

DOI: 10.3788/JQO20192501.0902<sup>②</sup>

## 420 mW 全固态连续单频可调谐 1 542 nm 激光器

朱海瑞<sup>1,2</sup>, 闫丽华<sup>1,2</sup>, 李渊骥<sup>1,2†</sup>, 张宽收<sup>1,2</sup>

(1. 山西大学光电研究所 量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西 太原 030006;

2. 山西大学 极端光学协同创新中心, 山西 太原 030006)

**摘要:** 设计并研制了一台激光二极管端面泵浦的全固态连续单频可调谐 1 542 nm 激光器。通过设计谐振腔的镀膜参数调控 Er, Yb: YAB 激光器的增益谱, 实现了 1 542 nm 波段的激光振荡。在此基础上, 通过优化激光晶体的厚度和谐振腔的输出耦合镜透射率等参数, 并利用扭摆模腔选择单纵模技术, 获得了最大输出功率为 420 mW 的连续单频 1 541.9 nm 激光运转。输出激光在 3 小时内的功率稳定性优于  $\pm 3\%$ , 激光强度噪声在分析频率 3 MHz 处即达到散粒噪声极限。通过内腔电光晶体和电光标准具调控谐振腔的腔长, 实现了激光器在 1 541.959 nm~1 542.014 nm 的波长范围内的准连续波长调谐。

**关键词:** 激光器; 1 542 nm; Er, Yb: YAB 晶体; 单频运转

中图分类号: TN248.1

文献标识码: A

文章编号: 1007-6654(2019)01-0094-06

### 0 引言

波长为 1 542 nm 的全固态连续单频激光光源具有窄线宽、低噪声、在光纤和大气中的传输损耗较低、波长对应乙炔 ( $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$ ) 分子吸收线和铟镓砷等探测器的探测灵敏区、对人眼安全等优点, 因此这类光源在量子信息、光频标、光学精密测量、高分辨率光谱、国防军事等领域有着广泛的应用需求<sup>[1-4]</sup>。

目前, 在全固态连续单频 1 542 nm 激光器的研制中常用的增益介质是钕镱共掺磷酸盐玻璃。由于磷酸盐玻璃具有近似连续的增益谱、适中的声子能量, 利用该介质可实现波长调谐范围较宽、转化效率较高的 1 542 nm 激光输出<sup>[5-6]</sup>。然而由于玻璃基质的热传导率和热损伤阈值比较低, 导致这类激光器可允许注入的泵浦功率较

低, 已报道的最高连续单频 1 542 nm 激光输出功率仅为 62 mW<sup>[7]</sup>。此外, 由于激光器的波长调谐依赖于调节内腔标准具的放置角度, 因此波长控制的精度和重复性不高。相比于磷酸盐玻璃, 硼酸盐晶体和硅酸盐晶体等晶体介质具有更好的热性质和机械性能。近十年来, 中科院福建物质结构研究所、莫斯科州立大学等单位研制了一系列具有优良性能的钕镱共掺的硼酸盐晶体和硅酸盐晶体, 例如 Er, Yb: YAB、Er, Yb: GdAB、Er: Sr<sub>3</sub>Yb(BO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>、Er, Yb: Lu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 等, 并分别利用这些增益介质实现了瓦级的准连续或连续的 1.5  $\mu\text{m}$  多模激光输出<sup>[8-10]</sup>。2013 年, 李渊骥等人利用 Er, Yb: YAB 晶体作为增益介质, 基于双标准具选模, 实现了 430 mW 的连续单频 1 550

② 收稿日期: 2018-10-25; 接受日期: 2018-11-06

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0405203); 国家自然科学基金青年基金(61405109)

