

阵列波导光栅解调的准分布式光纤光栅传感器

黄景堂 黄旭光 赵华伟

(华南师范大学信息光电子科技学院 光子信息技术广东省高校重点实验室, 广东 广州 510006)

摘要 从理论上和实验上研究了一种操作简单、响应速度快、价格低廉和高分辨率的基于阵列波导光栅(AWG)的准分布式光纤布拉格光栅(FBG)传感器。该传感系统采用了阵列波导光栅双通道强度解调技术对光纤光栅的布拉格波长和温度进行精确的解调。实验结果表明,该系统对宽带宽光纤光栅的布拉格波长和温度解调均具有高线性度,考虑系统稳定性及光纤布拉格光栅之间的串扰影响,波长测量精度仍可达 2 pm,温度测量精度优于 0.2℃。

关键词 光纤传感器;光纤光栅(FBG);阵列波导光栅(AWG);强度解调

中图分类号 TP212.11; TP212.14

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS20082811.2067

Quasi-Distributed Fiber Bragg Grating Sensor Using the Interrogation of Arrayed Waveguide Grating

Huang Jingtang Huang Xuguang Zhao Huawei

(Guangdong Provincial University Key Laboratory, School of Information and Photoelectronic Science and Technology, South China Normal University, Guangzhou, Guangdong 510006, China)

Abstract A quasi-distributed fiber Bragg grating (FBG) sensor based on arrayed waveguide grating (AWG) is researched in theory and experiment. This sensor system has the advantages of easy operation, high response speed, low cost and high resolution. Its interrogating technique is based on the double-channel intensity - demodulating and the demultiplexing of an arrayed waveguide grating. The experimental result shows that the wavelength and temperature interrogation of the system have high linearity for the wide bandwidth of FBG, and the wavelength and temperature measurement accuracy reaches 2 pm and 0.2℃ under the effects of system stability and FBG crosstalk.

Key words fiber optic sensors; fiber Bragg grating; arrayed waveguide grating; intensity demodulation

1 引言

近年来,光纤光栅布拉格(FBG)传感在光纤传感方面已得到广泛的应用,基于波长解调的光纤光栅传感器已经成为测量温度、应力、压力、电流和溶液折射率等物理量的重要工具^[1~7]。国内外主要的波长解调技术有法布里-珀罗(Fabry - Péro)干涉法、马赫-曾德尔(M-Z)干涉法、双光纤光栅解调法、光谱仪(OSA)探测等^[2,7,8~11]。但这些方法都不能完全满足实际应用中所需要的造价低、响应速度快、分辨率高、稳定性和重复性好等要求。阵列波导光

栅(AWG)^[12]具有波长分辨率高、稳定性好、结构紧凑和低成本等优点,已广泛地应用于密集波分复用(DWDM)光通信系统^[13,14]中,并且在传感方面也逐渐得到应用^[2,8,12],例如热扫描阵列波导光栅的光纤布拉格光栅解调技术^[15]、基于阵列波导光栅的光谱仪^[16]等,但热扫描阵列波导光栅的光纤布拉格光栅解调技术解调速度慢,而基于阵列波导光栅的光谱仪制作工艺要求和造价高,因此都不利于光纤光栅传感技术和光纤光栅传感器商业化。

因此,本文从理论上采用简单直观的方法分析

收稿日期: 2008-01-23; **收到修改稿日期:** 2008-05-27

基金项目: 广东省自然科学基金项目(05200534)和广州科技计划项目(2006J12C0461)资助课题。

作者简介: 黄景堂(1981-),男,硕士研究生,主要从事光通信及光纤传感等方面的研究。

E-mail: hjt1214@sina.com.

导师简介: 黄旭光(1962-),男,教授,硕士生导师,主要从事微纳集成光通信器件及光纤传感等方面的研究。

E-mail: huangxg0@163.com.

