

基于法布里-珀罗结构的光纤光栅功能型器件

董新永 孔令浚 赵春柳 金尚忠

(中国计量学院光学与电子科技学院, 浙江 杭州 310018)

摘要 基于法布里-珀罗(FP)结构的光纤光栅功能型器件的研制和应用是近年来光纤光栅领域研究方向细化后的一个热点,其在光纤通信、光纤传感等领域都具有重要的应用。综述了近几年 FP 结构光纤光栅功能型器件的研究进展,其中包括多波长滤波器、可调谐色散补偿器、分布布拉格反射(DBR)激光器、多参数传感器和高灵敏度超声水听器。

关键词 光纤光学;光纤布拉格光栅;法布里-珀罗干涉仪;滤波器;光纤传感;水听器

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.120604

Multifunctional Devices Based on Fiber Bragg Grating Fabry-Perot Structures

Dong Xinyong Kong Lingjun Zhao Chunliu Jin Shangzhong

(Institute of Optoelectronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China)

Abstract Optical fiber devices based on fiber Bragg grating Fabry-Perot structures have attracted considerable research interest in the recent years for their many important applications in optical communications and fiber-optic sensing areas. Their developments as multi-wavelength filters, tunable dispersion compensators, distributed Bragg reflection (DBR) lasers, multi-parameter sensors and high-sensitivity hydrophone have been reviewed.

Key words fiber optics; fiber Bragg grating; Fabry-Perot interferometer; filter; fiber-optic sensor; hydrophone

OCIS codes 060.2370; 060.3510; 060.3735

1 引言

基于光纤光栅(FBG)的各种功能型器件在最近 20 年里获得了飞速的发展,极大地推动了光纤通信和传感技术^[1,2]的发展。在这种大背景下,光纤光栅相关的研究领域进一步细化,应用化研究趋势明显,新型功能器件的研制备受重视。当前光纤光栅领域的研究热点被分散到很多具体的领域,如基于新型光纤(如光子晶体光纤)的光栅的研制、新的写入方法(如利用飞秒激光器写入)、光纤光栅传感器的大型组网技术和工程化应用技术研究等。针对不同的具体应用开展的功能型器件(包括传感器)的研究,如可调谐/多通道光纤光栅色散补偿器、色散斜率补偿器、光纤光栅生物探针和光纤光栅激光器^[3,4]等,更是越来越广泛和深入。

基于法布里-珀罗(FP)结构的光纤光栅功能型器件是近年来受到颇多关注的一类具有重要应用前景的光纤器件,基于此种结构的无源光纤光栅作为性能优异的窄线宽滤波器^[5,6],可以用于光纤通信系统中作为波长选择器件^[7]和色散补偿器^[8,9],也可用于应变/温度同时测量等光纤传感领域^[10];有源光纤光栅可以作为超短腔分布式布拉格反射(DBR)光纤激光器产生窄线宽单模激光输出^[11~13],是理想的激光光源和高信噪比的有源传感单元^[14],而利用光栅写入产生的微小双折射效应使其同时工作在两个偏振态,可产生正交双频输出,用光电探测器测量产生的拍频信号被用作一类崭新的光纤传感器,可以测量应变、温度、压力和用于超声水听器等^[15~17]。

FP 结构光纤光栅器件的突出特点是功能多。它们的形式多变,除了组成 FP 腔的两个光纤光栅的参数

收稿日期: 2011-05-31; 收到修改稿日期: 2011-08-16; 网络出版日期: 2011-10-17

基金项目: 国家自然科学基金(60807021)和浙江省自然科学基金(R1080087)资助课题。

作者简介: 董新永(1975—),男,博士,研究员,主要从事光纤激光器、光纤光栅和光纤通信等方面的研究。

E-mail: xydong@cjlue.edu.cn

可变外,它们比一般光纤光栅器件多出的干涉腔的参数也可以变。通过改变这些参数,可以衍生出很多独特的设计和功能,譬如在光纤上重叠写入宽带的啁啾光栅可以得到性能优异的多波长滤波器^[18,19],在高掺杂的有源光纤上写入同样的光栅结构则可以得到多波长激光输出^[20],改变干涉腔部分光纤的直径可以实现应变和温度的同时测量^[21]等。另外光纤光栅的波长和啁啾率可以通过应变和温度来改变,由此又可以使这类器件具有多参数可调谐的功能^[22,23],或者可以用于新型的传感单元^[24~27]。因此,对FP结构光纤光栅器件的研究能够为光纤通信和光纤传感系统的发展提供许多新颖的功能型器件,对光纤光栅应用技术的开发和应用具有重要的意义。

本文回顾了近年来基于FP结构的光纤光栅功能型器件的研究进展,按照其功能将其分为多波长滤波器、可调谐色散补偿器、应变温度等多参量传感器(包括高灵敏度超声水听器)、多波长激光器等多个类别,并逐一进行了整理综述。

