

Nd:Lu₃Al₅O₁₂ 晶体的生长与光谱性能研究

王晓丹¹, 徐晓东², 臧涛成¹, 马春兰¹, 赵志伟², 徐军³

(1. 苏州科技学院 物理科学与技术系, 苏州 215009; 2. 中国科学院 上海光学精密机械研究所, 上海 201800; 3. 中国科学院 上海硅酸盐研究所, 上海 200050)

摘要: 采用提拉法生长 Nd³⁺ 掺杂浓度为 1at% 高质量的 Nd:Lu₃Al₅O₁₂ (Nd:LuAG) 晶体. 对晶体在不同气氛下退火的光谱性能进行了表征. 研究发现:256nm 处的吸收峰是由 Fe³⁺ 引起的;467 和 518nm 处的吸收峰分别由 O⁻ 心和 F⁺ 心引起. 计算出 809nm 处的吸收截面为 $1.86 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$. 利用 J-O 理论拟合出 Nd:LuAG 晶体的强度参数 Ω_2 、 Ω_4 和 Ω_6 分别为 0.71×10^{-20} 、 1.13×10^{-20} 和 $4.36 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$; 计算出 Nd³⁺ $^4F_{3/2}$ 能级到不同下能级的跃迁几率、荧光分支比、辐射寿命和发射截面等光谱参数, 并对结果进行了相应的分析. 结果表明, Nd:LuAG 晶体是二极管抽运固态激光器中很有应用潜力的增益介质.

关键词: Nd:LuAG 晶体; 吸收光谱; J-O 理论; 荧光光谱

中图分类号: TN244

文献标识码: A

Growth and Spectral Properties of Nd:Lu₃Al₅O₁₂ Crystal

WANG Xiao-Dan¹, XU Xiao-Dong², ZANG Tao-Chen¹, MA Chun-Lan¹, ZHAO Zhi-Wei², XU Jun³

(1. Department of physics, University of Science and Technology of Suzhou, Suzhou 215009, China; 2. Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China; 3. Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

Abstract: High quality Nd:Lu₃Al₅O₁₂ (Nd:LuAG) crystal doped with 1at% Nd³⁺ was grown by the Czochralski method. The spectral properties of the crystal annealed in different atmosphere were characterized. The experiment indicates that the absorption band in 256nm, 467nm and 562nm are connected with Fe³⁺, O⁻, and F⁺, respectively. The absorption cross section at 809nm is $1.86 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$. The spectral parameters are calculated by Judd-Ofelt theory, and the intensity parameters Ω_2 , Ω_4 and Ω_6 are estimated to be $0.71 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, $1.13 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, and $4.36 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, respectively. The calculated radiative probabilities, branch ratios, radiative lifetime and emission cross section are evaluated for the $^4F_{3/2}$ excited state by using the calculated intensity parameters. The results indicate that Nd:LuAG crystal is a promising material for solid-state laser application.

Key words: Nd:LuAG single crystal; absorption spectrum; J-O theory; fluorescence spectrum

高功率大能量固体激光器在光电对抗、激光致盲、材料加工等领域有广泛的用途, 并可以应用到高能激光武器中, 对于国防事业起着重要的作用^[1-3]. 以 Nd³⁺ 为代表的四能级系统晶体, 激光下能级与基态相距较远, 泵浦阈值较低. 晶体的吸收和发射截面都较大, 是一种非常好的激光增益介质, 如 Nd:YAG, Nd:YVO₄, Nd:GdVO₄ 和 Nd:LuVO₄ 晶体^[4-5], 广泛应用于固体激光器中. 2005 年美国诺格公司利用二极管泵浦 Nd:YAG 板条固体激光器, 实现了 25kW 的连续

激光输出, 2008 年演示验证平均功率 100kW 的加速固体激光器^[6].

