

文章编号: 0258-7025(2009)06-1523-05

# Nd : CaNb<sub>2</sub>O<sub>6</sub> 晶体的生长及光谱性质

程艳<sup>1</sup> 辛征<sup>2</sup> 徐晓东<sup>1</sup> 徐军<sup>3</sup> 周圣明<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800; <sup>2</sup>山东建筑大学信息与电气工程学院, 山东 济南 250101)

<sup>3</sup>中国科学院上海硅酸盐研究所, 上海 200050

**摘要** 采用提拉法沿 *c* 向成功生长出质量优良的 Nd : CaNb<sub>2</sub>O<sub>6</sub> 新型单晶。测量了晶体的室温吸收光谱, 在 808 nm 处吸收截面为  $5.04 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ , 吸收带宽为 8 nm。根据 Judd-Ofelt 理论, 拟合出晶体场强度参数  $\Omega_t (t=2, 4, 6)$ :  $\Omega_2 = 5.321 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ ,  $\Omega_4 = 1.734 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ ,  $\Omega_6 = 2.889 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ 。荧光辐射寿命  $\tau_{\text{rad}}$  为 167.02  $\mu\text{s}$ , 计算的荧光分支比  $\beta$  为:  $\beta_1 = 36.03\%$ ,  $\beta_2 = 52.29\%$ ,  $\beta_3 = 11.15\%$ ,  $\beta_4 = 0.533\%$ 。这些良好的光谱性质表明 Nd : CaNb<sub>2</sub>O<sub>6</sub> 晶体将成为固态激光器中有潜力的激光增益介质。

**关键词** 材料; Nd : CaNb<sub>2</sub>O<sub>6</sub> 单晶; 吸收光谱; Judd-Ofelt 理论

**中图分类号** O782+.5; O734 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093606.1523

## Growth and Spectral Properties of Nd : CaNb<sub>2</sub>O<sub>6</sub> Crystal

Cheng Yan<sup>1</sup> Xin Zheng<sup>2</sup> Xu Xiaodong<sup>1</sup> Xu Jun<sup>3</sup> Zhou Shengming<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

<sup>2</sup> School of Information and Electric Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan, Shandong 250101, China

<sup>3</sup> Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China

**Abstract** New single crystal Nd : CaNb<sub>2</sub>O<sub>6</sub> is successfully grown by using the Czochralski method along the *c*-direction. Absorption spectra are measured at room temperature. Peak absorption cross section is calculated to be  $5.04 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$  with a broad FWHM of 8 nm at 808 nm. Based on Judd-Ofelt theory, the parameters of line strengths  $\Omega_t (t=2, 4, 6)$  are fitted and the values are  $\Omega_2 = 5.321 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ ,  $\Omega_4 = 1.734 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ , and  $\Omega_6 = 2.889 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ . The radiative lifetime is 167.02  $\mu\text{s}$ . The fluorescence branch ratios are calculated:  $\beta_1 = 36.03\%$ ,  $\beta_2 = 52.29\%$ ,  $\beta_3 = 11.15\%$ ,  $\beta_4 = 0.533\%$ . Good spectroscopic properties show that the Nd : CaNb<sub>2</sub>O<sub>6</sub> crystal is a potential laser gain medium of solid-state laser.

**Key words** materials; Nd : CaNb<sub>2</sub>O<sub>6</sub> single crystal; absorption spectra; Judd-Ofelt theory

## 1 引言

近年来,由于大功率激光二极管(LD)的发展和 LD 抽运固态激光器(DPSSL)整体设计的优化, DPSSL 广泛应用于光存储、数字视频技术、激光医疗和激光多媒体技术等方面<sup>[1]</sup>。激光晶体作为激光器的核心,是产生激光的重要物质。另外稀土 Nd<sup>3+</sup> 离子由于其丰富的离子能级,808 nm 的吸收峰与抽运源的抽运波长相匹配,以及较大的吸收和发射截面,成为激光晶体中普遍使用的激活离子<sup>[2]</sup>。Nd :

