

文章编号: 0253-2239(2001)01-0088-05

光纤光栅传感器的调谐滤波检测技术*

刘云启 刘志国 郭转运 董孝义
(南开大学现代光学研究所, 天津 300071)

摘要: 对光纤光栅传感器的光栅调谐滤波检测系统进行了理论和实验研究, 给出了波长测量分辨率的理论表达式, 理论计算的系统最佳波长分辨率为 0.8 pm; 基于高性能的光电测量系统, 实验测得的波长分辨率可达 2 pm, 应变分辨率可达 1.7 $\mu\epsilon$ 。

关键词: 光纤光栅; 检测; 调谐; 分辨率

中图分类号: TN247 文献标识码: A

1 引 言

近年来光纤光栅(FBG)在光传感方面^[1,2]的研究已经越来越引起人们的重视, 光纤光栅传感器在智能和灵巧结构(Smart Structure)方面有重要的应用价值。由于光纤光栅的传感信息是以波长编码的, 因此研究具有高灵敏度、光能利用率高、操作简单、价格低廉和适用于工程应用的波长位移检测技术对于光纤光栅传感器的最终应用具有重要的意义。国外学者提出了许多光纤光栅波长位移检测方法, 如非平衡马赫-曾德尔(M-Z)干涉仪法^[3]、可调法布里-珀罗(F-P)滤波器法^[4]、压电陶瓷(PZT)匹配光纤光栅滤波法^[5]、成像光谱技术^[6]等多种方法, 这些方法各有不同的优缺点。我们基于光纤光栅悬臂梁线性调谐技术, 提出了利用可调谐光纤光栅滤波器对光纤光栅传感信号进行检测的方案, 并对这一波长检测方案进行了理论和实验研究, 给出了系统波长测量分辨率的理论表达式, 理论计算的最高波长测量分辨率为 0.8 pm; 实验测得的波长测量分辨率可达 2 pm, 对应的应变分辨率为 1.7 $\mu\epsilon$ 。这一传感检测技术具有光能利用率高、信噪比高、操作简单和价格低廉等优点, 是一种较为理想的光纤光栅传感现场测试手段。

2 基本原理

2.1 波长检测原理

利用可调谐光纤光栅滤波器实现光纤光栅传感

器波长检测的基本原理如图 1 所示, 其中 BBS 为宽带光源, PD 为光电探测器, IMG 为折射率匹配液, 用于减少光纤的端面反射。这种波长检测技术可以采用反射和透射两种方案, 图中 (a)、(b) 分别为这两种方案的实验原理图。由传感光纤光栅 FBG₁ 反射宽带光源后形成窄带光谱, 由 3 dB 耦合器耦合到可调谐的滤波光纤光栅 FBG₂ (FBG₂ 为事先定标了的可调谐光纤光栅窄带滤波器) 上, 对于反射方案, 滤波光栅的反射信号经另一 3 dB 耦合器后由光电探测器接收; 而对于透射方案, 耦合到滤波光栅上的信号则经光栅滤波后由光电探测器接收。光电探测器将传感信息转化为电信号, 再经多级电路放大后经数据处理与显示系统显示测量结果。

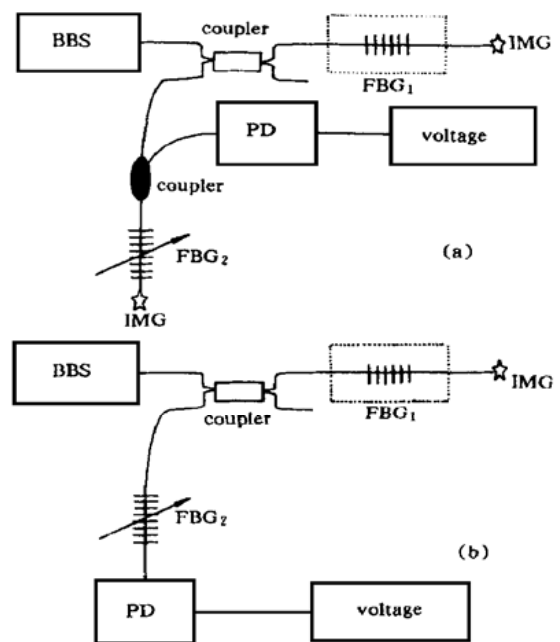


Fig. 1 Wavelength detection scheme of FBG sensor
(a) Reflective mode; (b) Transmissive mode

