

doi: 10. 3788/gzxb20124107. 0836

基于阵列波导光纤温度特性的分布式 光纤布喇格光栅解调法

钱翠萍, 彭保进, 万旭, 杨柳, 朱建成武, 徐斐, 董玥, 叶能

(浙江师范大学 信息光学研究所, 浙江 金华 321004)

摘要:设计了一种使用阵列波导光栅对分布式光纤布喇格光栅中心波长较大范围变化的解调方法. 根据阵列波导光栅各通道的中心波长可随温度变化而改变的特性, 通过控制软件循环地在几分钟内使加在阵列波导光栅的芯片温度从 30℃ 线性增加到 90℃, 同时用微机高速采集各通道的数据并分别找出各通道数据的最大值时刻所对应的阵列波导光栅芯片温度, 从而根据其波长-温度关系在微机上报告此时各光纤布喇格光栅的中心波长. 实验结果表明, 系统有效地解决了分布式解调的问题, 微机以小于 10 min 的周期报告出每通道 0.6 nm 范围变化的光纤布喇格光栅中心波长(共 40 个通道), 测量相对误差小于 2%.

关键词:传感技术; 解调; 光纤布喇格光栅; 阵列波导光栅

中图分类号: TN253

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2012)07-0836-5

0 引言

光纤布喇格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)作为一种传感器件逐渐受到人们关注, 其应用也越来越广泛^[1-4]. 已见报导的 FBG 传感解调方法有: 光谱仪检测法、匹配光栅法^[5]、可谐调 Fabry-Perot 法^[6]、非平衡 Mach-Zehnder 干涉仪跟踪法^[7]、可调谐光源法等. 这些方法中, 光谱仪检测法成本太高、不能直接输出对应波长变化的电信号; 匹配光栅法要求两个光栅严格匹配、受参考光栅应变量的限制, 传感光栅的测量范围不能很大、压电陶瓷的响应速度有限, 使这种方法只适用于测量静态或低频变化的物理量; 可调谐 Fabry-Perot 法中, 激光器的输出相比于线性调制信号在扫描范围内呈现出非线性^[8]; 其它有些则因结构复杂、调整困难、测量准确度不高而不利于实现或成本太高等等, 对 FBG 在传感领域的实用化有一定的影响.

随着光纤通信的迅速发展, 阵列波导光栅(Arrayed Waveguide Grating, AWG)^[9-11]已成为密集波分复用(Dense Wavelength Division Multiplexing, DWDM)系统中的关键器件. AWG 具有波长分辨率高、稳定性好、结构紧凑和低成本等优点, 不仅广泛地应用于 DWDM 光通信系统中^[12-13], 并且在传感方面也逐渐得到应用^[14-16].

本文用一个 AWG^[17-18]解调若干个分布于煤矿或大型建筑物中的 FBG 传感光栅反射中心波长的方法, 设计出一成本低、监测点数多、体积小、本质安全的基于 AWG 的分布式监测系统, 解决了现有检测系统中成本昂贵、体积庞大、调整困难等诸问题.

1 芯片温度影响 AWG 通道中心波长的原理

图 1 为阵列波导光栅 AWG 的构成原理^[17], 它是基于马赫-曾德尔干涉仪的原理, 即多个相干单色光经过不同的光程传输后的干涉理论. 输入光从第一个星形耦合器输入, 该耦合器把光功率几乎平

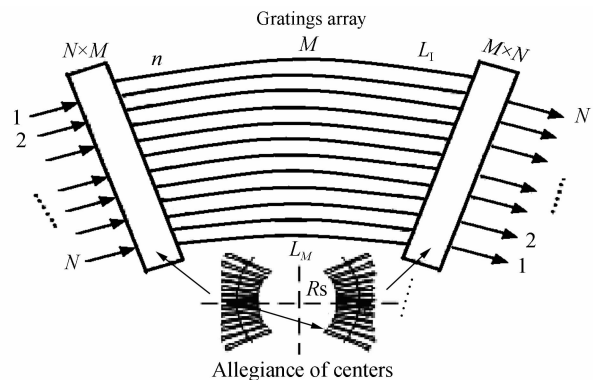


图 1 AWG 构成原理
Fig. 1 The structure of AWG

基金项目:浙江省科技计划项目(No. 2011C22051)和 2010 年浙江省大学生科技创新活动计划(新苗人才计划, No. 2010R404016)资助

第一作者:钱翠萍(1989-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为光电技术. Email: zsdqcp@163.com

