

# 高效率连续半导体抽运开环互易式全息光栅 Nd:YVO<sub>4</sub>板条激光器

孙 哲 李 强 程秋桐 姜梦华 雷 旬 惠勇凌

(北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124)

**摘要** 报道了一种采用开环互易式激光谐振腔形成动态全息光栅, 半导体巴条侧面抽运自适应 Nd:YVO<sub>4</sub> 板条激光器。实验研究了互易式全息光栅激光器输出激光的平均功率、光光转换效率、纵模以及其它特性, 并与类似结构传统激光振荡器输出的纵模进行对比。实验确定了开环互易式激光谐振腔内存在全息光栅, 对激光输出横模和纵模进行了调制。基于互易式激光谐振腔, 最终获得了平均功率 18.25 W, 光束质量  $M^2 < 1.2$ , 消光比大于 1000:1, 光光转换效率 48% 的高效率连续激光输出。

**关键词** 激光器; 非线性光学; 光栅; 半导体抽运; 自适应

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0702003

## Efficient Continuous Diode-Pumped Nd:YVO<sub>4</sub> Slab Laser with an Opened-Loop Reciprocal Dynamic Holographic Cavity

Sun Zhe Li Qiang Cheng Qitong Jiang Menghua Lei Hong Hui Yongling

(Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract** A self-adaptive laser based on a diode bar side pumped Nd:YVO<sub>4</sub> slab with opened-loop reciprocal cavity completed by dynamic holographic gratings is created. The output power, optical-to-optical efficiency, frequency spectrum and spatial characteristics of the generated beam are examined. Compared with similar structure of traditional laser oscillator, the holographic gratings are exist in the opened-loop reciprocal cavity and the obvious modulation of the transverse mode and longitudinal mode is observed. A high spatial quality beam ( $M^2 < 1.2$ ) with up to 18.25 W average power, 48% optical-to-optical efficiency, and 1000:1 extinction ratio is obtained.

**Key words** lasers; nonlinear optics; gratings; diode-pumped; self-adaptive

**OCIS codes** 140.3480; 140.3580; 190.2055; 190.4223; 190.4380

## 1 引 言

在高功率运转的激光器中, 激光晶体的热畸变是影响光束质量的重要因素。随着激光器抽运功率的增加, 激光晶体内的热效应将导致热致双折射和热透镜效应, 使激光器的基模(TEM<sub>00</sub>)输出功率和光束质量大幅度下降。为了克服热畸变对输出激光的影响, 通常采用的方法是使用相位共轭镜和衍射光学器件<sup>[1-5]</sup>。但是, 这类方法仅对于静态热畸变有效, 对抽运功率波动以及其他原因造成的动态热畸变则无能为力, 同时这类方法需要加入较为复杂

的额外光学元件。

由于非线性光学共轭技术能够补偿热畸变, 维持高质量光束, 近年来, 基于全息光栅的激光器具有自适应特性, 激光光束参数能够实现动态控制, 并产生光学位相共轭激光输出, 因此成为一个非常具有前景的研究领域<sup>[6-9]</sup>。目前, 在腔内加入非互易透射元件的全息光栅自适应激光器, 已经实现了脉冲能量大于 100 mJ, 脉宽 20 ns, 重复频率 100 Hz 的单纵模、高光束质量激光输出。该结构激光谐振腔产生的全息光栅, 可以由腔内自发辐射场产生空间

收稿日期: 2013-11-18; 收到修改稿日期: 2014-01-20

基金项目: 国家自然科学基金(61378023)、北京市自然科学基金(4112005)

作者简介: 孙 哲(1986—), 男, 博士研究生, 主要从事全固态激光器方面的研究。E-mail: allen-sun@emails.bjut.edu.cn

导师简介: 李 强(1965—), 男, 博士, 教授, 主要从事全固态激光器方面的研究。E-mail: ncltlq@bjut.edu.cn

烧孔效应,进而产生的增益光栅进行解释。对于非互易式全息光栅自适应激光器,为了使产生的光栅具有较深的调制度,提高衍射效率,在腔内加入了非互易透射元件,对写入光栅光束的能量大小进行控制,并补偿 $\pi$ 的相移。尽管采用该方法能够实现稳定的单纵模、高光束质量、被动调Q激光输出,但是光光转换效率较低,只有5.3%<sup>[10]</sup>。

