

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 2-0306-06

基于光纤梳状滤波器实现 Bragg 光栅波长解调

柏俊杰¹ 吴 英¹ 董志明¹ 陈月平²

(¹ 重庆科技学院电子信息工程学院, 重庆 401331; ² 武汉职业技术学院, 湖北 武汉 430070)

摘要 为了提高 Bragg 光栅波长解调系统的解调精度, 研究了光纤光栅中心波长的解调方法, 提出了一种基于光纤梳状滤波器实现 Bragg 光栅中心波长解调的方法。把接有光纤梳状滤波器的通道作为解调系统的内置恒温通道, 通过光纤梳状滤波器提供的多个参考点对 Bragg 光栅中心波长进行标定, 下位机对整形为矩形脉冲的光电转换信号电压进行采集和信号处理, 上位机实现光纤光栅波长解调的动态显示和光栅中心波长标定。实验结果表明, 与目前具有同样功能的其他波长解调系统相比, 本方法具有灵活、稳定、易维护、高速、高精度等优点, 可被应用到大型多点安全监测工程。

关键词 光纤光学; 波长解调; 光纤梳状滤波器; 光纤 Bragg 光栅

中图分类号 TN253 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200936s2.0306

Realization of Fiber Bragg Grating Wavelength Demodulation Based on a Fiber Comb Filter

Bai Junjie¹ Wu Ying¹ Dong Zhiming¹ Chen Yueping²

¹ School of Electronic & Information Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China
² Wuhan Institute of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China

Abstract To improve the accuracy of demodulation system of fiber Bragg grating (FBG) sensors, a demodulation method of FBG center wavelength based on a fiber comb filter is proposed. A constant temperature channel of the demodulation system is connected with a fiber comb filter, which offers reference points to calibrate the center wavelength of FBG. The under-bit machine collects and processes the photoelectric signal voltage transformed to rectangular voltage pulse. The computer displays dynamically the FBG wavelength demodulation process and calibrates the Bragg grating center wavelength. The experimental results show that, compared with other wavelength demodulators, it has many advantages, such as flexibility, stabilization, easy maintenance, high-speed, high-precision, and so on. The wavelength demodulation system can be used extensively in large-scale multipoint monitor engineering.

Key words fiber optics; wavelength demodulation; fiber comb filter; fiber Bragg grating

1 引 言

光纤布拉格光栅(FBG)具有体积小、重量轻、可集成、抗干扰,并且能够实现传感信息波长编码等特点,性能优于光强编码或相位编码的光纤传感器^[1,2]。因为多个光栅可以都写入到一根光纤上,并利用多路复用技术来编址,所以 FBG 传感器具备了分布式传感测量的能力,一个多通道分布式的传感

网络可有数百个 FBG 传感器。但是,如何将传感网络中的数百个 FBG 传感器皮米级的谐振波长位移 $\Delta\lambda$ 实时、高精度地解调出来,这是光纤布拉格光栅传感技术走向实用化所面临的关键技术^[3~5]。为了实现光纤传感技术的实用化与产业化,人们已经设计出了基于单片机,数字信号处理器(DSP),ARM 公司的 ARM 处理器和 32 位嵌入式软核 Nios II 等

基金项目: 国家自然科学基金(60876088)资助课题。

作者简介: 柏俊杰(1976—),男,讲师,硕士,主要从事光纤传感技术、嵌入式技术等方面的研究。

E-mail: junjie_7654@163.com

处理器的波长解调器^[6-9]。本文基于光纤梳状滤波器,利用单片机为解调系统下位机的中心,实现分布式光纤布拉格光栅传感系统 FBG 中心波长解调。

2 FBG 传感原理

布拉格光栅最大的特性就是能起到反射镜的作用,但必须满足反射条件——布拉格条件

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

式中 λ_B 为 FBG 反射光的中心波长, n_{eff} 为光纤芯区中有效折射率, Λ 为光栅周期。当 Λ 和 n_{eff} 受到外界环境的影响(温度、应力、压力)而发生变化 Δn_{eff} 和 $\Delta\Lambda$, 导致符合 Bragg 条件的波长发生位移 $\Delta\lambda_B$, 由 Bragg 条件可得

$$\Delta\lambda_B = 2\Delta n_{\text{eff}}\Lambda + 2n_{\text{eff}}\Delta\Lambda. \quad (2)$$