了阵列波导光栅双通道强度解调原理,并在实验上证明了阵列波导光栅双通道光纤光栅高精度解调技术及其系统的可行性。

2 双通道光纤光栅解调原理及传感系统

图 1 是单个光纤布拉格光栅波长各自在阵列波导光栅不同相邻通道波长范围内变化图, λ_n, λ_{n+1} 为

阵列波导光栅两相邻通道中心波长, λ_B^m 为第 m 个光纤布拉格光栅的波长。光纤布拉格光栅反射谱与阵列波导光栅通道透射谱的重叠部分决定了阵列波导光栅通道输出光强的大小。为了得到解析理论,光纤布拉格光栅反射谱与阵列波导光栅通道的透射谱均近似地用高斯函数来表示^[2],因此假设光纤布拉格光栅反射谱的函数表达式为

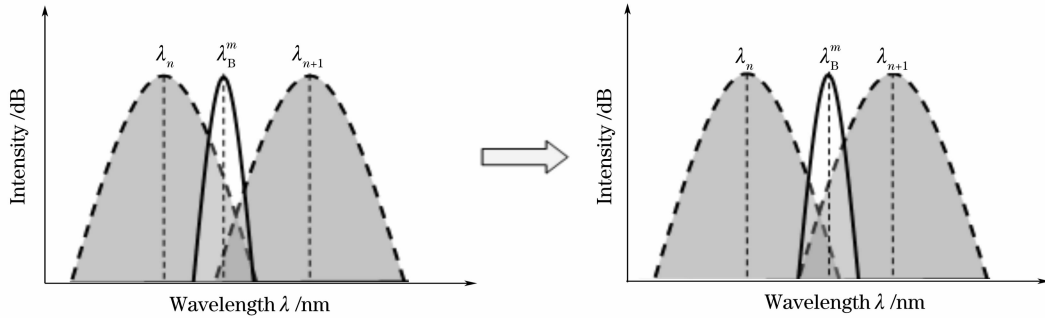


图 1 单个光纤布拉格光栅波长在阵列波导光栅相邻通道之间变化的示意图
Fig.1 Schematic diagram of a single FBG wavelength change in adjacent AWG channel

$$R_B^m(\lambda) = R^m \exp[-(\lambda - \lambda_B^m)^2 / (\sigma_B^m)^2], \tag{1}$$

式中 $\sigma_B^m = \frac{\omega_B^m}{\sqrt{4 \ln 2}}$, R^m, λ_B^m 和 ω_B^m 分别为第 m 个光纤布拉格光栅的反射系数、布拉格波长和反射谱的半峰全宽(FWHM)。阵列波导光栅第 $n, n+1$ 通道的透射谱的函数表达式为

$$T^j(\lambda) = T_j \exp[-0.5(\lambda - \lambda_j)^2 / \sigma_j^2], \tag{2}$$

式中, $\sigma_j = \sqrt{2} \omega_j$ 和 $j = n, n+1, T_j, \lambda_j$ 和 ω_j 分别为阵列波导光栅第 j 通道的透射系数、中心波长和透射谱的 FWHM, 相邻信道间隔 $\Delta\lambda = \lambda_{n+1} - \lambda_n$; 由于相邻通道 $\omega_n \approx \omega_{n+1}$, 所以假设 $\sigma_n = \sigma_{n+1} = \sigma_0$ 。由式(1)和(2)可以得到, 当光纤布拉格光栅的布拉格波长为 λ_B 时, 阵列波导光栅第 j 通道输出的光强为

$$I^j = \int_0^{+\infty} R_B^m(\lambda) \cdot T^j(\lambda) d\lambda = R^m T_j \exp(C_j) \int_0^{+\infty} \exp[-A_j(\lambda - B_j)^2] d\lambda \tag{3}$$

式中, $A_j = \frac{1}{(\sigma_B^m)^2} + \frac{1}{\sigma_j^2}, B_j = \frac{[\lambda_B^m \sigma_j^2 + \lambda_j (\sigma_B^m)^2]}{[(\sigma_B^m)^2 + \sigma_j^2]}$ 和 $C_j = -\frac{(\lambda_B^m - \lambda_j)^2}{[(\sigma_B^m)^2 + \sigma_j^2]}$ 。

