

# 光纤耦合输出的单频全固态 Yb:GdCOB 微片激光器

金东臣<sup>1</sup> 于浩海<sup>2</sup> 师红星<sup>1</sup> 王 科<sup>1</sup> 张怀金<sup>2</sup> 王 璞<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 北京工业大学激光工程研究院, 国家产学研激光技术中心, 北京 100124)  
<sup>2</sup> 山东大学晶体材料国家重点实验室, 山东 济南 250100)

**摘要** 报道了连续激光二极管单端抽运 Yb:GdCOB 晶体的单频微片激光器, 提出一种新的激光输出方式, 利用紧凑三明治结构和超短腔设计实现单频激光的空间、光纤双端输出。当使用 1 mm 厚晶体, 抽运功率为 360 mW 时, 实现了 40.9 mW 的 1083.2 nm 连续激光输出, 斜率效率为 13.7%, 光纤耦合输出功率为 337  $\mu$ W; 当使用 0.2 mm 厚晶体, 抽运功率为 380 mW 时, 实现了 4.5 mW 的 1078.2 nm 稳定单频输出。

**关键词** 激光器; 单频; 超短腔; 微片激光器

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.s102003

## All-Solid-State Single-Frequency Yb:GdCOB Microchip Laser with Fiber Coupled Output

Jin Dongchen<sup>1</sup> Yu Haohai<sup>2</sup> Shi Hongxing<sup>1</sup> Wang Ke<sup>1</sup> Zhang Huaijin<sup>2</sup> Wang Pu<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> National Center of Laser Technology, Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)  
<sup>2</sup> State Key Laboratory of Crystal Materials, Shandong University, Ji'nan, Shandong 250100, China)

**Abstract** The continuous-wave single-frequency single-end-pumped Yb:GdCOB crystal laser is designed and experimentally demonstrated. A novel output method is proposed to achieve the spatial and fiber output with compact sandwiched structure, and the single-frequency operation is realized in an ultrashort cavity. The maximum output power is 40.9 mW and the slope efficiency is 13.7% at 1083.2 nm with 360 mW incident power and a 1-mm-thick crystal, and the fiber output power is 337  $\mu$ W. Meanwhile, the maximum single-frequency output power is 4.5 mW at 1078.2 nm with 380 mW incident power and a 0.2-mm-thick crystal.

**Key words** lasers; single-frequency; ultrashort cavity; microchip laser

**OCIS codes** 140.3480; 140.3580; 140.3615; 140.3945

## 1 引 言

微片激光器是一种激光二极管(LD)端面抽运微型谐振腔的激光器类型,其典型结构是将介质膜直接镀在增益介质表面形成谐振腔,腔长一般在亚毫米量级,易于实现单频输出。单频微片激光器具有体积小、结构紧凑、相干性好、性能稳定和寿命长等优点,使其在激光雷达、激光遥感、光谱学、非线性频率变换等领域具有广泛的应用。目前激光二极管抽运激光器实现单频的方法有标准具选模法<sup>[1]</sup>、扭

转模腔法<sup>[2-3]</sup>、短程吸收法<sup>[4]</sup>、行波腔法和短腔法<sup>[5]</sup>。其中,短腔法通过缩短谐振腔长度,增大相邻纵模间隔,使得在荧光光谱的有效宽度内只存在一个纵模,实现单纵模振荡,并稳定输出。短腔法设计简单,结构紧凑,可将增益晶体直接固化在具有较高导热系数的热沉上减小热效应的产生,从而在一定程度上提高激光输出的稳定性,适用于中小功率激光器的实验研究。

国内 1  $\mu$ m 波段的单频激光器,多数是采用掺钕

**收稿日期**: 2013-02-01; **收到修改稿日期**: 2013-06-09

**基金项目**: 北京市自然科学基金重点项目(KZ2011100050011)

**作者简介**: 金东臣(1989—),男,硕士研究生,主要从事光纤激光器方面的研究。E-mail: jindongchen1989@gmail.com

**导师简介**: 王 璞(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤激光器、光纤放大器及新型光纤光学功能性器件等方面的研究。E-mail: wangpuemail@bjut.edu.cn(通信联系人)

