

文章编号: 0258-7025(2010)10-2554-05

基于空芯光子晶体光纤的在线法-珀标准件制作与应用

段德稳¹ 饶云江^{1,2} 朱涛^{1,2} 樊颜恩¹

¹ 重庆大学光电工程学院光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044
² 电子科技大学通信与信息工程学院宽带光纤传输及通信网络技术教育部重点实验室, 四川 成都 610054

摘要 基于空芯光子晶体光纤(HCPCF)的在线法-珀标准件(ILFE)应变传感器的应变灵敏度高,对温度敏感系数小,其腔长可制作得比传统 ILFE 长,适于在一路光路中进行频分复用从而扩大多点应变检测的准分布应变传感系统的容量。理论分析了制作中提高基于空芯光子晶体光纤的在线法-珀应变传感器输出信号的方案,通过实例讨论了光源时间相干长度对该类法-珀腔腔长的限制。结合波分频分复用,进行了基于该复用方法的应变测试实验研究,实验结果表明,其测量精度可达 $\pm 5 \mu\epsilon$,可用于大型结构健康监测。

关键词 光纤光学;光子晶体光纤;光纤法-珀腔;制作;复用

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103710.2554

Study of Fabrication and Application of Hollow-Core Photonic Crystal Fiber Based In-Line Fiber-Optic Etalon

Duan Dewen¹ Rao Yunjiang^{1,2} Zhu Tao^{1,2} Fan Yan'en¹

¹ Key Laboratory of Optoelectronic Technology & Systems, Ministry of Education, College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China
² Key Laboratory of Broadband Optical Fiber Transmission & Communication Networks Ministry of Education, School of Communication and Information Engineering, University of Electronic Science & Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China

Abstract Hollow-core photonic crystal fiber (HCPCF) based in-line fiber-optic etalon (ILFE), due to its high sensitivity to strain and low thermal coefficient, can be made with longer cavity length compared with traditional ILFE, making it suitable in quasi-distributed multipoint strain detection systems. The ways of enhancing the output signal of HCPCF based multiplexing strain detecting systems are analyzed. The effect of temporal coherence length of light source is analyzed through examples. A spatial-frequency division multiplexing (SFDM)/coarse-wavelength division multiplexing (CWDM) of ILFE strain sensors with four HCPCF-based ILFE strain sensors is demonstrated. The experimental results show that a strain accuracy of $\pm 5 \mu\epsilon$ can be achieved. Such an HCPCF-based ILFE strain sensor multiplexing system could be used for large engineering structure health monitoring.

Key words fiber optics; photonic crystal fiber; fiber-optic Fabry-Perot cavity; fabrication; multiplexing

1 引 言

光纤法-珀(F-P)传感器作为应用最广、技术最成熟的光纤干涉式传感器,以其测量精度高、抗电磁

干扰等优点而被广泛研究^[1~5]。光纤法-珀传感器主要分为3类:本征光纤法-珀传感器(IFP)、非本征光纤法-珀传感器(EFP)和光纤法-珀在线标准件

收稿日期: 2009-12-04; **收到修改稿日期**: 2010-03-10

基金项目: 国家自然科学基金重点基金(60537040)、重庆市自然科学基金(CSTC2008BB2165)和重庆大学骨干教师资助基金资助课题。

作者简介: 段德稳(1981—),男,博士研究生,主要从事光子晶体光纤器件方面的研究。E-mail: ddw@cqu.edu.cn

导师简介: 饶云江(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤通信及传感等方面的研究。E-mail: yjrao@cqu.edu.cn
(中国光学学会会员号: 4009074)

(ILFE)^[6]。IFP 由熔接在两部分反射面之间的实心光纤构成法-珀腔腔体, EFP 是由两光纤端面间的空气间隙来构成法-珀腔腔体, 而 ILFE 的法-珀腔体是由在两段单模光纤 (SMF) 中间熔接空芯光子晶体光纤 (HCPFCF) 构成。对于这 3 类法-珀腔来说, IFP 虽然可以制作出很长的腔长, 但因其腔体导光介质为光纤, 对温度、横向应变等敏感, 不适于应变测量^[6,7]; EFP 和 ILFE 构成法-珀腔体的导光介质都是空气, 温度系数较低且对横向应变不敏感, 但是由于固定非本征法-珀腔的玻璃管和空芯光子晶体光纤对光束束缚能力差, 光传输的损耗大, 腔长的长度受到限制, 而且非本征法-珀腔还会由于径向直径不一致而导致在应变时出现应力集中, 从而易被拉断^[6,8]。饶云江课题组报道了一种基于空芯光子晶体光纤 (HCPFCF) 的 ILFE, 它既有普通 EFP 和 ILFE 温度系数低的优点 (腔体材料单一, 且导光介质主要为空气), 又由于光被限制在 HCPFCF 中传输的损耗远小于空气隙和空芯光子晶体光纤, 这种 ILFE 腔长可以制作得很长, 有利于在复用系统中的应用^[4,9]。与传统法-珀传感器相比, 由于该法-珀传感器腔长可达数厘米, 可大大提高系统的复用能力。而且, 由于这种传感器 HCPFCF 的结构成分单一, 耐高温性能良好^[10]。

