

13.55 W 国产小型薄片式 Yb:YAG 1030 nm 激光器

邬丰富^{1,3} 田玉冰^{1*} 檀慧明¹ 王帆¹ 崔锦江¹ 董宁宁¹ 姚文明^{1,2}

¹ 中国科学院苏州生物医学工程技术研究所, 江苏 苏州 215163
² 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033
³ 长春理工大学理学院, 吉林 长春 130022

摘要 报道了薄片式 Yb:YAG/1030 nm 激光器, Yb:YAG 晶体掺杂原子数分数为 10%, 几何尺寸 $\Phi 11 \text{ mm} \times 420 \mu\text{m}$, 高反面经 Cr/Au 金属化处理后, 采用钎焊工艺焊接到微通道水冷热沉上。耦合系统为四程抽运结构, 球面镜规格为直径 26 mm, 曲率半径 50 mm, 在 32.4 W 抽运功率下, 1030 nm 最高输出可达 13.55 W, 光-光转换效率为 41.8%。

关键词 激光器; 激光二极管阵列抽运; Yb:YAG 晶体; 薄片激光器

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.061401

A Domestic Compact and Efficient 13.55 W, 1030 nm Yb:YAG Thin-Disc Laser

Wu Xingfu^{1,3} Tian Yubing¹ Tan Huiming¹ Wang Fan¹ Cui Jinjiang¹
 Dong Ningning¹ Yao Wenming^{1,2}

¹ Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology, Chinese Academy of Sciences, Suzhou, Jiangsu 215163, China

² State Key Laboratory for Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

³ School of Science, Changchun University of Sciences and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract The laser-diode-array (LDA) pumped Yb:YAG thin-disc 1030 nm laser is demonstrated. The Yb:YAG crystal doped with 10% Yb atomic fraction is 420 μm in thickness and 11 mm in diameter. It is mounted onto the micro-channel copper heat sink by Cr/Au/In. The four-pass optical coupling system is well designed with two spherical imaging mirrors (diameter 26 mm, radius of curvature 50 mm). With 32.4 W pump power, the maximum output power of 13.55 W at 1030 nm is obtained. The optical-optical conversion efficiency is 41.8%.

Key words lasers; laser-diode-array pumping; Yb:YAG crystal; thin-disk laser

OCIS codes 140.3480, 140.3410, 140.3515

1 引言

激光二极管阵列(LDA)抽运的 Yb:YAG/1030 nm 全固体激光器在诸多领域具有重要应用。在中红外高分辨率光谱领域, 可与 $2\sim 5 \mu\text{m}$ 光参变振荡器(OPO)一起使用; 在玻色-爱因斯坦凝聚和光镊实验中, 可以用来建立激光俘获和输运原子、分子; 在材料微加工的印刷工业中可以对清筛辊进行精确的雕刻^[1]。因此, 该类激光器具有广阔的市场前景。

收稿日期: 2013-02-04; **收到修改稿日期**: 2013-03-26; **网络出版日期**: 2013-05-14

基金项目: 江苏省自然科学基金面上项目(BK2010235)、苏州市应用基础研究计划(SYG201127)和苏州医工所青年引导基金(Y052051205)资助课题。

作者简介: 邬丰富(1987—), 男, 硕士研究生, 主要从事全固体激光器设计及非线性频率变换技术方面的研究。

E-mail: wuxingfu87@163.com

导师简介: 田玉冰(1976—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事医用全固体激光器设计及非线性频率变换技术方面的研究。

E-mail: tianyb76@yahoo.com.cn(通信联系人)

国际上对该波段的研究始于1971年,20世纪90年代初进入快速发展阶段,目前德国在该波段的研究仍处于领先地位,继2000年Stewen等^[2]实现单片晶体输出647 W连续激光后,2012年,德国Trumpf公司已推出可用于材料加工的16 kW商用薄片激光器^[3]。而国内起步较晚,2001年才开始有Yb:YAG激光性能的研究,天津大学、清华大学、北京理工大学、中国科学院安徽光学精密机械研究所等相继做了研究工作^[4~11],但由于端面抽运结构热效应严重,Yb:YAG的准三能级特性又不可避免地受到自吸收效应的影响,因而输出功率较低。2005年,宋秋鸣等^[7]获得了端面抽运结构的国内最高输出功率6.09 W,但光-光转换效率仅为24.3%。进一步提高输出功率的最佳途径则是采用薄片结构,由于其温度梯度与输出光束方向一致,因而可减少热透镜效应,极大地提高散热性能。2002年,清华大学的李超等^[12]采用八程结构,利用薄片Yb:YAG,在国内首次获得了16 W 1030 nm输出,光-光转换效率达到了40.5%,但其利用四个球面镜耦合抽运光,体积较大,光路的调整较为困难。2011年,中国工程物理研究院的王春华等^[13]采用十六程结构,在69.5 W抽运功率下,获得了27 W输出,光-光转换效率为38.8%,但其仿照的是德国结构,需要设计昂贵的非球面镜和直角棱镜。

