

基于可调铒纤激光器的温度测量系统研究

武永久¹, 李小方¹, 王旭², 刘玉芳^{1*}

(1. 河南师范大学 物理与材料科学学院, 河南 新乡 453007;

2. 河南师范大学 电子与电气工程学院, 河南 新乡 453007)

摘要: 实验研究了基于分布式布拉格反射镜 (Distributed Bragg Reflectors, DBR) 光纤激光器结构的光纤光栅传感系统, 采用可调光纤法布里-珀罗 (Fabry-Perot, F-P) 滤波器和光纤环行器构成的可调反射腔镜对传感光栅进行波长扫描, 实现了对光纤光栅温度的传感解调。与采用宽带光源、可调光纤 F-P 滤波器的光纤光栅温度传感解调系统进行了对比研究。实验结果表明, 采用可调光纤激光器传感解调的温度测量系统具有解调速度更快, 系统稳定性更强的优点。

关键词: 光纤激光器; 可调法布里-珀罗滤波器; 光纤布喇格光栅; 传感解调

中图分类号: TN929 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-5561(2018)05-0024-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2018.05.007

Research on temperature measuring system based on tunable erbium-doped fiber laser

WU Yongjiu¹, LI Xiaofang¹, WANG Xu², LIU Yufang^{1*}

(1. School of Physics and Materials Science, Henan Normal University,

Xinxiang Henan 453007, China; 2. School of electronic and

electrical engineering, Henan Normal University, Xinxiang Henan 453007, China)

Abstract: In this paper, the fiber Bragg grating sensing system based on DBR (Distributed Bragg Reflectors) fiber laser has been established in the experiment. The adjustable mirror of the system combines adjustable fiber Fabry-Perot (F-P) filter with circulator. Which the sensing grating was scanned by the adjustable mirror, finally implemented the sensing demodulation of fiber Bragg grating temperature. Another fiber Bragg grating sensing system based on broadband light sources and adjustable fiber Fabry-Perot filter also has been established and carried on the comparative study. The results show that the tunable fiber laser with sensing demodulation of temperature measuring system has the advantages of fast demodulation speed and stable system stability.

Key words: fiber laser; adjustable Fabry-Perot filter; fiber Bragg grating; sensing demodulation

0 引言

随着掺杂光纤放大技术和激光技术的快速发展, 铒纤激光器因可用带宽较宽、光束质量好、阈值低、转换效率高、光功率高、谱线宽度窄以及与光纤元件天然兼容等优势^[1,2]成为研究的热点。目前, 铒纤激光器

的研究工作主要集中在光纤通信领域, 由于受设计方案、调谐方法等因素的限制, 在光纤传感中的运用研究相对较少。光纤布喇格光栅 (FBG) 具有可靠性高、测量对象范围广、抗电磁干扰、传感信息波长编码、易于波分复用及传输距离远等优点^[3,4], 是光纤传感领域中使用最多的传感器件。在以往的 FBG 传感系统研究工作中, 传感系统所使用的光源多是宽带光源, 然而这种光源的信噪比不高且反射谱的带宽较宽, 导致中心波长的信号解调速度普遍较低。利用光纤光栅的窄带高反特性, 易于构成光纤激光器, 实现高灵敏度的光

收稿日期: 2018-01-26。

基金项目: 国家自然科学基金 (61475043) 资助; 河南省教育厅科学技术研究重点项目 (14A416001) 资助。

作者简介: 武永久 (1991-), 男, 硕士, 主要研究方向为布喇格光栅传感特性与光纤激光器优化设计。

* 通信作者: 刘玉芳 (E-mail: yf-liu@htu.cn)。

纤传感。2009年,Zhang等人提出了一套高灵敏分布的布喇格反射激光传感系统^[5],获得了灵敏度高达0.402GHz/mm的位移传感测量。2012年,Jin等人将双偏振光纤光栅激光器应用于温度测量中,实现了灵敏度为-78.46kHz/℃的温度高灵敏测量^[6]。2015年,Leandro等人提出了一种新型的光纤激光传感系统,只利用一个波长的激光器,实现对应力和温度的高灵敏度测量^[7]。

本文分析铒纤激光器的阈值条件^[8]、掺铒光纤(EDF)的增益特性^[9]以及F-P腔的滤波工作特性^[10],设计一套基于可调铒纤激光器的中心波长解调方法,与F-P腔匹配滤波法的温度测量系统进行对比研究。

