

文章编号: 1007-5461(2005)04-0570-04

# Nd:GSGG 激光晶体的光谱性能研究

孙敦陆, 张庆礼, 王召兵, 苏静, 张霞  
邵淑芳, 谷长江, 王爱华, 江海河, 殷绍唐

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031)

**摘要:** 用提拉法成功生长出了  $\text{Nd}^{3+}:\text{Gd}_3\text{Sc}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}$ (Nd:GSGG) 晶体, 并对其光谱性能进行了研究。测量了晶体在 400~2700 nm 波段内的吸收光谱, 用 808 nm 波长激发, 测量了晶体的荧光光谱和荧光寿命, 计算了晶体的发射截面。与 Nd:GGG 和 Nd:YAG 的光谱参数进行了比较。

**关键词:** 光谱学; GSGG 晶体; 光学材料; 吸收系数; 荧光光谱; 荧光寿命

**中图分类号:** O734.3      **文献标识码:** A

## 1 引言

上世纪 70 年代到 80 年代就已发现, 含钬石榴石晶体  $\text{A}_3\text{Sc}_2\text{B}_3\text{O}_{12}$ (A、B 可为稀土离子、Y、Ga 和 Al 离子) 是性能优良的激光工作基质。在激光遥感、空间技术、激光雷达、光学通讯、光电对抗等众多领域中有重要的应用前景。 $\text{Nd}^{3+}$  在这些基质中具有很高的分凝系数, 是在 YAG 中分凝系数 (~0.2) 的若干倍, 如在 GSGG 中  $\text{Nd}^{3+}$  的分凝系数为 0.75<sup>[1,2]</sup>, 因而在这些基质中可实现高浓度的  $\text{Nd}^{3+}$  掺杂, 有利于提高泵浦效率, 同时分凝系数大也有利于生长出掺杂浓度分布比较均匀的激光晶体, 从而提高激光的输出质量。 $\text{RE}_3\text{Sc}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}$ (RE=Y、Gd) 比较容易实现平界面生长, 可避免由于凸界面生长造成的小面生长所引起的杂质、应力等形成的核心, 晶体的整个截面都可有效利用, 从而能获得大尺寸的激光晶体元件, 有利于发展 LD 泵浦的固体强激光。含钬石榴石晶体具有较高的热导率和稳定的物理化学特性。而且在许多晶体中, 可以引入敏化剂, 使晶体的光-光转换效率大大提高, 不仅弥补了它们的热导率稍逊于 Nd:YAG 的不足, 而且可使这些含钬石榴石晶体在灯泵浦激光器中的泵浦效率成倍增长。但由于当时 Sc 原料非常昂贵, 每公斤高达几十万元人民币, 从而限制了含钬石榴石晶体的研究和发展<sup>[3]</sup>。近年来, 随着  $\text{Sc}_2\text{O}_3$  提纯技术的进步, 它的价格有了较大幅度的降低。因此, 近些年来, 国外含钬石榴石晶体的研究又重新兴起, 并取得了很大进展<sup>[4]</sup>。但国内尚未见有关含钬石榴石 GSGG 晶体生长的研究报道。因此利用  $\text{Sc}_2\text{O}_3$  价格下降这一契机, 开展含钬石榴石晶体生长研究, 探索新型含钬石榴石激光晶体, 为激光技术的发展提供高效、抗辐射、大功率、新波长和可调谐的激光工作物质, 使我国含钬石榴石研究走上国际发展前沿, 为我国激光技术的发展做出贡献。

本文对 Nd:GSGG 晶体的吸收光谱、荧光光谱及荧光寿命进行了测试分析, 并与 Nd:YAG 和 Nd:GGG 晶体进行了比较。

**基金项目:** 国家自然科学基金 (50472104 和 60478025)

**收稿日期:** 2005-05-08; **修改日期:** 2005-05-12

**E-mail:** dlsun@aiofm.ac.cn

## 2 实 验

用提拉法成功生长出了优质的 Nd:GSGG 晶体,并在其上切割加工出端面为 (111) 面,尺寸  $\phi 20 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$  的样品,双面抛光。在室温下使用 PE lambda 900 分光光度计测量其 400~2700 nm 的吸收光谱。用 808 nm 波光激发,使用 Fluorolog-3-Tan 光谱仪测量了晶体在室温下的荧光光谱和荧光衰减曲线。