为了获得更高的光光转换效率,同时获得高光束质量、单纵模、被动调Q输出激光,国外研究人员基于互易式激光谐振腔做了大量的研究。互易式激光谐振腔采用自相交环形结构,由光束相干产生干涉场,进一步形成动态全息光栅。自1996年开始, Antipov等<sup>[11-14]</sup>针对开环互易式激光器进行了大量的理论和实验研究。2004年,采用半导体连续抽运,实现了连续功率9.6 W,光光转换效率32%,光束质量 $M^2 < 1.2$ 的激光输出<sup>[15]</sup>;采用半导体脉冲抽运,能量10 mJ,重复频率500 Hz,光光转换效率15%的激光输出<sup>[16]</sup>。2012年, Jabczynski等<sup>[17]</sup>,采用闭环互易式激光谐振腔结构,采用半导体堆栈脉冲抽运,获得了能量250 mJ,重复频率25 Hz,光光转换效率30%,光束质量 $M^2 < 1.4$ 的激光输出。尽管对于互易式自适应激光器的理论和实验研究有了极大的进展,但是仍未实现单纵模被动调Q激光输出,并且对于激光产生机理仍存在一定的争议。目前认为,其基本原理是由自发辐射产生的光束相干形成干涉场,进一步形成反转粒子数分布光栅,并伴

随形成折射率光栅和增益光栅,其中折射率光栅起主要作用<sup>[13-14]</sup>。

本文基于开环互易式激光谐振腔结构,采用半导体巴条抽运 Nd:YVO<sub>4</sub>板条,获得了高效率、高光束质量、高消光比的连续激光输出,并对输出激光的纵模模式进行了研究。目前,国内在这方面的研究还没有报道。

## 2 实验结构

半导体侧面抽运开环互易式全息光栅 Nd:YVO<sub>4</sub>板条激光器如图1所示,实验采用沿 $a$ 轴切割,掺杂浓度(原子数分数)为1.0%,尺寸为1.5 mm×5 mm×20 mm的 Nd:YVO<sub>4</sub>晶体,晶体两侧的通光面镀有1064 nm增透膜,并切角5°。晶体下表面(1.5 mm×20 mm)为抽运光通光面,镀有808 nm增透膜,晶体的两个大面(5 mm×20 mm)采用铜热沉冷却。抽运源为传导冷却(CS)封装的半导体巴条,最大连续抽运功率40 W,抽运波长808 nm,抽运偏振方向为半导体巴条的快轴方向,即沿晶体 $c$ 轴方向。采用焦距为12.7 mm的柱透镜 VCL<sub>3</sub>沿半导体巴条的快轴方向对抽运光进行压缩整形,由于 Nd:YVO<sub>4</sub>晶体沿 $c$ 轴方向对808 nm的偏振抽运光具有很大的吸收系数(约30 cm<sup>-1</sup>),因此晶体内的增益区域( $x \times y \times z$ )约为14 mm×300  $\mu$ m×100  $\mu$ m。互易式激光谐振腔内,采用焦距为50 mm的柱面镜 VCL<sub>1</sub>和 VCL<sub>2</sub>来匹配增益区域的模体积。

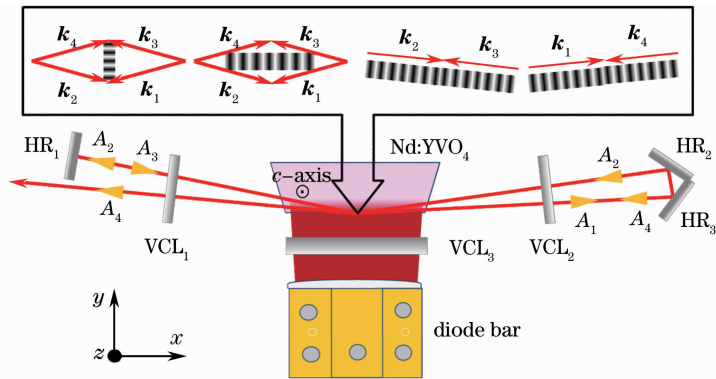


图1 半导体抽运开环互易式 Nd:YVO<sub>4</sub>激光器示意图

Fig. 1 Schematic of diode-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> laser with an opened-loop reciprocal cavity

