

文章编号: 0258-7025(2007)03-0350-04

基于光纤光栅法布里-珀罗腔的 高效窄线宽光纤激光器

伍波, 刘永智, 张谦述, 岳慧敏, 代志勇

(电子科技大学光电信息学院, 四川成都 610054)

摘要 报道了采用双光纤光栅(FBG)法布里-珀罗(F-P)腔选模的线形腔结构窄线宽光纤激光器。激光器以高掺杂 Er^{3+} 光纤为增益介质,利用全光纤型法拉第旋转器(FR)抑制空间烧孔效应,通过两个短光纤光栅法布里-珀罗腔选模,产生了稳定的1534.83 nm单频激光输出。激光器采用两支976 nm单模激光二极管(LD)抽运,两端输出。激光器阈值抽运光功率为12 mW,在总抽运光功率为145 mW时总输出信号光功率为39.5 mW,单端最高输出信号光功率为22 mW。光-光转换效率为27%,斜率效率为29.7%。随着抽运功率的增加,激光器输出功率趋于饱和。采用延迟自外差方法精确测量光纤激光器线宽,实验中使用了15 km单模光纤延迟线,由于测量精度的限制,得到激光器的线宽小于7 kHz。这种光纤激光器具有输出功率高、线宽窄、信噪比高的特点,可用于高精度的光纤传感系统。

关键词 激光技术;光纤激光器;窄线宽;光纤光栅法布里-珀罗腔;高掺杂铒光纤

中图分类号 TN 248.1 **文献标识码** A

High Efficient Narrow Linewidth Fiber Laser Based on Fiber Grating Fabry-Perot Cavity

WU Bo, LIU Yong-zhi, ZHANG Qian-shu, YUE Hui-min, DAI Zhi-yong

(School of Opto-Electronic Information, University of Electronic Science and Technology, Chengdu, Sichuan 610054, China)

Abstract A high Er^{3+} -doped narrow linewidth fiber laser based on fiber Bragg grating (FBG) Fabry-Perot (F-P) cavity was demonstrated. Spatial hole burning effect was restrained by fiber Faraday rotator. Two short FBG F-P cavities were used as narrow bandwidth filters to discriminate and select laser longitudinal modes efficiently. Stable single frequency 1534.83 nm laser was acquired. Pumped by two 976 nm laser diodes (LDs) and two ends output, the fiber laser exhibited 12 mW threshold. Total 39.5 mW output power and one end 22 mW output power were obtained upon the maximum 145 mW pump power. Optical-optical efficiency was 27% and slope efficiency was 29.7%. The output power tended to be saturated when pump power increased. The 3 dB linewidth of laser was less than 7 kHz, measured by the delayed self-heterodyne method with 15 km single mode fiber. The high power narrow linewidth fiber laser can be used in high resolution fiber sensor system.

Key words laser technique; fiber laser; narrow linewidth; fiber grating Fabry-Perot cavity; high Er^{3+} -doped fiber

1 引言

窄线宽光纤激光器在光学传感和高精度光谱方面有广泛的应用,特别是作为光纤激光传感器光源,它具有对电磁场的抗干扰、安全、体积小、可远程控

制等特性,可应用于分布式光纤光学传感器、激光定位/测距仪、光纤光学水中听音声纳阵列,以及海底石油勘探和地震探测等领域。目前,窄线宽光纤激光器已经可以实现单纵模输出,线宽可达2 kHz以下,功率超过200 mW。通过控制腔内相遇光波的偏

