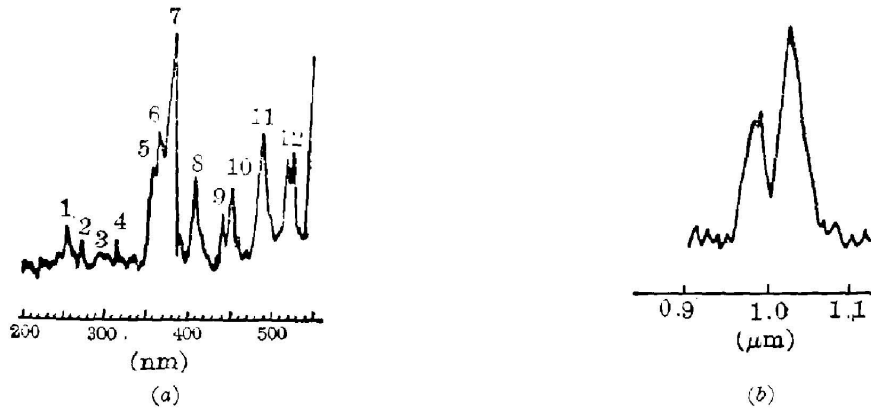
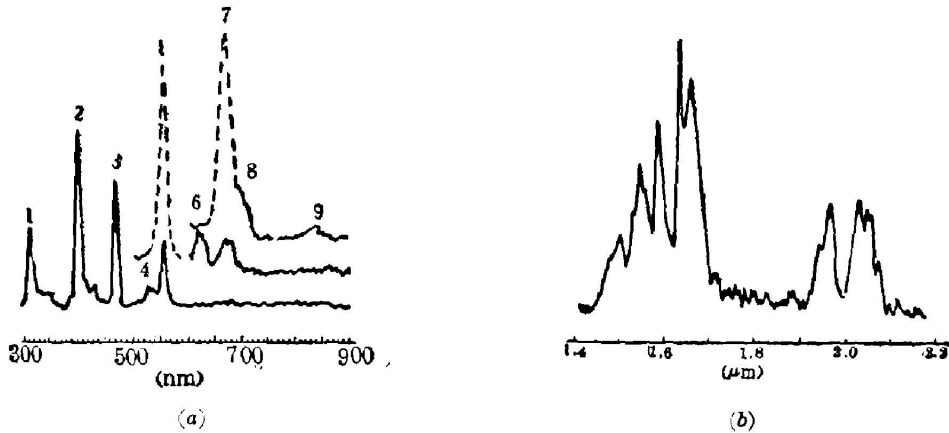




Table 1 The energy levels for  $\text{Er}^{3+}$  in  $\text{YAG}:\text{Er}^{3+}$  crystals at room temperature

Spectra term ( $S'LJ'$ )	Wave number ( $\text{cm}^{-1}$ )	Spectra term ( $S'LJ'$ )	Wave number ( $\text{cm}^{-1}$ )
$^2I_{13/2}$	43220	$^2K_{15}$	27780
$(^3D, ^2P)_{3/2}$	42840	$^4G_{9/2}$	27400
$^4D_{3/2}$	41900	$^4G_{11/2}$	26400
$^2L_{17/2}$	41420	$(^2G, ^4F, ^2H)_{9/2}$	24540
$^2I_{11/2}$	40860	$^4F_{3/2}$	22620
$^4D_{7/2}$	39040	$^4F_{5/2}$	22160
$^4D_{5/2}$	38500	$^4F_{7/2}$	20460
$(^2H, ^4G)_{9/2}$	36360	$^2H_{11/2}$	19200
$^2D_{3/2}$	34740	$^4S_{3/2}$	18380
$^4G_{7/2}$	34060	$^4F_{9/2}$	15310
$^2F_{1/2}$	33470	$^4I_{13/2}$	12320
$^4F_{5/2}$	33320	$^4I_{11/2}$	10340
$^2A_{13/2}$	33120	$^4I_{13/2}$	6740
$(^3P, ^2D, ^4F)_{3/2}$	31520	$^4I_{15/2}$	0
$^2G_{7/2}$	28060		