2 FP结构光纤光栅功能型器件的种类

2.1 FP结构光纤光栅滤波器

FP结构光纤光栅滤波器是由两个反射波长一致的光纤光栅间隔一定的距离构成的,两个光纤光栅具有一定的反射率,充当FP腔的两个反射镜,中间的光纤构成谐振腔,其结构如图1(a)所示。入射光在两个光纤光栅构成的谐振腔的作用下,形成干涉滤波,其典型透射光谱如图1(b)所示。其透射率在光纤光栅反射的波长范围内具有明显的周期性结构,其自由光谱范围(FSR)由两个光栅的中心距离 L 和纤芯的折射率 n 决定

$$R_{FS} = \frac{\lambda^2}{2nL},$$

式中 λ 为波长。

与传统的FP标准具相比,FP结构光纤光栅滤波器具有插入损耗低、集成度高、可灵活弯曲和不需要校准腔镜等优点,但其滤波范围受光栅反射带宽的限制(普通光纤布拉格光栅的反射带宽小于0.5 nm),通常不能覆盖较宽的范围。另外,滤波范围之外的光也会透过滤波器,对滤波性能造成不利影响,可采用匹配光纤光栅反射结合光纤环行器的方法来消除^[28]。

为增加FP结构光纤光栅滤波器的滤波范围,1995年英国Aston大学的Town等^[18]用啁啾光纤布拉格光栅(CFBG)重叠错位写入的方法获得了分布式的FP结构光纤光栅滤波器。其结构图及原理图如图2所示,两

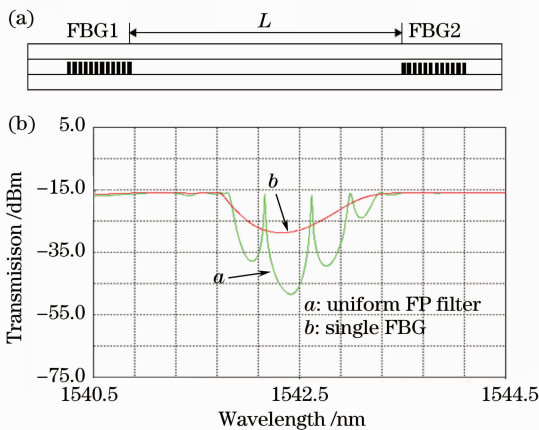


图1 FP结构光纤光栅滤波器示意图(a)和透射谱曲线(b)

Fig.1 (a) Schematic diagram and (b) transmission spectrum of the FP filter

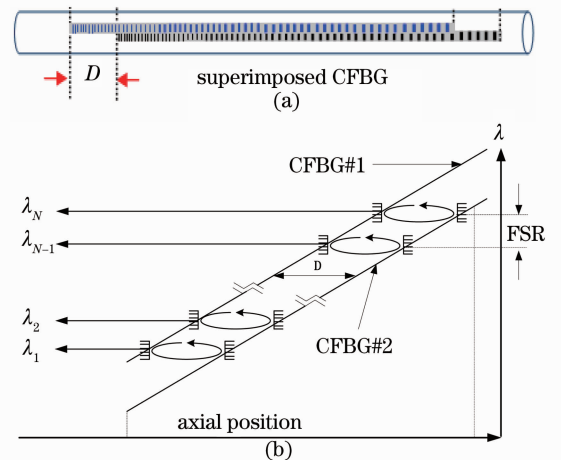


图2 FP结构重叠写入啁啾光纤光栅滤波器的结构图(a)及原理图(b)

Fig.2 (a) Structure diagram and (b) schematic diagram of the superimposed CFBG filter

个参数完全一致的啁啾光纤光栅错位距离 D (D 小于光栅长度) 写入同一段光纤, 形成的 FP 腔随波长变化构成分布式结构。由原理图可见, 形成的分布式 FP 腔的腔长即为 D , 所以改变 D 即可获得不同的 FSR。此结构大大拓宽了这种滤波器的滤波范围(可达 140 nm), 通道数获得极大提升, 其透射谱如图 3 所示。