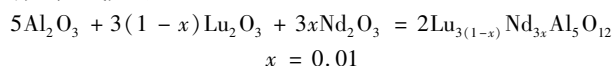
Lu₃Al₅O₁₂ (LuAG) 晶体属立方晶系, Ia3d 空间群, 晶胞参数为 1.190nm. 晶体具有光学各向同性、硬度高、热导率高、热膨胀系数小; 抗裂强度大、弹性模量高等特点, 具有良好的机械和热力学性能, 能够容许高平均功率下工作. 因此, 掺 Nd³⁺ 的 LuAG 晶体将是应用于高能激光器中很有发展潜力的增益介质, 而有关 Nd:LuAG 晶体的报道却很少. 2009 年, 本课题组

徐晓东等报道了 Nd: LuAG 晶体的激光性能^[7]. 本工作主要研究了 Nd: LuAG 晶体的光谱性能, 通过对吸收光谱和荧光光谱的分析, 跃迁几率、辐射寿命、荧光分之比等光谱参数的计算, 表征晶体的激光性能.

1 实验

1.1 晶体生长和样品准备

晶体生长所用的原料为 Lu_2O_3 (99.999%), Al_2O_3 (99.999%), Nd_2O_3 (99.999%), 整个固相反应的方程式如下:



晶体生长采用中频感应提拉法, 铱坩锅, 中频感应加热, 选择〈111〉方向的纯 LuAG 晶体作为籽晶. 生长过程中, 转速为 15~30r/min, 拉速为 1~3mm/h, 高纯氮气作为保护气体. 晶体的尺寸为 $\phi 27\text{mm} \times 82\text{mm}$, 如图 1 所示. 晶体为粉红色, 形状完整, 无宏观缺陷, 晶体内部亦无散射颗粒.

1.2 双晶摇摆曲线及分凝系数的测试

双晶摇摆曲线的测量选用高分辨 X 射线双晶衍射仪, 衍射源为 $\text{CuK}\alpha 1$, 采用的测试仪器为 PHILIPS X'Pert-MRD. 测试的晶片为准确的〈111〉方向切片. Nd 在 LuAG 晶体中的分凝系数的测量由电感耦合等离子体原子发射光谱(ICP-AES, 所用仪器型号为 Advantage, 美国 Thermol 公司)方法测得.

1.3 吸收光谱、荧光光谱和荧光寿命的测试

晶体的吸收光谱是在 V-570 type ultraviolet/visible/near-IR spectrophotometer 上测定的, 测试范围为 250~1100nm, 分辨率为 1nm. 荧光光谱由 JOBIN-YVON 公司生产的 TRIAX 550 型光谱仪测得, 抽运波长为 808nm, 测试范围为 850~1400nm, 分辨率为 1nm, 同时测试了在 808nm 激发下, 由 Tektronix TDS 420 示波器记录了 Nd^{3+} 离子的荧光寿命. 光谱测试所用样品有三种: 原始生长未退火晶体样品, 经 1600℃ (空气气氛), 48h 退火后的晶体样品, 经 1600℃ (氢

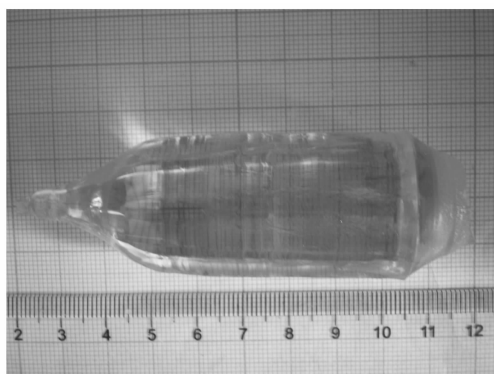


图1 提拉法生长的 1at% Nd: LuAG 晶体

Fig. 1 1at% Nd: LuAG crystal grown by Czochralski method

气气氛), 48h 退火后的晶体样品, 三种样品均双面抛光, 其尺寸为 $10\text{mm} \times 10\text{mm} \times 1\text{mm}$. 所有测试均在室温下进行.

2 结果与讨论

2.1 Nd: LuAG 晶体的结晶质量

对 Nd: LuAG 晶片进行结晶质量检测, 所测得的双晶摇摆曲线如图 2 所示, 其半高宽为 15.6'', 表明晶体具有较好的结晶质量.

