

文章编号: 1001-3806(2004)05-0488-03

NdYAG 多晶透明陶瓷的光谱性质

马海霞, 楼祺洪, 漆云凤, 董景星, 魏运荣

(中国科学院 上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要: 为了研究 NdYAG 多晶透明陶瓷作为激光增益介质的可能性, 测量了掺杂原子数分数为 1% 的 NdYAG 多晶透明陶瓷的吸收光谱、荧光光谱、荧光寿命等光学参量, 并和 NdYAG 单晶进行了比较。测量结果表明, NdYAG 多晶透明陶瓷作为激光增益介质具有极大的潜力。

关键词: NdYAG 多晶透明陶瓷; 吸收光谱; 荧光光谱; 荧光寿命

中图分类号: O433.5 **文献标识码:** A

Spectrum characteristics of the polycrystalline transparent ceramic

MA Hai-xia, LOU Qi-hong, QI Yun-feng, DONG Jing-xing, WEI Yun-rong

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract: Optical characteristics of the Nd YAG polycrystalline ceramic with Nd concentration of 1%, such as absorption spectrum, fluorescence spectra, transmission spectrum and fluorescence life are measured, which are compared with those of NdYAG single crystal. Results demonstrate NdYAG polycrystalline transparent ceramic to be a potential laser medium.

Key words: NdYAG polycrystalline transparent ceramic; absorption spectrum; fluorescence spectra; fluorescence life

引 言

激光增益介质对于产生高效的激光振荡具有极其重要的意义。在单晶作为增益介质的激光器中, NdYAG 激光器是目前最常用的一类固体激光器。YAG 基质很硬、光学质量好、热导率高, YAG 的立方结构也有利于产生窄的荧光谱线, 从而产生高增益、低阈值的激光作用。在 NdYAG 中, 三价钇替换了三价钕, 因此不需要补偿电荷。NdYAG 除了具有非常优越的光谱和激光特性外, 其基质材料的晶格因其非常有吸引力的物理、化学和机械特性而受到关注。在 NdYAG 中, Y^{3+} 被 Nd^{3+} 替代, 两种稀土离子的半径差大约为 3%。因此当加入大量的 Nd 时, 晶体就会出现应变。所有用提拉法生长的 NdYAG 晶体放于正交的起偏器之间时, 就会沿着晶体的长度方向显现出明亮的芯子, 还可以看到从此芯子向晶体表面辐射的应变花纹。利用电子探测针研究表

明, 中心区的 Nd 浓度是周边区域的两倍。在生长界面存在一个小界面, 那里钕的分凝系数不同于周围的生长面, 所以形成这种核心区。这种成分的差异引起相应的热膨胀系数差异, 从而在晶体从生长温度冷却下来的过程中, 就产生所观察到的应变花样。退火并不能消除该中心, 到目前为止, 也没有找到避免在生长界面形成小界面的方法。为了寻找更优秀的激光增益介质, 人们做了大量的努力^[1~6]。本文中介绍了一种新的激光增益介质, 并对其光谱性质进行了测量, 测量结果表明, NdYAG 多晶透明陶瓷作为激光增益介质具有极大的潜力。

1 NdYAG 透明陶瓷的光谱性质

1999 年, Konoshima 公司采用一种新的方法成功制备了 NdYAG 多晶透明陶瓷^[7,8]。首先用液相化学反应和预烧结技术制得了直径约为 10nm 的 YAG 粒子。制备过程如图 1 所示。然后用真空烧结法得到了平均直径约为 10 μ m 的颗粒, 如图 2 所示。颗粒边界小于 1nm, 在这种陶瓷中气孔率在 10⁻⁶ 的数量级上。因用这种方法制备的陶瓷颗粒边界很小, 且气孔率极少, 故它的散射损耗很低。