* 国家自然科学基金和国家攀登计划预研资助项目。
收稿日期: 1999-05-17; 收到修改稿日期: 1999-09-14

2.2 输出功率谱曲线

为了减少问题的复杂性,由文献[7]的分析可知,光纤光栅反射谱的线型可以近似为高斯分布,即光纤光栅的反射谱可以表示为

$$R_i(\lambda) = R_i \exp\left[-4\ln 2 \cdot \frac{(\lambda - \lambda_i)^2}{\Delta \lambda_i^2}\right], \quad (1)$$

其中 R_i 为光栅的峰值反射率, λ_i 为中心波长, $\Delta \lambda_i$ 为半强度带宽 ($i = S, B$, 分别代表传感和滤波光纤光栅)。由于宽带光源的带宽远远大于光纤光栅的带宽,因此,在光纤光栅反射谱宽内将光源入射光视为恒定,所以 FBG1 的反射光强可以表示为 $I_0 R_S(\lambda)$, 其中 I_0 为中心波长处的宽带光源入射光强。

对于图 1(a) 中的反射方案,光电探测器 PD 接收到的光功率 P_R 为对 $\alpha_1 I_0 R_B(\lambda) \cdot R_S(\lambda) \cdot d\lambda$ 在频域的积分,结合(1)式并利用定积分公式

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \exp(-x^2) dx = \sqrt{\pi},$$

化简后可得系统光功率为

$$\begin{aligned} P_R &= \alpha_1 I_0 \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} R_B(\lambda) \cdot R_S(\lambda) d\lambda = \\ & \alpha_1 I_0 R_B R_S \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left[-4\ln 2 \cdot \frac{(\lambda - \lambda_S)^2}{\Delta \lambda_S^2}\right] \times \\ & \exp\left[-4\ln 2 \cdot \frac{(\lambda - \lambda_B)^2}{\Delta \lambda_B^2}\right] d\lambda = \\ & \alpha_1 I_0 R_B R_S \frac{\sqrt{\pi}}{2 \sqrt{\ln 2}} \frac{\Delta \lambda_S \Delta \lambda_B}{(\Delta \lambda_S^2 + \Delta \lambda_B^2)^{1/2}} \times \\ & \exp\left[-4\ln 2 \cdot \frac{(\lambda_B - \lambda_S)^2}{\Delta \lambda_S^2 + \Delta \lambda_B^2}\right]. \quad (2) \end{aligned}$$

对于图 1(b) 中的透射方案,系统光功率的表达式为

$$\begin{aligned} P_T &= \alpha_2 I_0 R_B R_S \frac{\sqrt{\pi}}{2 \sqrt{\ln 2}} \Delta \lambda_S \times \\ & \left[1 - \frac{\Delta \lambda_B}{(\Delta \lambda_S^2 + \Delta \lambda_B^2)^{1/2}} \times \right. \\ & \left. \exp\left[-4\ln 2 \cdot \frac{(\lambda_B - \lambda_S)^2}{\Delta \lambda_S^2 + \Delta \lambda_B^2}\right] \right]. \quad (3) \end{aligned}$$

以上两式中的 α_1, α_2 为经过耦合器的光能利用率。由(2)式、(3)式可知,当调谐滤波光纤光栅 FBG₂ 时,系统光功率 P_R, P_T 将随滤波 λ_B 而发生变化,其波长变化曲线即为输出谱曲线,曲线的半强度带宽为 $(\Delta \lambda_S^2 + \Delta \lambda_B^2)^{1/2}$, 输出谱曲线的极小值位置即为传感光栅的峰值波长 λ_S 的位置。