由(3)式可以得到

$$\frac{I^{n+1}}{I^n} = \exp(C_{n+1} - C_n) \frac{T_{n+1} \int_0^{+\infty} \exp[-A_{n+1}(\lambda - B_{n+1})^2] d\lambda}{T_n \int_0^{+\infty} \exp[-A_n(\lambda - B_n)^2] d\lambda} = D_0 \exp(C_{n+1} - C_n) \tag{4}$$

$$\text{式中, } D_0 = \frac{T_{n+1} \int_0^{+\infty} \exp[-A_{n+1}(\lambda - B_{n+1})^2] d\lambda}{T_n \int_0^{+\infty} \exp[-A_n(\lambda - B_n)^2] d\lambda} = \frac{T_{n+1} \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{A_{n+1}}}}{T_n \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{A_n}}} = \frac{T_{n+1} \sqrt{A_n}}{T_n \sqrt{A_{n+1}}}$$

定义 AWG 相邻通道强度比值对数为

$$\eta = 10 \lg(I^{n+1}/I^n) \tag{5}$$

将(4)式代入(5)式得

$$\eta = 10(\lg(I^{n+1}/I^n)) = \frac{10}{\ln 10}(C_{n+1} - C_n) + 10\lg D_0 = D_1\lambda_B^m + D_2 \quad (6)$$

式中, $D_1 = 20\Delta\lambda/[(\sigma_B^m)^2\ln 10 + \sigma_0^2\ln 10]$, $D_2 = 10\lg D_0 - 10\Delta\lambda(\lambda_n + \lambda_{n+1})/[(\sigma_B^m)^2\ln 10 + \sigma_0^2\ln 10]$ 。

从(6)式可见,阵列波导光栅相邻通道强度比值对数与光纤布拉格光栅波长在高斯近似下呈线性关系,系统波长灵敏度 $d\eta/d\lambda$ 由阵列波导光栅信道间隔、FWHM 和光纤布拉格光栅的 FWHM 共同决定。

光纤布拉格光栅波长随外界的温度和应力等变化而变化^[6],但只考虑温度 T 对光纤布拉格光栅波长的影响,外界其他因素可忽略时,那么(6)式可以改写为

$$\eta = D_1\alpha_F(T - T_0) + D_1\lambda_{T_0} + D_2 \quad (7)$$

式中 λ_{T_0} 为初始温度为 T_0 时光纤布拉格光栅波长, α_F 为光纤布拉格光栅的温度灵敏度。从推导可见,当光纤布拉格光栅只受到温度影响时,阵列波导光栅相邻通道强度比值对数与光纤布拉格光栅外界温度也是线性关系,系统温度灵敏度 $d\eta/dT$ 由阵列波导光栅信道间隔、FWHM 和光纤布拉格光栅的 α_F 、FWHM 共同决定。

3 实验装置与结果分析

图 2 是实验装置示意图,由宽带光源(BBS,光谱范围 1525~1565 nm)、一个 2×2 耦合器(分束比 50:50)、一个 1×2 耦合器(分束比 10:90)、串联光纤布拉格光栅、一个 40 通道的阵列波导光栅[光谱范围 1529.55~1560.61 nm,信道间隔 100 GHz (~0.8 nm),3 dB 通道带宽 0.62 nm,插损 5.76~6.68 dB,相邻通道串扰 32.16~37.70 dB]、光电二极管探测器阵列和计算机。其中 1×2 耦合器分束比为 10 的端口接光谱仪用于监测光纤布拉格光栅 λ 波长变化,分束比为 90 的端口接阵列波导光栅的

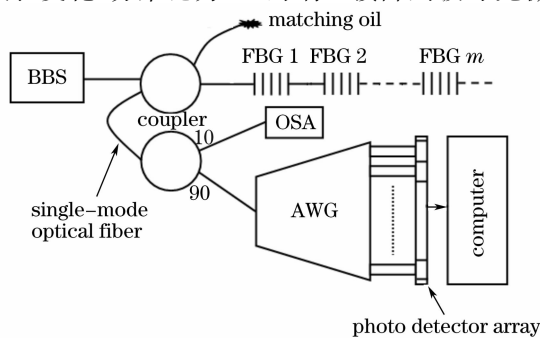


图 2 实验装置

Fig. 2 Experimental setup

输入端。光纤布拉格光栅置于恒温箱中,恒温精度为 0.1°C 。为了避免光纤布拉格光栅之间的串扰和 Fabry - Péro 干涉的影响,提高系统精确度和分辨率,实验用的光纤布拉格光栅均为切趾光纤光栅,并且光纤布拉格光栅之间距离足够远。图 3(a)是实测的工作在室温 24°C 下阵列波导光栅第 28 和 29 通道的透射谱,图(b)是 85°C 传感温度下 FBG_1 经阵列波导光栅第 28 和 29 两通道输出的反射谱特性图。