2.2 Nd: LuAG 晶体的分凝系数

通过 ICP-AES 方法, 测得 $C_{\text{top}} = 0.14\text{at\%}$, $C_0 = 1\text{at\%}$ (C_{top} 表示生长初期晶体中 Nd^{3+} 的浓度, C_0 为 Nd^{3+} 的初始浓度), 通过式 $k_m = C_{\text{top}}/C_0$ 可以计算出 Nd^{3+} 在 Nd: LuAG 晶体中的分凝系数为 0.14. 由于 Nd^{3+} 与 Lu^{3+} 半径相差较大, 较难进入 LuAG 晶格, 所以分凝系数较小.

2.3 Nd: LuAG 晶体的光谱性能

2.3.1 Nd: LuAG 晶体的吸收光谱

测试了常温下 Nd: LuAG 晶体在不同气氛下退火的样品的吸收光谱, 如图 3 所示, 测试范围为 250~1100nm. 图中 Nd: LuAG 晶体的吸收峰对应的是从基态 $^4I_{9/2}$ 到激发态的跃迁. 589、749 和 809nm 的吸收峰分别对应于 $^4I_{9/2} \rightarrow ^4G_{5/2}$ 、 $^4G_{7/2}$ 、 $^4I_{9/2} \rightarrow ^4F_{7/2}$ 和 $^4S_{3/2}$ 和 $^4I_{9/2} \rightarrow ^4F_{5/2}$ 和 $^2H(2)_{9/2}$ 的跃迁. 809nm 处的吸收主峰半高宽为 5nm, 与商用的 AlGaAs 激光二极管的发射波长匹配良好. 809nm 处的吸收截面为 $1.86 \times 10^{-20}\text{cm}^2$.

不同气氛退火对吸收光谱的吸收峰的峰形和强度也有影响, 从图 3 中可以看出, 与原始生长的晶片相比, 空气和氢气气氛下退火的晶片在紫外和可见区域光谱的透过率增加, 红外区域光谱基本相同. 可见经过退火, 晶体的质量有所提高. 为了详细分析退火气氛对吸收光谱的影响, 计算出空气气氛退火与原始

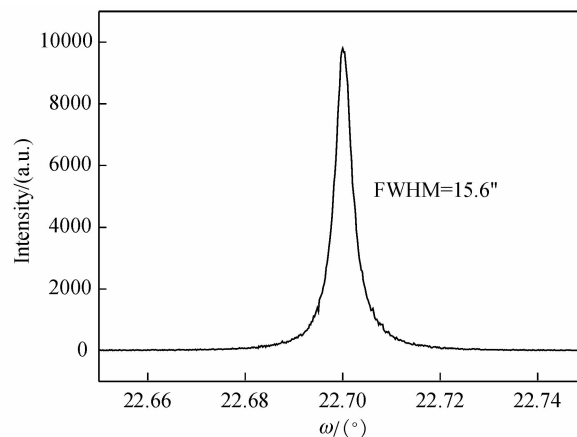


图2 Nd: LuAG 晶体的双晶摇摆曲线

Fig. 2 Twin rocking curve of Nd: LuAG crystal

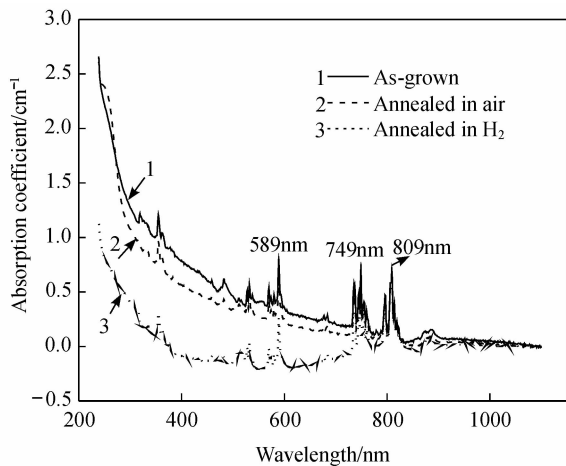


图3 Nd:LuAG 晶体不同气氛下退火的吸收光谱图

Fig. 3 Absorption spectra of the Nd: LuAG crystal annealed in different atmosphere

