

Er³⁺ 离子及 ErP₅O₁₄ 晶体的光谱性质

苏 翥 王庆元 于亚勤 董向明

(中国科学院长春应用化学研究所)

摘要: 根据 ErP₅O₁₄ 的吸收和荧光光谱, 用 Judd-Ofelt 理论计算了在此晶体中 Er³⁺ 的强度参数 Ω_λ (或 τ_λ), 由此计算了激光能级辐射跃迁速率、辐射寿命、荧光分支比和积分发射截面等光谱参数。提出了在 p_{exp} 与强度参数的总和之间存在直线关系的经验公式。讨论了 ErP₅O₁₄ 作为激光材料的可能性。

Spectroscopic properties of Er³⁺ ions and ErP₅O₁₄ crystals

Su Qiang, Wang Qingyuan, Yu Yaqin, Dong Xiangming

(Changchun Institute of Applied Chemistry, Academia Sinica)

Abstract. Intensity parameters Ω_λ (or τ_λ) of Er³⁺ in crystal ErP₅O₁₄ were calculated by Judd-Ofelt theory. With these Ω_λ values, the oscillator strength, spontaneous radiative transition rate, radiative lifetime, branching ratio and integrated emission cross section were calculated. In comparison with integrated emission cross section of certain laser crystals such as YAlO₃:Er³⁺ and CaF₂:Er³⁺, the potential application of ErP₅O₁₄ as laser material was discussed.

一、引言

Er³⁺ 离子也是常用于激光晶体的稀土离子之一, ErP₅O₁₄ 近年也引起研究者的注目, 研究 ErP₅O₁₄ 晶体的光谱性质, 有助于了解它作为激光材料的可能性。

二、实验结果与讨论

将 Er₂O₃ 溶于 H₃PO₄ 中, 在金坩埚内加热生长出 ErP₅O₁₄ 晶体。折射率为 1.6049, 比重为 3.55 g/cm³。所得的吸收光谱见图 1, 激发光谱与荧光光谱见图 2。

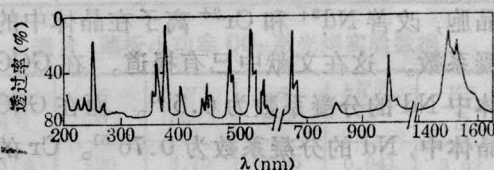
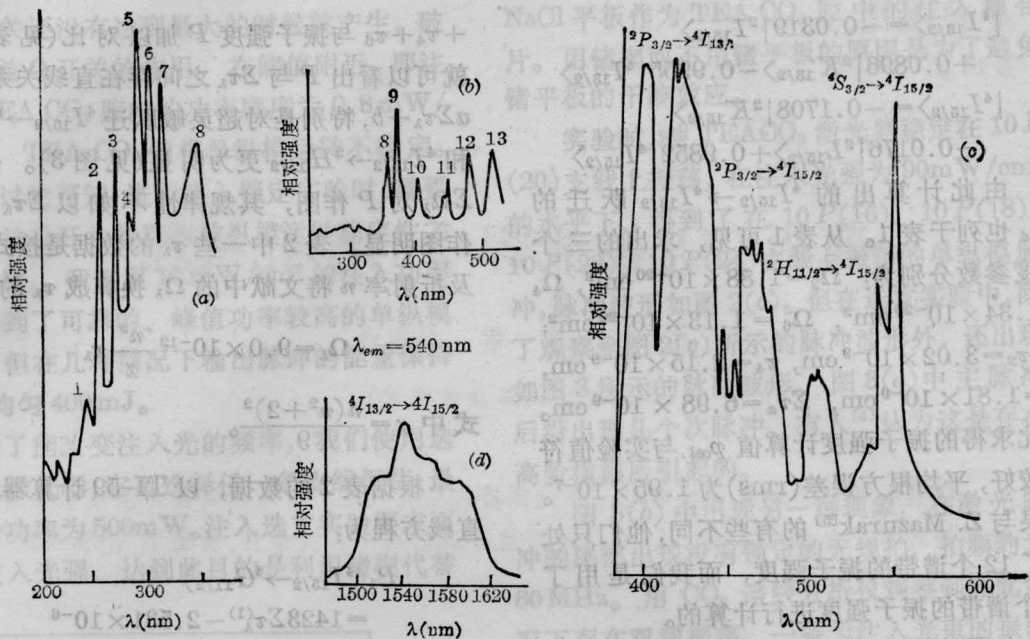