2 传感器制作

实验中的 ILFE 传感器是通过在两段标准单模光纤 (Corning SMF-28) 之间用商用电弧熔接机熔接一段空芯 PCF (Blanze Photonics; HC-1550) 而成。其中空芯 PCF 的空芯直径约为 20 μm , 包层直径与 SMF-28 相当, 约为 125 μm , 空气孔中心间距约为 3 μm , 在波长 1570 nm 的传输损耗小于 0.02 dB/m。传感器的结构如图 1 所示。在法-珀传感器的制作过程中, 首先将空芯 PCF 熔接在一端切好的单模光纤上, 再切去多余的空芯 PCF, 保留设计腔体所需长度, 为提高切取精度, 可以在显微镜下切割; 最后熔接另一段普通标准单模光纤而形成基于空芯 PCF 的 ILFE。为了减小另一段反射光纤的尾纤与空气接触端面反射的影响, 可以适当加长该尾纤至长于光源时间相干波列长的一半即可, 或者将尾纤放入折射率匹配液中, 或如图 1 所示将尾纤另一端切成一个大于 8° 的角。虽然由于空芯 PCF 的特殊带隙结构, 使得所切得 ILFE 的两端光纤端面的平整度对输出信号对比度影响比普通光纤法-珀腔小, 但是应尽可能地使所切端面平整以提高输出信号的平整度, 以利于减少解调时谐波分量, 提高解调精度。

设入射光纤与空芯 PCF 熔接点光强耦合效率

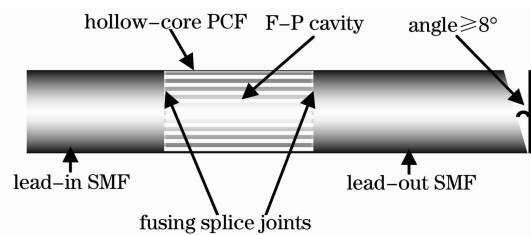


图 1 基于空芯 PCF 的 ILFE 结构图

Fig. 1 Configuration of an HCPFCF-based ILFE

为 β , 腔长为 l 的法-珀腔反射光强为^[1]

$$I_R = \frac{R_1 + \beta R_2 + 2\sqrt{\beta R_1 R_2} \cos\left(\frac{4\pi n l}{\lambda}\right)}{1 + \beta R_1 R_2 + 2\sqrt{\beta R_1 R_2} \cos\left(\frac{4\pi n l}{\lambda}\right)} I_i, \quad (1)$$

由于形成 ILFE 的两反射面为空气和单模光纤交界面形成, 光强反射率为 $R_i (i=1, 2)$ 约为 4%, $R_1 R_2 \ll 1$, 又由于干涉腔导光介质主要为空气, $n \approx 1$, 所以由 (1) 式可以得 ILFE 反射信号的归一化交流信号为

$$I_{ac}(l) \approx \frac{2\sqrt{R_1 \beta R_2}}{(R_1 + \beta R_2)} \cos\left(\frac{4\pi l}{\lambda}\right) = V \cos\left(\frac{4\pi l}{\lambda}\right), \quad (2)$$

式中 $V = 2\sqrt{R_1 \beta R_2} / (R_1 + \beta R_2)$ 为归一化的 ILFE 反射信号对比度, 而当 $(\beta R_2) / R_1 = 1$ 时 V 取得其最大值 ($V = 1$), 这说明通过在熔接第 2 个反射端面前在反射单模光纤的端面镀高反膜来提高第 2 个反射端面的反射系数, 以补偿第 1 个端面的连接损耗 (约 1 dB), 可以提高法-珀腔反射信号的对数对比度。这样就形成了 Fizeau 型 ILFE, 其对比度为^[1]

$$V = 2\sqrt{R_1 \beta R_2} / (R_1 + \beta R_2) \approx (\beta R_1)^{1/2} / (R_1 + \beta). \quad (3)$$