Fig. 2 Excitation spectra of  $\text{Er}^{3+}$  in  $\text{YAG}:\text{Er}^{3+}$  crystals at room temperatureFig. 3 Fluorescence spectra of  $\text{Er}^{3+}$  in  $\text{YAG}:\text{Er}^{3+}$  crystals at room temperature

的峰是一一对应的。

用 257 nm (<sup>4</sup>D<sub>7/2</sub>) 波长激发, 所记录的荧光光谱呈现出 <sup>2</sup>P<sub>3/2</sub>—<sup>4</sup>I<sub>15/2</sub> (320 nm); <sup>2</sup>P<sub>3/2</sub>—<sup>4</sup>I<sub>13/2</sub> (400 nm); <sup>2</sup>P<sub>3/2</sub>—<sup>4</sup>I<sub>11/2</sub> (470 nm); <sup>2</sup>P<sub>3/2</sub>—<sup>4</sup>I<sub>9/2</sub> (520 nm); <sup>2</sup>H<sub>9/2</sub>—<sup>4</sup>I<sub>13/2</sub> (560 nm); <sup>4</sup>S<sub>3/2</sub>—<sup>4</sup>I<sub>15/2</sub> (550 nm); <sup>2</sup>P<sub>3/2</sub>—<sup>4</sup>F<sub>9/2</sub> (623 nm) 及 <sup>4</sup>F<sub>9/2</sub>—<sup>4</sup>I<sub>15/2</sub> (676 nm) 等谱项跃迁(见图 3(a))。用 381 nm (<sup>4</sup>G<sub>11/2</sub>) 波长激发, 得到了比用 257 nm 波长强得多的 <sup>4</sup>S<sub>3/2</sub>—<sup>4</sup>I<sub>15/2</sub> (560 nm); <sup>4</sup>F<sub>9/2</sub>—<sup>4</sup>I<sub>15/2</sub> (676 nm) 的谱项跃迁和稍能看见的 <sup>2</sup>H<sub>9/2</sub>—<sup>4</sup>I<sub>11/2</sub> (700 nm) 较弱的谱项跃迁。加大狭缝后, 还得到了 <sup>4</sup>S<sub>3/2</sub>—<sup>4</sup>I<sub>13/2</sub> 谱项跃迁在 850 nm 的荧光光谱。我们所得到的 Er<sup>3+</sup> 在 YAG:Er<sup>3+</sup> 晶体中的吸收和发射光谱与 S. A. Pollack<sup>[4]</sup> 所研究的 Er<sup>3+</sup> 在 CaF<sub>2</sub> 基质中的吸收和发射光谱非常相似。用氩离子激光 480 nm (<sup>4</sup>F<sub>7/2</sub>) 波长(图 2(b)) 激发, 在国产 WDS-3 型 0.3m 光栅单色仪上用 PbS 光电池接收, 得到 1.0 μm 附近的 <sup>4</sup>I<sub>11/2</sub>—<sup>4</sup>I<sub>15/2</sub> 和位于 1.5 μm, 2.0 μm 处的 <sup>4</sup>I<sub>13/2</sub>—<sup>4</sup>I<sub>15/2</sub>, <sup>4</sup>F<sub>9/2</sub>—<sup>4</sup>I<sub>11/2</sub> 等谱项跃迁(图 3(b))。

## 二、YAG:Er<sup>3+</sup> 晶体中 Er<sup>3+</sup> 的光谱参数

### 1. 振子强度与 Ω<sub>λ</sub> 参数

根据 Judd-Ofelt 理论, 利用了 Er<sup>3+</sup> 的 28 个吸收光谱支项, 19 组方程, 用公式(1) 计算出 YAG:Er<sup>3+</sup> 中 Er<sup>3+</sup> 的吸收振子强度

$$P_{\text{exp}} = 4.318 \times 10^{-9} \int \epsilon(\sigma) d\sigma, \quad (1)$$