为了检验阵列波导光栅双通道解调工作原理的可行性,先对由 4 个光纤布拉格光栅串联组成的传感系统中的 FBG_1 进行解调实验。实验所用的 4 个光纤布拉格光栅的中心波长分别为: $\lambda_{\text{FBG1}} = 1550.3501\text{nm}$, $\lambda_{\text{FBG2}} = 1552.5690\text{nm}$, $\lambda_{\text{FBG3}} = 1540.1790\text{nm}$, $\lambda_{\text{FBG4}} = 1557.9378\text{nm}$,其中 FBG_1 和 FBG_2 是波长间隔最接近的两个相邻传感光栅。图 4(a)、图 4(b)分别为 FBG_1 反射波长和温度分别与 η 的变化关系,(c)为 FBG_1 反射波长和温度的变化关系,恒温箱温控范围为 $50^\circ\text{C} \sim 120^\circ\text{C}$ 。光电探测器精度为 0.001 dBm 。如图 4(a)、图 4(b)可见,实验得到的 FBG_1 反射波长和温度与 η 的变化关系与(6)式、(7)式一致,且可得到波长灵敏度 $d\lambda/d\eta = 0.01451\text{ nm/dB}$ 和温度灵敏度 $dT/d\eta = 1.512^\circ\text{C/dB}$,由此可以计算得到 $d\lambda/dT = (d\lambda/d\eta)/(dT/d\eta) = 9.597\text{ pm/}^\circ\text{C}$,这一结果与从图 4(c)得到的 $d\lambda/dT = 9.565\text{ pm/}^\circ\text{C}$ 结果一致。但由于系统稳定性等因素的影响,使得实际可以达到的精度和分辨率均有所降低。图 5 是光纤布拉格光栅温度为 $T = 67.8^\circ\text{C}$ 时温度测量的稳定性实验结果,由此计算得到在 2 h 内温度和波长的标准偏差分别为 0.05°C 和 0.5 pm ,最大漂移范围约 0.18°C 和 2 pm 。

光纤布拉格光栅之间的串扰对解调系统的影响实质上是由于相邻光纤布拉格光栅串扰随当地传感温度变化而变化造成的。串扰变化将对相邻光纤布拉格光栅解调通道的探测光强造成干扰,从而产生解调测量误差。实验测量了 FBG_2 因传感温度变化 (24°C 到 110°C) 对其相邻的 FBG_1 解调通道的串扰变化以及传感测量误差。获得 FBG_2 串扰变化引起 FBG_1 对应的阵列波导光栅双通道强度比(对数值)的变化范围为 $-0.382 \sim 0.244\text{ dBm}$,相应的标准偏差为 0.126 dB ,结合测得的系统波长和温度的灵敏度,计算得到波长和温度的标准偏差为 2 pm

