

文章编号: 0253-2239(2005)03-307-5

# 具有温度补偿功能的光纤光栅传感解调系统\*

张东生<sup>1,2</sup> 开桂云<sup>1</sup> 曹 晔<sup>1</sup> 姜 莉<sup>1</sup> 罗建花<sup>1</sup> 董孝义<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 南开大学现代光学研究所, 天津 300071  
<sup>2</sup> 武汉理工大学光纤传感技术研究中心, 武汉 430070)

**摘要:** 从理论和实验上研究了三角形光纤布拉格光栅的温度特性, 结果表明: 三角形光纤布拉格光栅谐振波长的温度变化率与普通光纤光栅的相同, 并且其光谱形状不随温度的变化而改变。利用三角形光纤光栅光谱的这一温度特性, 设计了一种具有温度补偿功能的应变传感解调系统。该系统利用斜线光纤光栅将光纤光栅应变传感的波长编码信息转换为强度, 并且用信号强度与参考光强度的比值作为应变的度量值。研究表明, 应变与应变度量值成线性关系, 同时系统具有温度补偿功能。在三种不同的温度条件下, 对悬臂梁的应变测试结果显示: 在实验测量范围内, 温度变化 1 °C 导致的应变测量误差小于 6 微应变。由于采用信号强度和参考光强度的比值作为应变的度量值, 避免了宽带光源的平坦度及波动对测量结果的影响。

**关键词:** 导波与光纤光学; 光纤光栅传感; 应变测量; 三角形光纤布拉格光栅; 温度补偿

中图分类号: TN25 文献标识码: A

## A Novel Fiberg Grating Sensing and Demodulating System with Temperature Compensation

Zhang Dongsheng<sup>1,2</sup> Kai Guiyun<sup>1</sup> Chao Ye<sup>1</sup> Jiang Li<sup>1</sup> Luo Jianhua<sup>1</sup> Dong Xiaoyi<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071  
<sup>2</sup> Fiber Optic Sensing Technology Research Centre, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070)

**Abstract:** The temperature characteristics of triangular fiber Bragg gratings have been studied theoretically and experimentally. The results show that the rate of resonant wavelength with temperature of the triangular fiber Bragg gratings is the same as that of ordinary fiber Bragg gratings, and the spectral shape of the grating can be kept without being affected by temperature. For the characteristics, a novel strain sensing and demodulating system with temperature compensation is designed. In the system, the wavelength code of strain is converted into the signal intensity, and the ratio of the signal intensity and the referent light intensity is used as the measuring value of strain. Theoretical and experimental researches indicate that the strain is proportional to the measurement value, and the system has the temperature compensation property. At three different temperature conditions, the strain test results of the cantilever experiments show that the measurement error of strain is less than 6 micro-strain /°C. For adopting the ratio of the signal intensity and the referent light intensity as the measuring value of strain, it avoids the effect to the test results coming from the flatness and fluctuating of the broad band light source.

**Key words:** guided wave and fiber optics; fiber grating sensing; strain measurement; triangular fiber Bragg grating; temperature compensation

## 1 引 言

光纤光栅传感是随着光纤通信技术的发展而逐步发展起来的一项崭新技术, 其传感量以光信号的形式在光纤中传输, 不受电磁干扰, 可以在恶劣环境

中工作。光纤光栅可以组成分布式光纤传感网络, 在建筑、桥梁、航空、石油和化工领域具有广泛应用<sup>[1~3]</sup>。在光纤光栅传感系统中, 波长的解调和光栅温度, 应变的交叉敏感问题, 一直是人们关注的两

\* 国家 863 计划(2002AA313110)、国家 973 计划(2003CB314906)和武汉理工大学博士启动基金资助课题。

作者简介: 张东生(1964~), 男, 辽宁锦州市人, 武汉理工大学光纤中心博士, 主要从事光纤光栅及光纤光栅传感应用研究。E-mail: zhangdsem@sina.com。

收稿日期: 2004-05-09; 收到修改稿日期: 2004-09-28

个主要问题,提出了许多波长解调和温度补偿方案<sup>[4~6]</sup>。其中,马赫-曾德尔干涉法、法布里-珀罗滤波法、光纤光栅匹配滤波法解调速度慢,结构复杂;而利用光纤光栅反射(或透射)谱的边缘滤波解调<sup>[7]</sup>,是最为快捷、简便和可靠的方案。它分为两种:其一,利用长周期光纤光栅透射谱的准线性区,进行解调。但是,长周期光栅的透射谱容易受到环境的影响,不宜采用;另一种方案就是制作三角形反射谱的光纤布拉格光栅<sup>[8,9]</sup>,布拉格光栅与长周期光栅相比,性能稳定。本文在研究了三角形布拉格光栅光谱的温度特性基础上,设计了具有温度补偿功能的光纤光栅应变测量解调系统。

