

文章编号: 0253-2239(2010)12-3627-04

# Tm<sup>3+</sup>:Sr<sub>3</sub>La<sub>2</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub>晶体的生长与光谱特性

周海芳<sup>1</sup> 王国富<sup>2\*</sup>

(<sup>1</sup> 福州大学物理与信息工程学院微纳器件与太阳能电池研究所, 福建 福州 350002)  
(<sup>2</sup> 中国科学院福建物质结构研究所, 福建 福州 350002)

**摘要** 报道了掺 Tm<sup>3+</sup> 离子 Sr<sub>3</sub>La<sub>2</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> 晶体的生长与光谱性能。根据吸收谱,应用 Judd-Ofelt (J-O)理论计算了光谱参数,得到唯象参数  $\Omega_2 = 4.46 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ ,  $\Omega_4 = 3.18 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ ,  $\Omega_6 = 1.88 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ 。采用倒易法,根据吸收截面计算了 Sr<sub>3</sub>La<sub>2</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> 晶体<sup>3</sup>F<sub>4</sub>→<sup>3</sup>H<sub>6</sub> 跃迁 1.82 μm 处的发射截面为  $0.694 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ ,并讨论了该晶体在近红外波段的增益截面与粒子数反转率间的关系。研究结果表明,Sr<sub>3</sub>La<sub>2</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> 晶体有较大的发射截面和较宽的调谐范围,是一种潜在的近红外波段激光材料。

**关键词** 光谱分析;晶体生长;激光晶体

中图分类号 O433.4 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103012.3627

## Growth and Spectroscopic Properties of Tm<sup>3+</sup>:Sr<sub>3</sub>La<sub>2</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> Crystal

Zhou Haifang<sup>1</sup> Wang Guofu<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Institute of Micro-Nano Devices and Solar Cells, College of Physics and Information Engineering,  
Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350002, China)  
(<sup>2</sup> Fujian Institute of Research on the Structure of Matter, Chinese Academy of Sciences,  
Fuzhou, Fujian 350002, China)

**Abstract** The growth and spectroscopic properties of Tm<sup>3+</sup>:Sr<sub>3</sub>La<sub>2</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> crystal are reported. Based on Judd-Ofelt theory, the intensity parameters are calculated to be  $\Omega_2 = 4.46 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ ,  $\Omega_4 = 3.18 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ , and  $\Omega_6 = 1.88 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$  according to the absorption spectrum. The emission cross section for the <sup>3</sup>F<sub>4</sub>→<sup>3</sup>H<sub>6</sub> transition are estimated to be  $0.694 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$  at 1.82 μm by the reciprocity method according to the absorption cross section, and the relation between gain cross section and the population inversion rate for the <sup>3</sup>F<sub>4</sub>→<sup>3</sup>H<sub>6</sub> transition is discussed. Compared with the other Tm<sup>3+</sup>-doped materials, Sr<sub>3</sub>La<sub>2</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> crystal has a larger emission cross section and wider tuning range. Therefore, Sr<sub>3</sub>La<sub>2</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> crystal may be a potential tunable near-infrared laser crystal.

**Key words** spectrographic analysis; crystal growth; laser crystal

## 1 引 言

稀土离子 Tm<sup>3+</sup> 的<sup>3</sup>F<sub>4</sub>→<sup>3</sup>H<sub>6</sub> 能级跃迁能够辐射出波长为 1.9 μm 的光,此波段的光源可被广泛应用于激光医疗、红外雷达、遥感、光通信和红外传感器检测等领域,其重要的应用前景引起广泛的关注并已逐渐成为研究热点<sup>[1,2]</sup>。在军事上,1.9 μm 波段的激光对大气和烟雾的穿透能力强,可用于激光测距和激光雷达等应用中,又由于其对人眼安全而对组织穿透深

