

二极管抽运 Yb:YAG 陶瓷连续激光器和波长调谐实验研究

汪 珂¹ 朱江峰¹ 高子叶¹ 李 江² 王军利¹ 谢腾飞² 潘裕柏² 魏志义³

¹西安电子科技大学物理与光电工程学院, 陕西 西安 710071

²中国科学院上海硅酸盐研究所透明光功能无机材料重点实验室, 上海 200050

³中国科学院物理研究所光物理重点实验室, 北京凝聚态物理国家实验室, 北京 100190

摘要 实验研究了二极管激光器抽运的国产 Yb:YAG 陶瓷的高效率连续激光输出和波长调谐输出特性。比较了不同掺杂原子数分数(1%、2%、5%、10%、15%)和不同厚度(3、6 mm)的激光陶瓷的输出激光性质。当吸收抽运功率为 6.3 W 时,在 3 mm 厚 15% 掺杂样品中得到了 2.4 W 的连续激光输出功率,斜效率为 47%。在谐振腔内插入三棱镜进行波长调谐,实验上得到的最宽波长调谐范围为 1017~1095 nm。实验结果表明高质量的 Yb:YAG 陶瓷在高功率全固态超短脉冲产生和放大中具有重要的应用。

关键词 激光器; 二极管抽运; Yb:YAG 陶瓷; 波长调谐

中图分类号 TN 248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.1202004

Continuous Wave and Wavelength Tuning Performances of Diode-Pumped Yb:YAG Ceramic Laser

Wang Ke¹ Zhu Jiangfeng¹ Gao Ziyue¹ Li Jiang² Wang Junli¹ Xie Tengfei²
Pan Yubai² Wei Zhiyi³

¹School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China

²Key Laboratory of Transparent and Opto-Functional Advanced Inorganic Materials, Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China

³Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract The high efficiency continuous wave and wavelength tuning properties of a diode-pumped domestic Yb:YAG ceramic laser is studied. The laser performances of ceramics with different atomic fractions (1%, 2%, 5%, 10%, 15%) and thickness (3, 6 mm) are compared. The highest output power of 2.4 W is obtained from a 3 mm 15% doping ceramic, pumped by an absorbed pump power of 6.3 W, corresponding to a slope efficiency of 47%. Wavelength tuning is realized by inserting a prism in the laser cavity, and the broadest tuning range is from 1017 to 1095 nm. The experimental results indicate the high-quality Yb:YAG ceramic is a promising candidate in high-power all-solid-state ultrashort pulse generation and amplification.

Key words lasers; diode-pump; Yb:YAG ceramic; wavelength tuning

OCIS codes 140.3480; 140.3580; 140.3600

收稿日期: 2015-07-20; 收到修改稿日期: 2015-08-27

基金项目: 国家自然科学基金(61205130、50990301)、科技部国家重大科学仪器设备开发专项(2012YQ120047)

作者简介: 汪 珂(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事全固态飞秒激光器方面的研究。E-mail: 534178876@qq.com

导师简介: 朱江峰(1980—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事超短激光脉冲技术及应用方面的研究。

E-mail: jfzhu@xidian.edu.cn(通信联系人)

