

# 基于全固态单向行波环形腔的连续波单频 1.5 $\mu\text{m}$ 激光器

姚子健<sup>1</sup>, 李渊骥<sup>1,2</sup>, 宋政<sup>1</sup>, 冯晋霞<sup>1,2</sup>, 张宽收<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup> 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;

<sup>2</sup> 山西大学极端光学协同创新中心, 山西 太原 030006

**摘要** 报道了一台激光二极管双端面偏振抽运的低噪声单向行波环形腔连续波单频 Er, Yb: YAB 1.5  $\mu\text{m}$  激光器。通过精确测量蓝宝石-Er, Yb: YAB-蓝宝石薄片和铋铁石榴石磁光晶体的热透镜焦距, 采用双端面、长聚焦、偏振选择的抽运结构, 通过提高可注入的抽运功率、降低激光晶体的热效应, 首次实现了基于单向行波环形腔单纵模选择技术的全固态连续波单频 1.5  $\mu\text{m}$  激光运转。连续波单频 1.5  $\mu\text{m}$  激光输出功率达 755 mW, 2 h 内的功率波动小于  $\pm 1.2\%$ , 激光的强度噪声在分析频率大于 5 MHz 的范围内达到散粒噪声极限。

**关键词** 激光器; 1.5  $\mu\text{m}$  激光; 连续波单频; 单向行波环形腔; 低噪声

中图分类号 TN248.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.0501010

## 1 引言

波长位于 1.5  $\mu\text{m}$  光通信波段的全固态连续波 (CW) 单频激光器具有在高功率输出条件下激光噪声更低的优势, 其强度噪声和相位噪声一般在分析频率高于 3~5 MHz 的范围内即可达到散粒噪声极限。相比之下, 采用 Littrow 腔结构的 1.5  $\mu\text{m}$  连续波单频半导体激光器的相位噪声一般高于散粒噪声极限 50 dB~80 dB<sup>[1]</sup>, 高功率连续波单频 1.5  $\mu\text{m}$  光纤激光器的强度噪声在分析频率 20 MHz 左右仍然高于散粒噪声极限 15 dB<sup>[2-3]</sup>。因此, 低噪声的全固态连续波单频 1.5  $\mu\text{m}$  激光器在激光干涉测量、相干多普勒激光雷达、光频标、冷原子物理、连续变量量子信息、量子光学基础研究等领域有着重要的应用<sup>[4-11]</sup>。特别是在光通信波段量子光源的研制中, 通常要求作为抽运光源的 1.5  $\mu\text{m}$  激光的功率高于 500 mW、强度噪声达到散粒噪声极限 (SNL)<sup>[12-13]</sup>。

目前, 全固态 1.5  $\mu\text{m}$  激光器主要是利用铒 (Er)

镱 (Yb) 共掺激光晶体研制而成, 为三能级激光系统, 需要较高的抽运功率密度以实现较低的抽运阈值功率和较高激光功率输出, 但又存在能量传输上转换、激发态吸收、自吸收损耗等显著增加激光晶体内部热量的能量沉积过程, 导致严重的热效应。已报道的基于铒镱共掺激光晶体的连续波 1.5  $\mu\text{m}$  激光器基本上是在较低抽运功率下进行运转。2004 年, Burns 等<sup>[14]</sup>通过理论和实验优化 Er, Yb: YCa<sub>4</sub>O(BO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> 晶体的掺杂浓度等参数, 在 1.75 W 抽运功率下, 实现了 255 mW 的 1.55  $\mu\text{m}$  连续波多模激光输出。2013 年, Gorbachenya 等<sup>[15]</sup>利用 Er, Yb: GdAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> 晶体制备了一台输出波长为 1.531  $\mu\text{m}$  的连续波多模激光器, 当吸收抽运功率为 4 W 时, 激光输出功率达 780 mW。2017 年, Chen 等<sup>[16]</sup>研制出驻波谐振腔 Er, Yb: LaMgB<sub>5</sub>O<sub>10</sub> 激光器, 在吸收抽运功率为 4 W 时, 通过优化输出镜的透射率获得了 610 mW 的连续波多模 1.57  $\mu\text{m}$  激光输出。2019 年, Chen 等<sup>[17]</sup>利用低掺杂 Er: Yb: YAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> (Er, Yb: YAB) 晶体, 将腔镜镀在晶体

收稿日期: 2020-11-02; 修回日期: 2020-12-07; 录用日期: 2020-12-15

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0405203, 2016YFA0301401)

\* E-mail: kuanshou@sxu.edu.cn

表面,研制出微片连续波多模  $1.55 \mu\text{m}$  激光器,在  $7.2 \text{ W}$  抽运功率下,激光输出功率达  $2.05 \text{ W}$ 。由于钕共掺激光晶体的热透镜效应严重,目前主要是采用腔内插入标准具选模、微片选模以及扭摆模腔选模等技术手段研制全固态连续波单频  $1.5 \mu\text{m}$  激光器<sup>[18-21]</sup>。2013 年, Li 等<sup>[19]</sup> 利用蓝宝石热沉端面制冷的 Er, Yb: YAB 晶体作为增益介质,在  $4.9 \text{ W}$  抽运功率下,基于双标准具选模实现了  $400 \text{ mW}$  的连续波单频  $1.55 \mu\text{m}$  激光输出。2018 年, Huang 等<sup>[20]</sup> 使用 Er: Yb:  $\text{Lu}_2\text{Si}_2\text{O}_7$  晶体作为增益介质,利用微片选模技术实现了波长为  $1.537 \mu\text{m}$  的连续波单频激光输出。当抽运功率为  $4.3 \text{ W}$  时,输出功率达  $440 \text{ mW}$ 。2019 年,朱海瑞等<sup>[21]</sup> 利用 Er, Yb: YAB 晶体作为增益介质,采用扭摆模腔选模技术实现了连续波单频可调谐  $1.542 \mu\text{m}$  的激光运转。当抽运功率为  $5.5 \text{ W}$  时,输出功率达  $420 \text{ mW}$ 。与上述单纵模选择技术相比,单向行波环形腔单纵模选择技术具有选模能力更强、模式选择效果受激光晶体的热效应影响较小的优势,已在  $1.06 \mu\text{m}$  等波段的全固态连续波单频激光器研制中得到了广泛应用<sup>[22-24]</sup>。然而钕共掺激光晶体的热透镜效应非常严重,例如,在  $4.7 \text{ W}$  抽运功率下,实测的 Er, Yb: YAB 晶体热透镜焦距仅为  $13 \text{ mm}$ <sup>[19]</sup>。同时为获得较低的抽运阈值功率和较高激光功率输出,需要较小的抽运激光腰斑来实现较高的抽运功率密度。因此,设计出合适的激光二极管(LD)端面抽运的环形激光器比较困难。特别是,要在环形谐振腔内插入光学单向器等元件使激光器单向行波运转,多个内腔元件引入的内腔损耗将会降低激光器的转换效率。目前,利用单向行波环形腔技术使  $1.5 \mu\text{m}$  激光器实现连续波单频运转的报道甚少,而且已报道的全固态连续波单频  $1.5 \mu\text{m}$  激光器的输出功率均小于  $500 \text{ mW}$ 。

