

光纤光栅主动稳频的短直线腔单频光纤激光器

杨 飞^{1,2} 陈迪俊¹ 潘政清¹ 叶 青¹ 蔡海文¹ 瞿荣辉¹ 龚尚庆^{1,3}

¹中国科学院上海光学精密机械研究所上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800
²中国科学院研究生院, 北京 100049
³山东华辰泰尔科技发展有限公司, 山东 济南 250101

摘要 利用 1.8 cm 长的 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺磷酸盐玻璃光纤作为增益介质制作了一个可调谐的短直线腔窄线宽单偏振单纵模光纤激光器。其谐振腔反射镜由高反射率的光纤布拉格光栅(FBG)和低反射率的保偏光纤 FBG 构成, 使用 976 nm 单模半导体激光器作为抽运源。当进入谐振腔的抽运功率为 360 mW 时获得了输出功率 65 mW, 信噪比大于 70 dB, 线宽约为 3 kHz, 偏振消光比达到 40 dB 的激光输出。另外, 通过使用压电陶瓷(PZT)调节增益光纤的长度实现了激光波长的电调谐, 其调谐斜率约为 14.2 MHz/V。再利用一个 -3 dB 带宽约为 11 GHz 的 FBG 作为鉴频器和参考频率, 采用边频锁定的方式进行主动稳频, 使得激光输出的长期频率波动从 25 MHz/10 s 减少到了 2.5 MHz/h, 从而实现了全光纤结构的高功率、高频率稳定性的单频光纤激光器。

关键词 激光器; 单频; 光纤布拉格光栅; $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺磷酸盐玻璃光纤

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0902005

Short Linear Cavity Single-Frequency Fiber Laser with Active Frequency Stabilization by Fiber Bragg Grating

Yang Fei^{1,2} Chen Dijun¹ Pan Zhengqing¹ Ye Qing¹ Cai Haiwen¹
Qu Ronghui¹ Gong Shangqing^{1,3}

¹Shanghai Key Laboratory of All Solid State Laser and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China
²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
³Shandong Huachentel Technology Development Co., Ltd., Jinan, Shandong 250101, China

Abstract A short-linear-cavity all-fiber laser configured with 1.8 cm $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped phosphate glass fiber is demonstrated experimentally with single frequency and high frequency stabilization. The fiber laser is composed of a high-reflectivity fiber Bragg grating (FBG) and a polarization-maintaining FBG. The pump is from a semiconductor laser of single mode at 976 nm. When the pump power into the cavity is 360 mW, the output power of the laser reaches more than 65 mW; the signal-to-noise ratio is higher than 70 dB; the laser linewidth is about 3 kHz and the polarization extinction ratio is about 40 dB. Moreover, the length of the active fiber is tuned by a piezoelectric transducer (PZT), and the laser frequency tunable slope is 14.2 MHz/V. Then the laser frequency is stabilized on FBG by using side frequency locking method. The long term frequency fluctuation is reduced from 25 MHz/10 s to 2.5 MHz/h.

Key words lasers; single frequency; fiber Bragg grating; $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped phosphate glass fiber

OCIS codes 140.3510; 140.3570; 140.3425

收稿日期: 2012-04-19; **收到修改稿日期**: 2012-05-21

基金项目: 国家自然科学基金(NSAF 联合)基金(11076028)、中国科学院创新基金(CXJJ-11-M16)和山东信息通信技术研究院引进海内外高层次人才项目联合资助课题。

作者简介: 杨 飞(1985—), 男, 博士研究生, 主要从事光纤光栅、单频光纤激光器及光纤时频传递方面的研究。

E-mail: eaglefy@yahoo.com.cn

导师简介: 蔡海文(1975—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事新型光电子器件、单频激光器、光纤高精度信息传递与感知等方面的研究。E-mail: hwcai@siom.ac.cn(通信联系人)