晶体作为增益介质(如 Nd:YAG、Nd:YVO<sub>4</sub>等)<sup>[6-12]</sup>,而掺 Yb 晶体是准三能级结构,在高效抽运激光器领域有很大潜力<sup>[13]</sup>。其较低的量子缺陷,可以降低热负载,提高光光转化效率。本实验选用 Yb<sup>3+</sup>:CaGdO(BO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>(简称为 Yb:GdCOB<sup>[14]</sup>)晶体作为增益介质,相比普通玻璃,它具有更高的热传导系数[ $\kappa_{\text{GdCOB}} = 2.1 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ,  $\kappa_{\text{glass}} = 0.7 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ]<sup>[15]</sup>,而对于准三能级结构晶体,热传导系数会影响增益介质的温度以及较低激光能级的温度分布,从而影响激光器输出功率的提高和光束质量的改善。同时相比其他晶体, Yb:GdCOB 晶体具有更宽的发射谱( $\tau_{1/2_{\text{Yb:GdCOB}}} = 43 \text{ nm}$ ,  $\tau_{1/2_{\text{Yb:YAG}}} = 12 \text{ nm}$ ),如图 1 所示。

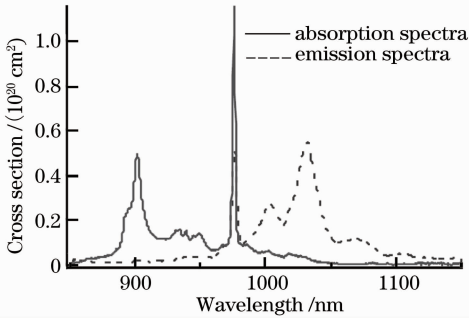


图 1 Yb:GdCOB 晶体的吸收谱和发射谱

Fig. 1 Absorption and emission spectra of Yb:GdCOB

Yb:GdCOB 晶体的主吸收峰在 976.4 nm 处,与 InGaAs LD 的波长(0.9~1.1 μm)一致。从荧光谱上可以看出,该晶体能够实现 1032~1083 nm 的激光输出,随着抽运位置的不同,晶体最强的发射峰在 976.4~1032 nm 变化。

本文利用带尾纤的器件提出一种新的激光输出方式,实现激光的空间、光纤双端输出,便于后续直

接光纤放大和谐振腔监测,具有高度可控性和灵活性,同时利用超短腔三明治紧凑结构,端面抽运 Yb:GdCOB 晶体实现了稳定的单频输出。

## 2 实验装置

光纤耦合输出的单频全固态激光器实验装置如图 2 所示,利用类似三明治结构本课题组已实现 Nd:YAG 晶体的石墨烯被动调 Q,获得中心波长为 1064.6 nm,重复频率为 300~807 kHz 可调,最小脉冲宽度为 75 ns 的脉冲激光输出<sup>[16]</sup>。本实验中,抽运源选用光纤耦合的 976 nm 单模 LD,输出中心波长为 976.5 nm,最大输出功率为 499 mW;抽运保护器用于防止反馈光对抽运源造成损伤,与 980/1064 nm 波分复用器(WDM)的 980 nm 端连接,公共端连接芯径为 6 μm,包层为 125 μm 的光纤适配器(FC/PC),便于激光耦合进光纤从 WDM 的 1064 nm 端输出,既可作为光纤输出端,直接用于后续的光纤放大,又可作为监测端,监测谐振腔内光谱、激光模式、稳定性等参数的变化。同时,该设计还可用于脉冲激光器和高功率多模抽运激光器的研制。准直系统由焦距分别为 4.5 mm 和 15 mm 的两个凸透镜构成,将抽运光准直聚焦成约 20 μm 的抽运光斑,耦合进入 Yb:GdCOB 进行端面抽运。Yb:GdCOB 晶体掺杂原子数分数为 30%,尺寸为 3 mm×3 mm×1 mm、3 mm×3 mm×0.2 mm,两端无镀膜。Yb:GdCOB 晶体夹在平面镜 M<sub>1</sub>、M<sub>2</sub> 中间,形成三明治结构,平面镜 M<sub>1</sub>、M<sub>2</sub> 分别镀有 976 nm 高透膜和 1064 nm 高反膜(反射率为 99.5%);整个谐振腔长约为晶体厚度。

