

文章编号: 0258-7025(2006)07-0973-04

温度梯度法生长 Nd:YAG 晶体的 1200 W 激光输出

姜本学^{1,2}, 徐 军¹, 李劲东^{1,2}, 李红军^{1,2}, 胡企铨¹

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800; ² 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 用温度梯度法(TGT)生长了大尺寸的 Nd:YAG 激光晶体,测试了室温下的吸收谱并利用吸收谱研究了 Nd 离子在 YAG 晶体中的分布。比较了温度梯度法与提拉法生长晶体的区别。根据热容激光的原理,利用生长的 Nd:YAG 激光晶体片设计了热容激光器,利用侧面抽运,获得了 1200 W 的激光输出,工作时间为 2 s,光-光转换效率为 30%。

关键词 材料;谱性质;温度梯度法;Nd:YAG 晶体;热容激光

中图分类号 TN 248.1 **文献标识码** A

Temperature Gradient Technique Grown Nd:YAG Crystal for Heat Capacity Laser with Laser Output of 1200 W

JIANG Ben-xue^{1,2}, XU Jun¹, LI Jin-dong^{1,2}, LI Hong-jun^{1,2}, HU Qi-quan¹

(¹ Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

² Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Abstract Large sized high quality Nd:YAG crystal was grown by the temperature gradient technique (TGT) method. The absorption spectra of Nd:YAG crystal at room temperature were measured. The distributions of Nd ions in Nd:YAG crystal were studied by using absorption spectra. According to heat capacity laser theory, a heat capacity laser by using this Nd:YAG crystal was designed and fabricated with the laser output of 1200 W and the optical-optical conversion efficiency of 30%.

Key words materials; spectra properties; temperature gradient technique method; Nd:YAG crystal; heat capacity laser

1 引 言

高平均功率(HAP)输出的固体激光器(SSL)在工业、科学和军事等领域都有着非常诱人的应用前景^[1~3]。设计高平均功率固体激光器的主要的挑战有两个:如何获得大尺寸高质量激光晶体以及对抽运过程中产生的无法避免的废热进行处理。热机械变形主要是由于淀积在增益介质里的废热。去除这些废热就会引起热透镜、机械应力及其他许多问题的产生,进而可能使激光光束质量下降,降低激光输

出功率,甚至可能导致固体激光增益介质的破裂。

大多数固体激光器系统在工作时连续冷却,以避免这种损伤。废热从激光介质内传导至表面,由水等冷却剂带走。因为大的温度梯度会导致机械应力、物理变形、光学畸变,最终会使光学元件断裂。所以高功率固体激光器面临的主要问题是抽运过程中的热破坏。传统激光器采用发光过程同时冷却的方法,很容易在激光介质中产生热机械应力。这种应力断裂极限决定着激光器的最高输出能量^[4]。固体热容激光器(SSHCL)^[5~7]的创新之处就是激光

收稿日期:2005-12-01;收到修改稿日期:2006-02-23

作者简介:姜本学(1980—),男,山东青州人,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。E-mail:jiangbenxue@163.com

导师简介:徐 军(1965—),男,江苏人,中国科学院上海光学精密机械研究所研究员,主要从事激光与光功能材料的研究。E-mail:xujun@mail.shenc.ac.cn

工作过程(10~20 s)是绝热过程,停止抽运后再冷却激光工作物质。与传统激光器相比,热容激光器激光介质表面温度高于中心温度,废热在热容激光介质中的淀积是压应力而非张应力。理论分析表明,压应力的破坏阈值为张应力的5倍以上。

近年来,大尺寸 Nd:GGG 激光晶体的出现,使得高平均功率固体激光器得到长足的发展。而用传统的提拉法无法生长大尺寸无核心 Nd:YAG 晶体。所以国内外将研究的重点放在了 Nd:GGG 晶体上^[4]。Nd:YAG 晶体的热导率、吸收截面、发射截面都较 Nd:GGG 大,同时 Nd:YAG 晶体在生长过程中不存在组分挥发问题,晶体的缺陷较少。根据盘片的热应力极限,相同条件下 Nd:YAG 晶体的输出功率比 Nd:GGG 晶体大约高1/3^[3]。所以对于大尺寸高质量 Nd:YAG 激光晶体生长和性能的研究具有重要的战略意义和社会价值。

