

文章编号: 0258-7025(2004)Supplement-0456-03

高浓度 Yb:YAG 及 YbAG 晶体的生长、光谱性能

徐晓东, 赵志伟*, 周国清, 邓佩珍, 徐军

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 应用中频感应提拉法成功生长出高浓度(原子数分数 0.50)Yb:YAG 晶体以及 Yb₃Al₅O₁₂ (YbAG)激光晶体, X 射线粉末衍射 (XRPD)结果表明晶体的结构和 Y₃Al₅O₁₂(YAG)相似。研究了室温下,晶体的吸收光谱、发射光谱和荧光寿命,并且比较了与低浓度 Yb:YAG 晶体的光谱参数。结果表明,高浓度 Yb:YAG 及 YbAG 晶体是有前途的高功率激光增益介质。

关键词 激光晶体; Yb:YAG 晶体; YbAG 晶体; 提拉法晶体生长; 光谱性能

中图分类号 O782

文献标识码 A

Growth and Spectral Performance of YbAG and Highly Doped Yb:YAG

XU Xiao-dong, ZHAO Zhi-wei, ZHOU Guo-qing, DENG Pei-zhen, XU Jun

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Science, Shanghai 201800, China)

Abstract Yb₃Al₅O₁₂ and highly doped Yb:YAG (50 at.-%) crystals were successfully grown using Czochralski method. X-ray powder diffraction (XRPD) experiments showed that YbAG and highly doped Yb:YAG crystals had the same structure as Y₃Al₅O₁₂ (YAG) crystal. The absorption, emission spectra and fluorescence lifetime of YbAG and highly doped Yb:YAG crystals at room temperature have also been studied, and spectral parameters have been compared with low doping Yb:YAG crystal. The results indicate that YbAG and highly doped Yb:YAG crystals are promising laser materials for high power laser output.

Key words laser crystals; Yb:YAG crystal; YbAG crystal; Czochralski method; spectral performance

1 引言

激光增益材料的热负载是发展高功率、高脉冲重复频率二极管抽运固体激光器首要考虑的问题,热量主要来源于抽运光子和发射光子间的能量差(也称为量子缺陷)。Yb³⁺离子由于小的量子缺陷(Yb³⁺在 YAG 中的吸收波长为 941 nm 以及激光发射波长为 1.03 μm)而引起广泛的关注^[1,2]。与 Nd³⁺离子相比,由于它的荧光寿命为 Nd³⁺离子的 3~4 倍,增加了储能并减少了吸收光子和发射光子间的能量差,小的斯托克位移减少了热耗,提高了激光效率。Yb³⁺离子的吸收峰宽较宽,无需严格的温度控制即可获得相匹配的 LD 抽运源的抽运波长。国内外对以 Yb³⁺离子为激活中心的激光晶体进行了大量的研究。其中, YAG 晶体不仅能为激活中心提供较大的晶格场分裂能,同时 YAG 晶体还具有各种优良的物理化学性质。因此对 Yb:YAG 晶体的研究格外引人

注目, Yb:YAG 已成了激光二极管抽运固体激光器增益介质中的研究热点。目前,国外很多机构实现了千瓦量级的全固态 Yb:YAG 激光器^[3,4],并展现出向更高功率发展的势头。

在 Yb:YAG 晶体中, Yb³⁺离子取代晶格中位于十二面体中心具有八配位的 Y³⁺离子格位。由于 Yb³⁺离子的半径(0.0985 nm)与 Y³⁺离子(0.1019 nm)的半径相近,因此 Yb³⁺离子在 YAG 中的掺杂浓度可以达到很高,甚至可以达到化学计量比的 Yb₃Al₅O₁₂,这对实现固体激光器的小型化和集成化将具有十分重要的意义^[5]。

2 晶体的生长

晶体生长所用的原料纯度为 5N,其中 Yb:YAG 所用原料为 Yb₂O₃, Al₂O₃ 和 Y₂O₃,而 YbAG 所用原料为 Yb₂O₃ 和 Al₂O₃。晶体生长采用中频感应提拉法,

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划(2002AA3111030)资助课题。

作者简介: 徐晓东(1979-),男,中国科学院上海光学精密机械研究所博士研究生,主要从事激光晶体生长、光谱和激光性能的研究。

* 通信联系人, Email: zzw8006@sina.com

先将各高纯氧化物粉末在空气中适当地预干燥,然后按化学计量比严格称量,称量精度为 10 mg,并研磨均匀,加压成直径略小于坩埚内径的块体,在空气中 1350 °C 恒温预烧数小时后装入铱坩埚中开始生长晶体。晶体生长方向〈111〉,晶转速率 10~20 rpm,生长速率 1 mm/h, Yb:YAG 的生长气氛为氮气中加入少许氧气,而 YbAG 的生长气氛为氮气。在生长过程中合理控制转速可以保持整个晶体生长过程界面凸向熔体,实现晶体的稳定生长,使得断层和杂质得以减少甚至排除。为防止晶体开裂,生长结束后以 15 °C/h 的速率缓慢降温。从炉中取出的 Yb:YAG 晶体毛坯为透明白色,而 YbAG 晶体为蓝色,经过高温氧气气氛退火后,晶体颜色变为无色。

