

# Dy<sup>3+</sup>:La<sub>2</sub>CaB<sub>10</sub>O<sub>19</sub> 晶体生长和光谱性能

吴 洋<sup>1,2</sup> 张建秀<sup>1\*</sup> 傅佩珍<sup>1</sup> 吴以成<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院理化技术研究所人工晶体研究中心, 中国科学院功能晶体与激光技术重点实验室, 北京 100190)  
<sup>2</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要** La<sub>2</sub>CaB<sub>10</sub>O<sub>19</sub> (LCB) 是一种性能优良的非线性光学晶体, 通过顶部籽晶法生长出了较高质量的掺杂 Dy<sup>3+</sup> 离子的 LCB 晶体, 尺寸为 40 mm×25 mm×15 mm, 其中 Dy<sup>3+</sup> 离子的<sup>4</sup>F<sub>9/2</sub>-<sup>6</sup>H<sub>13/2</sub> 能级跃迁可以发射 575 nm 的黄色激光, 该激光有望在医学和生物检测研究等领域得到应用。通过对该晶体的 *b* 面进行摇摆曲线测量, 得到其半峰全宽为 16.2"。对 Dy<sup>3+</sup>:LCB 晶体的室温吸收光谱进行测量, 并利用 452 nm 波长的激光进行激发, 测量荧光光谱, 得到 575 nm 处较强光谱峰, 此波段荧光寿命为 636 μs。通过 Judd-Ofelt 理论计算了其光谱参数: 唯象参数、吸收振子强度、自发辐射几率、吸收和发射截面和辐射寿命等。

**关键词** 激光晶体; Dy<sup>3+</sup>:La<sub>2</sub>CaB<sub>10</sub>O<sub>19</sub>; 吸收光谱; 荧光光谱

中图分类号 O734 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201138.1206001

## Crystal Growth and Optical Properties of Dy<sup>3+</sup>-Doped La<sub>2</sub>CaB<sub>10</sub>O<sub>19</sub> Crystals

Wu Yang<sup>1,2</sup> Zhang Jianxiu<sup>1</sup> Fu Peizhen<sup>1</sup> Wu Yicheng<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Beijing Center for Crystal Research and Development, Key Laboratory of Functional Crystals and Laser Technology, Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)  
<sup>2</sup> Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** La<sub>2</sub>CaB<sub>10</sub>O<sub>19</sub> (LCB) is a favourable nonlinear optical crystal. Dy<sup>3+</sup> doped La<sub>2</sub>CaB<sub>10</sub>O<sub>19</sub> crystal of good quality with a size of 40 mm×25 mm×15 mm has been grown by the top-seeded solution growth method. The <sup>4</sup>F<sub>9/2</sub>-<sup>6</sup>H<sub>13/2</sub> transition of Dy<sup>3+</sup> ion can emit 575 nm yellow laser, which may be applied in the medicine and biological detection. The rocking curve measurement showed that the full width at half maximum is 16.2" in the *b* plane. The absorption spectra of Dy<sup>3+</sup>:LCB were measured at room temperature. The sample was excited at the 452 nm radiations and the fluorescence spectrum was obtained, in which the strongest peak was at 575 nm. The fluorescence lifetime was 636 μs at the 575 nm emission. The Judd-Ofelt (J-O) theory was applied to the evaluation of the spectral properties. The J-O parameters, absorption oscillator strength, the absorption and emission cross section and radiative lifetime were calculated which show Dy<sup>3+</sup>:LCB crystal is a promised yellow laser material.

**Key words** laser crystal; Dy<sup>3+</sup>:La<sub>2</sub>CaB<sub>10</sub>O<sub>19</sub>; absorption spectrum; fluorescence spectrum

**OCIS codes** 160.4670; 300.1030; 300.2530

## 1 引 言

近年来, 采用 Dy<sup>3+</sup> 做激活离子的固态黄光激光器越来越受到研究者的重视<sup>[1]</sup>, 主要因为 Dy<sup>3+</sup> 离子

的<sup>4</sup>F<sub>9/2</sub>-<sup>6</sup>H<sub>13/2</sub> 跃迁可发射 575 nm 波长附近的黄光, 其在医学诊断、生物检测和军事通讯方面有一定应用前景<sup>[2]</sup>, 选择合适的基质材料, 可发展成为固态黄