实验中,互易式全息光栅 Nd:YVO<sub>4</sub>板条激光器采用掠入射结构,光束在 Nd:YVO<sub>4</sub>晶体下表面(1.5 mm×20 mm)进行内全反射,在匹配增益区域模体积的同时,能够补偿 $y$ 方向的热透镜效应。在条件允许的情况下,为获得更高的增益,掠入射角应尽量小。互易式激光谐振腔内,相交光束的夹角通

常小于5°<sup>[15]</sup>,当光束两两相交产生干涉场,进一步形成反转粒子数分布光栅,就能够获得高功率、高光束质量、高光光转换效率和高消光比的激光输出。

## 3 实验结果及分析

在如图1的实验结构下,当腔内相交光束夹角

为 3°, 掠入射角约为 6° 时, 改变抽运功率, 获得输出功率及光光转换效率的变化规律, 如图 2 所示。在半导体抽运功率为 38 W 时, 获得了最大平均功率 18.25 W 的激光输出, 此时对应最大的光光转换效率为 48%。在输出功率最大时, 测量输出激光的光束质量,  $M^2 < 1.2$ , 如图 3 所示, 图中所示光斑为激光远场光斑形状。由于增益介质 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体为单轴晶体, 并且板条结构的热退偏很小, 因此获得了消光比大于 1000:1 的线偏振激光输出, 实验使用偏振分光棱镜对输出激光消光比进行测量。

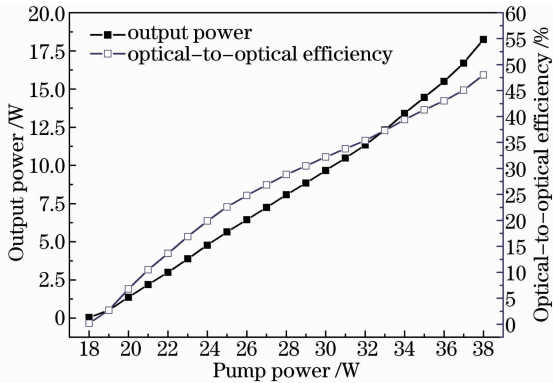


图 2 输出功率和光光转换效率随抽运功率变化规律  
Fig. 2 Output power and optical-to-optical efficiency versus pump power

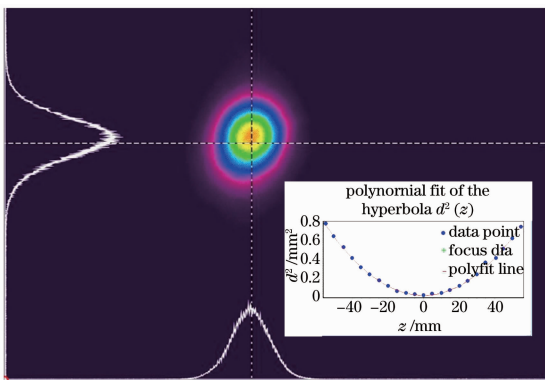


图 3 输出激光的远场光斑及光束质量  $M^2$  测量  
Fig. 3 Beam propagation and far-field pattern of the output laser

为实现激光振荡运行, 全息光栅必须通过从强光到弱光的能量转移, 提供对激光光束的正反馈。在 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体中, 光束通过这种非线性几何结构, 形成两波混频和四波混频的相互作用, 产生了不只一种光栅, 这些光栅都对谐振腔形成有作用。因此在该结构下, 对激光光束产生条件的分析将更加复杂, 目前对它的分析仍然处于研究阶段。