为获得输出功率更高的全固态连续波单频  $1.5 \mu\text{m}$  激光器,本文在采用蓝宝石热沉双端面制冷方式降低 Er, Yb: YAB 激光晶体热效应的基础上,通过设计双端端面偏振抽运系统,保证抽运光与振荡激光在整个激光晶体范围内模式匹配,控制激光晶体的抽运吸收效率,同时考虑激光晶体与腔内磁光晶体热透镜效应,设计出合适的四镜环形谐振腔。基于单向行波环形腔单纵模选择技术,进行了全固态低噪声连续波单频  $1.5 \mu\text{m}$  激光器的研制,并对激光器的输出特性进行了研究。

## 2 单向行波环形谐振腔设计

由于钕共掺激光晶体的热量沉积-体积比非常大,导致激光晶体的热透镜效应非常严重,故基于钕共掺激光晶体的连续波  $1.5 \mu\text{m}$  激光器只能在较低抽运功率下运转。为了获得较高的抽运吸收效率,通常选择的 Er, Yb: YAB 晶体 Er, Yb 离子掺杂浓度(原子数分数,下同)分别为  $1.1\%$  和  $25\%$ ,使得  $976 \text{ nm}$  的抽运光在  $0.6 \sim 1.0 \text{ mm}$  的晶体长度内即被完全吸收。同时,为了获得较高的抽运功率密度,提高晶体的热损伤阈值,通常选择在激光晶体内光斑半径范围为  $60 \sim 80 \mu\text{m}$  的抽运光。在此实验条件下,实验测得的 Er, Yb: YAB 晶体的热损伤阈值功率为  $6 \sim 6.5 \text{ W}$ 。

为进一步降低激光晶体的热效应,使其能够承受大于  $10 \text{ W}$  的注入抽运功率,从降低激光晶体内的热量沉积、改善热沉积分布两个方面进行设计。首先,利用如图 1 中所示的蓝宝石-Er, Yb: YAB-蓝宝石三明治形式的制冷结构来提高激光晶体的端面散热效率。实验测得蓝宝石双端面制冷的 Er, Yb: YAB 晶体在单端注入抽运功率为  $10 \text{ W}$  时未发生热损伤。其次,设计了如图 1 中所示的双端端面偏振抽运耦合系统来进一步减少激光晶体内的局部热沉积并改善热沉积的轴向分布<sup>[25]</sup>。通过使用偏振分束棱镜(PBS)将抽运光起偏分束,并在两端抽运光路中各加入一个半波片(HWP),将注入激光晶体的抽运光的偏振方向相对 Er, Yb: YAB 晶体的  $a$  轴旋

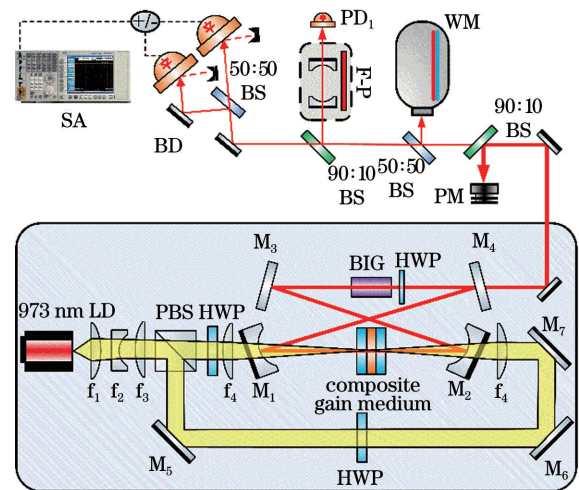


图1 全固态单向行波环形腔连续波单频  $1.5 \mu\text{m}$  激光器实验装置图

Fig. 1 Experimental setup of the continuous wave single-frequency  $1.5 \mu\text{m}$  laser based on unidirectional travelling-wave ring cavity

转一定的角度,控制激光晶体对抽运光的吸收系数。实验测得 Er, Yb:YAB 激光晶体对双端入射抽运光的总等效吸收系数为  $18.8 \text{ cm}^{-1}$ ,在双端注入抽运功率为 15 W 时未观察到抽运饱和以及热损伤现象。

为了适应双端端面抽运环形谐振腔的结构设计以及减小环形谐振腔内激光入射到曲面镜上的角度,需要在不影响抽运光在激光晶体内的光斑尺寸的前提下,增大抽运光的聚焦长度。为此,设计了由四透镜( $f_1$ - $f_4$ )组合构成的双端端面偏振抽运耦合系统,如图 1 所示。使用 Zemax 软件对抽运光束的传输演化进行理论模拟计算,对透镜组合方案进行了优化选择。最佳的透镜组合为: $f_1$  是焦距为 30 mm 的平凸透镜, $f_2$  是焦距为 -15 mm 的平凹透镜, $f_3$  是焦距为 50 mm 的平凸透镜, $f_4$  是两个焦距等于 70 mm 的平凸透镜。其中  $f_1$ - $f_2$ 、 $f_2$ - $f_3$  之间的距离分别为 45 mm、25 mm,左侧  $f_3$ - $f_4$  之间的距离为 190 mm,右侧  $f_3$ - $f_4$  之间的距离为 440 mm。图 2(a)为在上述条件下计算的 LD 经光纤耦合输出的抽运光通过双端端面抽运耦合系统和输入镜  $M_1$ 、 $M_2$  的光束传输演化结果。可以看到,采用上述四透镜抽运耦合聚焦系统,抽运光的聚焦长度达 86 mm,可以满足双端端面抽运环形谐振腔结构对抽运光聚焦长度的需求。图 2(b)为理论模拟双端