用于测试的样品取于晶体的头部,然后在玛瑙研钵中研成粉末,用 JUINER HÄJJ 相机测量了晶体的结构,由计算机收集和分析数据。为了便于比较,同时对 YAG 样品进行了 X 射线粉末衍射(XRPD)分析。图 1 为 Yb:YAG 及 YbAG 和 YAG 晶体的 XRPD 谱图,可以看出高浓度 Yb:YAG 及 YbAG 和 YAG 谱线形状相似,只是峰值强度有所不同,对应于(400)面的 X 射线衍射强度, YAG 最强,而 YbAG 最弱。

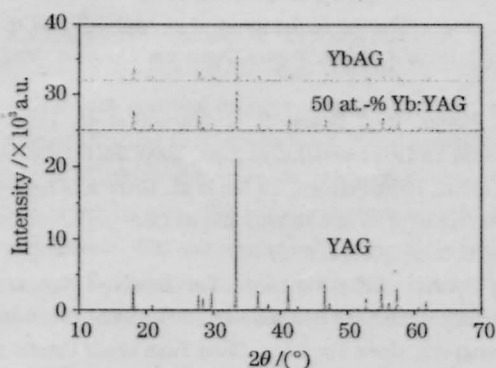


图 1 Yb:YAG, YbAG 和 YAG 晶体的 X 射线粉末衍射图

Fig.1 X-ray diffraction powder of Yb:YAG, YbAG and YAG crystals

晶胞结构分析结果显示高浓度 Yb:YAG, YbAG 和 YAG 的结构类似,属立方晶系,高浓度 Yb:YAG, YbAG 和 YAG 的晶格常数分别为 $1.197364 \pm 0.000065(\text{nm})$, $1.193799 \pm 0.000054(\text{nm})$ 和 $1.201159 \pm 0.000034(\text{nm})$ 。随着晶体中 Yb 浓度的增加,晶胞常数减小,这是由于 Yb³⁺离子半径比 Y³⁺离子半径小的缘故。

3 晶体的光谱特性

用于光谱测试的样品垂直于生长方向〈111〉方

向切割,样品经粗、细磨和抛光,厚度为 0.4 mm。吸收光谱的测试是在室温下进行的,所用仪器为 UV/VIS/NIR 光谱仪(型号 V-570 JASCO)。荧光光谱和荧光寿命的测试用 TRIAX 550 荧光光谱仪,激光波长为 940 nm,用 V-1050F 100 MHz 型示波器来观察和记录信号。为了便于比较,同时测量了掺杂浓度 5 at.-% Yb:YAG 晶体的吸收、荧光光谱以及荧光寿命。

图 2 为室温下 Yb:YAG 晶体及 YbAG 晶体中 Yb³⁺离子的特征吸收光谱, Yb³⁺离子吸收带在 0.9~1.1 μm 波长范围内,有 4 个主吸收峰。Yb 掺杂浓度对其峰位和峰形影响不大, 5 at.-% Yb:YAG 晶体的主吸收峰位于 941 nm 附近,而 50 at.-% Yb:YAG 晶体和 YbAG 晶体的主吸收峰则位于 939 和 938 nm 附近。它们的吸收带宽(FWHM)都大于 20 nm,在二极管抽运的固体激光器中,二极管的发射波长会随着温度的波动而移动的,大的吸收带宽意味着无需复杂的温度控制系统就可以实现激光的稳定输出。因此抽运波长处的吸收带宽是激光晶体重要参数。相对于低浓度 Yb:YAG 晶体而言,高浓度 Yb:YAG 晶体和 YbAG 晶体的吸收截面都有所下降。