作者简介: 朱海瑞(1993-), 女, 山西平遥人, 硕士研究生, 研究方向: 激光技术。E-mail: 15835112739@163.com

† 通信作者: 李渊骥, E-mail: liyuanji@sxu.edu.cn

nm 激光运转<sup>[11]</sup>。2018 年,黄建华等人利用 Er, Yb:Lu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 微片晶体,采用短程吸收法选模,获得了 440 mW 的连续单频 1 537 nm 激光运转<sup>[12]</sup>。但是一方面,由于常用的磁光晶体,如 TGG 晶体等在 1.5 μm 波段的磁致旋光系数仅为在 1.06 μm 波段的磁致旋光系数的 1/3 左右,对 1.5 μm 激光的吸收损耗更高达 0.21 cm<sup>-1</sup><sup>[13]</sup>,因此无法将大功率连续单频固体激光器研究领域常用的单向行波腔技术应用于 1.5 μm 固体激光器的纵模选择;另一方面,由于 Er, Yb:YAB 等晶体介质内部存在较强的晶体场,这些双掺晶体的增益谱均为由多个分立的峰组成的非连续谱。当改变泵浦功率,或者更换激光器的输出镜透射率时,输出激光波长通常仅在有限的几个波长之间跳变,连续调谐范围较窄,因此目前尚无利用钕镱共掺的块状晶体等获得连续单频 1 542 nm 激光输出的报道。

本文采用 Er, Yb:YAB 激光晶体作为激光增益介质,扭摆模腔技术作为纵模选择方法,通过设计谐振腔的镀膜参数调控谐振腔的增益损耗关系获得连续单频 1 542 nm 激光输出,并在谐振腔中插入电光晶体进行激光波长的精确调谐。

## 1 实验装置

图 1 为全固态连续单频可调谐 1 542 nm 激光器的实验装置图。泵浦源采用光纤芯径为 105 μm,中心波长为 976.4 nm,最大输出功率为 9 W 的半导体激光器(GD2-CC312-1-12-M976 +/- 0.5-9-F105/22-T1,杏林睿光公司,中国)。考虑到 Er, Yb:YAB 激光器的准三能级特性以及晶体严重的热效应,为了在保证激光单横模运转,避免晶体热损伤的前提下,获得较高的激光转化效率,实验中采用两片焦距分别为 40 mm 和 50 mm 的透镜(L1、L2)对泵浦光进行整形聚焦,聚焦在晶体上的泵浦腰斑约为 66 μm。激光晶体采用沿 c 轴切割的未镀膜 Er, Yb:YAB 晶体。为了改善晶体的热效应,同时消除由晶体未镀膜端面导致的标准具效应,采用两块厚度为 0.45 mm 的单面镀膜蓝宝石薄片( $R_{1.5 \mu\text{m}} < 0.1\%$ ,  $T_{976 \text{ nm}}$

$> 98\%$ )作为热沉,与激光晶体的两个通光端面紧密贴合并放置在紫铜控温炉中。通过使用控温精度为 0.01℃ 的常温控温仪(YG-4S,宇光公司,中国)将晶体的温度控制在 15℃。

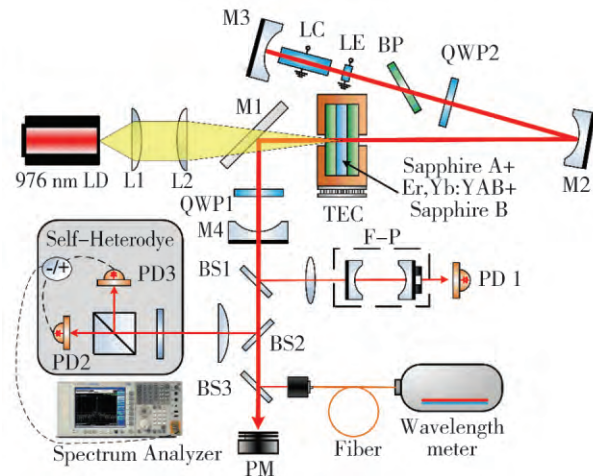


Fig. 1 Experimental setup of all-solid-state continuous-wave single frequency 1 542 nm laser