1 引言

激光二极管抽运的全固态激光器具有结构紧凑、性能稳定、光束质量好、电光效率高等优势,一直是激光技术研究的重点。特别是基于掺杂 Yb^{3+} 激光介质的全固态激光器,得益于 Yb^{3+} 优良的光学性质,如能级结构简单,吸收发射谱宽,上能级寿命长,无交叉弛豫、能量上转换、浓度淬灭等效应,是在 $1\ \mu\text{m}$ 波段实现超短脉冲产生和高能量高功率脉冲激光系统的重要手段^[1-5]。在众多的掺杂 Yb^{3+} 激光材料中, $\text{Yb}:\text{YAG}$ 晶体以其优良的机械、热学和光谱学综合性能,成为人们广泛研究和使用的激光晶体。近年来报导了一系列基于 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 晶体的大功率激光器^[6-7]和飞秒锁模超短脉冲激光器^[8-10]。随着高质量透明 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 激光陶瓷制备工艺的成熟,人们已经能够制作高掺杂浓度、多功能的 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 陶瓷,而且制作周期和制作成本大幅下降,因此高质量 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 陶瓷可以作为 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 晶体的有益补充。2007年,中国科学院上海光学精密机械研究所许毅等^[11]利用国产 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 陶瓷获得了1.63 W的连续激光,斜效率为23.2%。同年,Dong等^[12]在高浓度掺杂 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 陶瓷激光器中实现了2.67 W平均功率、52%斜效率的结果。Nakamura等^[13]利用原子数分数9.8%的 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 陶瓷实现了1020.1~1083.6 nm的波长调谐范围。在锁模实验研究方面,利用半导体可饱和吸收镜(SESAM)启动锁模,吕亮等^[14]实现了输出功率为1.04 W、脉冲宽度为10.4 ps的二极管抽运 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 皮秒激光器。Yoshioka等^[15]得到了233 fs、20 mW的飞秒锁模结果。Zhou等^[16]实现了高效率的二极管抽运的飞秒 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 激光器,输出功率为1.9 W,脉冲宽度为418 fs。

利用国产高质量 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 陶瓷,实验研究了不同掺杂原子数分数(1%、2%、5%、10%、15%)和不同厚度(3、6 mm)激光陶瓷的输出激光性质。随着掺杂浓度的提高,在相同的抽运功率下输出激光功率提高,但是受限于高掺杂浓度的自吸收效应,最大输出功率与样品的掺杂浓度和厚度有关。在实验中,当抽运激光功率为8 W时(吸收的抽运功率为6.3 W),在3 mm厚15%掺杂样品中得到了2.4 W的最大连续激光输出功率,对应的斜率效率为47%。通过腔内插入一个 SF_6 三棱镜进行输出激光波长的调谐,同样在3 mm厚15%掺杂样品中得到了1017~1095 nm的最宽波长调谐范围。实验结果表明国产 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 陶瓷具有优良的光学性质,波长调谐范围比国际上报道的还要宽^[13],因此利用高质量国产 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 陶瓷有望获得输出参数优异的二极管抽运飞秒锁模实验结果。

2 实验装置

实验装置如图1所示。抽运源是北京凯普林光电科技有限公司的光纤耦合半导体激光器,中心波长为970 nm,最大输出功率为30 W。输出激光由一个芯径为 $100\ \mu\text{m}$ 、数值孔径为0.22的光纤耦合输出。利用一个1:1的聚焦耦合系统把抽运激光聚焦到 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 陶瓷中,焦点处的光斑直径约为 $100\ \mu\text{m}$ 。实验中所用的 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 陶瓷由中国科学院上海硅酸盐研究所制备,陶瓷样品的掺杂原子数分数分别为1%、2%、5%、10%和15%,均切割为 $5\ \text{mm}\times 5\ \text{mm}$ 的通光口径,厚度分别为3 mm和6 mm。所有样品前后表面均为光学级抛光,未镀膜。为了降低热透镜效应,样品用铝箔包裹夹持在紫铜冷却装置上,由循环水对紫铜装置进行冷却,温度维持在 $10\ ^\circ\text{C}$ 。激光腔型为简单的三镜腔,其中M1是一个平面双色镜,镀有对970 nm的增透膜和对1020~1200 nm波段的高反膜。M2是一个曲率半径为200 mm的凹面镜,曲率半径为200 mm,也镀有对970 nm的增透膜和对1020~1200 nm波段的高反膜。OC是输出耦合镜。根据 $ABCD$ 矩阵模拟和实验优化抽运光与激光的模式匹配,设计谐振腔的总腔长为402 mm,输出激光为基模高斯光束。在研究 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 陶瓷的波长调谐