收稿日期: 2011-08-07; 收到修改稿日期: 2011-09-03

基金项目: 国家 973 计划(2010CB630701)和国家自然科学基金面上项目(50802100)资助课题。

作者简介: 吴 洋(1984—), 男, 博士研究生, 主要从事非线性光学晶体和激光晶体等方面的研究。

E-mail: wuyang\_19841222@163.com

导师简介: 吴以成(1946—), 男, 中国工程院院士, 博士生导师, 主要从事光电功能晶体材料方面的研究。

E-mail: ycwu@cl.cryo.ac.cn

\* 通信联系人。E-mail: zjx@mail.ipc.ac.cn

光激光器。一系列可作为  $Dy^{3+}$  掺杂载体的晶体材料已经被研究<sup>[3-6]</sup>, 优良的基质材料及其激光性能还在研究中。

$La_2CaB_{10}O_{19}$  (LCB)<sup>[7]</sup> 具有非线性效应适中、紫外可见区透光范围广、紫外吸收边短、高激光损伤阈值<sup>[8]</sup>、不潮解性、化学稳定性好和机械性能优良等优点, 其中  $La^{3+}$  易被稀土离子取代, 具备发展成为固态激光器的条件, 如已经发现  $Nd^{3+}$ :LCB 可以实现自倍频绿光输出<sup>[9]</sup>, 同时其他掺杂离子的 LCB 晶体激光性能也在研究中<sup>[10,11]</sup>, 而  $Dy^{3+}$  离子掺杂的 LCB 晶体目前未见报道。

本文采用顶部籽晶法进行  $Dy^{3+}$ :LCB 单晶生长, 对其室温吸收光谱和荧光光谱进行了分析, 利用 Judd-Ofelt(J-O)理论<sup>[12,13]</sup> 计算其光谱参数: 唯象参数  $\Omega_i$ 、吸收谱线强度、自发辐射几率、吸收和发射截面和辐射寿命等, 全面测评其受激辐射性能, 并与其他  $Dy^{3+}$  掺杂的硼酸盐晶体的光谱参数进行比对, 对其离子特征峰吸收发射截面和辐射寿命等重要参数做综合比较, 总结出  $Dy^{3+}$ :LCB 晶体在黄光激光器领域的特点和应用前景。

## 2 实验过程

### 2.1 晶体生长

晶体生长所用的原料均为纯度是 99.99% (质量分数) 的  $Dy_2O_3$ ,  $La_2O_3$ ,  $CaCO_3$ ,  $Li_2CO_3$  和  $H_3BO_3$ , 选择  $Li_2O-CaO-B_2O_3$  做为助熔剂<sup>[14]</sup>, 采用顶部籽晶法生长  $Dy^{3+}$ :LCB 单晶,  $Dy:La$  元素原子比为 3:97, 将原料在马弗炉中加热至 950 °C, 恒温 24 h, 降温速率为 0.5 °C/d, 采用 [110] 方向下入 LCB 籽晶, 经过 1 个月的生长期, 得到尺寸为 40 mm×25 mm×15mm 的无色单晶, 如图 1 所示, 经美国 Leeman 公司的 PROFILE SPEC 型电感耦合等离子体发射光谱仪测试其元素组成, 测得其中  $Dy^{3+}$  离子浓度为 1.2%。



图 1  $Dy^{3+}$ :LCB 晶体

Fig. 1 As-grown  $Dy^{3+}$ :LCB crystal

### 2.2 摇摆曲线测试

摇摆曲线是在荷兰 Philips 公司生产的 X' Pert Pro MPD 型 X 射线粉末衍射仪上测试的, 将晶体沿 (010) 面进行切割, 并将其抛光, 得到 7 mm×7 mm×1 mm 的  $b$  面器件, 测试范围为 13.94°~14.00°, 测试在室温下完成。

### 2.3 室温吸收光谱测试

吸收光谱是在 Lambda-900 UV-VIS-NIR 分光光度计上测试的, 测试范围为 185~3000 nm 的室温非偏振吸收光谱, 测试样品亦为 7 mm×7 mm×1 mm 的  $b$  面抛光器件。