## 2 原 理

具有温度补偿功能的光纤光栅应变测量解调实验系统如图 1 所示。图中,用特定的胶将传感光纤布拉格光栅(FBG)粘贴在悬臂梁 A 上,悬臂梁 A 一端固定,另一端施加应力  $F$ ,通过光纤布拉格光栅谐振波长的漂移来感测悬臂梁 A 的应变。为了对波长编码的应变信息进行解调,同时避免使用昂贵的波长选择设备,利用三角形光纤布拉格光栅(TFBG)作为解调器件,将光的波长编码信息转变为光的强度,直接用光功率计接收处理。解调三角形光纤布拉格光栅与传感光纤布拉格光栅由同一种光敏光纤写成,并且用相同的胶粘贴在与悬臂梁 A 完全相同的物体 B 上,物体 B 与悬臂梁 A 并行临近放置,处在相同的恒温环境中。三角形光纤布拉格光栅透射谱如图 2 所示。由宽带光源(BBS)发出的信号光经过 3 dB 耦合器照在传感光纤布拉格光栅上,由于光纤布拉格光栅的波长选择性,反射后的窄带光波经过另一个 3 dB 耦合器分成两束,其中一束光直接由光功率计 PD<sub>1</sub> 接收;另一束光经过三角形光纤布拉格光栅后,其透射光由光功率计 PD<sub>2</sub> 接收。

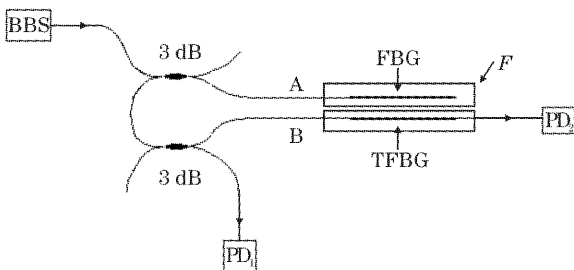


图 1 温度补偿功能的应变测量传感解调系统

Fig. 1 A strain sensing and demodulating system with temperature compensation

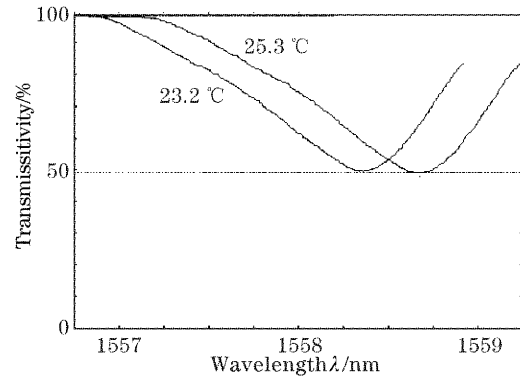


图 2 温度分别为 23.2 °C 和 25.3 °C 时三角形光纤布拉格光栅的透射谱

Fig. 2 The transmission spectrums of the TFBG at 23.2 °C and 25.3 °C

由光纤布拉格光栅反射的光的强度分布函数  $I(\lambda)$ ,可由高斯函数近似描述:

$$I(\lambda) = I_0 \exp\left[-4\ln(2)\left(\frac{\lambda - \lambda_B}{\delta\lambda}\right)^2\right], \quad (1)$$

式中  $I_0$  为入射光强度,  $\lambda_B$  为布拉格光栅的谐振波长,  $\delta\lambda$  为半峰值处的带宽。在线性区间内,三角形光纤布拉格光栅的透射率  $t(\lambda)$  表示为

$$t(\lambda) = A + B\lambda, \quad (2)$$

式中  $A, B$  为与温度有关的系数。由光功率计 PD<sub>1</sub> 接收到的功率  $P_1$  为

$$P_1 = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} I(\lambda) d\lambda, \quad (3)$$

而经过三角形光纤布拉格光栅衰减后,入射到 PD<sub>2</sub> 的光功率  $P_2$  为

$$P_2 = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} \gamma I(\lambda) t(\lambda) d\lambda, \quad (4)$$