针对上述问题,本文设计了简单的四程抽运Yb:YAG 1030 nm激光器,在32.4 W抽运功率下,获得了13.55 W 1030 nm输出,其光-光转换效率达到了41.8%,且光斑质量较好。

2 理论分析

薄片激光器主要是采用厚度小于500 μm 的晶体,通过焊接工艺减小接触面的热阻来达到有效散热的目的。由于Cr/Au具有较高的热导率,同时对激光晶体具有很好的附着力,而低熔点焊料In可降低镀膜的难度,同时其良好的塑性形变和浸润性可有效缓解热应力,因此首先采用Cr/Au实施金属化,然后用In焊接,效果如图1所示。

相对于八程和十六程结构^[12,13],四程结构要保证足够的吸收效率,需要适当增加晶体的厚度。本文计算了厚度为340 μm 和420 μm 的晶体吸收效率曲线^[14],如图2所示,当入射角度为 20° 时,420 μm 的晶体吸收效率可达82.7%,相比于340 μm 晶体提高了6.8%,同时也减少了抽运光沿原路返回损伤LDA的几率,因此采用420 μm 晶体。

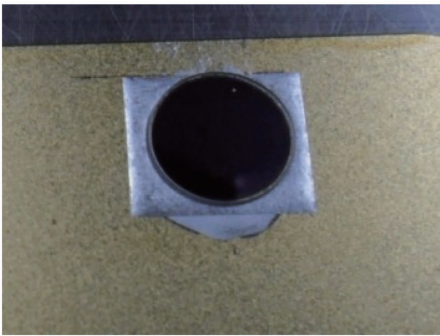


图1 420 μm Yb:YAG 晶体焊接图

Fig. 1 Photograph of 420- μm -thick Yb:YAG crystal soldered on the top of Cu heat sink

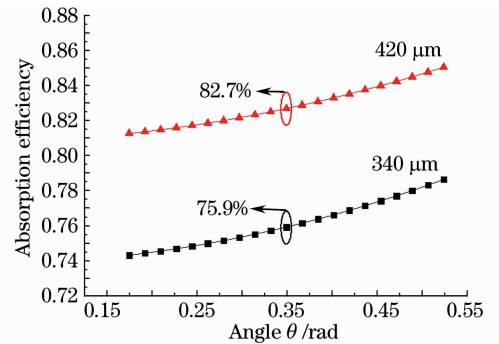


图2 340 μm 和420 μm Yb:YAG 晶体吸收效率曲线图

Fig. 2 Absorption curves of 340- μm and 420- μm -thick Yb:YAG crystal

3 实验研究及结果

根据以上结果,搭建了如图3所示的实验装置,整个系统由半导体激光抽运源、紫铜微通道热沉、国产Yb:YAG晶体、球面反射镜和平凹输出镜组成。抽运源采用德国DILAS M1F2S22-940型半导体激光器,数值孔径0.22,为了增加抽运功率密度,抽运光选用直径为200 μm 的光纤耦合输出。热沉采用德国Electrovaccuramik公司经金属化处理的微通道冷却器。薄片状Yb:YAG晶体规格为 $\Phi 11 \text{ mm} \times 0.42 \text{ mm}$,掺杂原子数分数为10%,晶体左端面镀对940 nm和1030 nm波长的高反(HR)膜(反射率1030 nm $R=99.92\%$,940 nm $R=99.93\%$),右端面镀对940 nm和1030 nm波长的增透(AR)膜(透射率1030 nm $T=$

99.96%, 940 nm $T=99.6\%$)。左端面膜层先采用 Cr/Au 实施金属化, 然后通过软焊料钢将其焊接到水冷热沉上, 这样可提高激光介质与冷却器之间的热传导率, 实现有效散热^[15]。水冷系统采用 LX-300 型水冷机, 水温可实现 $5\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 连续可调。从光纤头出射的抽运光先被球面镜 1 反射, 进入晶体后, 被晶体高反面再次反射, 经两次吸收后, 未被吸收的抽运光被球面镜 2 反射并再次注入晶体, 这样完成了四次抽运, 大约 82.7% 的抽运光被晶体吸收。由于采用 $200\text{ }\mu\text{m}$ 耦合光纤, 耦合镜的尺寸可适当减小^[14], 实验时均采用直径 26 mm, 曲率半径 50 mm 的球面镜, 凹面镀对 940 nm 反射率大于 99.5% 的高反膜。输出镜选用曲率半径 100 mm 的平凹镜, 与 Yb:YAG 晶体的左端面构成平凹谐振腔, 腔长 5.5 cm, 凹面镀制 1030 nm 波长高反膜 ($1030\text{ nm } T=95\%$), 平面镀对 1030 nm 波长增透的介质膜。

