5f <sup>14</sup> 7s <sup>2</sup> Nobelium Нобелий	103 [Rn]5f <sup>14</sup> 7s <sup>2</sup> 6p <sup>1</sup> Lawrencium Лоуренсий	

\* Element has no stable nuclides. For radioactive elements the value in parentheses refers to the number of nucleons (mass number) of the most stable isotope (IUPAC, 1995).  
 \* Элемент не имеет устойчивых изотопов. Для него в скобках приведено значение массового числа (число нуклонов в ядре) наиболее долгоживущего изотопа (ИЮПАК, 1995).  
 [A] Alternative English name  
 [M] American spelling of the element's name  
 ( ) Alternative English name  
 ( ) Alternative English name  
 [A] Alternative English name  
 [M] American spelling of the element's name



# Физические основы создания твердотельных лазерных систем

## Активные среды твердотельных лазеров



# Современная периодическая система элементов Д.И.Менделеева

Group 1	2	13	14	15	16	17	18										
Ia	Ila	IIla	IVa	Va	Vla	VIIa	0										
1 1s <sup>1</sup> Hydrogen Водород	2 1s <sup>2</sup> Helium Гелий	3 [He]2s <sup>1</sup> Lithium Литий	4 [He]2s <sup>2</sup> Beryllium Бериллий	5 [Ne]3s <sup>1</sup> Sodium Натрий	6 [Ne]3s <sup>2</sup> Magnesium Магний	7 [Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>1</sup> Aluminum Алюминий	8 [Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>2</sup> Silicon Кремний	9 [Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>3</sup> Phosphorus Фосфор	10 [Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>4</sup> Sulfur Сера	11 [Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>5</sup> Chlorine Хлор	12 [Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>6</sup> Argon Аргон						
11 [Ne]3s <sup>1</sup> Sodium Натрий	12 [Ne]3s <sup>2</sup> Magnesium Магний	13 [Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>1</sup> Aluminum Алюминий	14 [Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>2</sup> Silicon Кремний	15 [Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>3</sup> Phosphorus Фосфор	16 [Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>4</sup> Sulfur Сера	17 [Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>5</sup> Chlorine Хлор	18 [Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>6</sup> Argon Аргон										
19 [Ar]4s <sup>1</sup> Potassium Калий	20 [Ar]4s <sup>2</sup> Calcium Кальций	21 [Ar]4s <sup>1</sup> 3d <sup>1</sup> Scandium Скандий	22 [Ar]4s <sup>2</sup> 3d <sup>2</sup> Titanium Титан	23 [Ar]4s <sup>1</sup> 3d <sup>3</sup> Vanadium Ванадий	24 [Ar]4s <sup>1</sup> 3d <sup>4</sup> Chromium Хром	25 [Ar]4s <sup>1</sup> 3d <sup>5</sup> Manganese Марганец	26 [Ar]4s <sup>1</sup> 3d <sup>6</sup> Iron Железо	27 [Ar]4s <sup>1</sup> 3d <sup>7</sup> Cobalt Кобальт	28 [Ar]4s <sup>1</sup> 3d <sup>8</sup> Nickel Никель	29 [Ar]4s <sup>1</sup> 3d <sup>9</sup> Copper Медь	30 [Ar]4s <sup>1</sup> 3d <sup>10</sup> Zinc Цинк	31 [Ar]4s <sup>1</sup> 3d <sup>10</sup> 4p <sup>1</sup> Gallium Галлий	32 [Ar]4s <sup>1</sup> 3d <sup>10</sup> 4p <sup>2</sup> Germanium Германий	33 [Ar]4s <sup>1</sup> 3d <sup>10</sup> 4p <sup>3</sup> Arsenic Мышьяк	34 [Ar]4s <sup>1</sup> 3d <sup>10</sup> 4p <sup>4</sup> Selenium Селен	35 [Ar]4s <sup>1</sup> 3d <sup>10</sup> 4p <sup>5</sup> Bromine Бром	36 [Ar]4s <sup>1</sup> 3d <sup>10</sup> 4p <sup>6</sup> Krypton Криптон
37 [Kr]5s <sup>1</sup> Rubidium Рубидий	38 [Kr]5s <sup>2</sup> Strontium Стронций	39 [Kr]5s <sup>1</sup> 4d <sup>1</sup> Yttrium Иттрий	40 [Kr]5s <sup>2</sup> 4d <sup>2</sup> Zirconium Цирконий	41 [Kr]5s <sup>1</sup> 4d <sup>3</sup> Niobium Ниобий	42 [Kr]5s <sup>1</sup> 4d <sup>4</sup> Molybdenum Молибден	43 [Kr]5s <sup>1</sup> 4d <sup>5</sup> Technetium Технеций	44 [Kr]5s <sup>1</sup> 4d <sup>6</sup> Ruthenium Рутений	45 [Kr]5s <sup>1</sup> 4d <sup>7</sup> Rhodium Родий	46 [Kr]5s <sup>1</sup> 4d <sup>8</sup> Palladium Палладий	47 [Kr]5s <sup>1</sup> 4d <sup>9</sup> Silver Серебро	48 [Kr]5s <sup>1</sup> 4d <sup>10</sup> Cadmium Кадмий	49 [Kr]5s <sup>1</sup> 4d <sup>10</sup> 5p <sup>1</sup> Indium Индий	50 [Kr]5s <sup>1</sup> 4d <sup>10</sup> 5p <sup>2</sup> Tin Олово	51 [Kr]5s <sup>1</sup> 4d <sup>10</sup> 5p <sup>3</sup> Antimony Сурьма	52 [Kr]5s <sup>1</sup> 4d <sup>10</sup> 5p <sup>4</sup> Tellurium Теллур	53 [Kr]5s <sup>1</sup> 4d <sup>10</sup> 5p <sup>5</sup> Iodine Йод	54 [Kr]5s <sup>1</sup> 4d <sup>10</sup> 5p <sup>6</sup> Xenon Ксенон
55 [Xe]6s <sup>1</sup> Caesium Цезий	56 [Xe]6s <sup>2</sup> Barium Барий	57 [Xe]6s <sup>1</sup> 5d <sup>1</sup> Lanthanum Лантан	58 [Xe]6s <sup>1</sup> 5d <sup>2</sup> Cerium Церий	59 [Xe]6s <sup>1</sup> 5d <sup>3</sup> Praseodymium Прозердий	60 [Xe]6s <sup>1</sup> 5d <sup>4</sup> Neodymium Неодим	61 [Xe]6s <sup>1</sup> 5d <sup>5</sup> Promethium Прометий	62 [Xe]6s <sup>1</sup> 5d <sup>6</sup> Samarium Самарий	63 [Xe]6s <sup>1</sup> 5d <sup>7</sup> Europium Европий	64 [Xe]6s <sup>1</sup> 5d <sup>8</sup> Gadolinium Гадолий	65 [Xe]6s <sup>1</sup> 5d <sup>9</sup> Terbium Тербий	66 [Xe]6s <sup>1</sup> 5d <sup>10</sup> Dysprosium Диспрозий	67 [Xe]6s <sup>1</sup> 5d <sup>10</sup> 6p <sup>1</sup> Holmium Гольмий	68 [Xe]6s <sup>1</sup> 5d <sup>10</sup> 6p <sup>2</sup> Erbium Эрбий	69 [Xe]6s <sup>1</sup> 5d <sup>10</sup> 6p <sup>3</sup> Thulium Тулий	70 [Xe]6s <sup>1</sup> 5d <sup>10</sup> 6p <sup>4</sup> Ytterbium Иттербий	71 [Xe]6s <sup>1</sup> 5d <sup>10</sup> 6p <sup>5</sup> Lutetium Лютеций	
87 [Rn]7s <sup>1</sup> Francium Франций	88 [Rn]7s <sup>2</sup> Radium Радий	89 [Rn]7s <sup>1</sup> 6d <sup>1</sup> Actinium Актиний	90 [Rn]7s <sup>1</sup> 6d <sup>2</sup> Rutherfordium Резерфордий	91 [Rn]7s <sup>1</sup> 6d <sup>3</sup> Dubnium Дубний	92 [Rn]7s <sup>1</sup> 6d <sup>4</sup> Seaborgium Сиборгий	93 [Rn]7s <sup>1</sup> 6d <sup>5</sup> Bohrium Борий	94 [Rn]7s <sup>1</sup> 6d <sup>6</sup> Hassium Хассий	95 [Rn]7s <sup>1</sup> 6d <sup>7</sup> Meitnerium Мейтнерий	96 [Rn]7s <sup>1</sup> 6d <sup>8</sup> Ununnilium Унуннилий	97 [Rn]7s <sup>1</sup> 6d <sup>9</sup> Ununnilium Унуннилий	98 [Rn]7s <sup>1</sup> 6d <sup>10</sup> Ununnilium Унуннилий	99 [Rn]7s <sup>1</sup> 6d <sup>10</sup> 7s <sup>1</sup> Ununnilium Унуннилий	100 [Rn]7s <sup>1</sup> 6d <sup>10</sup> 7s <sup>2</sup> Ununnilium Унуннилий	101 [Rn]7s <sup>1</sup> 6d <sup>10</sup> 7s <sup>2</sup> Ununnilium Унуннилий	102 [Rn]7s <sup>1</sup> 6d <sup>10</sup> 7s <sup>2</sup> Ununnilium Унуннилий	103 [Rn]7s <sup>1</sup> 6d <sup>10</sup> 7s <sup>2</sup> Ununnilium Унуннилий	

Атомная масса, относительная: 186.207  
 Атомный номер, Обозначение: 75Re  
 Распределение электронов: [Xe] 4f<sup>14</sup>5d<sup>6</sup>6s<sup>2</sup>  
 Температура плавления (°C): 3180  
 Температура кипения (°C): 5627  
 Электроотрицательность (по Полингу/по Аллреду и Рохову): 1.9/1.46  
 Название: Rhenium  
 Латинское название: Rhenium

Groups 1...18 IUPAC 1989  
 Groups IA...VIII...0 IUPAC 1970  
 Группы 1...18 ИЮПАК, 1989  
 Группы IA...VIII...0 ИЮПАК, 1970

