

基于线阵 InGaAs 光电二极管阵列的光纤 光栅传感解调*

李国玉, 刘波, 郭团, 张键, 袁树忠, 开桂云, 董孝义

(南开大学现代光学研究所, 天津 300071)

摘 要:采用线阵 InGaAs 光电二极管阵列和体相位光栅并结合空分复用和波分复用技术, 对光纤光栅传感进行解调. 设计了基于线阵 InGaAs 光电二极管阵列和体相位光栅的光纤光栅传感解调系统, 通过系统测试和性能分析, 该解调系统解调带宽 42 nm, 信噪比 30 dB, 波长偏移测量精确度 ± 15 pm, 功率测量精确度为 ± 0.3 dB. 基于线阵 InGaAs 光电二极管阵列和体相位光栅的光纤光栅解调系统不但尺寸小, 功耗低, 而且具有较高的解调速度.

关键词:光纤光栅传感; InGaAs 光电二极管阵列; 解调系统

中图分类号: T1P21211

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2007)09-1591-4

0 引言

近些年来, 光纤光栅传感器在传感领域的应用迅速发展. 但是只有小部分光纤光栅传感器和传感技术投入商用, 原因之一就是光纤光栅传感解调技术的不成熟和不完善, 因此光纤光栅传感器不得不面临着电传感器的竞争. 光谱仪 (OSA) 是实验室中实现光纤光栅传感解调的方法, 但是光谱仪不但造价高, 而且波长扫描速度极慢, 不适于实时测量. 后来国内外又提出来了各种解调方法^[1-4], 例如耦合器解调法^[5], F-P 边缘滤波解调法^[6] 和非平衡的 Mach-Zehnder 干涉解调法^[7] 等. 有的解调方法比较简单, 但是局限于测量准确度, 动态范围和各种复用技术, 有的解调方法比较复杂, 测量准确度比较高, 但是造价高, 稳定性和重复性差.

Alexander G. Simpson 等人提出了基于 CCD 和闪耀布喇格光纤光栅对光纤传感器进行解调的方案^[8]. 虽然 CCD 能对光纤传感器进行解调, 但是由于它们的波长响应范围在 400~1 100 nm, 而布喇格光纤光栅传感解调波长在 1 500 nm 附近, 如果用 CCD 进行解调, 不得不镀膜而增加额外的成本. 由于线阵 InGaAs 光电二极管阵列的波长响应范围是 800~1 700 nm, 而且在波长 1 500 nm 附近具有很高的量子效率和反应灵敏度. 因此本文利用线阵 InGaAs 光电二极管阵列^[9] 探测波长随外界物理量变化的移动, 然后把光信号转化为电信号, 通过模数

转化 (A/D), 直接输入计算机, 实现光纤光栅传感的分布式实时测量, 增强了光纤光栅传感的智能化.

1 原理和结构

InGaAs 是近红外区域具有良好光敏感性的 III-V 族复合型半导体材料. 通过改变它的掺杂浓度, 可以控制它的灵敏度. 和 CCD 不同的是 InGaAs 探测器是一些光电二极管离散的排列在一块集成的片子上, 从而形成一个线性阵列. InGaAs 探测器阵列在结构上包括 PIN 二极管阵列、雪崩二极管 (APD) 阵列和金属-半导体-金属 (MSM) 二极管阵列. 由于 MSM 型二极管阵列结构特别复杂, 而且难于生产, APD 型二极管阵列需要在高电压下工作, 而且具有很大的暗电流, 所以它们不适宜应用在光纤光栅传感的解调系统中. 实验中采取的 PIN 型光电二极管阵列探测器是利用光生伏特效应 (Dember 效应), 光照射到 p-n 结上, InGaAs 层就会吸收光子, 同时产生电子-空穴对. 在外电场的作用下, 光生载流子就会产生漂移, 从而在外围电路生成光电流. 图 1 为 640 像素的 PIN 型光电二极管阵列的结构, 阵列长度是 40 nm, 像素间隔为 65 μm .