图 1 全固态连续单频 1 542 nm 激光器的实验装置图

为实现单频激光运转,激光谐振腔采用扭摆模腔设计。其中,作为输入镜的平面镜 M1 镀有 45°,  $R_{1.5 \mu\text{m}} > 99.8\%$ ,  $T_{976 \text{ nm}} > 98\%$  的双色膜;折叠镜 M2 和端镜 M3 分别为曲率半径 200 mm 和 100 mm 的凹面镜,为了抑制增益较强的 1 520 nm 波段的激光振荡, M2 和 M3 均镀有  $R_{1.542 \text{ nm}} > 99.8\%$ ,  $T_{1.520 \text{ nm}} > 10\%$  的双色膜;输出镜 M4 为曲率半径 100 mm 的凹面镜,镀有  $T_{1.520 \text{ nm}} > 10\%$ , 1 542 nm 部分反射的膜层。在 M2-M3 一臂插入厚度为 0.3 mm 的熔融石英片作为布儒斯特偏振器(BP),在激光晶体两侧各放置一个镀有 1.5 μm 减反膜( $R_{1.5 \mu\text{m}} < 0.1\%$ )的四分之一波片(QWP1、QWP2),两个四分之一波片的快轴方向相互垂直,并与起偏器的透振方向呈 45° 放置。为了对激光波长进行调谐,在谐振腔内插入两块长度分别为 10 mm 和 1 mm,沿 x 轴切割的 LiNbO<sub>3</sub> 晶体作为电光晶体(LC)和电光标准具(LE),其中,LC 设计为一端切角 1.5° 的楔形结构,以避免标准具效应。采用高压放大器(YG2016A,宇光公司,中国)在两块 LiNbO<sub>3</sub> 晶

体两侧(z轴方向)的电极上施加控制信号从而对谐振腔的腔长分别进行细调和粗调。为了保证激光器稳定运转,确定谐振腔的腔长为:激光晶体与M4之间的距离为103 mm,晶体与M2之间的距离为127 mm,M2与LC(中心)之间的距离为442 mm,LC与M3之间的距离为33 mm。根据ABCD矩阵理论,当激光晶体的等效热透镜焦距在8 mm~100 mm范围内(相应的泵浦功率为3~9 W之间)变化时,该谐振腔近似热不灵敏。

1.5 μm 激光输出之后由三个分束器(BS1、BS2、BS3)分为四束,其中主激光注入激光功率计(S314C, Thorlabs 公司,美国)测量激光器的输出功率;一小部分激光注入扫描共焦 F-P 腔(自由光谱区:750 MHz)监视激光器的运转模式;一部分激光经光纤耦合到波长计(WS-6, Wavelength 公司,美国)中测量输出激光的波长;另一部分激光注入一个自制的自零拍探测系统测量激光的强度噪声。

## 2 实验结果

在输出镜透射率为2.5%,且未对电光标准具施加控制电压的条件下,我们首先对晶体厚度进行了实验优化。图2为泵浦功率为5.5 W时,输出的连续单频1.5 μm 激光的功率和波长随 Er, Yb:YAB 晶体厚度的变化关系。其中,5 块晶体的掺杂浓度原子百分数均为:Er:1.1%; Yb:25%,而厚度依次为0.68 mm、0.75 mm、1.05 mm、1.52 mm、2 mm。当 Er, Yb:YAB 晶体长度为0.75 mm 时,最高输出功率达到0.45 W,激光波长为1550.2 nm。当晶体长度为1.05 mm 时,由于晶体内部热负载及温度分布的变化,由上转换等过程导致的损耗发生改变,使得激光波长切换至1542.1 nm,此时激光输出功率为0.35 W。当进一步增加晶体长度时,由于泵浦光能量在1 mm 内已被近似完全吸收,对振荡激光的吸收损耗将急剧增大,激光转换效率明显降低,激光波长红移。

为进一步提高1542nm 连续单频激光的输出功率,我们采用长度为1.05 mm 的 Er, Yb:

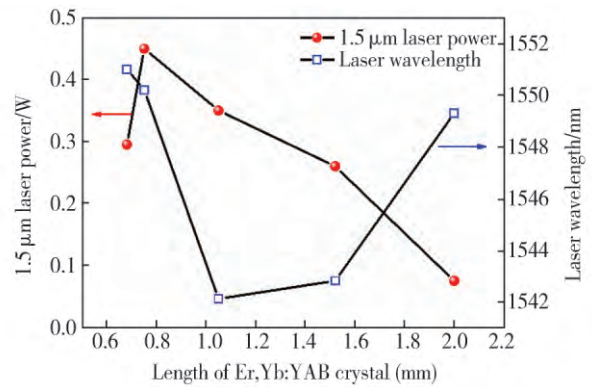


Fig. 2 Output power and wavelength of continuous-wave single frequency laser as functions of crystal thickness