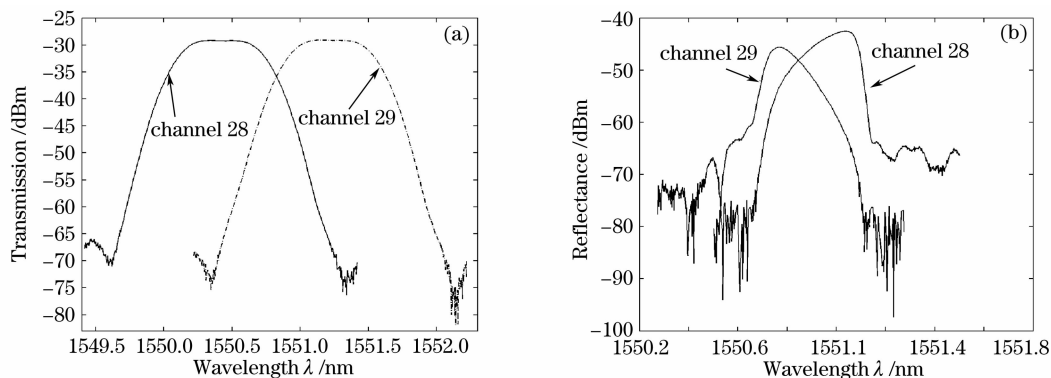


图 3 (a) 实测的工作在室温 24°C 下阵列波导光栅第 28 和 29 通道的透射谱;

(b) FBG₁ 温度为 85°C 时经阵列波导光栅第 28 和 29 两通道输出的反射谱

Fig. 3 Experimental transmission spectra of channels 28 and 29 of the AWG at 24°C;

(b) FBG₁ reflection spectra from channels 28 and 29 of the AWG under 85°C

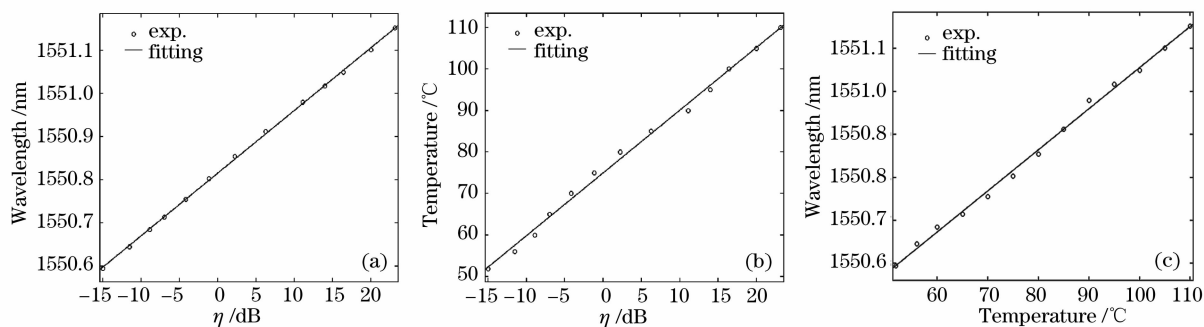


图 4 FBG₁ 反射波长(a)和温度(b)与 η 的变化关系,FBG₁ 反射波长与温度的变化关系

Fig. 4 Experimental curves of FBG₁ wavelength (a) and temperature versus η

(c) FBG₁ wavelength versus temperature

和 0.2°C, 最大偏差为 6 pm 和 0.6°C。因此, 与稳定性相比较, 得到系统的波长和温度的标准偏差分别为 2 pm 和 0.2°C。

验表明, 对于宽带宽的光纤布拉格光栅, 即使在系统稳定性及光纤布拉格光栅之间的串扰影响下, 提出的传感系统仍然具有较高的测量精度, 其波长和温度的标准偏差分别为 2 pm 和 0.2°C。