这种方法可提高信号对比度最高达约 5 倍^[9], 但是这也导致了一些问题。例如, 在镀膜过程中, 膜的厚度和平整度很难控制, 镀的膜容易在熔接放电时被烧坏, 镀膜后, 熔接点机械强度降低等。另一种方案是通过优化熔接参数来降低第 1 个熔接端面的连接损耗, 同时提高第 2 个熔接端面的反射系数。这可以通过调节熔接时的电弧放电、光纤放置位置等来达到对切好的端面的损坏和空芯 PCF 的微结构坍塌控制到最小来实现。通过这种方式以补偿第 1 个端面损耗来匹配两反射端面, 从而可以大大提高输出信号对比度, 在腔长较短时甚至达约 25 dB。通过优化熔接参数熔接得到的腔长分别为 226.5 μm 和 15 mm 的基于空芯 PCF 的 ILFE 的输

出信号如图 2 所示(熔接中的切割在显微镜下完成,其控制精度约为 $50 \mu\text{m}$,取决于显微镜),但这种方

案需要一定经验和熔接技巧。

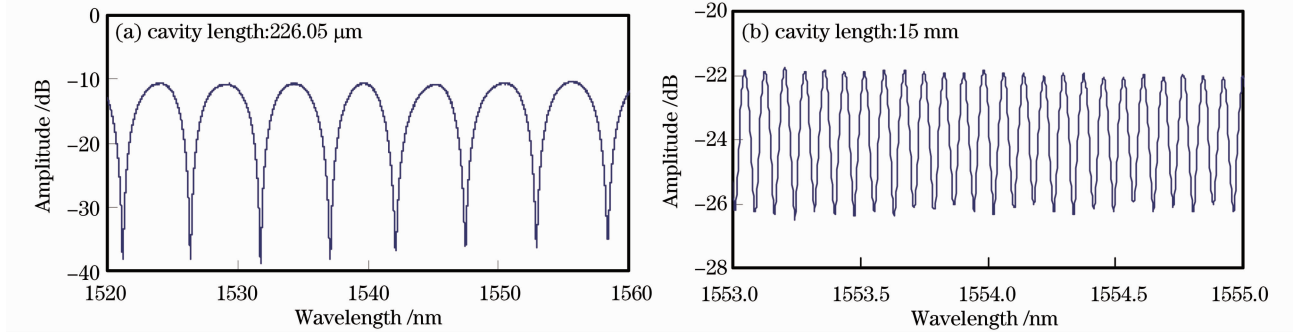


图 2 优化熔接所得基于空芯 PCF 法-珀标准件的输出信号

Fig. 2 Reflective signals from an HCPCF etalon

由于光在空芯 PCF 中的传输损耗非常低,由(1)和(2)式,在基于空芯 PCF 的 ILFE 腔长很长的情况下仍可得到对比度很高的输出干涉信号。但实际上由于(1)和(2)式是在相干长度无限长理想光源下推导得出的,考虑光源时间相干性时,干涉条纹对比度将随光源相干长度减小而降低^[11]。例如,若采用光谱高斯分布的多模激光器作光源,(2)式变为^[12]

$$I_{ac}(l) = V \exp[-(4l/L_c)^2] \cos(4\pi l/\lambda), \quad (4)$$

式中 l 为 ILFE 腔长, L_c 为光源的相干长度。(4)式说明采用该光源并考虑光源的相干性影响时实际对比度将降低为 $V_{re} = V \exp[-(4l/L_c)^2]$ 。其关系曲线在忽略其他损耗因素($V=1$)时如图 3 所示。可以看出,一定光源相干长度下,输出信号对比度会随着腔长增加而降低。对于采用单模激光器作光源,王安等^[13]做了详细讨论,也得到信号对比度随法-珀腔腔长与光源相干长度比值的增大而急剧下降的结论。

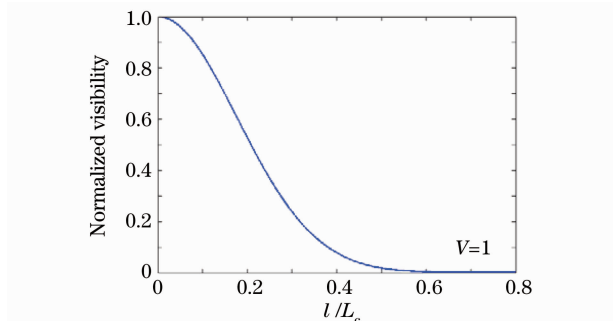


图 3 归一化干涉信号对比度 ILFE 腔长与光源相干长度比值(l/L_c)的关系曲线

Fig. 3 Relationship between cavity length to light source coherence length ratio (l/L_c) and normalized visibility