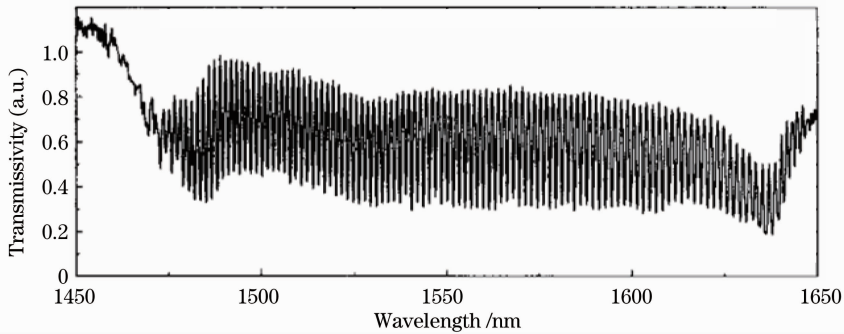


图 3 宽光谱 FP 结构重叠写入啁啾光纤光栅的滤波器透射谱

Fig. 3 Wide-band transmission spectrum of the superimposed CFBG FP filter

受光栅写入精度和切趾技术的限制, 重叠写入啁啾光纤光栅滤波器存在透射率不一致、插入损耗大、通道间隔不一致等问题。2002 年, 加拿大 Lavel 大学报道了 FSR 为 100 GHz 的 FP 结构啁啾光纤光栅滤波器^[29], 在 26 nm 范围内得到了精细度达 240 的多波长滤波器, 并研究了精细度等对滤波性能的影响。研究证实, 在精细度为 80 的情况下, 该滤波器性能尚可, FSR 的不均匀度小于 $\pm 3\%$, 过高的精细度将引起大的插入损耗(大于 3 dB)并增加 FSR 的不均匀度。

2006 年, 新加坡南洋理工大学的 Dong 等^[22]首次实现了对这种多波长 FP 结构啁啾光纤光栅滤波器的 FSR 的连续调谐, 实验原理及装置如图 4 所示。将 FP 结构啁啾光纤光栅滤波器斜向粘贴在直角三角形悬臂梁的直角侧面上, 当悬臂梁的自由端发生偏移(即挠度变化)时, 悬臂梁发生曲率一致的弯曲, 其应变作用于光纤光栅, 致使其啁啾率变化, 引起 FP 腔结构的腔长发生一致变化, 最后改变了滤波器的 FSR。在啁啾率减小、不变和变大三种情况下, 实验分别获得 FSR 为 0.30, 0.41 和 0.60 nm 的透射谱, 如图 5 所示。基于此设计的 FP 结构光纤光栅滤波器还被成功应用于波长间隔可调谐光纤激光器的研究^[23,30,31]。

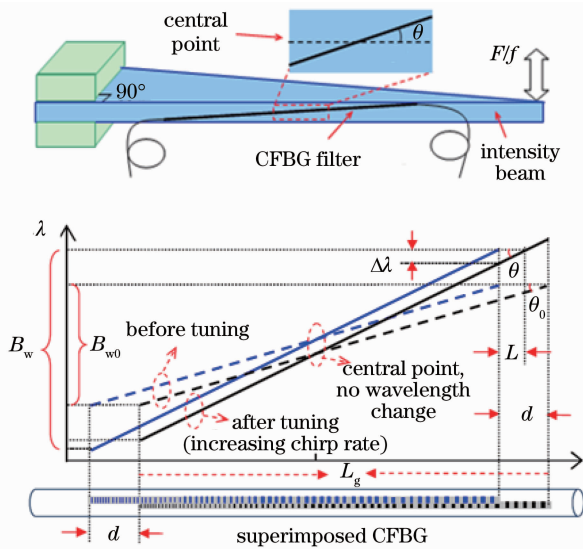


图 4 FSR 可调的 FP 结构啁啾光纤光栅滤波器的结构图(a)及工作原理图(b)

Fig. 4 (a) Structure diagram and (b) schematic diagram of the FSR tunable CFBG filter

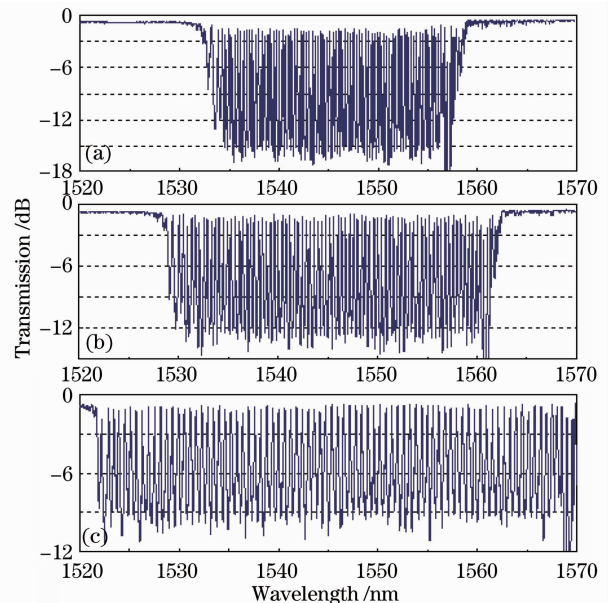


图 5 FSR 为(a) 0.30 nm, (b) 0.41 nm, (c) 0.60 nm 的 FP 结构啁啾光纤光栅滤波器的透射谱
Fig. 5 Transmission spectra of the FSR tunable filters with FSRs of (a) 0.30 nm (b) 0.41 nm (c) 0.60 nm