图1 ErP₅O₁₄ 晶体在室温下的吸收光谱

1. Er³⁺ 在 ErP₅O₁₄ 晶体中的吸收光谱、振子强度与强度参数

利用吸收光谱求得实验的振子强度 P_{exp} , 按 Judd-Ofelt 理论^[1,2], 用最小二乘法的计算程序从 18 个 $^4I_{15/2} \rightarrow ^{2s'+1}L'_J$ 的跃迁按公式(1)以计算机求出三个强度参数 Ω_λ 和计算的振子强度 P_{cal} (见表 1)。

收稿日期: 1985 年 8 月 5 日。



发射波长 $\lambda_{em} = 400 \text{ nm}$ $\lambda_{ex} = 255 \text{ nm}$ 激光波长 $\lambda_{ex} = 360 \text{ nm}$

图2 ErP₅O₁₄ 晶体在室温下的激发光谱(a)、(b)和荧光光谱(c)、(d)

- (1) $^4I_{15/2} \rightarrow ^2L_{17/2}$, (2) $\rightarrow ^4D_{7/2}$, (3) $\rightarrow ^4G_{9/2}$, (4) $\rightarrow ^2D_{5/2}$, (5) $\rightarrow ^2G_{5/2}$, (6) $\rightarrow ^2P_{1/2}$, (7) $\rightarrow ^2P_{3/2}$,
 (8) $\rightarrow ^2G_{7/2}$, $^2K_{15/2}$, (9) $\rightarrow ^4G_{11/2}$, (10) $\rightarrow ^2H_{9/2}$, (11) $\rightarrow ^4F_{9/2}$, $^4F_{5/2}$, (12) $\rightarrow ^4F_{7/2}$, (13) $\rightarrow ^2H_{11/2}$

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

式中 σ 是跃迁的波数 (cm^{-1}), n 是 ErP₅O₁₄ 的折射率, $\langle \| U^{(\lambda)} \rangle$ 是单位张量算符的约化矩阵元。除 $^4I_{15/2} \rightarrow ^4D_{7/2}$, $^4I_{15/2} \rightarrow ^2G_{7/2}$, $^2K_{15/2}$, $^4G_{5/2}$ 的 $\langle \| U^{(\lambda)} \rangle$ 是取自 W. T. Carnall 一文外^[3], 其余的 $\langle \| U^{(\lambda)} \rangle$ 都取自 M. J. Weber 一文^[4]。

表1中的 $^4I_{15/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ 跃迁, 除电偶极跃迁对振子强度有贡献之外, 因为此跃迁符合磁偶极跃迁的选择规则: $\Delta J = 0, \pm 1 (0 \neq 0)$, $\Delta L = 0, \Delta S = 0$, 故还考虑其磁偶极跃迁的振子强度 P_{md} 的贡献。按文献[3, 4], 磁偶极跃迁的振子强度可表示为:

$$P_{md} = \left(\frac{8\pi^2 m c}{3h e^2} \right) \times \sigma [S(\psi_J; \psi'_{J'}) / (2J+1)] \cdot n \quad (2)$$

式中的 S 是谱线强度, 可表示为:

$$S(\psi_J; \psi'_{J'}) = \left(-\frac{e}{2mc} \right)^2 \times |\langle \psi_J \| L + 2S \| \psi'_{J'} \rangle|^2 \quad (3)$$

当 $J' = J - 1$ 时

$$\langle \alpha S L J \| L + 2S \| \alpha S L J - 1 \rangle = \hbar \{ [(S+L+J+1)(S+L+1-J) \times (J+S-L)(J+L-S)] / 4J \}^{1/2} \quad (4)$$

当 $J' = J + 1$ 时

$$\langle \alpha S L J \| L + 2S \| \alpha S L J + 1 \rangle = \hbar \{ [(S+L+J+2)(S+J+1-L) \times (L+J+1-S)(S+L-J)] / \times 4(J+1) \}^{1/2} \quad (5)$$

