

基于高掺 Yb^{3+} 磷酸盐光纤的 1080 nm 短腔单频 光纤激光器

张伟南 李 灿 冯洲明 杨昌盛 徐善辉* 杨中民

(华南理工大学光通信材料研究所发光材料与器件国家重点实验室, 广东 广州 510640)

摘要 报道了一种输出波长为 1080 nm 的分布布拉格(Bragg)反射(DBR)短腔单频光纤激光器。该激光器采用 1.4 cm 长的自制高掺 Yb^{3+} 磷酸盐玻璃光纤作为激光介质。最大输出功率达到 90 mW, 斜率效率为 36.6%, 1 h 内功率抖动小于 0.05%, 边模抑制比达到 69 dB, 线宽小于 10 kHz。在大于 2 MHz 高频段, 相对强度噪声值小于 -120 dB/Hz。

关键词 光纤光学; 单频; 磷酸盐光纤; Yb^{3+} 离子; 短腔分布布拉格反射结构

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP49.100601

Short Cavity Single Frequency Fiber Laser at 1080 nm Based on Highly Yb^{3+} -Doped Phosphate Fiber

Zhang Weinan Li Can Feng Zhouming Yang Changsheng
Xu Shanhui Yang Zhongmin

(State Key Laboratory of Luminescent Materials and Devices, Institute of Optical Communication Materials,
South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China)

Abstract A 1080 nm single frequency fiber laser with a short distributed Bragg reflector (DBR) structure based on a 1.4 cm highly Yb^{3+} -doped phosphate glass fiber is reported. The maximum output power of 90 mW and the slope efficiency of 36.6% are obtained. The output power instability in one hour is less than 0.05%. The side mode suppression ratio (SMSR) is higher than 69 dB and the measured linewidth is less than 10 kHz. The relative intensity noise is less than -120 dB/Hz for frequencies over 2 MHz.

Key words fiber optics; single-frequency; phosphate fiber; Yb^{3+} ions; short-cavity distributed Bragg reflector configuration

OCIS codes 060.2280; 060.3735; 140.3615

1 引 言

Yb^{3+} 掺杂光纤激光器因其具有吸收光谱宽、转换效率高、激光亚稳态寿命长以及简单的能级结构(不存在上转换效应)等优点, 而成为近 10 年来的研究热点并在高功率激光加工、相干合成等领域得到了广泛的应用^[1~4]。在激光光谱学及高精度相干探测等实际应用领域中, 则要求激光光源具有单频运转、极窄线宽(千赫兹量级)和低噪声等特征。目前, 实现单频光纤激光输出的方法主要有环形腔技术和线形腔技术。环形腔技术结构比较复杂, 不便于集成, 而且容易存在跳模现象, 很难以某一特定纵模稳定运转^[5]。而线形腔技术, 包括分布布拉格(Bragg)反射(DBR)结构和分布反馈(DFB)结构, 自 1991 年 Ball 等^[6]首次采用光纤 Bragg

收稿日期: 2012-06-12; 收到修改稿日期: 2012-07-05; 网络出版日期: 2012-08-20

基金项目: 国家 863 计划(2011AA030203), 国家自然科学基金(11174085, U0934001, 60977060), 粤港招标项目(TC10BH07-1), 广东省科技计划(2009A090100044, 2009B091300127, cgzhd0903, 2011B090400055)和中央高校基本科研业务费专项资金(2012ZZ0002, 2009ZZ0054)资助课题。

作者简介: 张伟南(1954—), 男, 实验师, 主要从事光纤激光材料及器件方面的研究。E-mail: wnzhang@scut.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: flxshy@scut.edu.cn