收稿日期:2006-06-05;收到修改稿日期:2006-10-19

基金项目:国家自然科学基金(60377021)资助项目。

作者简介:伍波(1979—),男,土家族,重庆人,博士研究生,主要从事光纤激光器与放大器及光纤传感方面的研究工作。

E-mail: w_bo@sohu.com

导师简介:刘永智(1942—),男,四川人,教授,博士生导师,目前主要从事光纤技术与光电传感及信息处理方面的研究。

E-mail: yzliu123@uestc.edu.cn

振状态来消除驻波效应引起的空间烧孔的非相干技术,以及激光腔中加入未抽运掺杂光纤来抑制跳模的饱和吸收体方法,都实现了窄线宽的光纤激光输出。而窄线宽光纤激光器最常用的办法是直接在线形腔写入布拉格光栅^[1]作为激光腔镜,形成激光的窄带输出。分布布拉格反射器(DBR)和分布反馈光栅(DFB)两方面的工作都得到了证实。这种技术除了可以实现很窄的谱线输出,还便于集成,避免了复杂的光学结构,具有更好的稳定性和环境适应性。窄线宽光纤激光器的腔形结构有线形腔和环形腔。环形腔光纤激光器较易获得窄线宽激光输出^[2~4],缺点是输出功率低,目前最高仅为6.2 mW。在线形腔方面,2 cm长 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺磷酸盐光纤加分布布拉格反射器超短腔结构获得功率100 mW,线宽2 kHz的激光输出^[5,6],超短腔1064.2 nm波长掺镱光纤激光器,获得线宽3 kHz,功率200 mW的激光输出^[7]。超短腔采用的高掺杂 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺磷酸盐光纤光学增益极高,可达5 dB/cm,光纤光栅可直接在掺杂光纤上写入,或者熔接在2cm长掺杂光纤上。超短腔结构光纤激光器的难点在于采用怎样的抽运方式,在短增益光纤上实现高输出功率。超短腔分布布拉格反射器与分布反馈光栅结构光纤激光器国内也有研究,但是激光器效率低,输出功率最大仅为11 mW,线宽限制在兆赫兹范围^[8~11]。

本文报道了采用双光纤光栅(FBG)法布里-珀罗(F-P)腔选模的高掺 Er^{3+} 线形腔窄线宽光纤激光器。该光纤激光器输出稳定、功率高、线宽极窄,同时具有结构简单、全光纤化、信噪比高等特点,使其可应用于高精度的光纤传感系统。

2 窄线宽光纤激光器实验结果

光纤激光器主要由两个光纤光栅法布里-珀罗腔(FBG F-P)和高掺 Er^{3+} 光纤线形腔构成,实验装置如图1所示。图中光纤线形腔的增益介质为芬兰Liekki公司制造的高掺 Er^{3+} 光纤,型号为Er30-4/125,长度为3 m,该光纤在978 nm波长处峰值吸收系数为17 dB/m,在1530 nm波长的峰值吸收系数为30 dB/m。实验中采用了双向抽运、两端输出方式,抽运光源为中心波长976 nm的单模输出激光二极管(LD),LD1与LD2的最大抽运功率分别为76 mW和69 mW,双向抽运可以使增益光纤内功率分布及增益分布更加均匀,有利于输出光束的稳定。由于在线形腔结构中容易产生空间烧孔效应,引起

多纵模振荡,所以在实验中还使用了全光纤结构的法拉第旋转器(FR),法拉第旋转器可以使通过它的光束偏振态改变 90° ,变成互相垂直,从而破坏光纤激光器中驻波的形成条件,抑制空间烧孔效应。

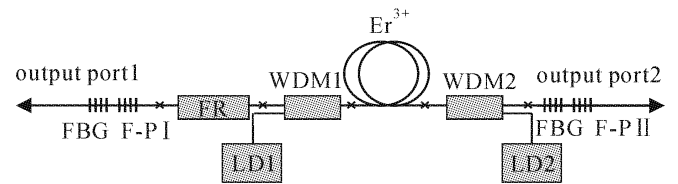


图1 双光纤光栅法布里-珀罗腔窄线宽光纤激光器实验原理图

Fig. 1 Experimental setup of narrow linewidth fiber laser with two FBG F-P cavities