生长的晶片的差吸收光谱,氢气气氛退火与原始生长的晶片的差吸收光谱如图4(a)和4(b)所示.从图中可以看出,图4(a)中的差吸收光谱在256nm处出现了较强的吸收峰,而图4(b)中差吸收光谱在256nm处出现凹穴,此缺陷的形成可能是由于Fe³⁺、Fe²⁺的存在而造成的^[8-10].文献[8-10]在生长完成的晶体中利用微量元素检测技术及电子自旋共振和光谱等手段检测到Fe³⁺的存在,分析这是由于高纯氧化物中会存在一些共生的痕量杂质离子.256nm左右为Fe³⁺吸收峰,氧气退火使Fe³⁺增加而Fe²⁺减少,故吸收峰增强,而氢气退火使Fe³⁺减少而Fe²⁺增加,故吸收峰减弱直至消失.在图4(b)的差吸收光谱中,467和518nm处出现了吸收峰,467nm处的吸收峰应为O⁻心的吸收,而518nm的吸收峰应为F⁺心的吸收^[11-12].在提拉法生长晶体过程中,采用高纯氮的惰性气氛作为保护气体,因此在晶体生长过程中,外界缺氧形成了较多氧离子空位.这些空位将成为电子的陷阱,生成F⁺心,电子的来源可能是从邻近格位的O²⁻而来,因此晶体中存在着相当数量的O⁻心.经空气气氛退火,晶体处于氧化气氛中,使得氧空位减少,O⁻心和F⁺心的缺陷有所减少,因此467和518nm处的吸收峰减弱.而经氢气气氛退火,还原气氛加剧了缺陷的形成,因此467和518nm处的吸收峰明显增强.综上,不同气氛退火对Nd:LuAG晶体紫外和可见光区域的光谱性能影响较大,在实际应用中要选择合适的退火气氛.

2.3.2 Judd-Ofelt 理论分析

(1) 谱线强度计算

Judd-Ofelt(简称J-O)理论是一种比较有效的计算稀土离子发光强度的方法,被人们广泛使用.它是通过吸收光谱来计算强度参数($\Omega_2, \Omega_4, \Omega_6$),进而计算电偶极跃迁、磁偶极跃迁几率(较电偶极跃迁小得

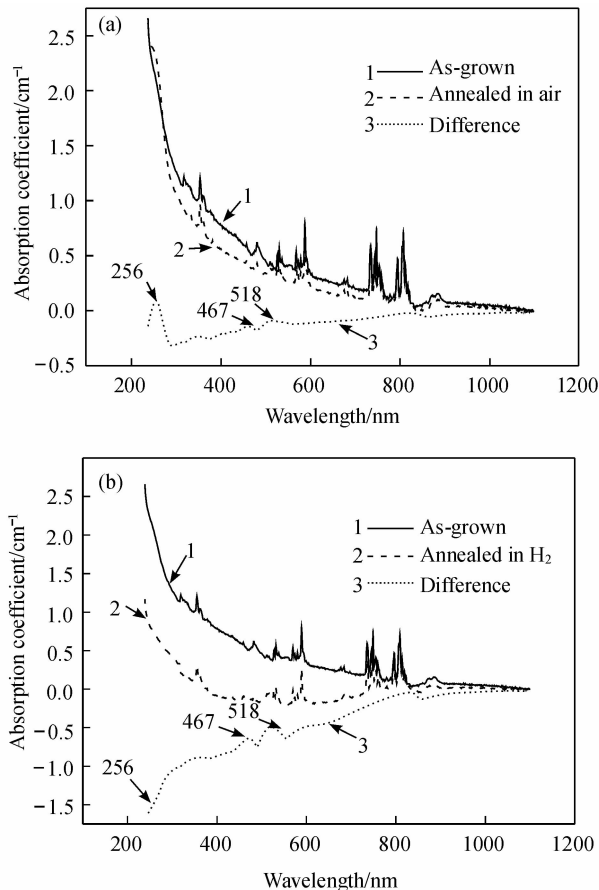


图4 Nd:LuAG 晶体不同气氛下退火的吸收光谱图及差吸收谱

Fig. 4 Absorption spectra and differential absorption spectra of Nd: LuAG single crystal annealed in different atmosphere

