

## 双光纤光栅法 - 珀腔可调谐窄线宽激光器

杜 勇<sup>1,2</sup>, 董小鹏<sup>1</sup>, 陈敏秀<sup>1</sup>, 周金龙<sup>1</sup>

(1. 厦门大学信息科学与技术学院光波技术研究所 福建 厦门 361005; 2. 集美大学信息工程学院 福建 厦门 361021)

**摘要:** 基于游标原理, 利用一对自由谱宽(FSR)略有不同的光纤布拉格光栅法布里-珀罗腔(FBG-FP)作为模式选择器件, 设计了一种新颖的环形腔光纤激光器。从理论和实验上研究了该激光器的特性。通过对可调谐FBG-FP应力调谐, 在1552.240~1552.912 nm范围内, 以96 pm为平均间距, 获得了8个由固定FBG-FP的透射谱所确定的窄线宽稳定激光输出。8个输出波长的平均功率为-17.66 dBm, 波动在0.7 dB范围内。当泵浦光的功率为95 mW的时候, 输出信号的信噪比均大于50 dB。实验上每隔1 min用光谱分析仪(OSA)对输出光波长自动扫描, 记录的输出光波长漂移在数皮米范围内, 且功率的波动小于0.1 dB。这种可调谐的窄线宽光纤激光器在光纤通信和光纤传感方面有潜在的应用价值。

**关键词:** 可调谐光纤激光器; 光纤布拉格光栅; 法布里-珀罗腔; 游标原理; 窄线宽

**中图分类号:** TN248.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2013.02.009

## Tunable narrow linewidth fiber laser with two FBG-FPs

DU Yong<sup>1,2</sup>, DONG Xiao-peng<sup>1</sup>, CHEN Min-xiu<sup>1</sup>, ZHOU Jin-long<sup>1</sup>

(1. Institute of Lightwave Technology, School of Information Science and Technology, Xiamen University, Xiamen 361005, China;  
2. School of Information Engineer, Jimei University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** Using a pair of Fiber Bragg grating Fabry-Pérots(FBG-FP) with a little different FSR as its wavelength-selective components, a novel ring laser based on the vernier effect is proposed. We have studied the characteristics of this kind of tunable fiber laser both theoretically and experimentally, and obtained 8 discretely tunable laser wavelengths ranging from 1552.240 nm to 1552.912 nm with an average 96 pm span by pulling the tunable FBG-FP. The output spectrum peak is uniform among different wavelength at -17.66 dBm with a fluctuation of 0.7 dB. When the pump power is 95 mW, the signal-to-noise ratio is better than 50 dB. The output spectrum of the laser is recorded automatically by an optical spectrum analyzer(OSA) once a minute. It is found that the output wavelength drift within a few pico-meter and the fluctuation of the output power is less than 0.1 dB. This kind of fiber ring laser may have potential applications in optical communications and sensors.

**Key words:** tunable fiber laser; fiber bragg grating; Fabry-Pérot; vernier principle; narrow linewidth

### 1 引言

窄线宽激光器在光纤通信、多普勒测速和光相干探测等领域应用广泛<sup>[1]</sup>。由双光纤布拉格光栅构成的全光纤法布里-珀罗腔(FBG-FP)由于其透射谱包含一系列具有超窄线宽的传输窗口而常被用来构建窄线宽或单频光纤激光器<sup>[2-5]</sup>。为了使光纤激光器输出单一波长, 文献[4]采用FBG进行波长选择, 但FBG反射谱带宽较大时可能选择多个纵

模, 产生模式竞争造成输出不稳定的现象; 另外, 通过机械拉伸或温度改变用作选模的FBG中心波长存在调谐速度慢等问题<sup>[6-7]</sup>。

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 61077031/F050208); 福建省教育厅B类科技研究项目(No. JB11097)资助。