若实验中采用 3 dB 耦合器,则(2)式、(3)式中的光能利用率分别为 $\alpha_1 = 1/16, \alpha_2 = 1/4$ 。如果由宽带光源进入系统的光功率 P_0 为 $8 \mu\text{W}$, 宽带光源的半强度带宽为 80 nm, 则由公式

$$I_0 = P_0 \cdot (4\ln 2/\pi)^{1/2} / \Delta \lambda$$

可得^[7]: $I_0 = 0.1 \mu\text{W}/\text{nm}$ 。图 2 为透射检测方案的输出光功率谱曲线,其中 $R_B = R_S = 90\%$, $\Delta \lambda_S = 0.2 \text{ nm}$, 图中 P_i (其中 $i = 1, 2, 3, 4$) 分别对应 $\Delta \lambda_B$ 为 0.1 nm、0.2 nm、0.3 nm 和 0.5 nm 时的透射光功率谱曲线,其中 $\lambda = \lambda_B - \lambda_S$ 。

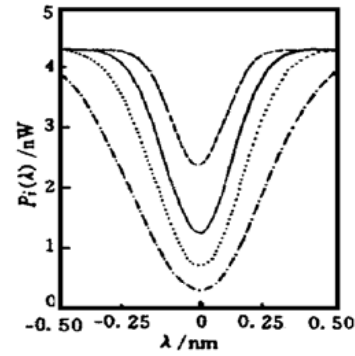


Fig. 2 The curve of transmissive optical power when the wavelength of filter grating is tuned. $P_1(\lambda)$: ----; $P_2(\lambda)$: —; $P_3(\lambda)$:; $P_4(\lambda)$: - · -

2.3 波长检测灵敏度

由于光功率谱波形极小值位置附近的波长测量灵敏度较低,而波峰两侧线性区域的测量灵敏度较高,因此取线性区两条拟合直线的交点做为输出谱曲线的极小值位置,这样确定光纤光栅的中心波长误差较小。基于以上考虑,定义波长检测灵敏度为输出光功率谱曲线的微分,即

$$\begin{aligned} \frac{dP_T}{d\lambda_B} &= 4 \sqrt{\pi \ln 2} \alpha_2 I_0 R_B R_S \frac{\Delta \lambda_B \Delta \lambda_S}{(\Delta \lambda_B^2 + \Delta \lambda_S^2)^{3/2}} \times \\ & (\lambda_B - \lambda_S) \exp\left[-4\ln 2 \cdot \frac{(\lambda_B - \lambda_S)^2}{\Delta \lambda_S^2 + \Delta \lambda_B^2}\right]. \quad (4) \end{aligned}$$

图 3 为滤波光栅的带宽取不同值时,传感系统透射光功率谱的波长测量灵敏度曲线,其中 R_B, R_S, I_0 和 $\Delta \lambda_S$ 的取值同图 2, 图中 $dP_i/d\lambda$ (其中 $i = 1, 2, 3, 4$) 分别对应 $\Delta \lambda_B$ 为 0.1 nm、0.2 nm、0.3 nm 和 0.5 nm 时的灵敏度曲线。由(4)式可知,图 3 中曲线的极值位置为

$$\lambda_B - \lambda_S = \frac{1}{2 \sqrt{2 \ln 2}} (\Delta \lambda_S^2 + \Delta \lambda_B^2)^{1/2},$$

对应的最佳波长检测灵敏度为

$$\frac{dP_T(\Delta \lambda_B)}{d\lambda_B} = \frac{\sqrt{2\pi}}{\sqrt{e}} \alpha_2 I_0 R_B R_S \frac{\Delta \lambda_B \Delta \lambda_S}{\Delta \lambda_B^2 + \Delta \lambda_S^2}. \quad (5)$$