图2 连续单频激光输出功率与激光波长随晶体厚度的变化关系

YAB 晶体作为增益介质,研究了谐振腔的输出镜透射率对激光功率和波长的影响。图3为分别采用透射率为1.5%、2.5%和5%的输出耦合镜时,1.5 μm 激光的输出功率随注入泵浦功率的变化曲线。在泵浦功率为5.5 W,输出耦合镜透射率为1.5%时,1.5 μm 激光的输出功率最高,达到0.42 W,测得激光输出波长为1541.9 nm。当采用透射率为5%的输出耦合镜时,激光输出功率为0.15 W,测得激光输出波长为1541 nm。

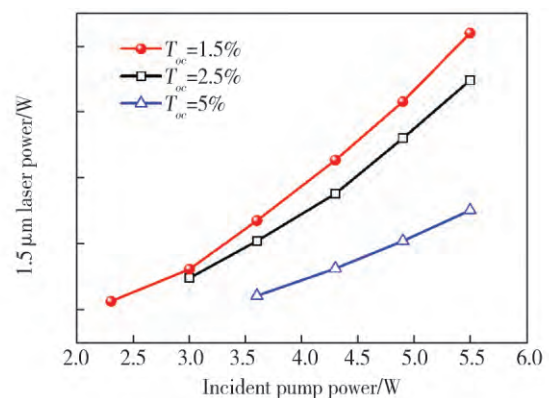


Fig. 3 Output characteristics of continuous-wave single frequency lasers using output couplers with different transmissions

图3 不同输出耦合镜透射率条件下的连续单频激光输出特性

图4为连续单频激光输出功率为0.42 W

时,采用功率计测得的激光功率长期稳定性曲线以及采用扫描 F-P 干涉仪测得的激光透射谱。根据实验结果,输出激光为单纵模运转,在 3 h 内的功率波动优于  $\pm 3\%$ 。

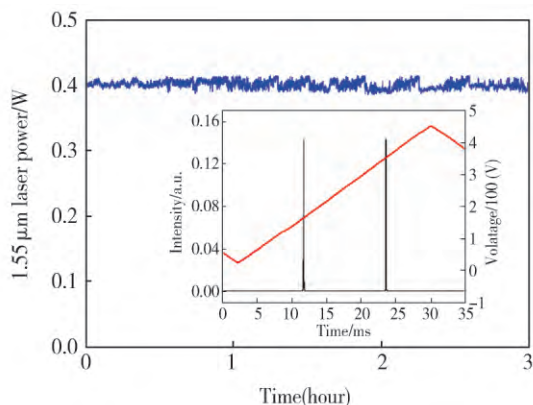


Fig. 4 Power fluctuation of the continuous-wave single frequency 1 542 nm laser and transmitted intensity from F-P interferometer

图 4 连续单频 1 542 nm 激光的长期功率波动曲线和扫描共焦 F-P 腔监视的连续单频 1 542 nm 激光器的透射谱

图 5 为采用频谱分析仪(N9010A, Agilent 公司,美国)测得的连续单频 1 542 nm 激光在输出功率为 0.42 W 时的强度噪声。频谱仪的分辨率带宽设置为 1 kHz,视频带宽设置为 100 Hz,扫描时间为 1 s。从图中可以看到,激光器的强度噪声在分析频率 3 MHz 处即达到散粒噪声极限。

图 6 为利用波长计测得的 1 542 nm 连续单频激光的波长随施加在两块 LiNbO<sub>3</sub> 晶体电极上

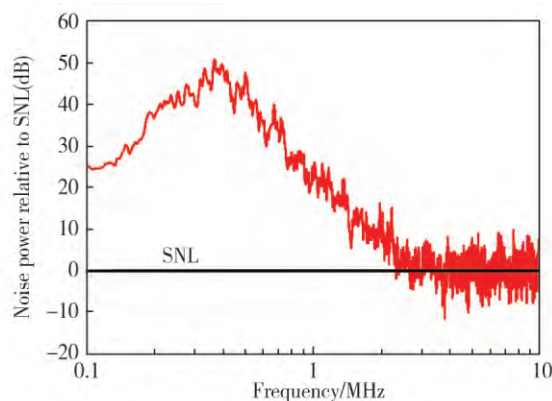


Fig. 5 Intensity noise spectra of the continuous-wave single frequency 1 542 nm laser