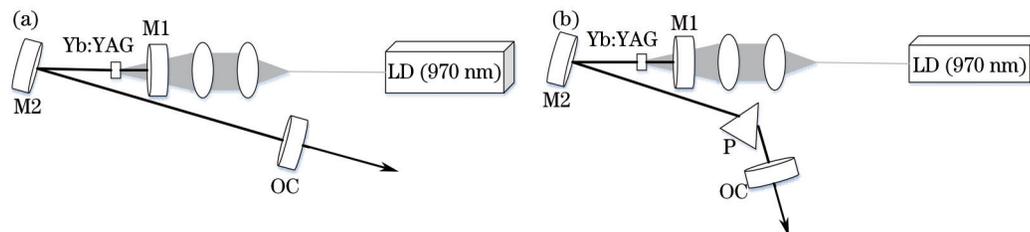


图1 (a) $\text{Yb}:\text{YAG}$ 陶瓷激光器连续激光输出实验装置图;(b) $\text{Yb}:\text{YAG}$ 陶瓷激光器波长调谐实验装置图

Fig.1 (a) Schematic of diode-pumped continuous-wave $\text{Yb}:\text{YAG}$ ceramic laser;
(b) schematic of diode-pumped wavelength tunable $\text{Yb}:\text{YAG}$ ceramic laser

性质时,在谐振腔内插入一个布儒斯特角切割的SF6三棱镜P,如图1(b)所示,通过微调三棱镜的角度可以实现输出激光的波长调谐。

3 实验结果与分析

首先测试了不同掺杂浓度和不同厚度的陶瓷样品对抽运激光的吸收率,实验结果如图2所示。在最大8 W 的入射抽运功率下,不同样品的吸收抽运功率随入射抽运功率的增加接近于线性关系。对于3 mm厚15%掺杂的Yb:YAG陶瓷,单程抽运的吸收率为78.9%,而对于6 mm厚15%掺杂的Yb:YAG陶瓷,抽运吸收率约为95.3%,几乎全部吸收抽运功率。

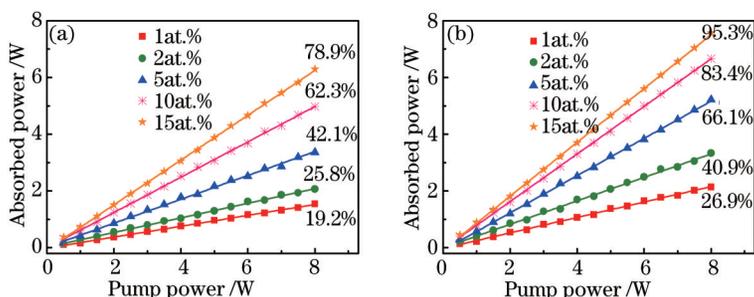


图2 (a) 3 mm厚和(b) 6 mm厚的不同掺杂浓度的Yb:YAG陶瓷吸收抽运功率随入射抽运功率的关系

Fig.2 Absorbed pump power versus incident pump power for (a) 3 mm and (b) 6 mm thickness Yb:YAG ceramic with different doping concentrations

接下来利用输出率分别为2.5%和10%的输出耦合镜研究了不同掺杂浓度和不同厚度Yb:YAG陶瓷的连续激光性质,实验结果如图3所示。图3(a)和(b)分别是利用厚度为3 mm的陶瓷,在2.5%和10%的输出耦合镜下的输出激光功率曲线。可以看出,对于每一种掺杂浓度,输出激光与抽运激光呈线性关系,且掺杂浓度越高,输出激光功率越大。对于15%掺杂的Yb:YAG陶瓷,在8 W的抽运功率下(吸收抽运功率为6.3 W),得到了2.4 W的连续激光输出,其斜效率为47%。由于陶瓷两个表面没有镀增透膜,会引入一定的功率损失,因此如果给陶瓷镀膜,则会得到更高的输出功率和更大的斜效率。为了避免打坏样品,实验中没有继续增加抽运功率,从输出功率曲线可以看出,输出功率没有饱和,因此通过良好的散热可以得到更高的连续激光输出功率。图3(c)和(d)分别是利用厚度为6 mm的陶瓷得到的输出激光功率曲线。与3 mm厚的陶瓷

