

文章编号: 0258-7025(2007)09-1171-03

激光二极管抽运的国产 Yb:YAG 陶瓷激光器

许毅¹, 于海波¹, 吴玉松², 姜本学¹, 李江², 潘裕柏², 梁晓燕¹, 郭景坤², 徐军¹

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800; ² 中国科学院上海硅酸盐研究所, 上海 200050)

摘要 研究了国产 Yb:YAG 陶瓷的激光输出特性。激光器采用激光二极管(LD)纵向同轴抽运 Yb:YAG 陶瓷样品,样品的掺杂原子数分数为 1%,一端面镀 940 nm 和 1030 nm 双增透膜,另一端面镀 1030 nm 增透膜,激光器在 1031 nm 处获得了近红外激光输出。实验中分别测试了 Yb:YAG 陶瓷在不同输出透射率($T=4\%, 8\%, 10\%$)条件下的激光输出特性。整个实验过程中,激光器维持基横模运转。当输出透射率为 10%,吸收的抽运功率为 9 W 时,激光器获得最大的激光输出功率为 1.63 W,相应的斜率效率为 23.2%。

关键词 激光器;陶瓷激光器;端面抽运;Yb:YAG 陶瓷

中图分类号 TN 248.1 文献标识码 A

Laser Diode-Pumped Domestic Yb:YAG Ceramic Laser

XU Yi¹, YU Hai-bo¹, WU Yu-song², JIANG Ben-xue¹, LI Jiang²,
PAN Yu-bo², LIANG Xiao-yan¹, GUO Jing-kun², XU Jun¹

(¹ Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)
(² Shanghai Institute of Ceramics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

Abstract The output performance of a domestic Yb:YAG ceramic laser is studied. The laser diode-end-pumped Yb:YAG ceramic is doped with atomic fraction of 1%, with one end face of high transmission at 940 nm and 1030 nm and the other of high transmission at 1030 nm. The near infrared laser output at 1031 nm is obtained. The output performance of Yb:YAG ceramic laser under different transmissivities (4%, 8%, 10%) is experimentally tested. The maximum output power of 1.63 W is obtained with output transmissivity of 10%, absorbed pump energy of 9 W, and slope efficiency of 23.2%.

Key words lasers; ceramic laser; end-pump; Yb:YAG ceramic

1 引言

20 世纪 90 年代以来,随着抽运源 InGaAs 激光二极管(发射波长为 0.9~1.1 μm)性能的提升及价格的下降,以及人们对激光器的高效率、高功率、小型化、集成化的追求,兴起了掺 Yb³⁺ 激光材料研究的热潮^[1~4]。相对于掺 Nd³⁺ 的激光材料而言,掺杂 Yb³⁺ 的激光材料有许多优点:无交叉弛豫振荡和激发态吸收,有较宽的吸收带、长的荧光寿命及高的量子效率等。在目前研究的掺 Yb³⁺ 激光材料中,由于

Yb:YAG 晶体具有良好的光谱性能、优异的光学、热力学和机械性能而使其成为研究最多的激光增益介质^[5]。然而 YAG 单晶材料固有的生长周期长、掺杂浓度低、生产成本高等因素在一定程度上制约了其应用范围^[6]。近年来,随着透明光学陶瓷材料制备工艺的突破,激光陶瓷作为一种新型激光介质材料得到了迅速的发展。Yb:YAG 激光陶瓷相比 Yb:YAG 单晶材料有容易制造、成本低、可以制造大尺寸、高掺杂浓度、可以制造多层和多功能的陶瓷结构、且耗时少并可以大批量生产等优点。而且陶