责任作者/导师(通讯作者):彭保进(1967-), 男, 教授, 主要研究方向为光电技术、计算机技术. Email: jhpbj@zjnu.cn

收稿日期:2011-09-01; **修回日期:**2012-04-11

均地分配到波导阵列输入端中的每一个波导中. 通常阵列波导长度 L 用光在该波导中传输的半波长 $\lambda/2n$ 的整数倍 m 表示,即

$$L = m\lambda/2n = mc/2fn \quad (m=1,2,3\cdots) \quad (1)$$

式中 n 是波导的折射率, $f=c/\lambda$ 是光波频率, c 是光速. 由此可以得到用波导长度 L 表示的沿该波导传输的光的频率

$$f = mc/2nL \quad (m=1,2,3\cdots) \quad (2)$$

由于阵列波导中的波导长度不等,相位延迟也不等,其相邻波导间的相位差为

$$\Delta\varphi = k\Delta L = 2\pi n\Delta L/\lambda \quad (3)$$

式中 k 是波矢量, $k=2\pi n/\lambda$, ΔL 是相邻波导间的路径长度差,通常为几十微米,所以输出端口与波长有一一对应的关系.

当只考虑温度 T 对光纤布喇格光栅波长的影响,外界其他因素可忽略时,那么存在式(4)的关系^[19]

$$\eta = D_1\alpha_F(T-T_0) + D_1\lambda_{T_0} + D_2 \quad (4)$$

式中 η 为 AWG 相邻通道强度比值对数, λ_{T_0} 为初始温度为 T_0 时光纤布喇格光栅波长, α_F 为光纤布喇格光栅的温度灵敏度. 由此可见,阵列波导光栅相邻通道强度比值对数与光纤布喇格光栅外界温度是线性关系.

2 使用 AWG 对 FBG 大范围检测的解调方法

传统的解调原理如图 2 中的非粗线部分所示.

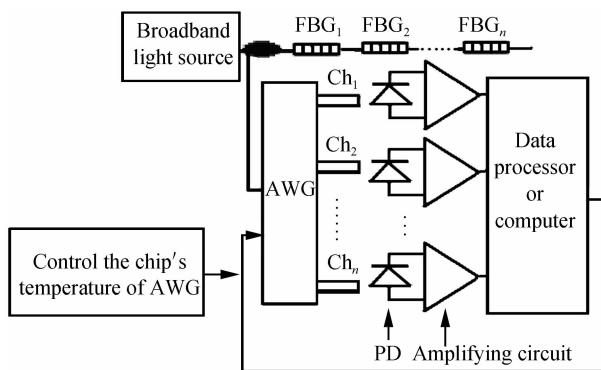


图 2 应用 AWG 的分布式 FBG 传感器的波长解调法
Fig. 2 A demodulated system of distributed FBG sensors used AWG

图 2 中, FBG_1 、 FBG_2 、 FBG_n 是分布于不同监测点的光纤光栅传感阵列. 宽带光源发出的光经过耦合器、单模光纤进入到光纤 Bragg 光栅阵列, 光纤 Bragg 光栅传感阵列的反射波长信号又经过耦合器进入到阵列波导光栅 AWG 中. AWG 将入射光分成不同波长的窄带到多个通道中. 这样只要传感光栅选取恰当, 就可以使 AWG 各通道与各监测点的 FBG 形成一一对应的关系. 同时从每个窄带光通道

中出来的光信号由光电管 PD 接收, 光电管 PD 的输出信号经放大后被数据处理器或高速微型计算机采集、处理.

正常情况下, AWG 各个通道的中心波长对应各个 FBG 的中心波长, 一旦现场的温度或应力发生变化, 那么相应 FBG 的反射中心波长就会发生漂移, 而这会使反射光在相应通道中透过的光强也会发生变化. 通过计算机或处理器对输出信号的检测就能确定相应光电管 PD 电流的变化量及传感光栅的偏移方向.

