

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 1-0349-04

双掺 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 离子 $\text{Sr}_3\text{Y}_2(\text{BO}_3)_4$ 晶体的光谱性能

周海芳^{1,2,3} 王国富¹

(¹中国科学院福建物质结构研究所, 福建 福州 350002; ²福州大学物理与信息工程学院, 福建 福州 350002)
³中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 报道双掺 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 的 $\text{Sr}_3\text{Y}_2(\text{BO}_3)_4$ 晶体的生长和光谱性能。采用提拉法生长出尺寸为 $\phi 25 \text{ mm} \times 35 \text{ mm}$ 双掺 Yb^{3+} 和 Er^{3+} 离子的 $\text{Sr}_3\text{Y}_2(\text{BO}_3)_4$ 晶体, 研究了 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}:\text{Sr}_3\text{Y}_2(\text{BO}_3)_4$ 晶体的吸收光谱和荧光光谱。应用 Judd-Ofelt (J-O) 理论分析并计算了光谱参数, 得到唯象参数 $\Omega_2 = 14.10 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, $\Omega_4 = 1.69 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, $\Omega_6 = 1.72 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ 。在 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}:\text{Sr}_3\text{Y}_2(\text{BO}_3)_4$ 晶体中, Er^{3+} 离子在 1534 nm 的发射截面为 $8.24 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$, $\text{Er}^{3+} ({}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2})$ 的荧光寿命和辐射寿命分别为 0.650 ms 和 3.873 ms, 研究结果表明, $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}:\text{Sr}_3\text{Y}_2(\text{BO}_3)_4$ 晶体可能成为 1.55 μm 波段的一种激光材料。

关键词 光谱分析; 激光材料; 提拉法; $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}:\text{Sr}_3\text{Y}_2(\text{BO}_3)_4$ 晶体

中图分类号 O433.4 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200936s1.0349

Spectroscopic Properties of $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ Co-Doped $\text{Sr}_3\text{Y}_2(\text{BO}_3)_4$ Crystal

Zhou Haifang^{1,2,3} Wang Guofu¹

¹ Fujian Institute of Research on the Structure of Matter, Chinese Academy of Sciences,
Fuzhou, Fujian 350002, China

² College of Physics and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350002, China

³ Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Abstract The growth and spectral properties of $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}:\text{Sr}_3\text{Y}_2(\text{BO}_3)_4$ crystal were reported in this paper. $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}:\text{Sr}_3\text{Y}_2(\text{BO}_3)_4$ crystal with high quality and dimensions of $\phi 25 \text{ mm} \times 35 \text{ mm}$ has been grown by the Czochralski method. The spectral properties of $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}:\text{Sr}_3\text{Y}_2(\text{BO}_3)_4$ were investigated. Based on the Judd-Ofelt (J-O) theory, the spectral parameters were calculated. The oscillator intensity parameters were $\Omega_2 = 14.10 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, $\Omega_4 = 1.69 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, $\Omega_6 = 1.72 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, and the emission cross section was $8.24 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$ at 1534 nm. The fluorescence lifetime and radiative lifetime of the $\text{Er}^{3+} ({}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2})$ transition were 0.650 ms and 3.873 ms, respectively. The result shows that the $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}:\text{Sr}_3\text{Y}_2(\text{BO}_3)_4$ crystal may be become 1.55 μm laser materials.

Key words spectrographic analysis; laser materials; Czochralski method; $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}:\text{Sr}_3\text{Y}_2(\text{BO}_3)_4$ crystal

1 引 言

由于红外波段的激光可用于光通信、医疗和肉眼安全的光检测和测距等领域^[1~4], 近年来人们对 1.5 μm 红外波段的激光产生了很大的兴趣。在中红外波段激光二极管(LD)抽运的激光中, Er^{3+} 离子

无疑是 1.55 μm (${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$) 和 2.8 μm (${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$) 最具竞争力的离子。许多工作者对掺 Er^{3+} 离子的材料进行了研究^[5~10], 但由于一般 Er^{3+} 离子的激光器存在抽运效率低、激光阈值高等不足, 而且 Er^{3+} 离子在激光二极管发射波长内吸收弱, 如果增