本文中测量了日本 Konoshima 和 Baikowski 协

基金项目: 国家高新技术八六三专题资助项目 (804 G 2)
作者简介: 马海霞 (1976-), 女, 博士研究生, 主要从事全固态激光器方面的研究。

E-mail: m0314@163.net

收稿日期: 2003-10-20; 收到修改稿日期: 2003-12-09

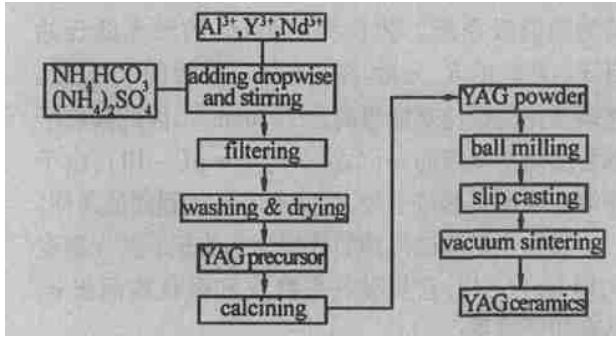


Fig. 1 Fabrication process of transparent ceramic YAG

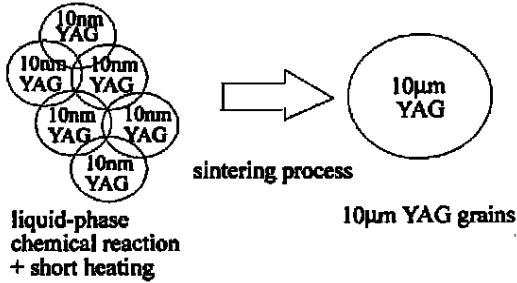


Fig. 2 Crystal growth from nano-crystals to micro-crystal

作制造的掺杂原子数分数为 1% 的直径为 20mm, 厚度为 1.2mm 的 NdYAG 多晶透明陶瓷的吸收光谱, 荧光光谱, 透过光谱, 荧光寿命等光学参量, 并和 NdYAG 单晶进行了比较。

1.1 吸收光谱

在室温下, 采用 Model V-570 JASCO 吸收光谱仪测试了样品在 500nm~1000nm 范围内的吸收光谱。NdYAG 多晶透明陶瓷和单晶的吸收光谱如图 3、图 4 所示。从图 3、图 4 可以看到, 在 500nm~

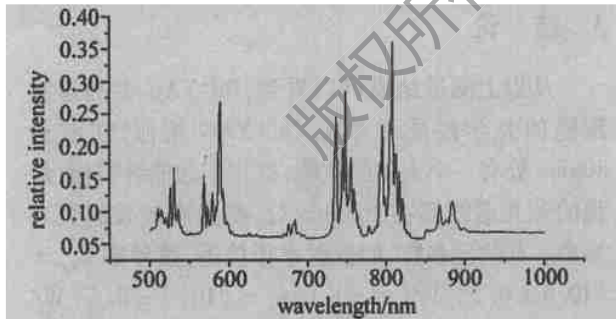


Fig. 3 The absorption spectrum of NdYAG transparent ceramic

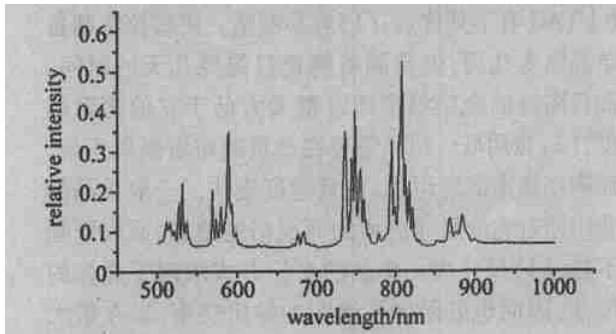


Fig. 4 The absorption spectrum of NdYAG single crystal

1000nm 范围内 NdYAG 多晶透明陶瓷的吸收光谱与 NdYAG 单晶相似, 在 808nm 附近都有一个大的吸收峰, 吸收带宽约为 1nm。通过调节温度, 使激光二极管的发射中心在 808nm, 使其对准 NdYAG 透明陶瓷的吸收峰, 实现高效激光振荡。

1.2 荧光光谱

在室温下, 采用 Triax550 荧光光谱仪测量了 NdYAG 多晶透明陶瓷的荧光光谱, 如图 5, 图 6 所示。从图 5, 图 6 看到, NdYAG 透明陶瓷的荧光光谱与 NdYAG 单晶相似, 一个主要的发射峰都是在 1064nm 附近, 通过谐振腔镜的选择振荡, 可以实现 1064nm 的激光振荡。