式中  $\gamma$  是入射光经过第二个 3 dB 耦合器分光后,由于工作波长等因素造成的分光比的变化以及光纤的弯曲和插入损耗的差异而导致的 PD<sub>1</sub> 和 PD<sub>2</sub> 所接收到的实际分光比。在测量系统中,应变传感量的测量值  $P$  由下式来度量:

$$P = P_2 / P_1. \quad (5)$$

将(1)式和(2)式分别代入(3)式和(4)式,计算后再代入(5)式,得到

$$P = \gamma(A + B\lambda_B) = \gamma t(\lambda_B). \quad (6)$$

对于布线完成的测量系统,  $\gamma$  是一个常量。因此,  $P$  只与  $\lambda_B$  (即应变) 有关,而与宽带光源的光强度无关。粘贴在悬臂梁 A 上的传感光纤布拉格光栅的谐振波长与应变的变化关系由下式描述:

$$\lambda_B = \lambda_{B0} + \lambda_{B0} \epsilon (1 - P_e), \quad (7)$$

式中  $\lambda_{B0}$  为传感光纤布拉格光栅处在自由状态时的谐振波长,  $\epsilon$  为轴向应变,  $P_e$  为光纤的弹光系数。将(7)式代入(6)式后,得到

$$\epsilon = kP + \varphi, \quad (8)$$

式中

$$k = \frac{1}{\gamma B \lambda_{B0} (1 - P_e)}, \quad \varphi = \frac{A + B \lambda_{B0}}{B \lambda_{B0} (1 - P_e)}, \quad (9)$$

(8)式即为利用应变传感系统进行应变测量的计算公式。从(8)式可以看出,  $\epsilon$  与  $P$  呈线性关系变化。

均匀光纤布拉格光栅的谐振波长与温度的变化关系由下式给出:

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = (\xi + \alpha) \Delta T, \quad (10)$$

式中  $\xi$  为热光系数,  $\alpha$  为热膨胀系数。温度在一定变化范围内, 均匀光纤布拉格光栅的谐振波长随温度近似成线性变化<sup>[10]</sup>, 其变化量由光纤的材质决定, 与光栅的谐振波长和反射率无关。

三角形光纤布拉格光栅可以看成是由若干小的均匀子光栅组成, 其透射谱是这些小的均匀子光栅透射谱叠加的结果。由于这些子光栅的谐振波长随温度的变化做同步漂移, 漂移量与均匀光纤布拉格光栅的相同, 所以由这些子光栅光谱线性叠加组成的三角形光纤布拉格光栅光谱随着温度的变化也做相应的漂移, 漂移量与均匀光纤布拉格光栅的也相同, 并且可以认为, 在有限的温度变化范围内, 三角形光纤布拉格光栅光谱形状保持不变。

由于光栅受到一定应变时的  $\lambda_B$  与光栅未受到应变时的  $\lambda_{B0}$  随温度做同步漂移, 即  $\lambda_B - \lambda_{B0}$  不随温度的变化而改变, 所以, 根据(7)式,  $\lambda_{B0} (1 - P_e)$  是一个与温度无关的量。另外, 在有限的温度变化范围内, 三角形光纤布拉格光栅透射谱的形状不变, 所以,  $B$  和  $A + B \lambda_{B0}$  也都是不随温度变化的常量。因此, 从(9)式中不难看出, 参量  $k$  和  $\varphi$  是与温度无关的常量。同样, 可以证明  $P$  也是与温度无关的量。

综上所述, 在一定的温度变化范围内, 本文所设计的应变传感解调系统的测量结果不受温度影响, 具有温度补偿功能。

### 3 实验与结果

#### 3.1 三角形光纤布拉格光栅温度特性的实验研究

为了验证三角形光纤布拉格光栅与光纤布拉格光栅具有相同温度特性这一论断, 分别在“自然”和“粘贴”(粘贴在有机聚合物上)两种情况下, 对两种

光栅的谐振波长与温度的变化关系进行了实验研究, 实验结果如图3所示。图中, 符号■和●分别表示光纤布拉格光栅和三角形光纤布拉格光栅在“自然”情况下的测量点, 符号▲与▼分别表示它们在“粘贴”情况下的测量点。实线、虚线、点划线等则是它们相应的拟合线, 相应的直线方程见表1。