由弹性力学可知, 光纤 Bragg 光栅中心波长 λ_B 随温度和轴向应变的变化可表示为

$$\Delta\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \times \left\{ \left[1 - \frac{n_{\text{eff}}^2}{2} [p_{12} - \mu(p_{11} + p_{12})] \right] \epsilon_a + (\alpha_s + \xi_s) \Delta T \right\}, \quad (3)$$

式中 ϵ_a 为轴向应变, p_{11} 和 p_{12} 为光纤材料的光弹性系数, μ 为光纤材料的泊松比, α_s 和 ξ_s 分别为光纤材料的热膨胀系数和热光参数, ΔT 为温度变化量。对于锗硅光纤, 把材料的各特性参数代入(3)式可得

$$\Delta\lambda_B = 0.78\lambda_B\epsilon_a + 6.67 \times 10^{-6} \lambda_B \Delta T. \quad (4)$$

由(4)式可知, 若仅考虑温度或应力的变化, 光纤 Bragg 光栅传感器反射的中心波长与温度和应变都有良好的线性关系, 所以, 只要检测出 FBG 反射波长的变化 $\Delta\lambda_B$ 就可以检测出外界的温度、应力、压力等被测信号。

3 基于光纤梳状滤波器设计 Bragg 光栅波长解调系统

3.1 光纤梳状滤波器

光纤梳状滤波器在光电子、光纤通信和光传感等领域具有许多重要应用。以具有连续特性的宽带光源为基础, 利用梳状滤波器可引出许多所需个数的窄带光源。大多数光纤梳状滤波器是基于多光束干涉原理的。主要类型有: 偏振光干涉的晶体双折射型, 迈克尔孙干涉仪与 GT 反射镜型(谐振腔结构), 马赫曾德尔干涉仪型和法布里-珀罗(F-P)干涉仪型等。解调系统采用法布里-珀罗干涉仪型的光纤梳状滤波器。

法布里-珀罗干涉仪型的光纤梳状滤波器的结

构如图 1 所示。法布里-珀罗腔主要是由一块平面石英玻璃板构成, 板的两表面各镀有部分透射的高反射膜, 并且相互平行。当宽带光从法布里-珀罗干涉仪型的光纤梳状滤波器一端入射, 入射光束在玻璃板内发生多次反射, 反射光多次干涉, 致使出射光为所需个数的窄带光谱, 相邻窄带光中心波长差为

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2nd}, \quad (5)$$

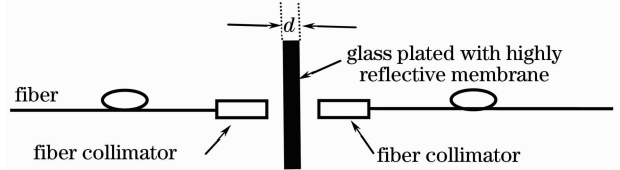


图 1 法布里-珀罗干涉仪型的光纤梳状滤波器结构

Fig. 1 Structure of fiber comb filter based on Fabry-Perot interferometer

式中 λ 为光在真空中的波长, n 为玻璃介质的折射率, d 为玻璃板的厚度。基于此原理, 武汉理工大学光纤中心研制出了法布里-珀罗干涉仪型的光纤梳状滤波器, 一端接宽带光源, 用高精度光谱仪测得另一端的出射光的光谱图, 如图 2 所示。

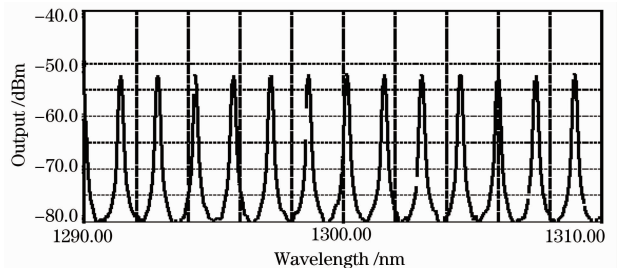


图 2 光纤梳状滤波器出射光谱图

Fig. 2 Output spectrum of the fiber comb filter

3.2 基于光纤梳状滤波器实现 FBG 波长解调的方案

如何高精度地实现布拉格光栅波长编码的解调, 即检测出 FBG 传感器皮米级波长谐振位移, 主要涉及到两个方面: 一是光纤光栅的布拉格波长谱宽约小于 0.3 nm, 要提高测量布拉格波长移动量的精度, 就必须精确测量布拉格波长峰值点的移动量, 因此找准布拉格波长峰值点并跟踪峰值点的移动量是研究光纤光栅传感器要解决的第一个问题; 二是要把测量到的布拉格波长峰值点的移动量转换为便于显示的电信号^[10]。