当采用居间耦合的本征矢量时,

$$|f^N \psi_J\rangle = \sum_{\alpha, S, L} C(\alpha, S, L) |f^N \alpha S L J\rangle \quad (6)$$

Er³⁺ 的 $|^4I_{13/2}\rangle$ 和 $|^4I_{15/2}\rangle$ 可采用如下的形式^[4]:

$$\begin{aligned}
|{}^4I_{13/2}\rangle &= -0.0319|{}^2I_{13/2}\rangle \\
&+ 0.0896|{}^2K_{13/2}\rangle - 0.9955|{}^4I_{13/2}\rangle \\
|{}^4I_{15/2}\rangle &= -0.1708|{}^2K_{15/2}\rangle \\
&- 0.0176|{}^2L_{15/2}\rangle + 0.9852|{}^4I_{15/2}\rangle
\end{aligned}$$

由此计算出的 ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ 跃迁的 P_{md} 也列于表 1。从表 1 可见, 求出的三个强度参数分别为: $\Omega_2 = 1.88 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, $\Omega_4 = 1.34 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, $\Omega_6 = 1.13 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$; 或 $\tau_2 = 3.02 \times 10^{-9} \text{ cm}$, $\tau_4 = 2.15 \times 10^{-9} \text{ cm}$, $\tau_6 = 1.81 \times 10^{-9} \text{ cm}$, $\Sigma\tau_\lambda = 6.98 \times 10^{-9} \text{ cm}$ 。由此求得的振子强度计算值 P_{cal} 与实验值符合较好, 平均根方误差(rms)为 1.95×10^{-7} 。结果与 Z. Mazurak^[5] 的有些不同, 他们只处理了 12 个谱带的振子强度, 而我们是用了 18 个谱带的振子强度进行计算的。

如果连同文献已报道的其他 12 个掺 Er^{3+} 体系的强度参数 τ_λ 及其总和 $\Sigma\tau_\lambda = \tau_2$

+ $\tau_4 + \tau_6$ 与振子强度 P 加以对比(见表 2), 就可以看出 P 与 $\Sigma\tau_\lambda$ 之间存在直线关系 $P = a\Sigma\tau_\lambda + b$, 特别是对超灵敏跃迁 ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4G_{11/2}$ 和 ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^2H_{11/2}$ 更为明显(见图 3)。如以 $\Sigma\Omega_\lambda$ 对 P 作图, 其规律性不如以 $\Sigma\tau_\lambda$ 对 P 作图明显, 表 2 中一些 τ_λ 的数据是按式 (7) 及折射率 n 将文献中的 Ω_λ 换算成 τ_λ 的:

$$\Omega_\lambda = 9.0 \times 10^{-12} \frac{n^2}{\chi} \tau_\lambda \quad (7)$$

$$\text{式中 } \chi = \frac{n(n^2+2)^2}{9}$$

根据表 2 的数据, 以 TI-59 计算器求得直线方程为:

$$\begin{aligned}
P_1({}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4G_{11/2}) \\
= 1423\Sigma\tau_\lambda^{(1)} - 2.531 \times 10^{-6} \quad (8)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
P_2({}^4I_{15/2} \rightarrow {}^2H_{11/2}) \\
= 711.6\Sigma\tau_\lambda^{(2)} - 1.225 \times 10^{-6} \quad (9)
\end{aligned}$$