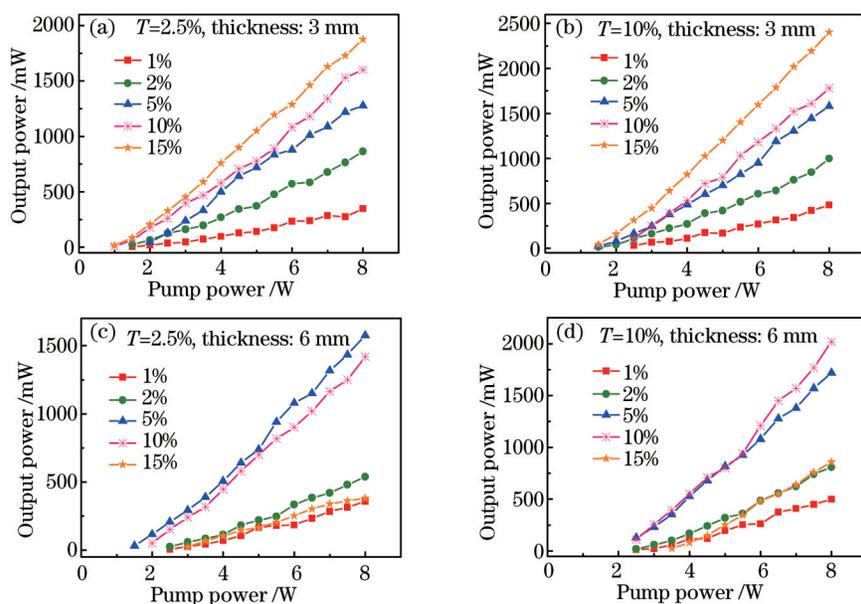


图3 厚度为3 mm的Yb:YAG陶瓷在(a)2.5%输出镜和(b)10%输出镜时的输出功率;厚度为6 mm的Yb:YAG陶瓷在(c)2.5%输出镜和(d)10%输出镜时的输出功率

Fig.3 Average output power for 3 mm thickness Yb:YAG ceramic with (a) 2.5% OC and (b) 10% OC; 6 mm thickness Yb:YAG ceramic with (c) 2.5% OC and (d) 10% OC

不同,由于通光长度增加一倍,随着掺杂浓度的提高, Yb:YAG 陶瓷对产生的激光有严重的自吸收作用。可以看出,对于 2.5% 的输出镜, 5 % 掺杂的 Yb:YAG 陶瓷有最高的输出功率,在 8 W 的抽运功率下(吸收抽运功率为 5.2 W)输出 1.6 W 的功率,斜效率为 36.8%。随着掺杂浓度进一步提高,输出功率反而下降。对于 10% 的输出镜, 10% 掺杂的 Yb:YAG 陶瓷输出功率最大,在 8 W 的抽运下(吸收抽运功率为 6.6 W)输出 2.0 W 的功率,斜效率为 41%。从图 3 中可以看出,在掺杂浓度相同且输出耦合镜的输出率相同的情况下,厚度为 3 mm 的陶瓷得到的连续激光输出功率高于厚度为 6 mm 的陶瓷得到的连续激光输出功率。综合以上实验结果,在高功率连续激光运转中,为了得到最大的输出效率,需综合考虑陶瓷的掺杂浓度、通光长度以及实验中使用的输出耦合镜的输出率等参数。