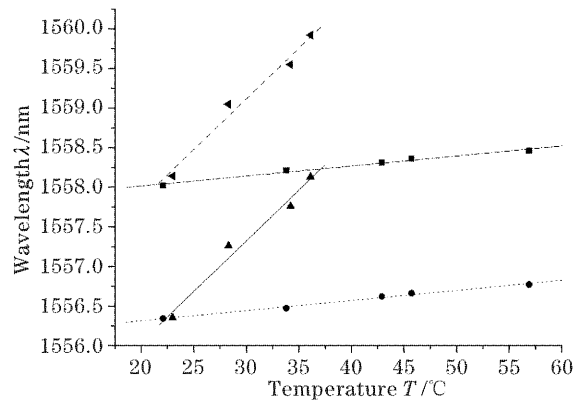


图3 两种光栅分别在自然状态、粘贴情况下, 谐振波长随温度的变化关系

Fig. 3 The relationship between the resonant wavelengths of the two gratings and temperature in free, adhered situation  
表1 与三角形光纤布拉格光栅谐振波长随温度变化的实验拟合方程

Table 1 Fitting equations of resonant wavelength changing with temperature

	FBG	TFBG
Free	$\lambda = 1556.7 + 0.0128T$	$\lambda = 1557.8 + 0.0127T$
Adhered	$\lambda = 1553.5 + 0.128T$	$\lambda = 1555.3 + 0.128T$

从图3和表1可以得到如下结论: 在测量误差允许的范围内, 处在相同状态(自然或粘贴)的两种光栅的谐振波长随温度的变化率一致; 粘贴在有机聚合物上的光栅对温度更加敏感, 它们的谐振波长随温度的变化率是无粘贴状态时的10倍; 粘贴状态下, 两种光栅的谐振波长随温度的变化率也一致。

另外, 还实验研究了三角形光纤布拉格光栅透射谱的形状随温度变化的情况。图2给出的就是在光谱仪上观察到的温度为23.2 °C和25.3 °C时三角形光纤布拉格光栅的透射谱的漂移情况。通过对透射谱在线性区间内若干取样点的测量, 得到温度为23.2 °C, 25.3 °C和31.1 °C时三角形光纤布拉格光栅透射谱线性区间内的拟合线及其直线方程, 参见图4。图4中, ■, ▲, ★是分别对应温度为23.2 °C, 25.3 °C和31.1 °C的测量点, 相应的实线、虚线和点划线即为它们的拟合线, 拟合线方程见表2。

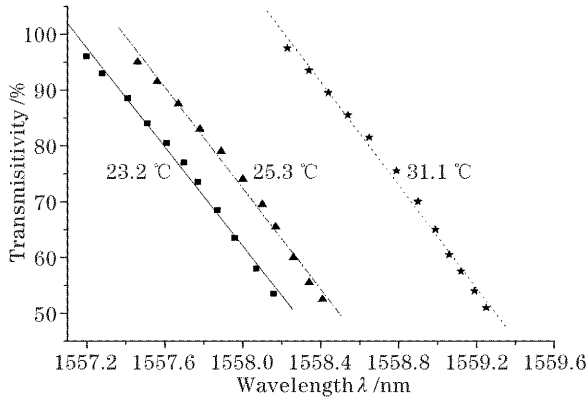


图 4 三种温度情况下三角形光纤布拉格光栅透射谱拟合线

Fig. 4 The fits of the transmission spectrum of TFBG at three different temperatures

表 2 三种温度情况下三角形光纤布拉格光栅透射谱直线方程

Table 2 Linear equations of the transmission spectrum of TFBG at three different temperatures

Temperature / °C	Linear equations of the transmission spectrum of TFBG
23.2	$t(\lambda) = 699.12 - 0.4484\lambda$
25.3	$t(\lambda) = 705.02 - 0.4521\lambda$
31.1	$t(\lambda) = 719.89 - 0.4614\lambda$

在三种温度情况下进行透射率取样点的测量实验中,由于每次接入光谱仪时插入损耗的随机性,所以造成透射谱线的测量误差,结果导致斜线拟合方程差异。从图 4 和表 2 中可以看出:在测量的温度变化范围内,可近似认为三角形光纤布拉格光栅透射谱的形状不受温度变化的影响。

综合上述实验可以得到下述结论:在测量误差允许的范围,三角形光纤布拉格光栅和光纤布拉格光栅两种光栅无论是处在“自然”还是“粘贴”的情况下,它们的谐振波长随温度的变化率一致;在一定的温度变化范围内,可认为三角形光纤布拉格光栅的透射谱形态保持不变。