式中  $\epsilon$  为克分子消光系数,  $\sigma$  为波数。由于  $P_{\text{exp}}$  包括  $P_{\text{ed}}$  和  $P_{\text{md}}$  两部分。故  $P_{\text{exp}} = P_{\text{ed}} + P_{\text{md}}$ 。  $P_{\text{ed}}$  和  $P_{\text{md}}$  根据 Judd 与 Ofelt 理论, 其表示式如下:

$$P_{\text{ed}} = \frac{8\pi^2 m c \sigma}{3h(2J+1)} \cdot \frac{(n^2+2)^2}{9n} \sum_{\lambda=2,4,6} \Omega_{\lambda} |\langle 4f^N [\alpha SL] J \| U^{\lambda} \| 4f^N [\alpha' S' L'] J' \rangle|^2, \quad (2)$$

$$P_{\text{md}} = P_n^{[5]}. \quad (3)$$

(2) 式中  $m$  为电子质量,  $c$  为光速,  $h$  为普朗克常数,  $\langle U^{\lambda} \rangle$  为约化矩阵元, 是 W. T. Carnall<sup>[6]</sup> 文中之值, (3) 式中  $P'$  则是同一作者<sup>[5]</sup> 文中之值,  $n$  为折射率,  $\Omega_{\lambda}$  是唯像强度参数。(1)、(2)、(3) 式, 用最小二乘法拟合了 YAG:Er<sup>3+</sup> 中 Er<sup>3+</sup> 的三个  $\Omega_{\lambda}$  ( $\lambda=2, 4, 6$ ) 参数。实验振子强度与振子强度计算值两者符合得很好, 其均方根偏差仅为  $1.9 \times 10^{-7}$  (见表 2)。所得到的  $\Omega_{\lambda}$  参数为:

$$\Omega_2 = 0.19 \times 10^{-20} \text{ cm}^2; \quad \Omega_4 = 1.68 \times 10^{-20} \text{ cm}^2; \quad \Omega_6 = 0.62 \times 10^{-20} \text{ cm}^2.$$

### 2. 辐射跃迁几率与辐射寿命

YAG:Er<sup>3+</sup> 中 Er<sup>3+</sup> 的自发辐射的电偶与磁偶跃迁<sup>[2]</sup> 几率用下式计算出来

$$A_{\text{ed}} = \frac{64\pi^4 e^2 \sigma^3}{3h(2J+1)} \frac{n(n^2+2)^2}{9} \sum \Omega_{\lambda} |\langle 4f^N (\alpha SL) J \| U^{\lambda} \| 4f^N (\alpha' S' L') J' \rangle|^2, \quad (4)$$

$$A_{\text{md}} = \frac{64\pi^4 \sigma^3 n^3}{3h(2J+1)} \left| \sum_{\alpha SL, \alpha' S' L'} c(\alpha SL) c(\alpha' S' L') \langle 4f^N (\alpha SL) J \| M \| 4f^N (\alpha' S' L') J' \rangle \right|^2, \quad (5)$$