度浅,并且可以通过光纤传输,因此在医学领域也有着重要的应用。探索性能优良的激光基质材料是研究工作者的努力目标之一,为此许多 Tm<sup>3+</sup> 离子掺杂的各种晶体与玻璃的光谱和激光性能的研究受到人们重视<sup>[3,4]</sup>。在掺 Tm<sup>3+</sup> 材料的研究中,为数不多的如 Tm<sup>3+</sup>:YAG, Tm<sup>3+</sup>:KLu(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>, Tm<sup>3+</sup>:YAlO<sub>3</sub> 和 Tm<sup>3+</sup>:BaY<sub>2</sub>F<sub>8</sub> 等晶体中,已实现了激光二极管(LD)抽运的 1.9 μm 波长激光输出<sup>[1,5~7]</sup>,其他许多掺

收稿日期: 2010-03-04; 收到修改稿日期: 2010-04-23

基金项目: 国家自然科学基金(60778035)和福建省教育厅 A 类科技计划项目(JA09010)资助课题。

作者简介: 周海芳(1972—),女,博士,讲师,主要从事激光晶体和电子材料等方面的研究。E-mail: zhaha@163.com

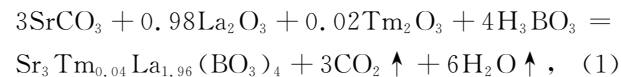
\* 通信联系人。E-mail: wgf@fjirsm.ac.cn

$\text{Tm}^{3+}$  晶体尚处于研究阶段。

分子式为  $\text{M}_3\text{Re}_2(\text{BO}_3)_4$  ( $\text{M}=\text{Ca}, \text{Sr}, \text{Ba}$ ;  $\text{Re}=\text{Y}, \text{La}, \text{Gd}$ ) 的硼酸盐体系是一种新型硼酸盐体系,其中掺稀土离子的  $\text{Sr}_3\text{Re}_2(\text{BO}_3)_4$  系列晶体已被研究,并显示了良好的光谱性能与激光性能<sup>[8]</sup>,  $\text{Sr}_3\text{La}_2(\text{BO}_3)_4$  晶体是此类硼酸盐化合物中的一种,具有良好的机械性能和物理化学性能,该晶体属于正交晶系,空间点群为  $\text{pc}21\text{n}$ , 单胞参数:  $a=0.878 \text{ nm}$ ,  $b=1.654 \text{ nm}$ ,  $c=0.742 \text{ nm}$ , 单胞体积  $V=1.0775 \times 10^{-27} \text{ m}^3$ , 单胞所包含的分子数  $Z=4$ , 密度为  $D=4.78 \text{ g/cm}^3$ <sup>[9]</sup>。为了进一步探索新型的掺  $\text{Tm}^{3+}$  的激光晶体,本文报道了掺  $\text{Tm}^{3+}$  的  $\text{Sr}_3\text{La}_2(\text{BO}_3)_4$  晶体生长和光谱性能。

## 2 实 验

$\text{Sr}_3\text{La}_2(\text{BO}_3)_4$  晶体在  $1337 \text{ }^\circ\text{C}$  同成分熔化,故可采用提拉法生长。生长原料采用质量分数为 99.99% 的  $\text{Tm}_2\text{O}_3$  与  $\text{La}_2\text{O}_3$  以及化学纯级的  $\text{SrCO}_3$  与  $\text{H}_3\text{BO}_3$ , 原料按照如下的化学反应式称量:



由于烧结过程与晶体生长过程中  $\text{H}_3\text{BO}_3$  容易挥发,所以在原料中通常需要加入过量质量分数为 3% 的  $\text{H}_3\text{BO}_3$ , 用于补偿烧结过程与晶体生长过程中的损耗。将掺原子数分数为 2%  $\text{Tm}^{3+}$  的  $\text{Sr}_3\text{La}_2(\text{BO}_3)_4$  原料经多次研磨、压片、固相烧结后放入  $\Phi 65 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$  的钛金坩中,置入氮气保护中频感应的单晶提拉炉内。原料熔化后在高于熔点温度  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  左右恒温 2 h 后,放下籽晶,在合适的温度下以  $0.7 \text{ mm/h}$  提拉速度,  $15 \text{ r/min}$  转速的生长工艺参数生长晶体。整个晶体生长过程通过收颈、扩肩、等径、收尾四个步骤后,晶体拉离液面。为了避免由于热应力引起的晶体开裂,所生长的晶体需要在炉子内以  $20 \text{ }^\circ\text{C/h}$  的降温速率缓慢退火至室温。结果得到了尺寸为  $\Phi 25 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$  透明的  $\text{Tm}^{3+}:\text{Sr}_3\text{La}_2(\text{BO}_3)_4$  晶体,如图 1 所示。