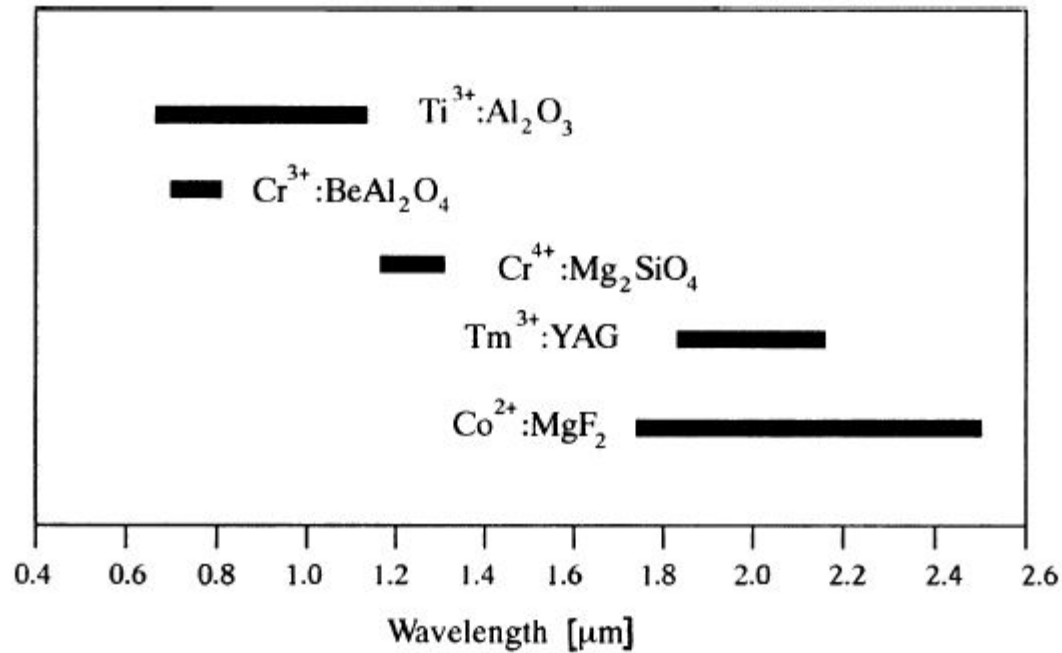
\* Element has no stable nuclides. For radioactive elements the value in parentheses refers to the number of nucleons (mass number) of the most stable isotope (IUPAC, 1995)  
 \* Элемент не имеет устойчивых изотопов. Для него в скобках приведено значение массового числа (число нуклонов в ядре) наиболее долгоживущего изотопа (ИЮПАК, 1995).  
 1) Alternative English name  
 2) American spelling of the element's name  
 ( ) Alternative English name  
 ( ) Латинское название элемента  
 [ ] Американское написание названия элемента

© P.C. Сайфуллин, А.Р.Сайфуллин, 2004  
 © R.S. Saifullin, A.R. Saifullin, 2004

Физические основы создания твердотельных лазерных систем

## Активные среды твердотельных лазеров

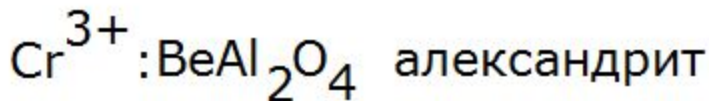
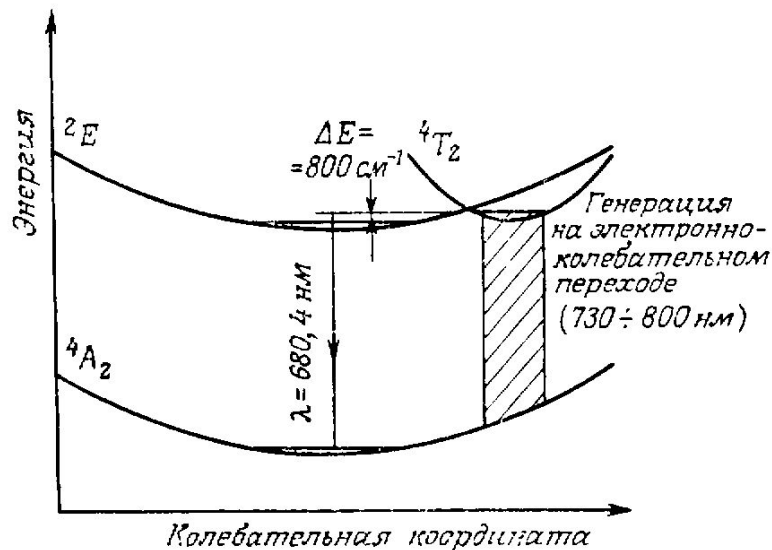
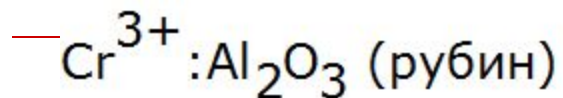
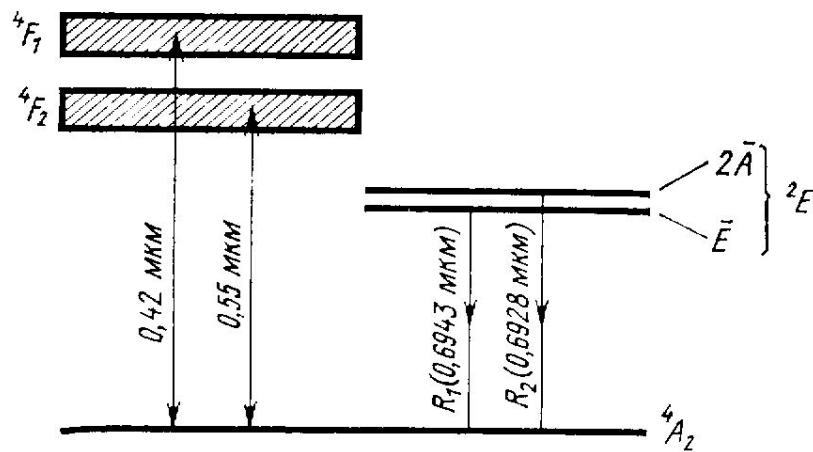
### Перестраиваемые лазеры





В лазерах на электронных переходах линии узки. В перестраиваемых лазерах в дело вступают колебательные подуровни спектра, связанные с взаимодействием генерирующего иона с решеткой (фононы). Электрон-фононное взаимодействие создает колебательные подуровни, размывающие узкие линии в полосы. Общая энергия лазерного перехода сохраняется, распределяясь между множеством фотон-фононных пар, так что энергия излученных фотонов изменяется (квази)непрерывным образом, и при каждом акте излучения фотона излучается или поглощается также и фонон.

### "Vibronic lasers"



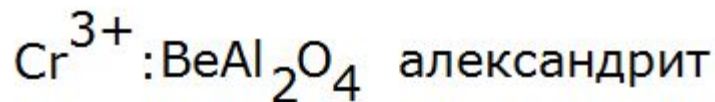
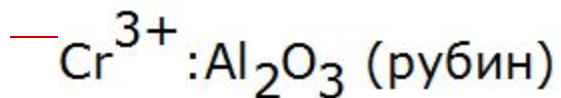
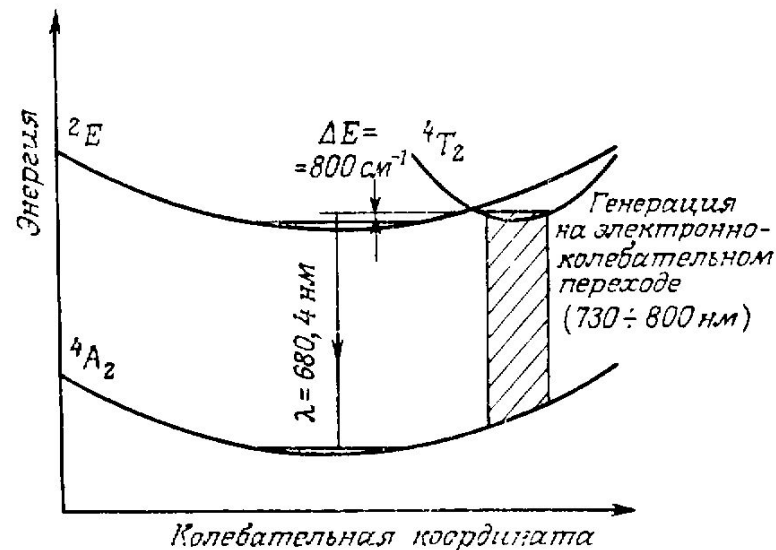
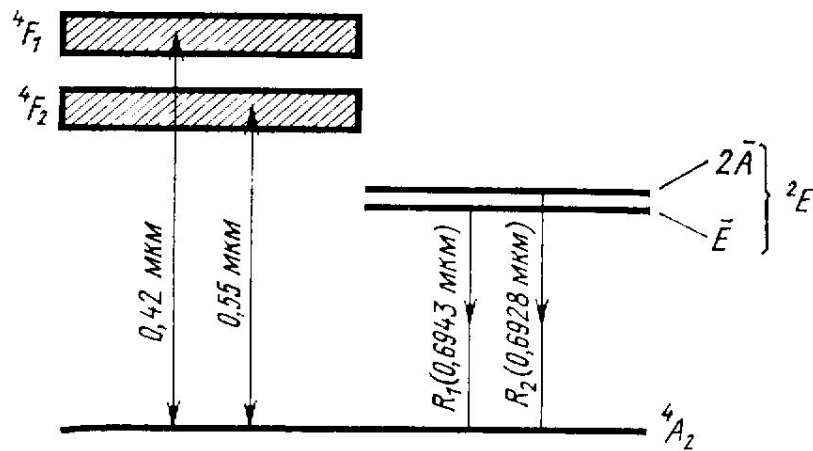
Следствия:

- 1) Время жизни возбужденного состояния  $\tau_f = 1/A_{21}$   
 2) Поперечное сечение вынужденных переходов  $\sigma \sim \Delta\nu$

➔ для перестраиваемых лазеров или лазеров УКИ характерны малые значения  $\sigma$  или  $\tau_f$  или обоих!

➔ требуются большие **МОЩНОСТИ** накачки ➔ накачка ЛД или лазерная.

“Vibronic lasers”





Физические основы создания твердотельных лазерных систем

## Активные среды твердотельных лазеров

### Перестраиваемые лазеры: история

1963: Bell System Labs Ni:MgF<sub>2</sub>

и далее Ni, Co, V в матрицах MnF<sub>2</sub>, MgO, MgF<sub>2</sub>, ZnF<sub>2</sub>

1.12–2.17 μm

Первый не-криогенный "вибронный" лазер - 1974 г.