1 引 言

具有窄线宽、高频率稳定性和高输出功率的单频光纤激光器在相干激光雷达、引力波探测、相干激光通信、高分辨率激光光谱、分布式光纤传感等一系列领域有着广泛的应用^[1~4]。近年来,采用短直线腔结构的高掺杂磷酸盐玻璃光纤激光器成为了同时满足上述性能指标的主要技术方案和研究方向,因为短直线腔结构便于实现稳定无跳模的单纵模运转,而磷酸盐玻璃光纤容易实现 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 离子的高浓度掺杂从而可以具有很高的单位长度增益,所以可以利用很短的长度实现高功率激光输出。自1998年 Loh 等^[5]利用高掺杂 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺磷酸盐玻璃光纤以及光纤光栅分别构造了分布式布拉格反射(DBR)结构和分布式反馈(DFB)结构的光纤激光器以来,该类型激光器的研究取得了很大进展。2004年,Spiegelberg 等^[6]实现了功率超过200 mW,线宽小于2 kHz,长期频率稳定度优于20 MHz/h的激光输出,同时还具备10 kHz的快速调谐能力。2005年,Qiu 等^[7]利用5.5 cm长的 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺磷酸盐玻璃光纤,采用二向色镜包层抽运以及光纤布拉格光栅(FBG)输出耦合的方式实现了1.6 W的单纵模激光输出,并利用对FBG施加压力的方式获得了单偏振输出,但是其稳定性较差。2006年 Schulzgen 等^[8]利用光子晶体磷酸盐玻璃光纤和光纤光栅实现了2.3 W的单纵模激光输出。2008年,Leigh 等^[9]利用短直线腔磷酸盐玻璃光纤单频激光器做种子源,并且使用高掺杂的磷酸盐玻璃光纤作为第三级放大增益介质构造主振荡器功率放大(MOPA)结构,获得了51.5 kW的单频脉冲激光输出。国内的华南理工大学也开展了高掺杂 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺磷酸盐玻璃光纤的研制^[10]。2008年本课题组利用他们的光纤并使用高反射率的平面反射镜和窄带FBG构造谐振腔实现了100 mW输出功率、4.5 kHz线宽的单纵模激光输出^[11,12]。2010年,华南理工大学的 Xu 等^[13]利用相同的结构实现了300 mW、线宽小于2 kHz的激光输出。同时本课题

组还先后利用外部偏振选择反馈技术^[14],保偏光纤光栅的腔纵模和偏振模式同时选择效应^[15]实现了稳定的单偏振单纵模激光输出。

本文在已有研究的基础上通过压电陶瓷(PZT)调谐磷酸盐玻璃光纤的长度实现了激光器的频率调谐,然后利用温控隔音隔振封装的光纤光栅作为鉴频器,将激光器的频率波动转化为强度波动,再通过电学负反馈控制激光器的腔长实现了激光器频率的主动稳定,最终获得了功率大于65 mW,信噪比高于70 dB,偏振消光比大于40 dB,线宽约为3 kHz,频率长期稳定性优于2.5 MHz/h的激光输出。

2 单频光纤激光器的结构及其主要性能

激光器结构如图1所示。使用1.8 cm长的 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺磷酸盐玻璃光纤作为增益介质,在抽运功率大于100 mW时其增益系数在1550 nm处达到3 dB/cm。将该光纤的两端分别镶嵌于两个陶瓷插芯内并固定在金属基座上,然后对两端面进行研磨抛光,同时在金属基座上安装PZT,当PZT受到电压作用后会纵向伸缩从而带动光纤的长度伸缩变化。激光器的谐振腔反射镜由一对波长匹配的保偏光纤FBG(PMFBG)和具有高反射率的FBG(HRFBG)构成^[15],两者匹配的中心波长为1548.95 nm,PMFBG的-3 dB带宽约为0.1 nm,反射率约为70%,HRFBG的-3 dB带宽约为0.25 nm,反射率大于99.9%。两个光纤光栅一端的尾纤去掉后分别与磷酸盐玻璃光纤的两端做物理接触连接,这样就构成了可调谐的激光腔。其有效腔长约为3 cm,腔纵模间隔约为0.026 nm,此时光纤光栅带宽内约包含3~5个腔纵模,再使用半导体热电制冷器(TEC)对整个谐振腔进行温控,通过温控点的选择控制腔纵模之间的模式竞争从而实现单纵模输出。HRFBG的另一端通过976 nm隔离器与976 nm半导体激光器连接。PMFBG的另一端与保偏隔离器连接,得到全保偏激光输出。