3 基于 HCPCF 的 ILFE 的复用

当不同腔长 $l_i (i=1, 2, 3, \dots, n)$ 的 $m (m \geq 2)$ 个基于空芯 PCF 的 ILFE 由耦合器接入同一光路时,由(2)式得其输出交流信号为

$$I'_{ac} = \sum_{i=1}^m V_i \cos\left(\frac{4\pi l_i}{\lambda}\right), \quad (5)$$

(5)式说明,多个不同腔长 ILFE 并联输出的交流信号近似为多个含有腔长信息的余弦信号叠加。对(5)式进行傅里叶变换得其频率域信号为

$$R[f_v] = F[I'_{ac}] = 0.5 \sum_{i=1}^m V_i \delta(f_v - l_i/2) + \sum_{i=1}^m V_i \delta(f_v + l_i/2), \quad (6)$$

式中 f_v 为频率,是腔长不同时,输出的近似余弦信号在波长域内变化快慢程度的表征量,与腔长一一对应。当腔长 l_i 彼此不相等时,通过提取不同腔长对应的频率信号 $f_v = l_i/2$,即可得到各个 ILFE 的腔长,这就构成了空间频分复用(SFDM)的原理。如图 4 所示为两个不同腔长(1.3 mm 和 3.1 mm)并联 ILFE 输出的信号及其快速傅里叶变换(FFT)所得频谱。由图 4 可以看出,腔长不一样的 ILFE 由于输出信号在波长域内的变化快慢不一样经 FFT 成为两个完全分开的数值频谱,将两个频谱分别代回计算就可分别得到其腔长^[14]。应变引起的腔长变化量则可通过傅里叶变换解调得的腔长对比原始腔长得^[4]。由于基于 HCPCF 的 ILFE 可以制作的腔长比普通 ILFE 更长,于是一路光路中可复用的传感器更多,若将多路复用的 ILFE 传感器接入波分复用的不同通道,就可以复用更多的 ILFE 传感器^[4],这就构成了基于 HCPCF 的 ILFE 频分/波分复用系统,它将把频分/波分复用系统复用能力强和基于 HCPCF 的

ILFE 可以制作长腔长利于复用的优点结合起来, 进一步提高系统的复用能力。

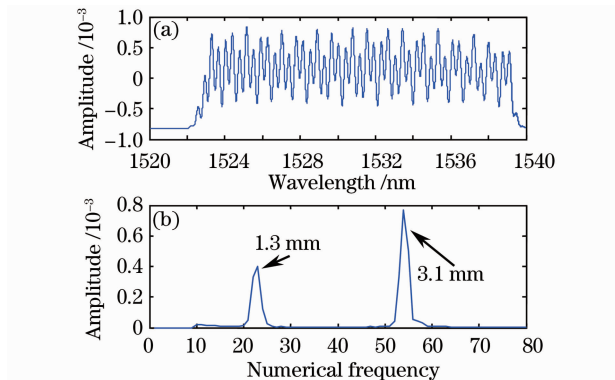


图 4 1.3 mm 和 3.1 mm 的两个法-珀腔混合输出信号(a)和其快速傅里叶变换所得数值频谱图 (b)

Fig. 4 Hybrid outputs of 2 ILFEs (cavity length 3.1 mm and 1.3 mm respectively) (a) and their numerical frequency (by FFT) (b)

4 实验与讨论

图 5 为基于空芯 PCF 的 ILFE 频分/粗波分复用系统应变测试实验装置示意图。从宽带光源发出的光经 2×2 耦合器后, 进入 1×4 粗波分复用器 (CWDM, 隔离度为 35 dB, 回波损耗为 45 dB), 通过粗波分复用器的宽带光被分解成 4 个带宽约为 20 nm 的通道, 由于光源限制, 只选用了 1520~1540 nm 和 1540~1560 nm 两个通道, 分别各自接入两个 ILFE 传感器, 其中同一通道内两传感器腔长不同, 不同通道内传感器的腔长可相同, 也可不同。实验中将 Sensor 1(3 mm) 和 Sensor 2 (2.7 mm) 通过耦合器接入 CWDM 的 1520~1540 nm 通道, Sensor 3(6 mm) 和 Sensor 4(1.7 mm) 接入 1540~1560 nm 通道。通过传感器反射回来并由 CWDM 集中的信号通过耦合器进入光谱仪, 然后通过计算机采集进行傅里叶变换解