Ho:BaY<sub>2</sub>F<sub>8</sub> 2.17 μm

1977 г.: лазер на александрите (BeAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> с хромом)

0.7–0.8 μm

Середина 1970-х гг.: MIT Lincoln Lab:

Ni<sup>2+</sup>, V<sup>2+</sup>, Co<sup>2+</sup>:MgF<sub>2</sub> → Накачка 1.3 μm Nd  
область перестройки 1750 - 2500 nm

1982 г.: Ti:sapphire laser

Физические основы создания твердотельных лазерных систем

## Активные среды твердотельных лазеров

Лазеры на основе Cr. 1) Александрит  $\text{BeAl}_2\text{O}_4:\text{Cr}^{3+}$



Назван в честь Александра II  
Преподнесен в день его 16-летия  
16 апр. 1834 г. Л. А. Перовским.



## Активные среды твердотельных лазеров

---

### Лазеры на основе Cr. 1) Александрит

---

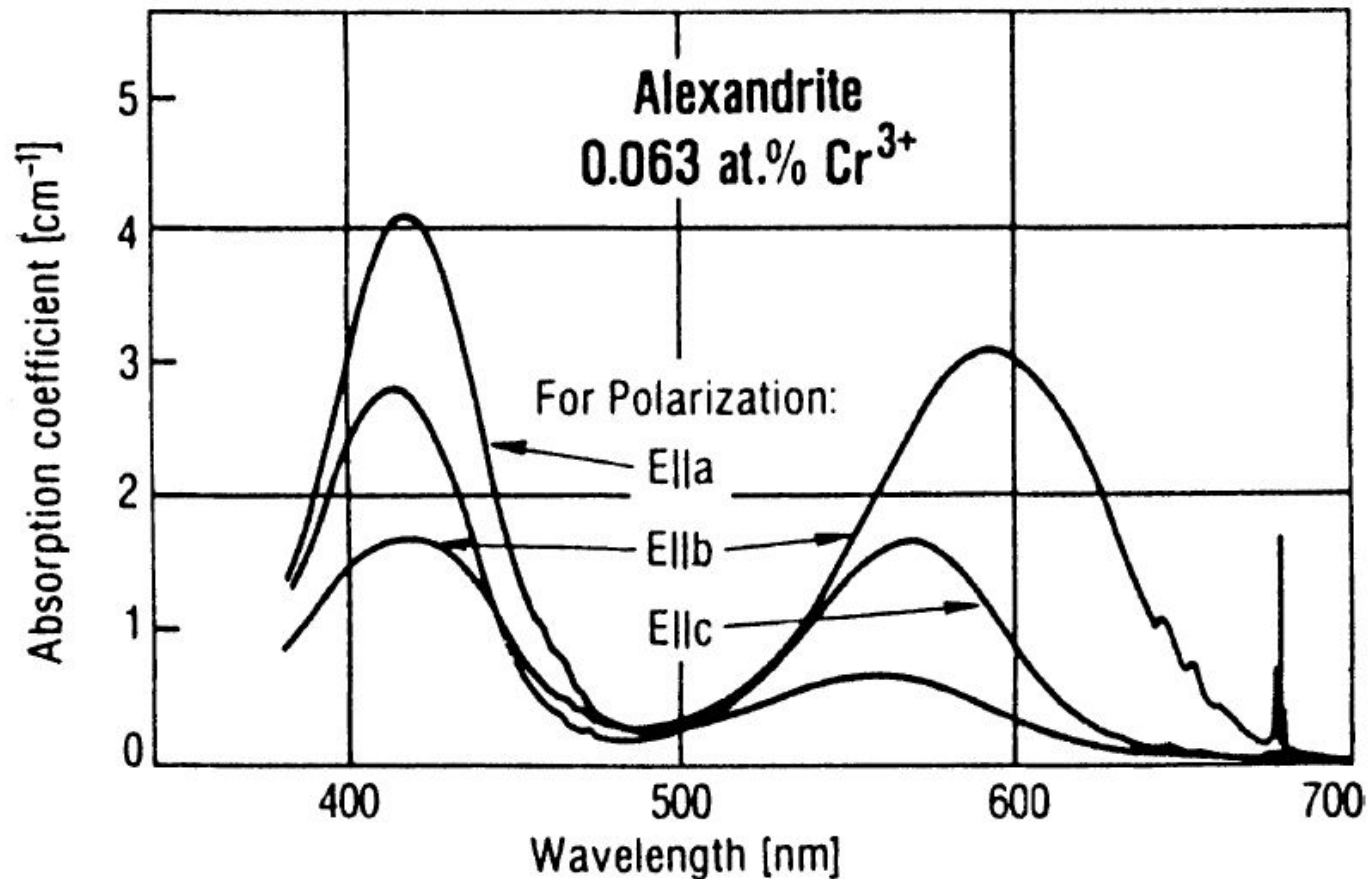
Laser wavelength (nm)	700–818
Stimulated emission cross section (cm <sup>2</sup> )	$1.0 \times 10^{-20}$
Spontaneous lifetime (μs)	260 ( $T = 298$ K)
Doping density (at.%)	0.05–0.3
Fluorescent linewidth (nm)	100
Gain coefficient for 1 J/cm <sup>3</sup> stored energy (cm <sup>-1</sup> )	0.038–0.19
Index of refraction (750 nm)	$n \approx 1.7421$
Thermal expansion	$\alpha \approx 6.1 \times 10^{-6}$ /K
Thermal conductivity (W/cm K):	0.23
Melting point (°C)	1870
Hardness (kg/mm <sup>2</sup> )	2000

---

Физические основы создания твердотельных лазерных систем

## Активные среды твердотельных лазеров

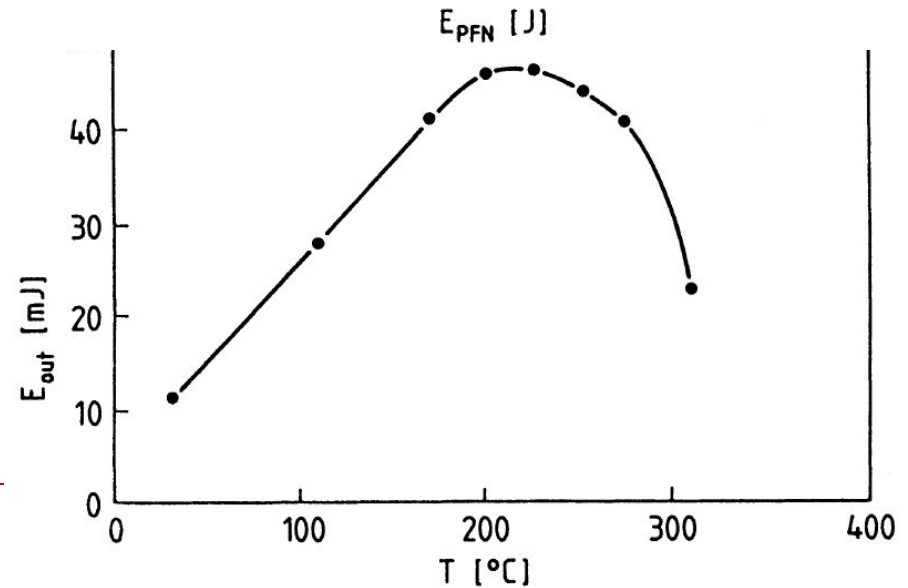
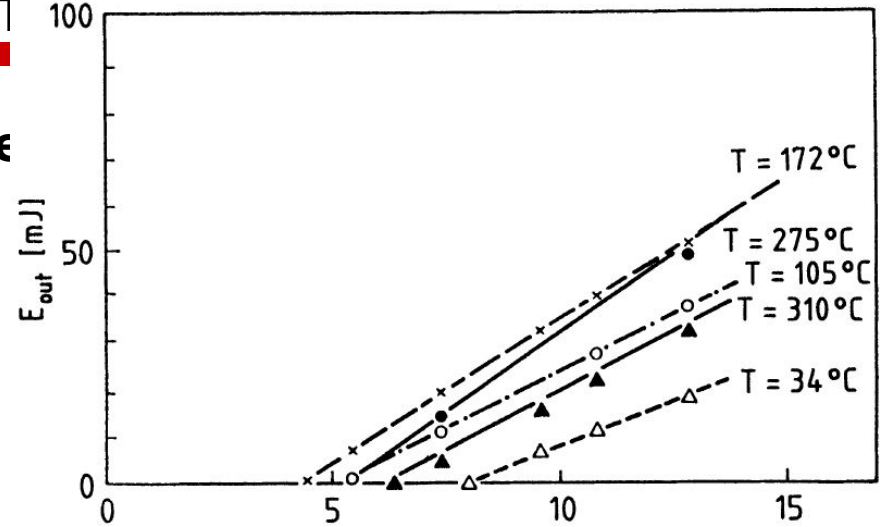
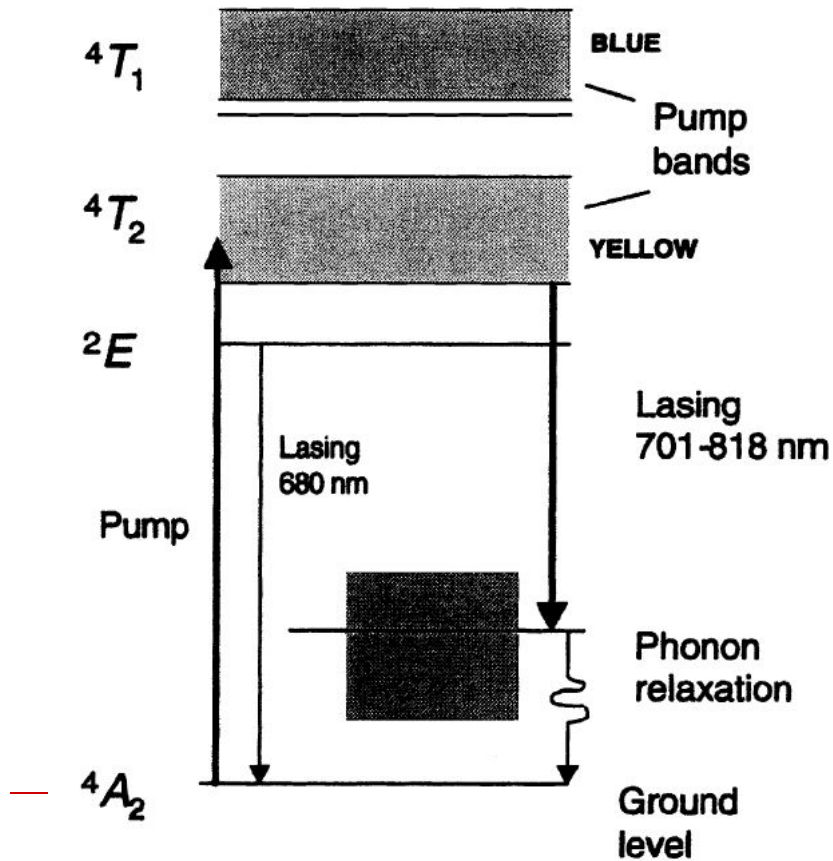
### Лазеры на основе Cr. 1) Александрит