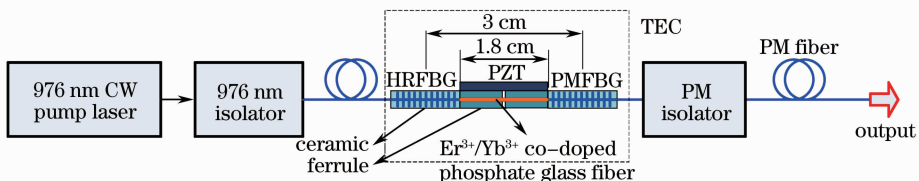


图1 激光器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the laser

图 2 给出了激光器在 TEC 温控温度为 18 ℃ 时的光谱图,中心波长为 1548.738 nm,从图 2 的插图可以看出激光的信噪比高于 70 dB,利用自差法测试其线宽为 3 kHz,验证了激光器的单纵模运转状态。激光器在 600 mW 的抽运功率下获得了 65 mW 的激光输出,由于 976 nm 隔离器的损耗很高,约 40%,因此实际进入谐振腔的抽运功率约为 360 mW。利用格兰棱镜测试,得到输出激光的消光比达 40 dB。

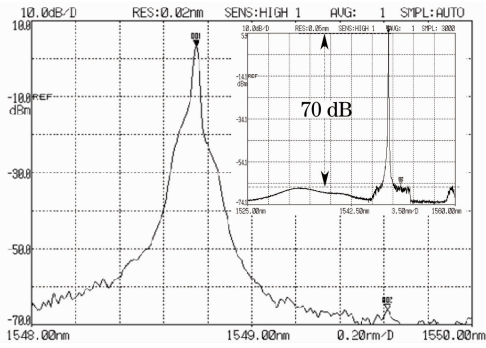


图 2 输出激光光谱图

Fig. 2 Spectrum of the output laser

再利用周期为 42.1 MHz 的光纤马赫-曾德尔干涉仪(MZI)测量激光器的 PZT 调谐特性,测试结果如图 3 所示。当激光器的 PZT 受到幅度为 68.9 V 的三角波扫描电压驱动后,输出激光频率在 MZI 上共扫过了 1.96 个干涉条纹周期,因此可以得到激光器的 PZT 调谐斜率约为 1.2 MHz/V。在整个调谐

范围内信号未失真,所以调谐范围大于 82 MHz。受到所能提供的驱动电压的限制,未能测到完整的调谐范围。

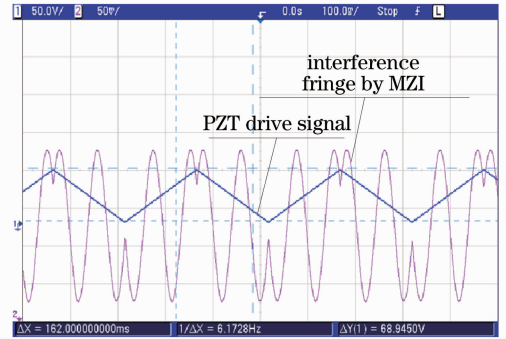


图 3 激光器的 PZT 调谐特性

Fig. 3 PZT tuning characteristic of the laser

3 光纤光栅稳频的结构及原理

使用光纤光栅稳频的系统结构如图 4 所示,单频磷酸盐玻璃光纤激光器输出的激光经过 20:80 耦合器后大部分能量作为激光输出,另一部分进入稳频系统被一个 50:50 耦合器分成两束,一束作为参考光直接被探测器接收,另一束经过光纤光栅后作为探测光被探测器接收,两者的信号相减后可以消除激光器光功率变化带来的影响,相减后的信号经过比例-积分-微分(PID)电路处理后反馈到激光器中驱动 PZT 来稳定激光器的输出频率。