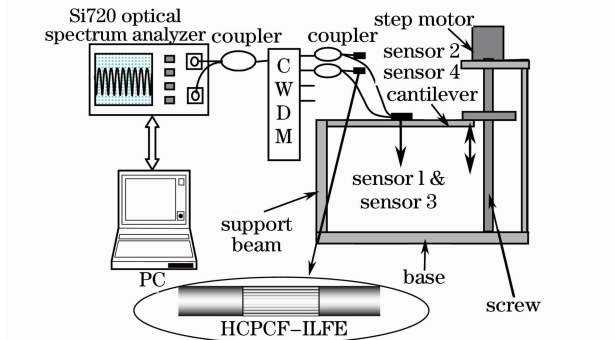


图 5 粗波分/频分复用系统应变测量装置图

Fig. 5 Schematic diagram of the SFDM/CWDM strain test experimental set-up

调处理。图 6 为通过光谱仪采集的 4 个 ILFE 应变传感器的两通道信号。从图中可看出, 各路信号分别位于不同的波段, 对各路信号分别采用相同的信号解调方法解调即可以实现多路传感器的波分/频分复用。

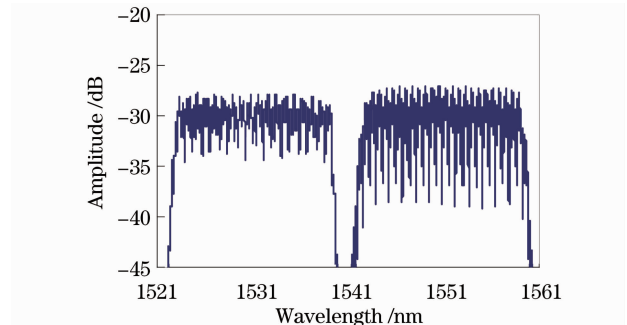


图 6 两路基于空芯 PCF 的 ILFE 传感器信号

Fig. 6 Reflective spectra of two groups of HCPCF based ILFE sensors

实验中传感器 1 和 3 粘贴在金属悬臂上的不同位置, 金属悬臂末端安装步进电机使悬臂末端发生位移而产生应变, 传感器 2 和 4 则不受应变, 用来测量粗波分复用通道之间的串扰及通道内两传感器之间的串扰。传感器 1 和 3 的应变测试结果如图 7 所示, 从图中可以看出该传感器线性度较好, 精度较高, 达 $\pm 5 \mu\epsilon$ 。由于熔接的基于空芯 PCF 的 ILFE 输出的信号带有波纹, 经 FFT 变换后主频谱旁边有一些杂频存在, 由传感器 2 和 4 测得的串扰比相应报道的 SFDM/CWDM Fizeau 传感器系统高了约 3

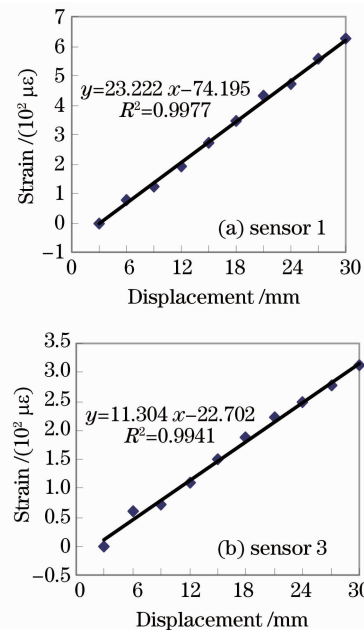


图 7 基于 HCPCF 的 ILFE 传感器的应变测量结果

Fig. 7 Experimental results of the HCPCF based ILFE strain sensors

倍^[4]。这有待于提高熔接的 ILFE 输出信号质量和改进算法来进一步降低^[15]。

5 结 论

分析了由基于空芯 PCF 的 ILFE 干涉原理而得出的制作中镀膜和调节熔接参数法提高制作的 ILFE 输出信号质量方法,以及光源时间相干长度对输出信号的影响。接着对制作的 ILFE 进行了复用,应用粗波分/频分复用系统进行了应变测试实验,得到较高精度的结果,达 $\pm 5 \mu\epsilon$,证明了结合基于空芯 PCF 的 ILFE 腔长可以制作得很长,和波分频分复用方法复用能力强的优点能有效地提高基于空芯 PCF 的 ILFE 应变传感器的复用能力,该传感器系统可望在大型结构健康监测中发挥重要作用。