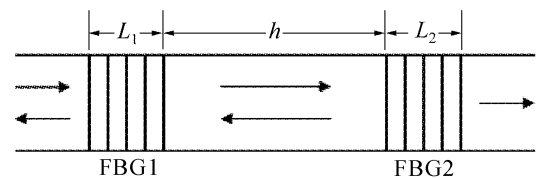


图2 光纤光栅法布里-珀罗腔结构图

Fig. 2 Schematic diagram of FBG F-P cavity

光纤光栅法布里-珀罗腔的结构如图2所示。图2中 h 为法布里-珀罗腔腔长, L_1 和 L_2 分别为两个光栅的长度。光纤光栅法布里-珀罗腔刻蚀在普通单模光纤上,光栅之间的距离为2 cm,总体腔长不超过5 cm,光栅反射率都为50%。根据文献^[12],以上述参数数值计算得到了光纤光栅法布里-珀罗腔的透射谱曲线,在透射谱曲线中只有四条输出纵模谱线,纵模间隔大于0.03 nm。同时计算得法布里-珀罗腔的总反射率为80%。采用宽带放大自发辐射(ASE)光源测量的光纤光栅法布里-珀罗腔反射谱如图3所示,由图可知,光纤光栅法布里-珀罗腔反射总带宽约为0.17 nm,反射峰上的凹陷对应于透射纵模谱线的位置。实验中光纤光栅法布里-珀罗腔是起腔反射镜与作为插入的法布里-珀罗腔选模的作用。光纤光栅法布里-珀罗腔有利于实现激光器的全光纤化,而且其输出纵模谱线数目由法布里-珀罗腔的腔长和光纤光栅的反射带宽决定,光纤光栅法布里-珀罗腔的腔长越短,其输出谱线间距越大,光纤光栅的反射带宽越窄,法布里-珀罗腔所能容纳的模式数越少,选频特性优于普通法布里-珀罗腔^[13]。实验中激光器的总体腔长约为3.5 m,相应的纵模间隔为29 MHz,通过光纤光栅法布里-珀罗腔选模后,只有四个纵模可以振荡,而且由于法拉第旋转器抑制了空间烧孔效应,腔内不会有其他

纵模振荡。最后由于增益饱和,在少数纵模的模式竞争中,使中心频率的单纵模占优势,最终获得单纵模激光输出。如果输出激光线宽小于光纤光栅法布里-珀罗腔的纵模间隔,而且在较长的观察时间内没有出现跳模现象,那么就可以判断激光器是单纵模运转的。

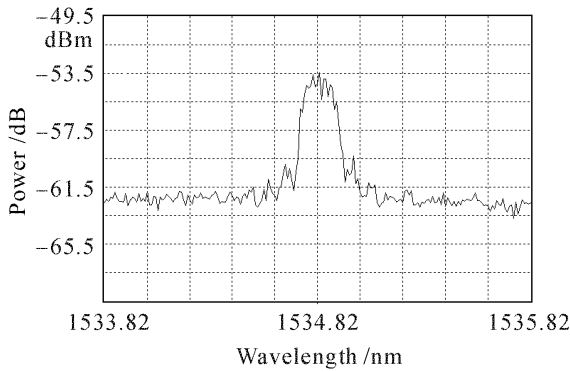


图 3 光纤光栅法布里-珀罗腔的反射谱

Fig. 3 Reflectivity spectrum of FBG F-P cavity

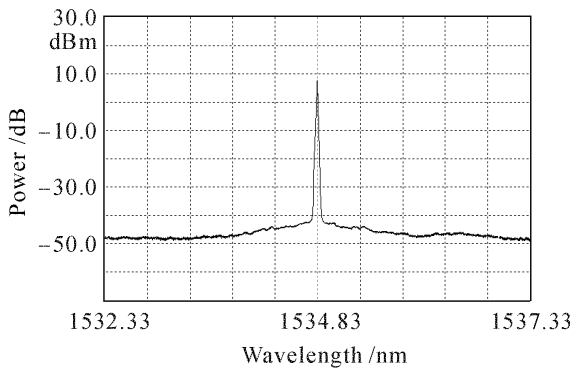


图 4 光纤激光器输出窄线宽光谱图

Fig. 4 Output narrow line-width spectrum of fiber laser

实验中采用 Ando6319 光谱分析仪进行实验记录,该光谱仪最高精度为0.01 nm,输出光功率采用光功率计精确测量。当抽运光功率为12 mW时,激光器开始起振。随着抽运功率的增加,激光器谱线趋于稳定。当抽运功率为18 mW时,开始得到稳定的光谱线,而且谱线的3 dB线宽不受抽运光功率增加的影响。图 4 为输出光谱图,图中扫描范围为 5 nm,精度为0.01 nm。光谱仪分析得输出激光中心波长为1534.83 nm,3 dB线宽小于0.01 nm(光谱仪最高精度),信噪比大于50 dB。在1 h的连续观察时间内,激光器无跳模现象发生,波长漂移范围小于0.01 nm。由于激光器输出激光3 dB线宽远小于光纤光栅法布里-珀罗腔透射谱线的纵模间隔(0.03 nm),且长时间无跳模现象,所以认为此激光器输出为单纵模。当抽运光功率最大为145 mW时,端口 1 输出信号光功率为22 mW,端口 2 输出信