此处磁偶算符

$$M = (-e\hbar/2mc) (L+2S),$$

Table 2 Oscillator strength of Er<sup>3+</sup> in YAG:Er<sup>3+</sup> crystals

Transition	Spectra region (cm <sup>-1</sup> )	Wave number (cm <sup>-1</sup> )	Oscillator strength	
			$P_{exp} \times 10^6$	$P_{cal} \times 10^6$
<sup>4</sup> I <sub>15/2</sub> → <sup>4</sup> I <sub>13/2</sub>	7400 ~ 5800	6740	2.07	1.44
— <sup>4</sup> I <sub>11/2</sub>	10760 ~ 9660	10340	0.58	0.31
— <sup>4</sup> I <sub>9/2</sub>	13160 ~ 11360	12690	0.50	0.44
— <sup>4</sup> F <sub>9/2</sub>	16260 ~ 14540	15310	1.72	2.15
— <sup>4</sup> S <sub>3/2</sub>	18640 ~ 17780	18380	0.38	0.30
— <sup>2</sup> H <sub>11/2</sub>	19940 ~ 18620	19200	2.02	2.01
— <sup>4</sup> F <sub>7/2</sub>	21200 ~ 19920	20460	1.14	1.54
— <sup>4</sup> F <sub>5/2</sub>	22400 ~ 21500	22160	0.46	0.36
— <sup>4</sup> F <sub>3/2</sub>	22940 ~ 22400	22620	0.26	0.21
— ( <sup>2</sup> G, <sup>4</sup> F, <sup>2</sup> H) <sub>9/2</sub>	25080 ~ 23800	24540	0.47	0.50
— <sup>4</sup> G <sub>11/2</sub>	27160 ~ 25500	26400	3.50	3.52
— <sup>2</sup> K <sub>15/2</sub>	27740 ~ 27060	27400	1.05	1.57
— <sup>2</sup> G <sub>7/2</sub>	28720 ~ 27660	28060	0.84	0.60
— ( <sup>2</sup> F, <sup>2</sup> D, <sup>4</sup> F) <sub>3/2</sub>	32260 ~ 30840	31520	0.17	0.04
— <sup>2</sup> K <sub>13/2</sub>	33700 ~ 32260	33120	0.18	0.07
— <sup>4</sup> G <sub>5/2</sub>		33320		
— <sup>2</sup> P <sub>1/2</sub>		33470		
— <sup>4</sup> G <sub>7/2</sub>	34460 ~ 33700	34060	0.24	0.23
— <sup>2</sup> D <sub>5/2</sub>	35230 ~ 34460	34740	0.11	0.06
— ( <sup>2</sup> H, <sup>4</sup> G) <sub>9/2</sub>	37400 ~ 35460	36360	0.59	0.36
— <sup>4</sup> D <sub>5/2</sub>	40160 ~ 37400	38500	7.29	7.09
— <sup>4</sup> D <sub>7/2</sub>		39400		

R. M. S.

 $1.9 \times 10^{-7}$ 

在  $SLJ$  态间  $M$  的矩阵元:

当  $J' = J$  时

$$\langle f_{aSLJ}^N \| M \| f_{a'S'L'J}^N \rangle = \delta(\alpha, \alpha') \delta(S, S') \delta(L, L') \beta [(2J+1) / 4J(J+1)]^{1/2} \times [S(S+1) - L(L+1) + 3J(J+1)], \quad (6)$$

当  $J' = J-1$  时

$$\langle f_{aSLJ}^N \| M \| f_{a'S'L'J-1}^N \rangle = \delta(\alpha, \alpha') \delta(S, S') \delta(L, L') \beta \times \left\{ \frac{[(S+L+1)^2 - J^2][J^2 - [(L-S)^2]}{4J} \right\}^{1/2}, \quad (7)$$

当  $J' = J+1$  时

$$\langle f_{aSLJ}^N \| M \| f_{a'S'L'J+1}^N \rangle = \delta(\alpha, \alpha') \delta(S, S') \delta(L, L') \beta \times \frac{[(S+L+1)^2 - (J+1)^2][(J+1)^2 - (L-S)^2]}{4(J+1)}, \quad (8)$$

此处  $\beta = e\hbar/2mc$ .

计算所用居间偶合态本征矢与(4)式中的约化矩阵元采用了文献[2]表中的值, 计算结果列于表3。

用下面公式计算得到的 YAG:Er<sup>3+</sup> 中 Er<sup>3+</sup> 的辐射寿命  $\tau_{rad}^0$  与荧光分支比  $\beta$ , 结果也列于表3。

Table 3 Radiative transition probability  $A$ , radiative lifetime  $\tau_{\text{rad}}^c$ , branching ratio and oscillator strength of the radiative transitions of Er<sup>3+</sup> in YAG:Er<sup>3+</sup> at room temperature