作者简介: 杜 勇(1971-), 男, 博士生, 讲师, 主要从事光电子器件研究。E-mail: duyong2001@jmu.edu.cn

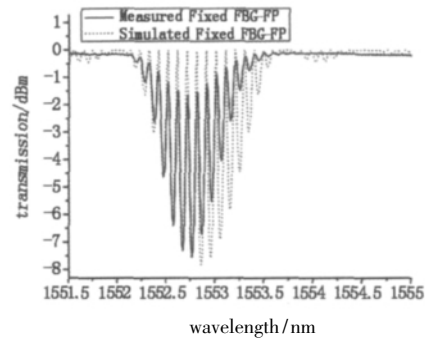
收稿日期: 2012-07-19; 修订日期: 2012-08-08

为获得线宽更窄的可调谐光纤滤波器,文献[8]将两个不同自由谱宽(FSR)的FBG-FP级联,基于游标原理通过调节其中一个FBG-FP使两个FBG-FP的传输谱有一个传输波长重合,实现窄线宽的选模和滤波。文献[9]将两组FBG-FP级联构成线型腔,实现了四个波长的离散调谐,但在这种线型腔方案中FBG-FP的部分反射会使激光输出不稳定和存在模式竞争问题。

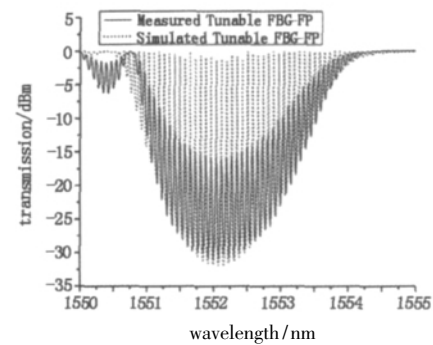
本文在基于游标原理工作的FBG-FP窄线宽滤波器基础上,利用可调谐FBG-FP(Tunable FBG-FP)和固定FBG-FP(Fixed FBG-FP)级联作为波长选择器件,设计一种环形腔结构的窄线宽可调谐光纤激光器,并对这种方案的可行性在实验上做了验证,得到了稳定的窄线宽激光输出。

## 2 理论分析

可调谐FBG-FP和固定FBG-FP可以通过在光纤上写入两个有一定间隔的FBG来构造,FBG-FP的FSR由FBG的长度和两个FBG的间距所决定<sup>[10]</sup>。本文所采用的两个FBG-FP是刻写在武汉长飞公司生产的锗硼共掺光纤上,在纤芯中掺杂了约17 mol%  $\text{GeO}_2$ 和10 mol%  $\text{B}_2\text{O}_3$ ,为了提高光纤的光敏性对光纤作了载氢处理。FBG-FP的透射谱可以利用传输矩阵法来仿真<sup>[11]</sup>。图1(a),图1(b)所示(点线)为仿真出的固定FBG-FP和可调谐FBG-FP的传输谱,固定FBG-FP的参数:FBG周期536.095 nm,长度 $L_g=1$  mm,有效折射率 $n_{\text{eff}}=1.448118$ ,两个FBG的间距为7.7 mm,由于紫外刻写光栅造成的折射率直流变化系数 $C=0.5$ 、调制折射率变化量 $\Delta n=4 \times 10^{-4}$ ,波长扫描范围1551~1555 nm。固定FBG-FP的所有峰值波长记录在表1中。可调谐FBG的参数:FBG周期536.095 nm,长度 $L_g=1$  mm, $n_{\text{eff}}=1.44676$ ,两个FBG的间距为11 mm, $C=0.5$ , $\Delta n=2.3 \times 10^{-3}$ ,波长扫描范围1550~1555 nm。图1(a),图1(b)所示(实线)为利用光谱仪(Ando AQ6317B)测量得到的固定FBG-FP和可调谐FBG-FP的透射谱,可以看出两个FBG-FP在1552~1553.5 nm和1551~1554 nm范围内都有多个谐振峰,平均FSR1和FSR2分别为96 pm和76.8 pm。由图1可知:除了实测透射谱幅度略有下降外,固定FBG-FP和可调谐FBG-FP各自透射谱的实测值与仿真值基本吻合。



(a) 固定FBG和可调谐FBG



(b) 测量透射谱(实线)和计算透射谱(虚线)

图1 固定FBG(a)和可调谐FBG(b)的测量透射谱(实线)和计算透射谱(虚线)

Fig. 1 measured (solid line) and calculated (dotted line) transmission spectra of tunable FBG-FP

表1 固定FBG-FP的计算和测量透射峰波长  
Tab. 1 calculated and measured peak wavelengths of the fixed FBG-FP

sequence of peaks	theoretical/nm	measured/nm
1	1552.2288	1552.240
2	1552.3252	1552.328
3	1552.4216	1552.418
4	1552.5184	1552.522
5	1552.6168	1552.622
6	1552.7152	1552.712
7	1552.8148	1552.812
8	1552.9132	1552.908