光栅作为反射腔镜在掺铈石英光纤中实现 1550 nm 的单频激光输出以来,一直是研究的热点^[7,8]。其中DFB结构是直接刻写在掺杂光纤上刻写相移 Bragg 光栅,以一个光栅来实现光反馈和波长选择,从而避免了光栅的精确匹配性问题与光栅和掺杂光纤的熔接损耗。但是掺杂光纤在紫外线照射下进行光栅制作时会使增益介质性能劣化,进而影响激光噪声和输出功率特性,同时掺杂光纤相移光栅的结构也限制了其最高输出功率。DBR 结构采用预先刻制的石英光纤光栅与一小段掺杂石英光纤熔接的方案,构成一个短法布里-珀罗(F-P)谐振腔,通过窄带光栅光谱及腔长决定的纵模模式来实现单一纵模激光输出。该结构避免了直接在增益介质上刻写光纤,激光器的噪声水平更低。然而,短腔长虽然有利于实现稳定的单纵模运转,但是,要得到高功率单频激光输出,除了可以有限增加腔长外,就必须提高光纤介质中稀土离子的掺杂浓度以增加光纤的增益系数。

在课题组的前期工作中,在长度仅为 0.8 cm 的掺 Yb^{3+} 磷酸盐光纤中实现了激光功率高于 400 mW 的 1.06 μm 单频输出^[9]。本文在此基础上,立足于 1080 nm Yb^{3+} 掺杂光纤激光器倍频后在可见光波段的重要应用^[10],分析并实现了工作波长为 1080 nm 的掺 Yb^{3+} 磷酸盐短腔单频光纤激光输出。

2 实验装置

1080 nm 单频光纤激光器的实验装置如图 1 所示。其中,掺 Yb^{3+} 磷酸盐光纤是采用管棒法先制作光纤预制棒,并将其在光纤拉丝塔上拉制完成。其具体的技术指标及相关性能参数可参考文献^[11]。由于掺 Yb^{3+} 磷酸盐光纤在 1080 nm 波段的辐射截面很小^[12],因此在原有的工作基础上^[9],我们进一步将 Yb^{3+} 掺杂浓度提高到 18.3% 质量分数。同时,所使用的磷酸盐光纤长度也由 0.8 cm 增加到 1.4 cm,提高了谐振腔内总的增益系数。激光腔是由磷酸盐玻璃光纤、窄带光纤 Bragg 光栅(NB-FBG)及宽带光纤 Bragg 光栅(BB-FBG)组成。其中 NB-FBG 的中心反射波长是 1080.15 nm,其反射率为 60%,3 dB 带宽为 0.06 nm;BB-FBG 的中心反射波长是 1080.10 nm,其反射率大于 99.5%,3 dB 带宽为 0.4 nm。两个光栅分别与增益光纤两端通过熔接相连,其有效谐振腔长约为 2 cm^[13],对应的激光纵模间隔为 5.2 GHz。而 NB-FBG 的反射带宽为 15.4 GHz,这表明要获得稳定的单模运转还必须采取严格的温控措施。整个激光腔封装于铜管中并通过精度为 0.1 $^{\circ}\text{C}$ 的温控系统来实现单一纵模输出及保持其频率的稳定。976 nm LD 激发的抽运光通过 980/1080 nm 波分复用器(WDM)耦合进激光腔,对 Yb^{3+} 掺杂的磷酸盐光纤进行抽运,产生的激光通过 NB-FBG 耦合输出,并经由 WDM 及 1080 nm 隔离器输出。