以上测量方法, 必须保证每一个 FBG 的中心波长 λ_{bi} ($1 \leq i \leq n$, n 为 AWG 的通道数) 随着被测量的变化范围都在相邻的 AWG 的两个通道的中心波长之间, 即 λ_{bi} 在 λ_{am} 和 λ_{am+1} 之间, 以免解调时的相互干扰, 防止解调失败. 由于 AWG 相邻通道中心波长相差小, 这样就决定了以上测量方法的局限性: 测量的变化范围 (FBG 中心波长的漂移量) 只能限制在小范围内. 为此本文根据 AWG 各通道的中心波长可随芯片温度的变化而改变的特性, 提出了一套低成本、可进行相对较大范围检测的方法: 温控扫描跟踪法.

AWG 的温度特性是其各个通道中心波长会随温度变化而漂移, 其漂移量约为 $10 \sim 11 \text{ pm}/^\circ\text{C}$, 如图 3 和 4 所示 (虽然目前商用 AWG 的通带多为平坦

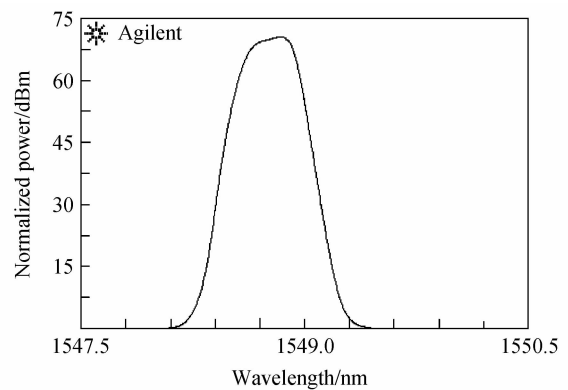


图 3 AWG 某一通道在 30°C 时的光谱
Fig. 3 The spectrogram of AWG

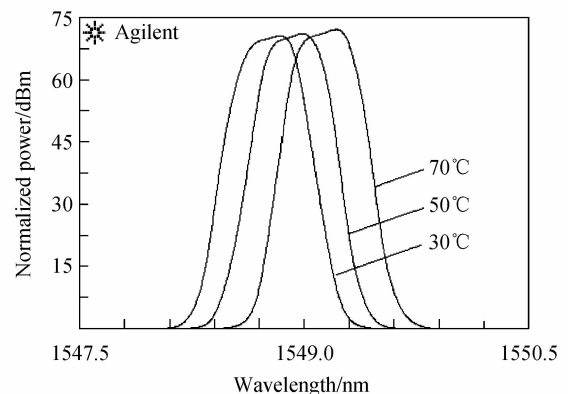


图 4 AWG 某一通道受温度调谐时的光谱变化图
Fig. 4 The spectrogram of AWG impacted by temperature

设计,但从图中可以看到还是可以比较方便地用找最大值法确定中心波长的).

实验所用 AWG 的温度—通道中心波长的关系图如图 5(图中为其中四个通道). 在 30℃ 到 90℃ 的温度范围内各通道中心波长的漂移量为 0.6 nm 左右.

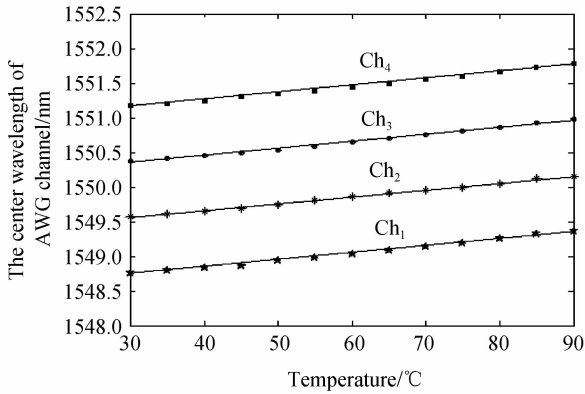


图 5 AWG 其中 4 通道的温度与通道中心波长的关系
Fig. 5 The relationship of wavelength and temperature by four channels of AWG

设计一温度控制电路(见图 2 中的粗线部分所示),循环地在 T 分钟内(此处为描述方便,暂称此 T 分钟为 1 周期)使 AWG 芯片温度从 30℃ 增加到 90℃,或从 90℃ 降到 30℃,温控软件可实时报告出当前 AWG 的温度. 在此同时用微机高速采集各通道的数据,一周期扫描结束后分别找出各通道数据的最大值时刻所对应的 AWG 芯片温度,从而根据图 5 所示的 AWG 通道的温度—通道中心波长关系