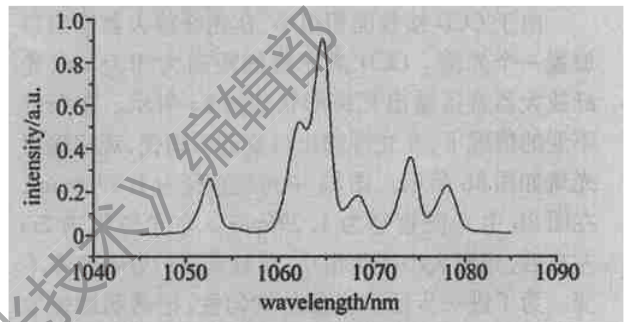


Fig. 5 The fluorescent spectrum of NdYAG transparent ceramic

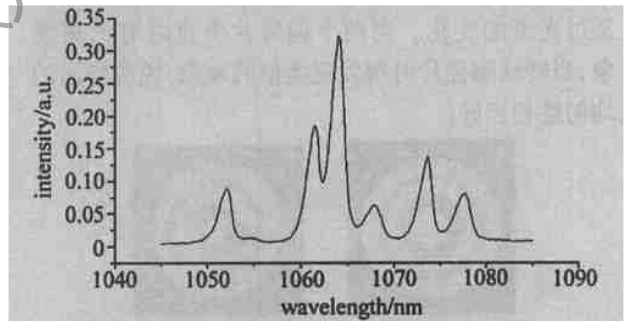


Fig. 6 The fluorescent spectrum of NdYAG single crystal

1.3 透过光谱

室温下, 采用 Lamda 900 UV/VIS/NIR 分光光度计测量了 NdYAG 多晶透明陶瓷在 350nm~1200nm 光谱范围内的透过光谱, 如图 7 所示。NdYAG 多晶透明陶瓷在 1064nm 的透过率为 85%,

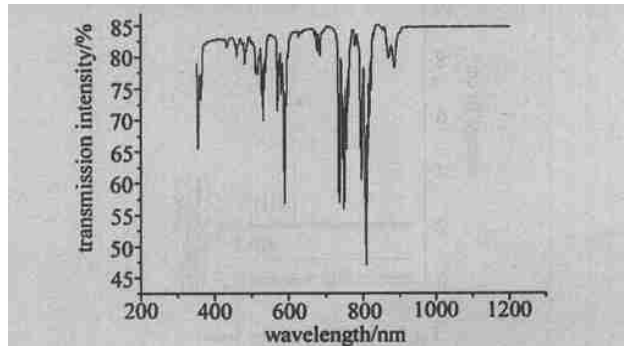


Fig. 7 The transmission spectrum of NdYAG single crystal

背景吸收很弱。

用荧光寿命测量仪测得 NdYAG 多晶透明陶瓷的荧光寿命为 240 μ s。1% 的 NdYAG 单晶的荧光寿命约为 230 μ s,都具有较长的上能级寿命,能够很好的实现粒子数反转。

另外,还测量了 NdYAG 多晶透明陶瓷的光学均匀性。采用种子源主振荡放大(MOPA),输出中心波长为 1064nm,重复频率为 20kHz~100kHz 连续可调,谱线宽度约为 6nm,输出功率为 0~10W 可调,光斑约为 10mm 掺 Yb 双包层光纤放大器作为光源,用 CCD 接收光斑,采用 LBA-PC 型激光波面分析仪捕捉和处理信号。

由于 CCD 接收面积很小,在光纤放大器输出口放置一个光阑。CCD 离光源的距离大约为 2m,光纤放大器直接输出光斑形状如图 8a 所示。在条件不变的情况下,在光源输出口置透明陶瓷,观察输出光斑如图 8b 所示。图 8a 中光斑直径为 1.2936mm,在图 8b 中光斑直径为 1.296mm。在光斑传输 2m 左右后,光斑大小变化很小,而且光强的分布基本不变。为了进一步证实样品的均匀性,把透明陶瓷放在两个偏阵片之间,当旋转其中一个偏阵片时观察透过光斑的变化。当两个偏阵片垂直时有消斑现象,当转动陶瓷片时都发现类似的现象,说明样品的均匀性相当好。