图 5 连续单频 1 542 nm 激光的强度噪声

的控制信号的变化关系。当 LE、LC 的控制信号的电压均为 0 V 时,输出激光的波长为 1 541.959 3 nm。随着 LE 的控制信号电压( $V_{LE}$ )每增加 30 V,输出激光的波长呈现间隔约 0.001 7 nm 的阶梯跳变。在  $0 V < V_{LE} < 120 V$  (图 6(a))和在  $420 V < V_{LE} < 960 V$  (图 6(b))范围内,输出激光的功率均在 400 mW 以上。在  $120 V < V_{LE} < 420 V$  时,虽然输出激光仍可正常调谐,但是由于增益特性的变化,输出功率出现较大幅度的降低。当  $V_{LE}$  固定不变时,通过调节 LC 的控制信号电压( $V_{LC}$ )可以实现在激光器的一个自由光谱区内的连续频率调谐,激光波长随  $V_{LC}$  的增加呈线性红移,变化的斜率为 0.000 254 nm/100 V。

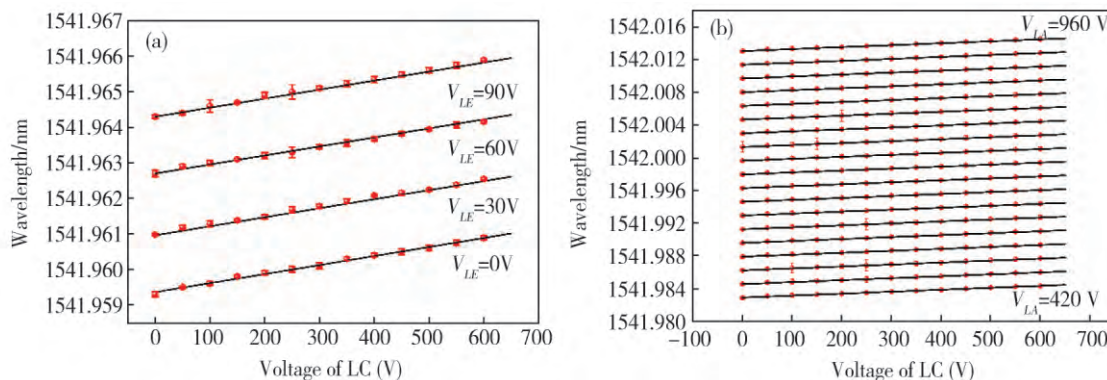


Fig. 6 Tuning curves of continuous-wave single frequency 1 542 nm laser

图 6 连续单频 1 542 nm 激光的调谐曲线

### 3 结论

研制了一台稳定输出的全固态连续单频可调谐 1 542 nm 激光器。通过设计腔镜的镀膜调控谐振腔的增益损耗关系,实现了 1 542 nm 激光运转。在此基础上,通过优化晶体长度与输出耦合镜的透射率、改善晶体制冷方式和纵模选择

方式等,获得了最大功率为 420 mW 的连续单频 1 542 nm 激光输出,激光在 3 h 内的功率波动优于  $\pm 3\%$ 。通过扫描内腔电光晶体和电光标准具,实现了激光在 1 541. 959 nm~1 542. 014 nm 范围内的准连续调谐。该激光器可应用于光频标、高分辨率光谱等方面。