收稿日期:2007-01-25; 收到修改稿日期:2007-05-11

基金项目:上海市光科技(05DZ22005)资助项目。

作者简介:许毅(1981—),男,湖南人,硕士研究生,主要从事掺 Yb³⁺ 激光介质激光特性的研究。

E-mail: xuyi@siom.ac.cn

导师简介:梁晓燕(1968—),女,山西人,研究员,主要从事超快超强激光技术及半导体抽运的全固态激光技术的研究。

E-mail: liangxy@siom.ac.cn

瓷的物理参数如热导率,光学性质如吸收光谱、发射光谱、荧光寿命等都与单晶相似。因此高质量的 Yb:YAG 陶瓷在未来将是 Yb:YAG 单晶材料强有力的替代品。

我国的透明陶瓷研究已有相当长的历史,并取得了很好的成果,如 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, MgAl_2O_4 (尖晶), PLZT, MgF_2 , ZnS 等。但激光陶瓷研究起步较晚,并与国外有较大的差距。近年来,激光透明陶瓷已经成为国内陶瓷研究领域的一大热点。最近,中国科学院上海硅酸盐研究所相继制备了较高质量的 Nd:YAG 和 Yb:YAG 多晶透明陶瓷并获得了激光输出^[7,8]。在本文中,为了降低腔内损耗,采用了较短的谐振腔,并使用不同的输出透射率,更系统、更有效地研究由中国科学院上海硅酸盐研究所制备的 Yb:YAG 陶瓷的激光输出特性。

2 Yb:YAG 陶瓷的制备和性质

陶瓷材料的制备是一个非常重要的过程。在制备过程中中国科学院上海硅酸盐研究所采用高纯商业 Y_2O_3 , Al_2O_3 , Yb_2O_3 超微粉作为原料,利用自己开发的可以低温合成不同团聚结构、不同掺杂浓度的纳米 Yb:YAG 粉体的溶胶-凝胶燃烧合成法技术制备粉体,再通过球磨混合、煅烧干燥,在 1650~1780 °C 真空条件下保温 10 h 以上,烧结成致密的 Yb:YAG 透明陶瓷。图 1 为室温下 Yb:YAG 多晶陶瓷样品的透射光谱,在激光工作波段 1031 nm 处的全透射率达 77%,且透射光谱基底基本保持水平,基底透射率大于 80%,没有出现明显的瑞利散射和米氏散射。作为能级结构最简单的激活离子, Yb^{3+} 离子的电子构型为 $4f^{13}$, 仅有两个电子态:基态 $^2F_{7/2}$ 和激发态 $^2F_{5/2}$, 两者的能量间隔约为

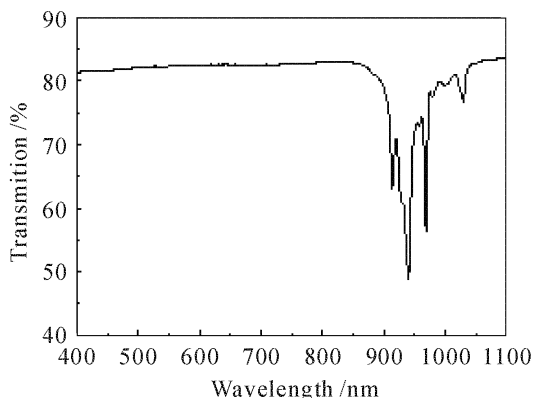


图1 室温下 Yb:YAG 多晶陶瓷的透射光谱

Fig. 1 Transmission spectra of polycrystal Yb:YAG ceramic at room temperature

10000 cm^{-1} , 在晶体场作用下,产生 Stark 分裂,基态和激发态分别分裂为 4 个和 3 个子能级,形成准三能级的激光运行机制,图 2^[9] 为 Yb:YAG 的能级示意图。由于 Yb^{3+} 离子在 1030 nm 处的吸收光谱和发射光谱^[9] 存在部分重叠,这将导致激发态发出的光子被基态离子吸收,产生自吸收效应^[10]。自吸收效应的存在将会消耗激发光,使激光振荡阈值发生变化,因此实验中需要高亮度的抽运源和高强度抽运使自吸收效应得以饱和,从而达到激光振荡阈值,获得激光输出。