国外理论及实验研究已经证明, 产生的激光光束并不是放大的自发辐射<sup>[11]</sup>。如图 1 所示, 光束

$A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$  和  $A_4$  由放大的自发辐射(ASE)开始, 彼此间能够发生干涉, 由干涉场产生反转粒子数分布光栅, Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体中粒子数光栅伴随产生增益光栅和折射率光栅。已有研究表明, 折射率光栅的衍射效率是增益光栅的 1.5~2 倍, 因此折射率光栅在谐振腔内对激光产生起主要作用<sup>[18-19]</sup>。其中, 折射率光栅在互易式全息光栅激光谐振腔中, 由激发和未激发 Nd<sup>3+</sup> 粒子的极化率之差产生。由于腔内产生的光束存在频率失谐, 并在折射率光栅和光束之间产生了  $\pi/2$  的相移, 因此在这种互易式结构中产生的全息光栅被解释为一种移动的折射率光栅。

由于折射率光栅中反射出的强光能够为弱光提供额外的放大, 并伴随着频率失谐, 其中, 频率失谐量最小的弱光增强后, 将使得光束之间的干涉场增强, 进一步导致折射率光栅增强。随着折射率光栅与光束之间的自洽增强, 能够实现对激光光束的正反馈后, 开始产生自适应激光输出。根据  $\Lambda \approx \lambda_0 / \theta$  可知, 光栅周期与激光波长  $\lambda_0$  和腔内相交光束夹角  $\theta$  有关, 因此在光栅形成过程中, 激光阈值与腔内相交光束夹角  $\theta$  有关。

在增益介质中, 由于弱光与强光的非线性相互作用, 当弱光被放大时, 折射率光栅将引起非线性效应, 产生非线性镜<sup>[19]</sup>, 因此互易式激光谐振腔能够自适应由热效应或其它因素引起的畸变, 获得高光束质量的激光输出。

激光谐振腔的纵模间隔可以近似表示为<sup>[20]</sup>

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_0^2}{2L},$$

式中  $\lambda_0$  为激光中心波长,  $L$  表示光学腔长。对于互易式全息光栅激光谐振腔, 其光学腔长  $L = (L_1 + 2L_2)$ ,  $L_1$  为图 1 中左侧全反镜到 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的光学腔长,  $L_2$  为图 1 中右侧 45° 全反镜到 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的光学腔长。实验中  $L_1$  和  $L_2$  长度均为

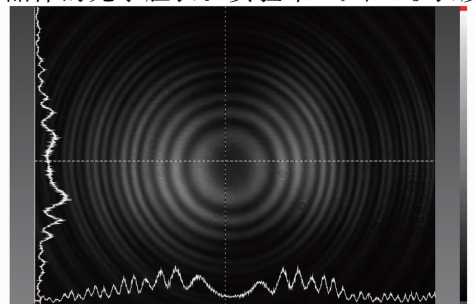


图 4 高功率运行时输出激光光谱图  
Fig. 4 Spectra of generated beam far from oscillation threshold

100 mm(由于晶体长度相对较短,这里计算忽略),经计算可知纵模间隔  $\Delta\lambda\approx 0.00189$  nm。实验采用表面反射率 94%,自由光谱范围为 10 pm,分辨率 0.2 pm,直径 20 mm 的法布里-珀罗(Fabry-Perot)标准具,对输出激光的纵模进行了测量,如图 4 所示。从图中可以看出,输出激光在高功率时,输出激光只存在 3 个纵模。这是由于谐振腔内存在增益,形成了光栅,对纵模具有一定的选择性。

为了对这种互易式激光器的优势进行比较,在激光输出端加入了对 1064 nm 激光透射率为 50% 的平面镜,构成激光振荡器。此时由于激光输出端存在一定的反馈,因此该结构的激光振荡器为传统的自由振荡激光器。此时,其光学腔长  $L'=2(L_1+L_2)$ ,对应的纵模间隔  $\Delta\lambda'\approx 0.00142$  nm,与互易式全息光栅激光谐振腔的纵模间隔差别不大。在相同的条件下,对此时输出激光的纵模和远场光斑进行了测量,如图 5 所示。从图中可以看出,此时的输出激光包含大量的纵模,并且其纵模间隔与互易式全息光栅激光谐振腔相比明显减小。同时,对比图 3 可以发现,输出激光同一位置处的远场光斑变差,光束质量明显下降。由此说明,互易式全息光栅激光谐振腔中,所形成的光栅具有模式选择特性,具有一定的调制深度,能够获得基横模输出,并明显减小纵模带宽和纵模数量。