(a) Annealed in air; (b) Annealed in H₂

多,常可忽略)、荧光分支比、辐射寿命、发射截面等光谱参数.根据Nd:LuAG晶体的吸收光谱,如图3中的曲线1,运用J-O理论进行分析.在计算J-O参量时,需要考虑吸收光谱中存在的七个吸收带.计算实验得到的吸收光谱谱线强度公式为:

$$S_{\text{meas}}(J, J') = \frac{3ch(2J+1)}{8\pi^3 C_0 e^2 \bar{\lambda}} \frac{9n}{(n^2+2)^2} \int \alpha(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

其中, e 为电子质量, c 为光速, C_0 为离子格位浓度, $\bar{\lambda}$ 为 $J \rightarrow J'$ 跃迁平均波长, n 为 $\bar{\lambda}$ 处晶体的折射率, $\int \alpha(\lambda) d\lambda$ 由吸收光谱获得.

根据J-O理论模型,稀土离子 $4f^N$ 电子组态 SLJ 能级到 $S'L'J'$ 跃迁的谱线强度为:

$$S_{\text{calc}}(J, J') = \sum_{i=2,4,6} \Omega_i |\langle S, L, J \| U^{(i)} \| S', L', J' \rangle|^2 \quad (2)$$

其中 $U^{(i)}$ 为单位张量算符约化矩阵元,一般离子的约化矩阵元随基质材料的变化变化不大.

令公式(1)与(2)相等,采用最小二乘法进行拟合可以得到Nd:LuAG晶体的强度参量,如表1所示.一般来说,J-O参数 Ω_2 反映晶体结构和配位对称性、

表1 Nd:LuAG 晶体与 Nd³⁺ 掺杂其它晶体强度参数的比较
Table 1 Comparison of the intensity parameters of other Nd³⁺ doped crystals

Crystals	$\Omega_2/(\times 10^{-20}, \text{cm}^2)$	$\Omega_4/(\times 10^{-20}, \text{cm}^2)$	$\Omega_6/(\times 10^{-20}, \text{cm}^2)$	References
LuAG	0.71	1.13	4.36	This work
YAG ^[14]	0.20	2.70	5.00	[14]
Ca ₃ Sc ₂ Ge ₃ O ₁₂ ^[15]	0.99	4.24	7.14	[15]
YAl ₃ (BO ₃) ₄ ^[16]	3.09	5.04	3.11	[16]
KY(WO ₄) ₂ ^[17]	8.80	3.11	3.16	[17]
KLa(MoO ₄) ₂ ^[18]	18.50	4.66	4.49	[18]

有序性等, Ω_2 越大, 晶体的共价性越强, 反之, 离子性越强. 从表 1 中可以看出, 得到的 Ω_2 比其它的石榴石晶体(YAG)要大. Ω_4/Ω_6 的值与奇晶场项的大小及跃迁分支比密切相关, 比值越大说明晶场的五次项相对于晶场的三次项较小, 研究表明, $\Omega_4/\Omega_6 > 1$, 0.9 μm 处的荧光分支比要比 1.06 μm 处的大, $\Omega_4/\Omega_6 < 1$, 0.9 μm 处的荧光分支比要比 1.06 μm 处的小, 计算 $\Omega_4/\Omega_6 = 0.26 < 1$.

实验值与理论值的误差由下面的均方差公式(3)给出^[13]:

$$rms\Delta S = \sqrt{\frac{\sum (\Delta S)^2}{N_{\text{transition}} - 3}} \quad (3)$$

式中 ΔS 为实验谱线强度与计算谱线强度的差值, $N_{\text{transition}}$ 为拟合能级跃迁. 由公式计算得 $rms\Delta S = 2.53 \times 10^{-21} \text{cm}^2$.

(2) 其他 J-O 参数计算

根据 J-O 理论, 可以通过上述的强度参数 $\Omega_{2,4,6}$ 及公式(2), 计算跃迁的振荡强度 f 、电偶极辐射跃迁几率 A 、荧光分支比 β 和辐射寿命 τ_{rad} 等.