本方案的光通道利用 F-P 滤波器和光开关来实现三通道分布式 FBG 传感系统并行解调, 能实时同步监测近百个外界被测信号, 解调方案如图 3 所示。首先, 中心波长为 1310 nm 的宽带光源(SLED)发出

的光通过 3 dB 定向光纤耦合器,通过程序控制光开关的四通道轮流导通,三个接有 FBG 的通道反射回波长编码的窄带光脉冲序列,内置于解调系统的恒温光纤梳状滤波器的透射光是中心波长等间隔分布的窄带光脉冲序列;然后,各通道窄带光脉冲序列轮流通过 3 dB 的耦合器进入可调光纤 F-P 滤波器,通过在 F-P 腔的压电体上施加锯齿波扫描电压调节其腔间隔,当 F-P 的透射波峰与窄带光脉冲序列波峰重合时,F-P 滤波器的透射光强最大,不同的扫描电压对应的透射光中心波长不同,这样就使各个通道的 FBG

在同一时刻反射回来或者梳状滤波器透射出来的不同中心波长的光脉冲信号在同一扫描周期的不同时刻通过 F-P 腔,再经过光电转换、放大、滤波和整形等调理电路,把光脉冲转化为矩形电压脉冲信号(高电平为 5 V,低电平为 0 V),单片机系统对信号采集和处理;最后在上位机上实现光纤光栅波长解调的动态显示和光栅中心波长标定。其中,光通道切换的频率和作用于光纤 F-P 腔的扫描电压的频率保持同步,均为 50 Hz。

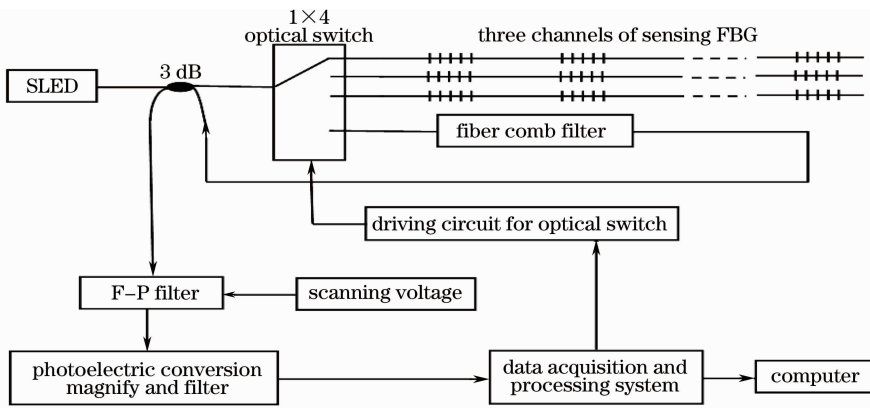


图 3 基于光纤梳状滤波器的三通道分布式 FBG 传感系统波长解调方案

Fig. 3 Wavelength demodulation scheme for three channels of the distributed FBG sensing system based on fiber comb filter

由于光源 SLED 的谱宽一般为 40~50 nm,传感 FBG 的谱宽通常为 0.07~0.6 nm,检测外界信号时,布拉格光栅中心波长要漂移 1~2 nm,所以为了使不同 FBG 的反射光谱峰不相互重叠,每个通道内只能接大约 30 个 FBG 传感器。一个大型工程往往需要同时监测上百个不同位置的信号,这就需要开发出多通道分布式光纤光栅传感系统,并实现并行实时解调。上述方案能对多通道分布式 FBG 光栅传感系统并行、实时、高精度(皮米级)波长解调,并且性能稳定,可被应用到大型工程。