### 2.4 荧光光谱测试

荧光光谱是在 Edinburgh Instruments FLS 920 型荧光光谱仪上测试的, 激发波长为 452 nm, 测量范围为 460~800nm, 测试在室温下进行, 测试样品亦为 7 mm×7 mm×1 mm 的  $b$  面抛光器件, 并对最强发射峰 575 nm 做了荧光寿命测试。

## 3 结果讨论

图 2 为  $Dy^{3+}$ :LCB 晶体 (010) 面 X 射线扫描的摇摆曲线, 13.97° 处半峰全宽为 16.2", 表明  $Dy^{3+}$  掺杂的 LCB 晶体具有良好的质量,  $Dy^{3+}$  离子较易取代进入晶格中, LCB 晶体是  $Dy^{3+}$  较好的基质材料。

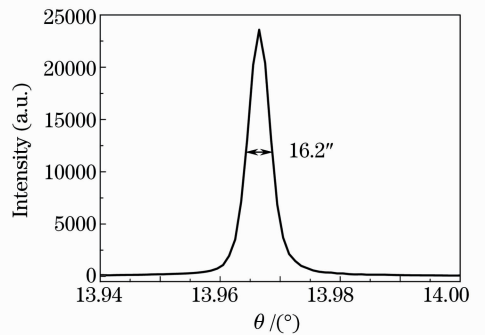


图 2  $Dy^{3+}$ :LCB 晶体 (010) 面的摇摆曲线

Fig. 2 Rocking curve of  $Dy^{3+}$ :LCB crystal (010) plane

根据 LCB 晶体的光学主轴与结晶学主轴间的平行关系<sup>[8]</sup>, 将生长的 LCB 晶体沿 (010) 面进行切割、抛光, 加工尺寸为 7 mm×7 mm×1 mm 的样品, 对该样品进行室温吸收光谱、非偏振荧光光谱和荧光寿命的测试, 图 3 为其吸收光谱, 吸收峰出现在 273, 298, 317, 327, 338, 352, 368, 388, 427, 453, 815, 915, 1070, 1101, 1250, 1272 和 1659 nm 附近, 对应于  $Dy^{3+}$  离子的 4f 电子跃迁的特征吸收, 根据  $Dy^{3+}$  离子的能级图, 可对其具体跃迁能级进行识别。

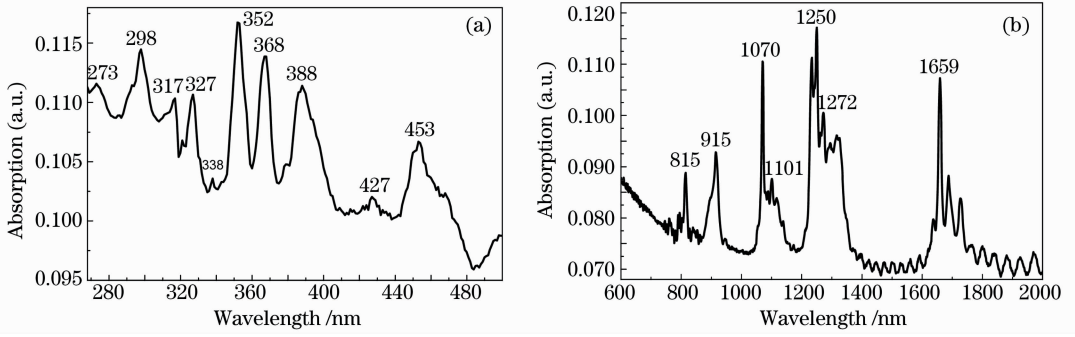


图 3 室温吸收光谱。(a) 紫外到可见光黄光;(b) 红光到红外光

Fig. 3 Absorption spectra at room temperature of (a) ultraviolet to visible yellow light range and (b) red light to infrared range