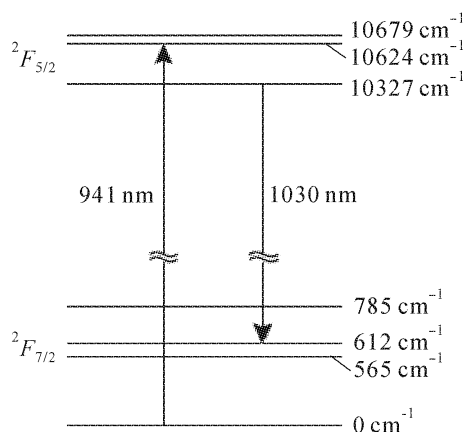


图2 Yb:YAG 能级示意图

Fig. 2 Energy level diagram of Yb:YAG

3 实验装置

实验采用端面抽运结构,激光器结构如图 3 所示。Yb:YAG 多晶陶瓷块的尺寸为 4 mm × 4 mm × 3 mm, Yb^{3+} 离子的掺杂原子数分数为 1%,陶瓷块双面抛光,一面镀 1030 nm 和 940 nm 的双增透膜,另一面镀 1030 nm 的增透膜。陶瓷块通过钢箔包裹后固定在铜质的水冷热沉上,与铜质热沉保持较好的热接触,冷却水温控制在 15 °C。抽运源采用光纤耦合输出的激光二极管(LD),光纤芯径为 200 μm ,输出中心波长在 937 nm,采用 1:1 的透镜组聚焦在 Yb:YAG 多晶陶瓷表面。谐振腔为平凹腔,其中 M_1 为平面镜,镀 940 nm 增透和 1030 nm 增透双色膜, M_2 为耦合输出镜,是曲率半径 $R = 100$ mm 的球面

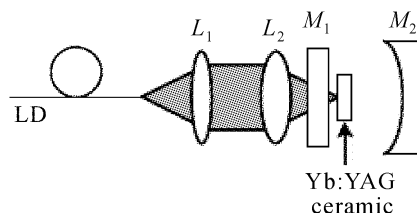


图3 激光器结构示意图

Fig. 3 Configuration of laser system

镜。设计的腔长约为 4 cm,多晶陶瓷块表面的振荡模半径约为 120 μm ,振荡模半径略大于抽运模半径,整个实验过程中激光器维持基横模运转。

4 实验结果及讨论

实验中,最初以曲率半径 $R = 200 \text{ mm}$ 的凹镜作为激光器的耦合输出镜,为了保证 Yb:YAG 陶瓷样品中振荡模与抽运模的匹配,此时激光器谐振腔的长度为 18.5 cm。当输出透射率为 10%,吸收的抽运功率为 9 W 时,获得最大的激光输出功率为 1.28 W,相应的斜率效率为 17.3%。为了降低腔内损耗,提高激光器的输出效率,进一步优化腔型的设计,以曲率半径 $R = 100 \text{ mm}$ 的凹镜作为耦合输出镜,在保证陶瓷样品中振荡模与抽运模匹配的条件下,此时谐振腔的长度仅为 4 cm。测试了在不同输出透射率 ($T = 4\%, 8\%, 10\%$) 条件下, Yb:YAG 陶瓷激光器的激光输出功率。随着输出透射率的增大,激光阈值从 1.85 W 上升至 2.06 W,当输出透射率为 10% 时,获得最大的激光输出功率为 1.63 W,光-光转换效率为 12.7%,相应的斜率效率为 23.2%。图 4 为不同透射率条件下短谐振腔的激光输入、输出曲线。随着抽运功率的增加, Yb:YAG 陶瓷激光器的输出呈线性增加且在最大抽运功率处没有出现明显的饱和,因此若能进一步增加抽运功率,有望获得更大的激光输出功率。