从 J 到 J' 态的跃迁振子强度 f :

$$f = \frac{8\pi^2 mc}{3h(2J+1)\lambda} \frac{(n^2+2)^2}{9n} S_{\text{calc}}(J, J') \quad (4)$$

根据吸收光谱确定的跃迁实验振子强度 f_{exp}

$$f_{\text{exp}} = \frac{mc^2}{\pi e^2 N_0 \lambda^2} \int \alpha(\lambda) d\lambda \quad (5)$$

电偶极辐射跃迁几率 A :

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

荧光分支比 β :

$$\beta = \frac{A(J, J')}{\sum A(J, J')} \quad (7)$$

辐射寿命 τ_{rad} :

$$\tau_{\text{rad}} = \frac{1}{A(J, J')} \quad (8)$$

Nd:LuAG 晶体实验和理论计算的跃迁振子强度参数如表2所示. Nd:LuAG 晶体中计算得到的 Nd³⁺ 从激光上能级 $^4F_{3/2}$ 到不同下能级 4I 的跃迁几率、荧光分支比和辐射寿命等数据如表 3 所列. 从表中可以看出, Nd:LuAG 晶体的辐射寿命达到 345 μs , 比 Nd:LuVO₄ 晶体的 135 μs ^[19], Nd:YVO₄ 晶体的 100 μs ^[20] 都要大. $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ 的荧光分支比最大, 晶体将发射 1065nm 左右的激光.

2.3.3 Nd:LuAG 晶体的荧光光谱与荧光寿命

Nd:LuAG 晶体的荧光光谱和荧光衰减曲线如

表2 Nd:LuAG 晶体实验和理论计算的跃迁振子强度比较
Table 2 The experimental and calculated oscillator strengths of Nd:LuAG

Excited states (Ground state $^4I_{9/2}$)	$\bar{\lambda}/\text{nm}$	$f_{\text{exp}}^{\text{cal}}$ ($\times 10^{-6}$)	$f_{\text{cal}}^{\text{cal}}$ ($\times 10^{-6}$)
$^4F_{3/2}$	885	1.540	1.070
$^4F_{5/2} + ^2H_{9/2}$	808	6.930	5.920
$^4F_{7/2} + ^4S_{3/2}$	747	6.840	7.440
$^4F_{9/2}$	680	0.504	0.538
$^4G_{5/2} + ^2G_{7/2}$	581	5.580	5.420
$^2K_{13/2} + ^4G_{7/2} + ^4G_{9/2}$	534	2.800	3.010
$^2K_{15/2} + ^2G_{9/2} + ^2D_{3/2} + ^4G_{11/2}$	484	0.863	0.821
$^4D_{3/2} + ^4D_{5/2} + ^2I_{11/2} + ^4D_{1/2} + ^2I_{15/2}$	354	3.910	4.700
$^2I_{13/2} + ^4D_{7/2} + ^2L_{17/2}$	321	1.920	0.322

表3 Nd:LuAG 晶体中计算的 Nd³⁺ $^4F_{3/2}$ 能级到不同下能级的跃迁几率、荧光分支比和辐射寿命

Table 3 Calculated radiative probabilities, radiative branching ratios and radiative time for the emissions from the $^4F_{3/2}$ level of Nd³⁺ in LuAG

Final State	A/s^{-1}	β	$\tau/\mu\text{s}$
$^4I_{9/2}$	770.0	0.266	345
$^4I_{11/2}$	1702.1	0.587	
$^4I_{13/2}$	406.9	0.140	
$^4I_{15/2}$	20.3	0.007	

图5所示,从图5(a)中可以看出,在860~950、1050~1130和1310~1360nm处的荧光峰对应于 $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$ 、 $^4I_{11/2}$ 和 $^4I_{13/2}$ 的跃迁.主要荧光峰出现在1065nm附近,为 $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ 的能级跃迁.测量了Nd:LuAG晶体 $^4F_{3/2}$ 能级荧光衰减曲线,如图5(b)所示,通过数据拟合得到 $^4F_{3/2}$ 能级的荧光寿命为277 μ s.通过J-O理论计算得到 $^4F_{3/2}$ 能级的辐射寿命(τ_r)为345 μ s,因此, $^4F_{3/2}$ 能级的发光量子效率 $\eta = 80.3\%$.