图 4 为用 OPHIR Laser Star 功率计测量的 1030 nm 输出功率曲线, 图中插图为采用 Ocean Optics MayaPro2000 型光纤光谱仪测量的光谱, 中心波长为 1030 nm。由图 4 可以看出, 当循环水温度为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, 入射功率为 32.4 W 时, 可获得 1030 nm 最大输出功率 13.55 W, 光-光转化效率达 41.8%, 且未出现饱和现象。

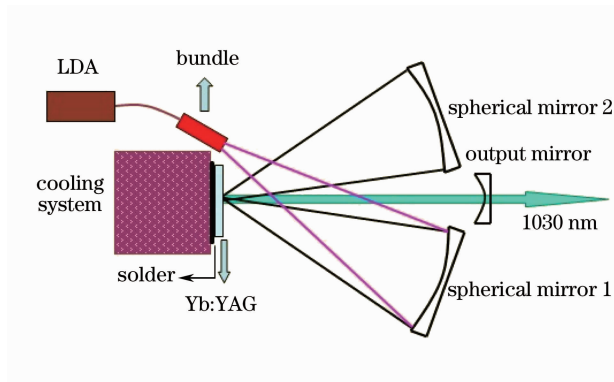


图 3 Yb:YAG 1030 nm 薄片激光器示意图

Fig. 3 Schematic of thin-disc Yb:YAG 1030 nm laser

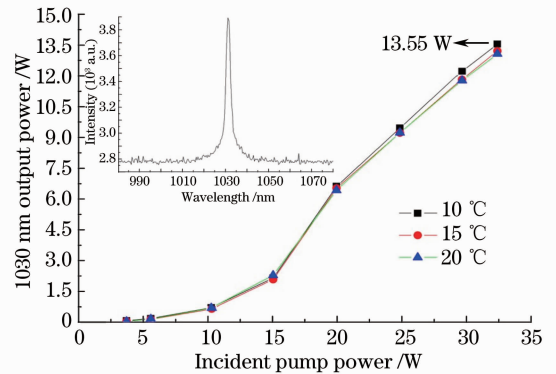


图 4 1030 nm 输出功率曲线。插图为输出光谱

Fig. 4 Curves of 1030 nm output power. Inset shows the output spectrum

图 5 为注入功率 32 W 时, 采用型号为 Pyrocam III 的光束轮廓仪测量的光束轮廓, 图 5(a) 和图 5(b) 分别为激光光斑的二维 (2D) 和三维 (3D) 光强分布, 可以看出激光光束的对称性很好, 光斑质量较高。

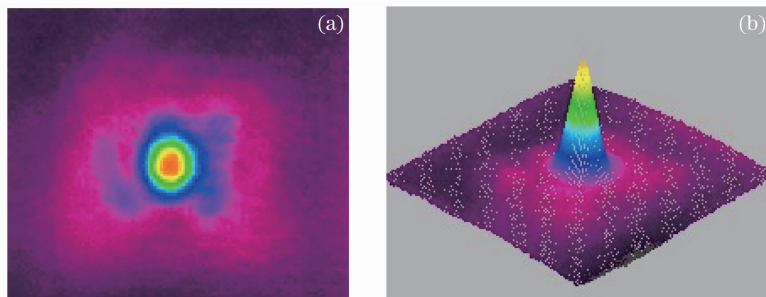


图 5 1030 nm (a) 二维和 (b) 三维激光光斑轮廓图

Fig. 5 (a) 2D and (b) 3D beam profiles of 1030 nm laser

4 结 论

设计了四程抽运 Yb:YAG 1030 nm 薄片激光器, 抽运光采用两个球面镜进行耦合, 谐振腔选用平凹腔, 通过优化晶体厚度, 在 32.4 W 抽运功率下, 获得了 13.55 W 1030 nm 输出, 光-光转换效率达 41.8%。该装置具有腔型简单、成本低廉、易于调节和易于产品化等特点。

参 考 文 献

- Zhang Zhiwei. Thin disk Yb:YAG laser and its applications[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(s) : 11~14