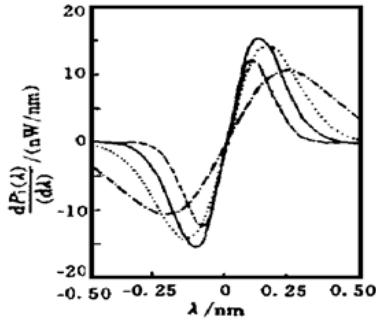


Fig. 3 The detection sensitivity curve of the transmissive

optical power. $\frac{d}{d\lambda}P_1(\lambda)$: ----; $\frac{d}{d\lambda}P_2(\lambda)$: —;
 $\frac{d}{d\lambda}P_3(\lambda)$:; $\frac{d}{d\lambda}P_4(\lambda)$: - · -

图4为理论计算的最佳波长测量灵敏度与滤波光栅半强度带宽的关系曲线,其中 R_B 、 R_S 、 I_0 和 $\Delta\lambda_S$ 的取值同图2,图中曲线依次为滤波光栅带宽 $\Delta\lambda_B$ 为0.1 nm、0.2 nm、0.3 nm和0.5 nm的情况。由(5)式可知,当滤波光栅的半强度带宽 $\Delta\lambda_B = \Delta\lambda_S$ 时,最佳波长测量灵敏度最高。

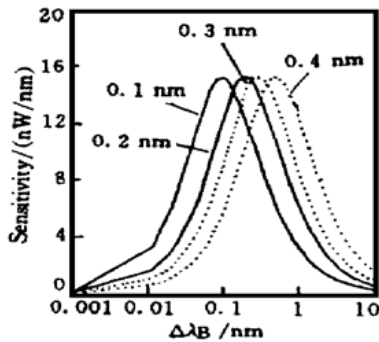


Fig. 4 The curve of relation between the best sensitivity of wavelength measurement and width of sensing grating

2.4 波长分辨率

传感系统的波长检测分辨率 $\delta\lambda$ 主要取决于透射信号的归一化幅度 T 、输出光功率谱曲线的波长测量灵敏度 $dP/d\lambda_B$ 和测量系统的最小可探测功率 δP ,用公式可以表示为

$$\delta\lambda = \frac{\delta P}{(dP/d\lambda_B) T}. \quad (6)$$

定义归一化幅度

$$T = \frac{P_T(\lambda_B = \infty) - P_T(\lambda_B = \lambda_S)}{P_T(\lambda_B = \infty)},$$

由(3)式可知

$$T = \frac{\Delta\lambda_B}{(\Delta\lambda_B^2 + \Delta\lambda_S^2)^{1/2}},$$

因此透射信号的归一化幅度 T 与滤波光栅的带宽有关;透射信号的 T 值越高,则系统的信噪比

(SNR)就越高。上式中的波长检测灵敏度也与滤波光栅带宽有关,其关系满足公式(5),而 δP 则由探测器及测量电路的特性决定。在传感系统设计过程中,为了得到最好的波长分辨率,必须使透射信号的归一化幅度最大和波长检测灵敏度最高^[8]。

图5为波长检测灵敏度、透射信号的归一化幅度以及 $(dP/d\lambda_B) T$ 与滤波光栅半强度带宽的关系曲线。为了便于对比,图中给出了 $(T \times 10)$ 与滤波光栅带宽的关系曲线。由图可知,当滤波光栅的半强度带宽 $\Delta\lambda_B = \Delta\lambda_S$ 时,输出功率谱曲线的最佳波长测量灵敏度最大,但系统的波长测量分辨率并非最高。结合(5)式可知,当滤波光栅带宽满足关系式 $\Delta\lambda_B = \sqrt{2}\Delta\lambda_S$ 时,系统的波长测量分辨率最高;而此时的最佳波长检测灵敏度为

$$\frac{2}{3} \sqrt{\frac{\pi}{e}} \alpha_2 I_0 R_B R_S = 0.0145 \mu\text{W/nm}.$$