Judd-Ofelt 理论是计算稀土离子  $4f$  能级跃迁的光谱参数的方法,可以使用该理论得到  $\text{Dy}^{3+}$  离子的各能级跃迁几率  $A_r$ , 辐射寿命  $\tau_r$  和荧光分支比  $\beta$  等。 $\text{Dy}^{3+}$  离子在 LCB 晶体中的能级跃迁分为电偶极跃迁和磁偶极跃迁两部分,故吸收谱线强度有两部分:电偶极谱线强度  $S_{\text{ed}}$  和磁偶极谱线强度  $S_{\text{md}}$ :

$$S_{\text{ed}} = \sum_{\tau=2,4,6} \Omega_{\tau} |\langle (S, L) J \| U^{(\tau)} \| (S', L') J' \rangle|^2, \quad (1)$$

$$S_{\text{md}} = \left( \frac{h}{4\pi mc} \right)^2 |\langle (S, L) J \| L + 2S \| (S', L') J' \rangle|^2, \quad (2)$$

式中  $U^{(\tau)}$  为  $\text{Dy}^{3+}$  离子吸收跃迁矩阵元,由文献[15]中查到  $S$  和  $S'$  为始末态自旋量子数,  $L$  和  $L'$  为始末态角动量,  $J$  和  $J'$  为始末态总动量量子数。其中电偶极谱线强度计算值  $S_{\text{ed}}^{\text{means}}$  为

$$S_{\text{ed}}^{\text{means}} = \frac{9n}{(n^2 + 2)^2} \frac{3hc}{8\pi^3 e^2} \frac{2J + 1}{\bar{\lambda}} \int \sigma(\lambda) d\lambda, \quad (3)$$

式中  $\lambda$  为吸收峰对应波长,  $n$  为该波长下的 LCB 晶体折射率,  $\bar{\lambda}$  为平均波长,  $D(\lambda)$  为光密度,  $\int \sigma(\lambda) d\lambda$  为积分吸收系数, 其值为

$$\int \sigma(\lambda) d\lambda = \frac{2.3}{N_c L} \int D(\lambda) d\lambda, \quad (4)$$

式中  $N_c$  为  $\text{Dy}^{3+}$  离子在晶体中的浓度,  $L$  为晶体长度,  $\int D(\lambda) d\lambda$  为积分吸收率。根据上述公式,可以得到跃迁吸收的各个谱线的强度,由最小二乘法可以得到光谱唯象参数  $\Omega_{\tau}$ , 分别为  $\Omega_2 = 5.04 \times 10^{-20}$ ,  $\Omega_4 = 1.87 \times 10^{-20}$ ,  $\Omega_6 = 1.98 \times 10^{-20}$ , 各计算参数结果如表 1 所示,其中  $S_{\text{meas}}$  为谱线强度计算值,  $S_{\text{cal}}$  为计算结果拟合的谱线强度值,  $\Delta S = S_{\text{cal}} - S_{\text{meas}}$ 。

 表 1  $\text{Dy}^{3+}:\text{LCB}$  晶体的计算光谱参数

 Table 1 Calculated spectrum parameters of  $\text{Dy}^{3+}:\text{LCB}$  crystal

Transitions	$\bar{\lambda}/\text{nm}$	$\int A_{\text{OD}}(\lambda) d\lambda / \text{nm}$	$S_{\text{meas}}$ / $(10^{-20} \text{ cm}^2)$	$S_{\text{cal}}$ / $(10^{-20} \text{ cm}^2)$	$\Delta S$	$\Delta S^2$
${}^6\text{H}_{15/2} \rightarrow$						
${}^6\text{H}_{11/2}$	1659	0.760	1.625	1.801	0.176	0.031
${}^6\text{F}_{11/2} + {}^6\text{H}_{9/2}$	1272	2.616	7.260	7.111	0.149	0.022
${}^6\text{F}_{9/2} + {}^6\text{H}_{7/2}$	1101	0.873	2.791	2.578	0.213	0.045
${}^6\text{F}_{7/2}$	915	0.482	1.850	1.667	0.183	0.033
${}^6\text{F}_{5/2}$	815	0.178	0.766	0.682	0.084	0.007
${}^4\text{I}_{15/2}$	453	0.061	0.461	0.1667	0.294	0.087
${}^4\text{G}_{11/2}$	427	0.013	0.105	0.030	0.075	0.006
${}^4\text{F}_{7/2} + {}^4\text{I}_{13/2} + {}^4\text{M}_{21/2}$	388	0.105	1.218	0.738	0.480	0.231
${}^4\text{M}_{19/2} + {}^4\text{I}_{11/2}$	368	0.070	0.648	0.461	0.187	0.035
${}^6\text{P}_{7/2}$	352	0.096	0.927	1.002	0.075	0.006
${}^4\text{I}_{9/2}$	338	0.002	0.020	0.001	0.019	0
${}^4\text{G}_{9/2}$	327	0.028	0.286	0.239	0.047	0.002
${}^4\text{H}_{13/2}$	298	0.050	0.561	0.275	0.286	0.082
${}^4\text{G}_{7/2}$	273	0.040	0.048	0.008	0.040	0.002