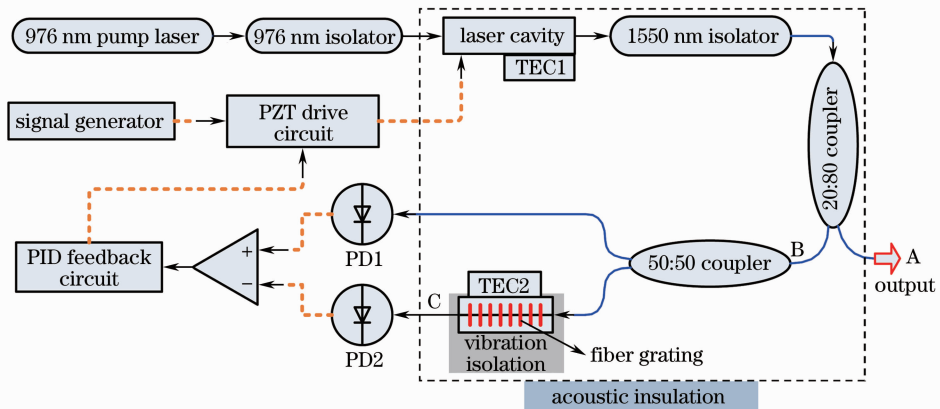


图 4 光纤光栅稳频的原理图

Fig. 4 Schematic diagram of the frequency stabilization using fiber grating

系统中光纤光栅的反射光谱如图 5 所示,反射率为 4.2 dB,反射谱的 -3 dB 带宽约为 11 GHz。该光栅起到了鉴频器的作用,其鉴频原理如图 6 所示。当激光器的中心频率位于光纤光栅透射谱的边沿处时,激光器频率随时间的改变会引起光纤光栅

透过光功率也随着时间变化,也就是说光纤光栅作为鉴频器将激光器的频率波动转化成了光强波动。该波动变化不仅反映了频率变化的大小,而且也反映了频率变化的方向,比如在图 6 中,一旦激光频率小于 ν_0 ,那么光纤光栅透过光强就会增加,而当激光

频率大于 ν_0 时光纤光栅透过光强就会减小。因此可以将图 6 中的 F 点作为参考频率点,用光纤光栅的透过光功率 I 减去 I_0 ,得到激光器频率变化的误差信号。再将该误差信号经过 PID 反馈系统后,就