# Физические основы создания твердотельных лазерных систем

## Активные среды твердот

### Лазеры на основе Cr. 1) Алё



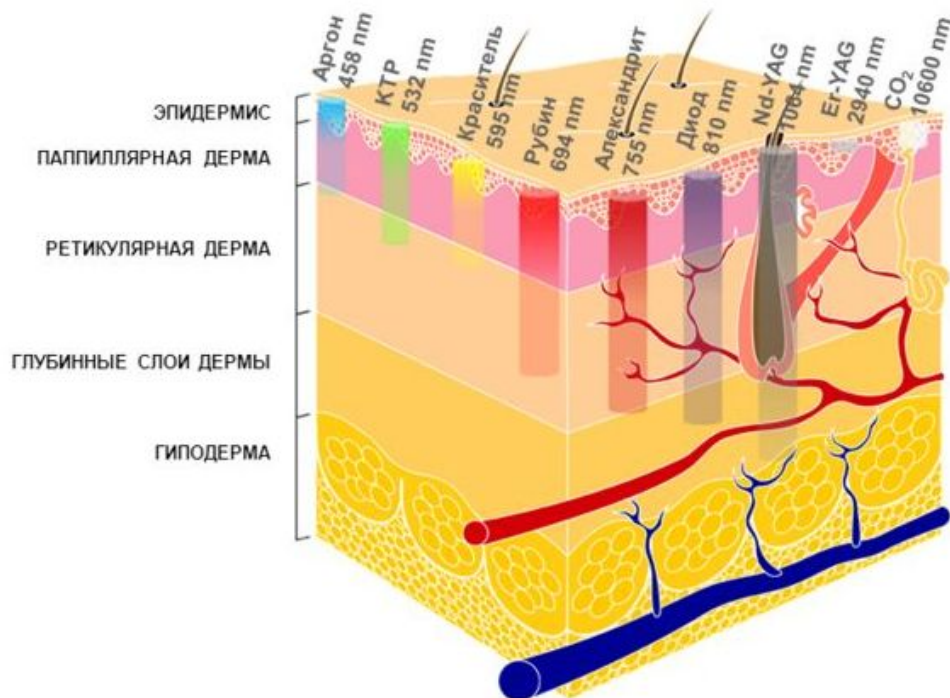


Физические основы создания твердотельных лазерных систем

## Активные среды твердотельных лазеров

Лазеры на основе Cr. 1) Александрит

### ГЛУБИНА ПРОНИКНОВЕНИЯ ЛАЗЕРА

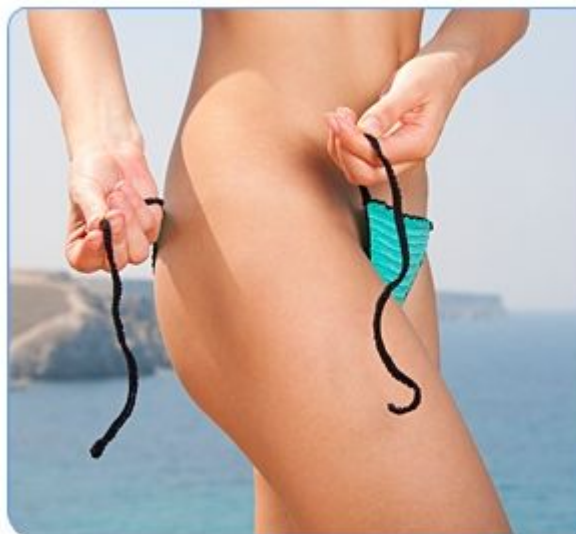
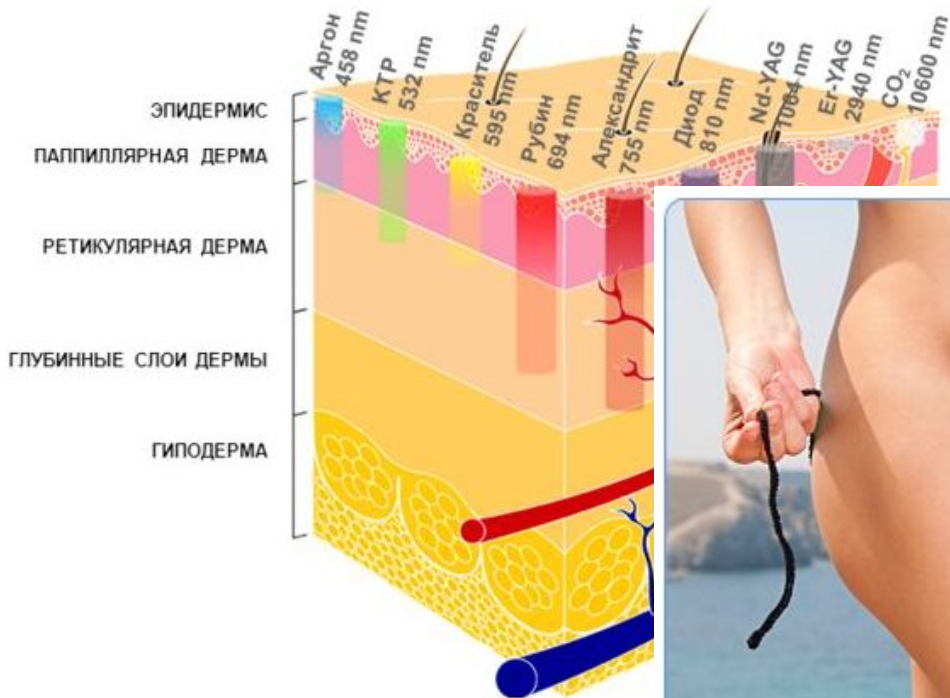


Физические основы создания твердотельных лазерных систем

## Активные среды твердотельных лазеров

Лазеры на основе Cr. 1) Александрит

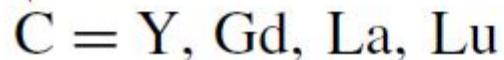
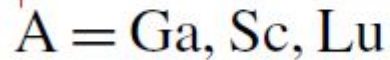
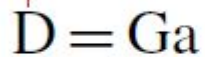
### ГЛУБИНА ПРОНИКНОВЕНИЯ ЛАЗЕРА



## Активные среды твердотельных лазеров

### Лазеры на основе Cr. 2) Прочие

Cr-содержащие гранаты.

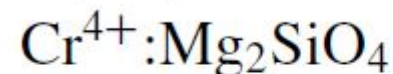


700–950 nm

240–70  $\mu s$

Наиболее популярен был  
GdScGG(GSGG).

Форстерит:Cr



1167—1345 nm

Полоса поглощения 850–1200 nm

25  $\mu s$

$1.44 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$

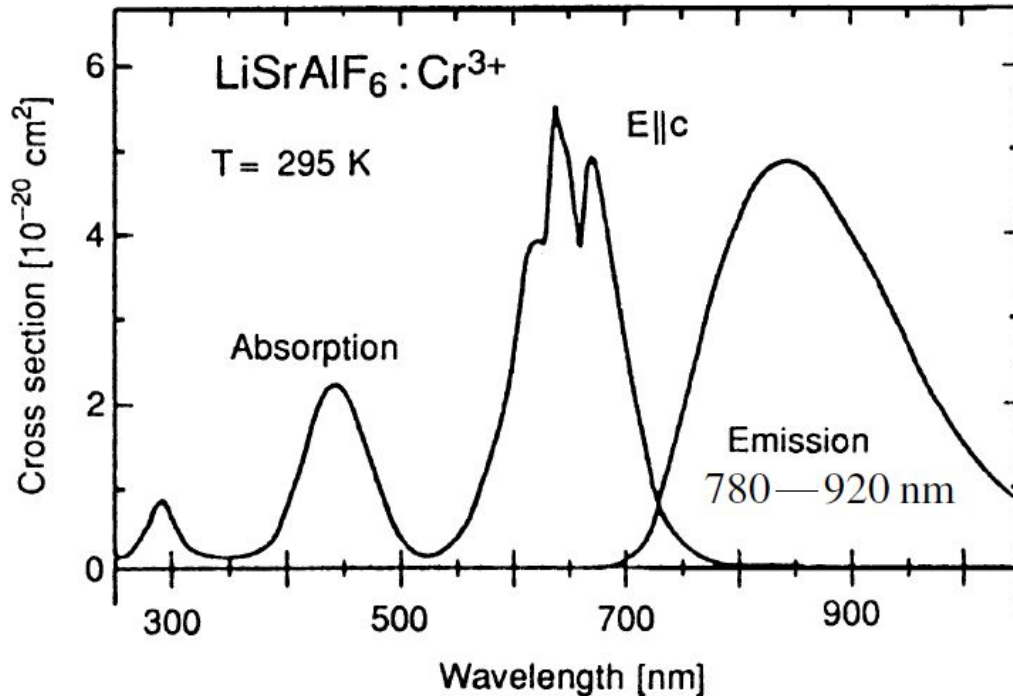
# Активные среды твердотельных лазеров

## Лазеры на основе Cr. 2) Прочие

**Cr:LiSAF.**  $\text{Cr}^{3+}$ -LiSrAlF<sub>6</sub>

${}^4T_2 \rightarrow {}^4A_2$  830 nm

$4.8 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$



	Cr:LiSAF	Glass
Thermal shock resistance ( $\text{W/m}^{1/2}$ )	$\approx 0.4$	$\approx 0.4$
Fracture strength ( $\text{kg/mm}^2$ )	3.9	5
Thermal expansion coefficient ( $\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ )	22	11.4
Young's modulus (Gpa)	100	50
Microhardness ( $\text{kg/mm}^2$ )	197	$\approx 500$
Fracture toughness ( $\text{MPam}^{1/2}$ )	0.4	0.45
Thermal conductivity ( $\text{W/m K}$ )	3.09	0.62

Возможна накачка лд AlGaInP 670 nm  
 или даже AlGaAs 752 nm  
 АЭ высокого качества вплоть до dia.25 mm