表 1 $\text{ErP}_5\text{O}_{14}$ 晶体中 Er^{3+} 的振子强度 P 与强度参数 τ_λ 和 Ω_λ

跃 迁	光谱范围(cm^{-1})	$\sigma(\text{cm}^{-1})$	$P_{exp} \times 10^6$	$P_{cal} \times 10^6$
${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	6160~6960	6666.6	1.97	$\begin{cases} P_{cal} = 1.21 \\ P_{md} = 0.59 \end{cases}$
$\rightarrow {}^4I_{11/2}$	7800~10580	10245	0.68	
$\rightarrow {}^4I_{9/2}$	11900~12820	12469	0.57	0.51
$\rightarrow {}^4F_{9/2}$	14900~15660	15349	1.72	0.30
$\rightarrow {}^4S_{3/2}$	18080~18680	18416	0.45	1.91
$\rightarrow {}^2H_{11/2}$	18680~19920	19249	3.66	0.46
$\rightarrow {}^4F_{7/2}$	20040~20920	20533	1.78	3.86
$\rightarrow {}^4F_{5/2}$	21880~22460	22246	0.61	1.86
$\rightarrow {}^4F_{3/2}$	22420~22820	22573	0.23	0.56
$\rightarrow {}^2H_{9/2}$	24140~25000	24600	0.60	0.32
$\rightarrow {}^4G_{11/2}$	25900~27180	26420	6.90	0.69
$\rightarrow {}^2G_{9/2}$	27040~27760	27472	1.28	6.80
$\rightarrow {}^2K_{15/2}$	27620~28020	27855	0.39	1.28
$\rightarrow {}^2G_{7/2}$	27860~28480	28050	0.41	0.37
$\rightarrow {}^4G_{9/2}$	35960~36900	36364	0.34	0.43
$\rightarrow {}^4D_{7/2}$	38160~40000	39216	4.81	0.26
$\rightarrow {}^2L_{17/2}$	40600~42560	41667	1.08	4.82
$\rightarrow {}^2I_{13/2}$	42920~44260	43478	0.41	0.56

平均根方误差(rms)

$$1.95 \times 10^{-7}$$

$$\Omega_2 = 1.88 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$$

$$\tau_2 = 3.02 \times 10^{-9} \text{ cm}$$

$$\Omega_4 = 1.34 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$$

$$\tau_4 = 2.15 \times 10^{-9} \text{ cm}$$

$$\Omega_6 = 1.13 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$$

$$\tau_6 = 1.81 \times 10^{-9} \text{ cm}$$

$$\Sigma\Omega_\lambda = 4.35 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$$

$$\Sigma\tau_\lambda = 6.98 \times 10^{-9} \text{ cm}$$

表2 在不同基质中 Er³⁺ 的振子强度 P 与强度参数 τ_λ 及其总和 $\Sigma\tau_\lambda$

序	体系	振子强度 $P \times 10^6$		强度参数 $\times 10^9 \text{cm}$					折射率 n
		$^4I_{15/2} \rightarrow ^2H_{11/2}$	$^4I_{15/2} \rightarrow ^4G_{11/2}$	τ_2	τ_4	τ_6	$\Sigma\tau_\lambda$ (J-O法)	$\Sigma\tau_\lambda$ (本法)	
1.	HClO ₄ -DClO ₄ [8]	2.57	4.87	1.59±0.22	2.26±0.36	2.38±0.18	6.23±0.76	5.27	
2.	ErPbZnGaLaF[8] 玻璃	2.78	5.805	2.49	1.83	1.93	6.25	5.74	1.611
3.	ErP ₅ O ₁₄ (本文)	3.86	6.80	3.02	2.15	1.81	6.98	6.85	1.60
4.	67ZrO ₂ ·33Y ₂ O ₃ :Er ³⁺ [9]	6.179	12.743	6.94	1.85	1.35	10.14	10.56	2.08
5.	ErCl ₃ ·6H ₂ O-CH ₃ OH[10]	5.01	10.42	4.22	4.28	1.05	10.55	8.93	$n(\text{CH}_3\text{OH})$ =1.3288
6.	ErCl ₃ ·6H ₂ O-C ₂ H ₅ OH[10]	6.59	13.53	6.76	3.42	0.86	11.04	11.14	$n(\text{C}_2\text{H}_5\text{OH})$ =1.3610
7.	ErCl ₃ ·6H ₂ O- <i>n</i> -C ₃ H ₇ OH[10]	7.30	14.79	7.58	3.42	1.02	12.02	12.08	$n(n\text{-C}_3\text{H}_7\text{OH})$ =1.3854
8.	Y ₂ O ₃ :Er ³⁺ [11]	11.03	20.55	9.51	2.51	0.99	13.01	16.72	1.915
9.	Ge-glass[12]	10.96	22.41	13.31±0.49	2.17±0.78	0.97±0.40	16.45±1.67	17.52	
10.	P-glass[12]	13.02	26.24	13.98±0.66	5.27±1.07	1.92±0.54	21.17±2.27	20.12	
11.	B-glass[12]	15.11	30.61	16.25±0.81	5.24±1.30	3.20±0.66	24.69±2.77	23.13	
12.	Te-glass[12]	17.68	—	19.29±0.37	3.38±0.46	2.31±0.20	25.48±1.03	26.57	
13.	LiNO ₃ -KNO ₃ [3]	—	36.3	21.8±1.6	2.54±2.76	1.92±1.20	26.26±5.56	27.29	