YVO<sub>4</sub> 晶体已经成为商用中小型激光器的主要材料,而 Nd : YAG 更适用于高功率 LD 抽运的固体激光器。但 Nd : YAG 晶体分凝系数小,生长时伴有应力核心<sup>[3]</sup>,吸收带宽较窄,在激光二极管抽运系统中需要严格的温度控制系统才能保证抽运波长与 Nd : YAG 激光晶体的吸收峰相吻合<sup>[4]</sup>。因此人们在改善 Nd : YAG 激光晶体的质量和性能的同时,也在积极地寻找其他性能优良的掺钕激光晶体。近年来,具有无序结构的红外宽光谱的晶体材料一直

收稿日期: 2008-08-08; 收到修改稿日期: 2008-11-27

基金项目: 国家自然科学基金(60544003, 60425516)资助项目。

作者简介: 程艳(1981-),女,博士研究生,主要从事激光材料的光谱和激光性能研究。E-mail: chengyan130@163.com

导师简介: 徐晓东(1979-),男,副研究员,主要从事晶体材料的生长、光谱以及激光性能研究。

E-mail: xdxu79@yahoo.com.cn

成为人们的研究热点。本文所研究的 Nd : CaNb<sub>2</sub>O<sub>6</sub> 晶体是一种新型的红外激光材料,最早的研究兴趣在于掺有稀土离子的 CaNb<sub>2</sub>O<sub>6</sub> 晶体用于全息照相技术<sup>[5]</sup>。在 CaNb<sub>2</sub>O<sub>6</sub> 基质晶体中掺入稀土离子时,稀土离子取代 Ca<sup>2+</sup> 离子格位。由于电荷补偿的影响,晶体中出现部分畸变结构,掺入的稀土离子和 Ca<sup>2+</sup> 离子的相互位置不固定。晶体中稀土离子具有无序结构,稀土离子的吸收和发射谱线都比较宽,可提高 LD 抽运的激光效率,有利于宽的波长调谐和锁模脉冲激光的输出。对于激光晶体来说,两个能级之间的跃迁几率、跃迁截面、辐射寿命、荧光分支比等(Judd-Ofelt)都是十分重要的光谱参数,但是它们的实验测定不太容易。本文报道了 Nd : CaNb<sub>2</sub>O<sub>6</sub> 晶体的生长,测量了该晶体的室温吸收光谱,根据 J-O 理论计算了晶体的吸收参数和发光参数,并对该晶体的光谱特性进行了分析,为下一步的激光特性研究打下基础。

## 2 实 验

### 2.1 晶体生长

采用 CaCO<sub>3</sub>, Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 化学试剂(纯度均为 99.999%)为原料,按适当的比例称取,经充分研磨混匀后,在液压机上压制成块,在马弗炉里烧制成料饼,然后放于铈坩埚内,采用提拉法生长晶体。生长单晶用的设备为西安理工大学生产的 DJL-50 单晶炉。温控装置为 EURO THERM 818 controller/programmer,精度 ±0.5 °C。籽晶采用经 X 射线衍射(XRD)仪精确定向端面法线方向为 [001] 的 CaNb<sub>2</sub>O<sub>6</sub> 单晶棒,晶体生长在高纯 N<sub>2</sub> + O<sub>2</sub> (约为 1%)气氛中进行。生长过程中,晶体的生长速度约为 1~2 mm/h,晶体的转动速度约为 5~15 r/m。晶体提脱后以 30~50 °C/h 的速率降温。图 1 为用提拉法生长的 Nd : CaNb<sub>2</sub>O<sub>6</sub> 晶体。沿 c 轴生长的晶体尺寸为 φ25 mm × 40 mm,质量超过