3.3 基于单片机的数据采集与处理模块

图 3 方案所示中的数据采集与处理模块是

FBG 解调系统的核心功能模块,该模块是基于图 4 所示 STC89C52 单片机系统实现的,图 4 中 SRAM 模块是静态随机处理器,MAX232 是 RS232 标准串口的接口电路。数据采集与处理的方法是先把光电转换后的尖峰电压信号整形为矩形脉冲信号,再用基于单片机的信号采集与处理系统采集并处理数据,找出每个矩形脉冲的中心位置在一个电压扫描周期内出现的相对位置(即计数脉冲数)。这些相对位置与信号矩形脉冲所对应的光脉冲信号的波长(即 FBG 的反射中心波长)一一对应,有较好的线性关系^[11]。利用光纤梳状滤波器提供的参考点来标定传感光栅的实时波长,解调出被测信号。

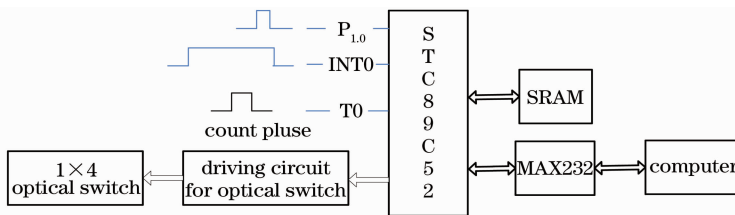


图 4 基于单片机的数据采集与处理模块

Fig. 4 Data acquisition and processing module based on a single-chip microcomputer

找出每个矩形电压脉冲的中心位置在一个扫描电压周期内的相对位置,可通过以下方法来实现:设计一个电路用来产生一个稳定的计数脉冲,接入单片机计数器引脚;整形为矩形脉冲电压的光电转换信号,接入单片机 P₁ 口的 P_{1.0} 引脚上。图 3 中的三角波扫描电压通过电路转换成等宽的脉冲信号接到单片机的外部中断功能 INT0。当中断产生时,计数器开始计数,I/O 采用查询方式,通过判断 P_{1.0} 高低电平来判定脉冲的上下沿,P_{1.0} 引脚的脉冲上下沿到来时存储计数器的值,这样就得到了测量光栅的相对位置值。三角形扫描电压到最高点时计数器清零,把采集到的脉冲相对位置装入 SRAM,等待下一次计数。若矩形脉冲下降沿和上升沿对应的计数器的值分别为 N₁ 和 N₂,那么该矩形脉冲的中心位置对应的脉冲数为 $N = (N_1 + N_2)/2$ 。中心位置对应的脉冲数通过串口传输到上位机进行光栅波长解调的动态显示和光栅中心波长标定。

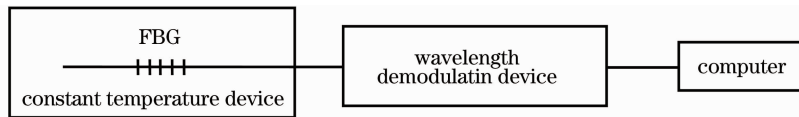


图 5 标定实验系统结构图

Fig. 5 Structural diagram of experimental system for calibration

具体实验如下:

1)用高精度光谱仪测定内置恒温通道内的光纤梳状滤波器输出的 15 个窄带光谱的中心波长 $\lambda_i (i = 1, \dots, 15)$, 依次为 1309.907 nm, 1308.763 nm, 1307.622 nm, 1306.482 nm, 1305.345 nm, 1304.209 nm, 1303.076 nm, 1301.944 nm, 1300.814 nm, 1299.687 nm, 1298.561 nm, 1297.437 nm, 1296.315 nm, 1295.195 nm, 1294.078 nm;

2)为了验证波长解调精度,用光谱仪测定恒温装置内的待测光栅的 Bragg 中心波长,依次为 1306.655 nm, 1304.022 nm, 1300.776 nm, 1298.447 nm;

3)根据图 5 所示的标定实验系统,测出与光纤梳状滤波器输出的 15 个窄带光谱相对应的矩形脉冲电压信号的位置 $N_i (i = 1, \dots, 15)$,同时测定 4 个待测光栅的位置 $x_i (i = 1, \dots, 4)$,不同环境下做了多次实验,取了 3 次随机实验数据如表 1 所示;