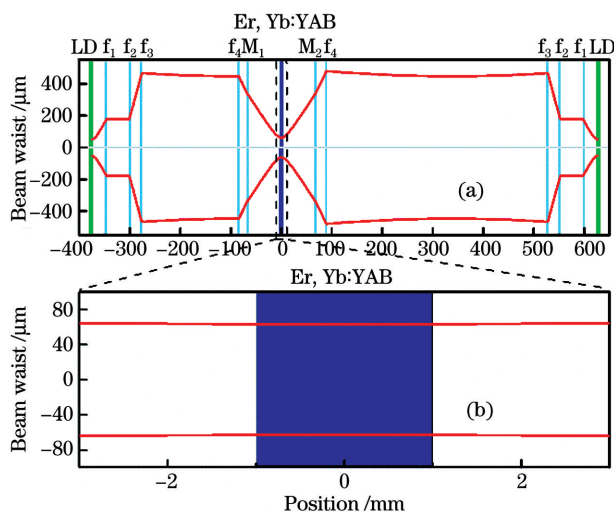


图 2 抽运光的传输演化。(a) 抽运光经过抽运耦合系统和输入镜的光束传输演化;(b) 两端注入 Er, Yb:YAB 晶体内的抽运光的光斑尺寸

Fig. 2 Evolution of the pump beam. (a) Evolution of the pump beam passing through the beam coupling system and input couplers; (b) size of pump beams as a function of the position relative to the center of Er, Yb:YAB crystal

端面注入抽运光在 Er, Yb:YAB 晶体中的空间分布。抽运光在激光晶体中的平均光斑半径为  $63 \mu\text{m}$ ,相对变化量仅为 0.3% ( $0.2 \mu\text{m}$ ),可实现激光晶体均匀吸收抽运光以及抽运光与振荡激光的空间模式匹配。

为避免激发高阶横模,减弱热致衍射损耗、自吸收损耗和激发态吸收等内腔损耗,获得较高的激光转换效率,连续波基横模  $1.5 \mu\text{m}$  激光器的振荡激光腰斑半径需要满足一定的条件。对于 Er, Yb:YAB 激光器,振荡激光腰斑半径须控制在  $50 \sim 70 \mu\text{m}$  的范围内<sup>[25]</sup>。为了设计出满足上述条件的环形谐振腔,首先需要准确测量腔内元件的热透镜焦距。采用文献[26]中所使用的刀片法对紧密贴合的蓝宝石-Er, Yb:YAB-蓝宝石三明治薄片的热透镜焦距进行测量,实验结果如图 3 所示。可以看到,通过采用双端端面偏振选择抽运技术以及蓝宝石双端面制冷激光晶体,在抽运功率为 4.5 W 时,蓝宝石-Er, Yb:YAB-蓝宝石薄片的热焦距(图中黑色数据点)为 78.2 mm,比文献[19]中报道的  $\sigma$  偏振单端端面抽运的蓝宝石-Er, Yb:YAB 薄片的热透镜焦距(图中红色数据点)大 1.7 倍。在抽运功率为 11.7 W 时,蓝宝石-Er, Yb:YAB-蓝宝石薄片的热焦距为 36.5 mm。相比单端端面抽运结构,双端端面偏振选择抽运结构有效增加了激光晶体的热透镜焦距。

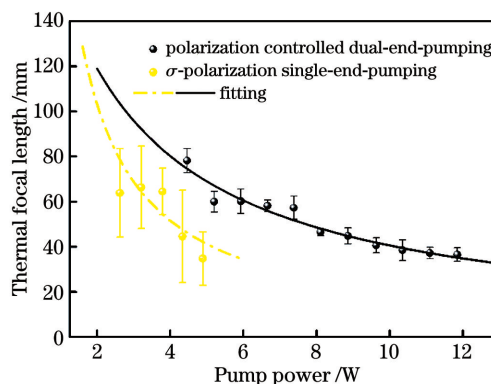


图 3 实测的蓝宝石-Er, Yb:YAB-蓝宝石薄片的热透镜焦距

Fig. 3 Measured thermal focal length of the sapphire-Er, Yb:YAB-sapphire crystal as a function of the pump power

利用单向行波环形腔进行单纵模选择需要在谐振腔内插入基于磁光晶体的法拉第旋转器。由于常用的铽镓石榴石(TGG)磁光晶体在  $1.5 \mu\text{m}$  波段的维尔德常数仅为  $-18 \text{ rad} \cdot \text{T}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ,故由其与半波片构成的内腔光学单向器不足以使激光器稳定地单

向行波运转。与 TGG 晶体相比,铍铁石榴石(BIG)磁光晶体对  $1.5 \mu\text{m}$  波段激光的维尔德常数为  $-305 \text{ rad}\cdot\text{T}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ ,可用于基于单向行波环形腔单纵模选择技术的连续波单频  $1.5 \mu\text{m}$  激光器的研制。但是 BIG 晶体对  $1.5 \mu\text{m}$  激光的吸收系数达  $0.06 \text{ cm}^{-1}$ 。对于已报道的连续波单频  $1.5 \mu\text{m}$  激光器,内腔激光功率约在  $10\sim 25 \text{ W}$  之间,因此在谐振腔内插入 BIG 晶体不仅会导致内腔损耗的增加,还会导致 BIG 晶体的热透镜效应,显著影响了谐振腔的稳定性和内腔激光模式。为此,对 BIG 晶体的热透镜效应进行了研究,并将其用于环形激光谐振腔的设计。由于 BIG 晶体的热透镜效应主要来源于该晶体对内腔振荡的  $1.5 \mu\text{m}$  激光的吸收,因此在实验研究中分两步对该晶体的热透镜焦距进行间接测量。首先,在谐振腔内插入由 BIG 磁光晶体和半波片组成的光学单向器,在不同的谐振腔长下调试谐振腔,使激光器单向行波运转,并逐渐提高抽运功率直至输出激光功率开始降低。在如图 1 所示的环形谐振腔中,包含激光晶体的两凹面镜之间的距离为固定值  $64 \text{ mm}$ ,包含 BIG 磁光晶体的两凹面镜之间的距离为  $L$ ,其腔长有待进一步优化设计。在