采用均方偏差进一步评价拟合结果

$$\Delta_{\text{ms}} - \Delta S = \sqrt{\frac{(S_{\text{meas}} - S_{\text{cal}})^2}{p - q}}, \quad (5)$$

式中  $p$  和  $q$  分别为辐射跃迁和强度参数的数目, 因此得到  $\Delta_{\text{ms}} - \Delta S = 0.231 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ , 说明计算结果比较合理。

跃迁几率  $A$  也由电偶极和磁偶极两部分组成:

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

$$A_{\text{md}}(J \rightarrow J') = \frac{64\pi^4 e^2}{3h\lambda^3} \frac{n^3}{(2J + 1)} S_{\text{md}}. \quad (7)$$

表 2  $\text{Dy}^{3+}:\text{LCB}$  晶体  ${}^4\text{F}_{9/2}-{}^6\text{H}_J$  跃迁的光谱参数

Table 2 Spectrum parameters of the  ${}^4\text{F}_{9/2}-{}^6\text{H}_J$  transition for  $\text{Dy}^{3+}:\text{LCB}$  crystal

${}^4\text{F}_{9/2}$	$\lambda / \text{nm}$	$S_{\text{ed}} / (10^{-22} \text{ cm}^2)$	$S_{\text{md}} / (10^{-22} \text{ cm}^2)$	$A / (\text{s}^{-1})$	$\beta_c$
${}^6\text{H}_{15/2}$	481	6.92	0	208.40	0.196
${}^6\text{H}_{13/2}$	575	40.37	0	673.94	0.635
${}^6\text{H}_{11/2}$	660	5.94	1.157	78.48	0.074
${}^6\text{H}_{9/2} + {}^6\text{F}_{11/2}$	756	5.22	8.016	100.70	0.095

$\tau_r = 942.05 \mu\text{s}$

可以看出辐射跃迁几率最高发生在波长为 575 nm 处, 说明  $\text{Dy}^{3+}:\text{LCB}$  具备应用于黄光激光器的基本条件。

为了得到 575 nm 附近的特征发射峰, 通常是利用特征吸收峰 452 nm 进行激发, 检测波长范围为 460~800 nm 的荧光信号, 如图 4 所示, 晶体在近

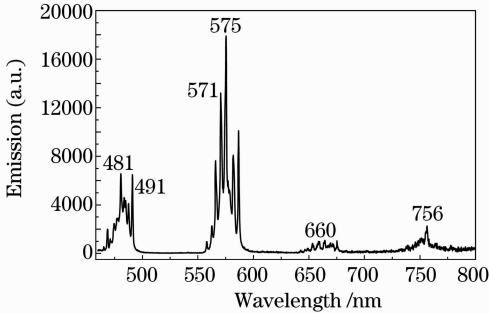


图 4 荧光光谱

Fig. 4 Fluorescence spectrum

表 3 与其他  $\text{Dy}^{3+}$  离子掺杂的激光晶体光谱参数对比

Table 3 Comparison of optical parameters with other  $\text{Dy}^{3+}$ -doped laser crystals

Crystals	$\Omega_2 / (10^{-20} \text{ cm}^2)$	$\Omega_4 / (10^{-20} \text{ cm}^2)$	$\Omega_6 / (10^{-20} \text{ cm}^2)$	$\tau_r / \mu\text{s}$	$\beta_c$ at 575 nm
$\text{Dy}:\text{LCB}$	5.04	1.87	1.98	942	0.63
$\text{Dy}:\text{YAB}^{[17]}$	1.77	1.05	1.13	1987	0.64
$\text{Dy}:\text{LiNbO}_3^{[18]}$	5.42	1.14	2.51	717	0.13
$\text{Dy}:\text{NaLa}(\text{WO}_4)_2^{[19]}$	14.43	2.60	1.68	308	0.78