- 张志伟. 薄片式 Yb:YAG 激光器及其应用[J]. 强激光与粒子束, 2005, **17**(0): 11~14
- 2 C. Stewen, K. Contag, M. Larionov *et al.*. A 1-kW CW thin disc laser[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 2000, **6**(4): 650~657
- 3 Adolf Giesen, Jochen Speiser. Fifteen years of work on thin-disk lasers: results and scaling laws[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 2007, **13**(3): 598~609
- 4 Zhang Lizhe, Dai Jianmin, Zhang Weili *et al.*. All-solid-state tunable Yb:YAG laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **28**(10): 873~876
- 张丽哲,戴建明,张伟力等. 全固化可调谐 Yb:YAG 激光器[J]. 中国激光, 2001, **28**(10): 873~876
- 5 Wu Haisheng, Yan Ping, Gong Mali *et al.*. $M^2 \leq 1.14$ diode-pumped Yb:YAG microchip laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **29**(11): 961~964
- 吴海生,闫平,巩马理等. $M^2 \leq 1.14$ 的 LD 抽运的 Yb:YAG 微晶片激光器[J]. 中国激光, 2002, **29**(11): 961~964
- 6 Li Lei, Yang Suhui, Sun Wenfeng *et al.*. LD-pumped Yb:YAG chip laser with high beam quality[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(11): 1285~1288
- 李磊,杨苏辉,孙文峰等. 激光二极管抽运的高光束质量的 Yb:YAG 薄片激光器[J]. 中国激光, 2004, **31**(11): 1285~1288
- 7 Song Qiuming, Chen Changshui, Yin Shaotang *et al.*. LD pumped Yb:YAG laser[J]. *Chinese J. Quant. Electronics*, 2005, **22**(4): 525~527
- 宋秋鸣,陈长水,殷绍唐等. 激光二极管泵浦 Yb:YAG 激光器[J]. 量子电子学报, 2005, **22**(4): 525~527
- 8 Wu Wuming, Wu Huiyun, Xu Xiaojun *et al.*. Cryogenically cooled high average power Yb:YAG laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(7): 071403
- 吴武明,吴慧云,许晓军等. 低温冷却高平均功率 Yb:YAG 激光器[J]. 激光与光电子学进展, 2010, **47**(7): 071403
- 9 Wang Jianlei, Shi Xiangchun, Zhu Xiaolei. Optimization design and modeling of high peak power Yb:YAG pulsed lasers with high efficiency[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2278~2283
- 王建磊,施翔春,朱小磊. 高效率大功率脉冲 Yb:YAG 片状激光器优化设计与模拟[J]. 光学学报, 2010, **30**(8): 2278~2283
- 10 Duan Wentao, Jiang Xinying, Jiang Dongbin *et al.*. 10 Hz joule-class laser diode end-pumped V-shaped water-cooled Yb:YAG oscillator[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 44~48
- 段文涛,蒋新颖,蒋东宾等. 激光二极管端面抽运的焦耳级 10 Hz“V”型水冷 Yb:YAG 激光器[J]. 中国激光, 2010, **37**(1): 44~48
- 11 Zhang Zhenhua, Cheng Xiaojin, Wang Jianlei *et al.*. Amplification characteristic of low temperature Yb:YAG crystal disc cooled by alcohol[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(7): 0702013
- 张振华,程小劲,王建磊等. 基于无水乙醇冷却的 Yb:YAG 片状晶体激光放大特性研究[J]. 中国激光, 2011, **38**(7): 0702013
- 12 Li Chao, Xu Zhen, Li Junlin *et al.*. Diode pumped Yb:YAG thin disk laser achieves 16 W CW output[J]. *Chinese J. Quant. Electronics*, 2002, **19**(2): 104~108
- 李超,徐震,李俊林等. 二极管泵浦 Yb:YAG Thin Disk 激光器获得 16 W 连续激光输出[J]. 量子电子学报, 2002, **19**(2): 104~108
- 13 Wang Chunhua, Wang Weimin, Ma Yi *et al.*. Design and experiment of multi-pass pump system for Yb:YAG thin-disk laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, **23**(5): 1229~1232
- 王春华,王卫民,马毅等. Yb:YAG 薄片激光器多通泵浦耦合系统设计与实验[J]. 强激光与粒子束, 2011, **23**(5): 1229~1232
- 14 Tian Yubing, Li Yantao, Lü Qipeng. 4.81 W of Yb:YAG/1030 nm thin disc laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, **22**(11): 2505~2509
- 田玉冰,李颜涛,卢启鹏. 4.81 W Yb:YAG/1030 nm 薄片激光器优化设计[J]. 强激光与粒子束, 2010, **22**(11): 2505~2509
- 15 J. K. Alan, J. V. Gareth, D. Burns. Progress towards high-power, high-brightness neodymium-based thin-disk lasers[J]. *Prog. Quant. Electron.*, 2004, **28**(6): 305~344