1 基于铒纤激光器的温度测量系统

基于铒纤激光器的温度测量系统原理如图1所示。由于压电陶瓷的蠕变性导致的非线性和F-P滤波器的电滞效应,需要选取一个波长标识。实验中,采用中心波长为1545nm、反射率为0.95的光纤光栅(FBG1)作为测温系统的参考定标光栅。控温系统选用温度范围20℃~200℃、精度0.1℃的鼓风干燥箱。放置在鼓风干燥箱中的FBG2,其反射率为0.95、中心波长为1550nm;为了消除应力对实验的干扰,对其进行补偿性的封装。光电探测器(PD)对解调后的光信号进行实时的监控和采集。光纤环形器和F-P滤波器构成一个可调反射腔镜,与FBG2共同构成铒纤激光器的光学谐振腔,为光子提供反馈的空间。掺铒光纤由Nufern提供,型号为EDF-C-980-HP,作为工作物质产生具有能量的光子,其长度为6m,波长为980nm时吸收系数为12dB/m,掺杂浓度大约为 1.2×10^{-25} 。泵浦光源型号为980-600-B-FBG,作为外界的刺激能源,激励光子跃迁。光纤耦合器一方面能提高光的利用率,另一方面将形成的激光信号输送到PD端,其分光比为1:99,插入损耗分别为20.80dB和0.06dB。铒纤激

光器回路中加入可调谐F-P滤波器能形成波长反馈,可以控制铒纤激光器的激射波长,实现波长的调谐目的。实验中的F-P滤波器由MOL公司生产,自由光谱范围为28nm、腔镜反射率为0.94、带宽为0.2nm;由两个高反射率的、严格平行的平面反射镜组成,其中一个固定不动,另一个端面紧贴压电陶瓷,电压驱动下紧贴压电陶瓷的平面反射镜可以自由地移动。驱动电源是普源精电生产的型号为DP834A,其电压调节范围为0~30V、精度为1mV。

1.1 FBG传温原理和F-P腔滤波机理

FBG是纤芯折射率均匀变化形成的空间相位短周期光栅。一束光入射到FBG后将会有特定波长的光被反射回来,被反射的光满足布喇格光栅方程^[11]:

$$\lambda_b = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (1)$$

在应力不变的条件下,对等式(1)两边温度进行微分有:

$$\Delta\lambda_b = 2\Lambda \frac{\Delta n_{\text{eff}}}{\Delta T} dT + 2n_{\text{eff}} \frac{\Delta\Lambda}{\Delta T} dT \quad (2)$$

其中, Λ 是光栅周期, n_{eff} 是光栅纤芯的有效折射率, λ_b 是布喇格中心波长。

由式(2)可知,在一定的温度范围内,FBG中心波长变化量和温度是线性相关的,通过解调系统测量中心波长的变化量可以实现对温度的测量。

F-P腔的光学滤波机理是多光束的干涉原理,干涉条纹具有很高的精细度^[12]。在不考虑反射光波相位变化的情况下,每个光波和它的前一个光波的相位之差对应于平板的间距,相位差 φ 表示为:

$$\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} n_l L \cos\Omega \quad (3)$$

其滤波函数用波长 λ 表示为^[13]:

$$T_{FP(\lambda)} = \left[1 + \frac{4R}{(1-R)^2} \sin^2 \left(\frac{2\pi}{\lambda} n_l L \right) \right]^{-1} \quad (4)$$

其中, R 表示腔镜的反射率, n_l 表示腔镜间的折射率, Ω 表示光波透射角度, L 表示F-P腔的腔长。由式(4)可知,F-P滤波器的腔长 L 改变,能够改变其中心谐振波长,实现对波长的选择。

1.2 铒纤激光器的阈值条件

铒纤激光器的阈值条件就是铒纤激光器输出的最低增益^[14]。激光是原子系统中受激发射超过自发辐射而占有一定优势的光辐射。粒子在谐振腔之间往返会损耗能量,使得光信号不断衰减,因此要形成粒子数的反转需要有一定的增益机制。当光学谐振腔内的单程稳态净增益和谐振腔的单程损耗相同时,就是激