基金项目: 国家自然科学基金(60778035)资助课题。

作者简介: 周海芳(1972—), 女, 讲师, 博士研究生, 主要从事激光晶体和电子材料等方面的研究。

E-mail: zhhafa@163.com

导师简介: 王国富(1949—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事激光晶体和非线性光学晶体等方面的研究。

E-mail: wgf@fjirsm.ac.cn(通信联系人)

大 Er^{3+} 的浓度又容易造成荧光浓度淬灭,这就限制了 Er^{3+} 作为激活离子的使用。众所周知, Yb^{3+} 离子的 $^2F_{5/2}$ 能带和 Er^{3+} 离子的 $^4I_{11/2}$ 能带有部分重叠,那么 Yb^{3+} 离子可以吸收抽运能,并通过共振将能量传递给 Er^{3+} 离子成为可能。研究表明, Yb^{3+} 可作为 Er^{3+} 的敏化离子提高 Er^{3+} 的吸收效率,改善 Er^{3+} 离子的光谱性能^[11~13]。

分子式为 $\text{M}_3\text{Re}_2(\text{BO}_3)_4$ ($\text{M}=\text{Ca}, \text{Sr}, \text{Ba}; \text{Re}=\text{Y}, \text{La}, \text{Gd}$) 是一种新型硼酸盐体系,其中添加稀土离子的 $\text{Ca}_3\text{Re}_2(\text{BO}_3)_4$ 和 $\text{Sr}_3\text{Re}_2(\text{BO}_3)_4$ 系列晶体已被研究,并展示了良好的光谱性能与激光性能^[14~17]。 $\text{Sr}_3\text{Y}_2(\text{BO}_3)_4$ 晶体是 $\text{M}_3\text{Re}_2(\text{BO}_3)_4$ 系列晶体中的一员,该晶体属于正交晶系,空间点群为 $\text{Pc}21n$, 单胞参数: $a=0.869 \text{ nm}$, $b=1.597 \text{ nm}$, $c=0.739 \text{ nm}$, 单胞体积 $V=1.02621 \text{ nm}^3$, 单胞所包含的分子数 $Z=4$, 密度为 $D=4.37 \text{ g/cm}^3$ ^[18]。 本文报道 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}:\text{Sr}_3\text{Y}_2(\text{BO}_3)_4$ 晶体的生长和光谱性能。

2 实 验

$\text{Sr}_3\text{Y}_2(\text{BO}_3)_4$ 晶体的熔点大约在 $1313 \text{ }^\circ\text{C}$, 且同成分熔化, 可以用提拉法生长, 原材料是纯度为 99.99% 的 Er_2O_3 , Yb_2O_3 和 Y_2O_3 , 99.9% 的 SrCO_3 和 H_3BO_3 , 原料按分子式 $\text{Sr}_3\text{Er}_{0.04}\text{Yb}_{0.20}\text{Y}_{1.76}(\text{BO}_3)_4$ 的反应式配比, 其中 H_3BO_3 过量 3% 拟补偿在烧结和晶体生长过程中的损耗。将固相合成的 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}:\text{Sr}_3\text{Y}_2(\text{BO}_3)_4$ 多晶粉末放入铱金锅, 在 N_2 气保护下在中频感应提拉炉中生长单晶, 生长出尺寸为 $\phi 25 \text{ mm} \times 35 \text{ mm}$ 的单晶, 如图 1 所示。

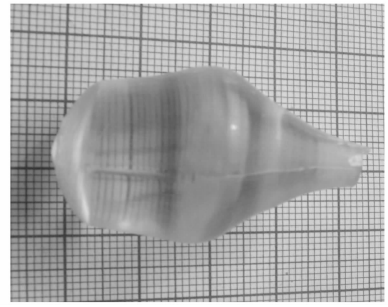


图 1 提拉法生长的 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}:\text{Sr}_3\text{Y}_2(\text{BO}_3)_4$ 晶体
Fig. 1 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}:\text{Sr}_3\text{Y}_2(\text{BO}_3)_4$ crystal grown by the Czocholaski method