2.2 FP 结构光纤光栅色散补偿器

2004年, Yang等^[8]研究发现, 基于FP结构的光纤光栅可以被用于光纤的色散补偿, 用244 nm的紫外光照射载氢光纤, 间隔1.1 mm写入两个长度为0.5 mm, 反射率为4.57 dB, 带宽为1.95 nm的均匀光纤光栅, 构成FP腔结构, 其反射谱及色散曲线如图6所示。在有效带宽内形成了4个通道, 色散呈周期性变化, 且每个通道内的色散都是线性的。作为色散补偿器来说, 虽然它存在色散补偿值小、线性度不高、带宽窄等不足, 但与基于啁啾光纤光栅的色散补偿器相比, 它成本低、容易制备, 而且是透射型器件, 不需要结合环形器使用即可直接接入光路。另外, 它可以同时进行色散补偿和色散斜率补偿, 调谐方式也更简单易行, 只需要施加应变使其波长移动就可以实现^[32]。

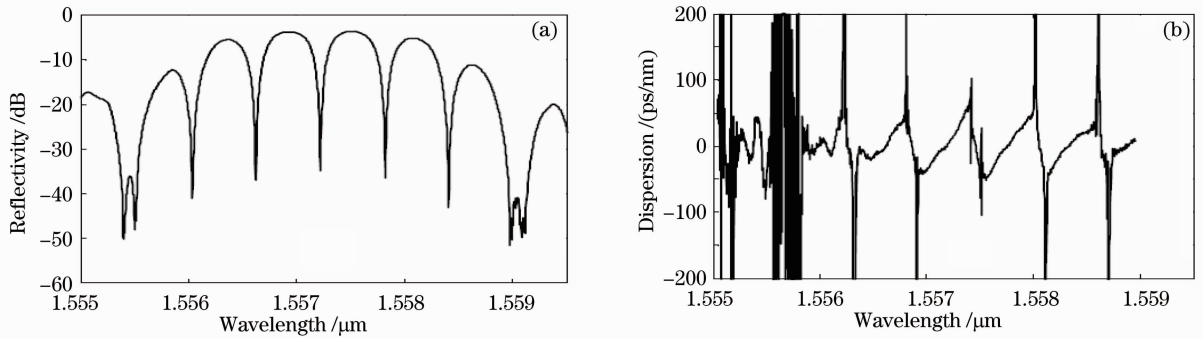


图6 FP结构光纤光栅的反射谱(a)和色散图(b)

Fig. 6 (a) Reflection spectrum and (b) chromatic dispersion of the FBG FP structure

利用啁啾光纤光栅的高反射带宽, 可以有效地增加对色散的补偿波长范围。英国的Aston大学Shu等^[9]研究了基于啁啾光栅的Gires-Tournois结构(FP结构的一个变种)滤波器的色散特性。在该工作中, 作者将一个强啁啾光纤光栅和一个弱啁啾光纤光栅重叠写入在光纤同一位置, 实验发现其具有大的多通道色散补偿能力。

2.3 FP结构光纤光栅激光器

基于FP结构的光纤光栅激光器, 也称分布式布拉格反射光纤激光器或光纤光栅FP激光器, 通过在掺杂稀土离子的有源光纤上写入两个波长一致的光纤光栅作为激光器的两个腔镜, 并间隔一定的距离使中间的光纤成为增益介质, 通过控制光纤光栅的带宽和激光器的腔长, 在980或1480 nm激光抽运下, 可以实现单纵模的窄线宽激光输出^[11~13, 33~36], 其结构如图7所示。这种激光器具有体积小、与通信光纤兼容、噪声低和单频性好等优点。经在10 Gb/s级通信系统中实验, 其传输性能完全可以与半导体激光器相媲美^[37], 而且结构简单、温度稳定性高和调谐范围更广^[12]。

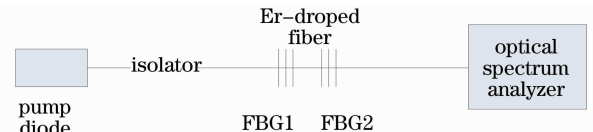


图7 FP结构的光纤光栅激光器

Fig. 7 Laser based on FBG FP structure

1991年, Ball等^[11]用双紫外光束干涉的方法在掺铒光纤上间隔0.5 m写入两个波长一致的光栅, 采用980 nm激光端抽运的方式, 获得了单模激光输出, 线宽小于47 kHz。但是由于受浓度猝灭和激光自脉冲效应的限制, 掺铒光纤的掺杂浓度不能太高, 造成激光器腔长长、输出功率低(斜率效率小于1%)。