参 考 文 献

- 1 Y. J. Rao. Recent progress in fiber-optic extrinsic Fabry-Perot interferometric sensors [J]. *Opt. Fiber Technol.*, 2006, **12**(3): 227~237
- 2 E. Udd. Fiber optic smart structures [C]. Proc IEEE, 1996, **84**(6): 884~894
- 3 Liu Weijun, Rao Yunjiang, Ran Zengling *et al.*. Novel Fabry-Pérot fiber-optic refractive-index sensor based on laser micromachining[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1400~1404
刘为俊, 饶云江, 冉曾令等. 基于激光微加工的新型光纤法布里-珀罗折射率传感器[J]. *光学学报*, 2008, **28**(7): 1400~1404
- 4 Zhou Changxue, Rao Yunjiang, Zhu Tao. SFDM/CWDM of fiber-optic Fizeau strain sensors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(11): 1472~1476
周昌学, 饶云江, 朱涛. 光纤菲佐应变传感器的波分频分复用方法[J]. *光学学报*, 2005, **25**(11): 1472~1476
- 5 Deng Hongyou, Rao Yunjiang, Ran Zengling *et al.*. Photonic crystal fiber based Fabry-Pérot sensor fabricated by using 157 nm laser micromachining [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 255~258
邓洪有, 饶云江, 冉曾令等. 用 157 nm 激光制作的光子晶体光纤法布里珀罗传感器[J]. *光学学报*, 2008, **28**(2): 255~258
- 6 J. Sirkis, T. A. Berkoff, R. T. Jones. In-line fiber etalon (ILFE) fiber-optic strain sensors[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(7): 1256~1263
- 7 C. E. Lee H. F. Taylor. Interferometric optical fibre sensors using internal mirrors. [J]. *Electron. Lett.*, 1988, **24**(4): 193~194
- 8 V. Bhatia, K. A. Murphy, R. O. Claus *et al.*. Optical fiber based absolute extrinsic Fabry-Perot interferometric sensing system[J]. *Meas. Sci. Technol.*, 1996, **7**(1): 581~585
- 9 Duan Dewen, Zhu Tao, Rao Yunjiang *et al.*. A miniature extrinsic Fabry-Pérot interferometer strain sensor based on hollow-core photonic crystal fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 17~20
段德稳, 朱涛, 饶云江等. 基于空芯光子晶体光纤的微型非本征光纤法布里-珀罗干涉应变传感器[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 17~20
- 10 Rao Yunjiang, Li Hong, Zhu Tao *et al.*. High temperature strain sensor based on in-line Fabry-Perot interferometer formed by hollow-core photonic crystal fiber[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1484~1488
饶云江, 黎宏, 朱涛等. 基于空芯光子晶体光纤的法-珀干涉式高温应变传感器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(6): 1484~1488
- 11 Yoshihiro Ohtsuka. Optical coherence effects on a fiber-sensing Fabry-Perot interferometer [J]. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(23): 4316~4320
- 12 D. N. Wang, K. T. V. Grattan, A. W. Palmer. Resolution improvement using a dual wavelength white light interferometer [J]. *Sensors and Actuators A*, 1999, **75**(2): 199~203
- 13 Wang An, Fan Yanping, Zhu Ling *et al.*. Influence of optical coherence on fiber-optic Fabry-Perot interferometer[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2009, **7**(2): 6~9
王安, 范彦平, 朱灵等. 光源相干长度对光纤 Fabry-Perot 干涉的影响[J]. *光学与光电技术*, 2009, **7**(2): 6~9
- 14 Lu Haisong, Zhang Peng, Chen Weimin *et al.*. Study on fiber Fabry-Perot strain sensors series and parallel mixed multiplexing with discrete gap transform [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(5): 842~846
陆海松, 章鹏, 陈伟民等. 光纤法珀应变传感器串并联混合复用的离散腔长变换解调研究[J]. *光子学报*, 2007, **36**(5): 842~846
- 15 Rao Yunjiang, Wang Xijing, Zhu Tao *et al.*. Demodulation algorithm for frequency-division-multiplexed fiber optic Fizeau strain sensor networks [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7): 997~1000
饶云江, 王希晶, 朱涛等. 光纤菲佐传感器频分复用网络解调方法研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(7): 997~1000