4)由 N_i 和 λ_i 组成标定标准数据对 (N_i, λ_i) ,根据不同的插值方法标定出与 x_i 相对应的 4 个待测光栅的 Bragg 中心波长 λ_{xi} ,并与高精度光谱仪测定的波长相比较,计算出均方误差。分段线性插值法标定 FBG 中心波长如表 2 所示,拉格朗日插值法标定 FBG 中心波长如表 3 所示,3 次样条插值法标定

4 应用波长解调器进行波长标定的实例

基于光纤梳状滤波器的多通道分布式 FBG 传感系统波长解调方案,研发出了四通道的波长解调器,利用该解调器进行波长标定实验,标定实验系统结构图如图 5 所示。波长解调器的其中一个通道接待测光栅序列,内置恒温通道接法布里-珀罗干涉仪型的光纤梳状滤波器,波长解调器与上位机通过 RS232 接口通信,把每个通道与光脉冲对应的信号电压矩形脉冲的中心位置(即计时脉冲数)传送给上位机,上位机根据电压矩形脉冲的中心位置与光栅的 Bragg 中心波长或光纤梳状滤波器输出的窄带光中心波长的对应关系进行标定。为了验证解调的精度,避免温度变化对光栅 Bragg 中心波长的影响,把待测光栅放在恒温装置内。

FBG 中心波长如表 4 所示。实验数据表明分段线性插值算法简单,但是精度相对较低,拉格朗日插值法和 3 次样条插值法算法较复杂,但精度可达到 ± 3 pm。

表 1 三次随机实验的位置

Table 1 Location of three random experiments

Location	First time	Second time	Third time
N ₁	2599	2596	2602
N ₂	7997	7996	7997
N ₃	11474	11474	11473
N ₄	14440	14443	14439
N ₅	17258	17256	17257
N ₆	20068	20063	20065
N ₇	22961	22965	22960
N ₈	26038	26037	26035
N ₉	29373	29377	29371
N ₁₀	33022	33013	33016
N ₁₁	37027	37021	37025
N ₁₂	41457	41455	41454
N ₁₃	46323	46315	46314
N ₁₄	51679	51669	51668
N ₁₅	57599	57587	57587
X ₁	14000	14001	14003
X ₂	20537	20530	20539
X ₃	29494	29483	29495
X ₄	37449	37451	37452

表 2 分段线性插值法标定 FBG 中心波长

Table 2 FBG central wavelength calibration based on linear interpolation

Central wavelength	First time/nm	Second time /nm	Third time /nm	Wavelength measured by high precision spectrum /nm	Mean square error / μm
λ_{x1}	1306.6651	1306.6517	1306.6495	1306.655	6.9
λ_{x2}	1304.0253	1304.0266	1304.0234	1304.022	3.3
λ_{x3}	1300.7766	1300.7811	1300.7756	1300.776	2.9
λ_{x4}	1298.4539	1298.4519	1298.4526	1298.447	5.8

表 3 拉格朗日插值法标定 FBG 中心波长

Table 3 FBG central wavelength calibration based on Lagrange interpolation

Central wavelength	First time /nm	Second time /nm	Third time /nm	Wavelength measured by high precision spectrum /nm	Mean square error / μm
λ_{x1}	1306.6565	1306.6564	1306.6545	1306.655	1.2
λ_{x2}	1304.0218	1304.0232	1304.0199	1304.022	1.4
λ_{x3}	1300.7748	1300.7798	1300.7739	1300.776	2.6
λ_{x4}	1298.4481	1298.4493	1298.4479	1298.447	1.5

表 4 3 次样条插值法标定 FBG 中心波长

Table 4 FBG central wavelength calibration based on cubic spline interpolation

Central wavelength	First time /nm	Second time /nm	Third time /nm	Wavelength measured by high precision spectrum /nm	Mean square error / μm
λ_{x1}	1306.6563	1306.6571	1306.6547	1306.655	1.4
λ_{x2}	1304.0218	1304.0231	1304.0199	1304.022	1.4
λ_{x3}	1300.7748	1300.7797	1300.7738	1300.776	2.6
λ_{x4}	1298.4487	1298.4468	1298.4475	1298.447	1.0