腔长优化过程中,内腔激光入射凹面镜的角度为固定值  $6^\circ$ 。图 4(a)中数据点为不同腔长下单向输出的  $1.5 \mu\text{m}$  激光功率随抽运功率的变化关系,图中曲线(I)、(II)、(III)、(IV)分别对应  $L$  为  $150 \text{ mm}$ 、 $160 \text{ mm}$ 、 $180 \text{ mm}$ 、 $200 \text{ mm}$  时的实验结果。可以看到,曲线(I)、(II)、(III)、(IV)分别在抽运功率为  $10.3 \text{ W}$ 、 $10.3 \text{ W}$ 、 $10.9 \text{ W}$ 、 $11.7 \text{ W}$  时出现转折并下降。同时可根据光学谐振腔理论计算出 BIG 晶体的热焦距( $f_{\text{BIG}}$ ),结果如图 4(b)中球形数据点所示。可以看到,当内腔激光功率为  $25.3 \text{ W}$  时,BIG 晶体的热透镜焦距约为  $58 \text{ mm}$ 。相比之下,当  $1.064 \mu\text{m}$  内腔激光功率为  $445 \text{ W}$  时,TGG 晶体的热透镜焦距约为  $407 \text{ mm}$ <sup>[27]</sup>。图 4(b)中实线为根据晶体热焦距理论表达式<sup>[28]</sup>以及下述实验参数理论计算的 BIG 晶体的热焦距随内腔激光功率的变化曲线。其中,BIG 晶体的半径和长度分别为  $3 \text{ mm}$  和  $5 \text{ mm}$ ,吸收系数为  $0.06 \text{ cm}^{-1}$ ,折射率为  $2.19$ ,热膨胀系数为  $1.04 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ,热传导率为  $9.4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ,泊松比为  $0.28$ ,热光系数为  $20 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 。可以看到,理论计算结果与实验数据基本吻合。

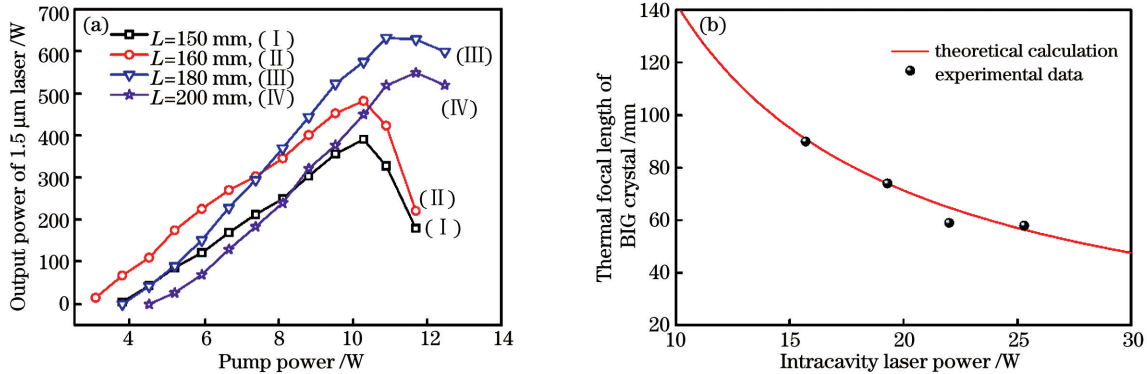


图 4 BIG 晶体热透镜焦距的测量结果。(a) 不同腔长下,单向输出的  $1.5 \mu\text{m}$  激光功率随抽运功率的变化关系;  
(b) BIG 磁光晶体的热透镜焦距随内腔激光功率的变化关系

Fig. 4 Measurement results of the thermal focal length of BIG crystal. (a)  $1.5 \mu\text{m}$  laser power as a function of incident pump power at different resonator lengths; (b) thermal focal length of BIG crystal as a function of the intracavity laser power

根据实验测得的蓝宝石-Er, Yb:YAB-蓝宝石激光晶体和 BIG 磁光晶体的热透镜焦距,对激光谐振腔的长度进行设计优化。图 5(a)~(c)分别为  $L=150 \text{ mm}$ 、 $L=170 \text{ mm}$  和  $L=180 \text{ mm}$  条件下,理论计算的激光晶体中心处振荡激光在子午面和弧矢面内的腰斑半径随抽运功率的变化关系。从图中可以看出,当  $L=150 \text{ mm}$  时,谐振腔仅在抽运功率为  $3\sim 10 \text{ W}$  的范围内满足高效单模激光产生所需的条件,即振荡激光腰斑半径在  $50\sim 70 \mu\text{m}$  的范围

内。当抽运功率为  $12 \text{ W}$  时,较大的振荡激光腰斑半径导致未抽运区域的吸收损耗急剧增加,因此在对应的实验中观察到了激光功率陡峭式下降的现象,如图 4(a)中方形数据点所示。当  $L=170 \text{ mm}$  时,谐振腔稳定运转区域缩窄,但是谐振腔可以在抽运功率为  $4\sim 12 \text{ W}$  的范围内满足高效单模激光产生所需的条件。当进一步将  $L$  增大至  $180 \text{ mm}$  时,子午面和弧矢面内的振荡激光腰斑半径差别较大,如图 5(c)所示,谐振腔的像散将严重影响激光运转