用等离子体发射光谱分析法测定 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}:\text{Sr}_3\text{Y}_2(\text{BO}_3)_4$ 晶体中 Er^{3+} 和 Yb^{3+} 的原子数分数分别为 1.75% 和 6.9%, 计算出 Er^{3+} 和 Yb^{3+} 的分凝系数分别为 0.88 和 0.69。

3 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}:\text{Sr}_3\text{Y}_2(\text{BO}_3)_4$ 晶体的光谱特性

3.1 吸收光谱与 Judd-Ofelt (J-O) 分析

从 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}:\text{Sr}_3\text{Y}_2(\text{BO}_3)_4$ 晶体的中部切出 $10.5 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm} \times 1.58 \text{ mm}$ 高质量样品, 磨平抛光后进行吸收光谱和荧光光谱的测量。常温下吸收光谱的测量在 Perkin Elmer UV-vis-NIR (Lambda-900) 型光谱仪上进行, 测试波长范围为 $200 \sim 2000 \text{ nm}$ 。荧光光谱与荧光寿命的测试在 An Edinburgh Analytical Instruments FLS92 型荧光光谱仪上进行。图 2 为常温下 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}:\text{Sr}_3\text{Y}_2(\text{BO}_3)_4$ 晶体的吸收光谱, 从基态到激发态的所有吸收带都标注在图上。

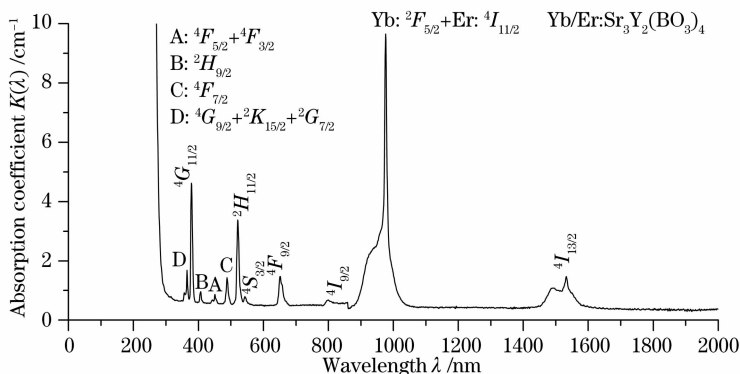


图 2 常温下 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}:\text{Sr}_3\text{Y}_2(\text{BO}_3)_4$ 晶体的吸收谱

Fig. 2 Absorption spectrum of $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}:\text{Sr}_3\text{Y}_2(\text{BO}_3)_4$ crystal at room temperature

根据 Judd-Ofelt (J-O) 理论, 利用吸收谱可以计算出激发态的辐射寿命、荧光分支比、辐射跃迁几率

和谱线强度。据 J-O 理论, 从基态 $^4I_{15/2}$ ($J=15/2$) 到激发态 J' 电偶极跃迁的谱线强度可以表示

为^[19, 20]

$$S_{\text{exp}}(J \rightarrow J') = \frac{3hc(2J+1)}{8\pi^3 e^2 \bar{\lambda}_{\text{abs}} N_c} \frac{9n}{(n^2+2)^2} \int K(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

式中 J 和 J' 分别是始态与终态的总角动量量子数, $\bar{\lambda}_{\text{abs}}$ 为吸收带的平均波长, n 为折射率 (对 Er³⁺/Yb³⁺:Sr₃Y₂(BO₃)₄ 晶体而言 $n=1.65$), c 为光速, e 为电子的电量, h 为普朗克常数, N_c 为 Er³⁺ 离子的浓度, $K(\lambda)$ 为吸收系数。由 S_{exp} 可得到唯象参数 Ω_2, Ω_4 和 Ω_6 , 其值分别为 $\Omega_2 = 14.10 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, $\Omega_4 = 1.69 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, $\Omega_6 = 1.72 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ 。根据 J-O 理论, 从初始态 $|(S, L), J\rangle$ 到终态 $|(S', L'), J'\rangle$ 谱线强度的理论计算的表达式为^[21, 22]

$$S_{\text{cal}}(J \rightarrow J') = \sum_{t=2,4,6} \Omega_t \langle \langle (S, L)J \| U^{(t)} \| (S', L')J' \rangle \rangle^2, \quad (2)$$