本文用温度梯度法(TGT)生长了大尺寸的 Nd:YAG 晶体,设计了激光二极管抽运的固体热容激光器件,采用59 mm×38 mm×5.7 mm的晶片片,用两个峰值功率为20 kW的激光二极管阵列获得了平均功率为1200 W的激光输出,光-光转换效率为30%。

2 晶体生长与光谱测试

温度梯度法生长大尺寸 Nd:YAG 晶体的具体工艺见参考文献[8,9]。晶体生长过程中,石墨碳的挥发主要以扩散、渗透等形式进入熔体上部区域,结晶于晶体的尾部。晶体生长完毕后,将其放入 KSY-12D-18 型 MoSi₂ 棒坩锅中以70 °C/h速率加热到1550 °C,进行高温氧化气氛(空气)脱碳退火,去除应力。恒温24 h后,以40 °C/h速率缓慢降至室温,待晶体完全冷却后取出,最终晶体为粉红色,如图1所示。

温度梯度法生长晶体的特点是熔体中的温度梯度与重力场方向相反,晶体生长从坩锅底部开始,以近乎平的固液界面向上推进。熔体经充分搅拌均匀时,晶体中 Nd³⁺ 离子的浓度可表示为

$$C_s = C_0 k_m (1 - g)^{k_m - 1}, \quad (1)$$

其中 g 为熔体的结晶分数, k_m 为 Nd 在 YAG 晶体中的分凝系数。 C_0 为混料中的原始浓度。图2中空圆线为根据式(1)计算的提拉法(CZ)生长晶体时 Nd 离子的相对分布。由于 Nd 离子的分凝系数为0.18,远小于1,所以随着晶体的生长 Nd 离子浓度

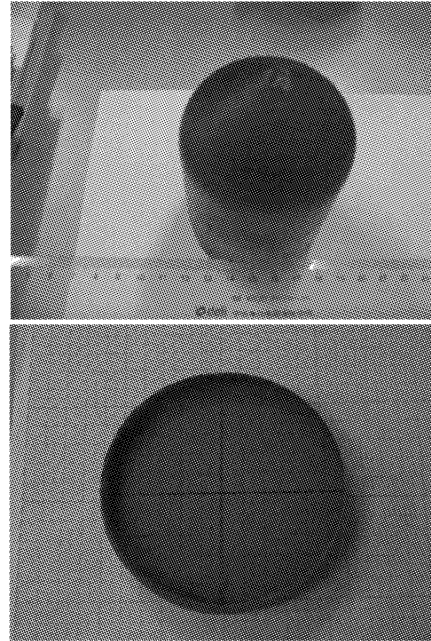


图1 退火后的 Nd:YAG 晶体照片

Fig. 1 Photographs of after-annealing Nd:YAG single crystal

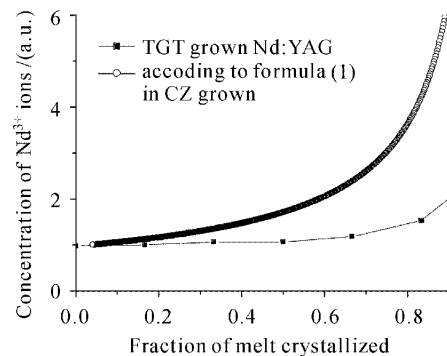


图2 温度梯度法生长 Nd:YAG 晶体中 Nd 离子的分布与计算值比较

Fig. 2 Concentration distribution of Nd ions in TGT grown YAG and calculated one in Czochralski (CZ) grown

迅速增大(到最后已经非常难以生长晶体)。温度梯度法生长 Nd:YAG 晶体时,由于晶体生长过程中熔体是静止的,不像提拉法生长是熔体被晶体搅拌,使得 Nd 在 YAG 晶体中的分布不能严格按照公式(1)计算。Nd 离子会强制进入晶体中,所有的原料全部结晶。图3为温度梯度法与提拉法生长的同尺寸晶体可取出的最大晶片示意图。由图3可以看出,在同一层生长平面上,晶体中间部分浓度分布较为均匀,晶体周边浓度高于中心浓度,说明晶体生长过程中为凸界面生长。微凸界面有利于杂质离子向外