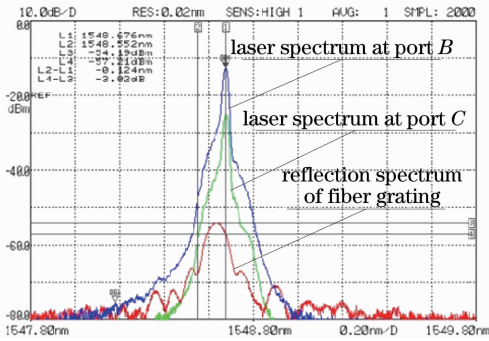


图 5 激光光谱与光纤光栅反射谱

Fig. 5 Spectrum of the laser and reflection spectrum of the fiber grating

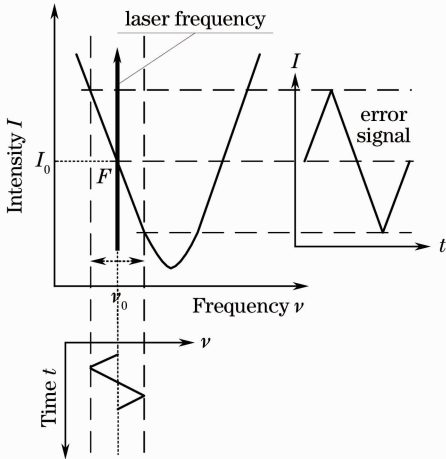


图 6 光纤光栅的鉴频原理

Fig. 6 Principle of frequency discrimination of fiber grating

可作为激光腔 PZT 的驱动控制信号从而通过改变激光腔长来改变激光器的输出频率,使其维持在参考值处不变。

从以上分析中可以看出,频率能否稳定,关键就是参考信号是否稳定。光纤光栅是无源器件,且光经过时损耗很小可以忽略,因此其透射波长变化与否主要取决于所处环境的温度和应力,所以稳频系统中的光纤光栅需要进行温控和隔振的封装处理。此处将光纤光栅用 TEC 进行温控并置于弹簧隔振台上,使用 PID 反馈控制 TEC 使光纤光栅的相对温度变化控制在 1 mK 以内,已知光纤光栅的温度系数约为 1 GHz/K^[16],因此可以估算光纤光栅的频率波动在 1 MHz 以内。同时为了使系统更加可靠,还对激光腔和光纤光栅鉴频器进行了隔音处理。

4 稳频结果及讨论

首先使反馈环路处于开环状态,用信号发生器产生一个三角波信号驱动激光腔的 PZT,测试系统的误差信号,如图 7(a)所示,从中可以看出三角波扫描信号为 30 V 时误差信号的幅度为 118 mV,根据

$$k = \frac{\Delta f}{V_e} = \frac{V_s k_0}{V_e} \quad (1)$$

可以得到 1 mV 的误差信号代表激光器频率相对于参考频率漂动了 0.3 MHz。(1)式中 Δf 表示激光器的频率波动量, V_e 表示误差信号的幅度, V_s 表示 PZT 的三角波扫描信号幅度, k_0 表示激光器的调谐斜率。再将三角波信号变成直流信号,此时的误差信号如图 7(b)所示,变化幅度在 10 s 内超过了 70 mV,表示激光器在没有稳频时的频率波动量超过了 25 MHz/10 s。

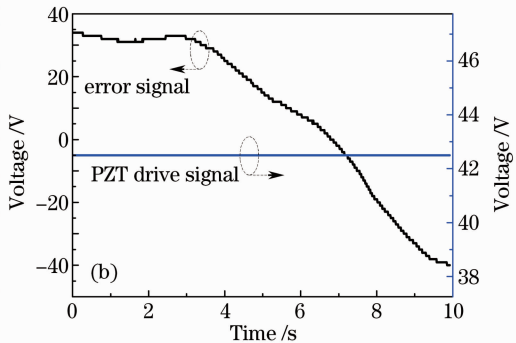
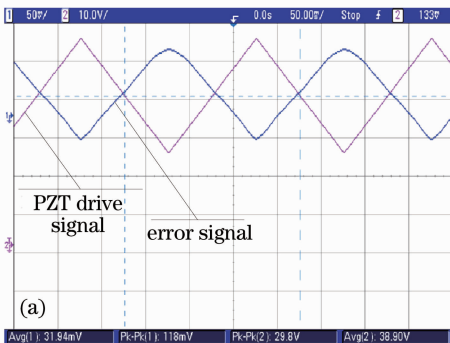


图 7 稳频环路闭合前 PZT 的驱动信号分别为(a)三角波和(b)直流时的误差信号

Fig. 7 Error signal before closing the frequency stabilization loop when the PZT drival signal is (a) triangular and (b) direct current