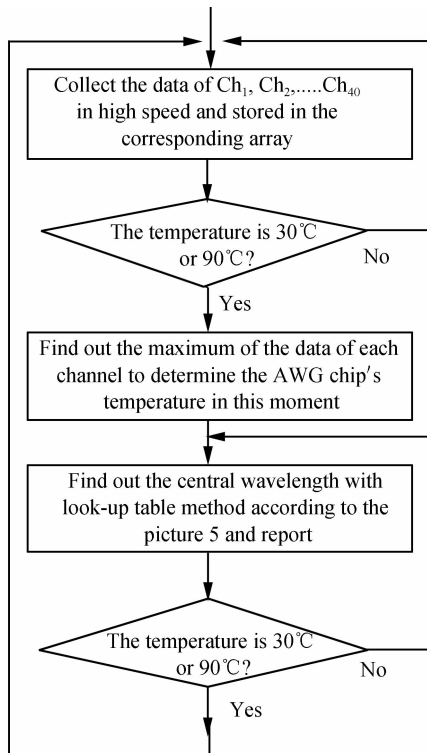


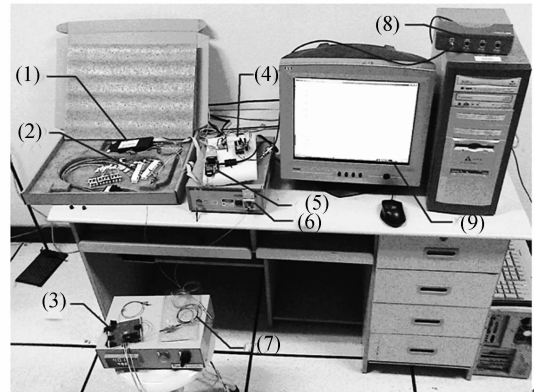
图 6 软件识别流程
Fig. 6 Schematic diagram of the software identification

可知该通道在本周期所测的中心波长,进而获得监测点的信息.

温控软件可识别一周期扫描的结束(AWG 芯片温度从 30℃ 增加到 90℃,或从 90℃ 降到 30℃ 均视为一周期),从而可靠地判断此周期采集对应的中心波长. 软件识别流程如图 6,图中 Ch₁、Ch₂、…… Ch₄₀ 分别对应 40 个通道.

3 实验及结果

按图 2 所示原理图搭建了实验系统,如图 7. 实验中对奥康光通器件(中山)有限公司原本应用于通讯的 AWG 进行改造,使其各通道中心波长受温度调制,当温度改变,各通道中心波长也随之漂移,符合实验需要,不失一般性,系统以解调 4 个串接的 FBG 为例. 为了便于验证,将各 FBG 贴于一电热板表面,通过控制电热板温度来模拟对调制系统的执行过程.



(1) AWG;(2) AWG 40 channels;(3) Temperature sensor;(4) Amplifying circuit;(5) AWG temperature control circuits;(6) Broadband light source;(7) Ccoupler;(8) Box of data acquisition;(9) Ccomputer

图 7 实验系统图

Fig. 7 The diagram of experimental system

为验证所用方法的准确性,先用光谱仪(Agilent 86140B)对每一确定的温度对应的波长进行测量,然后用本系统进行检测,通过比较(见图 8).

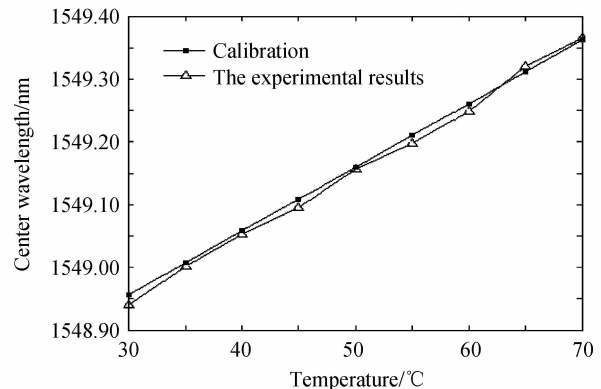


图 8 FBG₁(中心波长 1 548.956 nm)实验结果
Fig. 8 The experiment results of FBG₁ (1 548.956 nm)

篇幅所限,图中仅给出 FBG₁ 的实验结果)可以看到,两者相当吻合.从图 8 中看到,在 $T=30^{\circ}\text{C}$ 时,系统所测为 1 548.940 nm,以其标称的 1 548.956 nm 中心波长为基准,绝对误差为 0.016 nm,相对误差小于 2%.