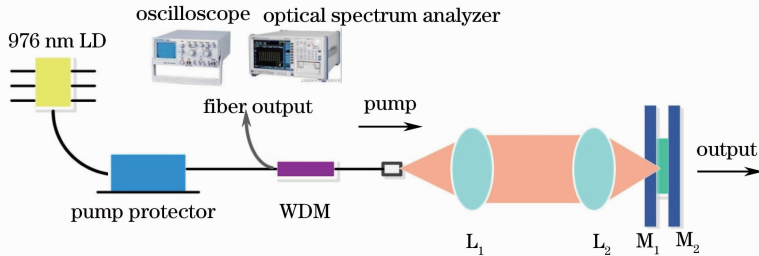


图 2 Yb:GdCOB 微片激光器实验装置图

Fig. 2 Experimental setup diagram of Yb:GdCOB microchip laser

## 3 实验结果与分析

当增益介质为 3 mm×3 mm×1 mm 晶体时,实现了 Yb:GdCOB 微片激光器的稳定连续输出,出光阈值为 40.4 mW。通过最小分辨率为 0.02 nm 的光谱仪(YOKOOGAWA 6370B)测得输出光谱中心

波长约为 1083.2 nm,其半峰全宽(FWHM)为 0.08 nm,如图 3 所示。输出功率随抽运功率的增加而线性增加,当抽运功率为 360 mW 时,输出功率为 40.9 mW,斜效率为 13.7%,如图 4 所示。光纤端输出功率为 337 μW,尽管目前功率略低,但光纤端直接

输出,易于直接后续放大,相关工作会继续进行。光纤端输出功率随抽运功率变化曲线如图 5 所示。

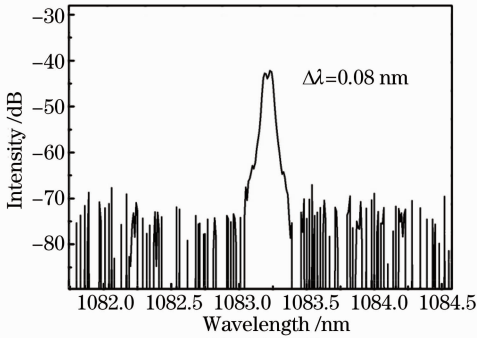


图 3 Yb:GdCOB 微片激光器的输出光谱

Fig. 3 Optical spectrum of Yb:GdCOB microchip laser

损发热而产生热梯度和热致应力<sup>[17]</sup>影响,阻碍激光器输出功率的提高和光束质量的改善。

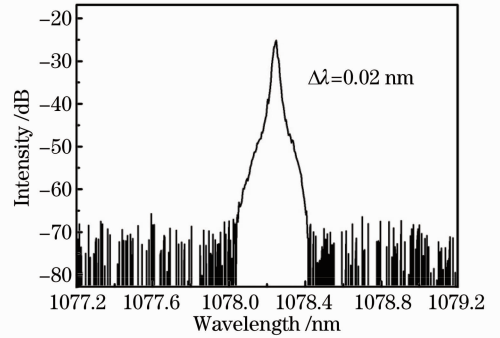


图 6 Yb:GdCOB 单频微片激光器的输出光谱

Fig. 6 Optical spectrum of single-frequency Yb:GdCOB microchip laser

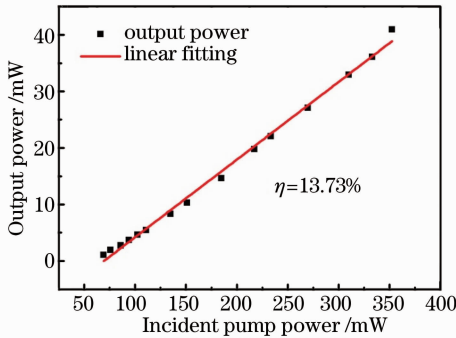


图 4 输出功率随抽运功率的变化曲线

Fig. 4 Output power corresponding to the incident pump power

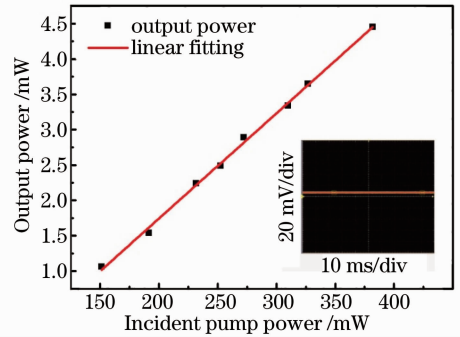


图 7 Yb:GdCOB 单频微片激光器的输出功率随抽运功率的变化曲线。插图为示波器所得的稳定性曲线

Fig. 7 Output power corresponding to the incident pump power of single-frequency Yb:GdCOB microchip laser.