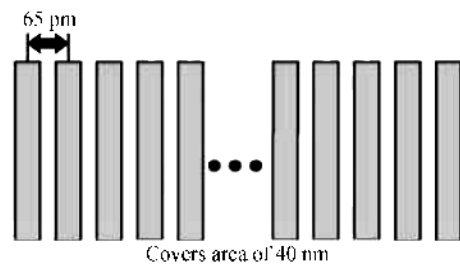


图 1 PIN 型光电二极管阵列

Fig. 1 Schematic diagram of the PIN photodiode array

体相位光栅是在薄片感光材料上光刻出的一种精细结构, 它与传统光栅不同之处在于对入射光的

*973 国家重点基础研究发展计划 (2003CB314906), 天津市自然科学基金重点项目 (06YFJZJC00300) 和光电信息技术科学教育部重点实验室开放基金资助
Tel: 022-23509849 Email: guoyu-li@mail.nankai.edu.cn
收稿日期: 2006-06-12

衍射不是由表面结构的相互作用完成的,而是由两片玻璃之间刻在薄片上面的光栅完成的.从光纤光栅传感器反射回来的具有不同中心波长的光束照射到体相位光栅上,由于中心波长不同照射到体相位光栅的入射角不同,从而透射光被分成不同的角度来达到分波的目的.体相位光栅结合线阵 InGaAs 光电二极管阵列形成波长解调系统.

2 实验装置

实验中采用的 $14\ \mu\text{m}$, 512 像素的线阵 InGaAs 光电二极管阵列放置在耦合光输出的平面上,它由离散分布的光电二极管,电荷放大器阵列,三极管以及相关的取样电路,偏移补偿电路,移位寄存器和时序发生器组成,见图 2.为了区分特别接近的空间信道并且获得高散射效率,实验中采用的体相位光栅夹在两棱镜之间.这种结构可以允许在 $1\ 550\ \text{nm}$ 波长附近为了满足布拉格方程而达到的大角度.中心波长为 $1\ 550\ \text{nm}$,波长范围为 $1\ 525\sim 1\ 570\ \text{nm}$.

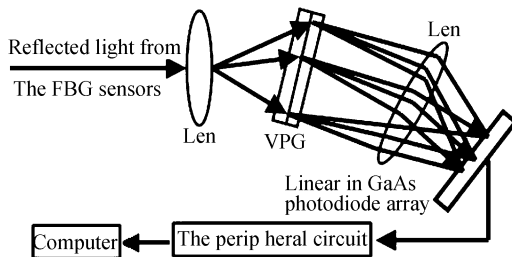


图 2 实验装置

Fig. 2 Schematic diagram of the experimental apparatus

宽带光源(BBS)发出的光分成几束,通过耦合器进入多束单模光纤,沿着每束单模光纤上数个事先确定的不同波长光纤光栅传感器,经过光纤光栅传感器的反射,每个通道的反射光通过光纤接口照射到准直镜上,透过的准直光束直接照射到体相位光栅上.由于体相位光栅的分波原理,具有不同中心波长的光束从而以不同角度透射,这些被分开的具有不同的角度的光束经过会聚透镜聚焦到线阵 InGaAs 光电二极管阵列不同的点上,系统中 FBG 的中心波长可由处在该点的光电二极管探测得到.于是光强度转化成光电流,通过外围电路与计算机连接,从而形成了基于线阵 InGaAs 光电二极管阵列和体相位光栅的解调系统.

3 实验结果

和 CCD 相同,如果解调系统的输入功率长时间超过 $-20\ \text{dBm}$,线阵 InGaAs 光电二极管阵列就会发热,需要额外的制冷电路.但是当输入功率限制在 $-60\sim -20\ \text{dBm}$ 之间,解调系统就不需要制冷电路而工作在 $0\sim 60\ ^\circ\text{C}$ 之间,因此解调系统的输入功

率保持在 $-30\sim -45\ \text{dBm}$ 左右,保证其在室温下工作.在单独应力和温度的实验中,光纤光栅传感器随着外界应力和温度的变化,中心峰值波长的偏移分别由 InGaAs 光电二极管阵列的解调系统测量.在每个具体的变化测量中,中心波长的偏移由 InGaAs 光电二极管阵列测得,并输入计算机计算绘图.图 3(a)和图 3(b)分别是应力从 0 增加到 $618\ \mu\epsilon$,温度从 $23\ ^\circ\text{C}$ 增加到 $60\ ^\circ\text{C}$ 的中心波长偏移量.图 3(a)中的星号代表随着应力的变化中心波长的偏移量,图 3(b)中的矩形代表随着外界温度变化中心波长的偏移量,由两图可见,它们是呈线性分布的,但是有的星号或者矩形偏离拟合曲线一点,说明解调系统测量得到的中心波长偏移具有一定的误差.