由于 $\text{FSR}_1/\text{FSR}_2 \approx 5/4$ ,则固定FBG-FP和可调谐FBG-FP级联可以构造出一个新的FSR增大、半高全宽(FWHM)减小且基于游标原理可调谐的滤波器<sup>[12]</sup>。对可调谐FBG-FP应力调谐的装置如图2所示,可调谐FBG-FP的一端固定在一个平台上,另一端紧紧地与弹簧的一端连接,以防止大的应力导致FBG-FP断裂。为了拉伸可调谐FBG-FP,弹簧的另一端系在精密移动台上,平台和移动

台的高度相同,以保证调谐的顺利进行。当对 FBG-FP 均匀拉伸时 FBG 和 FBG-FP 可视为具有同样的波长响应<sup>[13]</sup>。

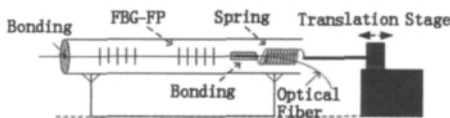


图2 可调谐 FBG-FP 的拉伸装置

Fig.2 the tuning setup for the tunable FBG-FP

FBG-FP 的半高全宽可写为<sup>[14]</sup>:

$$FWHM = \frac{\lambda^2}{2\pi nL} \frac{1-R}{\sqrt{R}}$$

其中  $\lambda$  是工作波长;  $n$  是光纤的折射率;  $R$  是 FBG 反射率  $R > 0.8$  时,有效长度  $L$  可写为<sup>[15]</sup>:

$$L \approx d + \lambda_B / (4\eta\Delta n) + \lambda_B / (4\eta\Delta n)$$

其中  $d$  是两个 FBG 的间距;  $\lambda_B$  是布拉格波长;  $\eta$  是  $LP_{01}$  模的重叠积分;  $\Delta n$  是 FBG 的调制折射率变化量。可调谐 FBG-FP 的两个 FBG 在可调谐范围内的反射率  $R > 0.9$ ,为强反射光栅,故 FWHM 较小。固定 FBG-FP 的 FBG 反射率相对较弱,FWHM 较大,两者级联后滤波器的 FWHM 由可调谐 FBG-FP 的 FWHM 决定。 $d = 11 \times 10^{-3} \text{ m}$ ,  $\lambda_B = 1551.2 \text{ nm}$ ,  $\eta = 0.80$ ,  $\Delta n = 2.3 \times 10^{-3}$  时可知  $L \approx 11.4 \text{ mm}$ 。当  $L \approx 11.4 \text{ mm}$ ,  $\lambda = \lambda_B = 1551.2 \text{ nm}$ ,  $R = 0.9$ ,  $n = 1.44676$  时,FWHM 最大值为  $2.44 \text{ pm}$ ,小于文献 [16] 给出的  $10 \text{ pm}$  线宽。

### 3 实验装置

光纤激光器的结构如图 3 所示,Isolator1 和 Isolator2 是两个光隔离器,保证光在环形腔中逆时针传输。泵浦激光二极管(LD)的中心波长是  $980 \text{ nm}$ ,  $980/1550 \text{ nm}$  波分复用器(WDM)是用来将泵浦光耦合到长度为  $2.3 \text{ m}$ 、用作增益介质的、在  $980 \text{ nm}$  处峰值吸收系数为  $17 \text{ dB/m}$  的高掺杂掺铒光纤中。采用反向泵浦的结构是为了降低残余的  $980 \text{ nm}$  泵浦光和 ASE 噪声,从而减小激光的输出不稳定性。环路中接入 AFR 公司的粗波分复用器(CWDM)作为粗选滤波器,其四个通道的滤波特性如图 4 所示。根据本实验要求应选用波长范围  $1552.1 \sim 1553.5 \text{ nm}$  的通道,其中心波长在  $1552.5 \text{ nm}$ ,平顶部分带宽约为  $0.8 \text{ nm}$ ,插入损耗约为  $1.5 \text{ dB}$ 。可调谐 FBG-FP 与固定 FBG-FP 级联,用来模式选择。