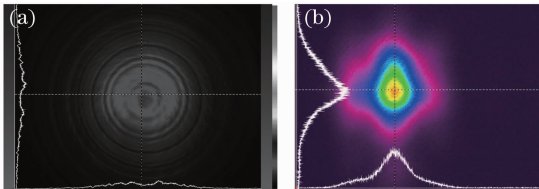


图 5 自由振荡激光光谱图(a)及远场光斑(b)  
Fig. 5 Spectra (a) and far-field pattern (b) of free-running output laser

## 4 结 论

报道了一种开环互易式全息光栅半导体抽运自适应 Nd:YVO<sub>4</sub> 板条激光器,实验研究了该激光器输出激光的平均功率、光光转换效率、纵模、光束质量和偏振特性,并与相同结构下的传统激光器进行了实验对比,实验结果说明,采用互易式全息光栅激光谐振腔,是一种获得高光束质量和高光光转换效率激光输出的有效途径。实验最终获得了平均功率 18.25 W,光束质量  $M^2 < 1.2$ ,消光比大于 1000:1,光光转换效率 48% 的连续激光输出。在下一步的研究工作中,会针对产生光栅的机理及特性进行研究,增

加光栅的调制深度,最终实现单纵模激光输出。

## 参 考 文 献

- 1 Wang Yulei, Lü Zhiwei, He Weiming, *et al.*. Investigation on a high energy stimulated Brillouin scattering phase-conjugate mirror [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56(2): 883-888.  
王雨雷, 吕志伟, 何伟明, 等. 一种大能量受激布里渊散射相位共轭镜的研究[J]. *物理学报*, 2007, 56(2): 883-888.
- 2 Li Jie, Chen Haiqing, Wu Peng. Closed-loop adaptive compensation for thermally induced aberration laser beams[J]. *Chinese J Lasers*, 2006, 33(12): 1605-1608.  
李捷, 陈海清, 吴鹏. 热畸变激光光束的闭环自适应补偿[J]. *中国激光*, 2006, 33(12): 1605-1608.
- 3 Zhao Zhigang, Cui Lingling, Dong Lixin, *et al.*. All-solid-state high pulse repetition rate high pulse energy single-longitudinal-mode MOPA laser system with solid-state phase conjugating mirror[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(12): 2950-2953.  
赵智刚, 崔玲玲, 董立新, 等. 带固体相位共轭镜的全固态脉冲抽运高重复频率大能量单纵模 MOPA 激光器[J]. *中国激光*, 2010, 37(12): 2950-2953.
- 4 Chen Jinbao, Guo Shaofeng. Review on technical approaches of high energy solid-state lasers[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(6): 0602006.  
陈金宝, 郭少锋. 高能固态激光器技术路线分析[J]. *中国激光*, 2013, 40(6): 0602006.
- 5 He Bing, Zhou Jun, Liu Houkang, *et al.*. Study on characteristics of passive coherent beam combination with all-optical feedback loop [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(6): 0601001.  
何兵, 周军, 刘厚康, 等. 复合环形腔被动相干合成技术重要特性研究[J]. *中国激光*, 2013, 40(6): 0601001.
- 6 R P M Green, G J Crofts, M J Damzen. Holographic laser resonators in Nd:YAG[J]. *Opt Lett*, 1994, 19(6): 393-395.
- 7 R P M Green, D Udaiyan, G J Crofts, *et al.*. Holographic laser oscillator which adaptively corrects for polarization and phase distortions[J]. *Phys Rev Lett*, 1996, 77(7): 3533-3536.
- 8 Benjamin A Thompson, Ara Minassian, Robert W Eason, *et al.*. Efficient operation of a solid-state adaptive laser oscillator[J]. *Appl Opt*, 2002, 41(27): 5638-5644.
- 9 R Elsner, R Ullmann, A Heuer, *et al.*. Two-dimensional modeling of transient gain gratings in saturable gain media[J]. *Opt Express*, 2012, 20(7): 6887-6896.
- 10 R Soulard, A Brignon, S Raby, *et al.*. Diode-pumped Nd:YAG self-adaptive resonator with a high-gain amplifier operating at 100 Hz[J]. *Appl Phys B*, 2012, 106(2): 295-300.
- 11 O L Antipov, A S Kuzhelev, V A Vorob'yov, *et al.*. Pulse repetitive Nd:YAG laser with distributed feedback by self-induced population grating[J]. *Opt Commun*, 1998, 152(4): 313-318.
- 12 O L Antipov, A S Kuzhelev, D V Chausov, *et al.*. Dynamics of refractive index changes in a Nd:YAG laser crystal under Nd<sup>3+</sup> ions excitation[J]. *J Opt Soc Am B*, 1999, 16(7): 1072-1079.
- 13 O L Antipov, A S Kuzhelev, D V Chausov. Formation of dynamic cavity in a self-starting high-average-power Nd:YAG laser oscillator[J]. *Opt Express*, 1999, 5(12): 286-291.
- 14 O L Antipov, O N Eremeykin, A P Savikin, *et al.*. Electronic changes of refractive index in intensively pumped Nd:YAG laser crystals[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 2003, 39(7): 910-918.
- 15 O N Eremeykin, O L Antipov, A Minassian, *et al.*. Efficient continuous-wave generation in a self-organizing diode-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> laser with a reciprocal dynamic holographic cavity[J]. *Opt Lett*, 2004, 29(20): 2390-2392.
- 16 O L Antipov, O N Eremeykin, A V Ievlev, *et al.*. Diode-pumped Nd:YAG laser with reciprocal dynamic holographic cavity[J]. *Opt Express*, 2004, 12(18): 4313-4319.
- 17 W Zendzian, J K Jabczynski, M Kaskow, *et al.*. 250 mJ, self-