首先测试了稳频过程的有效性和抗干扰能力,如图 8 所示。先开启稳频然后在图 8 中 A 点对应的时间断开稳频环路,可以看到此时误差信号从稳定状态迅速偏离并出现较大波动。图 8 中的 B、C 点表示当敲击激光腔时误差信号的波动情况,可以看到稳频开启时误差信号的波动幅度明显小于稳频不工作时的波动幅度,这说明稳频是有效的而且具有较好的抗干扰能力。

图 9 表示稳频系统闭环前后的误差信号和对应的 PZT 驱动信号。从中可以看出,稳频开启后误差信号迅速降到 0,然后激光器 PZT 驱动信号不断变化以使误差信号一直稳定在 0 值附近,误差信号的波动量约为 4.8 mV,持续时间超过 1 h。通过(1)式可以得到激光器相对于光纤光栅的频率波动幅度小

于 1.5 MHz/h。再加上光纤光栅本身的频率波动,激光器最终的频率波动幅度小于 2.5 MHz/h。

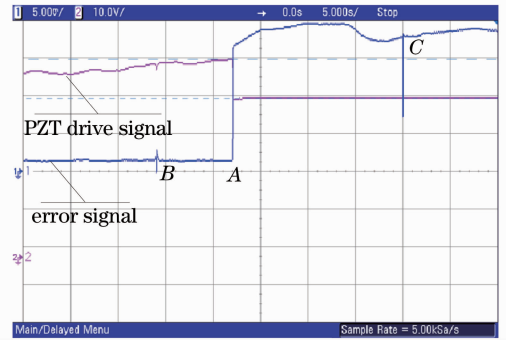


图 8 稳频环路断开前后的误差信号
Fig. 8 Error signal around opening the frequency stabilization loop

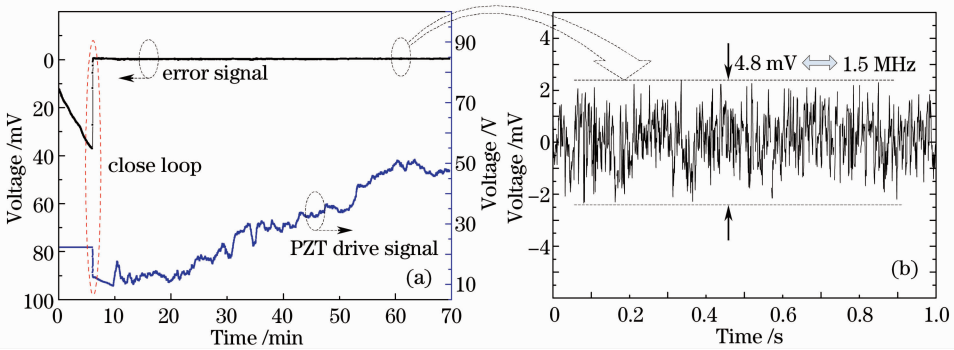


图 9 (a) 稳频环路闭合前后的误差信号; (b) 时间展开后的误差信号

Fig. 9 (a) Error signal around closing the frequency stabilization loop; (b) error signal after unfolding the time

5 结 论

报道了一台具有高频率稳定性的单频磷酸盐玻璃光纤激光器。采用很短的一段高增益磷酸盐玻璃光纤作为增益介质,光纤光栅对做谐振腔镜,其中 PMFBG 的快轴反射峰与 HRFBG 的反射峰对准,并采用全保偏输出。在腔内加入 PZT 调节腔长实现频率调谐,并使用温控隔振的光纤光栅作为鉴频器实现了主动频率稳定。获得了功率大于 65 mW,信噪比高于 70 dB,偏振消光比大于 40 dB,线宽约为 3 kHz,频率长期稳定性优于 2.5 MHz/h 的全光纤激光输出。该激光器相干性好、频率稳定度高,所以在高相干光源的众多领域具有重要的应用前景。