# Лекция 9

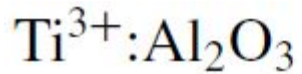
---

## *Активные среды твёрдотельных лазеров (окончание)*

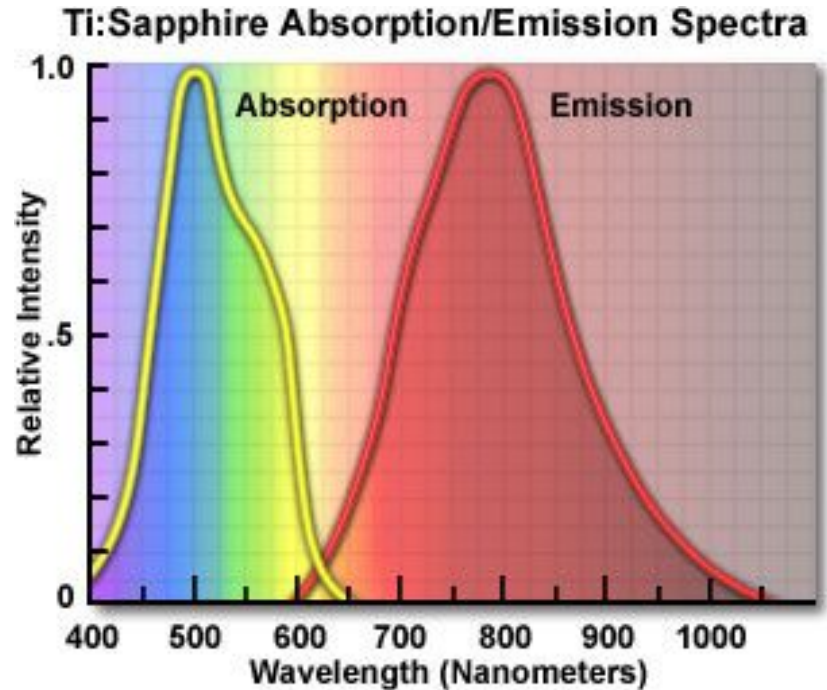
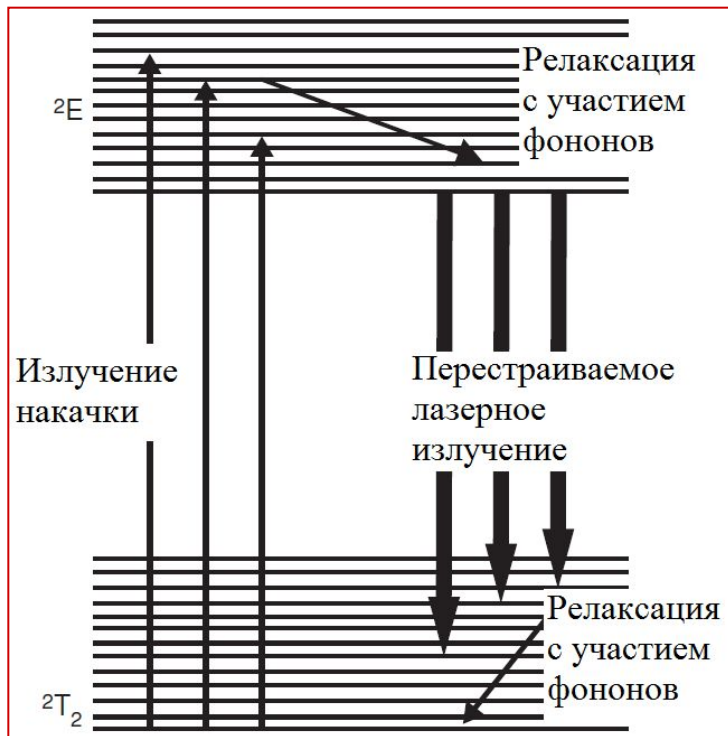


## Активные среды твердотельных лазеров

### Ti-сапфир



0.1%  $\text{Ti}^{3+}$  ВЕСОВЫХ



## Активные среды твердотельных лазеров

### Ti-сапфир

Доступны АЭ до dia.35 x 150 mm

Index of refraction	1.76
Fluorescent lifetime	3.2 $\mu$ s
Fluorescent linewidth (FWHM)	230 nm
Peak emission wavelength	780 nm
Peak stimulated emission cross section	
parallel to <i>c</i> -axis	$\sigma_{\parallel} \sim 4.1 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$
perpendicular to <i>c</i> -axis	$\sigma_{\perp} \sim 2.0 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$
Stimulated emission cross section	
at 0.795 $\mu$ m	$\sigma_{\parallel} = 2.8 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$
Quantum efficiency of	
converting a 0.53 $\mu$ m photon	
into an inverted site	$n_Q \approx 1$
Saturation fluence at 0.795 $\mu$ m	$E_s = 0.9 \text{ J/cm}^2$

Физические основы создания твердотельных лазерных систем

## Активные среды твердотельных лазеров

**Ti-сапфир**

Доступны АЭ до dia.35 x 150 mm



$\times 10^{-19} \text{ cm}^2$

$\times 10^{-19} \text{ cm}^2$

$\times 10^{-19} \text{ cm}^2$

$\text{J/cm}^2$

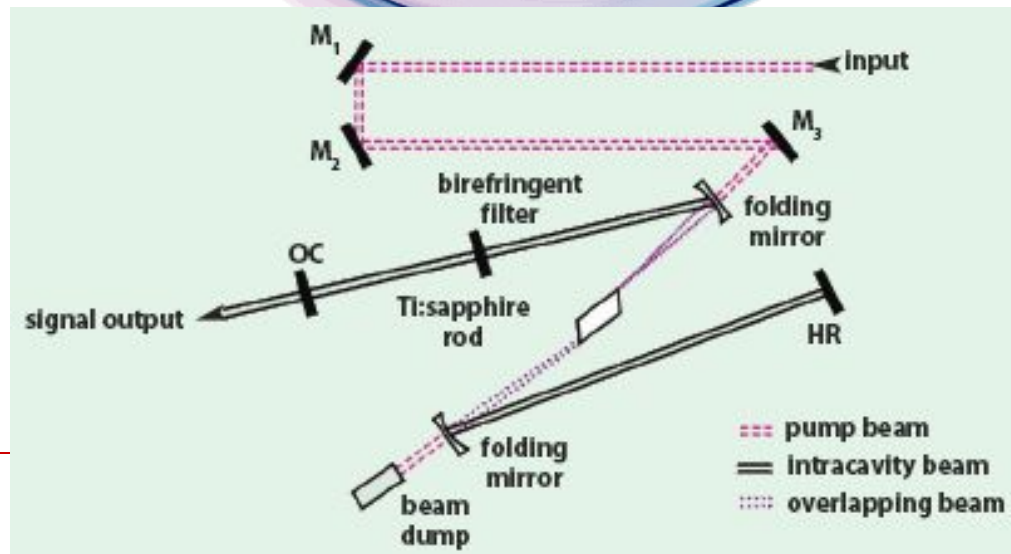
## Активные среды твердотельных систем

### Ti-сапфир

3900S CW Tunable  
Ti:Sapphire Laser

Tunable, CW output from  
675 to 1100 nm.

Pumped with either an  
argon ion laser or 532 nm  
diode-pumped solid state  
laser, the Model 3900S solid  
state Ti:Sapphire laser  
produces up to 3.5 W of  
 $TEM_{00}$ .

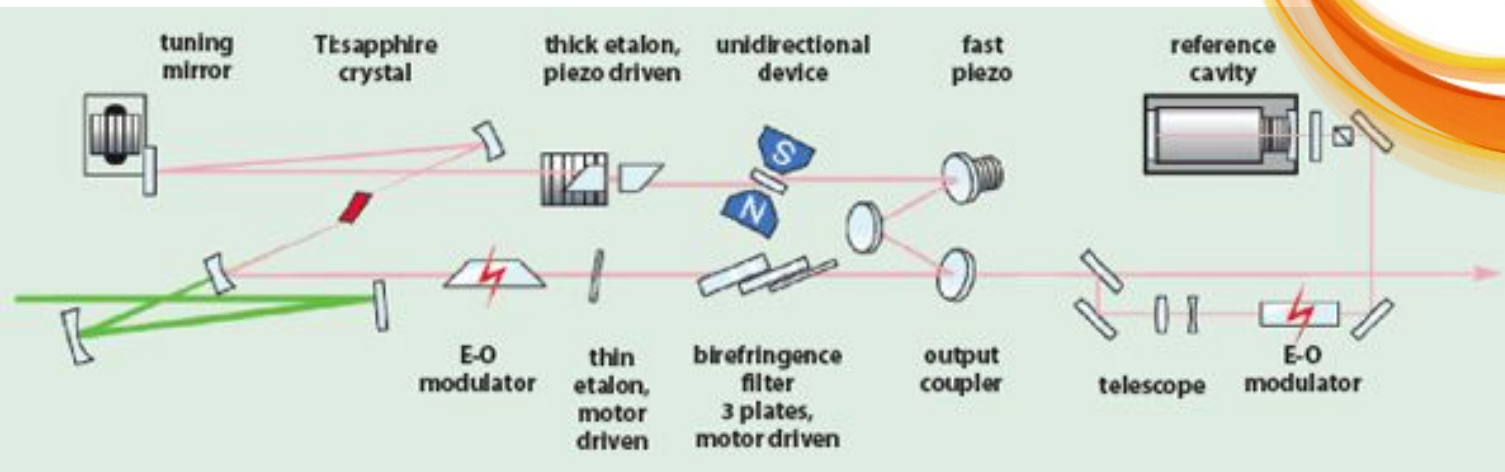
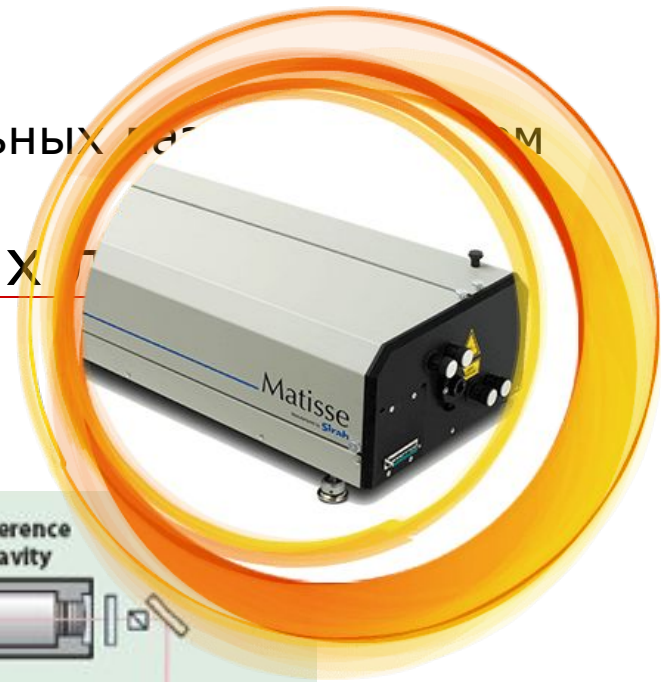