1994年, 英国南安普顿大学的Kringelbotn等^[38]在铒镜共掺的光纤两端熔接光纤光栅对, 成功地将腔长缩小到了厘米量级。铒镜共掺光纤在980 nm处的吸收比普通掺铒光纤高出2个量级, 因此铒离子的浓度可以维持在较低的水平, 有助于避免激光器的自脉冲效应。1997年, 英国南安普顿大学的Dong等^[39]成功地制作了具有光敏性的铒镜共掺光纤, 并在此光纤上直接写入光栅对, 获得了阈值为4 mW、斜率效率高于20%的激光器。2004~2005年, 加拿大Lavel大学的Brochu等^[20, 40]用重叠写入啁啾光纤光栅的方法发展出多波长光纤激光器, 在8 cm长的铒镜共掺光纤上分别实现了8个和16个波长的输出。2008年, Kim等^[41]用同样的方法实现了50个波长通道的激光输出, 通道间隔为101.62 GHz, 其输出谱如图8所示。

2.4 FP 结构光纤光栅传感器

基于 FP 结构的光纤光栅传感器在近年获得很大的发展,除了传统的物理参量如应变、温度等的测量方面得到应用,它在超声水听器方面的应用也获得了很大成功。

FP 结构光纤光栅除了具有光纤光栅的传感特性,其 FP 腔也可以被用作传感,从而达到传统光纤光栅所不能获得的传感性能,如温度和应变的同时测量。1999 年,香港理工大学的 Du 等^[10,21]先后报道了两种基于 FP 结构的光纤光栅传感器,用于对温度和应变的同时测量,其传感头设计如图 9 所示。第一种结构采用铝套管包覆光纤 FP 腔体部分,第二种结构采用熔融拉锥的方法使 FP 腔中间光纤变细。两种方法的目的是使 FP 腔与两端的光纤光栅具有不同的应变和温度响应灵敏度。实验中通过监测反射谱中因干涉而分裂出来的两个峰的波长以及它们的强度差,就可以计算出温度和应变。

基于 FP 结构的啁啾光纤光栅也可以被用于传感。2006 年,电子科技大学的饶云江等^[24]进行了此项研究,并提出了基于 FP 结构啁啾光纤光栅的传感波分复用 WDM/FDM 系统,其结构如图 10 所示。复用原理如下:波分复用采用不同中心波长的 FP 结构啁啾光纤光栅来实现,频分复用采用不同腔长(对应不同空间频率)来实现。实验结果表明,该方法可以大大地提高 FP 结构光纤光栅传感器的复用能力,理论上可达数百个传感头。西北工业大学的沈震强等^[25]也对这种传感方案进行了理论和实验研究,并提出了利用自相关分析实现频分复用传感器系统信号解调的方案。

FP 结构光纤光栅激光器也可用于多种参量的传感。2005 年,香港理工大学的 Guan 等^[16]将其应用于高频水听器,探测范围可达 40 MHz,该水听器的结构如图 11 所示。由于光纤固有的残余双折射效应,FP 结构光纤光栅激光器为正交偏振双波长输出,两个偏振态的波长不同但是差别很小,在光电探测器上显示的拍频结果约为 1 GHz,不同声波频率和电压下 FP 结构光纤光栅激光器的拍频谱如图 12 所示。水中的高频超声场所产生的侧向压力波周期性地改变光纤的双折射系数,对该拍频产生调制作用,调制的结果是在拍频的两侧

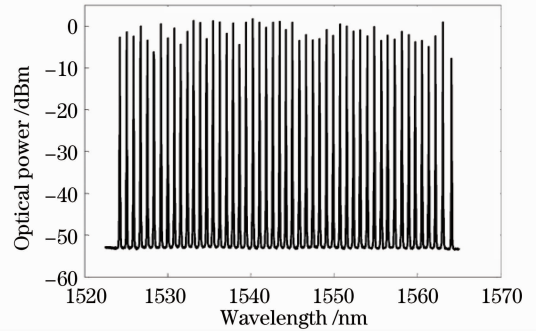


图 8 FP 结构光纤光栅多波长激光器的输出谱
Fig. 8 Transmission spectrum of the multi-wavelength laser based on FBG FP structure

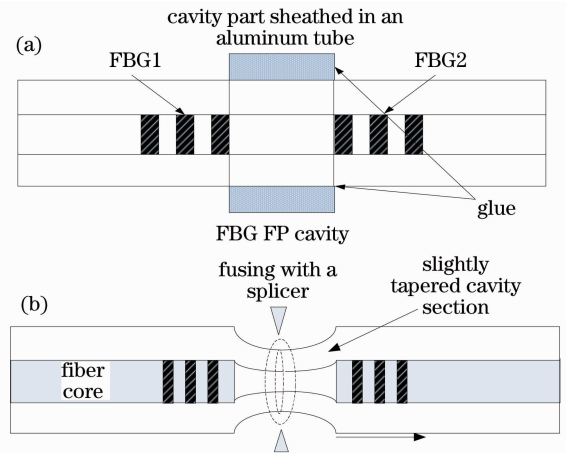


图 9 (a)腔长部分附着铝套管和(b)熔融拉锥腔长的 FP 结构光纤光栅传感器示意图
Fig. 9 (a) Schematic diagram of FBG FP sensors a with cavity sheathed in an aluminum tube and (b) with cavity fused with a splicer