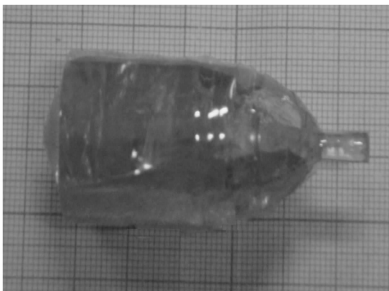


图 1 生长的 Nd : CaNb<sub>2</sub>O<sub>6</sub> 单晶照片

Fig. 1 Photograph of as-grown Nd : CaNb<sub>2</sub>O<sub>6</sub> single crystal

80 g。晶体呈淡蓝色,晶体在空气中约 1200 °C 下退火 10 h,颜色没变。

用 5 mW He-Ne 激光器照 Nd : CaNb<sub>2</sub>O<sub>6</sub> 单晶时,肉眼观察不到晶体内部有光束通过。这表明该晶体中没有散射颗粒,晶体有着较好质量可以进行激光实验。采用 HRXRD-D5005 型高分辨 X 射线衍射仪进一步检测晶体的质量。样品为两面抛光的 (001) 晶片,尺寸为 6 mm × 6 mm × 3 mm。HRXRD-D5005 型高分辨 X 射线衍射仪是以双晶衍射理论为基础的,其核心部件为四晶单色器,四晶单色器由两块高度完整的 U 形 Ge(220) 单晶组成。X 射线管为 Cu 靶,采用 CuK<sub>α1</sub>(λ = 0.1541 nm) 辐射,仪器的角度分辨率可达 0.0002°。管电压和管电流分别为 30 kV 和 30 mA。测量的扫描范围和步长为 0.2 s 和 0.0005° (1.8'')。图 2 为所测晶体 (001) 面的摇摆曲线。可以测得 (001) 面的半峰全宽为 20.30'', 峰形完整对称,无变形,没有劈裂。这表明沿 c 方向生长的晶体结构完好,晶体的质量较好。

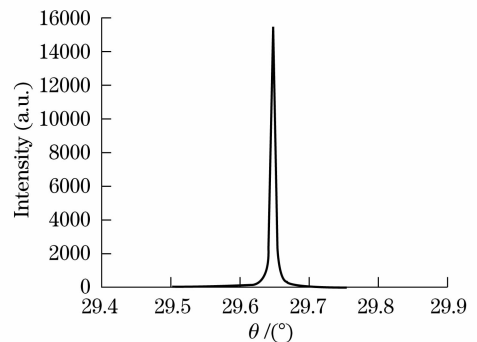


图 2 Nd : CaNb<sub>2</sub>O<sub>6</sub> 晶体 (001) 面的摇摆曲线  
Fig. 2 Rocking curve of Nd : CaNb<sub>2</sub>O<sub>6</sub> crystal along (001) face

### 2.2 组分分析与分凝系数

通过 ICP-AES 方法,测定了 Nd<sup>3+</sup> 在 Nd : CaNb<sub>2</sub>O<sub>6</sub> 晶体顶部的浓度,测试样品采用 Nd : CaNb<sub>2</sub>O<sub>6</sub> 晶体与籽晶接触处的晶块研磨成的细粉末。并计算了 Nd : CaNb<sub>2</sub>O<sub>6</sub> 晶体中 Nd<sup>3+</sup> 的分凝系数,测试及计算结果列于表 1,分凝系数计算公式为<sup>[6]</sup>

$$K_{\text{eff}} = \frac{K_0}{K_0 + (1 - K_0) \exp(-f/D)^{\delta_c}} = \frac{C_s}{C_m} \quad (1)$$

其中, C<sub>s</sub> 为生长初期晶体中 Nd<sup>3+</sup> 离子的浓度, C<sub>m</sub> 为多晶料中 Nd<sup>3+</sup> 离子的浓度。溶质边界层厚度 δ<sub>c</sub> = 1.61f<sup>1/6</sup> D<sup>1/3</sup> ω<sup>-1/2</sup>, D 为熔体中离子的扩散系数, K<sub>0</sub> 为平衡分凝系数, f 为提拉速度, ω 为晶转速度。可见有效分凝系数与 f 和 ω 相关。通过对晶体样品的组分分析,可以得到 Nd : CaNb<sub>2</sub>O<sub>6</sub> 单晶生长

过程中各离子的有效分凝系数。

表 1 Nd : CaNb<sub>2</sub>O<sub>6</sub> 晶体中 Nd<sup>3+</sup> 离子的有效分凝系数( $K_{\text{eff}}$ )

Sample	$c_0 / \%$	atom fraction / %			$c_{\text{top}} / \%$	$K_{\text{eff}}$
		Ca <sup>2+</sup>	Nb <sup>5+</sup>	Nd <sup>3+</sup>		
1% Nd : CaNb <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	1.0	14.2	60.8	0.61	1.03	1.03