Физические основы создания твердотельных лазеров

## Активные среды твердотельных лазеров

### Ti-сапфир

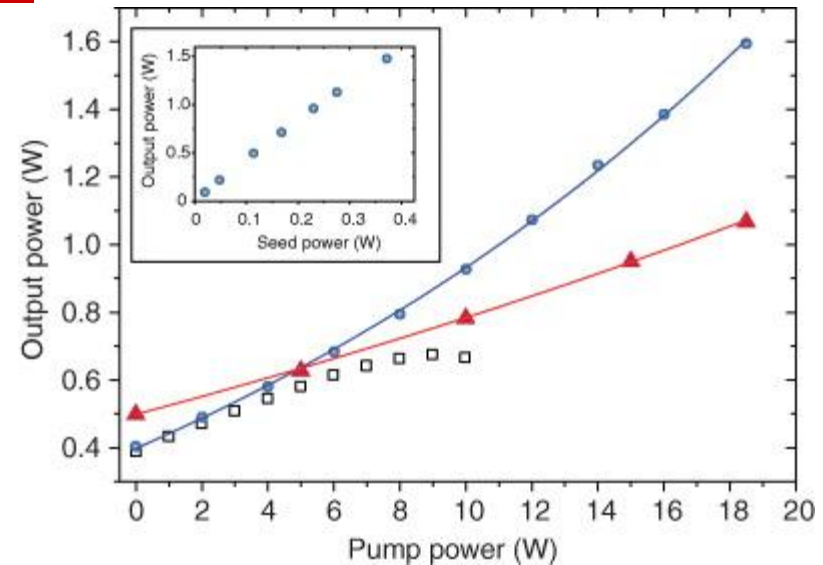
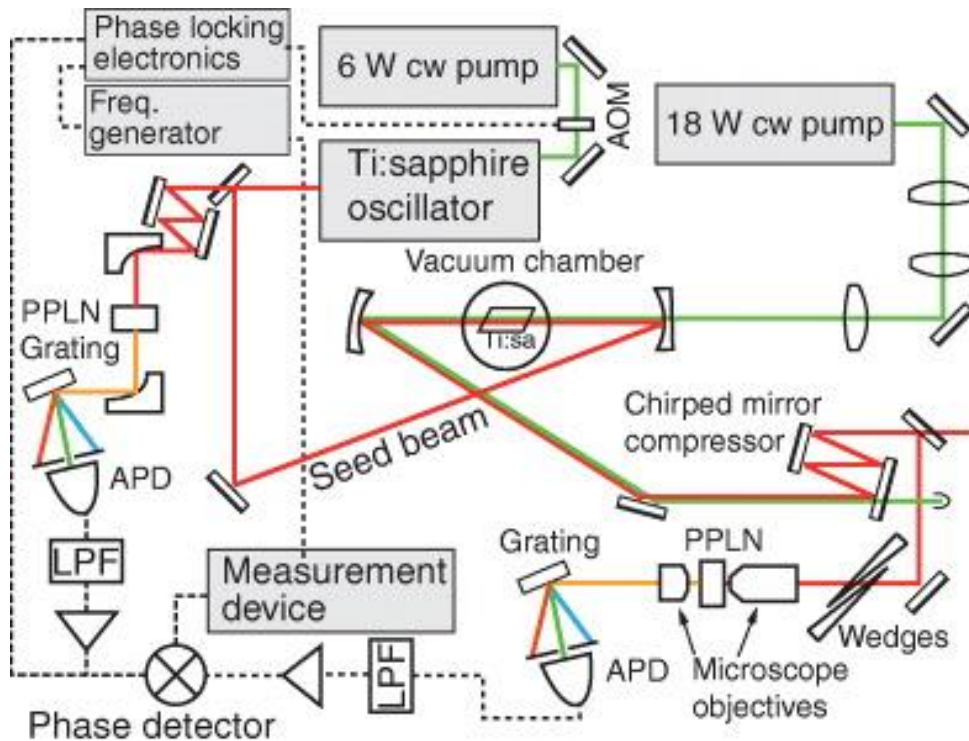


**Highest output power available >6.5 W**  
**Narrowest linewidth <30 kHz**  
**Wavelength tuning of resonator over 50 GHz**

# Физические основы создания твердотельных лазерных систем

## Активные среды твердотельных лазеров

### Ti-сапфир



Triangles: sub-7 fs pulses, circles: ~200 fs pulses.

Seed power : 500 mW (for sub-7 fs) pulses; 400 mW (for ~200 fs)

Inset: seed power for 200 fs pulses, 18.5 W of pump power.

Физические основы создания твердотел

## Активные среды твердотел

### Thulium: [что-то]



$Tm^{3+}$

Ho:Tm

Накачка ЛД GaAlAs 785 nm

Tm:YAG

Tm:YAP

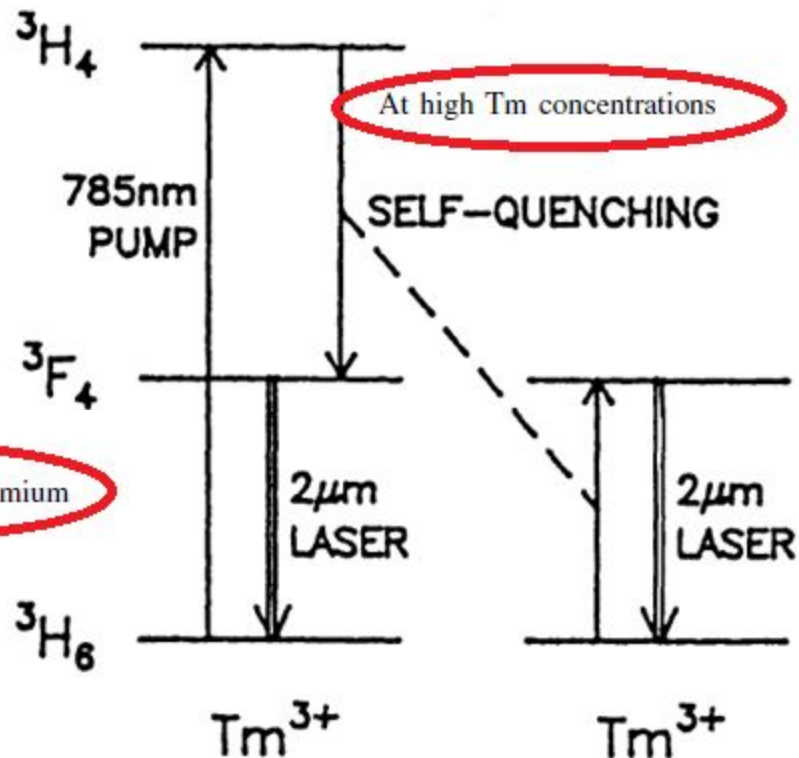
Tm:YLF

Ho:Tm:YAG

Ho:Tm:YLF

$\sim 2 \mu m$

$^5I_7$  and  $^5I_8$  levels in holmium



# Физические основы создания твердотельных лазерных систем

## Активные среды твердотельных лазеров

### Tm:YAG

Пик излучения 2.02  $\mu\text{m}$

Ширина линии люминесценции 400 nm.

Область перестройки 1.87—2.16  $\mu\text{m}$ .

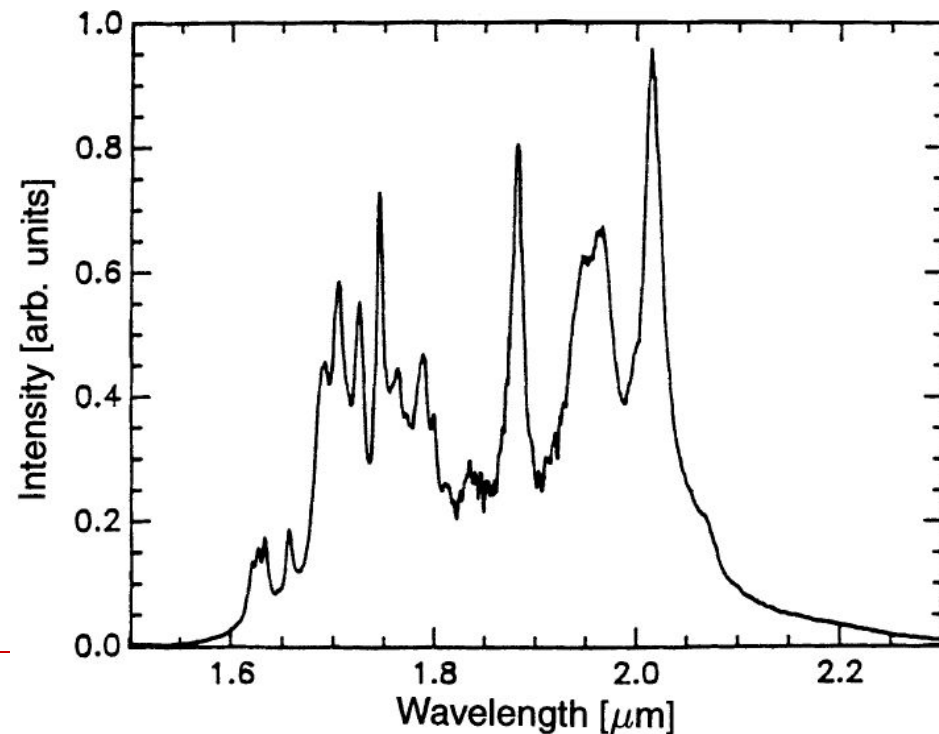
Область поглощения 785 nm

Ширина полосы поглощения 4 nm

(возможна накачка ЛД GaAlAs )

Effective cross section at 25°C  $2 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$