## 3 结果与讨论

首先将测量得到的 Nd:GSGG 晶体的透过率曲线转化成吸收系数曲线。吸收系数  $\alpha$  与透过率  $T$  的关系为

$$\alpha = \frac{\ln(1-R)^2/T}{d}, \quad (1)$$

$d$  是晶体厚度,  $R$  是入射光垂直通过界面的反射率

$$R = (n-1)^2/(n+1)^2, \quad (2)$$

$n$  为折射率<sup>[5]</sup>。Nd:GSGG 晶体的折射率可以通过塞米尔方程得到

$$n^2 = A + CB/(C\lambda^2 - 1) + D\lambda^2/(E\lambda^2 - 1), \quad (3)$$

$A, B, C, D$  和  $E$  是塞米尔系数,可以从文献 [2] 中查到,如表 1 所示。在 808 nm 处得到  $n$  等于 1.9486。

Table 1 Seamier coefficient of GSGG crystal

$A$	$B$	$C$	$D$	$E$
3.743782	$4.426317 \times 10^{-10} \text{ cm}^2$	$4.324039 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$	$1.067490 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$	$1.55817 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$

图 1 示出了掺  $\text{Nd}^{3+}$  离子浓度为 0.6at% 的 Nd:GSGG 晶体在室温下吸收谱。标出了从基态  $^4\text{I}_{9/2}$  到激发态的 17 个不同的跃迁,其中有 5 个光谱带中有相邻能级的重叠,在 808 nm 处出现了最强的吸收峰,吸收系数  $\alpha$  为  $4.72 \text{ cm}^{-1}$ ,根据吸收截面公式  $\delta_{\text{吸收}} = \alpha/N^{[6]}$ ,  $N$  为单位体积内的激活离子数,得到在 808 nm 处,  $\delta_{\text{吸收}} = 6.15 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ ,高于 Nd:GSGG 晶体在此波长处的吸收截面<sup>[7]</sup> $4.02 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ ,大的吸收截面有利于晶体对泵浦光的吸收,从而有利于输出功率的提高。

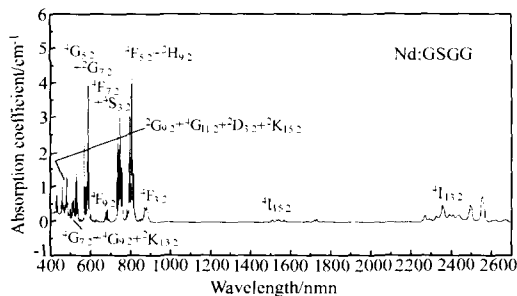


Fig.1 The absorption spectrum of Nd:GSGG crystal

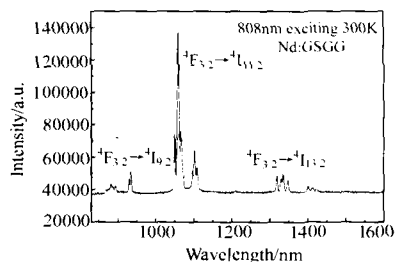


Fig.2 Fluorescence spectra of Nd:GSGG crystal excited by 808 nm wavelength at room temperature

我们采用 808 nm 光源激发,在室温下,使用 Fluorolog-3-Tan 光谱仪测试了晶体的荧光光谱及荧光寿命,荧光谱如图 2 所示。在 900 nm、1100 nm 和 1340 nm 附近出现了三个荧光发射带,分别对应于

${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$ 、 ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$  和  ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$  的跃迁。其中  ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$  跃迁的荧光分支比最高, 最强发射峰在 1060 nm 处, 而 Nd:GGG 晶体的最强发射峰在 1062 nm, Nd:YAG 的在 1064 nm。