从表 1 可以看出, Nd : CaNb<sub>2</sub>O<sub>6</sub> 晶体的 Nd<sup>3+</sup> 分凝系数为 1.03, 接近 1。这说明 Nd : CaNb<sub>2</sub>O<sub>6</sub> 晶体组分比较均匀, 暗示了该晶体将具有优良的光学性能。并且较大的分凝系数有利于实现高浓度 Nd<sup>3+</sup> 的掺杂。而薄片和波导激光器的设计往往要求激光增益介质具有高的掺杂浓度以获得高功率激光和改善热效应。所以该晶体可能适用于薄片和波导激光器。

### 2.3 吸收光谱测试

利用 Hitachi U-3500 型 IR-VIS-UV 分光光度计, 测定了 Nd : CaNb<sub>2</sub>O<sub>6</sub> 晶体的室温吸收谱(图 3(a)), 波长范围为 190~900 nm, 晶片厚度为 1 mm。同时还测量了 0.2 mol/L 的 NdCl<sub>3</sub> 溶液的室温吸收谱(图 3(b))。在 Nd : CaNb<sub>2</sub>O<sub>6</sub> 晶体中, Nd<sup>3+</sup> 离子有 7 个主要的吸收谱带, 16 个光谱支项, 分别对应 Nd<sup>3+</sup> 离子吸收能量后从基态 <sup>4</sup>I<sub>9/2</sub> 向不同激发态的跃迁。根据晶体的室温吸收光谱图 3(a) 可知, Nd : CaNb<sub>2</sub>O<sub>6</sub> 晶体主要有 3 个吸收带, 分别

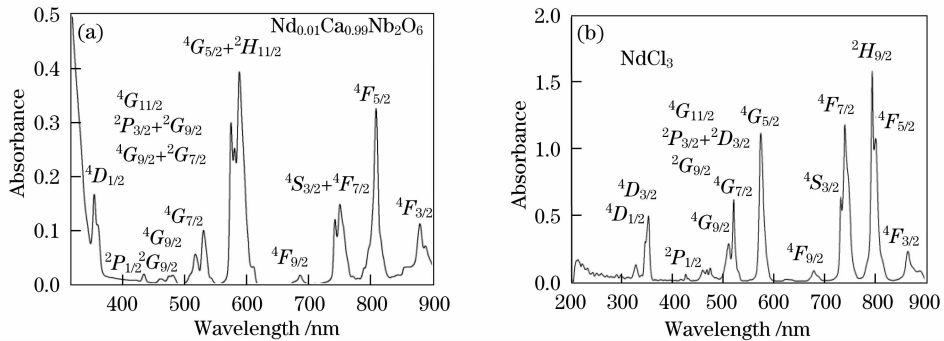


图 3 Nd : CaNb<sub>2</sub>O<sub>6</sub> 晶体(a)和 NdCl<sub>3</sub> 溶液(b)的吸收光谱

Fig. 3 Absorption spectra of Nd : CaNb<sub>2</sub>O<sub>6</sub> crystal (a) and NdCl<sub>3</sub> solution (b)

### 3 晶体光谱参数的计算

已知基质晶体在该波长的折射率为 2.07~2.2<sup>[7]</sup>。根据 Judd-Ofelt 理论<sup>[8]</sup>, 可计算出晶体中 Nd<sup>3+</sup> 离子的吸收谱线强度

$$S_{\text{exp}}(J - J') = \frac{3ch(2J+1)}{8\pi 3e^2 N} \times \frac{9n}{(n^2+2)^2} \cdot \frac{2.3}{L\lambda} \int A(\lambda) d\lambda, \quad (2)$$

对应中心波长 588 nm, 750 nm 和 808 nm, 对应 Nd<sup>3+</sup> 离子的基态 <sup>4</sup>I<sub>9/2</sub> 到 <sup>4</sup>G<sub>5/2</sub> + <sup>4</sup>G<sub>7/2</sub>, <sup>44</sup>F<sub>7/2</sub> + <sup>4</sup>S<sub>3/2</sub> 和 <sup>4</sup>I<sub>9/2</sub> → <sup>4</sup>F<sub>5/2</sub> + <sup>2</sup>H<sub>9/2</sub> 的跃迁。该晶体在 808 nm 的吸收带宽为 8 nm, 较长的吸收线宽适于商业高功率 AlGaAs 激光二极管抽运。计算了 3 个波长的吸收截面, 晶体在 588 nm 处的吸收截面最大, 达到  $5.899 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ , 但是由于目前缺少此发射波长的大功率商用化抽运源, 因此难以利用; 808 nm 处的吸收截面为  $5.04 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ , 且与商业化的 LD 抽运源相匹配, 因此可以选用该波长作为抽运波长。