采用 X 射线粉末衍射 (XRD) 方法对所生长的晶体进行物相分析,试样的 XRD 采用 DMAX2500 型粉末衍射仪,  $\text{CuK}\alpha$  辐射 ( $\lambda=0.154056 \text{ nm}$ ), 物相分析结果如图 2 所示。由图 2 可以看出,晶体的粉末衍射峰的位置和相对强度和标准卡片上(如图 2 中插图所示)的纯  $\text{Sr}_3\text{La}_2(\text{BO}_3)_4$  吻合,确认了所生长的晶体为  $\text{Tm}^{3+}:\text{Sr}_3\text{La}_2(\text{BO}_3)_4$  晶体。

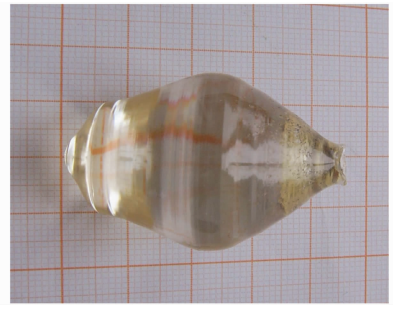


图 1 提拉法生长的  $\text{Tm}^{3+}:\text{Sr}_3\text{La}_2(\text{BO}_3)_4$  晶体  
Fig. 1  $\text{Tm}^{3+}:\text{Sr}_3\text{La}_2(\text{BO}_3)_4$  single crystal grown by Czochralski method

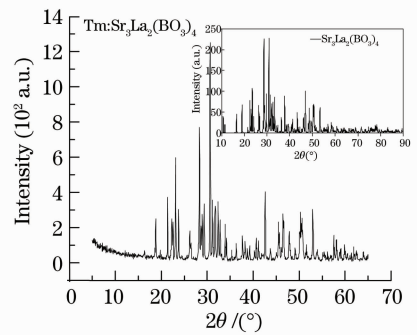


图 2  $\text{Tm}^{3+}:\text{Sr}_3\text{La}_2(\text{BO}_3)_4$  晶体的粉末衍射图  
Fig. 2 XRD patterns of  $\text{Tm}^{3+}:\text{Sr}_3\text{La}_2(\text{BO}_3)_4$  crystal

## 3 结果与讨论

从  $\text{Tm}^{3+}:\text{Sr}_3\text{La}_2(\text{BO}_3)_4$  晶体的中部切出  $10 \text{ mm} \times 6.0 \text{ mm} \times 1.0 \text{ mm}$  高质量样品,双面磨平抛光后进行吸收光谱的测量。常温下吸收光谱的测量在 Perkin Elmer UV-vis-NIR (Lambda-900) 型分光光度计上进行,测试波长范围为  $200 \sim 2000 \text{ nm}$ 。用电感耦合等离子光谱分析法测定  $\text{Sr}_3\text{La}_2(\text{BO}_3)_4$  晶体中  $\text{Tm}^{3+}$  离子的质量分数为 0.90%, 即晶体中  $\text{Tm}^{3+}$  离子的浓度为  $0.665 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 。图 3 为常温下  $\text{Tm}^{3+}:\text{Sr}_3\text{La}_2(\text{BO}_3)_4$  晶体的吸收光谱,从图 3