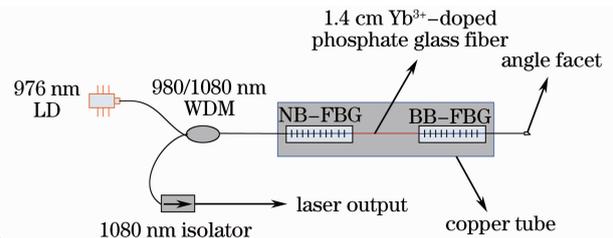


图 1 1080 nm 光纤激光器的实验装置

Fig. 1 Experimental setup of the 1080 nm fiber laser

3 实验结果及分析

激光输出的功率随抽运光功率变化的曲线如图 2 所示。其阈值功率约为 40 mW,当抽运功率大于阈值功率时,激光输出功率随抽运功率近似线性增加。当抽运功率为 275 mW 时,输出功率达到了 90 mW。输出功率相对于注入抽运功率的斜率效率为 36.6%,由于耦合损耗、散射等因素,导致约 85% 的抽运功率耦合进入了纤芯,则激光器相对于吸收的抽运功率的量子效率约为 47.6%。掺 Yb^{3+} 磷酸盐光纤在 1080 nm 波段荧光辐射弱是导致量子效率不高的主要原因。从图 2 还可以看出激光器并未出现输出功率饱和现象,表明如果继续增加抽运功率,还可进一步提高激光器的输出功率水平。此外,测量了激光器在 1 h 内的功率稳定性,其结果如图 2 中插图所示。结果表明激光器功率相对于平均功率的不稳定性小于 0.05%。激光器的输出光谱由精度为 0.02 nm 的光谱仪测量,结果如图 3 所示。中心波长为 1080.19 nm,边模抑制比(SMSR)达到 69 dB。

采用扫描 F-P 干涉仪测量了其纵模特性,图 4 是其在一个自由光谱范围($W_{\text{FSR}} = 1.5 \text{ GHz}$)内的扫描结果,激光器能够实现稳定的单模运转,无跳模以及模式竞争现象出现。采用光纤延时自外差方法(光纤长度

为 10 km)测得激光线宽小于 10 kHz。

图 5 为输出激光的相对强度噪声(RIN)谱。从图中可以看出相对强度噪声在小于 2 MHz 的低频段随着频率的增加,由 -100 dB/Hz 降低到了 -120 dB/Hz。此部分噪声主要是由于抽运功率的抖动以及环境的振动干扰而引起的。如图 5 所示,弛豫振荡峰出现在 380 kHz 处,此频率处的相对强度噪声约为 -100 dB/Hz。当频率大于 2 MHz 时,其相对强度噪声小于 -120 dB/Hz。

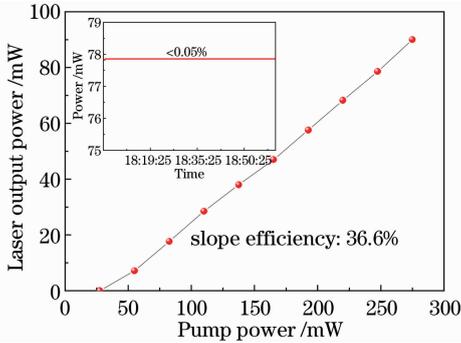


图 2 激光输出功率与抽运功率的关系。插图: 光纤激光器在 1 h 内的功率稳定性

Fig. 2 Output power of the fiber laser versus the pump power. Inset: power stability of the fiber laser in 1 h

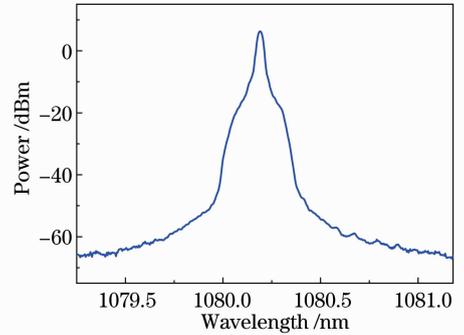


图 3 光纤激光器的输出光谱

Fig. 3 Emission spectrum of the fiber laser

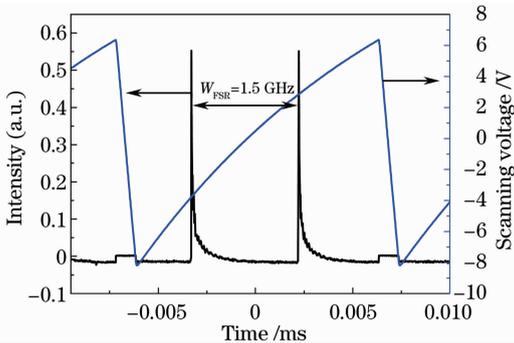


图 4 扫描 F-P 干涉仪扫描得到的激光纵模特性

Fig. 4 Longitudinal modes characteristics of the fiber laser measured by the scanning Fabry-Perot interferometer