### 3.2 应变测量与解调

图 1 中,传感布拉格光栅(FBG)和解调三角形光纤布拉格光栅分别粘贴在悬臂梁 A 和物体 B 上,悬臂梁 A 与物体 B 是同一种有机聚合物材料,放在同一恒温箱中。实验中,分别在 22.9 °C, 26.8 °C 和 31.8 °C 三种不同温度条件下,对悬臂梁的微应变和测量值  $P$  进行测量。在温度为 26.8 °C 时,三角形光纤布拉格光栅透射谱线性区的直线方程为

$$t(\lambda) = 705.09 - 0.4521\lambda, \quad (11)$$

式中  $\lambda$  的单位为 nm。

在温度为 20 °C 时,  $P_e = 0.22$ 。由于  $\lambda_B - \lambda_{B0} = \lambda_{B0}(1 - P_e)$  不随温度变化,所以,根据(8)式和(9)式,得到

$$\epsilon = 2.2647 \times 10^3 - 1.8225 \times 10^3 P / \gamma, \quad (12)$$

式中  $\epsilon$  的单位是  $10^{-6}$ 。(12)式是温度为 26.8 °C 时从理论上计算出来的微应变与测量值之间的关系式,它是与温度无关的。

在温度为 26.8 °C 时,三角形光纤布拉格光栅的线性变化范围位于 1557.38~1558.53 nm 之间,与此相应的透射率为 0~47.74%。在此温度下,传感光纤布拉格光栅自由状态的谐振波长 1556.84 nm,施加一定应力产生  $\epsilon_0 = 444.9410 \times 10^{-6}$  后,传感光栅光纤布拉格光栅的谐振波长开始进入解调光栅三角形光纤布拉格光栅的线性变化范围之内。在三角形光纤布拉格光栅透射谱的线性区内,测量得到光纤布拉格光栅的谐振波长与  $P$  值的变化关系拟合曲线,如图 5 所示。它的线性方程为

$$P = 128.657 - 0.08235\lambda_B, \quad (13)$$

(13)式与(6)式和(11)式比较,得到  $\gamma = 0.1822$ 。则

$$P \approx 0.1822 \times (705.0029 - 0.4521\lambda) = 0.1822t(\lambda), \quad (14)$$

(14)式与(6)式符合很好。将  $\gamma = 0.1822$  代入(12)式,得到

$$\epsilon = 2.2647 \times 10^3 - 10.0027 \times 10^3 P, \quad (15)$$

(15)式即为应变光栅传感系统的微应变的理论计算公式。

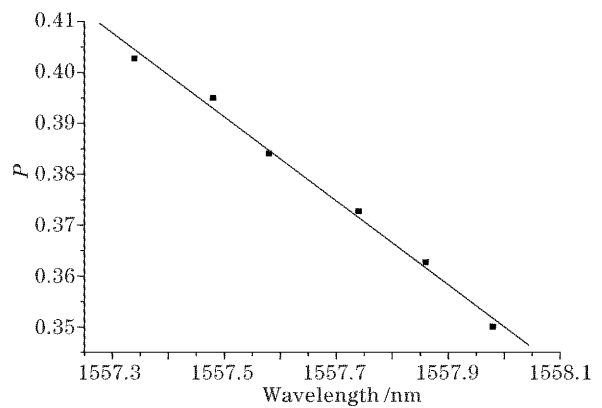
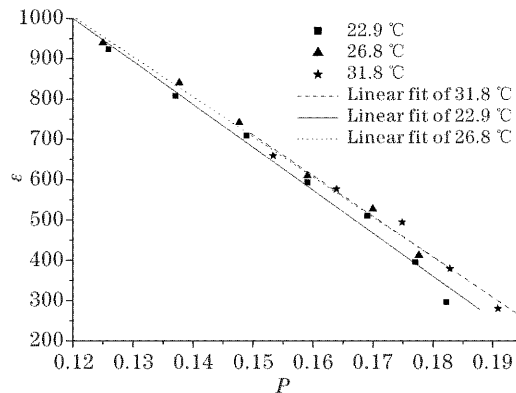


图 5 谐振波长与应变测量值的变化关系

Fig. 5 The relationship between the measurement value and the resonant wavelength

在 22.9 °C, 26.8 °C 和 31.8 °C 三种不同温度条件下,实验测量的应变与系统  $P$  值之间的变化关系如图 6 所示,相应的拟合线方程见表 3。实验过程中,悬臂梁的微应变  $\epsilon$  是利用(7)式,并且根据光纤