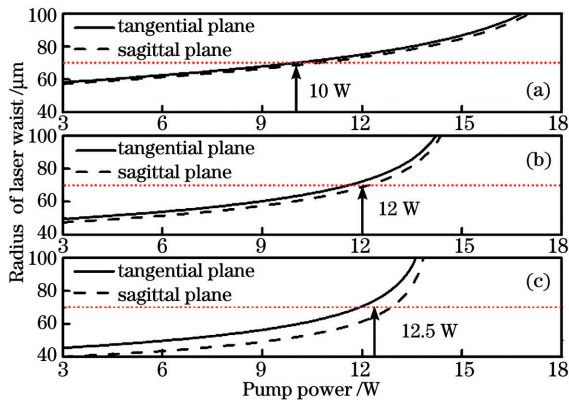


图 5 激光晶体中心处,在子午面和弧矢面内的振荡激光腰斑半径随抽运功率的变化关系。(a)  $L = 150$  mm; (b)  $L = 170$  mm; (c)  $L = 180$  mm

Fig. 5 Radii of laser waist as a function of the incident pump power at the center of laser crystal and in the tangential and sagittal planes, respectively. (a)  $L = 150$  mm; (b)  $L = 170$  mm; (c)  $L = 180$  mm

特性,在实验中可观察到输出激光光束在横截面上呈椭圆或菱形强度分布。因此本研究选择  $L = 170$  mm 的环形谐振腔型进行连续波单频  $1.5 \mu\text{m}$  激光器的研制。

### 3 实验装置及结果

基于全固态单向行波环形腔的连续波单频  $1.5 \mu\text{m}$  激光器的实验装置如图 1 所示。其中,抽运源采用光纤耦合输出的激光二极管(LIMO35-F100-DL980-FG-E, LIMO 公司)。LD 的中心波长为  $973.6 \text{ nm}$ ,最大输出功率为  $35 \text{ W}$ ,光纤芯径为  $100 \mu\text{m}$ 。激光晶体为中国科学院福建物质结构研究所黄艺东研究员课题组提供的沿  $a$  轴切割、尺寸为  $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$  的 Er, Yb: YAB 晶体,其

中 Er 离子掺杂浓度为  $1.1\%$ , Yb 离子掺杂浓度为  $25\%$ 。Er, Yb: YAB 晶体两个端面抛光未镀膜,分别与两块厚度为  $0.45 \text{ mm}$  的单面镀膜蓝宝石薄片 ( $R_{1.5 \mu\text{m}} < 0.1\%$ ,  $T_{976 \text{ nm}} > 98\%$ ) 紧密贴合,利用蓝宝石晶体的高热导率改善 Er, Yb: YAB 晶体的轴向散热。将蓝宝石-Er, Yb: YAB-蓝宝石三明治薄片放置在紫铜控温炉中,并使用控温精度为  $0.01 \text{ }^\circ\text{C}$  的常温控温仪(YG-4S, 宇光公司)将晶体的温度控制在  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ 。激光器谐振腔采用由  $M_1$ - $M_4$  四个腔镜构成的环形腔。平凹输入耦合镜  $M_1$  和  $M_2$  曲率半径均为  $50 \text{ mm}$ , 镀有  $8^\circ$  双色膜 ( $R_{1.5 \mu\text{m}} > 99.8\%$ ,  $T_{976 \text{ nm}} > 98\%$ ); 平面腔镜  $M_3$  镀高反膜 ( $R_{1.5 \mu\text{m}} > 99.8\%$ ), 平面腔镜  $M_4$  为输出耦合镜, 镀部分反射膜 ( $T_{1.5 \mu\text{m}} = 2.5\%$ )。  $M_1$ -Er, Yb: YAB、Er, Yb: YAB- $M_2$ 、 $M_1$ -( $M_4$ - $M_3$ )- $M_2$  之间的距离分别为  $32 \text{ mm}$ 、 $32 \text{ mm}$  和  $170 \text{ mm}$ 。通过在腔内插入由 BIG 磁光晶体和半波片组成的光学单向器,使激光在谐振腔内单向行波运转,最终获得连续波单频  $1.5 \mu\text{m}$  激光输出。

输出的  $1.5 \mu\text{m}$  激光由两个  $90:10$  分束器和一个  $50:50$  分束器分为四束。其中主激光注入激光功率计(PM, S314C, Thorlabs 公司)测量输出功率。功率较弱的三束激光:一束注入一个扫描 Fabry-Pérot 干涉仪(F-P, 自由光谱范围为  $375 \text{ MHz}$ , 精细度为  $350$ )中监视激光器的纵模模式;一束经光纤耦合注入到波长计(WM, WS-6, Wavelength 公司)中测量输出激光的波长;剩余的一束激光利用自制的共模抑制比达  $45 \text{ dB}$  的平衡探测器(BD)测量激光的强度噪声<sup>[29-30]</sup>。

图 6(a)为  $1.5 \mu\text{m}$  激光的输出功率随抽运功率的变化曲线,可以看出,  $1.5 \mu\text{m}$  激光功率呈线性增

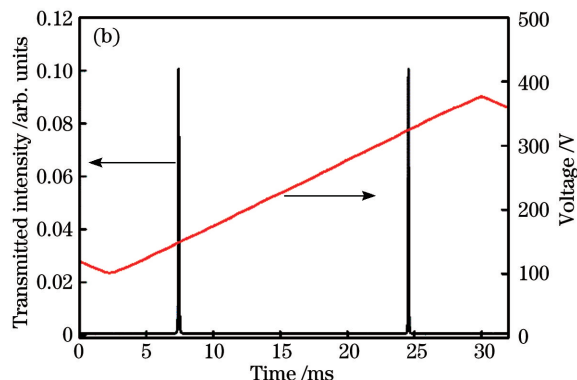
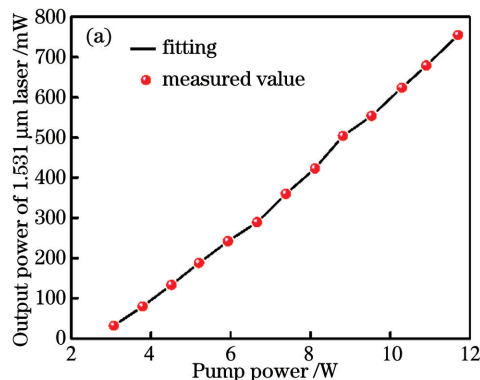