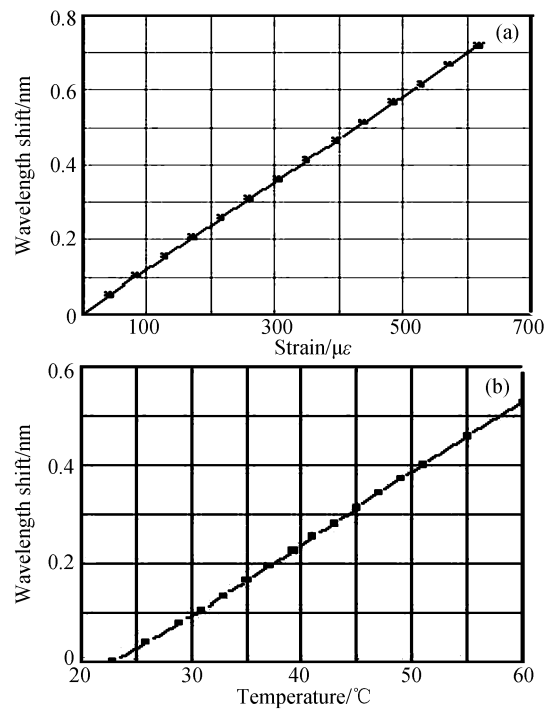


图 3 随着应力(a)和温度(b)的变化,InGaAs 解调系统测得波长的偏移

Fig. 3 Detected (a) strain- and (b) temperature-induced wavelength shifts with the InGaAs interrogation system

4 系统性能分析

一般信噪比定义为某一个信道波长,信号功率与噪音功率的绝对比值,计算公式为

$$\text{SNR} = 10 \times \log_{10} \left[\frac{P_{\text{signal}}}{P_{\text{noise}}} \right]$$

信噪比的测量在某一恒定的温度和相同的光照强度下,FBG 波峰的相对强度与解调系统的最大噪音的比值.图 4 就是 InGaAs 解调系统在不同的解调波长下测量得到的信噪比,从图中可以看出,解调波长范围为 $42\ \text{nm}$,测量得到的信噪比为 $30\ \text{dB}$ 左右.

图 5 是解调系统测得四个波长的信噪比随温度

变化的误差,由图可见,信噪比误差在 ± 0.5 dB之间.

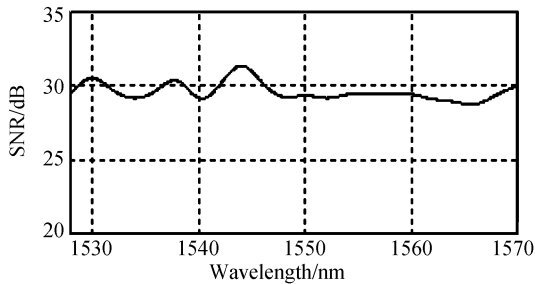


图4 InGaAs 解调系统信噪比的测量

Fig. 4 SNR measurement of the InGaAs interrogation system

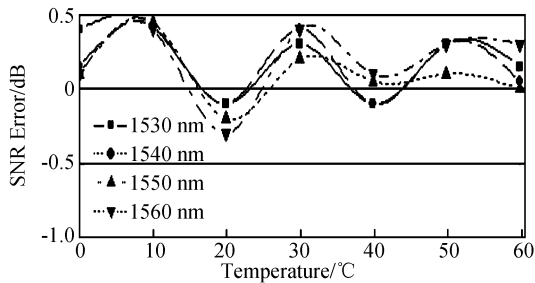


图5 不同工作温度下解调系统的 SNR 精确度

Fig. 5 SNR accuracy at different operating temperature

中心波长的精确度(漂移)是 InGaAs 解调系统另一个非常重要的因素,它的测量是解调系统测得的中心波长的漂移与它的“真值”的比值.其实“真值”是无法得到的,这里的“真值”指用多波长计测量得到的.图6就是四个波长的中心波长的漂移随着温度变化的误差,由图可见,波长的精确度为 ± 15 pm.

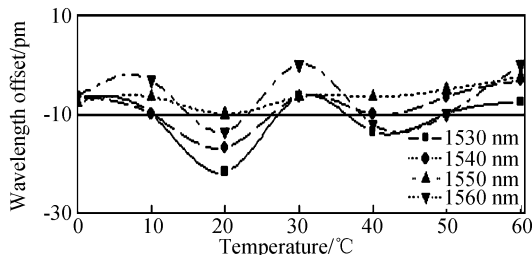


图6 不同工作温度下波长的精确度

Fig. 6 Wavelength accuracy at different operating temperature

同理,功率的精确度测量是 InGaAs 解调系统测得的输入功率与它的“真值”的比值.这里的“真值”由功率计测得.图7就是四波长的输入功率随着温度变化的误差,由图可见,功率的精确度为 ± 0.3 dB.