如果测量系统的最小可探测功率为皮瓦量级(约为10 pW),且 $T \approx 0.9$,则由(6)式可得传感系统的波长检测分辨率可达0.8 pm,这是在现有的系统配置($R_B = R_S = 90\%$, $I_0 = 0.1 \mu\text{W}$, $\Delta\lambda_S = 0.2 \text{ nm}$)下传感器所能达到的最高波长分辨率。

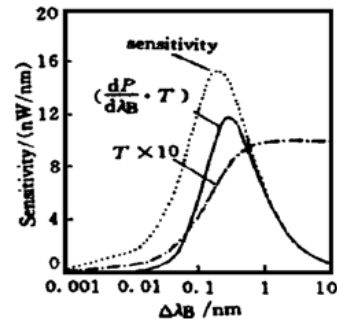


Fig. 5 The relationship among the measuring wavelength sensitivity, the normalized transmissivity, $\frac{dP}{d\lambda_B} \cdot T$ and the FWHM of the filtering FBG

由公式(5)、(6)可知提高系统波长测量分辨率的方法为:选用高功率的宽带光源和高反射率的光纤光栅;选用半强度带宽相互匹配的传感和滤波光栅。同时考虑到波分复用传感系统的要求,为了保证在一定的调谐波长范围内复用尽可能多的传感光栅,传感光栅的半强度带宽越窄越好。

3 实验结果与讨论

3.1 实验结果

我们用图1(b)所示的光路配置构成光纤光栅传感测试系统,其中滤波光栅的调谐方法采用

一种新型线性调谐技术——悬臂梁调谐技术^[9], 宽带光源用峰值为 1530 nm 的宽带发光二极管(其输出功率约为 8 μ W~ 9 μ W, 半强度带宽约为 80 nm); 光电控制器采用高灵敏度的 InGaAs 光电二极管; 实验中传感光纤光栅也粘贴于悬臂梁上, 通过调谐悬臂梁模拟待测传感量的变化; 实验所用的光纤光栅是采用相位掩模法在掺锗光敏光纤中写入的, 光栅的中心波长在 1526 nm 左右, 反射率均大于 90%; 其中滤波光纤光栅的半强度带宽为 0.20 nm, 传感光栅的半强度带宽为 0.25 nm。

悬臂梁调谐技术的基本原理如图 6 所示, 其中调谐光纤光栅粘接在悬臂梁的固定端附近, 调节梁的自由端位移, 梁的弯曲将对光纤光栅产生拉伸和压缩作用, 从而使光栅的中心波长发生变化, 实现对滤波光纤光栅的波长调谐^[9]。利用光纤光谱分析仪(AV6361 型)对滤波光栅调谐特性进行了标定, 其调谐曲线如图 7 所示, 图中横坐标为悬臂梁形变量调节器的刻度数。由图 7 通过数据拟合的结果可知, 悬臂梁调谐技术具有很好的线性, 形变量调节器的波长调谐灵敏度 ($\Delta \lambda / \text{div}$) 为 0.0125 nm/div, 滤波光栅总的调谐量约为 5.6 nm。