其中 $\langle \dots \| U^{(t)} \| \dots \rangle$ 为约化矩阵元, 因为 $4f^3$ 的电子被三价稀土离子 (Re³⁺) 的其他电子层屏蔽, 故约化矩阵元与稀土离子 Re³⁺ 周围的配位种类无关。约化矩阵元的值可从参考文献^[23, 24] 得到, 这 3 个唯象参数 Ω_2, Ω_4 和 Ω_6 的值从另一方面展示了基质对辐射跃迁几率的影响, 它包含了奇对称晶场对辐射跃迁几率的影响。

在 300~1700 nm 间选择了 8 个吸收峰积分, Er³⁺ 离子每个吸收带 $U^{(t)}$ 矩阵元的值在 Kaminskii 有关的文献中可找到, 若有两个或两个以上的吸收带重叠在一起, 则取相应矩阵元的总和。理论与实验间的计算误差可用均方根表示为:

$$\Delta S_{\text{rms}} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(S_{\text{cal}} - S_{\text{exp}})^2}{N-3}}, \quad (3)$$

其中 N 是所选择的吸收带的数目 ($N=8$), 测量的相对误差表示为

$$S_{\text{rms-error}} = \frac{\Delta S_{\text{rms}}}{S_{\text{rms}}} \times 100\%, \quad (4)$$

$$\text{其中 } S_{\text{rms}} = \sqrt{\sum_1^N S_{\text{exp}}^2 / N}, \quad (5)$$

ΔS_{rms} 和 $S_{\text{rms-error}}$ 的值分别为 $4.1 \times 10^{-8} \text{ cm}^2$ 和 3.0%。这些值在 J-O 理论拟合的误差范围内, 说明计算值与实验值之间数据吻合较好。

从激发态到基态的辐射跃迁几率和电偶极跃迁的荧光分支比由唯象参数 Ω_t 计算得到, 从初始态到终态的辐射跃迁几率的表达式为

$$A_{\text{ed}}(J' \rightarrow J'') = \frac{64\pi^4 e^2}{3h(2J+1)\bar{\lambda}_{\text{em}}^3} \cdot \frac{n(n^2+2)^2}{9} S(J' \rightarrow J''), \quad (6)$$

其中 $\bar{\lambda}_{\text{em}}$ 为发射带的平均波长, $S(J', J'')$ 为荧光谱线强度, 其值由 Ω_t 和发射跃迁的约化矩阵元 $U^{(t)}$ 算出, 发射跃迁约化矩阵元的值可参考 Weber 的计算值^[25]。对于 Er³⁺ 离子而言, ${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ 和 ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ 跃迁过程中磁偶极跃迁的贡献不能忽略^[25], 所以总的辐射跃迁几率表示成

$$A(J' \rightarrow J'') = A_{\text{ed}}(J' \rightarrow J'') + A_{\text{md}}(J' \rightarrow J''), \quad (7)$$

$$A_{\text{total}}(J' \rightarrow J'') = \sum A(J' \rightarrow J''). \quad (8)$$

磁偶极辐射跃迁几率 A_{md} 可用下式表示^[26]

$$A_{\text{md}}(J' \rightarrow J'') = A_{\text{md}(\text{LaF}_3)}(J' \rightarrow J'') \left(\frac{n}{n(\text{LaF}_3)} \right)^3, \quad (9)$$

式中 n 和 $n(\text{LaF}_3)$ 分别是 Sr₃Y₂(BO₃)₄ 和 LaF₃ 晶体的折射率, $A_{\text{md}(\text{LaF}_3)}$ 是 Er³⁺ 在 LaF₃ 中磁偶极跃迁几率^[25]。

每个激发态的辐射寿命由自发辐射几率决定

$$\tau_r = 1/A_{\text{total}}, \quad (10)$$

计算得到晶体中 Er³⁺ 离子的 ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ 能级的辐射寿命为 3.873 ms。