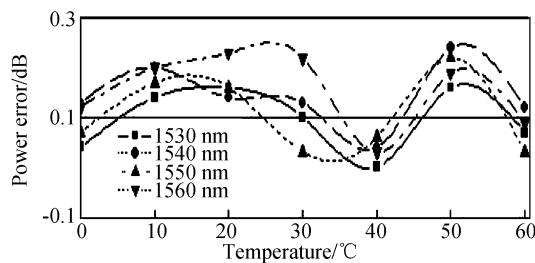


图7 不同工作温度下输入功率的精确度

Fig. 7 Input power accuracy at different operating temperature

5 结论

提出了基于线阵 InGaAs 光电二极管阵列和体相位光栅并结合波分复用和空分复用技术的解调系统.该解调系统不仅实现了尺寸小,低功耗,高的分辨率,而且具有很快的解调速度.实验结果和系统分析表明:基于线阵 InGaAs 光电二极管阵列和体相位光栅的解调系统,可用于解调带宽为 42 nm 的 FBG 传感器阵列,实现了信噪比为 30 dB,信噪比漂移 ± 0.5 dB,中心波长误差 ± 15 pm,输入功率误差 ± 0.3 dB 的解调,具有良好的应用前景.

参考文献

- [1] LEE B. Review of the present status of optical fiber sensors [J]. *Optical Fiber Technology*, 2003, **9**: 57-79.
- [2] FAN Dian, JIANG De-sheng, MEI Jia-chun. High-speed double-edged wavelength interrogation technology for fiber bragg grating [J]. *Acta Photonica Sinica*. 2006, **35**(1): 711-715.
范典,姜德生,梅加纯.高速双边缘光纤光栅波长解调技术 [J]. *光子学报*, 2006, **35**(1): 711-715.
- [3] ZHAN Ya-ge, LU Qing, XIANG Shi-qing, *et al.* Study on the optimization of matched grating interrogation technique of fiber bragg grating sensor [J]. *Acta Photonica Sinica*. 2004, **33**(6): 118-121.
詹亚歌,陆青,向世清,等.优化光纤光栅传感器匹配光栅解调方法的研究 [J]. *光子学报*, 2004, **33**(6): 118-121.
- [4] LIU Bo, TONG Zheng-rong, ZENG Jian, *et al.* A demodulation method based on chirp graing reflective filter in fiber bragg grating sensing system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(1): 57-60.
刘波,童峥嵘,曾剑,等.一种利用啁啾光栅反射滤波的光纤光栅传感解调方法 [J]. *光子学报*, 2004, **33**(1): 57-60.
- [5] DAVIS M A, KERSEY A D. All-fibre Bragg grating strain-sensor demodulation technique using a wavelength division coupler [J]. *Electron Lett*, 1994, **30**(1): 75-77.
- [6] VOHRA ST, TODD M D, JOHNSON G A, *et al.* Fiber bragg grating sensor system for civil structure monitoring: applications and field tests. Proceedings of the 13th International Conference on Optical Fiber Sensors [C]. *SPIE*, 1999, **3746**: 32-37.
- [7] LIU Y Q, MARK F K. Transient gain control in EDFA's by dual-cavity optical automatic gain control [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 1999, **11**(11): 1381-1383.
- [8] ALEXANDER G S, ZHOU K M, ZHANG L, *et al.* Optical sensor interrogation with a blazed fiber bragg grating and a charge-coupled device linear array [J]. *Applied Optics*, 2004, **43**(1): 33-40.
- [9] TOVKACH E F. Method of measuring linear displacements and twist angle by means of a linear array of photodetectors [J]. *Opt Technol*. 2005, **72**(4): 332-337.

Interrogation for Fiber Grating Sensors Based on the Linear InGaAs Photodiode Array

LI Guo-yu, LIU Bo, GUO Tuan, ZHANG Jian, YUAN Shu-zhong, KAI Gui-yun, DONG Xiao-yi

(*Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China*)

Received date: 2006-06-12

Abstract: Based on the linear indium gallium arsenide (InGaAs) photodiode array and volume phase grating (VPG), a interrogative system of the fiber Bragg grating (FBG) sensors is designed by use of the wavelength division multiplexing (WDM) and spatial division multiplexing (SDM) technology. The performance tests show that the interrogation system can be used to interrogate the FBG sensor array with wavelength bandwidth 42 nm, SNR of 30 dB, wavelength shift accuracy of ± 15 pm and power accuracy of about ± 0.3 dB. The interrogative system has small size, and high interrogation speed, and it shows a good prospect.

Key words: FBG sensing; InGaAs photodiode array; Interrogation system



LI Guo-yu was born in 1977 in Hebei Province. He received the M. S. degree from Hebei University of Technology in 2004. Now he is a doctor of the Institute of Modern Optics, Nankai University and his research interests are fiber sensors, fiber Bragg grating sensing system and fiber communication.