$A$	$B$ (cm <sup>-1</sup> )	$C$		$D$ (sec <sup>-1</sup> )		$E$ (sec <sup>-1</sup> )	$F$ $\tau_{\text{rad}}$ ( $\mu\text{s}$ )	$G$ $\beta$
		$P_{\text{ed}}$	$P_{\text{md}}$	$A_{\text{ed}}$	$A_{\text{md}}$			
<sup>4</sup> I <sub>13/2</sub> — <sup>4</sup> I <sub>15/2</sub>	6740	1.01	0.67	103.12	68.68	169.16	5911.56	1
<sup>4</sup> I <sub>11/2</sub> — <sup>4</sup> I <sub>13/2</sub>	3600	0.47	0.47	13.80	13.64	126.57	7900.77	0.22
<sup>4</sup> I <sub>11/2</sub> — <sup>4</sup> I <sub>15/2</sub>	10340	0.41		99.13				0.78
<sup>4</sup> I <sub>9/2</sub> — <sup>4</sup> I <sub>11/2</sub>	2280		0.19		2.19	246.00	4065.04	0.01
<sup>4</sup> I <sub>9/2</sub> — <sup>4</sup> I <sub>13/2</sub>	5880	0.46		35.53				0.14
<sup>4</sup> I <sub>9/2</sub> — <sup>4</sup> I <sub>15/2</sub>	12620	0.58		208.28				0.85
<sup>4</sup> F <sub>9/2</sub> — <sup>4</sup> I <sub>3/2</sub>	2690	0.02	0.22	0.30	3.61	2033.77	491.70	0.002
— <sup>4</sup> I <sub>11/2</sub>	4970	0.76	0.17	42.31	9.36			0.03
— <sup>4</sup> I <sub>13/2</sub>	8570	0.52		85.91				0.04
— <sup>4</sup> I <sub>15/2</sub>	15310	3.58		1892.28				0.93
<sup>4</sup> S <sub>3/2</sub> — <sup>4</sup> I <sub>3/2</sub>	5760	0.76		57.20				
— <sup>4</sup> I <sub>11/2</sub>	8040	0.21		30.50				
— <sup>4</sup> I <sub>13/2</sub>	11640	1.19		362.32				
— <sup>4</sup> I <sub>15/2</sub>	18380	1.23		936.38				
<sup>4</sup> F <sub>11/2</sub> — <sup>4</sup> I <sub>15/2</sub>	19200	2.66		2250.83				
<sup>4</sup> F <sub>7/2</sub> — <sup>4</sup> I <sub>15/2</sub>	20460	3.07		2896.41				
<sup>4</sup> F <sub>5/2</sub> — <sup>4</sup> I <sub>15/2</sub>	22160	0.97		1071.06				
<sup>4</sup> F <sub>3/2</sub> — <sup>4</sup> I <sub>15/2</sub>	22620	0.80		919.68				
<sup>2</sup> H <sub>9/2</sub> — <sup>4</sup> F <sub>9/2</sub>	9230	0.16	0.33	29.76	62.61			
— <sup>4</sup> F <sub>7/2</sub>	11920	0.03	0.01	8.35	2.59			
— <sup>4</sup> I <sub>11/2</sub>	14200	0.70	0.12	315.70	53.91			
— <sup>4</sup> I <sub>13/2</sub>	17800	1.58		1127.85				
— <sup>4</sup> I <sub>15/2</sub>	24540	1.10		1487.80				
<sup>4</sup> G <sub>11/2</sub> — <sup>2</sup> H <sub>11/2</sub>	7200	0.38		44.65				
— <sup>4</sup> F <sub>9/2</sub>	11090	0.27	0.02	75.46	4.67			
— <sup>4</sup> I <sub>9/2</sub>	13780	0.13	0.003	56.60	1.12			
— <sup>4</sup> I <sub>11/2</sub>	16060	2.12	~0	1230.51	0.11			
— <sup>4</sup> I <sub>13/2</sub>	19660	1.92	0.07	1674.85	63.41			
— <sup>4</sup> I <sub>15/2</sub>	26400	4.72		7404.40				
<sup>2</sup> F <sub>3/2</sub> — <sup>4</sup> S <sub>3/2</sub>	13140	0.10		38.87				
— <sup>4</sup> F <sub>9/2</sub>	16210	0.74		439.21				
— <sup>4</sup> I <sub>9/2</sub>	18900	0.71		572.23				
— <sup>4</sup> I <sub>11/2</sub>	21180	2.34		2365.63				
— <sup>4</sup> I <sub>13/2</sub>	24780	1.16		1606.77				
— <sup>4</sup> I <sub>15/2</sub>	31520	0.24		537.36				
<sup>4</sup> G <sub>9/2</sub> — <sup>4</sup> I <sub>15/2</sub>	36360	0.59		1759.65				
<sup>4</sup> D <sub>5/2</sub> — <sup>2</sup> F <sub>1/2</sub>	5030	0.03		1.54				
— <sup>2</sup> H <sub>9/2</sub>	13960	0.07		29.91				
— <sup>4</sup> F <sub>3/2</sub>	15880	1.31	0.003	743.99	1.81			
— <sup>4</sup> F <sub>5/2</sub>	16340	0.45	0.001	268.49	0.48			
— <sup>4</sup> F <sub>7/2</sub>	18040	1.06	0.03	779.11	18.79			
— <sup>2</sup> H <sub>11/2</sub>	19300	0.11		92.81				
— <sup>4</sup> S <sub>3/2</sub>	20120	0.24	0.015	219.64	13.87			
— <sup>4</sup> F <sub>9/2</sub>	23190	4.75		5757.97				
— <sup>4</sup> I <sub>9/2</sub>	25880	0.32		482.06				
— <sup>4</sup> I <sub>11/2</sub>	28160	3.00		5865.83				
— <sup>4</sup> I <sub>13/2</sub>	31760	4.54		10315.26				
— <sup>4</sup> I <sub>15/2</sub>	38500	0.15		502.17				