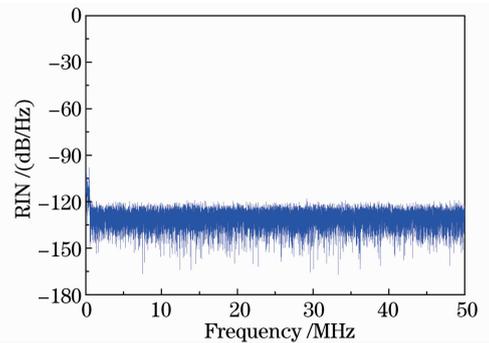


图 5 激光相对强度噪声

Fig. 5 Laser relative intensity noise

4 结 论

实验结果表明,基于 Yb^{3+} 离子高掺杂的磷酸盐光纤的短腔 DBR 光纤激光器能保持稳定的单纵模运转,输出功率以及斜率效率较高,功率稳定性良好,相对强度噪声值较低,可以满足实际应用中对单频激光光源的性能要求。

参 考 文 献

- 1 S. Kurkov. Oscillation spectral range of Yb-doped fiber lasers[J]. *Laser Phys. Lett.*, 2007, **4**(2): 93~102
- 2 V. P. Gapontsev, N. S. Platonov, O. Shkurihin *et al.*. 400 W low-noise single-mode CW ytterbium fiber laser with an integrated fiber delivery[C]. CLEO, 2003. paper CThPDB9
- 3 Lou Qihong, He Bing, Xue Yuhao *et al.*. A 1.75 kW China-made double-clad fiber laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(5): 1277~1280
楼祺洪, 何 兵, 薛宇豪 等. 1.75 kW 国产掺 Yb 双包层光纤激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(5): 1277~1280
- 4 Liu Qingwen, Wang Qingyue, Xue Yinghong *et al.*. 2.41 W ultrashort pulsed laser output from laser diode pumped Yb^{3+} -doped fiber amplifier[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **35**(6): 819~822
刘庆文, 王清月, 薛迎红 等. 激光二极管抽运掺 Yb^{3+} 光纤放大器获得 2.41 W 超短脉冲输出[J]. *中国激光*, 2009,

35(6): 819~822

- 5 K. Iwatsuki, H. Okamura, M. Saruwatari. Wavelength-tunable single-frequency and single-polarisation Er-doped fibre ring-laser with 1.4 kHz linewidth[J]. *Electron. Lett.*, 1990, **26**(4): 2033~2035
- 6 G. A. Ball, W. W. Morey, W. H. Glenn. Standing-wave monomode erbium fiber laser[J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 1991, **3**(7): 613~615
- 7 C. Spiegelberg, J. Geng, Y. Hu *et al.*. Low-noise narrow-linewidth fiber laser at 1550 nm[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2004, **22**(1): 57~62
- 8 Y. Kaneda, C. Spiegelberg, J. Geng *et al.*. 200-mW, narrow-linewidth 1064.2-nm Yb-doped fiber laser[C]. CLEO, 2004. paper CThO3
- 9 S. H. Xu, Z. M. Yang, W. N. Zhang *et al.*. 400 mW ultrashort cavity low-noise single-frequency Yb³⁺-doped phosphate fiber laser[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(18): 3708~3710
- 10 S. Kurkov, V. M. Paramonov, O. I. Medvedkov. Ytterbium fiber laser emitting at 1160 nm[J]. *Laser Phys. Lett.*, 2006, **3**(10): 503~506
- 11 Qian Qi, Yang Zhongmin. Yb³⁺-doped phosphate glass fiber and 1.06 μm single-frequency fiber laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 1904~1909
钱奇, 杨中民. Yb³⁺掺杂磷酸盐玻璃光纤与1.06 μm 单频激光器的研制[J]. *光学学报*, 2010, **30**(7): 1904~1909
- 12 M. A. Melkumov, I. A. Bufetov, K. S. Kravtsov *et al.*. Lasing parameters of ytterbium-doped fibres doped with P₂O₅ and Al₂O₃[J]. *Quantum Electron.*, 2004, **34**(9): 843~848
- 13 Y. O. Barmenkov, D. Zalvidea, S. Torres-Peiro *et al.*. Effective length of short Fabry-Perot cavity formed by uniform fiber Bragg gratings[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(14): 6394~6399