为保证测量范围的合理性,应保证当 AWG 芯片温度为 55°C 时,使各个通道的中心波长对应各个 FBG 的中心波长.这样的优点是 FBG 中心波长无论左移或右移都能测量.

4 结论

本文提出的解调方法是对分布式 FBG 中心波长大范围解调的一种实用方法,其思想方法可在其它大范围解调应用中借鉴,有重要的参考价值.值得一提的是此方法测量可靠的前提条件是,相邻 FBG 中心波长差值不能小于 AWG 随芯片温度变化的最大变化量(如 $30^{\circ}\text{C}\sim 90^{\circ}\text{C}$,实验所用的 AWG 的最大变化范围即为 0.6 nm),否则会存在交叉混扰的问题.解决的办法及扩大检测范围的方法是让一个 FBG 对应 AWG 中若干个邻接的通道,通道数由实际需要确定.

参考文献

- [1] CHU Xiao-hui, ZHANG Ming, ZHOU hong-pu, *et al.* Design and experiment of fiber bragg grating pressure sensor [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(11): 2785-2788.
褚晓慧,张敏,周宏朴,等.一种光纤布喇格光栅压力传感器的设计及实验[J].光子学报,2009,**38**(11):2785-2788.
- [2] PENG Bao-jin, ZHAO Yong, MENG Qing-yao, *et al.* Fiber Bragg grating high-pressure sensor with temperature compensation[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2006, **46**(4): 484-487.
彭保进,赵勇,孟庆尧,等.具有温度补偿的光纤光栅压力传感器[J].清华大学学报(自然科学版),2006,**46**(4):484-487.
- [3] NI Kai, WU Li-shu, JIN Yong-xing. Temperature-insensitive fiber Bragg grating tilt sensor[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2011, **22**(1): 27-29.
倪凯,吴立枢,金永兴.基于光纤光栅的温度不敏感的倾斜传感器[J].光电子·激光,2011,**22**(1):27-29.
- [4] SUN Li, SUN Qian-qian, REN Liang, *et al.* A new method for underground pipeline corrosion monitoring applied FBG [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(1): 6-10.
孙丽,孙茜茜,任亮,等.应用光纤布喇格光栅传感器监测地下管道腐蚀的新方法研究[J].光子学报,2012,**41**(1):6-10.
- [5] LUO Ying-xiang, YU Chong-xiu, YAN Bin-bin, *et al.* Sensor based on demodulation by matched fiber grating[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, **43**(5): 47-50.
罗映祥,余重秀,颜纷纷,等.匹配光栅解调的传感器[J].激光与光电子学进展,2006,**43**(5):47-50.
- [6] ZHOU Ke-yu, YE Hui, ZHEN Hong-yu, *et al.* Study of tunable Fabry-Perot filter based on piezoelectric polymer film [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(1): 365-369.
周可余,叶辉,甄红宇,等.基于压电聚合物薄膜可调谐 Fabry-Perot 滤波器的研究[J].物理学报,2010,**59**(1):365-369.
- [7] LI Li, LIN Yu-chi, WANG Wei, *et al.* The study of fiber Bragg grating demodulating technology based on unbalanced M-Z interferometer [J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2008, **30**(1): 16-18.
李丽,林玉池,王为,等.光纤光栅非平衡 M-Z 干涉解调技术研究[J].压电与声光,2008,**30**(1):16-18.
- [8] WANG Hong-zhang, DAI Heng. Characteristic analysis of new type Fabry-Perot cavity filter and control system [J]. *Journal of Transducer Technology*, 2005, **24**(9): 16-18.
汪宏章,戴珩.新型 F-P 腔滤波器的性能分析及控制[J].传感器技术,2005,**24**(9):16-18.
- [9] WANG You-bin, HUANG Xu-guang. Analysis and optimum of a novel arrayed-waveguide grating [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, **37**(2): 454-459.
王有斌,黄旭光.新型阵列波导光栅的分析与优化[J].中国激光,2010,**37**(2):454-459.
- [10] WANG Wen-min, LIU Wen, MA Wei-dong. Novel compact low refractive index contrast silica-on-silicon AWG [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(8): 1137-1142.
王文敏,刘文,马卫东.小尺寸低折射率差硅基二氧化硅阵列波导光栅[J].光子学报,2011,**40**(8):1137-1142.
- [11] WANG Wen-min, LIU Wen, SONG Qiong-hui. Stress-free thermally stabilized curve-shape arrayed waveguide grating packaging [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(12): 1780-1784.
王文敏,刘文,宋琼辉.低热应力热稳定曲线型阵列波导光栅复用器[J].光子学报,2011,**40**(12):1780-1784.
- [12] YOU Quan, CUI Sheng, LIU Deming, *et al.* Progress in the research on channelized tunable optical dispersion compensators [J]. *Study on Optical Communications*, 2011 (4): 19-22.
尤全,崔晟,刘德明,等.多信道动态色散补偿器的研究进展[J].光通信研究,2011(4):19-22.
- [13] ZHOU Jing-yu, TIAN Shu-lin. Generation of DS/FH communication signals with Simulink and AWG [J]. *China Measurement & Test*, 2011, **37**(1): 74-76.
周靖宇,田书林.利用 Simulink 及 AWG 产生扩跳频通信信号的方法[J].中国测试,2011,**37**(1):74-76.
- [14] ZOU Fang, WANG Yu-bao, FENG Yuan-kai. Study on WDM/TDM distributed FBG sensor networks based on AWG [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2010, **29**(9): 55-60.
邹芳,王玉宝,冯元凯.基于 AWG 的波分/时分复用 FBG 传感网络研究[J].传感器与微系统,2010,**29**(9):55-60.
- [15] WANG You-bin, HUANG Xu-guang. Study on the High-accuracy fluid refractive-index sensor based on an arrayed-waveguide grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(9): 2378-2384.
王有斌,黄旭光.基于阵列波导光栅的高准确度折射率传感器研究[J].光学学报,2009,**29**(9):2378-2384.
- [16] SUN F G, XIAO G Z, ZHANG Z Y, *et al.* Modeling of arrayed waveguide grating for wavelength interrogation application [J]. *Optics Communications*, 2007, **271**(1): 105-108.
- [17] YUAN Rong. Arrayed waveguide grating component and its applications [J]. *Optical Communication Technology*, 2010 (1): 1-5.
原荣.阵列波导光栅(AWG)器件及其应用[J].光通信技术,2010(1):1-5.
- [18] ZHENG H J, WU C Q, LIU S L, *et al.* Experimental observation of lasering behavior in wavelength-switchable fiber laser with arrayed waveguide grating [J/OL]. *Optik (International Journal for Light and Electron Optics)*, 2011-8-26. [2012-2-18]. <http://www.sciencedirect.com/science/>