号光功率为 17.5 mW,获得的总输出功率为 39.5 mW,光-光转换效率为 27%,斜率效率为 29.7%。两端输出激光的光谱特性一致,都无跳模现象发生。图 5 为总输出功率随总抽运功率变化的曲线,图中“*”形表示实测值,直线为数值拟合。从图 5 可知,随着抽运功率的增加,光纤激光器的输出功率有饱和趋势。

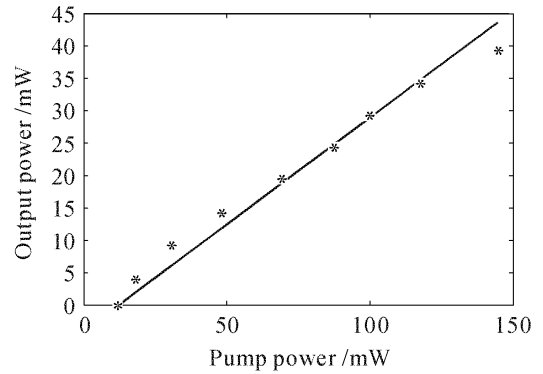


图 5 输出功率随抽运功率的变化

Fig. 5 Output power versus pump power

3 自外差线宽测量实验结果

目前测量千赫兹量级激光器线宽的方法有延迟自外差/零差测谱法。自零差方法与自外差方法相比,虽然不需要使用移频器,但是却不能直接使用标准射频频谱仪进行测量。改进的自零差测量系统中^[14]需要增加相位调制器与本地射频振荡器,结构相比自外差测量系统更加复杂。为了得到精确的激光器线宽,采用延迟自外差方法测量光纤激光器线宽。

延迟自外差方法实验系统如图 6 所示。整个实验系统的组成包括:15 km单模光纤延迟线,中心频率为70 MHz的声光移频器,两个 1×2 型 3 dB 光纤耦合器,一只带宽为 155 MHz 的光电探测器以及 ADVANTEST R3267 射频频谱分析仪,该频谱仪测量频率范围为 100 Hz~8 GHz,最高分辨率带宽 10 Hz,测量动态范围超过 137 dB。

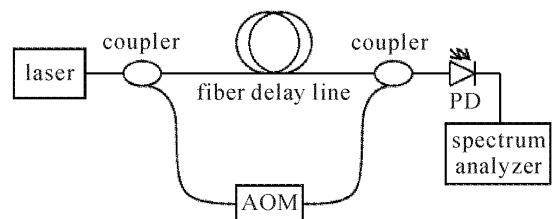


图 6 延迟自外差实验原理图

Fig. 6 Experimental setup for delayed self-heterodyne measurement

延迟自外差测量方法的测量精度与光纤延迟线长度有关^[15],根据计算,15 km长光纤延迟线的测量精度为7 kHz。在此测量精度下,如果射频频谱仪分辨精度足够高,而且被测激光器线宽小于7 kHz,那么从射频频谱仪得到的小于7 kHz的线宽与被测激光器的线宽不存在直接对应关系。激光器线宽测量结果如图 7 所示,由射频频谱仪分析得到谱线的 3 dB带宽为5 kHz,由于测量精度的限制,我们认为光纤激光器的3 dB线宽小于7 kHz。

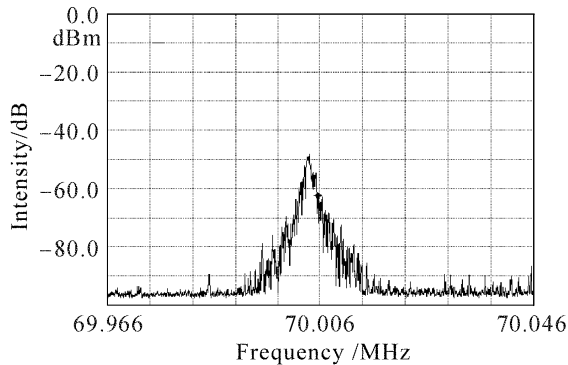


图 7 采用 15 km 延迟光纤测量的自外差信号

Fig. 7 Heterodyne signal measured at 15 km delay fiber

4 结 论

利用全光纤型法拉第旋转器抑制空间烧孔效应,通过两个短光纤光栅法布里-珀罗腔选模,设计并建立了一种单纵模窄线宽光纤激光器。给出了功率输出特性,阈值抽运光功率为12 mW,最大输出信号光功率为39.5 mW,单端最高输出信号光功率为22 mW,斜率效率为29.7%。激光器输出中心波长为1534.83 nm,光谱稳定,信噪比高。采用15 km单模光纤延迟线进行了延迟自外差线宽测量,由于测量精度的限制,最后得到光纤激光器的3 dB线宽小于7 kHz。