由图 3 中得到在 1060 nm 处的荧光峰发射强度最强, 因此我们测量了此波长处的荧光衰减曲线, 如图 4 所示。实验中脉冲光源每秒闪 200 次, 入射和出射狭缝的宽度均为 3 nm。根据衰减曲线拟合得到了 Nd:GSGG 晶体在室温下的荧光寿命为 289  $\mu\text{s}$ , 结果与 Nd:GGG 和 Nd:YAG 晶体进行了比较, 如表 2 中所示。由表中可看出, 室温下相同掺 Nd<sup>3+</sup> 浓度 Nd:GSGG 晶体的荧光寿命均高于 Nd:GGG 晶体和 Nd:YAG 晶体, 分别高出约 32  $\mu\text{s}$  和 79  $\mu\text{s}$ 。荧光寿命长的晶体可以在上能级积累起更多的粒子, 增加了储能, 有利于器件输出功率或能量的提高 [8]。

Table 2 Fluorescence lifetime comparison of the Nd:GSGG, Nd:GGG and Nd:YAG crystal

Crystal	Nd:GSGG	Nd:GGG	Nd:YAG <sup>[12]</sup>
Fluorescence lifetime( $\mu\text{s}$ )	289	257	210
Emission cross-section( $10^{-19}\text{cm}^2$ )	1.0	2.1	3.4

利用测量的荧光光谱及荧光寿命代入 Füchtbauer-Ladenburg 公式<sup>[9,10]</sup>

$$\sigma_{em}(\lambda) = \frac{\lambda^5 I(\lambda)}{8\pi n^2 c \tau_{rad} \int \lambda I(\lambda) d\lambda} \quad (4)$$

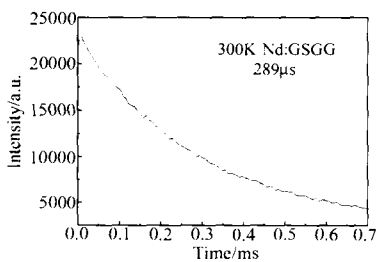


Fig.3 Fluorescence decay curve of Nd:GSGG crystal

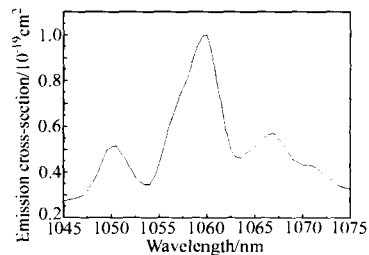


Fig.4 Stimulated emission cross-sections( ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ ) calculated from the F-L formula in the spectral range of 1040~1080 nm

计算了晶体在 1.06  $\mu\text{m}$  附近的受激发射截面, 其曲线如图 4 所示。其中  $I(\lambda)$  表示荧光谱中波长  $\lambda$  处单位波长的荧光强度,  $\tau_{rad}$  为荧光寿命,  $c$  为光速,  $n$  是折射率。得到 Nd:GSGG 在室温下 1.06  $\mu\text{m}$  附近的峰值发射截面为  $1.0 \times 10^{-19}\text{cm}^2$ , 如表 2 中所示。所得发射截面的结果与文献报道的  $1.3 \times 10^{-19}\text{cm}^2$  [2] 较为接近。此外, Nd:GSGG 的峰值发射截面均低于 Nd:GGG 的  $2.1 \times 10^{-19}\text{cm}^2$  [11] 和 Nd:YAG<sup>[12]</sup> 的  $3.4 \times 10^{-19}\text{cm}^2$ 。对于大能量和大功率的脉冲激光器来说, 小的受激发射截面有利于高能量存储, 能够促进器件能量和功率的提高 [8]。

## 4 结 论

用提拉法成功生长出了质量优良的 Nd:GSGG 晶体, 对其光谱性能进行了研究。结果表明, 晶体在 808 nm 处具有最大的吸收系数, 适合于二极管泵浦。晶体最强的荧光发射峰位于 1060 nm 处。晶体的  ${}^4F_{3/2}$  上能级的荧光寿命为 289  $\mu\text{s}$ , 均高于 Nd:GGG 和 Nd:YAG 晶体, 长的荧光寿命有利于器件输出功率或能量的提高。Nd:GSGG 晶体在 1.06  $\mu\text{m}$  附近的峰值发射截面均低于 Nd:GGG 和 Nd:YAG 晶体, 有利于脉冲光输出功率的提高。