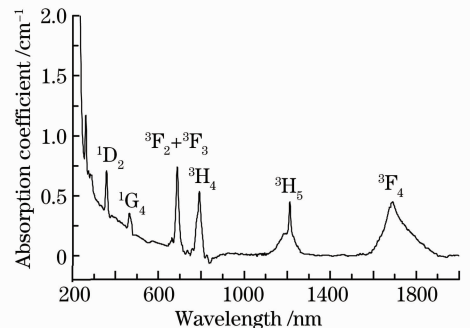


图 3  $\text{Tm}^{3+}:\text{Sr}_3\text{La}_2(\text{BO}_3)_4$  晶体的常温吸收谱  
Fig. 3 Absorption spectrum of  $\text{Tm}^{3+}:\text{Sr}_3\text{La}_2(\text{BO}_3)_4$  crystal at room temperature

中可看出,该晶体的吸收边为 250 nm,在 1691, 1212, 791, 690, 466 和 360 nm 处都有很强的吸收峰,这些吸收峰是由于  $\text{Tm}^{3+}$  的  $4f \rightarrow 4f$  能级跃迁引起的,其所对应的从基态  $^3\text{H}_6$  到激发态的所有吸收带都标注在图上。

Judd-Ofelt (J-O) 理论是研究激光材料光谱特性的有力工具,根据此理论利用吸收谱可以得到晶体的线性谱线强度,辐射寿命与荧光分之比等光谱参数。应用 J-O 理论对  $\text{Sr}_3\text{La}_2(\text{BO}_3)_4$  晶体中  $\text{Tm}^{3+}$  离子的光谱参数进行了计算,根据 J-O 理论,两个  $J$  簇能级之间的跃迁,其电偶极矩跃迁的理论线性谱线强度可表示为<sup>[10,11]</sup>:

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

式中  $S$  和  $S'$ ,  $L$  和  $L'$  以及  $J$  和  $J'$  分别为始态与终态的总自旋量子数、总轨道角动量量子数和总角动量量子数;  $U^{(t)}$  为约化矩阵元,其值与掺杂离子与跃迁能级有关,随基质的变化差异很小;  $\Omega_t$  为唯象强度参数,其取决于基质材料的配位特性。

从基态  $^3\text{H}_6$  ( $J=6$ ) 到激发态  $J'$  电偶极转变的实验线性谱线强度可以用下式表示<sup>[12]</sup>:

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

式中  $\lambda_{\text{av}}$  为吸收带的平均波长;  $n$  为折射率;  $c$  为光速;  $e$  为电子的电量;  $h$  为普朗克常数;  $N_c$  为  $\text{Tm}^{3+}$  离子在晶体中的浓度;  $K(\lambda)$  为吸收谱的吸收系数。每个吸收带跃迁约化矩阵元  $U^{(t)}$  的值可从文献[13]中查得,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。在约化矩阵元与实验线性谱线强度基础上,利用最小二乘法可拟合出唯象强度参数  $\Omega_t$ 。实验选取了 6 个只涉及电偶极跃迁的吸收带对  $\Omega_t$  进行拟合,计算得到的  $S_{\text{exp}}$  和  $S_{\text{cal}}$  值可参阅文献[14],实验值与理论值的相对误差为 3.6%,此值在 J-O 拟合的误差范围内,说明计算值与实验值之间数据吻合得较好,数据可靠。最终拟合的结果为  $\Omega_2 = 4.46 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ ,  $\Omega_4 = 3.18 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ ,  $\Omega_6 = 1.88 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ 。

在  $^3\text{F}_4 \rightarrow ^3\text{H}_6$  跃迁的近红外发射研究中,倒易法(RM)是常采用的一种方法,与 Fuchtbauer-Ladenburg (F-L)法相比,采用 RM 计算发射截面可避免荧光谱受自吸收的影响,只要已知吸收截面  $\sigma_{\text{abs}}(\lambda)$  和多重态 Stark 能级分裂位置,就能得出发