布拉格光栅的谐振波长的测量值计算得到的。



温度为 22.9 °C, 26.8 °C 和 31.8 °C 时, 微应变和测量值之间的变化关系

Fig. 6 The relationship between the microstrain and its measuring value at 22.9 °C, 26.8 °C and 31.8 °C

表 3 三种温度条件下, 微应变与其测量值的实验拟合方程  
Table 3 Fitting equations of microstrain and its measuring value at three different temperatures

Temperature / °C	Fitting equations
22.9	$\epsilon = 2.278 \times 10^{-3} - 1.0650 \times 10^{-2} P$
26.8	$\epsilon = 2.197 \times 10^{-3} - 9.935 \times 10^{-2} P$
31.8	$\epsilon = 2.221 \times 10^{-3} - 1.0066 \times 10^{-2} P$

表 4 给出的是实验测量得到的应变与  $P$  值的变化关系方程的参量  $a$  和  $b$  与理论值的相对误差, 它们不大于 7%。在实验测量的范围之内 ( $P = 0.12 \sim 0.19$ ), 温度变化 8.9 °C, 应变的实验测量误差小于  $5.5 \times 10^{-5}$ 。相当于温度每变化 1 °C, 测量误差小于  $6 \times 10^{-6}$ 。

表 4 三种温度条件下, 参量  $a, b$  的相对误差

Table 4 Relative errors of  $a$  and  $b$  at three different temperatures

Temperature / °C	Relative error	
	of $a$ / %	of $b$ / %
22.9	0.6	6
26.8	3	7
31.8	2	0.6

## 4 结 论

本文从理论上分析了三角形光纤布拉格光栅的

温度特性, 并进行了实验研究。理论分析和实验结果表明, 在有限的温度变化范围内, 三角形光纤布拉格光栅的光谱只是平移, 形态近似不变; 它的谐振波长的温度变化率与处在相同状态的普通光纤布拉格光栅的相同。把理论公式与实验测量公式比较后显示: 公式中各参量的相对误差小于 7%。本文还对应变传感解调系统的温度补偿特性进行了理论研究, 并且在三种不同的温度条件下进行了实验测量, 结果表明该应变传感解调系统具有温度补偿功能。

## 参 考 文 献

- Zhang Weigang, Liu Yiange, Wang Yue *et al.*. Study of sensing and measurement for vertically mechanical quantities using single Fiber grating[J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, **30**(1): 71~74 (in Chinese)  
张伟刚, 刘艳格, 王跃等. 利用单光纤光栅实现力学量垂直感测的研究[J]. *中国激光*, 2003, **30**(1): 71~74
- Yu Youlong, Hwayaw Tam, Wenghong Chung *et al.*. Fiber Bragg grating sensor for simultaneous measurement of displacement and temperature[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(16): 1141~1131
- Guan B O, Tan H Y, Ho S L *et al.*. Simultaneous strain and temperature measurement using a single fiber Bragg grating[J]. *Electron. Lett.*, 2000, **26**(12): 1018~1019
- Davis M A, Kersey A D. Matched-filter interrogation technique for fiber Bragg grating arrays[J]. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(10): 822~823
- Ohn M M, S Y Huang, R M Measures *et al.*. Arbitrary strain profile measurement within fiber gratings using interferometric Fourier transform technique[J]. *Electron. Lett.*, 1997, **33**(14): 1242~1243
- Brady G, Kalli K, Webb D J *et al.*. Simultaneous interrogation of interferometric and Bragg grating sensors[J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(11): 1340~1342
- Liu Bo, Tong Zhengrong, Chen Shaohua *et al.*. A novel method of edge filter linear demodulation using long period grating in fiber sensor system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(2): 199~202 (in Chinese)  
刘波, 童峥嵘, 陈少华等. 一种长周期光纤光栅边沿滤波线性解调新方法[J]. *光学学报*, 2004, **24**(2): 199~202
- Feced R, Zervas M N. Efficient inverse scattering algorithm for the design of grating-assisted codirectional mode couplers[J]. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 2000, **17**(9): 1573~1581
- Huang Rui, Zhou Yingwu, Sun Guowei *et al.*. A novel fiber Bragg grating with triangular spectrum and its application in strain sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(Supplement): 787~788
- Jia Zhen'an, Qiao Xueguang, Li Ming *et al.*. Nonlinear phenomena of fiber Bragg grating temperature sensing[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(7): 844~847 (in Chinese)  
贾振安, 乔学光, 李明等. 光纤光栅温度传感的非线性现象[J]. *光子学报*, 2003, **32**(7): 844~847