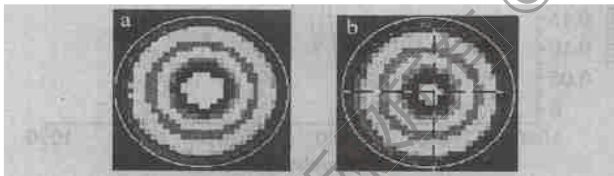


Fig. 8 Beam profile of (a) signal (b) with transparent ceramic

2 光谱分析

由吸收光谱和荧光光谱,计算出 NdYAG 多晶透明陶瓷的能级结构,如图 9 所示。NdYAG 激光

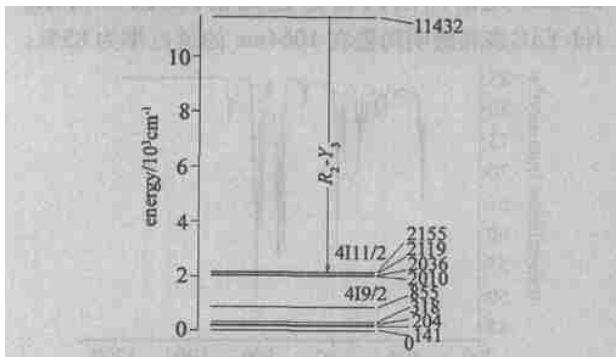


Fig. 9 NdYAG energy level

器为四能级系统。波长为 1064nm 的激光跃迁始

自 $^4F_{3/2}$ 能级的 R_2 分量,终止于 $^4I_{11/2}$ 能级的 Y_3 分量。终端激光能级比基能级高出 2036 cm^{-1} ,因此其粒子数密度是基能级的 $\exp(\Delta E/kT) \approx \exp(-10)$,由于终端能级没有热粒子数,因而很容易达到阈值条件。

吸收光谱测试得到的数据为各波长下的光密度 D ,即 $\log(I_0/I)$,它与吸收系数 α 和吸收截面积 σ_a 具有如下关系:

$$\alpha = \frac{2.303 \cdot \log(I_0/I)}{L} \quad (1)$$

$$\sigma_a = \frac{2.303 \cdot \log(I_0/I)}{L \cdot N} \quad (2)$$

式中, L 为样品的厚度, N 为 Nd^{3+} 离子的掺杂原子数分数。由吸收光谱得到 1%NdYAG 多晶透明陶瓷的背景吸收系数约为 1.2 cm^{-1} ,在最强的吸收峰 808nm 处,其吸收系数为 6.7 cm^{-1} ,吸收截面为 $4.9 \times 10^{-20} \text{cm}^2$ 。

由 NdYAG 多晶透明陶瓷的透过光谱,根据公式:

$$T_s = 2T_0/(1 + T_0) \quad (3)$$

$$R_s = 1 - T_s \quad (4)$$

$$n = (1 + \sqrt{R_s})/(1 - \sqrt{R_s}) \quad (5)$$

计算出 NdYAG 多晶透明陶瓷的折射率 n 。其中 T_0 为双面透过率,即为测量值, T_s 为单面透过率, R_s 为单面发射率。由此计算出 NdYAG 多晶透明陶瓷在 1064nm 处的折射率 $n = 1.804$ 。

3 结论

从以上测试结果可以看到,NdYAG 多晶透明陶瓷的光学性质和单晶 NdYAG 相似,在波长 808nm 处有一个大的吸收峰,有相似的能级结构,最强的荧光谱线都在 1064nm 处,都具有较长的荧光寿命。其物理参数,如折射率很接近,热导率 $\kappa_{s,c} = (10.5 \pm 0.5) \text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, $\kappa_c = (10.7 \pm 0.5) \text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 也是很接近。而且 NdYAG 陶瓷相对单晶 NdYAG 有下列优点:(1) 容易制造。用提拉法制备单晶需要几周,但是制备陶瓷只需要几天的时间。而且陶瓷的烧结温度通常都大大低于它的熔融温度;(2) 费用低。单晶需要在昂贵的铍坩锅里生长,而陶瓷棒不需要坩锅,而且速度更快。一般单晶的费用随着它的尺寸的增加而成倍的增加,而陶瓷则不然;(3) 尺寸大。单晶的生长方式限制了晶体的尺寸,因而也就限制了潜在的输出功率。现在最大

(下转第 502 页)