3.2 荧光光谱和荧光寿命

图 3 所示为在 976 nm 激光抽运时, 常温下 Er³⁺/Yb³⁺:Sr₃Y₂(BO₃)₄ 晶体的荧光谱。从谱图中可以观察到在 940~1100 nm 和 1430~1640 nm 处分别有较弱和较强的发射峰, 这两个峰分别对应于 Yb³⁺ 离子的 ${}^2F_{5/2} \rightarrow {}^2F_{7/2}$ 跃迁和 Er³⁺ 离子的 ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ 跃迁, 但没观察到 Er³⁺ 离子的上转换现象。Yb³⁺ 和 Er³⁺ 离子能级的跃迁和两者之间能量的转换过程如下: 电子被激发到 ${}^2F_{5/2}$ (Yb³⁺) 能级后, 有一部分电子弛豫到 ${}^2F_{7/2}$ 基态, 产生 940~1100 nm (Yb³⁺ 离子的 ${}^2F_{5/2} \rightarrow {}^2F_{7/2}$ 跃迁) 范围的荧光, 同时

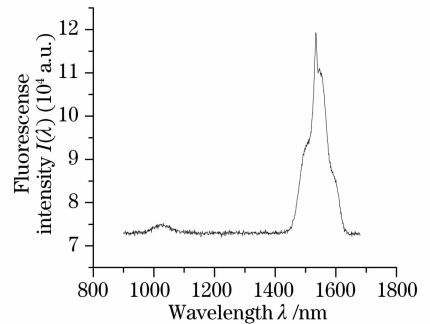


图 3 常温下 Er³⁺/Yb³⁺:Sr₃Y₂(BO₃)₄ 晶体在 976 nm 激发下的发射谱

Fig. 3 Fluorescence spectrum of Er³⁺/Yb³⁺:Sr₃Y₂(BO₃)₄ crystal excited with 976 nm laser radiation at room temperature

由于偶极-偶极作用,能量从 Yb^{3+} 离子的 $^2F_{5/2}$ 能级转移到 Er^{3+} 离子的 $^4I_{11/2}$ 能级, $^4I_{11/2}$ 能级上的电子通过声子弛豫到 Er^{3+} 离子的 $^4I_{13/2}$ 能级,从而导致了相应于 $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ 跃迁的 1450~1650 nm 发射。这表明在 976 nm 激光激发下能量从敏化离子 Yb^{3+} 转移到 Er^{3+} 离子是可能的。另外 Er^{3+} 离子也会自吸收部分 976 nm 抽运能,有助于 $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ 跃迁,因此观察到了 Er^{3+} 离子 $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ 跃迁的 1534 nm 的较强发射峰。1534 nm 发射峰的半峰全宽为 65 nm。根据发射谱,用 Füchtbauer-Ladenburg (F-L) 法可估算不同发射波长的发射截面^[27]

$$\sigma_{\text{em}}(\lambda) = \frac{\lambda^5 A(J' \rightarrow J'') I(\lambda)}{8\pi c n^2 \int \lambda I(\lambda) d\lambda}, \quad (11)$$

式中 $I(\lambda)$ 为波长为 λ 的荧光强度,计算出在 1534 nm 处 Er^{3+} 离子 $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ 跃迁的发射截面值为 $8.24 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$ 。 Er^{3+} 离子的 $^4I_{13/2}$ 能级的荧光寿命为 0.650 ms,则其量子效率为 16.8%。低量子效率主要原因是声子能量高达 1400 cm^{-1} 的高无辐射跃迁几率引起的, Er^{3+} 离子 $^4I_{13/2}$ 与 $^4I_{15/2}$ 能级间的能量为 6500 cm^{-1} ,因此来自 $^4I_{13/2}$ 能级的高的多声子弛豫是可能的^[28]。另一方面吸收带与发射带间能带的部分重叠也是导致量子效率低的原因之一。

