

掺 Er^{3+} 离子 Mg-Al 尖晶石晶体光谱性质分析*

敬守勇^a 林理彬^b 蔡邦维^c

(^a成都精密光学工程研究中心 成都 610041)

(^b四川大学物理系 成都 610064)

(^c四川大学光电系 成都 610064)

摘要: 实验给出了掺 Er^{3+} : Mg-Al 尖晶石晶体的吸收谱、荧光谱和激发谱, 确定了 Er^{3+} 离子在 Mg-Al 尖晶石晶体中的能级位置。用 Judd-Ofelt 理论计算得到了掺 Er^{3+} : Mg-Al 尖晶石晶体的光谱特性参数。最后对该掺杂晶体出光的可能性进行了分析。

关键词: Er^{3+} 离子 Mg-Al 尖晶石晶体 光谱性质

Analysis of spectra characteristics of Er^{3+} -doped Mg-Al spinel crystal

Jing Shouyong^a, Lin Libin^b, Cai Bangwei^c

(^a Chengdu Fine Optical Engineering Centre, Chengdu 610041)

(^b Dept. of Phys., Sichuan University, ^c Dept. of Opti.-Electr., Sichuan University, Chengdu 610064)

Abstract: On the experimental basis of the absorption spectrum, excited spectrum and emission spectrum of Er^{3+} -doped Mg-Al spinel crystal, we found that there are two main absorption lines of wavelength 380nm and 522nm in its absorption spectrum, three strong fluorescence lines of 528nm, 536nm and 549nm and other fluorescence lines in green range. Based on these results, we can calculate the spectrum parameters such as resonator strength relative to energy transition, transition probabilities of self irradiation, irradiation life and integrated irradiation section. So, we can employ Er: MA spinel crystal to build a novel laser operating at green band or $1.50\mu\text{m}$.

Key words: Er^{3+} ion Mg-Al spinel crystal spectra characteristics

引 言

近年来, 为了获得比 $1.06\mu\text{m}$ 更长的红外激光, 人们将注意力集中到掺 Er^{3+} 离子晶体和玻璃的光谱特性研究上, 其主要原因是 Er^{3+} 离子的离子能级丰富, 发射波长从可见到近红外共有 9 个跃迁通道^[1]。其中, 特别是在近红外 $1.53\mu\text{m}$ 和 $2.94\mu\text{m}$ 波段的荧光对于发展光通讯和激光外科等新用途的激光器具有特别重要的意义。

到目前为止, 很多学者已对 Er^{3+} 离子在 LiNbO_3 , ZnWO_4 , $\text{Na}_5\text{Er}(\text{WO}_4)_4$ 和 YAG 等晶体及磷酸盐玻璃^[2-9]中的光谱性质进行了研究。但对具有较好的理化性能的 Mg-Al 尖晶石(简称为 MA) 中掺 Er^{3+} 的情况却未见报道。

我们将从实验测到的 Er^{3+} : Mg-Al 尖晶石晶体的吸收谱、荧光谱和激发谱^[10], 确定 Er^{3+} 离子在 MA 晶体中的能级位置, 并从吸收谱计算 Er^{3+} 离子在该晶体中部分跃迁的振子强度,

再用 Judd-Ofelt 理论公式拟合出与 Er³⁺ 离子光谱相关的 3 个晶场调节参数 $\Omega_{2,4,6}$ 的值,并计算出各谱线的光谱参数,最后分析该掺杂晶体出光的可能性。

1 实 验

1.1 样 品

实验所用掺 Er³⁺: Mg-Al 尖晶石晶体样品由本实验室用焰熔法制备,基质 Mg-Al 尖晶石晶体中 Al₂O₃ 与 MgO 的摩尔配比为 3.0(即 MgO·3Al₂O₃),掺 Er³⁺ 离子浓度(Er³⁺ 占 Al³⁺ 的摩尔百分比)为 0.2%。制备出的掺杂晶体光学质量良好,Er³⁺ 离子分布均匀,用 X 光荧光分析法测得晶体中 Er³⁺ 的实际掺入浓度 N 为 $2.0 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ 。样品从同一块晶体切下,分别加工成 10mm×10mm×15mm 的长方体和 1.7mm 厚的薄片,样品经抛光处理后供光学测试使用。