- fects in a Brillouin fiber ring laser [J]. *Opt Lett*, 1993, 18(24): 2123~2125.
- [9] NICATI P A, TOYAMA K, SHAW H J. Frequency stability of a Brillouin fiber ring laser [J]. *J Lightwave Technol*, 1995, 13(7): 1445~1451.
- [10] BAYVEL P, GILES I P. Evaluation of performance parameters of single-mode all-fiber Brillouin ring lasers [J]. *Opt Lett*, 1989, 14(11): 581~583.
- [11] TATEDA M, HORIGUCHI Y, KURASHIMA T *et al.* First measurement of strain distribution along field-installed optical fibers using Brillouin spectroscopy [J]. *J Lightwave Technol*, 1990, 8(9): 1266~1276.
- [12] KURASHIMA T, HORIGUCHI T, TATEDA M. Distributed temperature sensing using stimulated Brillouin scattering in optical silica fibers [J]. *Opt Lett*, 1990, 15(13): 1038~1040.
- [13] FERREIRA M F, ROCHA J F, PINTO J L. Analysis of the gain and noise characteristics of fiber Brillouin amplifiers [J]. *Opt Quantum Electron*, 1994, 26(1): 34~44.
- [14] CULVERHOUSE D, KALLI K, JACKON D A. Stimulated Brillouin scattering ring resonator laser for SBS gain studies and microwave generation [J]. *Electron Lett*, 1991, 27(24): 2033~2035.
- [15] KALLI K, CULVERHOUSE D, JACKON D A. Fiber frequency shifter based on generation of stimulated Brillouin scattering in high-finesse ring resonator [J]. *Opt Lett*, 1991, 16(19): 1538~1540.
- [16] THOMAS P J, van DRIEL H M, STEGEMAN G I A. Possibility of using an optical fiber Brillouin ring laser for inertial sensing [J]. *Appl Opt*, 1980, 19(12): 1906~1908.
- [17] ZARINETCHI F, SMITH S P, EZEKIEL S. Stimulated Brillouin fiber-optic laser gyroscope [J]. *Opt Lett*, 1991, 16(4): 229~231.
- [18] HUANG S, NICATI P A, TOYAMA K. Synthetic heterodyne detection in a fiber-optic ring-laser gyro [J]. *Opt Lett*, 1993, 18(1): 81~83.
- [19] TAKIGUCHI K, HOTATE K. Removal of lock-in phenomenon in optical passive ring-resonator gyro by using optical Kerr-effect in fiber ring resonator [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 1992, 4(7): 810~812.
- [20] TANAKA Y, YAMASAKI S, HOTATE K *et al.* Brillouin fiber-optic gyro with directional sensitivity [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 1996, 8(10): 1367~1369.
- [21] SCHWLOW A L, TOWNES C H. Infrared and optical masers [J]. *Phys Rev*, 1958, 112: 1940~1949.
- [22] DEBUT A, RANDOUX S, ZEMMOURI J. Linewidth narrowing in Brillouin lasers: theoretical analysis [J]. *Phys Rev*, 2000, A62(2): 023803-1~023803-4.
- [23] DEBUT A, RANDOUX S, ZEMMOURI J. Experimental and theoretical study of linewidth narrowing in Brillouin fiber ring lasers [J]. *J O S A*, 2001, B18(4): 556~567.

(上接第 490 页)

的单晶尺寸为 23cm 长,但是制得的多晶陶瓷的长度已达到单晶的 2 倍;(4)多功能性。陶瓷的制造能够和调 Q 以及喇曼相结合,但是单晶就不可能做到这一点;(5)大批量生产。陶瓷激光棒适合流水线作业,减少了时间和费用,但是单晶却不然。

正是由于多晶 NdYAG 陶瓷弥补了单晶 NdYAG 的很多不足,因此, NdYAG 多晶透明陶瓷作为激光增益介质具有极大的潜力。

感谢上海光机所光子晶体实验室宋秀东老师在吸收光谱测量上给予的帮助,感谢玻璃室李顺光在荧光光谱和荧光寿命测试方面给予的帮助。

参 考 文 献

- [1] LU J, MURAI T, TAKAICHI K *et al.* Nd³⁺Y₂O₃ ceramic laser [J]. *Japan J A P*, 2001, 40: L1277~L1279.
- [2] LU J, TAKAICHI K, UEMATSU T *et al.* Promising ceramic laser material: highly transparent Nd³⁺LU₂O₃ ceramic [J]. *A P L*, 2002, 23: 4324~4326.
- [3] LU J, TAKAICHI K, UEMATSU T *et al.* Yb³⁺Y₂O₃ ceramics-a novel solid-state laser material [J]. *Japan J A P*, 2002, 41: L1373~L1375.
- [4] de WITH G, van DIJ KHJ A. Translucent Y₃Al₅O₁₂ ceramics [J]. *Mat Res Bull*, 1984, 19: 1669~1674.
- [5] SEKITA M, HANEDA H, YANAGITANI T *et al.* Induced emission cross section of NdY₃Al₅O₁₂ ceramics [J]. *J A P*, 1990, 67(1): 453~458.
- [6] IKESUE A, KINOSHITA T, KAMATA K *et al.* Fabrication and optical properties of high-performance polycrystalline NdYAG ceramics for solid-state lasers [J]. *J Amer Ceram Soc*, 1995, 78(4): 1033~1040.
- [7] YANAGITANI T, YAGI H, ICHIKAWA M. Production of fine powder of yttrium aluminum garnet [P]. *Japan Patent*: 10-10411, 1998-04-21.
- [8] YANAGITANI T, YAGI H, HIRO Y. Production of yttrium aluminum garnet powder [P]. *Japan Patent*: 10-114519, 1998-05-06.