4 结 论

采用提拉法生长出较高质量的 $\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+} : \text{Sr}_3\text{Y}_2(\text{BO}_3)_4$ 晶体。其唯象参数分别为: $\Omega_2 = 14.10 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, $\Omega_4 = 1.69 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, $\Omega_6 = 1.72 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ 。 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+} : \text{Sr}_3\text{Y}_2(\text{BO}_3)_4$ 晶体中 Er^{3+} 离子的荧光寿命为 0.650 ms,在 1534 nm 处 Er^{3+} 离子的发射截面为 $8.24 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$ 。结果表明 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+} : \text{Sr}_3\text{Y}_2(\text{BO}_3)_4$ 晶体可能成为一种 1.55 μm 波长的激光晶体材料。

参 考 文 献

- 1 A. G. Antipenko, N. V. Aetemev, A. A. Betin *et al.*. Use of a YAG:Er laser with a chalcogenide fibre waveguide in laser surgery[J]. *Quant. Electron.*, 1995, **25**(5): 498~500
- 2 P. E.-A. Möbert, E. Heumann, G. Huber *et al.*. Green $\text{Er}^{3+} : \text{YLiF}_4$ upconversion laser at 551nm with Yb^{3+} codoping: a novel pumping scheme[J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(18): 1412~1414
- 3 Song Feng, Tan Hao, Shang Meiru *et al.*. Spectra characteristics of Er^{3+} doped $\text{NaY}(\text{WO}_4)_2$ crystal[J]. *Acta Physica Sinica*, 2002, **51**(10): 2375~2379
宋峰,谭浩,商美茹等.掺 Er^{3+} 的 $\text{NaY}(\text{WO}_4)_2$ 晶体的光谱特性[J]. *物理学报*, 2002, **51**(12): 2375~2379
- 4 R. Scheps. Upconversion laser processes[J]. *Prog. Quant. Electron.*, 1996, **20**(4): 271~358
- 5 M. C. Pujol, M. Rico, C. Zaldo *et al.*. Crystalline structure and