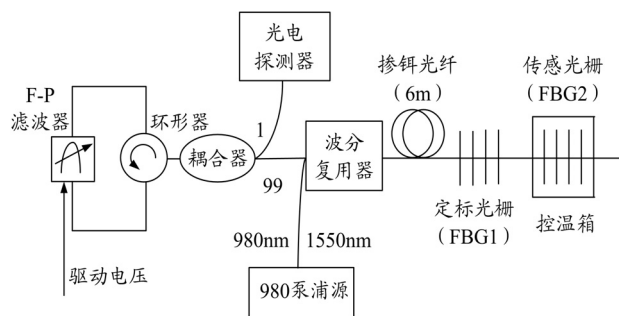


图1 基于铒纤激光器的温度测量系统原理图

光产生的零界点。当增益大于损耗时,掺铒光纤激发出来的光子在光学谐振腔中不断被放大形成激光。铒纤激光器的阈值条件可以表达为:

$$R_1 R_2 e^{2\alpha L} = 1 \quad (5)$$

其中, α 为工作物质的增益系数, R_1 和 R_2 分别为光学谐振腔镜的反射率, L 为光学谐振腔之间的距离。由式(5)可知,在光学谐振腔之间距离不变的条件下,随着谐振腔反射率的改变,铒纤激光器的阈值点也改变。

1.3 测温原理及过程

实验中,铒纤激光器谐振腔之间的损耗和距离不变,腔镜的反射率可以作为影响铒纤激光器阈值点的唯一变量。调节驱动电源的电压,压电陶瓷伸长或者缩短,F-P腔的腔长随之伸长或者缩短,导致反射腔镜的反射率发生变化,谐振腔的增益随腔镜的反射率改变而变化;当增益满足铒纤激光器的阈值条件时,测温系统刚好有激光输出,用此时驱动电源的电压值来标定FBG的传感温度。铒纤激光器的阈值点就是激光刚好出现的时刻,由于激光的瞬时功率很高,因此阈值点处PD的功率读数会变大多个数量级,出现一个清晰、明显和相对稳定的数量倍增。随着外界温度的改变,FBG中心波长也改变。由于进入环形器的调制光波长不同,会使对应铒纤激光器阈值点处电源的电压不同,由此可以将温度的变化和电源电压值一一对应起来,把温度参数的变化转变成电信号的变化,实现温度的测量目的。

由于激光的能量很大,对光学器件有损伤,实验中980nm泵浦源的电压不宜过大;同时光经过波分复用器(WDM)、耦合器和环形器等器件会有光功率的衰减,实验中需要快速地改变驱动电源的电压值。将FBG2放置在鼓风干燥箱中,设定初始温度为40℃,等达到热平衡状态,再进行温度测量的实验操作。因为铒纤激光器的振荡条件会随温度的变化而改变,所以每个温度点都要选择以FBG1作为谐振腔镜时阈值点处的电压,定标以FBG2作为腔镜时阈值点处的中心波长。实验中依次、快速地调节1V、100mV、10mV和1mV的电压档,同时观察PD的功率读数,直到刚好出现相对稳定的数量倍增时,分别记录此时刻FBG2和FBG1对应的电压值 U_1 和 U_2 ;用 ΔU ($\Delta U=U_2-U_1$)来表征FBG2的相对温度。为了降低操作的随机性误差,每个温度点测量8组实验数据。然后,分别测量45℃、50℃、55℃、60℃、65℃、70℃、75℃、80℃、85℃和90℃下对应的实验数据,并做好数据记录。

2 基于可调谐 F-P 腔的温度测量系统

由于F-P腔匹配滤波解调方法具有可调谐范围宽、易于集成化及可传感复用等优点,是目前光纤光栅传感解调系统中使用最多的方法之一^[15,16],但此方法也有中心波长的解调速度低、滤波损耗大、难以精确标定F-P腔波长和电压的关系等缺点。