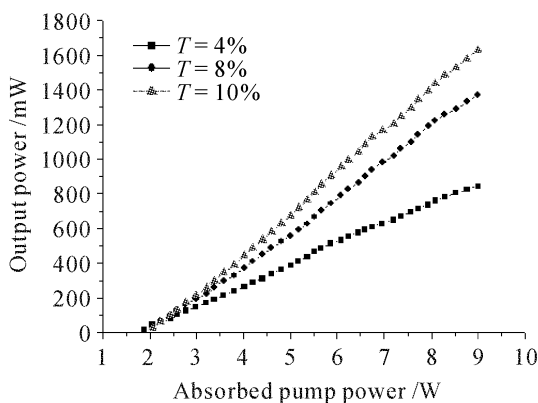


图 4 激光输入、输出关系曲线

Fig. 4 Curve of laser input and output power

实验结果表明在激光陶瓷中振荡模与抽运模匹配的条件下,短谐振腔的激光输出效率要优于长谐振腔。若能进一步优化谐振腔的设计,并选择最佳的耦合输出透射率,相信可以获得更大的激光输出

功率。此外,增加 Yb^{3+} 离子的掺杂浓度,选择最佳的样品长度,并进一步改善激光陶瓷的制备工艺以提高激光陶瓷的透明性和均匀性,都将优化 Yb:YAG 陶瓷的激光输出性能。

5 结 论

继国产 Yb:YAG 陶瓷获得激光输出后,进一步深入地研究了国产 Yb:YAG 透明陶瓷的激光输出性能。通过减小腔长,降低腔内损耗,在 1031 nm 附近获得了 1.63 W 的激光输出,斜率效率为 23.2%。实验结果表明国产 Yb:YAG 陶瓷的制备工艺已经获得了较大突破,揭示了高质量的 Yb:YAG 陶瓷在未来作为高功率高效率激光增益介质的应用前景。

参 考 文 献

- William F. Krupke, L. L. Chase. Ground-state depleted solid-state lasers: principles, characteristics and scaling [J]. *Optical Quantum Electronics*, 1990, **22**:S1~S22
- Laura D. Deloach, Stephen A. Payne, L. L. Chase *et al.*. Evaluation of absorption and emission properties of Yb^{3+} doped crystals for laser applications [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1993, **29**(4):1179~1191
- Xu Xiaodong, Zhao Zhiwei, Song Pingxin *et al.*. Growth of $\text{Yb}_3\text{Al}_5\text{O}_{13}$ laser crystal [J]. *Chin. Ceram. Soc.*, 2004, **32**(5):590~593
徐晓东,赵志伟,宋平新等. $\text{Yb}_3\text{Al}_5\text{O}_{13}$ 激光晶体的生长[J]. *硅酸盐学报*, 2004, **32**(5):590~593
- A. Giesen, H. Hugel, A. Voss *et al.*. Scalable concept for diode-pumped high-power solid state lasers [J]. *Appl. Phys. B*, 1994, **58**(4):365~372
- Stephen A. Payne, Howard T. Powell, William F. Krupke. Can solid-state laser technology serve usefully beyond fusion ignition facilities? [C]. *SPIE*, 1996, **2633**:256~263
- Ma Haixia, Lou Qihong, Ling Lei *et al.*. Current advances in ceramic lasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2003, **40**(2):45~51
马海霞,楼祺洪,凌磊等. 陶瓷激光器的研究发展[J]. *激光与光电子学进展*, 2003, **40**(2):45~51
- Li Jingdong, Jiang Benxue, Pan Yubo *et al.*. Laser output was achieved for domestic Nd:YAG ceramic [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(6):864
李劲东,姜本学,潘裕柏等. 国产 Nd:YAG 陶瓷获得激光输出[J]. *中国激光*, 2006, **33**(6):864
- Xu Yi, Wu Yusong, Jiang Benxue *et al.*. Laser output was achieved for domestic Yb:YAG transparent ceramic [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1):60
许毅,吴玉松,姜本学等. 国产 Yb:YAG 透明陶瓷首次实现激光输出[J]. *中国激光*, 2007, **34**(1):60
- K. Takichi, H. Yagi, J. Lu *et al.*. Yb^{3+} -doped $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ceramics—A new solid-state laser material [J]. *Phys. Stat. Sol. (a)*, 2003, **200**(1):R5~R7
- J. Kong, J. Lu, K. Takaichi *et al.*. Diode-pumped Yb:Y₂O₃ ceramic laser [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **82**(16):2556~2558