- optical spectroscopy of Er^{3+} -doped $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ single crystals[J]. *Appl. Phys. B*, 1999, **68**(2): 187~197
- 6 C. Bertini, A. Toncelli, M. Tonelli *et al.*. Optical spectroscopy and laser parameters of $\text{GdVO}_4 : \text{Er}^{3+}$ [J]. *J. Lumin.*, 2004, **106**(3~4): 235~242
- 7 R. Guo, Y. C. Wu, P. Z. Fu *et al.*. Optical transition probabilities of Er^{3+} ions in $\text{La}_2\text{CaB}_{10}\text{O}_{19}$ crystal[J]. *Chem. Phys. Lett.*, 2005, **416**(1~3): 133~136
- 8 Y. J. Chen, X. Q. Lin, Z. D. Luo *et al.*. Spectroscopic properties of Er^{3+} ions in $\text{La}_2(\text{WO}_4)_3$ crystal[J]. *Opt. Mater.*, 2004, **27**(3): 625~633
- 9 H. D. Jiang, J. Y. Wang, X. B. Hu *et al.*. Optical transition properties of Er^{3+} ions in $\text{YAl}_3(\text{BO}_3)_4$ crystal[J]. *Chem. Phys. Lett.*, 2002, **365**(3~4): 279~284
- 10 X. Z. Li, Z. B. Lin, L. Z. Zhang *et al.*. Growth, thermal and spectroscopic characterization of $\text{Er}^{3+} : \text{NaY}(\text{MoO}_4)_2$ crystal[J]. *J. Cryst. Growth*, 2006, **293**(1): 157~161
- 11 B. Wei, Z. B. Lin, G. F. Wang. Growth and spectral properties of $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ -co-doped $\text{Ca}_3\text{Ln}_2(\text{BO}_3)_4$ (Ln=Gd, La) crystals[J]. *J. Cryst. Growth*, 2006, **295**(2): 241~245
- 12 D. Zhao, Z. S. Hu, Z. B. Lin *et al.*. Growth and spectral properties of $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ -codoped $\text{Sr}_3\text{Y}(\text{BO}_3)_3$ crystal[J]. *J. Cryst. Growth*, 2005, **277**(1~4): 401~405
- 13 T. Tsuboi. Upconversion emission in $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ -codoped YVO_4 crystals[J]. *Phys. Rev. B*, 2000, **62**(7): 4200~4203
- 14 B. Wei, Z. B. Lin, L. Z. Zhang *et al.*. Growth and spectroscopic characterization of $\text{Er}^{3+} : \text{Ca}_3\text{La}_2(\text{BO}_3)_4$ crystal[J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2007, **40**(7): 2792~2796
- 15 J. G. Pan, Z. B. Lin, Z. S. Hu *et al.*. Crystal growth and spectral properties of $\text{Yb}^{3+} : \text{Sr}_3\text{La}_2(\text{BO}_3)_4$ crystal[J]. *Opt. Mater.*, 2006, **28**(3): 250~254
- 16 Y. Zhang, Z. B. Lin, Z. S. Hu *et al.*. Growth and spectroscopic properties of Nd^{3+} -doped $\text{Sr}_3\text{Y}_2(\text{BO}_3)_4$ crystal[J]. *J. Soli. Sta. Chem.*, 2004, **177**(9): 3183~3186
- 17 Y. Zhang, Z. B. Lin, L. Z. Zhang *et al.*. Growth and optical properties of Yb^{3+} -doped $\text{Sr}_3\text{Gd}_2(\text{BO}_3)_4$ crystal[J]. *Opt. Mater.*, 2007, **29**(6): 543~546
- 18 Y. Zhang, Y. D. Li. Red photoluminescence and crystal structure of $\text{Sr}_3\text{Y}_2(\text{BO}_3)_4$ [J]. *J. Alloys Compd.*, 2004, **384**(1~2): 88~92
- 19 W. F. Krupke. Optical absorption and fluorescence intensities in several rare-earth-doped Y_2O_3 and LaF_3 single crystals[J]. *Phys. Rev.*, 1966, **145**: 325~337
- 20 W. B. Fowler, D. L. Dexter. Relation between absorption and emission probabilities in luminescent centers in ionic solids[J]. *Phys. Rev.*, 1962, **128**: 2154~2165
- 21 B. R. Judd. Optical absorption intensities of rare-earth ions[J]. *Phys. Rev.*, 1962, **127**: 750~761
- 22 G. S. Ofelt. Intensities of crystal spectra of rare-earth ions[J]. *J. Chem. Phys.*, 1962, **37**(3): 511~520
- 23 W. T. Carnall, P. R. Fields, K. Rajnak. Electronic energy levels in the trivalent lanthanide aquo ions. I. Pr^{3+} , Nd^{3+} , Pm^{3+} , Sm^{3+} , Dy^{3+} , Ho^{3+} , Er^{3+} , and Tm^{3+} [J]. *J. Chem. Phys.*, 1968, **49**(10): 4424~4442
- 24 A. A. Kaminskii, G. Boulon, M. Buoncrisiani *et al.*. Spectroscopy of a new laser garnet $\text{Lu}_3\text{Sc}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12} : \text{Nd}^{3+}$. Intensity luminescence characteristics, stimulated emission, and full set of squared reduced-matrix elements $|\langle \|U^{(l)}\| \rangle|^2$ for Nd^{3+} ions[J]. *Phys. Stat. Sol. A*, 1994, **141**(2): 471~494
- 25 M. J. Weber. Probabilities for radiative and nonradiative decay of Er^{3+} in LaF_3 [J]. *Phys. Rev.*, 1967, **157**: 262~272
- 26 J. A. Capobianco, P. Kabro, F. S. Ermeneux *et al.*. Optical spectroscopy, fluorescence dynamics and crystal field analysis of Er^{3+} in YVO_4 [J]. *Chem. Phys.*, 1997, **214**(2~3): 329~340
- 27 B. Aull, H. Jenssen. Vibronic interactions in $\text{Nd} : \text{YAG}$ resulting in nonreciprocity of absorption and stimulated emission cross sections[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1982, **QE-18**(5): 925~930
- 28 Y. W. Zhao, X. H. Gong, Y. J. Chen *et al.*. Spectroscopic properties of Er^{3+} ions in $\text{Li}_6\text{Y}(\text{BO}_3)_3$ crystal[J]. *Appl. Phys. B*, 2007, **88**(1): 51~55