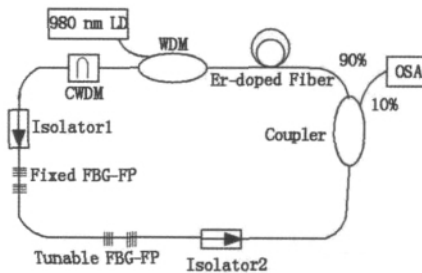


图3 基于双光纤布喇格光栅法布里-珀腔的环形激光器的实验装置

Fig.3 experimental setup of the fiber ring laser based on a pair of FBG-FPs

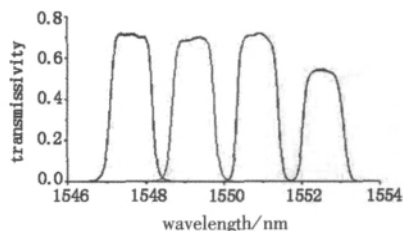


图4 CWDM 的透射谱

Fig.4 transmission spectra of CWDM

### 4 实验结果

实验中,根据游标原理,通过对可调谐 FBG-FP 应力调谐,可得到如图 5 所示的由固定 FBG-FP 的透射谱所决定,在  $1552.240 \sim 1552.912 \text{ nm}$  波长范围内,平均 FSR 为  $96 \text{ pm}$  的 8 个离散波长(output ①~⑧)。8 个输出波长的平均功率为  $-17.66 \text{ dBm}$ ,波动在  $0.7 \text{ dB}$  范围内。当泵浦光的功率为  $95 \text{ mW}$  的时候,输出信号的信噪比均大于  $50 \text{ dB}$ 。图 6 记录了输出波长为  $1552.912 \text{ nm}$  时,可调谐 FBG-FP 和固定 FBG-FP 的透射谱情况,由它可知:两个 FBG-FP 在此波长处两个峰值重合,激光输出,在其他波长处,峰峰值不重叠,无激光输出。为了研究激光器的稳定性,用光谱分析仪对波长为  $1552.912 \text{ nm}$  的激光输出自动地以  $1 \text{ min}$  为间隔进行记录,结果如图 7 所示,由它可知:波长的飘移为数皮米,功率波动小于  $0.1 \text{ dB}$ ,可认为输出稳定。

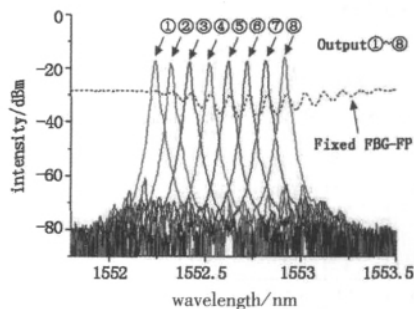


图5 可调谐激光器的透射谱

Fig.5 experimental spectra of the tunable laser

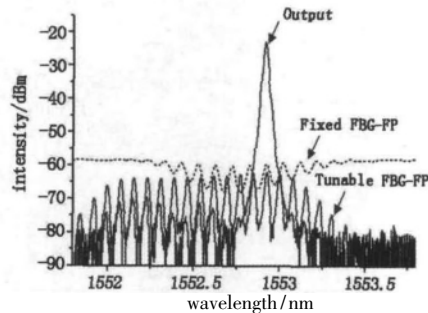


图6 激光器输出波长为1552.912 nm时激光器的透射谱

Fig. 6 the transmission spectra when the output laser is at 1552.912 nm

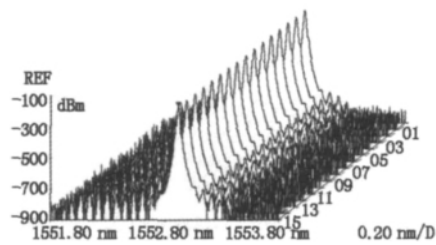


图7 激光器输出波长为1552.912 nm时以1 min为间隔的单波长输出的稳定性测量

Fig. 7 stability measurement of single-wavelength at 1552.912 nm with 1 minute interval

## 5 结论

利用可调谐FBG-FP和固定FBG-FP构成的新颖且基于游标原理可调谐的滤波器作为模式选择器件,设计了一种窄线宽、离散可调谐且输出稳定的环形光纤激光器。从理论和实验上研究了该激光器的特性。通过调谐在1552.24~1552.912 nm范围内得到了以96 pm为间距的8个离散可调谐波长,并研究了该激光器的稳定性。由于此激光器线宽较窄、调谐速率快且容易实现,在光纤通信和传感领域可能具有潜在的应用价值。