射截面  $\sigma_{\text{em}}(\lambda)$ 。吸收截面与发射截面间的关系为<sup>[15]</sup>

$$\sigma_{\text{em}}(\lambda) = \sigma_{\text{abs}}(\lambda) \frac{Z_l}{Z_u} \exp\left(\frac{E_{Zl} - hc/\lambda}{k_B T}\right), \quad (4)$$

式中  $\sigma_{\text{abs}} = K(\lambda)/N_c$ ;  $k_B$  为玻尔兹曼常数;  $Z_u$  和  $Z_l$  分别为高低能级组对应的配分函数;  $E_{Zl}$  为高低能级组最低子能级的能量差,  $E_{Zl}$  可由  $\text{Tm}^{3+}$  最高吸收峰的位置来决定。由于缺少低温发射谱,不能获得  $\text{Tm}^{3+}:\text{Sr}_3\text{La}_2(\text{BO}_3)_4$  晶体  $\text{Tm}^{3+}$  离子精确的能级分布图,参考  $\text{Tm}^{3+}:\text{Li}_6\text{Gd}(\text{BO}_3)_3$ <sup>[16]</sup> 与  $\text{Tm}^{3+}:\text{La}_2\text{Be}_2\text{O}_5$ <sup>[17]</sup> 晶体,估算  $Z_l/Z_u$  和  $E_{Zl}$  的值分别为 1.20 和  $5714 \text{ cm}^{-1}$ 。由 RM 计算所得的发射截面如图 4 所示,从图 4 中可看出,最大的发射截面位于  $1.82 \mu\text{m}$  处,其值为  $0.694 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ 。与其它掺  $\text{Tm}^{3+}$  的激光晶体的发射截面,如  $\text{Tm}:\text{LiYF}_4$  为  $0.33 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ <sup>[17]</sup>,  $\text{Tm}:\text{CaF}_2$  为  $0.39 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ <sup>[18]</sup> 相比,  $\text{Tm}^{3+}:\text{Sr}_3\text{La}_2(\text{BO}_3)_4$  有较大的发射截面,因此  $\text{Tm}^{3+}:\text{Sr}_3\text{La}_2(\text{BO}_3)_4$  晶体也许可成为近红外波段一种潜在的激光材料。

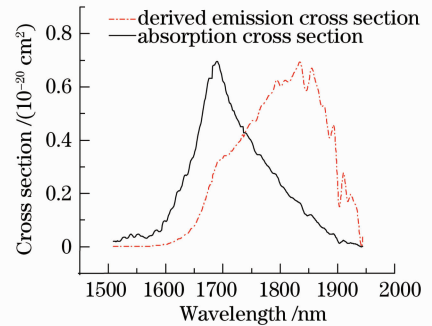


图 4  $\text{Tm}^{3+}:\text{Sr}_3\text{La}_2(\text{BO}_3)_4$  晶体  $^3\text{H}_6 \rightarrow ^3\text{F}_4$  跃迁的吸收截面和  $^3\text{F}_4 \rightarrow ^3\text{H}_6$  跃迁的模拟发射截面

Fig. 4 Absorption cross section and derived emission cross section curves due to the  $^3\text{H}_6 \rightarrow ^3\text{F}_4$  and  $^3\text{F}_4 \rightarrow ^3\text{H}_6$  transition of  $\text{Tm}^{3+}:\text{Sr}_3\text{La}_2(\text{BO}_3)_4$  crystal, respectively

激光增益截面是衡量激光性能的重要参数之一,根据  $\text{Tm}^{3+}$  在近红外波段的吸收截面和发射截面,可通过下面的公式计算激光增益截面<sup>[15]</sup>:

$$\sigma_{\text{gain}} = P\sigma_{\text{em}}(\lambda) - (1-P)\sigma_{\text{abs}}(\lambda), \quad (5)$$