Inset is the stability curve from the oscilloscope

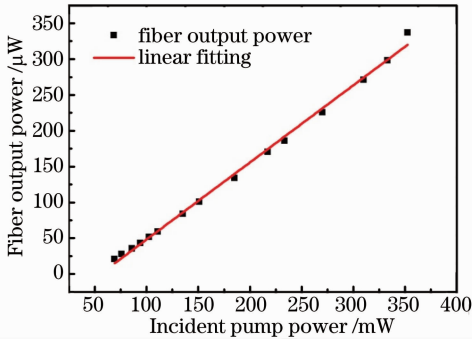


图 5 光纤端输出功率随抽运功率的变化曲线

Fig. 5 Fiber output power corresponding to the incident pump power

当增益介质为 3 mm×3 mm×0.2 mm 晶体时,此装置可实现 Yb:GdCOB 微片激光器的稳定单频连续输出,出光阈值为 83.6 mW,输出激光中心波长为 1078.2 nm,如图 6 所示,输出功率随抽运功率的增加而线性增加,当抽运功率为 380 mW 时,输出功率为 4.5 mW,如图 7 所示。由于增益晶体厚度和掺杂浓度的限制,平行平面腔的抽运单次通过增益较低,同时在激光材料的光抽运过程中,量子亏

在激光器输出功率为 4.5 mW 时,借助扫描共焦法布里-珀罗干涉仪监测谐振腔内的纵模模式(如图 8 所示),可知激光器实现稳定单频运转,连续运转数小时,无跳模及模式竞争出现;同时利用 Thorlabs PM20 型手持功率计和 3 W 功率计,连续数小时监测激光器的输出功率,发现激光器稳定输

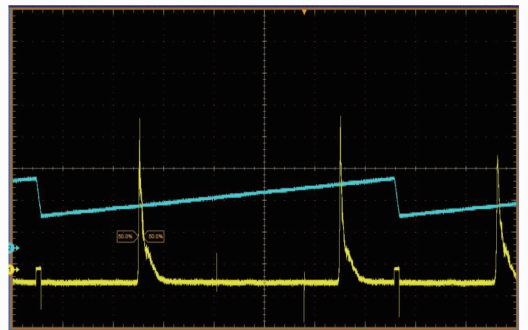


图 8 单频激光的法布里-珀罗频谱

Fig. 8 Fabry-Perot spectrum of the single-frequency laser

出、功率波动小。

## 4 结 论

报道了连续激光二极管单端抽运 Yb:GdCOB 晶体的单频微片激光器,提出一种新的激光输出方式,结合固体激光器与光纤器件的优点,实现激光的空间、光纤双端输出,光纤耦合输出端既可作为激光输出端直接用于后续放大,也可作为监测端。采用紧凑三明治结构设计,超短腔实现单频运转。当采用 1 mm 厚晶体,抽运功率为 360 mW 时,实现 40.9 mW 的 1083.2 nm 连续激光输出,斜率效率为 13.7%,光纤耦合输出 337  $\mu$ W;当采用 0.2 mm 厚晶体,抽运功率为 380 mW 时,实现 4.5 mW 的 1078.2 nm 稳定单频输出。此外,类似结构设计还可用于脉冲激光器和高功率多模抽运激光器。随着激光器技术的不断创新,兼具固体激光器和光纤器件优点的新型激光器有望成为未来的研究热点之一。

## 参 考 文 献

- 1 P Nachman, J Munch, R Yee. Diode-pumped, frequency-stable, tunable, continuous-wave Nd:glass laser[J]. IEEE J Quantum Electron, 1990, 26(2): 317-322.
- 2 K Wallmeroth, P Peuser. High power, CW single-frequency, TEM<sub>00</sub>, diode-laser-pumped Nd:YAG laser[J]. Electron Lett, 1988, 24(17): 1086-1088.
- 3 V Evtuhov, A E Siegman. A "twisted-mode" technique for obtaining axially uniform energy density in a laser cavity[J]. Appl Opt, 1965, 4(1): 142-143.
- 4 J Zayhowski. The effects of spatial hole burning and energy diffusion on the single-mode operation of standing-wave lasers[J]. IEEE J Quantum Electron, 1990, 26(12): 2052-2057.
- 5 Hao Erjuan, Li Te, Tan Huiming, *et al.*. Methods of obtaining single-frequency of all-solid-state lasers intracavity frequency doubling in diode-pumped[J]. Laser Journal, 2006, 27(2): 14-15.  
郝二娟, 李 特, 檀慧明, 等. LD 泵浦的全固态激光器的单频实现方法[J]. 激光杂志, 2006, 27(2): 14-15.
- 6 Zhang Tieli, Yao Jianquan, Wang Peng, *et al.*. Laser diode end-pumped, high-power continuous-wave single-frequency Nd:YVO<sub>4</sub> ring laser at 1064 nm[J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(9): 1194-1197.  
张铁犁, 姚建铨, 王 鹏, 等. 端面抽运高功率连续单频 1064 nm Nd:YVO<sub>4</sub> 环形腔激光器[J]. 中国激光, 2007, 34(9): 1194-1197.