参 考 文 献

- 1 G. A. Ball, W. W. Morey, W. H. Glenn. Standing-wave monomode erbium fiber laser [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1991, **3**(7):613~615
- 2 Lu Changgui, Wang Zhuyuan, Yun Binfeng *et al.*. Stable single frequency Er-doped all-fiber ring laser with fiber Bragg grating Fabry-Perot filter [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(4):212~214

- 3 M. J. Guy, J. R. Taylor, R. Kashyap. Single-frequency erbium fibre ring laser with intracavity phase-shifted fibre Bragg grating narrowband filter [J]. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(22):1924~1925
- 4 Yu Benli, Zhen Shenglai, Zhu Ju *et al.*. Experimental study on low-noise fiber laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(2):217~220
俞本立,甄胜来,朱 军等. 低噪声光纤激光器的实验研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(2):217~220
- 5 Ch. Spiegelberg, J. Geng, Y. Hu *et al.*. Compact 100 mW fiber laser with 2 kHz linewidth [C]. *OFC' 2003*, 2003, **3**, PD45:1~3
- 6 Ch. 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
- 7 Yushi Kaneda, Christine Spiegelberg, Jihong Geng *et al.*. 200-mW, narrow line width 1064.2-nm Yb-doped fiber laser [C]. *CLEO' 2004*, 2004, **2**, CThO3:1~2
- 8 Xu Yuanzhong, Tan Huayao, Du Weichong *et al.*. Short cavity Er/Yb fiber grating laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(10):1327~1331
许远忠,谭华耀,杜卫冲等. 短腔 Er/Yb 光纤光栅激光器[J]. *光学学报*, 1999, **19**(10):1327~1331
- 9 Xue Yiyuan, An Honglin, Fu Libin *et al.*. Narrow-linewidth single-mode DBR fiber lasers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(9):1251~1254
薛亦元,安宏林,傅立斌等. 单频窄线宽分布布拉格反射光纤激光器研究[J]. *光学学报*, 2000, **20**(9):1251~1254
- 10 Wang Tianshu, Guo Yubin, Li Jun *et al.*. All fiber type short cavity Er/Yb co-doped fiber laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(10):1161~1164
王天枢,郭玉彬,李 军等. 全光纤型 Er/Yb 共掺光纤短腔激光器[J]. *中国激光*, 2004, **31**(10):1161~1164
- 11 Liu Haitao, Chen Jianping, Chen Xiangfei *et al.*. Fabrication of distributed feedback Bragg fiber laser on regular Er-doped fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(7):873~876
刘海涛,陈建平,陈向飞等. 低掺杂钕纤上分布反馈布拉格光纤激光器的制作[J]. *中国激光*, 2006, **33**(7):873~876
- 12 Guan Baiou, Yu Youlong, Ge Chunfen *et al.*. Theoretical studies on transmission characteristics of fiber grating Fabry-Perot cavity [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(1):34~38
关柏鸥,余有龙,葛春风等. 光纤光栅法布里-珀罗腔透射特性的理论研究[J]. *光学学报*, 2000, **20**(1):34~38
- 13 Lü Changgui, Cui Yiping, Wang Zhuyuan *et al.*. A study on the longitudinal mode behavior of Fabry-Perot cavity composed of fiber Bragg grating [J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(1):145~150
吕昌贵,崔一平,王著元等. 光纤布拉格光栅法布里-珀罗腔纵模特性研究[J]. *物理学报*, 2004, **53**(1):145~150
- 14 Hanne Ludvigsen, Mika Tossavainen, Matti Kaivola. Laser linewidth measurements using self-homodyne detection with short delay [J]. *Opt. Commun.*, 1998, **155**:180~186
- 15 Liang Kefei, Chen Shixiang, Yang Darong. Measurements of laser linewidth [J]. *Journal of Nanjing Institute of Posts and Telecommunications*, 1991, **11**(2):32~35
梁可非,陈世翔,杨大容. 激光器线宽的测量[J]. *南京邮电学院学报*, 1991, **11**(2):32~35