式中  $P$  为粒子数反转率,  $\sigma_{\text{em}}(\lambda)$  和  $\sigma_{\text{abs}}(\lambda)$  分别是发射截面和吸收截面,在不同  $P$  ( $P=0, 0.1, 0.2, \dots, 1$ ) 值下计算得到的增益截面  $\sigma_{\text{gain}}(\lambda)$  值如图 5 所示。当  $P$  值超过 0.3 时,增益在  $1.82 \sim 1.94 \mu\text{m}$  光谱范围,并且随着  $P$  值的增大,调谐范围变宽,增益截面值变大。当  $P=0.6$  时,调谐范围范围扩展到  $1.71 \sim 1.94 \mu\text{m}$ ,此时最大的  $\sigma_{\text{gain}}(\lambda)$  值出现在  $1.835 \mu\text{m}$  处

的  $0.35 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ 。若在此波长处进行激光实验,有望得到激光放大输出。

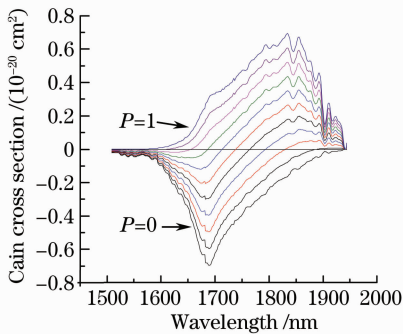


图 5 不同  $P$  值下  ${}^3F_4 \rightarrow {}^3H_6$  跃迁的增益截面曲线

Fig. 5 Gain cross section calculated for different values of  $P$  for the  ${}^3F_4 \rightarrow {}^3H_6$  transition

## 4 结 论

采用提拉法生长得到尺寸为  $\Phi 25 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$  质量优良的  $\text{Tm}^{3+}:\text{Sr}_3\text{La}_2(\text{BO}_3)_4$  晶体, XRD 结果确认了所生长的晶体属于  $\text{Tm}^{3+}:\text{Sr}_3\text{La}_2(\text{BO}_3)_4$  晶体。应用 J-O 理论计算出该晶体唯象强度参数分别为  $\Omega_2 = 4.46 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ ,  $\Omega_4 = 3.18 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ ,  $\Omega_6 = 1.88 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ 。光谱研究中采用 RM 计算出近红外波段  $1.82 \mu\text{m}$  处的发射截面为  $0.694 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ 。研究了  $\text{Tm}^{3+}:\text{Sr}_3\text{La}_2(\text{BO}_3)_4$  晶体的增益截面与粒子数反转率的关系, 表明激光调谐的范围为  $1.71 \sim 1.94 \mu\text{m}$ 。研究结果表明,  $\text{Tm}^{3+}:\text{Sr}_3\text{La}_2(\text{BO}_3)_4$  晶体可能成为一种潜在的近红外波段激光晶体材料。

## 参 考 文 献

- 1 G. Galzerano, F. Cornacchia, D. Parisi *et al.*. Widely tunable 1.94- $\mu\text{m}$  Tm:BaY<sub>2</sub>F<sub>8</sub> laser [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(8): 854~856
- 2 V. Petrov, F. Guell, J. Massons *et al.*. Efficient tunable laser operation of Tm:KGd(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> in the continuous-wave regime at room temperature [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2004, **40**(9): 1244~1251
- 3 Lin Qiongfai, Xia Haiping, Wang Jinhao *et al.*. Spectral properties of Tm<sup>3+</sup>-doped SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-PbF<sub>2</sub>-AlF<sub>3</sub> glasses [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 305~310  
林琼斐, 夏海平, 王金浩等. Tm<sup>3+</sup> 掺杂 SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-PbF<sub>2</sub>-AlF<sub>3</sub> 玻璃的光谱特性[J]. *光学学报*, 2008, **28**(2): 305~310