两者之和为跃迁几率  $A = A_{\text{ed}} + A_{\text{md}}$ 。

辐射寿命  $\tau_r$  和荧光分支比  $\beta_c$  由以下公式决定:

$$\frac{1}{\tau_r} = \sum_{J'} A(J \rightarrow J'), \quad (8)$$

$$\beta_c = \frac{A(J \rightarrow J')}{\sum_{J'} A(J \rightarrow J')}. \quad (9)$$

所关心的辐射跃迁是  ${}^4\text{F}_{9/2}-{}^6\text{H}_{15/2}$ ,  ${}^4\text{F}_{9/2}-{}^6\text{H}_{13/2}$ ,  ${}^4\text{F}_{9/2}-{}^6\text{H}_{11/2}$ ,  ${}^4\text{F}_{9/2}-{}^6\text{H}_{9/2} + {}^6\text{F}_{11/2}$  四个过程, 因此对其进行计算得到如表 2 所示结果。

红外波段有四个主要发射带, 分别发生在 481, 575, 660 和 756 nm 处, 对应于  $\text{Dy}^{3+}$  离子的上述四个辐射跃迁过程, 其中最强峰也出现在 575 nm, 与计算的辐射过程相吻合。

发射截面  $\sigma_p$  为<sup>[16]</sup>

$$\sigma_p = \frac{\lambda_p^4}{4\pi^2 c n^2 \Delta\lambda_{\text{eff}}} A[({}^4\text{F}_{9/2}); ({}^6\text{H}_{13/2})], \quad (10)$$

式中  $\Delta\lambda_{\text{eff}}$  为半峰全宽, 因此得到 575 nm 处的发射截面为  $2.891 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$ , 同时计算得到 452 nm 处的吸收截面为  $0.344 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ 。

同时, 对最强发射峰 575 nm 处做了荧光寿命测量, 计算得到实际荧光寿命为 636  $\mu\text{s}$ , 故量子效率为 67.4%, 说明效率较高, 跃迁几率较大。

对比如表 3 所列中  $\text{Dy}^{3+}$  掺杂的其他激光晶体,  $\text{Dy}^{3+}:\text{LCB}$  晶体光谱唯象参数、辐射寿命、荧光分支比数据与其他激光晶体相当, 说明其在激光晶体领域有一定应用价值。

## 4 结 论

采用合适的助熔剂, 利用顶部籽晶法, 生长出了

掺杂离子浓度为 1.2% 的  $\text{Dy}^{3+}:\text{LCB}$  晶体, 通过测得的摇摆曲线证明其具有良好的晶体质量, 对其进

行室温吸收光谱和荧光光谱测定,通过 J-O 理论计算得到其光谱唯象参数、跃迁几率、辐射寿命、荧光分支比、吸收和发射截面等光谱数据,证明其能够利用 452 nm 波长进行激发,发射出 575 nm 波长的黄光,且其荧光寿命较长,量子效率较高,为其在黄光激光领域的应用奠定了基础。