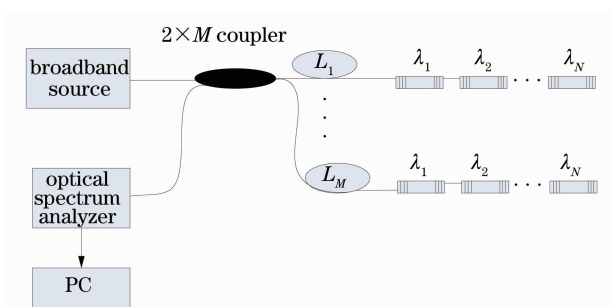


图 10 FP 结构啁啾光纤光栅传感器波分复用系统
Fig. 10 WDM/FDM system based on CFBG-FP sensors

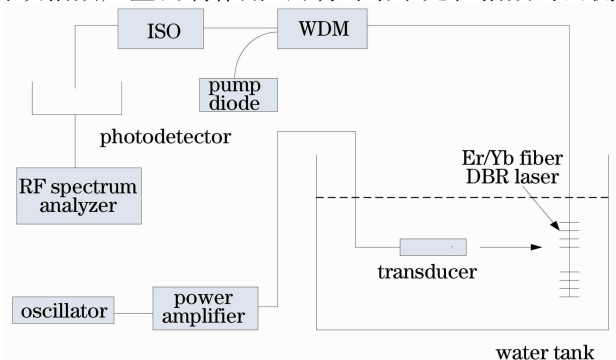


图 11 基于 FP 结构光纤光栅激光器的水听器
Fig. 11 Hydrophone based on FBG FP laser

产生边模,主频和边模的频率间隔即为超声波的频率,强度差则反映了超声波的强度,这就是 FP 结构光纤光栅激光水听器的工作原理。另外,通过化学腐蚀将光纤包层变薄,可提高该水听器的空间分辨率和频率响应范围^[17]。

另外,利用 FP 结构光纤光栅激光器还可以实现对温度和应变或横向压力(负载)的同时测量^[14,15,42]。当应变和温度发生改变时,激光器的波长和拍频都会发生改变,而且具有不同的响应,同时测量波长和拍频,通过计算就可实现对应变和温度的同时测量。横向压力则直接改变光纤的双折射系数,导致激光器拍频的变化,而对激光波长影响很小,因此也可以通过同时测量激光器的波长和拍频实现对横向压力和温度的同时测量。

利用紫外光照射 FP 结构光纤光栅激光器的腔长部分,可以改变其双折射系数,从而获得拍频的改变。当紫外光照射方向与快轴方向一致时,双折射效应变小,拍频减小;当紫外光照射方向与慢轴方向一致时,双折射效应变大,拍频增大。2011 年,Zhang 等^[43]首次采用该方法实现了单个 FP 结构光纤光栅激光器的拍频在 478~617 MHz 范围内的改变。利用该方法,他们成功地实现了该种传感器的频分复用,在一根光纤上串联了 6 个不同拍频的 FP 结构光纤光栅激光器进行传感应用。

3 结 论

基于 FP 结构的光纤光栅功能型器件形式多样、用途广泛,具有许多优点和重要的应用前景。目前国内外对该类器件的研究多侧重于其单一方面,缺乏足够的深度和系统性,而这类器件无论在理论分析上还是在实验制备上都具有天然的共性,因此还有很多领域等待我们去开拓。深入研究基于 FP 结构的光纤光栅功能型器件对于光纤应用技术(特别是光纤通信和光纤传感)的推广具有重要的推动作用。随着性能的不提高和功能的不断扩展,基于 FP 结构的光纤光栅功能型器件将得到更广泛的应用。

参 考 文 献

- Li Lan, Dong Xinyong, Zhao Chunliu *et al.*. Research and development of intensity-demodulated fiber Bragg grating sensors [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(9): 090603
李 岚,董新永,赵春柳等. 强度解调型光纤布拉格光栅传感器的研究及进展[J]. 激光与光电子学进展, 2010, **47**(9): 090603
- Ni Jiasheng, Chang Jun, Wang Chang *et al.*. Fiber humidity detection system based absorption method[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(8): 082802
倪家升,常 军,王 昌等. 吸收式光纤湿度检测系统的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2010, **47**(8): 082802
- Feng Suchun, Xu Ou, Lu Shaohua *et al.*. Multi-wavelength erbium-doped fiber laser using polarization-maintaining fiber Bragg gratings in symmetrical linear cavities[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1886~1889
冯素春,许 鸥,鲁韶华等. 基于保偏光纤光栅的对称腔多波长掺铒光纤激光器[J]. 中国激光, 2009, **36**(7): 1886~1889
- Li Jian, Liu Peng, Wang Jing *et al.*. Experiment study on a tunable fiber laser using optical circulator and tunable fiber Bragg gratings[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(5): 1047~1050
李 坚,刘 鹏,王 静等. 以环行器和光纤光栅为腔镜的可调谐窄线宽激光器[J]. 中国激光, 2009, **36**(5): 1047~1050