A—Transition;

B—Wave number;

C—High O. S.;

D—Spontaneous emission rate;

E—Sum spontaneous emission rate;

F—Radiative life time;

G—Branching ratio

$$\tau_{\text{rad}} = \{\sum A[(\alpha SL)J; (\alpha' S' L')J']\}^{-1}, \quad (9)$$

$$\beta_0 = [(\alpha SL)J; (\alpha' S' L')J'] = \frac{A[(\alpha SL)J; (\alpha' S' L')J']}{\sum A[(\alpha SL)J; (\alpha' S' L')J']}. \quad (10)$$

我们又用了下面公式, 计算了各激发态的电偶和磁偶跃迁的振子强度, 结果也列于表 3 中。

$$P = \frac{mc}{8\pi^2 e^2 n^2 \sigma^2} A_0. \quad (11)$$

### 三、讨 论

我们用了质量很好的 YAG:Er<sup>3+</sup> 晶体, 作出了该晶体中 Er<sup>3+</sup> 在 0.2~2.5 μm 波段内室温下的吸收光谱与荧光光谱。用了倒数分光光度法测定的 Er<sup>3+</sup> 的定量分析结果 (Er<sup>3+</sup> 含量为 17.38%, 偏差 ±0.9%) 来计算的实验振子强度, 利用了 28 个吸收光谱支项 (19 个方程组) 拟合出 Ω<sub>λ</sub> 参数。但我们所得结果与文献 [7, 8] 作者结果有一定的差别。我们认为用 J-O 理论计算光谱强度诸参数, 有三个特别要注意的关键因素: 一是光谱支项多, 二是被测离子含量要准确, 三是晶体质量要好。在我们的工作中特别重视这三方面要求。所得的实验振子强度值与文献 [5] 中 Er<sup>3+</sup> 的结果比较符合。同时, 为了鉴别我们结果的正确性, 我们将本工作得到的 YAG:Er<sup>3+</sup> 中 Er<sup>3+</sup> 的 Ω<sub>λ</sub> 参数与文献 [1] 中 YAlO<sub>3</sub>:Er<sup>3+</sup> 的 Ω<sub>λ</sub> 参数和 YAlO<sub>3</sub>:Nd<sup>3+</sup> 中 Nd<sup>3+</sup> 的 Ω<sub>λ</sub> 参数, 以及文献 [3] 中 YAG:Nd<sup>3+</sup> 中 Nd<sup>3+</sup> 的 Ω<sub>λ</sub> 参数列于表 4 以资对比。从表 4 的数据中可以看出, Ω<sub>λ</sub> 参数与材料的结构和组成有关。我们的数据在两种基质中得到了相一致的比例关系。因此, 可认为结果是可靠的。