图 6  $1.5 \mu\text{m}$  激光输出特性。(a)  $1.5 \mu\text{m}$  激光输出功率随抽运功率的变化曲线; (b) 扫描共焦 F-P 干涉仪的透射曲线  
Fig. 6 Behaviors of the  $1.5 \mu\text{m}$  laser. (a) Output power of  $1.5 \mu\text{m}$  laser as a function of pump power; (b) transmitted intensity of the scanning F-P interferometer

长,抽运阈值功率为 3.1 W。当抽运功率为 11.7 W 时,输出激光功率达 755 mW。此时使用波长计测得的激光中心波长为 1531.00 nm,使用光束质量分析仪(M2-200-BB,SP-1550M,Spricon 公司)测得的激光光束质量  $M^2$  因子为  $M_x^2 = 1.58, M_y^2 = 1.97$ 。注入 1.5  $\mu\text{m}$  激光后,扫描 F-P 干涉仪的透射曲线如图 6(b) 所示,激光器为单纵模运转。与文献[16-18]报道的结果相比,虽然连续波单频激光输出功率提高了 40%,但是激光器转换效率相对较低,这主要是由于单向环形谐振腔中插入的 BIG 磁光晶体具有较大的吸收损耗所致。

图 7 为连续测量 2 h 得到的连续波单频 1.5  $\mu\text{m}$  激光器输出功率的波动曲线。1.5  $\mu\text{m}$  激光在 2 h 内的功率波动小于  $\pm 1.2\%$ 。图 8 是在激光器输出功率为 755 mW 时,分出 10 mW 激光注入平衡探测器进行探测,并由频谱分析仪(SA, N9010A, Agilent 公司)记录的 1.5  $\mu\text{m}$  激光的强度噪声谱。为了精确测量低频处的激光强度噪声特性,频谱分析仪的分辨率带宽(RBW)和视频带宽

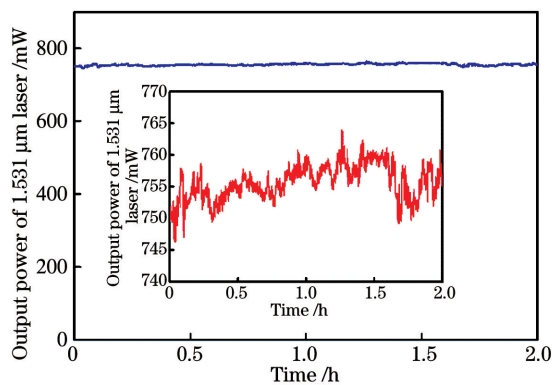


图 7 连续波单频 1.5  $\mu\text{m}$  激光的功率波动曲线

Fig. 7 Power fluctuation of CW single-frequency 1.5  $\mu\text{m}$  laser

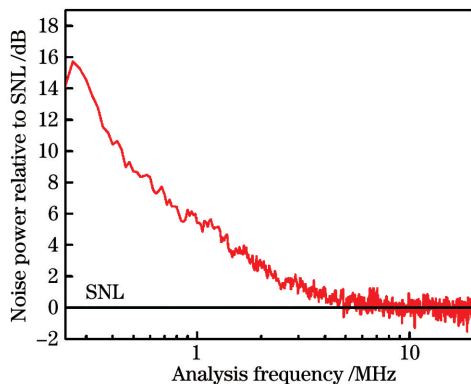


图 8 连续波单频 1.5  $\mu\text{m}$  激光的强度噪声谱

Fig. 8 Measured intensity noise spectrum of CW single-frequency 1.5  $\mu\text{m}$  laser

(VBW)分别设置为 100 kHz 和 100 Hz,扫描时间为 1 ms。可以看到,连续波单频 1.5  $\mu\text{m}$  激光的强度噪声在分析频率大于 5 MHz 的范围内达到散粒噪声极限,在分析频率 260 kHz 附近存在一个远高于散粒噪声极限的弛豫振荡峰。

## 4 结 论

研制了一台 LD 双端端面偏振抽运的低噪声单向行波环形腔连续波单频 1.5  $\mu\text{m}$  激光器。通过精确测量蓝宝石-Er, Yb:YAB-蓝宝石薄片和 BIG 磁光晶体的热透镜焦距,设计了稳定运转的四镜环形谐振腔。通过设计双端面、偏振选择的抽运结构,提高了可注入激光晶体的抽运功率,降低了激光晶体的热效应。在抽运功率为 11.7 W 时,获得的连续波单频 1.5  $\mu\text{m}$  激光功率为 755 mW,2 h 内的功率波动小于  $\pm 1.2\%$ 。利用平衡探测器测量了激光强度噪声,1.5  $\mu\text{m}$  激光的强度噪声在分析频率大于 5 MHz 的范围内达到散粒噪声极限。该光源可用于实用化紧凑型光通信波段压缩态光源和量子纠缠源的制备。下一步,将首先通过使用低掺杂浓度的 Er, Yb:YAB 晶体提高荧光量子效率、降低激光晶体单位体积内的产热量;同时采用多棒谐振腔设计等方法增大吸收泵浦光功率的有效体积,进一步解决谐振腔可注入的泵浦功率受限的问题。其次,通过选择吸收损耗更小的磁光晶体、采用可减小像散的六镜环形谐振腔设计等方法提高激光器的转换效率,实验研制出输出功率大于 1 W 的连续波单频 1.5  $\mu\text{m}$  激光器。

## 参 考 文 献

- [1] Leonardo R C, Martinelli M. Reducing the phase noise in diode lasers [J]. Optics Letters, 2019, 44 (13): 3394-3397.
- [2] Feng J X, Li Y M, Tian X T, et al. Noise suppression, linewidth narrowing of a master oscillator power amplifier at 1.56  $\mu\text{m}$  and the second harmonic generation output at 780 nm [J]. Optics Express, 2008, 16(16): 11871-11877.
- [3] Zhao X, Liu Y, Zhou L, et al. All-normal-dispersion polarization-maintaining Yb-doped fiber laser based on nonlinear amplifying loop mirror [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(5): 0508025. 赵翔, 刘洋, 周廉, 等. 全正色散非线性放大环形镜保偏掺镱光纤激光器 [J]. 中国激光, 2019, 46(5): 0508025.
- [4] Aasi J, Abbott B P, Abbott R, et al. Advanced