室温下 Yb:YAG 晶体及 YbAG 晶体的荧光光谱如图 3 所示,可以看出, Yb 离子的浓度对发射峰的峰

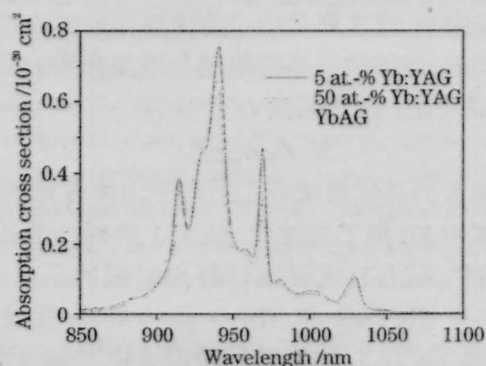


图 2 Yb:YAG 和 YbAG 晶体的吸收光谱

Fig.2 Absorption spectra of Yb:YAG and YbAG crystals

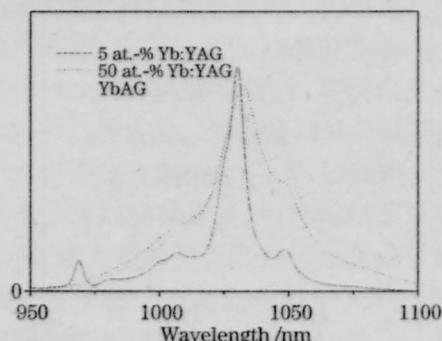


图 3 Yb:YAG 和 YbAG 晶体的荧光光谱

Fig.3 Fluorescence spectra of Yb:YAG and YbAG crystals

表 1 Yb:YAG 和 YbAG 晶体光谱参量的比较
Table 1 Spectroscopic parameters of Yb:YAG and YbAG crystals

Properties	5 at.-% Yb:YAG	50 at.-% Yb:YAG	YbAG
Absorption peak /nm	915, 941, 969, 1029	916, 939, 969, 1030	916, 938, 968, 1029
Absorption band-width /nm	20	21	23
Absorption cross section /(10^{-20} cm ²)	0.76	0.66	0.64
Fluorescence peak /nm	969, 1030, 1048	1032	1025, 1036
Emission band-width /nm	10	29	35
Emission cross section /(10^{-20} cm ²)	1.89	1.89	1.96
Fluorescence lifetime /ms	1.15	0.39	0.27
M /(10^{-22} cms)	1.241	3.729	4.786

形和峰位影响较大。随着掺杂浓度的增加,荧光主峰向长波长方向移动,发射线宽增大,YbAG 的发射带宽(FWHM)高达 35 nm,大的发射带宽使得该激光器调谐激光输出成为可能。由倒易法计算的发射截面如表 1 所示,50 at.-% Yb:YAG 晶体和 YbAG 晶体在最强发射峰处的发射截面分别为 1.89×10^{-20} cm² 和 1.96×10^{-20} cm²。

表 1 比较了低浓度、高浓度 Yb:YAG 晶体及 YbAG 晶体的光谱参数,高浓度 Yb:YAG 晶体和 YbAG 晶体的荧光寿命要比低浓度 Yb:YAG 晶体的荧光寿命小,这主要是由于浓度猝灭效应的影响^[6]。众所周知,连续激光器的阈值与增益介质的品质因素 M 成反比。品质因素 M 定义为^[7]:

$$M = \sigma_{\text{abs}} \sigma_{\text{em}} \tau_f C \quad (1)$$

M 值越大的晶体意味着更适合于固体激光输出。 C 为晶体中 Yb 离子的浓度,从表 1 中列出的 σ_{abs} , σ_{em} 和 τ_f 的值通过(1)式可以计算出它们的品质因素。50 at.-% Yb:YAG 和 YbAG 晶体的品质因素为 5 at.-% Yb:YAG 晶体的品质因素的 3 和 4 倍,由此可见高掺杂 Yb:YAG 和 YbAG 晶体是有前途的

激光增益介质。

参 考 文 献

- 1 Qiu Hongwei, Zhong Heyu, Li Hongjun *et al.* Thermal properties of Yb:YAG laser crystal[J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(2): 173-175
邱宏伟,钟鹤裕,李红军等. Yb:YAG 晶体的热学性质[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(2):173-175
- 2 H. W. Bruesselbach, D. S. Sumida. Member. Low-heat high-power scaling using InGaAs-diode-pumped Yb:YAG lasers [J]. *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.*, 1997, **3**(1):105-116
- 3 C. Stewen, K. Contag, M. Larionov *et al.* A 1-kW CW thin disc laser[J]. *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.*, 2000, **6**(4): 650-659
- 4 E. C. Honea, R. J. Beach, S. C. Mitchell *et al.* High-power dual-rod Yb:YAG laser[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(11):805-807
- 5 Yang Peizhi, Deng Peizhen, Xu Jun *et al.* Growth of high-quality single crystal of 30 at% Yb:YAG and its laser performance [J]. *J. Cryst. Growth*, 2000, **216**:348-351
- 6 Yang Peizhi, Deng Peizhen, Yin Zhiwen. Concentration quenching in Yb:YAG[J]. *J. Lumin.*, 2003, **91**:51-54
- 7 Xu Yongyuan, Gong Xinghong, Chen Yujin *et al.* Crystal growth and optical properties of YbAl₃(BO₃)₄: a promising stoichiometric laser material[J]. *J. Cryst. Growth*, 2003, **252**:241-245