基于可调F-P腔的温度测量系统如图2所示,测温装置包括光源、波长解调部分、探测器、参考定标光栅(FBG1)、温度传感光栅(FBG2)以及控温系统。980nm泵浦光经过980nm/1550nm的WDM和EDF,产生了波长在 Er^{3+} 增益带宽内的宽带光。光路中的光纤环形器具有单向传输性,避免光子在谐振腔内产生激光。宽带光经过3路环形器进入FBG,由FBG反射回来的光再次通过环形器进入到可调F-P腔中进行中心波长的解调,最后PD端接收的光是FBG反射光和F-P腔透射光的卷积。实验过程中快速地改变压电陶瓷驱动电源的电压,F-P腔的透射波长会随着电压的变化而变化,当F-P腔的透射波长和FBG的反射波长重合时,PD能探测到最大光强。每一组数据测量都要用以FBG1作为腔镜时最大光强处的电压,定标以FBG2作为腔镜时最大光强处的中心波长。利用压电驱动元件时刻保持探测光强最大,可以得到电压和波长的对应关系曲线,实现对FBG中心波长的解调目的。改变控温箱的温度,从40~90℃进行每5℃的逐点温度测量,分别记录每个温度点下FBG2和FBG1对应 U_3 和 U_4 的8组实验数据,用 $\Delta U'$ ($\Delta U'=U_4-U_3$)来表征FBG2的相对温度。

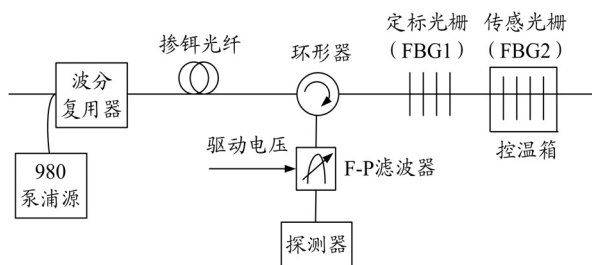


图2 基于可调谐 F-P 腔的温度测量系统原理图

3 实验结论及对比

3.1 实验结论

基于铒纤激光器测温系统的实验数据如表1所示,基于可调F-P腔测温系统的实验数据如表2所示;求每个温度点下电压差值 ΔU 和 $\Delta U'$,并求其平均值 $\overline{\Delta U}$ 和 $\overline{\Delta U'}$;然后用Origin做出平均电压差值和温度的关系曲线,并且进行曲线的拟合。

表 1 基于钕纤激光器实验系统的测温数据

温度 T(℃)	电压差值 $\Delta U(V)$							
40	1.242	1.244	1.240	1.242	1.241	1.242	1.243	1.242
45	1.234	1.228	1.233	1.228	1.234	1.232	1.231	1.230
50	1.220	1.221	1.218	1.222	1.221	1.219	1.220	1.221
55	1.210	1.208	1.205	1.206	1.206	1.209	1.211	1.207
60	1.197	1.194	1.198	1.200	1.196	1.197	1.198	1.195
65	1.188	1.185	1.186	1.184	1.187	1.185	1.186	1.187
70	1.174	1.176	1.174	1.175	1.177	1.175	1.173	1.176
75	1.167	1.163	1.164	1.168	1.164	1.163	1.164	1.165
80	1.153	1.153	1.156	1.154	1.154	1.155	1.156	1.152
85	1.145	1.146	1.140	1.142	1.145	1.143	1.141	1.142
90	1.136	1.129	1.132	1.130	1.132	1.131	1.132	1.133

表 2 基于可调谐 F-P 腔实验系统的测温数据

温度 T(℃)	电压差值 $\Delta U(V)$							
40	1.213	1.210	1.211	1.212	1.209	1.208	1.220	1.214
45	1.204	1.200	1.201	1.199	1.198	1.199	1.203	1.198
50	1.179	1.186	1.186	1.183	1.181	1.182	1.185	1.180
55	1.172	1.175	1.177	1.169	1.173	1.172	1.174	1.169
60	1.153	1.158	1.153	1.155	1.161	1.152	1.157	1.157
65	1.145	1.144	1.150	1.142	1.151	1.144	1.144	1.146
70	1.131	1.127	1.134	1.128	1.129	1.133	1.130	1.126
75	1.123	1.120	1.116	1.117	1.124	1.117	1.118	1.122
80	1.105	1.100	1.100	1.098	1.101	1.105	1.099	1.103
85	1.086	1.085	1.082	1.087	1.090	1.089	1.083	1.087
90	1.080	1.075	1.079	1.073	1.078	1.075	1.074	1.074

图 3 为实验温度-平均电压差值曲线,其中实验曲线 1 是基于钕纤激光器测温系统拟合后的曲线,实验曲线 2 是基于可调谐 F-P 腔测温系统拟合后的曲线。基于钕纤激光器实验系统温度每变化 5℃,电压平