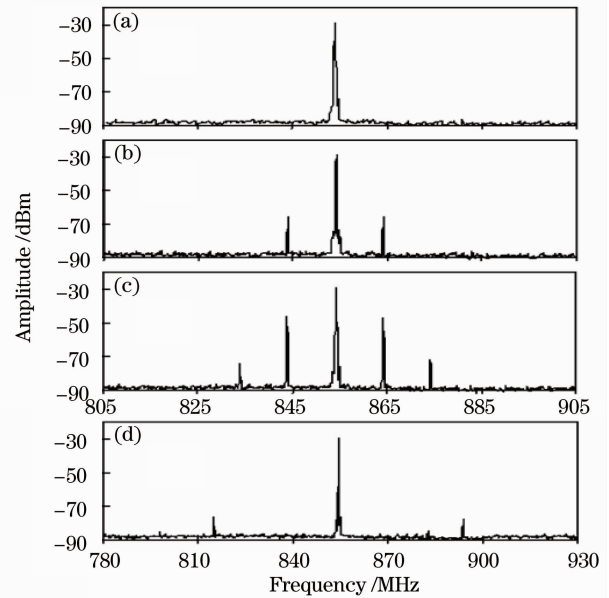


图 12 不同声波频率和电压下的 FP 结构光纤光栅激光器的拍频谱。(a)没有声波驱动;(b)电压 0.1 V, 频率 10 MHz; (c) 电压 1.0 V, 频率 10 MHz; (d) 电压 8.5 V, 频率 40 MHz

Fig. 12 Beat frequencies of the FP laser under different acoustic wave frequencies and voltages. (a) Without acoustic wave; (b) voltage 0.1 V, frequency 10 MHz; (c) voltage 1.0 V, frequency 10 MHz; (d) voltage 8.5 V, frequency 40 MHz

- 5 Guan Baiou, Yu Youlong, Ge Chunfeng *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
- 6 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): 143~150
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): 143~150
- 7 X. Dong, P. Shum, Z. Xu *et al.*. Spacing-tunable multiwavelength fiber laser with a fiber grating-based Fabry-Pérot filter [C]. LEOS, 2005, 813~814
- 8 X. Yang, C. Zhao, J. H. Ng *et al.*. Simultaneous dispersion slope compensation for WDM channels using a Fabry-Perot etalon formed by double FBGs[J]. *Opt. Commun.*, 2004, **231**(1-6): 227~231
- 9 X. Shu, K. Sugden, K. Byron. Bragg-grating-based all-fiber distributed Gires-Tournois etalons[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(11): 881~883
- 10 W. Du, X. Tao, H. Y. Tam. Fiber Bragg grating cavity sensor for simultaneous measurement of strain and temperature [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(1): 105~107
- 11 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
- 12 G. A. Ball, W. W. Morey. Continuously tunable single-mode erbium fiber laser[J]. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(6): 420~422
- 13 J. L. Zyskind, V. Mizrahi, D. J. Digiovanni *et al.*. Short single frequency erbium-doped fibre laser[J]. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(15): 1385~1387
- 14 L. Y. Shao, X. Dong, A. P. Zhang *et al.*. High-resolution strain and temperature sensor based on distributed-Bragg-reflector fiber laser[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(20): 1598~1600
- 15 L. Y. Shao, X. Dong, H. Y. Tam. Transverse-load sensor based on a distributed Bragg reflector fiber laser [C]. Optical Fiber Communication and Optoelectronics Conference, 2007, 136~138
- 16 B. O. Guan, H. Y. Tam, S. T. Lau *et al.*. Ultrasonic hydrophone based on distributed Bragg reflector fiber laser[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(1): 169~171
- 17 L. Y. Shao, S. T. Lau, X. Dong *et al.*. Ultrasonic hydrophone based on etched distributed-Bragg-reflector fiber laser [C]. OECC/IOOC2007, 2007, 133~135
- 18 G. E. Town, K. Sugden, J. Williams *et al.*. Wide-band Fabry-Perot-like filters in optical fiber[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1995, **7**(1): 78~80
- 19 R. Slavik, S. Doucet, S. LaRochelle. High-performance all-fiber Fabry-Pérot filters with superimposed chirped Bragg gratings[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(4): 1059~1065
- 20 G. Brochu, S. LaRochelle, R. Slavik *et al.*. Modeling and experimental demonstration of ultracompact multiwavelength distributed Fabry-Pérot fiber lasers[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(1): 44~53
- 21 W. Du, X. Tao, H. -Y. Tam. Temperature independent strain measurement with a fiber grating tapered cavity sensor[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(5): 596~598
- 22 X. Dong, P. Shum, C. C. Chan *et al.*. FSR-tunable Fabry-Pérot filter with superimposed chirped fiber Bragg gratings[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(1): 184~186
- 23 Y. G. Han, X. Dong, C. S. Kim *et al.*. Flexible all fiber Fabry-Perot filters based on superimposed chirped fiber Bragg gratings with continuous FSR tunability and its application to a multiwavelength fiber laser[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(6): 2921~2926
- 24 Rao Yunjiang, Zhou Changxue, Ran Zengling *et al.*. SFDM/WDM for large number of fiber-optic F-P sensors based on chirped fiber Bragg gratings[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(5): 631~635
饶云江, 周昌学, 冉曾令 等. 啁啾光纤光栅法布里-珀罗传感器波分复用[J]. 中国激光, 2006, **33**(5): 631~635
- 25 Shen Zhenqiang, Zhao Jianlin, Zhang Xiaojuan. Frequency-division multiplexing technique of fiber grating Fabry-Pérot sensors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(7): 1173~1177
沈震强, 赵建林, 张晓娟. 光纤光栅法布里-珀罗传感器频分复用技术[J]. 光学学报, 2007, **27**(7): 1173~1177
- 26 Li Jiafang, Lu Kecheng, Han Qun *et al.*. Theoretical studies on a novel sensor system with fiber grating Fabry-Perot cavity [J]. *Optoelectronic Technology*, 2004, **24**(1): 21~31
李家方, 吕可诚, 韩 群 等. 基于光纤光栅 FP 腔的一种新颖传感系统的理论研究[J]. 光电子技术, 2004, **24**(1): 21~31
- 27 Chen Chao. An Optical Fiber Current Sensor Utilizing Twin Fiber Bragg Grating Fabry-Perot Interferometer[D]. Xi'an:

Northwestern Polytechnical University, 2007

陈超. 光纤光栅内腔式法布里-珀罗电流传感器研究[D]. 西安:西北工业大学, 2007

- 28 J. R. Capmany, R. I. Laming, D. N. Payne *et al.*. A novel highly selective and tunable optical band-pass filter using a fiber grating and a fiber Fabry-Perot[J]. *Microwave and Opt. Technol. Lett.*, 1994, **7**(11): 499~501
- 29 S. Doucet, R. Slavik, S. LaRochelle. High-finesse large band Fabry-Perot fiber filter with superimposed chirped Bragg gratings[J]. *Electron. Lett.*, 2002, **38**(9): 402~403
- 30 X. Dong, P. Shum, N. Q. Ngo *et al.*. Multiwavelength Raman fiber laser with a continuously-tunable spacing[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(8): 3288~3293
- 31 Y. G. Han, F. Frecci, F. Poti *et al.*. Continuously spacing-tunable multiwavelength semiconductor-optical-amplifier-based fiber ring laser incorporating a superimposed chirped fiber Bragg grating[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(9): 1032~1034
- 32 J. Zhang, P. Shum, N. Q. Ngo *et al.*. A FBG etalon in transmission based tunable dispersion slope compensator[J]. *Opt. Commun.*, 2004, **241**(1-3): 113~119
- 33 Wu Bo, Liu Yongzhi, Zhang Qianshu *et al.*. High efficient narrow line-width fiber laser based on fiber grating Fabry-Perot cavity[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(3): 350~353
- 伍波, 刘永智, 张谦述等. 基于光纤光栅法布里-珀罗腔的高效窄线宽光纤激光器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(3): 350~353
- 34 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
- 35 Xue Yiyuan, An Honglin, Fu Libin *et al.*. Narrow-line-width 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
- 36 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
- 37 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
- 38 J. T. Kringlebotn, P. R. Morkel, L. Reekie *et al.*. Efficient diode-pumped single-frequency erbium-ytterbium fiber laser[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1993, **5**(10): 1162~1164
- 39 L. Dong, W. H. Loh, J. E. Caplen *et al.*. Efficient single-frequency fiber laser with novel photosensitive Er/Yb optical fibers[J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(10): 694~696
- 40 R. Slavik, I. Castonguay, S. LaRochelle *et al.*. Short multiwavelength fiber laser made of a large-band distributed Fabry-Pérot structure[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(4): 1017~1019
- 41 Y. Kim, S. Doucet, S. LaRochelle. 50-channel 100-GHz-spaced multiwavelength fiber lasers with single-frequency and single-polarization operation[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(20): 1718~1720
- 42 Guan Bai-Ou, Zhang Yang, Zhang Li-Wei *et al.*. Electronically tunable microwave frequency generation based on dual-polarization fiber grating laser [C]. OFC 2009, 2009, JWA54
- 43 Yang Zhang, Yan-Nan Tan, Tuan Guo *et al.*. Beat frequency trimming of dual-polarization fiber grating lasers for multiplexed sensor applications[J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(1): 218~223