## 参考文献:

- [1] Brandle C D, Barns R L. Crystal stoichiometry and growth of rare-earth garnets containing scandium [J]. *J. Crystal Growth*, 1973, 20: 1-5.
- [2] Kruple W F, Shinn M D, Marion J E, *et al.* Spectroscopic, and thermomechanical properties of neodymium- and chromium-doped gadolinium scandium gallium garnet [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1986, 3: 102-113.
- [3] Bass M, Weichman L S, *et al.* The temperature dependence of Nd<sup>3+</sup> doped solid-state lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electronics*, 2003, 39: 741-748.
- [4] Zhang Q L, Yin S T, Wang A H, *et al.* Research Process of the Laser Crystal GGG Species [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics* (量子电子学报), 2002, 19(6): 481-484 (in Chinese).
- [5] Jin B M, Kim I W, White W B, *et al.* Modification of UV-VIS optical absorption properties caused by MgO incorporation in MgO-doped LiNbO<sub>3</sub> crystals [J]. *Mater. Lett.*, 1997, 30(5,6): 385-388.
- [6] Lu Y, Wang G F. Growth and spectroscopic properties of Nd<sup>3+</sup>:LaCa<sub>4</sub>O(BO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> crystals [J]. *J. Cryst. Growth.*, 2003, 253: 270-273.
- [7] Sun D L, Zhang Q L, Wang Z B, *et al.* Concentration distribution of Nd<sup>3+</sup> In Nd:Gd<sub>3</sub>Ga<sub>5</sub>O<sub>12</sub> crystals studied by optical absorption method [J]. *Crys. Res. Tech.*, 2005, 40(7): 698-702.
- [8] Wang G F. New development of laser crystal materials [J]. *J. Synth. Cryst.*, (人工晶体学报), 1998, 27(4): 390-394 (in Chinese).
- [9] Sokülska I, Heumann E, Kück S, *et al.* Laser oscillation of Er<sup>3+</sup>: YVO<sub>4</sub> and Er<sup>3+</sup>, Yb<sup>3+</sup>:YVO<sub>4</sub> crystals in the spectral range around 1.6 μm [J]. *Appl. Phys. B*, 2000, 71(6): 893-896.
- [10] Sokülska I. Spectroscopic characterization of LaGaO<sub>3</sub>:Er<sup>3+</sup> crystals [J]. *Appl. Phys. B*, 2000, 71(2): 157-162.
- [11] Rotter M D, Dane B. Measuring the stimulated-emission cross-section: a case study in Nd:GGG [J]. *Opt. Commun.*, 2001, 198: 155-161.
- [12] Demidovich A A, Shkadarevich A P, Dansilov M B, *et al.* Comparison of CW laser performance of Nd:KGW, Nd:YAG, Nd:BEL, and Nd:YVO<sub>4</sub> under laser diode pumping [J]. *Appl. Phys. B*, 1998, 67: 11-15.

## Study on the spectral characteristics of Nd:GSGG laser crystal

SUN Dun-lu, ZHANG Qing-li, WANG Zhao-bing, SU Jing, ZHANG Xia,  
 SHAO Shu-fang, GU Chang-jiang, WANG Ai-hua, JIANG Hai-he, YIN Shao-tang  
 (Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

**Abstract:** The spectral characteristics of Nd:GSGG crystal were studied, where the crystal was grown successfully by the Czochralski method. The absorption spectrum in the range of 400~2700 nm was measured. The fluorescence spectrum and lifetime were determined by exciting with 808 nm wavelength, the emission cross-section was calculated by F-L formula. These parameters were also compared with Nd:GGG and Nd:YAG crystals.

**Key words:** spectroscopy; GSGG crystal; absorption coefficient; fluorescence spectrum; fluorescence lifetime

**作者简介:** 孙敦陆 (1972 -), 男, 安徽怀远人, 在读博士研究生, 目前从事激光晶体材料的生长及性能表征研究。