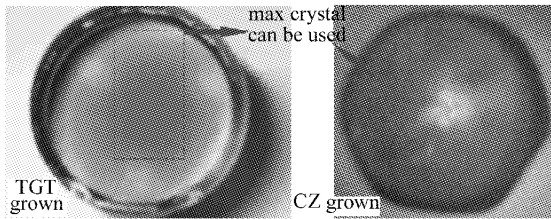


图 3 温度梯度法和提拉法生长的 YAG 晶体的比较

Fig. 3 Comparison between TGT and CZ grown YAG crystal

排出,所以温度梯度法生长 Nd:YAG 晶体时,核心位于周边,这非常有利于从晶体中心取出大晶片。

用于光谱测试的样品平行于生长方向 $\langle 111 \rangle$ 切割,样品经粗、细磨和抛光,厚度为 0.9 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 JASCO V-570)。图 4 为室温下 Nd:YAG 晶体的特征吸收谱(300 ~ 1000 nm)。吸收系数和吸收截面可以表示为

$$\alpha(\lambda) = 2.303 \lg(I_0/I)/l, \quad (2)$$

$$\sigma_{\text{abs}}(\lambda) = 2.303 \lg(I_0/I)/NI, \quad (3)$$

式中 $\lg(I_0/I)$ 为光强度, N 为单位体积内激活粒子的浓度, l 为样品的厚度。由图 4 可以看出,用温度梯度法生长的 Nd:YAG 晶体,随着掺杂浓度的提高吸收峰发生蓝移,最高点漂移到 807 nm 甚至 806 nm,而不像提拉法生长的 Nd:YAG 晶体那样位于 808 nm 处。其原因可能是 Nd 离子的掺入导致晶格变形,晶场强度增加使得 Nd 离子的斯托克斯分裂加剧,光谱发生蓝移。由式(3)可以计算出 806 nm 处的吸收截面为 $3.7 \times 10^{-19} \text{ cm}^{-2}$ 。吸收半高宽为 4 nm。

图 4(a)为垂直于生长方向 $\langle 111 \rangle$ 切片上从中心到边缘 Nd 离子在晶体中的分布(分别取了 5 个点)。从中可以看出,晶体中 Nd 离子的浓度差距较小(处于中心的点 3 吸收系数稍小而在接近边缘的点 5 吸收系数稍大),说明晶体是在接近平界面下(微凸界面)生长的。图 4(b)测试点 9, 8, 1, 6 为沿晶体生长方向 Nd 离子的分布,可以看到即使全部熔体都结晶,到最后 Nd 离子的浓度差距也不会很大。所以用温度梯度法生长 Nd:YAG 晶体可以降低晶体中由于 Nd 离子分凝系数过小而引起的浓度分布不均。测试点 8, 9 位于结晶的初始部分(即放肩部分),晶体在 350 nm 处的吸收系数出现大幅度增加,可能是此部分晶体的质量较差,存在大量的缺陷、色心、杂质等。从宏观上可以看到存在类似链状