Fluorescence lifetime 10 ms

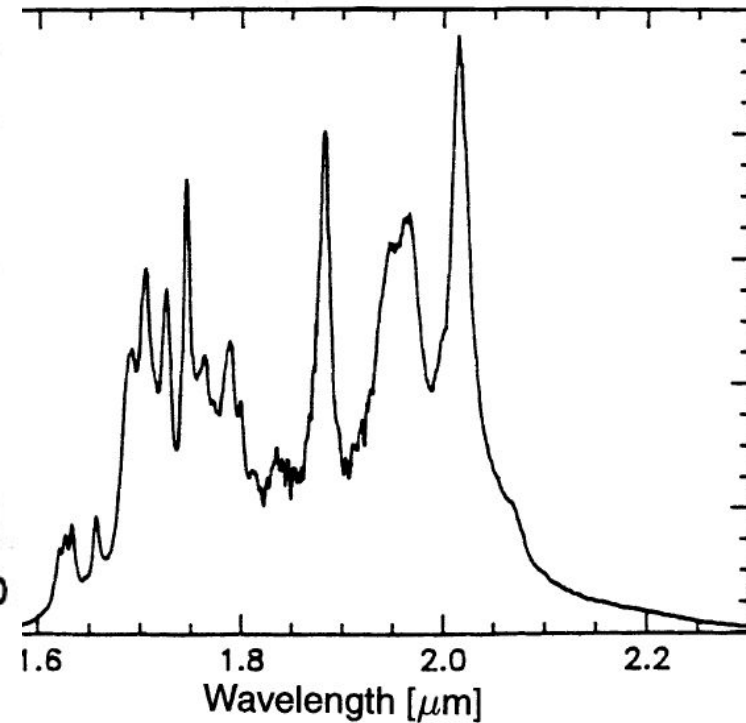
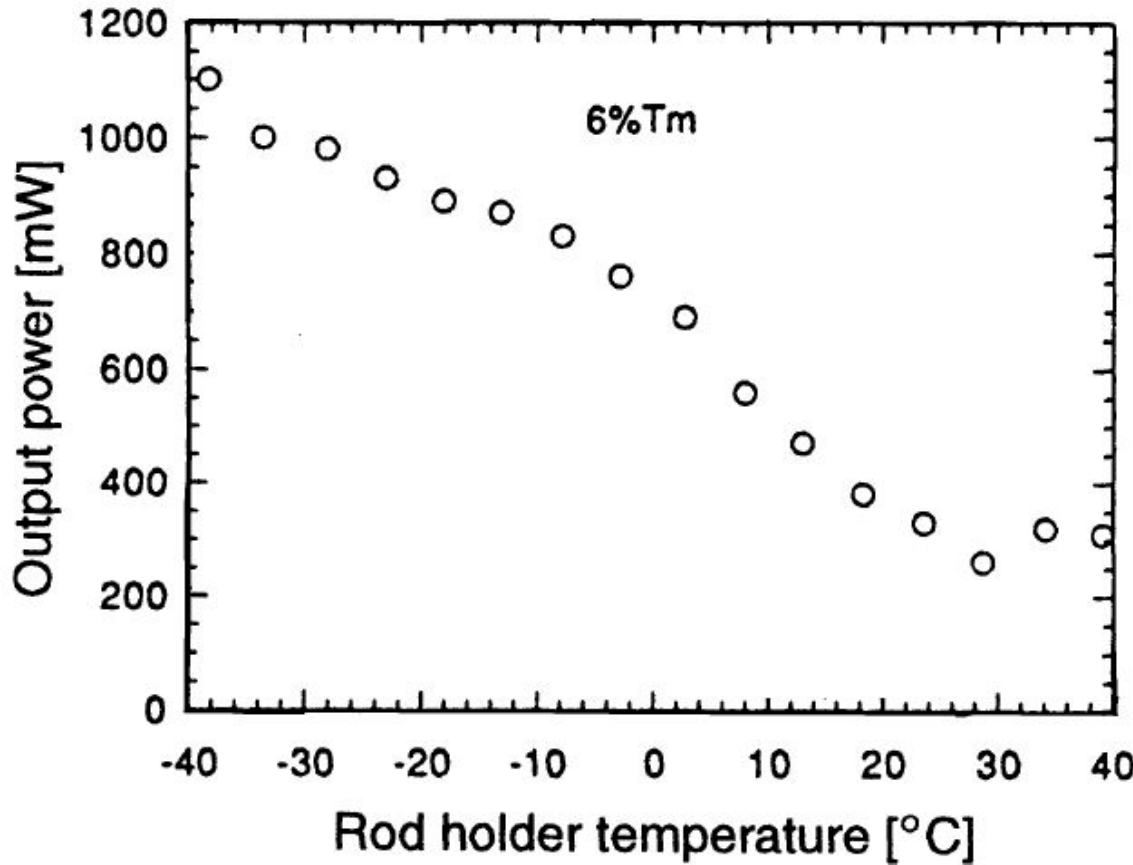




Физические основы создания твердотельных лазерных систем

## Активные среды твердотельных лазеров

### Tm:YAG

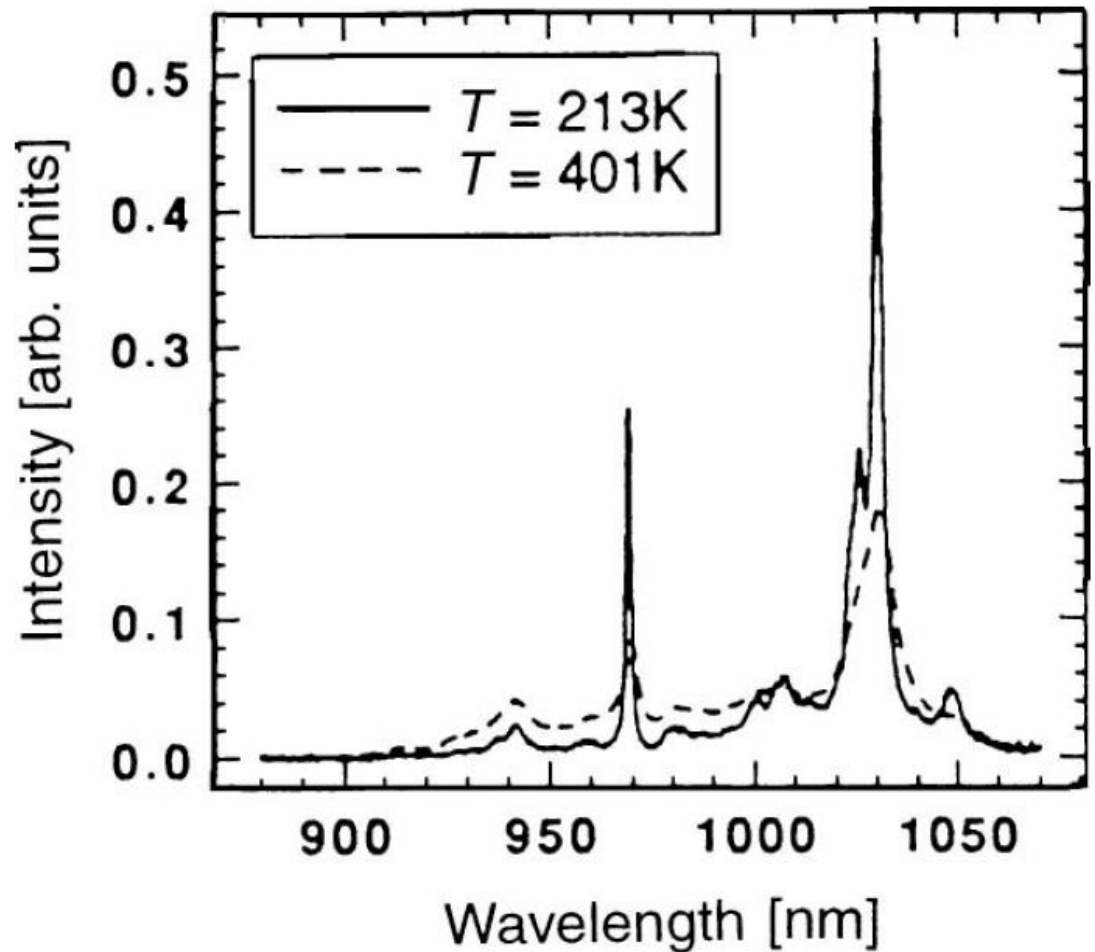


Физические основы создания твердотельных лазерных систем

## Активные среды твердотельных лазеров

---

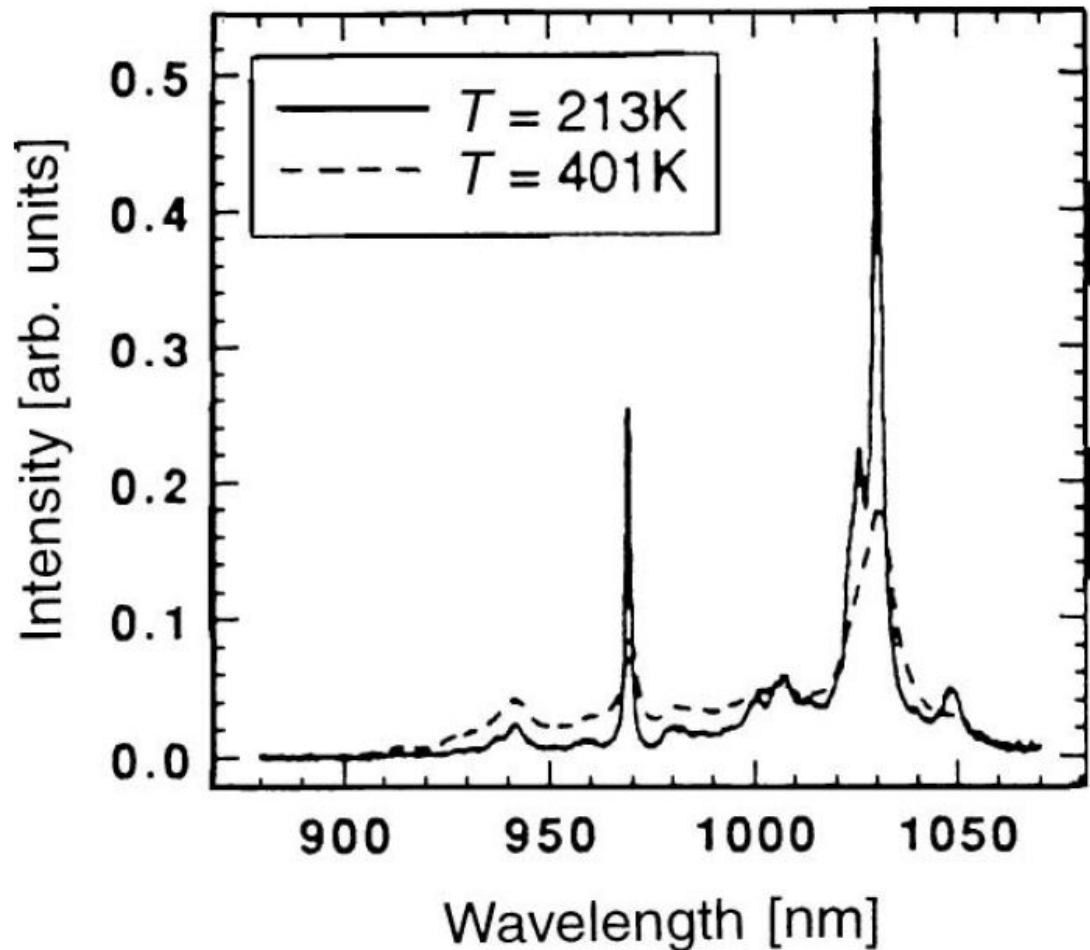
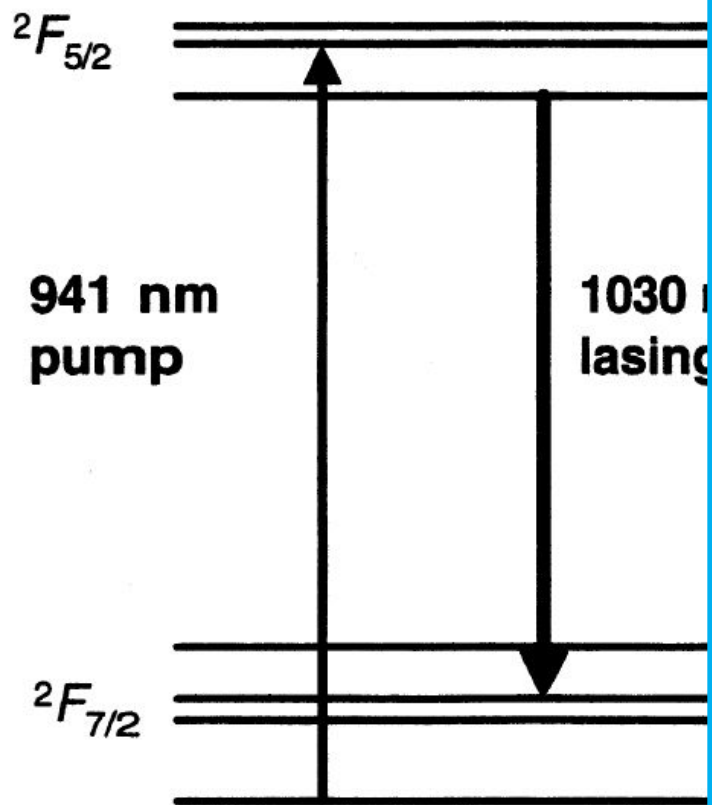
### Yb:YAG