2 实验结果

2.1 吸收光谱

室温下,用 Perkin-Elmer Lambda 19 型紫外/可见/红外分光光度计测定了 MA:Er³⁺ 晶体的吸收光谱^[5](见图 1),波长范围从 200nm 到 1700nm。谱图表明,Er³⁺ 离子有两个主要吸收峰,峰值为 380nm 和 522nm,对应的跃迁激发态能级分别为⁴G_{11/2}和²H_{11/2},这两个吸收峰的强度相对其它能级的吸收峰强得多。另外,在 661nm 852nm 980nm 和 1.53 μm 处还有较弱的吸收峰,其分别对应 Er³⁺ 离子吸收能量后从基态⁴I_{15/2}向⁴F_{9/2},⁴I_{9/2},⁴I_{11/2},⁴I_{13/2}激发态的跃迁。除上面提及的吸收之外,在 1.34~1.42 μm 范围内还有一簇较强的吸收线群,这簇线群与焰熔法生长出晶体中含有的 OH⁻ 离子吸收相关^[11]。

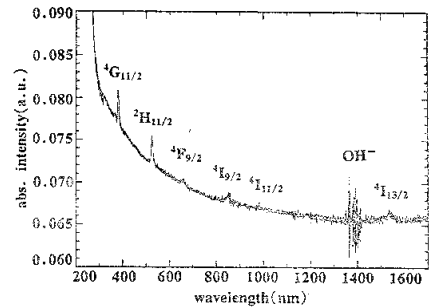


Fig.1 The absorption spectrum of MA:Er³⁺

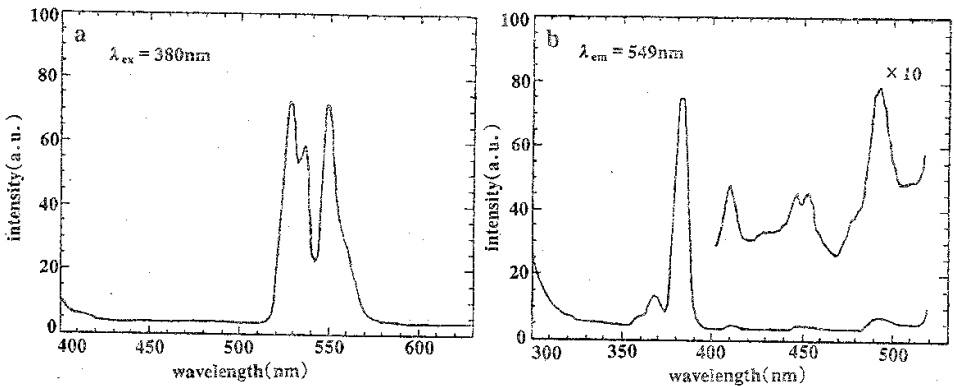


Fig.2 The spectra of MA:Er³⁺

a—fluorescence spectrum ($\lambda_{ex} = 380\text{nm}$) b—excited spectrum ($\lambda_{em} = 549\text{nm}$)

2.2 荧光光谱和激发光谱

在室温下,用 Hitachi 850 型荧光光谱仪测定 MA:Er³⁺ 单晶体的激发光谱和荧光谱^[5]。

用 380nm 波长的光激发晶体时,在绿光波段有 3 个很强的荧光发射:峰值波长为 528nm,536nm 和 549nm,如图 2a。另外,在波长 690nm 处还有一个荧光峰,此峰为 Cr^{3+} 离子的荧光发射,因为:

(1)此荧光峰在非掺 Er^{3+} 离子的 MA 晶体中已同样被观察到;(2)此峰的激发光谱与已报道的掺 Cr^{3+} 离子 MA 晶体的激发光谱一致^[12,13]。分别选择 528nm,536nm 和 549nm 作为荧光发射波长,测得相同的激发谱,如图 2b 所示。其主要激发峰为 360nm,368nm,380nm,410nm,447nm,454nm 和 490nm。综合分析掺 Er^{3+} 离子晶体的文献及自由 Er^{3+} 离子能级图^[14],这些激发峰应分别与 Er^{3+} 离子从基态向激发态 ${}^2\text{K}_{15/2}$, ${}^2\text{G}_{9/2}$, ${}^4\text{G}_{11/2}$, ${}^2\text{H}_{9/2}$, ${}^4\text{F}_{3/2}$, ${}^4\text{F}_{5/2}$ 和 ${}^4\text{F}_{7/2}$ 的跃迁相对应。由此并结合吸收谱数据,可以得到 MA: Er^{3+} 晶体中 Er^{3+} 离子的能级(见表 1)。

Table 1 The energy levels of Er^{3+} ions in MA: Er^{3+} crystal

terms/ S', L', J'	wavelength(λ nm)	wavenumber(cm^{-1})
${}^2\text{K}_{15/2}$	360	27777.8
${}^2\text{G}_{9/2}$	368	27173.9
${}^4\text{G}_{11/2}$	380	26315.8
${}^2\text{H}_{9/2}$	410	24390.2
${}^4\text{F}_{3/2}$	447	22371.4
${}^4\text{F}_{5/2}$	454	22026.4
${}^4\text{F}_{7/2}$	490	20408.2
${}^2\text{H}_{11/2}$	526	18939.4
${}^4\text{S}_{3/2}$	536	18656.7
${}^4\text{F}_{9/2}$	661	15128.4
${}^4\text{I}_{9/2}$	852	11737.1
${}^4\text{I}_{11/2}$	980	10204.1
${}^4\text{I}_{13/2}$	1530	6535.9

3 MA: Er^{3+} 晶体光谱参数计算

3.1 光谱跃迁振子强度

根据吸收谱上的几个较强吸收峰的吸收系数值,可以由下式计算出对应跃迁的吸收振子强度 P ^[15,16],结果列于表 2 中。

$$P = [mc^2 / (\pi e^2 N \bar{\lambda}^2)] \int K(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

式中, m , e 分别为电子的质量和电荷, c 为光速, N 为晶体中 Er^{3+} 离子的浓度,用 X 射线荧光分析法实测出 $N = 2.0 \times 10^{18} / \text{cm}^3$, $\bar{\lambda}$ 为谱线中心波长, $K(\lambda)$ 为波长 λ 处的吸收系数。积分分别对每一谱线进行, $\int K(\lambda) d\lambda = [1 / (0.4343 L)] \int D(\lambda) d\lambda$ ^[17], $D(\lambda)$ 是吸收光谱光学密度 (Abs), L 为样品厚度,实验中样品厚度为 1.7mm。

Table 2 Absorption transitions and oscillator strength of Er^{3+} in MA: Er^{3+} crystal

transition	wavenumber(cm^{-1})	$\int D(\lambda) d\lambda$ (nm)	$P_{\text{exp}} (\times 10^{-6})$	$P_{\text{cal}} (\times 10^{-6})$
${}^4\text{I}_{15/2} \sim {}^4\text{G}_{11/2}$	26150	0.03168	16.6	16.1
${}^4\text{I}_{15/2} \sim {}^2\text{H}_{11/2}$	18997	0.03072	8.50	9.00
${}^4\text{I}_{15/2} \sim {}^4\text{F}_{9/2}$	15129	0.01944	3.46	3.45
${}^4\text{I}_{15/2} \sim {}^4\text{I}_{9/2}$	11737	0.00584	0.62	0.61
${}^4\text{I}_{15/2} \sim {}^4\text{I}_{13/2}$	6536	0.04516	1.48	1.48

$$\Omega_2 = 4.24 \times 10^{-20} \text{cm}^2, \Omega_4 = 3.27 \times 10^{-20} \text{cm}^2, \Omega_6 = 0.53 \times 10^{-20} \text{cm}^2, \text{RMS} = 3.2 \times 10^{-7}$$

3.2 MA:Er³⁺ 晶体光谱参数计算

据 Judd-Ofelt 理论^[18,19] 4f^N 电子组态的 SLJ 能级到 S'L'J' 能级的振子强度为:

$$P_{ed} = \frac{8\pi^2 mc}{3h\lambda(2J+1)} \frac{(n^2+2)^2}{9n} S_{JJ'} \quad (2)$$