通过对 Nd<sup>3+</sup> 在溶液中以及在晶体中所测量的室温吸收谱的比较, 发现两个吸收谱形基本相同。这是由于 Nd<sup>3+</sup> 离子 4f 电子受到屏蔽作用, 其特定的能级结构受晶体场的影响较小, 致使在不同基质中 Nd<sup>3+</sup> 离子的发射或吸收波长一般变化不大。

两谱图最大的区别在于, 溶液中 Nd<sup>3+</sup> 离子在 585 nm 附近的强吸收峰是单峰, 而在晶体的室温吸收谱上却分裂为 2 重峰。这是由于晶体场作用产生的 Stark 能级分裂(即处于较低对称性的配位场中的 Nd<sup>3+</sup> 离子, 其光谱支项 <sup>4</sup>G<sub>5/2</sub> 的 Stark 分裂造成的), 而非离子的本征跃迁, 弱晶场对 Stark 能级微扰的非均匀性说明了钕离子的外场是非球对称的。同时由于克拉默斯(Kramers)简并, 故 Nd<sup>3+</sup> 能态的 Stark 劈裂比期望值  $(2J+1)/2$  要少。

式中  $e$  为电子的电量,  $c$  为真空中的光速,  $h$  为普朗克常数,  $L$  和  $N$  分别为样品厚度和晶体中 Nd<sup>3+</sup> 离子的浓度,  $\bar{\lambda}$  为跃迁平均波长,  $n$  为基质晶体在该波长的折射率,  $J$  和  $J'$  为跃迁初态和末态的总量子数,  $A$  为吸光度。

另外, 理论谱线强度可表示为

$$S(J \rightarrow J') = \sum_{\lambda=2,4,6} \Omega_{\lambda} | \langle 4f^n \psi, J \times \| U^{(\lambda)} \| 4f^n \psi', J' \rangle |^2, \quad (3)$$

式中 3 个参数  $\Omega_\lambda$  与  $J$  无关, 只含晶体场参数, 故可作为光谱计算中不同基质的可调节参量。 $\langle \| U^{(\lambda)} \| \rangle$  为约化矩阵元, 本文采用文献[2]中的值。

由计算出的吸收谱线强度及公式(3), 用最小二乘法拟合出光谱的晶体场调节参数  $\Omega_2 = 5.321 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ ,  $\Omega_4 = 1.734 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ ,  $\Omega_6 = 2.889 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ , 数据拟合的方差为  $1.97 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$ 。由于磁偶极跃迁对谱线强度贡献不大, 与电场相比较要弱近一个数量级, 所以在再计算时将其忽略不计。晶体中  $\text{Nd}^{3+}$  离子的各实验和理论吸收谱线强度如表 2 所示。

表 2 Nd :  $\text{CaNb}_2\text{O}_6$  晶体的谱线强度Table 2 Line intensity of the absorption spectrum of Nd :  $\text{CaNb}_2\text{O}_6$  crystal

Excited states (Ground state $^4I_{9/2}$ )	$\bar{\lambda}$ /nm	$S_{\text{mea}}(J \rightarrow J') / 10^{-20} \text{ cm}^2$	$S_{\text{cal}}(J \rightarrow J') / 10^{-20} \text{ cm}^2$
$^4D_{3/2} + ^4D_{5/2} + ^2I_{11/2} + ^4D_{1/2} + ^2I_{15/2}$	355	1.00805	1.07644
$^2P_{1/2}$	436	0.08094	0.06363
$^2P_{2/3} + ^2G_{9/2} + ^2D_{3/2} + ^4G_{11/2}$	478	0.29625	0.16979
$^4G_{7/2} + ^4G_{9/2}$	530	0.59412	0.97181
$^4G_{5/2} + ^2G_{7/2}$	588	5.59305	5.59096
$^2H_{11/2}$	632	0.01263	0.03526
$^4F_{9/2}$	686	0.10828	0.14122
$^4F_{7/2} + ^4S_{3/2}$	750	1.80421	1.98913
$^4F_{5/2} + ^2H_{9/2}$	808	2.20614	1.95961
$^4F_{3/2}$	878	0.66021	0.55617