### 参 考 文 献

- 1 A. Kaminskii, U. Hömmeric, D. Temole *et al.*. Visible laser action of  $\text{Dy}^{3+}$  ions in monoclinic  $\text{KY}(\text{WO}_4)_2$  and  $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$  crystals under Xe-flashlamp pumping[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2000, **39**(6A): L208
- 2 W. Telford, M. Murga, T. Hawley *et al.*. DPSS yellow-green 561 nm lasers for improved fluorochrome detection by flow cytometry[J]. *Cytometry Part A*, 2005, **68A**(1): 36~44
- 3 D. K. Sardar, W. M. Bradley, R. M. Yow *et al.*. Optical transitions and absorption intensities of  $\text{Dy}^{3+}$  ( $4\text{F}^9$ ) in YSGG laser host[J]. *J. Lumin.*, 2004, **106**(3-4): 195~203
- 4 E. Cavalli, M. Bettinelli, A. Belletti *et al.*. Optical spectra of yttrium phosphate and yttrium vanadate single crystals activated with  $\text{Dy}^{3+}$  [J]. *J. Alloys Compd.*, 2002, **341**(1-2): 107~110
- 5 G. Dominiak-Dzik, P. Solarz, W. Ryba-Romanowski *et al.*. Dysprosium-doped  $\text{YAl}_3(\text{BO}_3)_4$  (YAB) crystals: an investigation of radiative and non-radiative processes[J]. *J. Alloys Compd.*, 2003, **359**: 51~58
- 6 Z. Wang, D. Yuan, X. Shi *et al.*. Crystal growth and optical properties of  $\text{Dy}:\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$  single crystals [J]. *J. Cryst. Growth*, 2004, **263**(1-4): 246~250
- 7 Y. Wu, J. Liu, P. Fu *et al.*. A new lanthanum and calcium borate  $\text{La}_2\text{CaB}_{10}\text{O}_{19}$  [J]. *Chem. Mater.*, 2001, **13**(3): 753~755
- 8 F. Jing, P. Fu, Y. Wu *et al.*. Growth and assessment of physical properties of a new nonlinear optical crystal: Lanthanum calcium borate[J]. *Opt. Mater.*, 2008, **30**(12): 1867~1872
- 9 A. Brenier, Y. Wu, P. Fu *et al.*. Spectroscopy and self-frequency doubling of the  ${}^4\text{F}_{3/2}\text{-}{}^4\text{I}_{13/2}$  laser channel in the  $\text{La}_2\text{CaB}_{10}\text{O}_{19}:\text{Nd}^{3+}$  bi-functional crystal[J]. *Appl. Phys. B: Lasers Opt.*, 2007, **86**(4): 673~676
- 10 Y. Wu, J. Zhang, G. Zhang *et al.*. Optical properties of  $\text{Nd}^{3+}$ -doped  $\text{La}_2\text{CaB}_{10}\text{O}_{19}$  crystals with different  $\text{Nd}^{3+}$  concentrations [J]. *J. Cryst. Growth*, 2011, **318**(1): 632~635
- 11 R. Guo, Y. Wu, P. Fu *et al.*. Growth and spectroscopic properties of ytterbium-doped lanthanum calcium borate ( $\text{Yb}^{3+}:\text{La}_2\text{CaB}_{10}\text{O}_{19}$ ) crystal [J]. *Opt. Commun.*, 2005, **244**(1-6): 321~325
- 12 B. R. Judd. Optical absorption intensities of rare-earth ions[J]. *Phys. Rev.*, 1962, **127**(3): 750~761
- 13 G. S. Ofelt. Intensities of crystal spectra of rare-earth ions[J]. *J. Chem. Phys.*, 1962, **37**(3): 511~519
- 14 F. Jing, Y. Wu, P. Fu *et al.*. Growth of  $\text{La}_2\text{CaB}_{10}\text{O}_{19}$  single crystals from  $\text{CaO-Li}_2\text{O-B}_2\text{O}_3$  flux[J]. *J. Cryst. Growth*, 2005, **285**(1-2): 270~274
- 15 W. T. Carnall, P. R. Fields, K. Rajnak. Electronic energy levels in the trivalent lanthanide aquo ions[J]. *J. Chem. Phys.*, 1968, **49**(10): 4424~4442
- 16 Ralph R. Jacobs, Marvin J. Weber. Dependence of the  ${}^4\text{F}_{3/2}\text{-}{}^4\text{I}_{13/2}$  induced-emission cross section for  $\text{Nd}^{3+}$  on glass composition [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1976, **12**(2): 102~111
- 17 K. Wang, J. Zhang, J. Li *et al.*. Optical properties and parameters of  $\text{Dy}^{3+}$ -doped  $\text{YAl}_3(\text{BO}_3)_4$  crystals [J]. *J. Cryst. Growth*, 2005, **285**(3): 388~393
- 18 G. Dominiak-Dzik, W. Ryba-Romanowski, U. U. Palatnikou *et al.*. Dysprosium-doped  $\text{LiNbO}_3$  crystal. optical properties and effect of temperature on fluorescence dynamics [J]. *J. Mol. Struc.*, 2004, **704**(1-3): 139~144
- 19 Y. Wei, C. Tu, H. Wang *et al.*. Optical spectroscopy of  $\text{NaLa}(\text{WO}_4)_2:\text{Dy}^{3+}$  single crystal [J]. *J. Alloys Compd.*, 2007, **438**(1-2): 310~316

栏目编辑: 马 沂