Nd:LuAG晶体的受激发射截面可由荧光光谱结合公式(9)计算得出.

$$\sigma_{em}(\lambda) = \frac{\lambda^5 \beta_{JF} I(\lambda)}{8\pi n^2 c \tau_r \int I(\lambda) \lambda d\lambda} \quad (9)$$

其中 λ 是发射波长, $I(\lambda)$ 是Nd³⁺在不同波长处的发射强度, τ_r 为上能级的辐射寿命.通过计算得出Nd:LuAG晶体在1065nm处的发射截面积为 $9.67 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$.综上,通过对Nd:LuAG晶体各种光谱参数的计算和光谱性能的特征,表明Nd:LuAG晶体是固态激光器中很有潜力的增益介质.

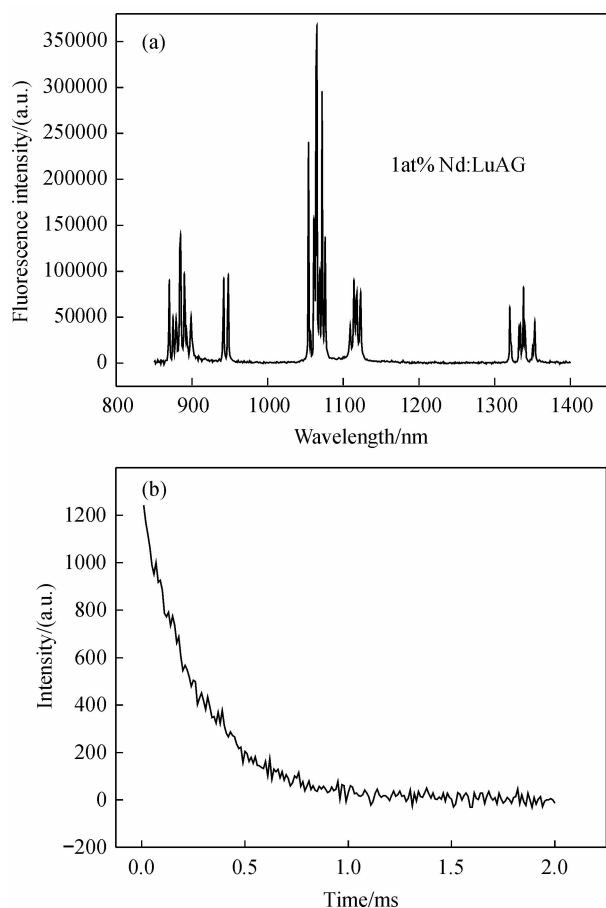


图5 Nd:LuAG晶体的荧光光谱(a)和 $^4F_{3/2}$ 能级荧光衰减曲线(b)

Fig. 5 Fluorescence spectrum and decay curve of the $^4F_{3/2}$ manifold of Nd:LuAG single crystal

(a) Fluorescence spectrum; (b) Decay curve

3 结论

采用提拉法生长Nd³⁺掺杂浓度为1at%的Nd:LuAG晶体,对晶体的结晶质量、分凝系数、光谱性能进行了详细的研究.晶片的双晶摇摆曲线半高宽为15.6",表明晶体具有较好的结晶质量.Nd:LuAG晶体中Nd³⁺的分凝系数为0.14.研究不同气氛下退火的Nd:LuAG晶体的吸收光谱,研究表明在空气和氢气气氛下退火,晶体质量有所提高;吸收光谱中256nm处的吸收带是由Fe³⁺引起的;467和518nm处的吸收峰分别由O²⁻心和F⁺心引起的;计算出809nm处的吸收截面为 $1.86 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$.通过J-O理论拟合出Nd:LuAG晶体的强度参数 Ω_2 、 Ω_4 和 Ω_6 分别为 0.71×10^{-20} 、 1.13×10^{-20} 和 $4.36 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$;进而计算出Nd³⁺的 $^4F_{3/2}$ 能级到不同下能级的跃迁几率、荧光分支比和辐射寿命等光谱参数.计算出Nd:LuAG晶体在1065nm处的发射截面为 $9.67 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$.综上,Nd:LuAG晶体是二极管抽运固态激光器中很有应用潜力的增益介质.