致谢 感谢华南理工大学杨中民教授及其课题组提供性能优良的磷酸盐玻璃光纤。

参 考 文 献

1 A. Liem, J. Limpert, H. Zellmer *et al.*. 100-W single-frequency

master-oscillator fiber power amplifier[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(17): 1537~1539
 2 F. Lienhart, S. Boussen, O. Carraz *et al.*. Compact and robust laser system for rubidium laser cooling based on the frequency doubling of a fiber bench at 1560 nm[J]. *Appl. Phys. B*, 2007, **89**(2-3): 177~180
 3 M. Dobbs, W. Krabill, M. Cisewski *et al.*. A multi-functional fiber laser lidar for earth science & exploration[C]. Conference on Lasers and Electro-Optics/International Quantum Electronics Conference, 2009. CFJ5
 4 J. E. Koroshetz. Fiber lasers for lidar [C]. Optical Fiber Communication Conference and Exposition and The National Fiber Optic Engineers Conference, 2005. OFJ4
 5 W. H. Loh, B. N. Samson, L. Dong *et al.*. High performance single frequency fiber grating-based erbium:ytterbium-codoped fiber lasers[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1998, **16**(1): 114~118
 6 C. Spiegelberg, J. H. Geng, Y. D. Hu *et al.*. Low-noise narrow-linewidth fiber laser at 1550 nm [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2004, **22**(1): 57~62
 7 T. Qiu, S. Suzuki, A. Schulzgen *et al.*. Generation of watt-level single-longitudinal-mode output from cladding-pumped short fiber lasers[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(20): 2748~2750
 8 A. Schulzgen, L. Li, V. L. Temyanko *et al.*. Single-frequency fiber oscillator with watt-level output power using photonic crystal phosphate glass fiber[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(16): 7087~7092

- 9 M. Leigh, W. Shi, J. Zong *et al.*. High peak power single frequency pulses using a short polarization-maintaining phosphate glass fiber with a large core [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **92**(18): 181108
- 10 S. H. Xu, Z. M. Yang, Z. M. Feng *et al.*. Gain and noise characteristics of single-mode Er³⁺/Yb³⁺ co-doped phosphate glass fibers [C]. 2nd IEEE International Nanoelectronics Conference, 2008, **1-3**: 633~635
- 11 Pan Zhengqing, Meng Li, Ye Qing *et al.*. Single-frequency Er/Yb co-doped phosphate glass fiber laser with 100-mW output power[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(12): 1996
潘政清, 孟莉, 叶青等. 钕镱共掺磷酸盐玻璃光纤激光器实现 100 mW 单频输出[J]. *中国激光*, 2008, **35**(12): 1996
- 12 Meng Li, Pan Zhengqing, Geng Jianxin *et al.*. A short-cavity phosphate glass fiber laser and its output characteristics [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(2): 362~366
孟莉, 潘政清, 耿建新等. 短腔磷酸盐玻璃光纤激光器及其输出特性[J]. *中国激光*, 2010, **37**(2): 362~366
- 13 S. H. Xu, Z. M. Yang, T. Liu *et al.*. An efficient compact 300 mW narrow-linewidth single frequency fiber laser at 1.5 μm [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(2): 1249~1254
- 14 Zhengqing Pan, Haiwen Cai, Li Meng *et al.*. Single-frequency phosphate glass fiber laser with 100-mW output power at 1535 nm and its polarization characteristics [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(1): 52~54
- 15 Yang Fei, Ye Qing, Pan Zhengqing *et al.*. 100-mW linear polarization single-frequency all-fiber seed laser for coherent Doppler lidar application [J]. *Opt. Commun.*, 2012, **285**(2): 149~152
- 16 L. A. Ferreira, F. M. Araujo, J. L. Santos *et al.*. Simultaneous measurement of strain and temperature using interferometrically interrogated fiber Bragg grating sensors [J]. *Opt. Eng.*, 2000, **39**(8): 2226~2234

栏目编辑:宋梅梅