式中, n 为基质晶体的折射率, 对 MA 折射率 n 取 1.742。谱线强度可表为

$$S_{JJ'} = \sum_{\lambda=2,4,6} \Omega_\lambda | f^N \psi, J || U^{(\lambda)} || f^N \psi', J' |^2 \quad (3)$$

式中 3 个参数 Ω_λ 与 J 无关, 只含晶场参数, 因此, 可以作为光谱计算中不同基质晶体的可调节参量; $f^N \psi, J || U^{(\lambda)} || f^N \psi', J'$ 为单位张量算符的约化矩阵元, 对于 Er³⁺ 离子的这个矩阵元, 可由文献 [15-20] 中查到。

由计算出的几个吸收振子强度 P_{exp} 及 (2) 式和 (3) 式, 用最小二乘法拟合出光谱得晶场调节参数 $\Omega_2 = 4.24 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, $\Omega_4 = 3.27 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, $\Omega_6 = 0.53 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ 。由此晶场调节参数 $\Omega_{2,4,6}$ 得到的振子强度的计算值 P_{cal} 与实验值 P_{exp} 符合较好, 均方根偏差为 3.2×10^{-7} (见表 2)。

对于 Russel-Saunders 耦合中满足选择定则 $\Delta\alpha = \Delta S = \Delta L = 0$, $\Delta J = 0, \pm 1$ ($0 \leftarrow / \rightarrow 0$) 的磁偶极跃迁振子强度 P_{md} 由下式确定^[15,21,22]

$$P_{md} = \frac{8\pi^2 mcn}{3he^2\lambda(2J+1)} R_{JJ'} \quad (4)$$

$$R_{JJ'} = \left| \sum_{\alpha, S, L} \alpha(\alpha S L) \alpha(\alpha' S' L') \psi J || \vec{M} || \psi' J' \right|^2 \quad (5)$$

式中, 磁偶算符 $\vec{M} = -e(\vec{L} + 2\vec{S})(2mc)$ (6)

式中, Er³⁺ 的居间耦合系数 $\alpha(\alpha S L)$ 和 $\alpha(\alpha' S' L')$ 可由文献 [23] 查到。

由前面求出的 3 个参数 Ω_λ ($\lambda = 2, 4, 6$) 并根据 (2)~(6) 式以及下面的 (7)~(12) 式, 可以计算出各激发态之间跃迁及激发态和基态之间跃迁时的荧光谱线振子强度 P_{em} 、自发辐射跃迁几率 A_r 、某激发态能级辐射跃迁总几率 $\sum A_r$ 、辐射寿命 τ_{rad} 、荧光分支比 β 和积分发射截面 Σ 。这些计算结果列于表 3 中。

辐射几率: $P_{em} = P_{ed} + P_{md}$ (7)

$$A_r = 8\pi^2 e^2 n^2 P_{em} / (mc\lambda^2) \quad (8)$$

总辐射几率: $\sum A_r = \sum_{S, L, J} A_r$ (9)

荧光寿命: $\tau_{rad} = 1 / \sum A_r$ (10)

分支比: $\beta = A_r / \sum A_r$ (11)

积分发射截面:

$$\Sigma = \frac{\lambda^2}{8\pi n^2 c} A_r = \frac{\lambda^2}{8\pi n^2 c} \frac{8\pi^2 e^2 n^2}{m c \lambda^2} P_{em} = \frac{\pi e^2}{m c^2} P_{em} = 8.84 \times 10^{-13} P_{em} (\text{cm}) \quad (12)$$