### 参考文献:

- [1] Predehl K, Grosche G, Raupach S M F, *et al.* A 920-kilometer Optical Fiber Link for Frequency Metrology at the 19th Decimal Place[J]. *Science*, 2012, **336**(6080): 441-444. DOI: 10. 1126/science. 1218442.
- [2] Minutolo P, Corsi C, Amato F D, *et al.* Self-and Foreign-broadening and Shift Coefficients for  $C_2H_2$  Lines at 1. 54  $\mu m$  [J]. *Eur Phys J D*, 2001, **12**(2): 175-179. DOI: 10. 1007/s100530170020.
- [3] Hong F L, Onae A, Jiang J, *et al.* Absolute Frequency Measurement of an Acetylene-stabilized Laser at 1 542 nm[J]. *Opt Lett*, 2003, **28**(23): 2324-2326. DOI: 10. 1109/LEOSST. 2005. 1528030.
- [4] Akulinichev V V, Kurnin I V, Kurochkina E G. Eyesafe Lidar by the Solid State Er: Glass Laser[J]. *Proc SPIE*, 2004, **5478**: 291-297. DOI: 10. 1117/12. 561017.
- [5] Svelto C, Galzerano G, Bava E. Absolute Frequency Stabilization of 1. 54  $\mu m$  Solid-state Er-Yb: Glass Lasers[C]. *Freq Standards Metrol*, 2015: 625-628. DOI: 10. 1142/9789812777713\_0095.
- [6] Alouini M, Brunel M, Bretenaker F, *et al.* Dual Tunable Wavelength Er: Yb: Glass Laser for Terahertz beat Frequency Generation[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 1998, **10**(11): 1554-1556. DOI: 10. 1109/68. 726747.
- [7] Leeuwen R V, Xu B, Watkins L S, *et al.* Low Noise High Power Ultra-stable Diode Pumped Er-Yb Phosphate Glass Laser[J]. *Proc SPIE*, 2008, **6975**: 69750K 1-9. DOI: 10. 1117/12. 782202.
- [8] Chen Y J, Lin Y F, Gong X H, *et al.* 2. 0 W Diode-pumped Er: Yb:  $YAl_3(BO_3)_4$  laser at 1. 5~1. 6  $\mu m$ [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, **89**(24): 269. DOI: 10. 1063/1. 2404969.
- [9] Gorbachenya K N, Kisel V E, Yasukevich A S, *et al.* Highly Efficient Continuous-wave Diode-pumped Er, Yb:  $GdAl_3(BO_3)_4$  Laser[J]. *Opt Lett*, 2013, **38**(14): 2446-2448. DOI: 10. 1364/OL. 38. 002446.
- [10] Huang J H, Chen Y J, Gong X H, *et al.* Efficient 1. 55  $\mu m$  Laser Operation of  $Er^{3+}$  in Stoichiometric  $Sr_3Yb(BO_3)_3$  Crystal[J]. *Opt Mater Express*, 2015, **5**(7): 1579-1587. DOI: 10. 1364/OME. 5. 001579.
- [11] Li Y J, Feng J X, Li P, *et al.* 400 mW Low Noise Continuous-wave Single-frequency Er, Yb:  $YAl_3(BO_3)_4$  Laser at 1. 55  $\mu m$ [J]. *Opt Express*, 2013, **21**(5): 6082-6090. DOI: 10. 1364/OE. 21. 006082.
- [12] Huang J H, Chen Y J, Lin Y F, *et al.* 940 mW 1 564 nm Multi-longitudinal-mode and 440 mW 1 537 nm Single-longitudinal-mode Continuous-wave Er: Yb:  $Lu_2Si_2O_7$  Microchip Lasers[J]. *Opt Lett*, 2018, **43**(8): 1643-1646. DOI: 10. 1364/ol. 43. 001643.
- [13] Ondrej S, Ryo Y, Antonio L, *et al.* Wavelength Dependence of Magneto-optic Properties of Terbium Gallium Garnet Ceramics[J]. *Opt Express*, 2015, **23**: 13641-13647. DOI: 10. 1364/OE. 23. 013641.

## 420 mW all Solid State Continuous wave Single Frequency Tunable Laser at 1 542 nm

ZHU Hai-rui<sup>1,2</sup>, YAN Li-hua<sup>1,2</sup>, LI Yuan-ji<sup>1,2</sup>, ZHANG Kuan-shou<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices,  
Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China;

2. Collaborative Innovation Center of Extreme Optics,  
Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

**Abstract:** A diode-end-pumped all-solid-state continuous-wave (cw) single-frequency tunable 1 542 nm laser is designed and fabricated. The laser oscillation at wavelength around 1 542 nm is realized by tuning the gain spectrum of the Er, Yb:YAB laser system via a special coating design. The cw single-frequency laser operation is achieved by using the twisted-mode technique for mode selection. Based on the optimization of the thickness of the gain medium and the transmission of the output coupler, the laser power is scaled up to 420 mW under 5.5 W pumping. The power stability of the laser is better than  $\pm 3\%$  during a given 3 hours. The laser intensity noise reaches the shot noise limit beyond the analysis frequency of 3 MHz. When an electro-optical crystal and an electro-optical etalon is inserted into the cavity and controlled by high voltage sources, quasi-wavelength-tuning of the cw single-frequency laser with the range of 1 541.959 nm~1 542.014 nm is demonstrated.

**Key words:** laser; 1 542 nm; Er, Yb:YAB crystal; single frequency operation