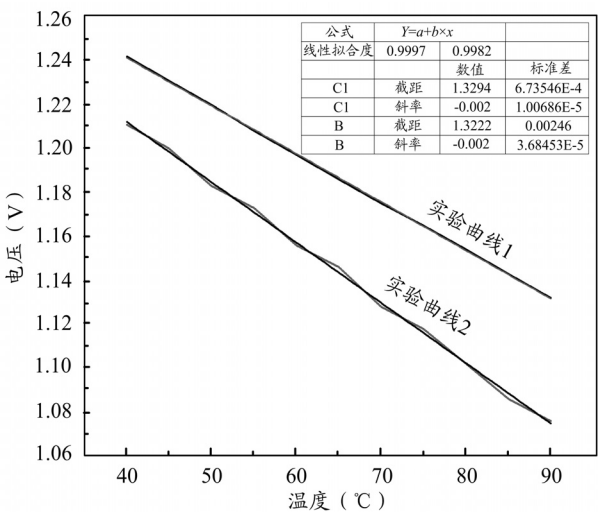


图 3 实验温度-平均电压差值曲线

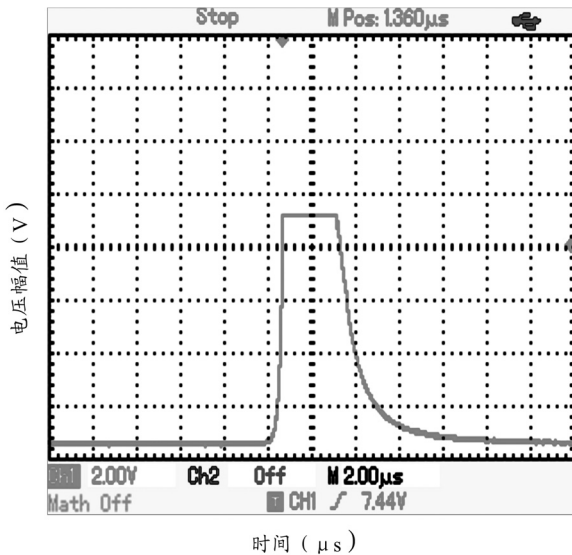
均变化 11mV,测温精度为 0.45℃。基于可调谐 F-P 腔测温系统温度每变化 5℃,电压平均变化 13.5mV,测温精度是 0.37℃。由此可知,基于可调 F-P 腔的实验系统的测温精度高于基于钕纤激光器的实验系统。实验中,波长选择器件 F-P 腔的精细度、控温箱的温度稳定性、驱动电源的精度和电压稳定性等因素都会影响系统的温度测量精度。由拟合后的曲线可知,实验曲线 1 的线性拟合度是 0.9997,实验曲线 2 的线性拟合度是 0.9982,表明基于钕纤激光器的测温系统线性相关性更好,抗外界干扰和稳定性更强。

3.2 相关性分析

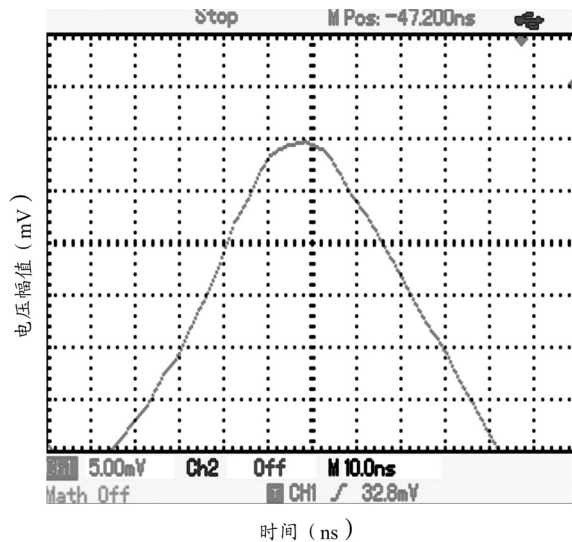
为了更好地说明基于钕纤激光器测温系统和基于可调谐 F-P 腔测温系统的响应性,我们做了相关性分析的实验。实验中使用一个光电转化器将光信号转变成数字示波器(DSO)可以接收到的电信号,使电源输出一个正向扫描的锯齿波电压且扫描频率连续可调,当扫描 F-P 腔时会形成一个周期性的和时间成正比的水平位移,把待测时域信号按时间的变化图像呈现在 DSO 上,保存截取的时域图片,如图 4(a)、图 4(b)所示。通过对比两图像的上升沿,图 4(a)中上升沿近乎为一条直线,图 4(b)中上升沿有一个明显的坡度,这可以证明基于可调光纤激光器的温度测量系统能极大地提高中心波长的检测速度。