表 3 由  $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{J'}$  跃迁的发光参数Table 3 Luminescence parameters for the radiation  $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{J'}$  transition

Final state	Central wavelength $\bar{\lambda}$ /nm	$S_{\text{cal}}(J \rightarrow J') / 10^{-20} \text{ cm}^2$	$A(J \rightarrow J') / \text{s}^{-1}$	$\tau_{\text{rad}} / \mu\text{s}$	$\beta_{J'} / \%$
$^4I_{9/2}$	880	0.5606	1270.978		36.026
$^4I_{11/2}$	1062	1.4221	1844.877	167.02	52.29
$^4I_{13/2}$	1340	0.6125	393.3253		11.149
$^4I_{15/2}$	1880	0.0809	18.81113		0.533

#### 4 与 Nd : YAG 晶体的光谱参数比较

为了便于比较, 同时收集了 Nd : YAG 晶体的一些基本光谱性能数据, 见表 4 所示<sup>[9~11]</sup>。

与  $\text{Nd}^{3+}$  离子在 YAG 基质中的光谱参数相比,  $\text{Nd}^{3+}$  离子在  $\text{CaNb}_2\text{O}_6$  晶体中的吸收线宽约为在 YAG 晶体中的 8 倍大小。这与  $\text{CaNb}_2\text{O}_6$  晶体提供的晶格场有关,  $\text{CaNb}_2\text{O}_6$  晶体中畸变  $\text{Ca}^{2+}$  离子格位存在使得  $\text{Nd}^{3+}$  离子与其周围离子的晶体场作用存在一定的变数, 这使得 Nd :  $\text{CaNb}_2\text{O}_6$  晶体的吸收光谱非均匀加宽。另外, 对于  $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$  跃迁, Nd :  $\text{CaNb}_2\text{O}_6$  晶体具有比 Nd : YAG 晶体更大的荧光分支比。这些结果表明 Nd :  $\text{CaNb}_2\text{O}_6$  晶体是一

种有前景的可调谐激光晶体。

$$A(J \rightarrow J') = \frac{8\pi^2 e^2 n^2}{mc\lambda^2} f_{J,J'}, \quad (4)$$

$$\tau_{\text{rad}} = \frac{1}{\sum_{J'} A(J \rightarrow J')}, \quad (5)$$

$$\beta_{J'} = \frac{A(J \rightarrow J')}{\sum_{J'} A(J \rightarrow J')}. \quad (6)$$

通过(4)~(6)式, 可计算出在电偶极近似模式下的辐射跃迁几率、辐射寿命和荧光分支比, 列于表 3。

种有前景的可调谐激光晶体。

表 4 Nd :  $\text{CaNb}_2\text{O}_6$  与 Nd : YAG 晶体光谱参数的比较Table 4 Spectroscopic parameters of Nd :  $\text{CaNb}_2\text{O}_6$  and Nd : YAG crystals

Contents	Nd : YAG <sup>[9~11]</sup>	Nd : $\text{CaNb}_2\text{O}_6$
$\text{Nd}^{3+}$ concentration / $10^{20} \text{ cm}^{-3}$	1.38	1.03
Absorption wavelength /nm	807	808
Absorption FWHM /nm	1	8
Absorption coefficient / $\text{cm}^{-1}$	11.8	5.26
Radiative lifetime / $\mu\text{s}$	518	167.02
Fluorescence branch ratio ( $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ )	0.50	0.52

## 5 结 论

采用提拉法成功地生长出尺寸  $\phi 25 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ , 重 80 g 的新型 Nd : CaNb<sub>2</sub>O<sub>6</sub> 单晶。晶体中 Nd<sup>3+</sup> 离子的分凝系数为 1.03。分析了晶体的室温吸收谱, 结果表明该晶体在 808 nm 左右有 8 nm 的宽吸收带, 吸收截面为  $5.04 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ 。在 Nd<sup>3+</sup> : CaNb<sub>2</sub>O<sub>6</sub> 晶体中, Nd<sup>3+</sup> 离子的光谱支项 <sup>4</sup>G<sub>5/2</sub> 由于晶体场作用而产生 Stark 分裂, 辐射跃迁发生在 Stark 能级之间, 光谱线的数目增多; 同时具有奇数电子的 Nd<sup>3+</sup> 离子产生了 Kramers 简并, 故能级分裂数目少。