Table 3 The optical spectrum characteristic of Er^{3+} ions in $\text{MA}:\text{Er}^{3+}$

transition	wave-number (cm^{-1})	$P_{\text{em}} (\times 10^{-6})$		$A (\text{sec}^{-1})$		$\sum A_r$ (s^{-1})	τ_{rad} (ms)	β	\sum ($\times 10^{-18} \text{cm}$)
		P_{ed}	P_{md}	A_{ed}	A_{md}				
${}^4\text{I}_{13/2} \sim {}^4\text{I}_{15/2}$	6536	1.00	0.60	85.0	51.2	136.2	7.3	1.000	1.41
${}^4\text{I}_{11/2} \sim {}^4\text{I}_{15/2}$	10204	0.47		98.0		124.2	8.1	0.7890	0.42
${}^4\text{I}_{13/2}$	3668	0.53	0.45	14.2	12.0			0.2110	0.87
${}^4\text{I}_{9/2} \sim {}^4\text{I}_{15/2}$	11737	0.97		266.1		284.5	3.5	0.9353	0.86
${}^4\text{I}_{13/2}$	5201	0.33		17.8				0.0626	0.29
${}^4\text{I}_{11/2}$	1533		0.12		0.6			0.0021	0.11
${}^4\text{F}_{9/2} \sim {}^4\text{I}_{15/2}$	15129	5.48		2496.9		2683.1	0.37	0.9306	4.84
${}^4\text{I}_{13/2}$	8593	0.90		131.5				0.0490	0.80
${}^4\text{I}_{11/2}$	4925	0.84	0.16	40.3	7.6			0.0179	0.88
${}^4\text{I}_{9/2}$	3392	0.04	0.26	0.9	5.9			0.0025	0.27
${}^4\text{S}_{3/2} \sim {}^4\text{I}_{15/2}$	18657	0.98		676.6		1093.9	0.91	0.6185	0.87
${}^4\text{I}_{13/2}$	12121	0.97		282.7				0.2584	0.86
${}^4\text{I}_{11/2}$	8453	0.20		28.0				0.0256	0.18
${}^4\text{I}_{9/2}$	6920	1.12		106.6				0.0974	0.99
${}^2\text{H}_{11/2} \sim {}^4\text{I}_{15/2}$	18997	12.00		8610.2		8700.9	0.11	0.9896	10.61
${}^4\text{I}_{13/2}$	12461		0.26		79.4			0.0091	0.23
${}^4\text{I}_{11/2}$	8793		0.07		10.0			0.0011	0.06
${}^4\text{I}_{9/2}$	7260		0.01		1.1			0.0001	0.01
${}^4\text{F}_{9/2}$	3868		0.01		0.2			~ 0	0.01
${}^4\text{F}_{7/2} \sim {}^4\text{I}_{15/2}$	20408	3.59		2669.5		2669.5	0.37	1.0000	3.17
${}^4\text{F}_{5/2} \sim {}^4\text{I}_{15/2}$	22026	0.75		726.7		726.7	1.4	1.0000	0.66
${}^4\text{F}_{3/2} \sim {}^4\text{I}_{15/2}$	22371	0.62		614.7		614.7	1.6	1.0000	0.55
${}^2\text{H}_{9/2} \sim {}^4\text{I}_{15/2}$	24390	1.46		1723.3		3886.4	0.26	0.4434	1.29
${}^4\text{I}_{13/2}$	17854	1.98		1254.7				0.3228	1.75
${}^4\text{I}_{11/2}$	14186	1.81	0.11	723.9	44.6			0.1977	1.70
${}^4\text{I}_{9/2}$	12653	0.11	0.00	34.9	1.5			0.0094	0.10
${}^4\text{F}_{9/2}$	9262	0.28	0.32	47.0	54.0			0.0260	0.53
${}^2\text{H}_{11/2}$	5393		0.02		1.4			0.0004	0.02
${}^4\text{F}_{7/2}$	3982		0.04		1.1	0.0003	0.04		
${}^4\text{G}_{11/2} \sim {}^4\text{I}_{15/2}$	26150	21.42		29108.5		35279.2	0.028	0.8251	18.94
${}^4\text{I}_{13/2}$	19615	4.04	0.07	3089.1	53.9			0.0891	3.63
${}^4\text{I}_{11/2}$	15947	3.73	0.00	1884.1	0.1			0.0534	3.30
${}^4\text{I}_{9/2}$	14414	0.70	0.00	288.8	1.1			0.0082	0.62
${}^4\text{F}_{9/2}$	11022	3.20	0.02	772.6	3.8			0.0220	2.85
${}^2\text{H}_{11/2}$	7154	0.60	0.15	61.3	15.4			0.0022	0.66
${}^2\text{H}_{9/2}$	1760		0.03		0.2			~ 0	0.03