article/pii/S0030402611003044.

- [19] HUANG Jing-tang, HUANG Xu-guang, ZHAO Hua-wei.
Quasi-distributed fiber bragg grating sensor using the
interrogation of arrayed waveguide grating[J]. *Acta Optica*

Sinica, 2008, **28**(11): 2067-2071.

黄景堂, 黄旭光, 赵华伟. 阵列波导光栅解调的准分布式光纤
光栅传感器[J]. *光学学报*, 2008, **28**(11): 2067-2071.

A New Demodulated System of Distributed FBG Based on Temperature Characteristics of AWG

QIAN Cui-ping, PENG Bao-jin, WAN Xu, YANG Liu, ZHU Jian-cheng-wu,
XU Fei, DONG Yue, YE Neng

(*Institute of Information Optics, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321004, China*)

Abstract: A set of using arrayed waveguide grating (AWG) for distributed fiber Bragg grating (FBG) wide variation of center wavelength demodulation method is presented. According to the characteristics that AWG center wavelength of each channel can change with the chip's temperature changes, a voltage control circuit was designed, and the chip's temperature can vary from 30°C to 90°C periodically, several minutes per period. Simultaneously, the data of the channels of AWG can be collected in high speed by a computer. Then the chip's temperature can be found responding to the maximum of each channel. Finally, the computer can report central wavelength of FBG according the relationship of wavelength and temperature. The experiment demodulating system was established. The experiment results prove that the system can effectively resolve the problem of measurement range. The system can report the central wavelength of FGB in 0.6 nm each channel (40 channels in total) in less than 10 minutes, but also measurement error is less than 2 percent.

Key words: Transducer technology; Demodulation; Fiber Bragg grating; Arrayed waveguide grating