### 参考文献:

- [1] Gao Xuesong, Gao Chunqing, Song Xueyong, et al. Study on key technology of narrow-linewidth fiber laser [J]. *Laser & Infrared* 2006, 36(6): 441-444. (in Chinese)  
高雪松,高春清,宋学勇,等.窄线宽光纤激光器关键技术研究[J].*激光与红外* 2006, 36(6): 441-444.
- [2] Wu Bo, Liu Yongzhi, Dai Zhiyong, et al. Stable narrow linewidth Er-doped fiber laser at 1550 nm [J]. *Microw. Opt. Technol. Lett* 2007, 49(6): 1453-1456.
- [3] Xia Li, Shum P, Yan Min, et al. Tunable and switchable fiber ring laser among four wavelengths with ultranarrow wavelength spacing using a quadruple transmission band fiber Bragg grating filter [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett*, 2006, 18(19): 2038-2040.
- [4] Lü Changgui, Wang Zhuyuan, Yun Bin Feng, et al. Stable single frequency Er-doped all-fiber ring laser with fiber Bragg grating Fabry-Pérot filter [J]. *China. Opt. Lett*, 2005, 3(4): 212-214.
- [5] Zhou J L, Xia L, Cheng X P, et al. Photonic generation of tunable microwave signals by beating a dual-wavelength single longitudinal mode fiber ring laser [J]. *Appl. Phys. B: Lasers and Optics* 2008, 91(1): 99-103.
- [6] Dong Xiaopeng, Chen Yong. Novel discretely tunable narrow linewidth fiber laser with uniform wavelength spacing [J]. *Chin. Opt. Lett* 2007, 5(4): 218-220.
- [7] Han Younggeun, Fresi Francesco, Luca Poti, et al. Continuously spacing tunable multi-wavelength semiconductor optical amplifier based fiber ring laser incorporating a superimposed chirped fiber Bragg grating [J]. *Opt. Lett*, 2007, 32(9): 1032-1034.
- [8] Ja Y H. Optical vernier filter with fiber grating Fabry-Pérot resonators [J]. *Applied Optics* 1995, 34(27): 6164-6167.
- [9] Wang Xu, Yu Chongxiu, Yu Zhihui, et al. Tunable distributed back reflector all fiber laser based on vernier effect [J]. *Chinese Journal of Lasers* 2006, 33(2): 145-148. (in Chinese)  
王旭,余重秀,于志辉,等.基于游标原理的可调谐分布反射全光纤激光器[J].*中国激光*, 2006, 33(2): 145-148.
- [10] A Melloni, M Floridi, F Morichetti, et al. Equivalent circuit of Bragg gratings and its application to Fabry-Pérot cavities [J]. *J. Opt. Soc. Am. A* 2003, 20(2): 273-281.
- [11] S Legoubin, M Douay, P Bernage, et al. Free spectral range variations of grating-based Fabry-Pérot filters photowritten in optical fibers [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1995, 12(8): 1687-1694.
- [12] P A Humblet, W M Hamdy. Crosstalk analysis and filter optimization of single- and double-cavity Fabry-Pérot filters [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1990, 8(6): 1095-1107.
- [13] Ball G A, Morey W W. Continuously tunable single-mode erbium fiber laser [J]. *Opt. Lett*, 1992, 17(6): 420-422.
- [14] Guan Baiou, Yu Youlong, Ge Chunfeng, et al. Theoretical studies on transmission characteristics of fiber grating Fabry-Pérot cavity [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, 20(1): 34-38. (in Chinese)  
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.
- [15] L F Stoke, M Chodorow, H J Shaw. All single mode fiber resonator [J]. *Optics Letters*, 1982, 7(6): 288-290.
- [16] Wu Bo, Liu Yongzhi, Liu Shuang, et al. Single frequency fiber ring laser with mode selection by FBG F-P etalon [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(12): 1987-1990. (in Chinese)  
伍波,刘永智,刘爽,等.光纤光栅F-P标准具选模单频环形腔光纤激光器[J].*强激光与粒子束*, 2006, 18(12): 1987-1990.