4 结果分析

(1) 通过实验我们得到了 Er³⁺ 离子在 Er³⁺ : MA 晶体中的能级数据 , 观察到了 Er³⁺ 离子在绿光波段的荧光发射。

(2) 利用吸收谱、激发谱和荧光谱数据 , 采用 Judd-Ofelt 理论计算得到了在 Er³⁺ : MA 晶体中的 Er³⁺ 离子各能级间跃迁的各项光谱参数。

(3) 文献分析表明 , Er³⁺ 离子是稀土离子中激光通道最多的离子。据估计 , 有近 30 种掺 Er³⁺ 离子的晶体和玻璃的近 10 个通道可产生激光输出^[1]。文献 24 指出 , 具有大的振子强度和积分发射截面 $\sigma (> 10^{-18} \text{ cm}^2)$ 的跃迁有可能获得激光输出。从表 3 可以看出 , 在 Er³⁺ : MA 晶体中共有 9 个通道的积分发射截面大于 $1.50 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$, 它们是 $^4F_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ (661nm) , $^4H_{11/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ (528nm) , $^4F_{7/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ (490nm) , $^2H_{9/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ (549nm) , $^2H_{9/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ (705nm) , $^4G_{11/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ (382nm) , $^4G_{11/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ (510nm) , $^4G_{11/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ (627nm) 和 $^4G_{11/2} \rightarrow ^4F_{9/2}$ (907nm) , 其中 $^2H_{9/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ 是 Er³⁺ : MA 晶体最值得注意的荧光发射跃迁之一。因为在 380nm 附近紫外光激发下 , 经 $^4I_{15/2} \rightarrow ^4G_{11/2}$ 跃迁到达 $^4G_{11/2}$ 能级的电子能很快弛豫到 $^2H_{9/2}$ 能级 , 随后完成 $^2H_{9/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ 跃迁并发出 549nm 的绿色荧光。据前面计算结果 , $^2H_{9/2}$ 比 $^2G_{11/2}$ 的能级寿命长约 90 倍 , 文献 15 也报道 Er³⁺ 在 LaF₃ 晶体中 $^2H_{9/2}$ 能级的实测寿命比 $^2G_{11/2}$ 的长 30 倍 , 因此 , $^2H_{9/2}$ 可以作为 $^4I_{15/2}$, $^4I_{13/2}$, $^2H_{9/2}$ 和 $^4G_{11/2}$ 四能级系统的亚稳态能级。

(4) 为进一步评价 Er³⁺ : MA 晶体的激光性能 , 特别将上述计算得到的主要光谱参数与已实现激光输出的几种有代表性的掺钕晶体相应参数相比较^[25] , 见表 4。在进行比较的几组跃

Table 4 Comparison of parameters of Er: MA with those of some other laser crystals

crystal	J→J'	wavelength (μm)	oscillator strength ($P_{em} \times 10^{-6}$)	transition probability (A_r, s^{-1})	integrated cross section emission ($\sum \times 10^{-18} \text{ cm}^2$)	remark
YalO ₃ : Er	$^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$	1.67	1.21	107	1.03	pulsed lasing at room temperature
MA: Er		1.65	1.12	106.6	0.99	---
CaF ₂ : Er	$^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$	1.23	0.31	51.2	0.48	lasing output at 77K
MA: Er		1.21	0.20	28.0	0.18	---
Y ₃ Al ₅ O ₁₂ : Er	$^4I_{11/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$	2.75	1.29	41	1.24	lasing at room temperature
MA: Er		2.73	0.98	26.2	0.87	---
Y ₃ Al ₅ O ₁₂ : Er	$^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$	1.54	2.04	221	2.00	pulsed lasing at room temperature
MA: Er		1.53	1.60	136.2	1.41	---
BaY ₂ F ₈ : Er	$^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$	0.55	1.85	960	1.63	lasing output at 77K
MA: Er		0.54	0.98	676.6	0.87	---
BaY ₂ F ₈ : Er	$^2H_{9/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$	0.56	0.80	881	0.71	lasing output at 77K
MA: 函方数据		0.55	1.98	1254.7	1.75	---