- LIGO[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2015, 32: 074001.
- [5] Wehner S, Elkouss D, Hanson R. Quantum internet: a vision for the road ahead [J]. *Science*, 2018, 362(6412): eaam9288.
- [6] Endres M, Bernien H, Keesling A, et al. Atom-by-atom assembly of defect-free one-dimensional cold atom arrays [J]. *Science*, 2016, 354(6315): 1024-1027.
- [7] Chen H F, Tang L, Shi Z Y, et al. ZEMAX simulation method of laser tracing system using a dual-wavelength method to compensate for the refractive index of air [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(1): 0104009.  
陈洪芳, 汤亮, 石照耀, 等. 基于双波长法补偿空气折射率的激光追踪系统 ZEMAX 仿真方法 [J]. *中国激光*, 2019, 46(1): 0104009.
- [8] Chen Y J, Lin Y F, Huang J H, et al. Research progress in 1550-nm all-solid-state lasers based on  $\text{Er}^{3+}$ -doped crystals [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(5): 0500018.  
陈雨金, 林炎富, 黄建华, 等. 基于掺  $\text{Er}^{3+}$  晶体的 1550 nm 波段全固态激光研究进展 [J]. *中国激光*, 2020, 47(5): 0500018.
- [9] Zheng Y H, Li F Q, Zhang K S, et al. Progress of all-solid-state single-frequency lasers [J]. *Chinese Journal of 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.
- [10] Lian Y M, Xie C D, Peng K C. Continuous variable multipartite entanglement and optical implementations of quantum communication networks [J]. *New Journal of Physics*, 2007, 9(9): 314.
- [11] Vahlbruch H, Chelkowski S, Danzmann K, et al. Quantum engineering of squeezed states for quantum communication and metrology [J]. *New Journal of Physics*, 2007, 9(10): 371.
- [12] Feng J X, Tian X T, Li Y M, et al. Generation of a squeezing vacuum at a telecommunication wavelength with periodically poled  $\text{LiNbO}_3$  [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(22): 221102.
- [13] Wan Z J, Feng J X, Li Y J, et al. Comparison of phase quadrature squeezed states generated from degenerate optical parametric amplifiers using PPKTP and PPLN [J]. *Optics Express*, 2018, 26(5): 5531-5540.
- [14] Burns P A, Dawes J M, Dekker P, et al. Optimization of  $\text{Er, Yb:YCOB}$  for CW laser operation [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2004, 40(11): 1575-1582.
- [15] Gorbachenya K N, Kisel V E, Yasukevich A S, et al. Highly efficient continuous-wave diode-pumped  $\text{Er, Yb:GdAl}_3(\text{BO}_3)_4$  laser [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(14): 2446-2448.
- [16] Chen Y J, Hou Q, Huang Y S, et al. Efficient continuous-wave diode-pumped  $\text{Er}^{3+}:\text{Yb}^{3+}$  laser with sapphire cooling at 1.57  $\mu\text{m}$  [J]. *Optics Express*, 2017, 25(16): 19320-19325.
- [17] Chen Y J, Lin Y F, Yang Z M, et al. Eye-safe 1.55  $\mu\text{m}$   $\text{Er:Yb}$  microchip laser [J]. *OSA Continuum*, 2019, 2(1): 142-150.
- [18] Laporta P, Longhi S, Taccheo S, et al. Single-mode CW erbium-ytterbium glass laser at 1.5  $\mu\text{m}$  [J]. *Optics Letters*, 1993, 18(1): 31-33.
- [19] Li Y J, Feng J X, Li P, et al. 400 mW low noise continuous-wave single-frequency  $\text{Er, Yb:YAl}_3(\text{BO}_3)_4$  laser at 1.55  $\mu\text{m}$  [J]. *Optics Express*, 2013, 21(5): 6082-6090.
- [20] Huang J H, Chen Y J, Lin Y F, et al. 940 mW 1564 nm multi-longitudinal-mode and 440 mW 1537 nm single-longitudinal-mode continuous-wave  $\text{Er:Yb}$  microchip lasers [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(8): 1643-1646.
- [21] Zhu H R, Yan L H, Li Y J, et al. 420 mW all solid state continuous wave single frequency tunable laser at 1542 nm [J]. *Journal of Quantum Optics*, 2019, 25(1): 94-99.  
朱海瑞, 闫丽华, 李渊骥, 等. 420 mW 全固态连续单频可调谐 1542 nm 激光器 [J]. *量子光学学报*, 2019, 25(1): 94-99.
- [22] Liu J L, Wang Z Y, Li H, et al. Stable, 12 W, continuous-wave single-frequency  $\text{Nd:YVO}_4$  green laser polarized and dual-end pumped at 880 nm [J]. *Optics Express*, 2011, 19(7): 6777-6782.
- [23] Ma Y Y, Li Y J, Feng J X, et al. High-power stable continuous-wave single-longitudinal-mode  $\text{Nd:YVO}_4$  laser at 1342 nm [J]. *Optics Express*, 2018, 26(2): 1538-1546.
- [24] Gao Y H, Li Y J, Feng J X, et al. Low noise continuous-wave single-frequency dual-wavelength laser operating at 532 nm and 1.06  $\mu\text{m}$  [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(4): 0401005.  
高英豪, 李渊骥, 冯晋霞, 等. 低噪声连续单频 532 nm/1.06  $\mu\text{m}$  双波长激光器 [J]. *中国激光*, 2019, 46(4): 0401005.
- [25] Li Y J. Theoretical and experimental investigations of diode-pumped solid-state laser at 1.5  $\mu\text{m}$  [D]. Taiyuan: Shanxi University, 2013.  
李渊骥. 激光二极管泵浦的 1.5  $\mu\text{m}$  固体激光器的理论和实验研究 [D]. 太原: 山西大学, 2013.
- [26] Song F, Liu S J, Wu Z H, et al. Determination of the thermal loading in laser-diode-pumped erbium-

- ytterbium-codoped phosphate glass microchip laser [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2007, 24(9): 2327-2332.
- [27] Yin Q W, Lu H D, Su J, et al. High power single-frequency and frequency-doubled laser with active compensation for the thermal lens effect of terbium gallium garnet crystal [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(9): 2033-2036.
- [28] Innocenzi M E, Yura H T, Fincher C L, et al. Thermal modeling of continuous-wave end-pumped solid-state lasers [J]. *Applied Physics Letters*, 1990, 56(19): 1831-1833.
- [29] Bachor H A, Ralph T C. A guide to experiments in quantum optics [M]. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2004: 204-205.
- [30] Shi S P, Yang W H, Zheng Y H, et al. Noise analysis of single-frequency laser source in preparation of squeezed-state light field [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(7): 0701009. 史少平, 杨文海, 郑耀辉, 等. 压缩态光场制备中的单频激光源噪声分析 [J]. *中国激光*, 2019, 46(7): 0701009.