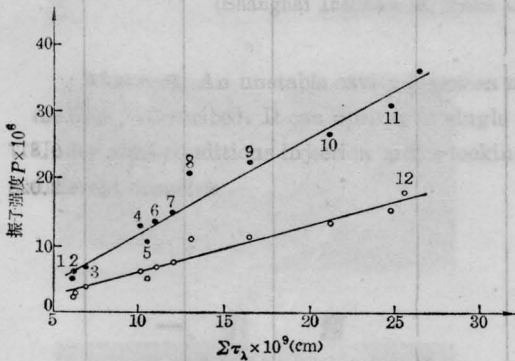


图3 Er³⁺ 离子的振子强度 P_{exp} 与强度参数的总和 $\Sigma\tau_\lambda$ 的关系(图内编号见表2)

$$\Sigma\tau_\lambda = \frac{\Sigma\tau_\lambda^{(1)} + \Sigma\tau_\lambda^{(2)}}{2} \quad (10)$$

利用实验测得的振子强度 P , 按上式可算出强度参数的总和 $\Sigma\tau_\lambda$, 与用 Judd-Ofelt 理论所得的 $\Sigma\tau_\lambda$ 符合较好(见表2)。在 Er³⁺ 离子中存在这种 P 与 $\Sigma\tau_\lambda$ 之间的直线关系 $P = a\Sigma\tau_\lambda + b$, 我们曾在 Nd³⁺[6] 和 Tm³⁺[7] 离

子中也观察到。

2. Er³⁺ 在 ErP₅O₁₄ 晶体中的自发辐射跃迁速率、辐射寿命、荧光分支比与积分发射截面

求得 Ω_λ 后, 可按(1)、(2)式和文献[4]、[13]给出的约化矩阵元 $|\langle\langle U^{(\lambda)} \rangle\rangle|^2$, 计算 J 多重激发态 $|(S', L')J'\rangle$ 和下能级 $|(S, L)J\rangle$ 之间的振子强度 P_{ed} 和 P_{md} 。利用这些 P 和 σ 可按下面的(11)、(12)、(13)式计算 $|(S', L')J'\rangle$ 和 $|(S, L)J\rangle$ 之间的自发辐射跃迁速率 A_r , 辐射寿命 τ_{rad}^0 和跃迁的荧光分支比 β_0 :

$$A_r[(S'L')J'; (\bar{S}, \bar{L})\bar{J}] = \frac{8\pi^2 e^2 n^2 \sigma^2}{mc} P \quad (11)$$

$$\tau_{rad}^0 = \left\{ \sum_{S, L, J} A_r[(S', L')J'; (\bar{S}, \bar{L})\bar{J}] \right\}^{-1} \quad (12)$$

$$\beta_0 = [(S', L')J'; (\bar{S}, \bar{L})\bar{J}]$$

表3 Er^{3+} 在 $\text{ErP}_5\text{O}_{14}$ 晶体中 $|(S', L')J'|$ 和 $|(S, L)J|$ 之间跃迁的振子强度、辐射跃迁速率、辐射寿命、荧光分支比和积分发射截面