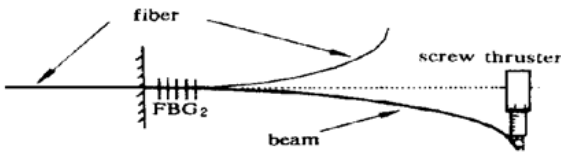


Fig. 6 Schematic diagram of FBG cantilever beam tunable technique

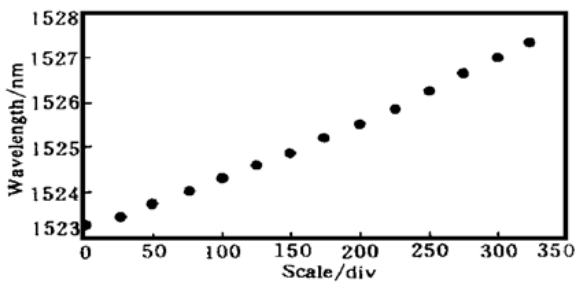


Fig. 7 Tunable curve of filter fiber grating

实验中滤波光栅 FBG2 调谐过程中毫伏表电压信号的变化曲线如图 8(a) 所示, 由图可知, 电压输出谱曲线除主峰外还有一个次峰, 这主要是由于滤波光纤光栅分别具有一个主峰和次峰的原因(主次峰之间的间距为 1.3 nm)。为了便于对比, 我们将滤波光栅的反射谱示于图 8(b) 中, 从图上可以看到, 图 8(a)、(b) 中的峰值位置一一对应。结合图 7 和图 8(a) 的实验数据通过计算可得: 电压输出谱曲线的主次峰之间的波长间隔为 1.26 nm, 其中主峰

的半强度带宽为 0.32 nm, 与光谱仪直接测量的结果基本一致。

3.2 波长分辨率

实验中波长测量分辨率 $\delta \lambda$ 可以由以下方法确定: 波长分辨率由图 8(a) 中波形两侧线性区域拟合直线斜率的平均值 $\Delta V / \text{div}$ 、毫伏表可分辨的最小稳定显示值电压 δV 和波长调谐灵敏度 $\Delta \lambda / \text{div}$ 三方面因素共同决定, 即波长分辨率可表示为

$$\delta \lambda = \frac{\text{div}}{\Delta V} \delta V \frac{\Delta \lambda}{\text{div}}, \quad (7)$$

其中 $\Delta V / \text{div}$ 可由毫伏表的电压变化曲线实验测得, 其大小主要是由最佳波长测量灵敏度、放大电路的放大倍数和光电探测器的量子效率等因素决定, 由图 8(a) 可知毫伏表电压输出曲线的主透射峰的

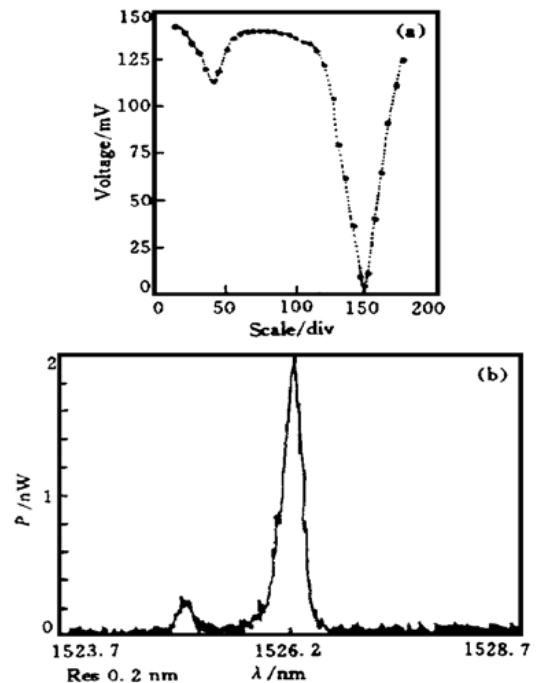


Fig. 8 The curve of voltage output of the sensor (a) and the reflective spectrum of filter grating (b)

$\Delta V / \text{div}$ 的平均值为 6.75 mV/div。 δV 主要决定于放大电路的信噪比的高低和毫伏表的分辨率大小, 对本文的实验测量系统来说, 由于采用了高信噪比的放大电路, 毫伏表可分辨的最小稳定值电压 δV 为 1.0 mV, 因此实验测得的波长测量分辨率 $\delta \lambda$ 近似为 0.002 nm。根据光纤光栅峰值波长与其最小可探测应变量的关系式 $\delta \lambda / \lambda_0 = 0.78 \delta \epsilon$ 可知, 基于这一波长分辨率, 光纤光栅传感器的应变测量分辨率为 1.7 $\mu\epsilon$ 。由于这一分辨率远高于常规仪器的波长和应变测量分辨率, 因此目前尚无法对这一波长和应变分辨率进行直接测量。