- 4 Zhang Pengjun, Dai Shixun, Peng Bo *et al.*. Near- and mid-infrared spectroscopic properties of Tm<sup>3+</sup>-doped Ge-Ga-S-CsI glasses[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(2): 554~559  
张鹏君, 戴世勋, 彭波等. Tm<sup>3+</sup> 离子掺杂 Ge-Ga-S-CsI 硫卤玻璃近红外及中红外发光特性研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(2): 554~559
- 5 K. S. Lai, P. B. Phua, R. F. Wu *et al.*. 120-W continuous-wave diode-pumped Tm:YAG laser [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(21): 1591~1593
- 6 N. I. Borodin, P. V. Kryukov, A. V. Popov *et al.*. Diode-pumped CW Tm<sup>3+</sup>:YAlO<sub>3</sub> laser [J]. *Quant. Electron.*, 2005, **35**(6): 511~514
- 7 X. Mateos, V. Petrov, J. H. Liu *et al.*. Efficient 2- $\mu\text{m}$  continuous-wave laser oscillation of Tm<sup>3+</sup>:Klu(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> [J]. *IEEE. J. Quant. Electron.*, 2006, **42**(10): 1008~1015
- 8 J. G. Pan, Z. B. Lin, Z. S. Hu *et al.*. Crystal growth and spectral properties of Yb<sup>3+</sup>:Sr<sub>3</sub>La<sub>2</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> crystal [J]. *Opt. Mater.*, 2006, **28**(3): 250~254
- 9 G. K. Abdullaev, K. S. Mamedov, S. T. Amirov. Crystal structure of La<sub>2</sub>Sr<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> [J]. *Kristallografiya*, 1973, **18**(N): 1075~1077
- 10 B. R. Judd. Optical absorption intensities of rare-earth ions [J]. *Phys. Rev.*, 1962, **127**(3): 750~761
- 11 G. S. Ofelt. Intensities of crystal spectra of rare-earth ions [J]. *J. Chem. Phys.*, 1962, **37**(3): 511~520
- 12 W. F. Krupke. Optical absorption and fluorescence intensities in several rare-earth-doped Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and LaF<sub>3</sub> single crystals [J]. *Phys. Rev.*, 1966, **145**(1): 325~337
- 13 W. T. Carnall, P. R. Fields, K. Rajnak. Electronic energy levels in the trivalent lanthanide aquo ions. I. Pr<sup>3+</sup>, Nd<sup>3+</sup>, Pm<sup>3+</sup>, Sm<sup>3+</sup>, Dy<sup>3+</sup>, Ho<sup>3+</sup>, Er<sup>3+</sup>, and Tm<sup>3+</sup> [J]. *J. Chem. Phys.*, 1968, **49**(10): 4424~4442
- 14 Zhou Haifang. Growth and Spectroscopic Properties of Rare-Earth Ions-Doped Sr<sub>3</sub>Ln<sub>2</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> (Ln = La, Y) Crystals [D]. PhD Thesis, Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, 2009  
周海芳. 掺稀土离子 Sr<sub>3</sub>Ln<sub>2</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> (Ln = La, Y) 晶体的生长与光谱性能的研究[D]. 中国科学院研究生院博士论文, 2009
- 15 F. Güell, Gavaldà Jna, R. Solé R *et al.*. 1.48 and 1.84  $\mu\text{m}$  thulium emissions in monoclinic KGd(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> single crystals [J]. *J. Appl. Phys.*, 2004, **95**(3): 919~923
- 16 X. H. Ma, J. F. Li, Z. J. Zhu *et al.*. Thermal and optical properties of Tm<sup>3+</sup>:Li<sub>6</sub>Gd(BO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> crystal: a potential candidate for 1.83  $\mu\text{m}$  lasers [J]. *J. Luminesc.*, 2008, **128**(10): 1660~1664
- 17 S. A. Payne, L. L. Chase, L. K. Smith *et al.*. Infrared cross-section measurements for crystals doped with Er<sup>3+</sup>, Tm<sup>3+</sup>, and Ho<sup>3+</sup> [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1992, **28**(11): 2619~2630
- 18 S. Bigotta, A. Toncelli, M. Tonelli *et al.*. Spectroscopy and energy transfer parameters of Tm<sup>3+</sup>- and Ho<sup>3+</sup>-doped Ba<sub>2</sub>NaNb<sub>5</sub>O<sub>15</sub> single crystals [J]. *Opt. Mater.*, 2007, **30**(1): 129~131