4 结束语

本文提出的基于可调谐光纤激光器的 FBG 传感解调系统,引入波长标准具的 FBG1 作为传感光栅的波长定标点,很好地解决了由于压电陶瓷的非线性和 F-P 腔的腔长因温度变化而产生的漂移所导致的波长



(a) 基于铒纤激光器测温系统时域微分等于无穷大



(b) 基于可调谐 F-P 腔测温系统时域微分等于零

图 4 DSO 上截取の時域图

变化的问题。将铒纤激光器运用在 FBG 传感系统中,可使传感器的整体性能提高,体现了激光传感系统具有波长解调速度快、抗干扰能力强的优点。此外,由于激光信号强度很高,基于铒纤激光器的 FBG 传感系统的输出信号信噪比大幅度地提高,有望取代传统的以宽带光源作为解调光源的 FBG 传感系统,在矿井、油田、粮库及医疗测温等领域的温度测量和安全监控方面具有很好的应用前景。

参考文献:

- [1] 李平雪. 980nm 掺镱光纤激光器综述 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(7): 42–53.
- [2] CRANCH G A, FLOCKHART G M H, KIRKENDALL C K. Distributed Feedback Fiber Laser Strain Sensors [J]. IEEE Sensors Journal, 2008, 8 (7): 1161–1172.
- [3] LIANG R. Application of fiber Bragg grating based strain sensor in pipeline vortex-induced vibration measurement [J]. Science China Technological Sciences, 2014, 57(9): 1714–1720.
- [4] 谢涛, 王行, 李川, 等. 水银柱活塞差动式光纤布拉格光栅倾角传感器[J]. 光学学报, 2017(3): 170–176.
- [5] ZHANG Y, GUAN B O. High-Sensitivity Distributed Bragg Reflector Fiber Laser Displacement Sensor [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2009, 21(5): 280–282.
- [6] JIN L, TAN Y N, QUAN Z, et al. Strain-insensitive temperature sensing with a dual polarization fiber grating laser [J]. Optics Express, 2012, 20(6): 6021–8.
- [7] LEANDRO D. AMS M, LÓPEZ-AMO M, et al, Simultaneous Measurement of Strain and Temperature Using a Single Emission Line[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(12): 2426–2431.
- [8] LIU Z, ZHENG Y, PAN F, et al. Investigation of laser induced damage threshold measurement with single-shot on thin films [J]. Applied Surface Science, 2016(382): 294–301.
- [9] 宋梅梅, 冯素娟, 毛庆和. 抽运方案对 L 波段双通掺铒光纤放大器增益特性的影响[J]. 光学学报, 2010(3): 681–685.
- [10] FERREIRA M F S, STATKIEWICZ-BARABACH G, KOWAL D. Fabry-Perot cavity based on polymer FBG as refractive index sensor[J]. Optics Communications, 2017, 394: 37–40.
- [11] 马科夫·阿列克谢, 郭耀, 常天英, 等. 光纤布拉格光栅在冰声学性能测量中的应用[J]. 光学学报, 2015, 35(11): 69–78.
- [12] WU F, ZHU G F, CHEN X. Study of the characteristics of concentration sensing based on FBG Fabry-Perot cavity [J]. Optoelectronics Letters, 2009, 5(2): 138–142.
- [13] LI Qi, CHEN Haiyan. Design of Fiber Magnetic Field Sensor Based on Fiber Bragg Grating Fabry-Perot Cavity Ring-Down Spectroscopy [J]. Photonic Sensors, 2015, 5(2): 189–192.
- [14] 张远宪, 普小云, 祝昆, 等. 回音壁模式光纤激光器的阈值特性研究 [J]. 物理学报, 2009, 58(5): 3179–3184.
- [15] CHEN Haotao, LIANG Youcheng. Analysis of the Tunable Asymmetric Fiber F-P Cavity for Fiber Strain Sensor Edge-Filter Demodulation[J]. Photonic Sensors, 2014, 4(4): 338–343.
- [16] HUANG W, ZHANG W T, ZHENG T K, et al. A Cross-Correlation Method in Wavelet Domain for Demodulation of FBG-FP Static-Strain Sensors[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(16): 1597–1600.