实验中选用宽带发光二极管做为宽带光源, 它

的价格低廉,但输出功率较小(微瓦量级),若采用更强的宽带光源(超辐射管或者掺铒光纤荧光光源,输出功率可达 1 mW~ 10 mW),则可取得更高的波长测量灵敏度;另外,若用光环形器代表图 1 中的 3dB 耦合器,也可以进一步提高波长测量灵敏度。

结论 对光纤光栅传感器的光栅调谐滤波检测系统进行了理论和实验研究,给出了系统波长测量分辨率的理论表达式,分析了提高系统波长分辨率的方法,理论计算的最高波长测量分辨率为 0.8 pm。由于采用了高性能光电测量系统,传感测量的波长分辨率可达 2 pm,应变测量分辨率可达 1.7 $\mu\epsilon$ 。在实际应用中可以利用这一波长检测装置代替光谱分析仪或者其他价格昂贵的波长检测仪器,对光纤光栅传感信息进行现场测量。由于光纤光栅对于环境干扰(温度或应力等)较为敏感,实际应用中应该采取措施提高器件的工作稳定性。

参 考 文 献

- [1] Kersey A D, Davis M A, Patrick H J *et al.*. Fiber grating sensors. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1442~1463
- [2] Rao Y J. IN-fiber Bragg Grating sensors. *Meas. Sci. & Tech.*, 1997, **8**(4): 355~ 357
- [3] Weis R S, Kersey A D, Berkoff T A. A four-element filter grating sensor array with phase-sensitive detection. *IEEE. Photonics Tech. Lett.*, 1994, **6**(12): 1469~ 1472
- [4] Kersey A D, Berkoff T A, Morey W W. Multiplexed fiber Bragg grating strain sensor system with a fiber Fabry-Perot wavelength filter. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(16): 1370~ 1372
- [5] Jackson D A, Ribeiro A B L, Reekie L *et al.*. Simple multiplexing scheme for a fiber-optic grating sensor network. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(14): 1192~ 1194
- [6] Hu Y, Chen S, Zhang L *et al.*. Multiplexing Bragg gratings using combined wavelength and spatial division techniques with digital resolution enhancement. *Electron. Lett.*, 1997, **33**(23): 1973~ 1975
- [7] Lobo A B, Ferreira L A, Santos J L *et al.*. Analysis of the reflective-matched fiber Bragg grating sensing interrogation scheme. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(4): 934~ 939
- [8] Ning Y N, Meldrum A, Shi W J *et al.*. Bragg grating sensing instrument using a tunable Fabry-Perot filter to detect wavelength variations. *Meas. Sci. & Technol.*, 1998, **9**(6): 599~ 606
- [9] 刘志国,张艺兵,开桂云等. 新型光纤光栅线性调谐方法. *光学学报*, 1998, **18**(12): 1731~ 1734

Theoretical and Experimental Researches on Tunable Filtering Detection Technique of Fiber Grating Sensor

Liu Yunqi Liu Zhiguo Guo Zhuanyun Dong Xiaoyi
(*Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071*)
(Received 17 May 1999; revised 14 September 1999)

Abstract: The tunable grating filtering detection system of fiber grating sensor is investigated theoretically and experimentally. The theoretical expression of the wavelength resolution is presented. The optimum theoretical wavelength resolution of the system is 0.8 pm. Due to the excellent performance of the photoelectric detection system, the measured wavelength resolution of sensing detection is 2 pm and the strain resolution is 1.7 $\mu\epsilon$ in the experiment.

Key words: fiber grating; detection; tuning; resolution