跃迁	波数 $\sigma(\text{cm}^{-1})$	振子强度 $P \times 10^6$		跃迁速率 $A_r(\text{s}^{-1})$		ΣA_r (s^{-1})	辐射寿命 $\tau_{\text{rad}}^0(\mu\text{s})$	荧光分支比 β_c	积分发射截面 $\Sigma \times 10^{18}$ (cm)
		P_{ed}	P_{md}	$ed.$	$md.$				
${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$	6666.6	1.53	0.59	116	44.9	160.9	6215	1.00	1.98
${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	3578.4	0.70	0.49	15.4	10.7	} 159.1	6285	0.16	1.02
$\rightarrow {}^4I_{15/2}$	10245	0.74		133				0.84	
${}^4I_{9/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	2224		0.27		2.3	} 149.3	6698	0.015	0.24
$\rightarrow {}^4I_{13/2}$	5802	0.75		43				0.29	
$\rightarrow {}^4I_{15/2}$	12469	0.39		104				0.70	
${}^4F_{9/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$	2880	0.09		1.3		} 1414.3	707	0.0009	
$\rightarrow {}^4I_{11/2}$	5104	1.39		62				0.04	1.23
$\rightarrow {}^4I_{13/2}$	8682	0.46		59				0.04	
$\rightarrow {}^4I_{15/2}$	15439	3.21		1292				0.92	2.81
${}^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$	5947	0.98		59		} 1787	560	0.033	0.853
$\rightarrow {}^4I_{11/2}$	8171	0.34		38				0.021	0.2836
$\rightarrow {}^4I_{13/2}$	11749	2.03		479				0.268	1.794
$\rightarrow {}^4I_{15/2}$	18416	2.09		1211				0.68	1.851
${}^2H_{11/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$	19249	4.97		3144					
${}^4F_{7/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$	20533	3.98		2864					
${}^4F_{5/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$	22246	1.65		1393					
${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$	22573	1.35		1175					
${}^2H_{9/2} \rightarrow {}^4F_{9/2}$	9251	0.19		28.2					
$\rightarrow {}^4I_{9/2}$	12131	0.046		11.6					
$\rightarrow {}^4I_{11/2}$	14355	0.93		325					0.817
$\rightarrow {}^4I_{13/2}$	17933	2.29		1258					2.028
$\rightarrow {}^4I_{15/2}$	24600	1.23		1269					
${}^4G_{11/2} \rightarrow {}^2H_{11/2}$	7171	0.33		29					
$\rightarrow {}^4F_{9/2}$	11071	1.31		272					
$\rightarrow {}^4I_{9/2}$	13951	0.36		119					
$\rightarrow {}^4I_{11/2}$	16175	1.41		631					
$\rightarrow {}^4I_{13/2}$	19753	2.22		1481					
$\rightarrow {}^4I_{15/2}$	26420	8.87		10570					
${}^2P_{3/2} \rightarrow {}^4S_{3/2}$	13130	0.82		241					
$\rightarrow {}^4F_{9/2}$	16197	0.50		226					
$\rightarrow {}^4I_{9/2}$	19077	0.52		324					
$\rightarrow {}^4I_{11/2}$	21301	1.70		1313					
${}^2P_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	24879	1.98		2091					
$\rightarrow {}^4I_{15/2}$	31546	0.41		693					
${}^4G_{9/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$	36364	0.39		870					

表4 ErP₅O₁₄与已实现激光输出的几种掺Er³⁺晶体的一些光谱参数^[16]的比较

基 质	跃 迁	波长 λ (nm)	振子强度 P×10 ⁶	跃迁速率 A _r (s ⁻¹)	积分发射截面 Σ×10 ¹⁸ (cm)	备 注
YAlO ₃ :Er ³⁺ ErP ₅ O ₁₄	⁴ S _{3/2} → ⁴ I _{9/2}	1670	1.21	107	1.03	室温脉冲激光
			0.98	59	0.85	—
CaF ₂ :Er ³⁺ ErP ₅ O ₁₄	⁴ S _{3/2} → ⁴ I _{11/2}	1200	0.31	51.2	0.48	77K 输出激光
			0.34	38	0.28	—
CaF ₂ :Er ³⁺ ErP ₅ O ₁₄	⁴ S _{3/2} → ⁴ I _{13/2}	850	1.61	557	2.61	77K 输出激光
			2.03	479	1.79	—
Y ₃ Al ₅ O ₁₂ :Er ³⁺ ErP ₅ O ₁₄	⁴ I _{11/2} → ⁴ I _{13/2}	2750	1.29	41	1.24	室温出激光
			0.70	26.1	1.02	—
Y ₃ Al ₅ O ₁₂ :Er ³⁺ ErP ₅ O ₁₄	⁴ I _{13/2} → ⁴ I _{15/2}	1540	2.04	211	2.00	室温脉冲激光
			1.53	161	1.98	—