adaptive, diode-side-pumped Nd:YAG slab laser[J]. Opt Lett, 2012, 37(13): 2598–2600.

18 O L Antipov, A S Kuzhelev, D V Chausov. Nondegenerate four-wave-mixing measurements of a resonantly induced refractive-index grating in a Nd:YAG amplifier[J]. Opt Lett, 1998, 23(6): 448–450.

19 O L Antipov, S I Belyaev, A S Kuzhelev. Stimulated resonance scattering of light waves in laser crystals with a population inversion[J]. J Exp Theor Phys Lett, 1996, 63(1): 13–19.

20 W Koehner. Solid-state laser engineering [M]. 5th ed., Springer, 1999. 172–175.

栏目编辑: 宋梅梅

## 2 μm 短腔硝酸盐玻璃光纤窄线宽激光器及其输出性能

人眼安全的 2 μm 激光在遥感、生物医疗等领域具有重要的应用。2 μm 单频光纤激光器线宽窄、相干长度长、波长可调谐且结构紧凑、设备可靠耐用,受到了研究人员的广泛关注。采用短腔结构,加大纵模间隔,保证激光器无跳模运转,是实现单频光纤激光的有效途径。传统的稀土掺杂石英光纤由于本身玻璃网络结构的原因,稀土离子溶解度较低,短腔结构难以获得足够的增益。而多组分玻璃,由于无定形的玻璃网络结构,稀土离子掺杂浓度可以比石英光纤高 1~2 个数量级,因此基于高浓度稀土离子掺杂的多组分玻璃单频光纤激光器已成为 2 μm 光纤激光器领域的研究热点。

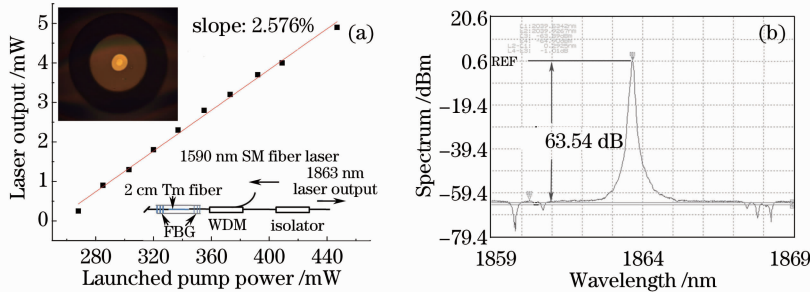


图 1 (a) 激光输出功率随抽运功率的变化,插图为增益光纤端面 and 激光器结构示意图;(b)激光输出光谱

Fig. 1 (a) Laser output as a function of launched power. Insets, microscopic image of the active fiber and DBR laser setup; (b) output laser spectrum