根据 J-O 理论, 拟合了该晶体的晶体场参数并计算了部分光谱参数。结果表明 <sup>4</sup>F<sub>3/2</sub> 能级荧光辐射寿命为 167.02  $\mu\text{s}$ , <sup>4</sup>F<sub>3/2</sub> → <sup>4</sup>I<sub>11/2</sub> 的荧光分支比为 52.29%, 可采用 AlGaSn 激光二极管作为抽运源, 实现 1.06  $\mu\text{m}$  的激光输出。Nd : CaNb<sub>2</sub>O<sub>6</sub> 晶体具有宽的吸收带宽、长荧光寿命和大的荧光分支比等优点, 适于激光二极管抽运系统, 且可用作可调谐激光增益介质。因此, Nd : CaNb<sub>2</sub>O<sub>6</sub> 晶体是一种有前景的激光增益介质。

## 参 考 文 献

- 1 Lin Qiang, Wang Xiantao, Zhu Jianqiang. Balance of asymmetry of thermal beam distortion in laser diode end-pumped Nd : YVO<sub>4</sub> solid state lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(10): 1371~1374
- 林 强, 王宪涛, 朱健强. 激光二极管端面抽运 Nd : YVO<sub>4</sub> 固体激光器热致光束畸变非对称的平衡[J]. *中国激光*, 2007, **34**(10): 1371~1374
- 2 A. A. Kaminskii. *Laser Crystal* [M]. Beijing: Science Press, 1981
- 卡明斯基. 激光晶体[M]. 北京: 科学出版社, 1981
- 3 Jiang Benxue, Zhao Zhiwei, Xu Jun *et al.*. Growth and spectral properties of high average power solid state laser (HAP SSL) crystal Nd : Gd<sub>3</sub> Ga<sub>5</sub> O<sub>12</sub> [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(12): 1465~1468
- 姜本学, 赵志伟, 徐 军 等. 高功率固体激光晶体 Nd : Gd<sub>3</sub> Ga<sub>5</sub> O<sub>12</sub> 的生长和光谱性能的研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(12): 1465~1468
- 4 Zhu Yueqin, Hang Yin, Zhang Lianhan *et al.*. Growth and Spectroscopic properties of Nd : (La, Sr)(Al, Ta)O<sub>3</sub> crystal [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(1): 107~110
- 朱月芹, 杭 寅, 张连翰 等. Nd : (La, Sr)(Al, Ta)O<sub>3</sub> 晶体的生长及光谱性能的研究[J]. *中国激光*, 2006, **33**(1): 107~110
- 5 J. P. Cummings, S. H. Simonsen. The crystal structure of calcium niobate (CaNb<sub>2</sub>O<sub>6</sub>) [J]. *Am. Mineral*, 1970, **55**: 90~97
- 6 Zhangke Kecong, Zhang Lehui. *Science and Technology of Crystal Growth* [M]. Beijing: Science Press, 1997
- 张克从, 张乐惠. 晶体生长科学与技术[M]. 北京: 科学出版社, 1997
- 7 A. A. Ballman, S. P. S. Porto, A. Yariv. Calcium niobate Ca (NbO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>-A new laser host crystal [J]. *J. Appl. Phys.*, 1963, **34**(11): 3155~3156
- 8 Zhang Siyuan, Bi Xianzhang. *Rare Spectral Theory* [M]. Jilin: Science Technology Press, 1991. 155~188
- 张思远, 毕宪章. 稀土光谱理论[M]. 吉林: 科学技术出版社, 1991. 155~188
- 9 W. F. Krupke. Radiative transition probabilities within the 4f<sup>3</sup> ground configuration of Nd : YAG. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1971, **QE-7**(4): 153~159
- 10 W. Koehner. *Solid State Laser Engineering* [M]. New York: Springer Verlag, 1992
- 11 Mao Yanli, Qiu Hongwei, Xu Jun *et al.*. Spectra and laser characteristics of high-doped Nd : YAG laser crystals [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(10): 1264~1267
- 毛艳丽, 邱宏伟, 徐 军 等. 高浓度掺钕钇铝石榴石 (Nd : YAG) 晶体的光谱与激光特性[J]. *光学学报*, 2001, **21**(10): 1264~1267