Table 4 Ω<sub>λ</sub> parameters of Er<sup>3+</sup>, Nd<sup>3+</sup> in YAG:Er<sup>3+</sup>; YAlO<sub>3</sub>:Er<sup>3+</sup> and YAG:Nd<sup>3+</sup>, YAlO<sub>3</sub>:Nd<sup>3+</sup> (units: 10<sup>-2</sup> cm<sup>2</sup>)

Crystal	Ω <sub>1</sub>	Ω <sub>2</sub>	Ω <sub>3</sub>	reference
YAG:Er <sup>3+</sup>	0.19	1.68	0.62	this work
YAlO <sub>3</sub> :Er <sup>3+</sup>	1.06	2.68	0.78	[1]
YAG:Nd <sup>3+</sup>	0.2	2.7	5.0	[3]
YAlO <sub>3</sub> :Nd <sup>3+</sup>	1.24	4.68	5.85	[1]

### 参 考 文 献

- [1] M. J. Weber *et al.*; *Phys. Rev. B. Solid State*, 1973, **8**, No. 1 (Jul), 47.
- [2] M. J. Weber; *Phys. Rev.*, 1967, **157**, No. 2 (May), 262.
- [3] W. F. Kruppa; *IEEE J. Q. E.*, 1971, **QE-7**, No. 4 (Apr), 153.
- [4] S. A. Pollack; *J. Chem. Phys.*, 1964, **40**, No. 10, (May), 2751.
- [5] W. T. Carnall *et al.*; *J. Chem Phys.*, 1968, **49**, No. 10 (Nov), 4412.
- [6] W. T. Carnall *et al.*; *J. Chem. Phys.*, 1968, **49**, No. 10 (Nov), 4424.
- [7] A. A. Kaminskii *et al.*; *Phys. Stat. Sol. (a)*, 1982, **71**, No. 2 (Feb), 291.
- [8] Б. М. Автипенко и др.; *Оптика и Спектроскопия*, 1978, **44**, Вып. 2 (Фев), 272.

## Spectroscopic parameters of Er<sup>3+</sup> crystals calculated by Judd-Ofelt theory

WANG QINGYUAN, ZHANG SIYUAN, WU SHIXUE, REN YING AND DONG XIANGMING  
(Changchun Institute of Applied Chemistry, Academia Sinica)

(Received 12 August 1985; revised 9 October 1985)

### Abstract

In this paper we report the results of spectroscopic intensity parameters of Er<sup>3+</sup> in YAG:Er<sup>3+</sup> single crystals. By using absorption spectra and Judd-Ofelt theory the experimental and theoretical oscillator strengths were calculated. The rms deviation is only  $1.9 \times 10^{-7}$ . Based on a least-square fit between experimental and theoretical oscillator strengths, the intensity parameters were determined. The results are  $\Omega_2 = 0.19 \times 10^{-20} \text{cm}^2$ ;  $\Omega_4 = 1.68 \times 10^{-20} \text{cm}^2$ ;  $\Omega_6 = 0.62 \times 10^{-20} \text{cm}^2$ . We then calculated probabilities of the induced electric and magnetic dipole spontaneous radiative transitions radiative lifetimes, high oscillator strengths, and branching ratios. The fluorescence spectra of Er<sup>3+</sup> in YAG:Er<sup>3+</sup> crystals were shown in the  $0.3 \mu\text{m} \sim 2.0 \mu\text{m}$  wave length range.