参考文献:

- [1] 张怀金, 蒋民华 (ZHANG Huai-Jin, et al). 新型激光晶体材料研究进展. 无机材料学报 (Journal of Inorganic Materials), 2008, **23** (3): 417-424.
- [2] 王晓丹, 赵志伟, 王静雅, 等 (WANG Xiao-Dan, et al). 热键合制作 Yb:Y₃Al₅O₁₂/Y₃Al₅O₁₂ 复合晶体. 无机材料学报 (Journal of Inorganic Materials), 2008, **23** (1): 125-129.
- [3] 杨心波, 李红军, 毕群玉, 等 (YANG Xin-Bo, et al). 导模法生长 Al₂O₃:C 晶体. 无机材料学报 (Journal of Inorganic Materials), 2009, **24** (2): 255-258.
- [4] Liu Fengqin, He Jingliang, Zhang Baitao, et al. Diode-pumped passively Q-switched Nd:LuVO₄ laser at 1.34 μ m with a V³⁺:YAG saturable absorber. Opt. Express, 2008, **16** (16): 11759-11763.
- [5] Chen F, Yu X, Gao J, et al. Efficient generation of 914nm laser with high beam quality in Nd:YVO₄ crystal pumped by π -polarized 808nm diode-laser. Laser Phys. Lett., 2008, **5** (9): 655-658.
- [6] 任国光, 黄裕年. 二极管抽运固体激光器迈向100kW. 激光与红外, 2006, **36** (8): 617-622.
- [7] Xu X D, Wang X D, Meng J Q, et al. Crystal growth, spectral and laser properties of Nd:LuAG single crystal. Laser Phys. Lett., 2009, **6** (9): 678-681.
- [8] 杨培志, 邓佩珍, 殷之文. Yb:YAG 晶体中的荧光浓度猝灭现象. 发光学报, 1999, **20** (4): 325-329.
- [9] Ashurov M K, Rakov A F, Erzlin R A. Luminescence of defect centers in yttrium-aluminum garnet crystals. Solid State Commun., 2001, **120** (12): 491-494.
- [10] 蒋成勇, 周国清, 姜雄伟, 等. 飞秒脉冲激光对YAG晶体的辐照作用的研究. 光学学报, 2003, **23** (10): 1273-1276.
- [11] Mareš J A, Čechová N, Nikl M, et al. Cerium-doped RE³⁺AlO₃

- perovskite scintillators; Spectroscopy and radiation induced defects. *Journal of Alloys and Compounds*, 1998, **275-277**: 200-204.
- [12] Zeng Xionghui, Zhao Guangjun, Xu Jun, *et al.* Effects of annealing on the color, absorption spectra, and light yield of Ce:YAlO₃ single crystal grown by the temperature gradient technique. *Journal of Applied Physics*, 2004, **95**(2): 749-751.
- [13] Wang Guofu. Optical-transition probability of the Nd³⁺ ion in GdAl₃(BO₃)₄ crystal. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2001, **18**(2): 173-175.
- [14] Krupke W F. Radiative transition probabilities within the 4f³ ground configuration of Nd:YAG. *IEEE J. Quantum Electron*, 1971, **7**(4): 153-159.
- [15] Cavalli E, Zannoni E, Belletti A, *et al.* Spectroscopic analysis and laser parameters of Nd³⁺ in Ca₃Sc₂Ge₃O₁₂ garnet crystals. *Appl. Phys. B*, 1999, **68**(4): 677-681.
- [16] Jaque D, Capmany J, Luo Z D, *et al.* Optical bands and energy levels of Nd³⁺ ion in the YAl₃(BO₃)₄ nonlinear laser crystal. *J. Phys.: Condens. Matter*, 1997, **9**(44): 9715-9729.
- [17] Han X, Wang G F. Crystal growth and spectral properties of Nd³⁺: KY(WO₄)₂ crystal. *J. Cryst. Growth*, 2003, **247**(3/4): 551-554.
- [18] Cavalli E, Zannoni E, Mucchino C, *et al.* Optical spectroscopy of Nd³⁺ in KLa(MoO₄)₂ crystals. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1999, **16**(11): 1958-1965.
- [19] 冉栋刚, 夏海瑞, 吕英波, 等. Nd:LuVO₄ 晶体光谱参数的计算及其分析. *人工晶体学报*, 2005, **34**(1): 17-20.
- [20] Ermeux F S, Goutaudier C, Monxorge R, *et al.* Multiphonon relaxation in YVO₄ single crystals. *Phys. Rev. B*, 2000, **61**(6): 3915-3921.