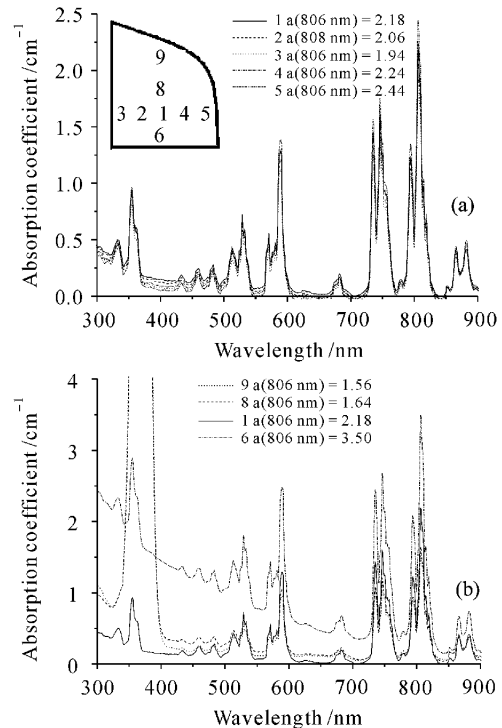


图 4 Nd:YAG 晶体各个部分的吸收谱

Fig. 4 Absorption spectra of several parts of Nd:YAG crystal

的散射中心(文献[8]详细介绍了在这部分中存在的缺陷),此处的强吸收为杂质缺陷吸收。测试点 6 在短波长吸收系数迅速上升,表明其中存在着严重的光散射损耗,包括瑞利散射和米氏散射,可能是由样品中的微气孔、包裹物等缺陷造成的。说明在晶体生长的末端质量下降。

3 实验

用温度梯度法生长的 Nd:YAG 激光晶体初步进行了激光实验,获得了波长为 $1.06 \mu\text{m}$ 的高效率激光输出。实验中用激光二极管阵列作为抽运源, Nd:YAG 激光器的实验装置如图 5 所示, Nd:YAG

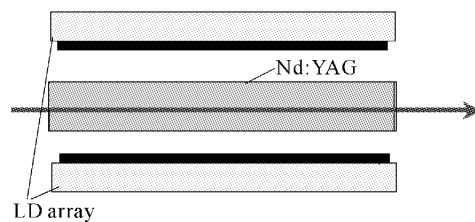


图 5 Nd:YAG 晶体热容激光实验

Fig. 5 Experimental setup of Nd:YAG heat capacity laser

晶片的尺寸为59 mm×38 mm×5.7 mm,掺杂原子数分数为1%。采用平-平腔结构。最终得到了1200 W的激光输出,光-光转换效率为30%,工作时间为2 s。

4 结 论

用温度梯度法生长出了高质量大尺寸的Nd:YAG晶体,晶体的质量较好。测试了晶体的光谱性质,计算了晶体的光谱参数。利用吸收光谱研究了晶体中Nd离子的分布。利用生长的Nd:YAG晶体设计了固体热容激光器件,获得了光-光转换效率为30%,平均功率为1200 W的激光输出。

参 考 文 献

- 1 Alan J. Kemp, Gareth J. Valentine, David Burns. Progress towards high-power, high-brightness neodymium-based thin disk lasers [J]. *Progress in Quantum Electron.*, 2004, **28**:305~344
- 2 John Vetrovec, Andrea Koumvakalis, Rashmi Shah *et al.*. Development of solid-state disk laser for high average power [C]. *SPIE*, 2003, **4968**:55~64
- 3 John Vetrovec. Compact active laser [C]. *SPIE*, 2002, **4630**:1~12
- 4 G. F. Albrecht, S. B. Sutton, E. V. George *et al.*. Solid state heat capacity laser [J]. *Laser and Particle*, 1998, **16**(4):605~625
- 5 G. F. Albrecht, E. V. George, F. K. William *et al.*. High energy bursts from solid state laser operated in the heat capacity limited regime [P]. United States Patent : 5526372, 1996206211
- 6 George Albrecht, E. Victor George, William F. Krupke *et al.*. High energy bursts from a solid state laser operated in the heat capacity limited regime [P]. United States Patent. Patent Number:5,526,372
- 7 Cao Weilou, Zhang Meizhen, Hua Xuelei. Output characteristics of large aperture Nd:YAG disk laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 1988, **8**(8):711~716
曹渭楼,张梅珍,华雪蕾. 40 mm 孔径 Nd:YAG 片状器件的激光特性研究[J]. *光学学报*, 1988, **8**(8):711~716
- 8 Deng Peizhen, Qiao Jingwen, Hu Bing *et al.*. Perfection and laser performances of Nd:YAG crystals grown by TGT [J]. *Journal of Crystal Growth*, 1988, **92**:276~286
- 9 J. Dong, P. Deng, F. Gan *et al.*. High doped Nd:YAG crystal used for microchip laser [J]. *Opt. Commun.*, 2001, **197**:413~418