5 结 论

光纤 Bragg 光栅是近年来光纤传感领域的研究热点,波长编码信号解调是实现光纤光栅分布式传感网络的关键。实验表明,基于光纤梳状滤波器的多通道分布式 FBG 传感解调系统具有灵活、稳定、易维护、高速、高精度等优点,可被广泛地应用于大型桥梁安全检测、电力系统温度测量及火灾报警等领域。该解调方案有助于加速光纤传感技术的实用化与产业化,但还有待于进一步提高其解调精度和速度,以达到更好的波长解调效果。

参 考 文 献

- 1 Li Chuan, Zhang Yimo, Zhao Yonggui *et al.*. Principle, sensing technology and application of fiber bragg grating[M]. Beijing: Science Press, 2005. 1~8
李 川,张以谟,赵永贵等. 光纤光栅:原理、技术与传感应用[M]. 北京:科学出版社,2005. 1~8
- 2 Liao Yanbiao. Fiber Optics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003. 197~212
廖延彪. 光纤光学[M]. 北京:清华大学出版社,2003. 197~212
- 3 Lin Junyou, Wang Wenhua, Wang Xiaoxu. Study of application and evolution of fiber grating sensors technique[J]. *J. Dalian*

University of Technology, 2004, **44**(6): 931~956

林钧岫,王文华,王小旭. 光纤光栅传感技术应用研究及其进展[J]. 大连理工大学学报, 2004, **44**(6): 931~956

- 4 Liu Lihui, Zhao Qida, Zhang Hao *et al.*. Progress in demodulation technology of fiber Bragg grating sensor[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2004, **41**(7): 35~39

刘丽辉,赵启大,张 昊等. 光纤光栅传感器的解调技术进展[J]. 激光与光电子学进展, 2004, **41**(7): 35~39

- 5 Wang Min, Qiao Xueguang, Jia Zhenan *et al.*. Research on demodulating techniques for fiber Bragg grating sensor system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2004, **41**(12): 54~58

王 敏,乔学光,贾振安等. 光纤布喇格光栅传感系统信号解调技术研究[J]. 激光与光电子学进展, 2004, **41**(12): 54~58

- 6 Zhuang Qiren, Gong Dongmei, Wang Jing *et al.*. A high precise sensing demodulation technology based on fiber-grating sensors and single-chip microcomputer [J]. *J. Huaqiao University(Natural Science)*, 2004, **25**(3): 254~257

庄其仁,龚冬梅,王 静等. 单片机的高精度 FBG 传感解调技术[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2004, **25**(3): 254~257

- 7 Zhao Liming, Wang Xin, Diao Chunnuan. FBG sensor demodulation system based on F-P fiber interferometer filter[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2008, (2): 76~79

赵立明,王 鑫,刁春暖. 基于光纤 F-P 滤波器 FBG 传感的解调系统[J]. 仪表技术与传感器, 2008, (2): 76~79

- 8 Xiong Haoyu, Gao Xueqing. Design and implementation of FBG sensor signal processing and collection system[J]. *Electronic Technology*, 2005, **32**(2): 37~40

- 熊浩宇,高雪清. FBG 传感信号处理及采集系统的设计与实现[J]. 电子技术, 2005, **32**(2): 37~40
- 9 Bai Junjie, Wu Ying, Chen Nianjun. Research on the demodulation techniques for the sensing system of fiber grating based on the Nios II [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(s2): 120~123
- 柏俊杰,吴英,陈念军. 基于 Nios II 的光纤光栅传感系统解调技术的研究[J]. 中国激光, 2008, **35**(s2): 120~123
- 10 Jia Zhen'an, Zhang Lei, Qiao Xueguang *et al.*. Experimental study of signal demodulation key hardware electric circuit for fiber grating[J]. *J. Optoelectronic · Laser* 2008, **19**(3): 315~317
- 贾振安,张磊,乔光学等. 光纤光栅传感信号解调关键硬件电路的实验研究[J]. 光电子·激光, 2008, **19**(3): 315~317
- 11 Bai Junjie, Wang Lixin, Ran Changyan *et al.*. Demodulating and calibrating for fiber Bragg grating based on fabry-perot filter[J]. *Transducer and Microsystem Technology*, 2006, **25**(3): 10~11
- 柏俊杰,王立新,冉昌艳等. 基于 F-P 滤波器的光纤光栅解调和标定[J]. 传感器与微系统, 2006, **25**(3): 10~11