$$= \frac{A_r[(S', L')J'; (\bar{S}, \bar{L})J]}{\sum_{S', L', J} A_r[(S', L')J'; (\bar{S}, \bar{L})J]} \quad (13)$$

其中 $\sum_{S', L', J}$ 是对所有可能的终多重态 $|(\bar{S}, \bar{L})J\rangle$ 求和, 表示从始态辐射衰变时的总跃迁速率。计算所得的数据列于表3。

目前, Er³⁺ 约有 27 种晶体通过 11 个通道实现激光输出^[14], 在稀土离子中是激光通道最多的元素, 其中 ⁴S_{3/2}→⁴I_J 的 4 个通道全部都实现了激光输出。现已发现很多具有大的振子强度和积分发射截面 Σ (>10⁻¹⁸ cm) 的跃迁可以产生激光发射^[15], 为了与已知的实现激光输出的晶体进行对比, 将 ErP₅O₁₄ 的 11 个跃迁按(14)式计算的积分发射截面 Σ 的数据列于表3, 并与已实现激光输出的几种掺 Er³⁺ 的晶体的数据列于表4 以资比较:

$$\Sigma[(S', L')J'; (\bar{S}, \bar{L})J] = \frac{\lambda^2}{8\pi n^2 c} A_r[(S', L')J'; (\bar{S}, \bar{L})J] \quad (14)$$

从表4可见, ErP₅O₁₄ 的积分发射截面都略低于已实现激光输出的几种掺 Er³⁺ 的晶体, 但除 ⁴S_{3/2}→⁴I_{11/2} (1.2 μm) 的 Σ 小于 1×10⁻¹⁸ cm 以外, 其他 4 种跃迁的 Σ 都大于

10⁻¹⁸ cm, 因而可能实现激光输出。

参 考 文 献

- [1] B. R. Judd; *Phys. Rev.*, 1962, **127**, 750.
- [2] G. S. Ofelt; *J. Chem. Phys.*, 1962, **37**, 511.
- [3] W. T. Carnall et al.; *J. Chem. Phys.*, 1965, **42**, No. 11, 3797.
- [4] M. J. Weber; *Phys. Rev.*, 1967, **157**, No. 2, 262.
- [5] Z. Mazurak et al.; *J. Lumin.*, 1978, **17**, 401.
- [6] 苏锵, 吕玉华; 《中国稀土学报》, 1983, **1**, No. 2, 37.
- [7] 苏锵等; 《发光与显示》, 1984, **5**, No. 1, 19.
- [8] R. Reisfeld et al.; *J. Solid State Chem.*, 1982, **41**, 253.
- [9] E. Greenberg et al.; *J. Chem. Phys.*, 1982, **77**, No. 10, 4797.
- [10] B. Keller et al.; *Chem. Phys. Lett.*, 1982, **92**, No. 5, 541.
- [11] W. F. Krupke; *Phys. Rev.*, 1966, **145**, 325.
- [12] R. Reisfeld, Y. Eckstein; *J. Chem. Phys.*, 1975, **63**, No. 9, 4001; *J. Solid State Chem.*, 1972, **5**, 174; *J. Noncryst. Solids*, 1973, **11**, 261; **12**, 357; 1974, **15**, 125.
- [13] H. U. Rahman; *J. Phys. C.*, 1972, **5**, 306.
- [14] A. A. Kaminskii; *Laser Crystals: Their Physics and Properties*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, New York, 1981.
- [15] J. A. Caird; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1975, QE-11, No. 11, 874.
- [16] R. Reisfeld et al.; "The Rare Earths in Modern Sciences and Technology", Ed. by G. J. McCarthy et al.; Plenum Press, New York and London, 1979, p. 441.