以上连续激光实验中,输出激光的中心波长都在 1050 nm 处,如图 4 所示。

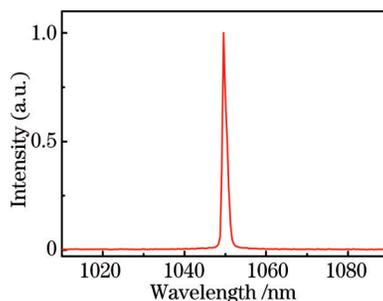


图 4 Yb:YAG 陶瓷连续激光光谱

Fig.4 Spectrum of Yb:YAG ceramic laser under continuous wave operation

在连续激光输出的基础上,研究了 Yb:YAG 陶瓷的波长调谐特性。在激光谐振腔的输出端插入一个布儒斯特角切割的 SF6 三棱镜,由于不同的三棱镜插入角度会引入与波长相关的损耗,因此可以连续调谐输出激光的波长。为了获取较宽的波长调谐范围,实验中采用输出率为 0.8% 和 2.5% 的输出耦合镜。在抽运功率为 7 W 时,分别研究了 3 mm 厚、掺杂原子数分数为 15% 的 Yb:YAG 陶瓷和 6 mm 厚、掺杂原子数分数为 10% 的 Yb:YAG 陶瓷的波长调谐性质,如图 5 所示。对于 3 mm 厚、15 % 掺杂的 Yb:YAG 陶瓷,利用 0.8% 的输出镜,测量得到最宽的波长调谐范围为 1017~1095 nm,长波处受限于光谱仪的测量范围,可以看出波长调谐范围超过 78 nm。2.5% 输出镜对应的波长调谐范围为 1033~1095 nm。对于 6 mm 厚, 10% 掺杂的 Yb:YAG 陶瓷, 0.8% 输出镜时调谐范围为 1034~1095 nm, 2.5% 输出镜时为 1020~1090 nm。3 mm 厚、15 % 掺杂的 Yb:YAG 陶瓷其波长调谐范围更宽,输出功率更加平滑,因此更有利于利用锁模技术实现脉冲宽度为飞秒量级的超短激光脉冲。

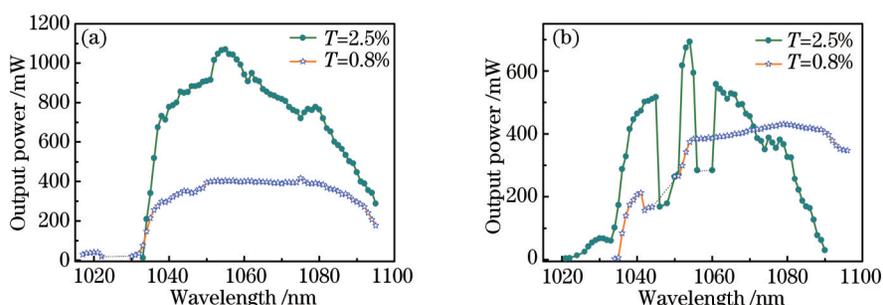


图 5 Yb:YAG 陶瓷激光波长调谐曲线。(a) 陶瓷尺寸为 5 mm×5 mm×3 mm, 掺杂原子数分数为 15 %;

(b) 陶瓷尺寸为 5 mm×5 mm×6 mm, 掺杂原子数分数为 10%

Fig.5 Wavelength tuning curves of Yb:YAG ceramic laser. (a) 5 mm × 5 mm × 3 mm and 15% doping concentration;

(b) 5 mm × 5 mm × 6 mm and 10 % doping concentration

4 结 论

对不同掺杂浓度和不同厚度的国产 Yb:YAG 陶瓷的激光输出和波长调谐特性进行了实验研究。利用 3 mm 厚、15% 掺杂的 Yb:YAG 陶瓷,在吸收抽运功率为 6.3 W 时得到了 2.4 W 的连续激光输出,斜效率高达 47%。考虑到晶体没有镀增透膜,进一步优化实验有潜力获得更高的输出功率和斜效率。采用 0.8% 的输出

耦合镜,获得了波长调谐范围为1017~1095 nm的结果,调谐带宽大于78 nm。这些实验充分证明了高质量国产Yb:YAG陶瓷在大功率激光输出以及利用锁模技术实现超短激光脉冲方面具有光明的前景。