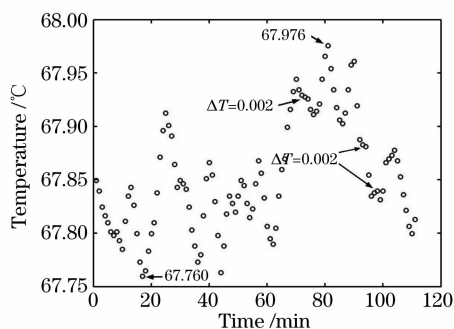


图 5 温度为 $T=67.8^\circ\text{C}$ 时温度测量的稳定性结果

Fig. 5 Experimental results of temperature stability at 67.8°C

4 结 论

提出了一种基于阵列波导光栅双通道强度解调技术的准分布式光纤布拉格光栅高精度的传感器, 并且从理论上和实验上证明了该系统的可行性。实

参 考 文 献

- 1 Wei Liang, Yanyi Huang, Yong Xu *et al.* Highly sensitive fiber Bragg grating refractive index sensors[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **86**:151122
- 2 D. Robertson, P. Niewczas, J. R. McDonald. Interrogation of a dual fiber Bragg grating sensor using an arrayed waveguide grating[C]. *Proc. SPIE*, 2005, **5855**:844~847
- 3 LIU Hai-tao, CHEN Jian-ping, HSU Luke. Study on fiber grating petroleum pressure sensor and its reliability[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(9):1243~1246 (in Chinese)
刘海涛, 陈建平, HSU Luke. 光纤光栅原油压力传感器实验及其可靠性研究[J]. *中国激光*, 2006, **33**(9):1243~1246
- 4 Yong Zhao, Qing-yao Meng, Kun Chen. Novel current measurement method based on fiber Bragg grating sensor technology[J]. *Sensors and Actuators A*, 2006, **126**:112~116
- 5 Guo Tuan, Zhao Qida, Liu Lihui *et al.* Light intensity-referred and temperature-insensitive fiber Bragg grating dynamic pressure sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2):207~211 (in Chinese)
郭团, 赵启大, 刘丽辉等. 光强检测型光纤光栅温变不敏感动

- 态压力传感研究[J]. 光学学报, 2007, **27**(2): 207~211
- 6 Yu Xiujuan, Yu Yonglong, Zhang Min *et al.* . Study on the strain and temperature densing characteristics of FBG packaged by the copper slice[J]. *Acta Photonica Sinica* , 2006, **35**(9): 1325~1328
- 于秀娟, 余有龙, 张敏等. 铜片封装光纤光栅传感器的应变和温度传感特性研究[J]. 光子学报, 2006, **35**(9):1325~1328 (in Chinese)
- 7 H. B. Liu, H. Y. Liu, G. D. Peng *et al.* . Strain and temperature sensor using a combination of polymer and silica fibre Bragg gratings[J]. *Opt. Commun.* , 2003, **219**:139~142
- 8 David C. C. Norman, David J. Webb, Ralf D. Pechstedt. Interferometric and fibre Bragg grating sensor interrogation using an arrayed waveguide grating[C]. *Proc. SPIE* , 2004, **5459**: 101~108
- 9 M. D. Todd, G A Johnson, B L Althouse. A novel Bragg grating sensor interrogation system utilizing a scanning filter, a Mach - Zehnder interferometer and a 3×3 coupler[J]. *Meas. Sci. Technol.* , 2001, **12**:771~777
- 10 Gao Hongwei, Li Hongmin, Liu Bo *et al.* . A novel fiber Bragg grating sensors multiplexing technique [J]. *Opt. Commun.* , 2005, **251**:361~366
- 11 Seiji Kojima, Akihito Hongo, Shinji Komatsuzaki *et al.* . High-speed optical wavelength interrogator using a PLC-type optical filter for fiber Bragg grating sensors[C]. *Proc. SPIE* , 2004, **5384**:241~249
- 12 F. G. Sun, G. Z. Xiao, Z. Y. Zhang *et al.* . Modeling of arrayed waveguide grating for wavelength interrogation application[J]. *Opt. Commun.* , 2007, **271**:105~108
- 13 F. I. El-Nahal, R. J. Mears. Applications of active arrayed-waveguide grating in future wavelength division multiplexing networks[J]. *Opt. Engng.* , 2003, **42**(3):867~874
- 14 Hiroyuki Toda, Tsukasa Yamashita, Ken-ichi Kitayama *et al.* . Demultiplexing using an arrayed-waveguide grating for frequencyinterleaved DWDM Radio-on-Fiber systems with 25-GHz channel spacing[C]. *Proc. SPIE* , 2002, **4906**:99~106
- 15 G. Z. Xiao, P. Zhao, F. G. Sun *et al.* . Grover. Interrogating fiber Bragg grating sensors by thermally scanning a demultiplexer based on arrayed waveguide gratings [J]. *Opt. Lett.* , 2004, **29**(19):2222~2224
- 16 Yosuke Tanaka, Yoshimasa Itoh, Koichi Aizawa *et al.* . Optical spectrum Analyzer based on Arrayed Waveguide grating for high-Speed Optical Communication Systems [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.* , 2005, **17**(2):432~434