Физические основы создания твердотельных лазеров

## Активные среды твердотельных лазеров

**Yb:YAG**



## Активные среды твердотельных лазеров

### Yb:YAG

Laser wavelength	1030 nm
Radiative lifetime at room temperature	951 $\mu$ s
Peak emission cross section	$2.1 \times 10^{-20}$ cm <sup>2</sup>
Peak absorption wavelength	941 nm
Pump bandwidth at 941 nm	18 nm
Doping density (1% at.)	$1.38 \times 10^{20}$ cm <sup>3</sup>



## Активные среды твердотельных лазеров

### Yb:YAG

Laser wavelength	1030 nm
Radiative lifetime at room temperature	951 $\mu$ s
Peak emission cross section	$2.1 \times 10^{-20}$ cm <sup>2</sup>
Peak absorption wavelength	941 nm
Pump bandwidth at 941 nm	18 nm
Doping density (1% at.)	$1.38 \times 10^{20}$ cm <sup>3</sup>

Yb:YAG 943 nm	9%	11%
Nd:YAG 808 nm	24%	32%
	Stokes shift	fract. therm.loading

## Активные среды твердотельных лазеров

### Yb:YAG

При  $T \sim 300$  К населенность нижнего уровня  $\sim 5.5\%$

Пороговая мощность накачки:  $I = f_a n_t h \nu_p / \tau_f$

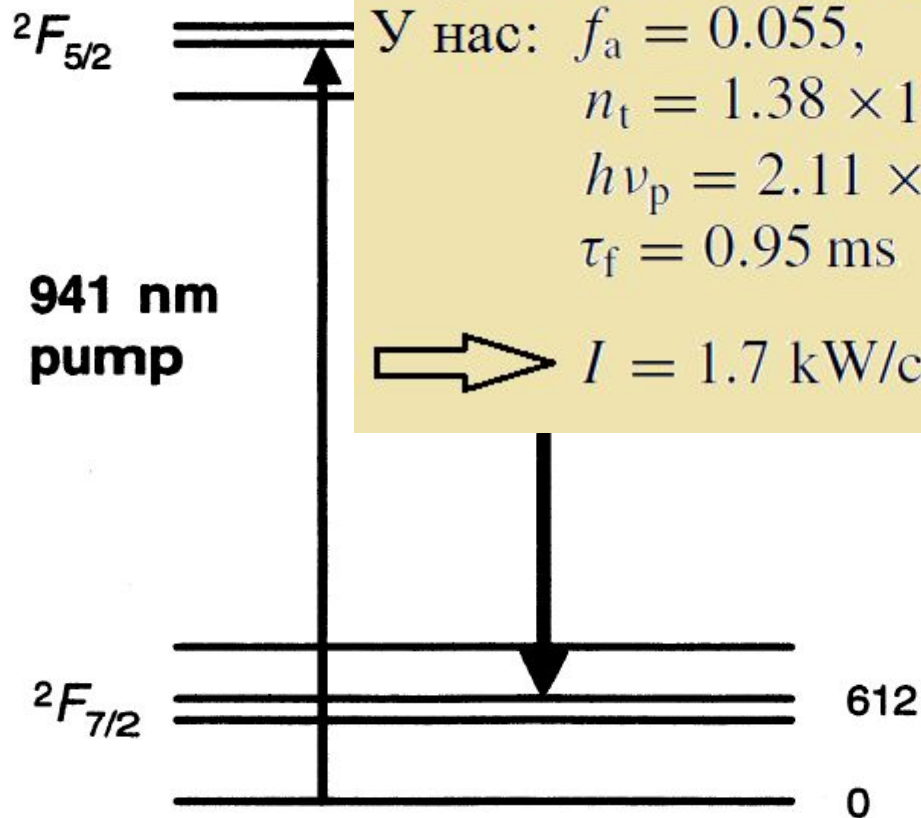
У нас:  $f_a = 0.055$ ,

$n_t = 1.38 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ , 1% doping

$h \nu_p = 2.11 \times 10^{-19} \text{ J}$ ,

$\tau_f = 0.95 \text{ ms}$

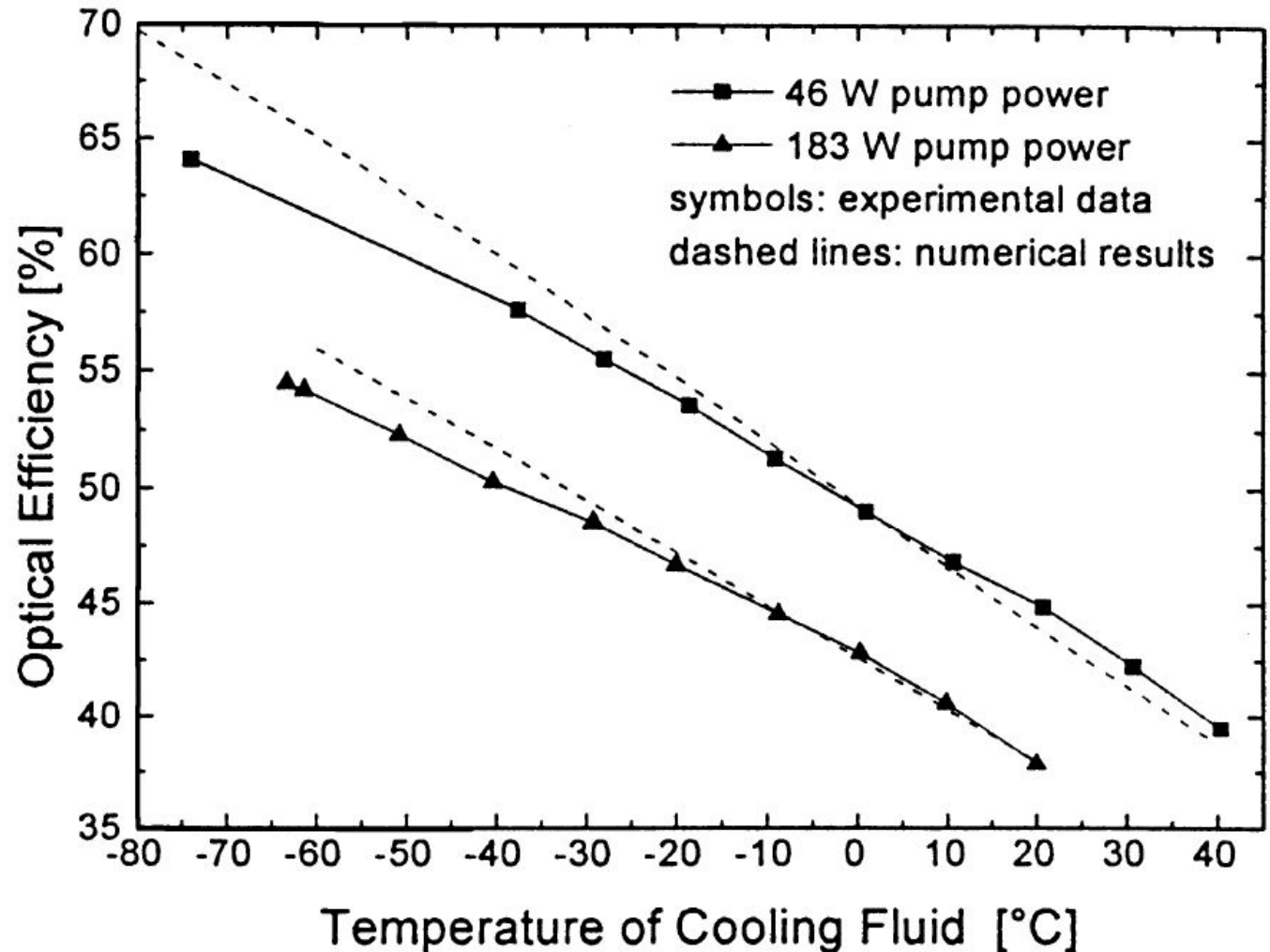
$\Rightarrow I = 1.7 \text{ kW/cm}^3$



a quasi-three level system

## Активные среды твердотельных лазеров

### Yb:YAG



## Активные среды твердотельных лазеров

**Yb:YAG**