峰值反射率约为 60%, 3 dB 带宽约为 0.15 nm, 栅区长度约为 1 cm, 激光器有效腔长约为 3 cm。光纤光栅刻写在普通的石英光纤上,将硝酸盐玻璃光纤装入陶瓷插芯采用物理对接的方式组装谐振腔。自制 1590 nm 掺铊单模光纤激光作同带抽运源,经 1590/1900 nm 波分复用器(WDM)反向抽运,最大抽运功率为 500 mW。图 1(a)为激光器的输出功率随抽运功率的变化曲线,激光器的抽运阈值约为 270 mW,在 450 mW 抽运功率下,激光器的最大输出功率为 5 mW,斜率效率约为 2.576%。激光器较高的阈值和较低的斜率效率源于增益光纤较低的同轴度,如图 1(a)中插图所示。较低的同轴度一方面降低了抽运耦合效率,另一方面增加了谐振腔单程损耗。图 1(b)为激光器最大输出功率时的激光光谱图,中心波长为 1863.66 nm,边模抑制比为 63.54 dB。

图 2 为采用光纤迈克耳孙干涉仪测量的该 DBR 激光器频率噪声图,干涉仪两臂长度差 15 m,同时给出了实验室 1.5 μm 波段两个已知线宽单频激光器的频率噪声。低频段 DBR 激光器的频率噪声相对较高,高频段该激光器的频率噪声和 1535 nm 激光器的频率噪声基本处于同一水平,均比 1550 nm 窄线宽单频激光器高 16 dB 左右。据此可知,该 DBR 激光器的线宽应与 1535 nm 激光器的线宽相当或略高,约为 5 kHz。

该 DBR 激光器实现 2 μm 波段线宽约 5 kHz 的窄线宽全光纤激光输出。在此基础上,将进一步优化增益光纤,改善抽运源和谐振腔的稳定性,并采用保偏光纤光栅以实现高功率线偏振单频激光输出。

张 磊 潘政清 李科峰 叶 青 蔡海文 胡丽丽

(中国科学院上海光学精密机械研究所,上海 201800)

\* E-mail: kfli@siom.ac.cn

收稿日期: 2014-06-19; 收到修改稿日期: 2014-06-25

近年来,本课题组致力于高浓度稀土掺杂多组分玻璃光纤的研究,并在铊掺杂的多组分硝酸盐玻璃光纤中取得突破。基于该光纤制作了与普通石英光纤模场直径匹配的单模(SM)光纤,以该光纤为增益介质,初步研制了超短直线腔分布布拉格反射(DBR)结构的窄线宽全光纤激光器。

用 2 cm 铊掺杂硝酸盐玻璃光纤作为增益介质构建了一个 DBR 激光器,如图 1(a)中插图所示。光栅的中心波长为 1863.66 nm,高反光栅峰值反射率大于 99%,3 dB 带宽约为 0.8 nm,低反光栅

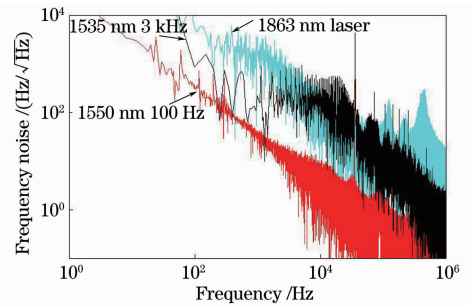


图 2 1863 nm DBR 激光器频率噪声谱和两个已知线宽(1535 nm 3 kHz, 1550 nm 100 Hz)激光器的频率噪声谱

Fig. 2 Frequency noise spectra of the 1863 nm DBR laser and two reference lasers at 1535 nm and 1550 nm with line-width of 3 kHz and 100 Hz, respectively