迁中 $^2 H_{9/2} \rightarrow ^4 I_{13/2}$ 和 $^4 I_{13/2} \rightarrow ^4 I_{15/2}$ 两组跃迁的积分截面比较大,因此,它们是 $Er^{3+} : MA$ 晶体中最有希望被利用(实现激光输出)的两组跃迁。并且它们的发射波长分别在绿光波段和光通信关注的 $1.50\mu m$ 附近的近红外波段,因此,也是目前引人注目的激光输出波长。

(5) 通过以上分析知道,在 $Er^{3+} : MA$ 晶体的所有跃迁中 $^2 H_{9/2} \rightarrow ^4 I_{13/2}$ 跃迁不仅属于四能级系统,而且具有较大的积分发射截面。因此,可以将 $Er^{3+} : MA$ 晶体作为可能在绿光波段实现激光输出的激光新材料加以重视。

参 考 文 献

- 1 Kaminskii A A. Laser Crystal. Berlin, Heidelberg, New York :Springer-Verlag, 1981
- 2 Heumann E, Ledir M, Ehrh D *et al.* A P L, 1988, 52 :255 ~ 256
- 3 Hanna D C, Kazer A, Shepherd D P. Opt Commun, 1987, 63 :417 ~ 420
- 4 祁长鸿, 张秀荣, 蒋亚丝 *et al.* 中国激光, 1991, 18(1) :16 ~ 33
- 5 田玉金, 杨鸣华, 苏永红 *et al.* 中国激光, 1993, A20(2) :121 ~ 125
- 6 郭常新, 林 泳, 姚连增 *et al.* 中国激光, 1995, A22(3) :223 ~ 227
- 7 于亚勤, 张思远, 盛桂云. 人工晶体学报, 1995, 24(3) :217 ~ 221
- 8 阮永丰, 李宝凌, 李文润 *et al.* 人工晶体学报, 1995, 24(3) :272 ~ 277
- 9 王英剑, 林凤英, 胡和方. 光学学报, 1997, 17(2) :155 ~ 160
- 10 敬守勇, 林理彬, 蔡邦维. 电子科技大学学报, 1997, 26 :72 ~ 75
- 11 Vaughan D J. Absorption Spectroscopy in Mineralogy (Some contribution of spectral studies in the visible(and near visible) light region to mineralogy. New York :Elsevier Science, 1990
- 12 Wang C C, Zanuzuchi P J. Solid State Science, 1971, 11(4) :586 ~ 591
- 13 Wood D L, Imbusch G F, Macfarlane R M *et al.* J Chem Phys, 1968, 48(11) :5255 ~ 5563
- 14 Dieke G H, Crosswhite H M. Appl Opt, 1963, 2(7) :675 ~ 686
- 15 Weber M J. Phys Rev, 1967, 157(2) :262 ~ 272
- 16 Krupke W F. IEEE J Q E, 1971, QE7(4) :153 ~ 159
- 17 吴光照. 发光与显示, 1980, 4(1) :31 ~ 37
- 18 Judd B R. Phys Rev, 1962, 127(3) :750 ~ 761
- 19 Ofelt G S. J Chem Phys, 1962, 37(3) :511 ~ 520
- 20 Carnall W T, Fields P R, Rajnak K. J Chem Phys, 1968, 49(10) :4424 ~ 4442
- 21 Wybourne B G. Spectroscopic Properties of Rare Earths. New York :Wiley, 1965
- 22 Carnall W T, Fields P R, Wybourne B G. J Chem Phys, 1965, 42(11) :3797 ~ 3806
- 23 Condon E U, Shortley G H. The Theory of Atomic Spectra. New York :Cambridge University Press, 1957
- 24 Caird J A, Deshazer L G, Nella J. IEEE J Q E, 1975, QE11(11) :874 ~ 881
- 25 Reisfeld R. The Rare Earths in Modern Science and Technology. In :Mocarty G J *et al.* eds. New York and London :Plenum Press, 1979

*

*

*

作者简介:敬守勇,男,1967年出生。博士,助理研究员。目前主要从事光学材料及光学元件制造方面的研究工作。