参 考 文 献

- 1 Z Y Gao, J F Zhu, W L Tian, *et al.*. Generation of 73 fs pulses from a diode pumped Kerr-lens mode-locked Yb:YCa₄O(BO₃)₃ laser[J]. *Opt Lett*, 2014, 39(20): 5870-5872.
- 2 J L Xu, X L Li, G L He, *et al.*. Performance of large-area few-layer graphene saturable absorber in femtosecond bulk laser[J]. *Appl Phys Lett*, 2011, 99(26): 261107.
- 3 M Siebold, M Hornung, R Boedefeld, *et al.*. Terawatt diode-pumped Yb:CaF₂ laser[J]. *Opt Lett*, 2008, 33(23): 2770-2772.
- 4 M Tokurakawa, K Takaichi, A Shirakawa, *et al.*. Diode-pumped 188 fs mode-locked Yb³⁺:Y₂O₃ ceramic laser[J]. *Appl Phys Lett*, 2007, 90(7): 071101.
- 5 Liu Jingwei, Tian Jinrong, Hu Mengting, *et al.*. Q-switched Yb:KGW laser based on topological insulators[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(8): 0802004.
刘经微, 田金荣, 胡梦婷, 等. 基于拓扑绝缘体的Yb:KGW调Q激光器[J]. *中国激光*, 2015, 42(8): 0802004.
- 6 Q Liu, M L Gong, F Y Lu, *et al.*. Corner-pumped Yb:yttrium aluminum garnet slab laser emitted up to 1 kW[J]. *Appl Phys Lett*, 2006, 88(10): 101113.
- 7 Tian Yubing, Tan Huiming, Wang Fan, *et al.*. A compact efficient intra-cavity frequency doubled Yb:YAG/BIBO 515 nm thin disc laser [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(6): 0602021.
田玉冰, 檀慧明, 王帆, 等. 680 mW小型薄片式Yb:YAG/BIBO 515 nm激光器[J]. *中国激光*, 2013, 40(6): 0602021.
- 8 S Uemura, K Torizuka. Center-wavelength-shifted passively mode-locked diode-pumped ytterbium: yttrium aluminum garnet (YAG) laser[J]. *J Appl Phys*, 2005, 44(12): L361-L363.
- 9 S Uemura, K Torizuka. Sub-40-fs pulses from a diode-pumped Kerr-lens mode-locked Yb-doped yttrium aluminum garnet laser[J]. *J Appl Phys*, 2011, 50(1R): 010201.
- 10 C Hönninger, R Paschotta, M Graf, *et al.*. Ultrafast ytterbium-doped bulk lasers and laser amplifiers[J]. *Appl Phys B*, 1999, 69(1): 3-17.
- 11 Xu Yi, Yu Haibo, Wu Yusong, *et al.*. Laser diode-pumped domestic Yb:YAG ceramic laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2007, 34(9): 1172-1173.
许毅, 于海波, 吴玉松, 等. 激光二极管抽运的国产Yb:YAG陶瓷激光器[J]. *中国激光*, 2007, 34(9): 1172-1173.
- 12 J Dong, A Shirakawa, H Yagi, *et al.*. Laser-diode pumped heavy-doped Yb:YAG ceramic lasers[J]. *Opt Lett*, 2007, 32(13): 1890-1892.
- 13 S Nakamura, H Yoshioka, Y Matsubara, *et al.*. Efficient tunable Yb:YAG ceramic laser[J]. *Opt Commun*, 2008, 281(17): 4411-4414.
- 14 L Lv, Q Wang, J F Zhu, *et al.*. Efficient mode-locked picosecond Yb:YAG ceramic laser[J]. *Chin Opt Lett*, 2012, 10(s1): s11410.
- 15 H Yoshioka, S Nakamura, T Ogawa, *et al.*. Diode-pumped mode-locked Yb:YAG ceramic laser[J]. *Opt Express*, 2009, 17(11): 8919-8925.
- 16 B B Zhou, Z Y Wei, Y W Zou, *et al.*. High-efficiency diode-pumped femtosecond Yb:YAG ceramic laser[J]. *Opt Lett*, 2010, 35(3): 288-290.

栏目编辑: 宋梅梅