## Continuous-Wave Single-Frequency 1.5 $\mu\text{m}$ Laser Based on All-Solid-State Unidirectional Traveling-Wave Ring Cavity

Yao Zijian<sup>1</sup>, Li Yuanji<sup>1,2</sup>, Song Zheng<sup>1</sup>, Feng Jinxia<sup>1,2</sup>, Zhang Kuanshou<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China;

<sup>2</sup>Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China

### Abstract

**Objective** High power and low noise continuous-wave (CW) single-frequency all-solid-state lasers at 1.5  $\mu\text{m}$  have important applications in laser interferometry, coherent Doppler lidar, optical frequency standard, cold atom physics, continuous variable (CV) quantum information, and basic research of quantum optics. 1.5  $\mu\text{m}$  lasers with power more than 500 mW and an intensity noise spectrum down to the shot-noise limit are indispensable in the development of telecom band quantum light sources, e. g., CV entangled states. The diode-pumped all-solid-state CW single-frequency 1.5  $\mu\text{m}$  lasers were mainly developed using the  $\text{Er}^{3+}$  and  $\text{Yb}^{3+}$  co-doped gain mediums and the longitudinal mode selection techniques, such as intracavity etalon, microchip cavity, or twisted-mode cavity. This kind of laser suffers from the relatively low thermal fracture threshold and significant thermal-induced depolarization, and the deterioration of beam quality and longitudinal mode structure. There is no report on a CW single-frequency all-solid-state laser at 1.5  $\mu\text{m}$  providing low noise output more than 500 mW.

**Methods** To achieve high power CW single-frequency laser operation at 1.5  $\mu\text{m}$ , the heat deposition inside the gain medium was firstly reduced by a dual-end face-cooling scheme, i. e., using two polished sapphire plates acting as transparent heat spreaders to improve the axial heat conduction in the Er, Yb:YAB crystal. Secondly, to realize a relatively homogeneous distribution of pump absorption inside the gain medium, and to raise the maximum permitted incident pump power and achieve the best mode-matching, a long depth-of-focus polarized dual-end-pump structure was employed (Fig. 1, Fig. 2). Finally, two additional half-wave plates were used to control the pump polarization. Due to the dependence of absorption on the polarization, the pump power axial absorption can be tuned to be more uniform, and the pump saturation effect can be prevented.

The designed ring resonator was based on the precise measurements of the thermal focal lengths of both the laser crystal and the bismuth iron garnet (BIG) magneto-optical crystal. The former was measured using a knife method, and the latter was measured based on the theoretical analysis of the resonator's dynamical behaviors depending on the varied thermal focal length of the BIG crystal. Considering the thermal lens of the laser and BIG crystals, the resonator length was optimized by balancing the thermal insensitive region, the mode-matching between the laser and pump beams, and astigmatism (Fig. 5). Figure 1 shows the resonator design of the CW single-frequency 1.5  $\mu\text{m}$  laser based on unidirectional traveling-wave ring cavity.

Compared with the single-end face-cooled Er, Yb:YAB crystal under  $\sigma$ -polarization single-end-pumping, the dual-end face-cooling scheme combined with the long depth-of-focus tunable polarization dual-end-pump structure reduced



the thermal lens effect of the laser crystal significantly. The thermal focal length of Er, Yb: YAB crystal was lengthened from 45 to 78.2 mm under 4.5 W pumping after the optimizations (Fig. 3). Besides, the functional relationship between the intracavity laser power and the thermal focal length of the BIG crystal was experimentally determined [Figs. 4(a) and (b)]. It can be found that the BIG crystal thermal effect was severe, and the thermal focal length was only 58 mm in the case of 25.3 W intracavity laser power. Based on the developments of the cooling and pumping schemes, using the measured thermal focal lengths to optimized the resonator length, 755 mW CW single-frequency 1.5  $\mu\text{m}$  laser was generated from the ring cavity [Figs. 6(a) and (b)], and the power fluctuation within 2 hours was less than  $\pm 1.2\%$  (Fig. 7). The intensity noise of the 1.5  $\mu\text{m}$  laser was measured using a balanced homodyne detection system. The intensity noise reached the shot-noise limit for frequencies above 5 MHz (Fig. 8).

**Results and Conclusions** A low noise CW single-frequency 1.5  $\mu\text{m}$  laser based on Er, Yb: YAB crystal and unidirectional traveling-wave ring cavity was demonstrated. By measuring the thermal focal lengths of the sapphire-Er, Yb: YAB-sapphire laser crystal and the BIG magneto-optic crystal, as well as adopting the long depth-of-focus tunable polarization dual-end-pump structure to reduce the thermal effects of laser crystal and raise the maximum permitted incident pump power, CW single-frequency 1.5  $\mu\text{m}$  laser was realized using the unidirectional traveling-wave cavity technique. The laser power was scaled up to 755 mW with the power fluctuation less than  $\pm 1.2\%$ , and the laser intensity noise reached the shot-noise limit beyond the analysis frequency of 5 MHz. This laser source can be used to generate a CV entangled light source in the telecom band. The power of the CW single-frequency 1.5  $\mu\text{m}$  laser can be further scaled up by employing low-doped Er, Yb: YAB crystal as the gain medium, using the magneto-optical crystals with lower absorption loss, as well as designing a 6-mirror ring cavity with weaker astigmatism.

**Key words** lasers; 1.5  $\mu\text{m}$  laser; continuous wave single-frequency; unidirectional traveling-wave ring cavity; low intensity noise

**OCIS codes** 140.3480; 140.3570; 140.3580; 140.6810