- 7 Zhang Jing, Zhang Kuanshou, Wang Runlin, *et al.*. All-solid-state Nd:YVO<sub>4</sub> ring laser of single-frequency operation[J]. Chinese J Lasers, 2000, 27(8): 694-696.  
张 靖, 张宽收, 王润林, 等. 全固化单频 Nd:YVO<sub>4</sub> 环形激光器[J]. 中国激光, 2000, 27(8): 694-696.
- 8 Wang Haibo, Ma Yan, Zhai Zehui, *et al.*. 1.5 W CW frequency-stabilized and intracavity frequency-doubled ring laser end-pumped by diode laser[J]. Chinese J Lasers, 2002, 29(2): 119-122.  
王海波, 马 艳, 翟泽辉, 等. LD 端面抽运 1.5 W 单频稳频绿光激光器[J]. 中国激光, 2002, 29(2): 119-122.
- 9 Zheng Yaohui, Lu Huadong, Li Fengqin, *et al.*. All-solid-state high-efficiency high-power Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP laser of single-frequency operation[J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(6): 739-742.  
郑耀辉, 卢华东, 李凤琴, 等. 全固态高输出功率单频 Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP 激光器[J]. 中国激光, 2007, 34(6): 739-742.
- 10 Zheng Yaohui, Li Fengqin, Zhang Kuanshou, *et al.*. Progress of all-solid-state single-frequency lasers[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(7): 1635-1642.  
郑耀辉, 李凤琴, 张宽收, 等. 全固态单频激光器研究进展[J]. 中国激光, 2009, 36(7): 1635-1642.
- 11 Wang Yajun, Zheng Yaohui, Li Fengqin, *et al.*. High-power all-solid-state single-frequency lasers[J]. Acta Sinica Quantum Optica, 2010, 16(3): 230-239.  
王雅君, 郑耀辉, 李凤琴, 等. 全固态高功率单频激光器[J]. 量子光学学报, 2010, 16(3): 230-239.
- 12 Liang Yong, Yao Zhijian. Development of single-frequency all-solid-state infrared lasers[J]. Laser Technology, 2013, 37(1): 85-88.  
梁 勇, 姚志健. 红外波段全固态单频激光器研究进展[J]. 激光技术, 2013, 37(1): 85-88.
- 13 G J Spuhler, R Paschotta, M P Kullberg, *et al.*. A passively Q-switched Yb:YAG microchip laser[J]. Applied Physics B, 2001, 72(3): 285-287.
- 14 M Martrou, F Mougel, G Aka, *et al.*. Laser performance of an ytterbium doped new single crystal Yb<sup>3+</sup>:Ca<sub>4</sub>GdO(BO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> (Yb:GdCOB) under end pumped titanium sapphire[J]. OSA Topical Conference on Advanced Solid State Lasers, 158/AMF1-1, 1998.
- 15 F Druon, S Chenais, F Balembos, *et al.*. High-power diode-pumped Yb:GdCOB laser: from continuous-wave to femtosecond regime[J]. Optical Material, 2002, 19(1): 73-80.
- 16 Cao Yi, Liu Jia, Liu Jiang, *et al.*. Passively Q-switched Nd:YAG microchip laser based on graphene[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(2): 0202009.  
曹 懿, 刘 佳, 刘 江, 等. 基于石墨烯被动调 Q Nd:YAG 晶体微片激光器[J]. 中国激光, 2012, 39(2): 0202009.
- 17 W Koechner. Solid-State Laser Engineering [M]. Sun Wen Transl. Beijing: Science Press, 2002. 366-367.  
W 克希耐尔著. 固体激光工程[J]. 孙 文译. 北京: 科学出版社, 2002. 366-367.

栏目编辑:张 腾