

用阵列波导光栅实现光纤传感器的复用

倪小琦, 陈绪兴, 王 鸣

(南京师范大学 物理科学与技术学院, 江苏 南京 210097)

[摘要] 阵列波导光栅 (AWG) 是密集波分复用 (DWDM) 光网络中的关键器件, 具有滤波特性好、性能稳定、串扰小的优点. 介绍了 AWG 的结构和原理, 在此基础上提出了用 AWG 实现光纤法布里-珀罗 (F-P) 传感器复用的方案. 可调谐激光器和 AWG 的联合使用实现了时分复用和波分复用, 系统的复用能力决定于可调谐光源的带宽、AWG 的通道数和自由频谱范围. 采用传统的强度法对传感器进行解调, 解调结构简单, 容易实现, 传感器间无串扰.

[关键词] 光纤光学, 阵列波导光栅 (AWG), 光纤 FP 传感器, 复用

[中图分类号] TN253 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1672-1292 (2006) 04-0062-04

Multiplexing of Fiber Optical Sensors Employing Arrayed Waveguide Grating

NIXiaoqi, CHEN Xuxing, WANG Ming

(School of Physical Science and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China)

Abstract: Arrayed waveguide grating (AWG) is a key device in the DWDM optical network and has the advantages of good filter capacity, steady performance and low crosstalk. The configuration and principle of AWG are described, and a scheme of multiplexing of fiber optical FP sensors is presented. The combination of tunable laser source (TLS) and AWG makes time division multiplexing and wavelength division multiplexing possible. The number of sensors multiplexed in this system depends on the bandwidth of TLS, the number of AWG channels and AWG free spectrum range (FSR). Sensors are demodulated with the conventional method of intensity which is of simple configuration and easily carried out. There is little crosstalk between sensors.

Key words: fiber optics, arrayed waveguide grating (AWG), optical fiber FP sensor, multiplexing

0 引言

密集波分复用 (DWDM) 技术为大容量、高速度光纤通信系统的发展提供了有效途径. DWDM 系统中, 以阵列波导光栅 (AWG) 为基础的波分复用器是波长复用和解复用的关键光学器件. 其性能的优劣对传输质量起决定性作用. AWG 设计灵活、滤波特性良好、性能长期稳定, 具有高重复性、高可靠性、低插损、低串扰、易于与光纤有效耦合以及半导体器件集成能力强等优点, 致使 AWG 很快就进入了实用化阶段^[1-4]. 随着 AWG 制作工艺的迅速发展以及性能的不提高, AWG 的应用逐渐扩展到光纤传感领域. 光学传感器与传统的电子传感器相比, 主要优点有: 免除了电机干扰, 可在恶劣的环境中工作以及可多路复用等. 工业生产中常需要用多个光学传感器测量温度、应力和压力, 这就使得多路复用成为光学传感器的一个重要问题. 复用使得单个传感器的成本大幅度降低, 提高了光学传感器对传统的电子传感器的竞争力. 某些应用领域对重量要求很苛刻, 光多路复用技术也使整个系统重量大大减少. 应用 AWG 构成的光纤传感器复用系统复用能力强, 解调方法多样且准确方便.

本文在分析 AWG 原理的基础上, 结合时分复用和波分复用, 提出了一种应用 AWG 的光纤 FP 传感器多路复用系统, 并简要介绍了强度法对传感器的解调. 该系统中, AWG 的一个通道就可以接一个传感器,

收稿日期: 2006-01-13.

基金项目: 江苏省高技术研究计划资助项目 (BG2003024)

作者简介: 倪小琦 (1981-), 女, 硕士研究生, 主要从事光纤传感技术的学习和研究. E-mail: xiaoqi_ni@163.com

通讯联系人: 王 鸣 (1950-), 教授, 博士生导师, 主要从事激光应用与传感的教学与研究. E-mail: wangming@njnu.edu.cn

复用能力很强,且传感器单独工作,基本没有串扰。

1 AWG的结构和原理

1×N的AWG复用/解复用器的结构如图1所示,由输入波导、输出波导、阵列波导和两个具有Rowland圆结构的平板波导(自由传播区域)组成,集成在同一衬底上。输入/输出波导位于半径为R的Rowland圆周(光谱聚焦圆周)上,对称地分布在器件的两端。阵列波导的端口等间距分布,各波导的参数基本相同。相邻波导的光程差为一常数L,对波长为λ的信号,每个波导中产生一个相移 $2\pi L/\lambda$ 。

对不同的波长,产生的相移也各不相同。所以该波导阵列对入射光束起到光栅作用,光波通过阵列波导将发生光衍射效应。不同波长的光信号通过输入波导进入自由传播区域,发生散射,将功率等量耦合入阵列波导。经阵列波导的衍射,不同波长的同阶衍射光波将分布到第二个平板波导的不同位置,由输出波导引出,由此实现了解复用功能。反之,可将不同输入波导中的具有不同波长的光信号汇集到同一根输出波导中,完成复用功能。

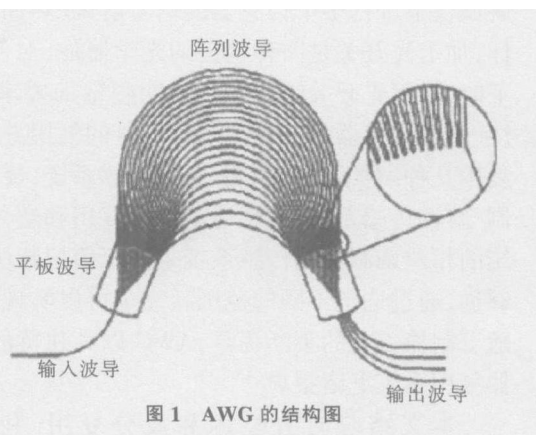


图1 AWG的结构图

对于AWG解复用器,它的原理由分光和聚焦两部分组成。分光是指将输入WDM合波光按波长分离开来,使得不同波长的光沿不同方向传播。聚焦是指WDM合波光中的任意一个单一波长分量经阵列波导传播后能聚焦于某一点。

对于AWG解复用器,它的原理由分光和聚焦两部分组成。分光是指将输入WDM合波光按波长分离开来,使得不同波长的光沿不同方向传播。聚焦是指WDM合波光中的任意一个单一波长分量经阵列波导传播后能聚焦于某一点。

输入光束中同一波长的光经平板波导入射到相邻的两根阵列波导后,变成两路光在波导中传播。当这两路光从波导的另一端输出后,如果再重新汇合成一路光,则要求这两路光的相位延迟之差必须是 2π 的整数倍,或者说这两路光的光程差必须是波长的整数倍,即满足光栅方程:

$$n_d \sin \theta_i + n_i L + n_d \sin \theta_o = m \quad (1)$$

式中, n 为平板波导的有效折射率; n_i 为第*i*个波导的有效折射率; m 是衍射级数; θ_i 和 θ_o 对应输入/输出光的波阵面的倾角; d_i 为相邻阵列波导间距; λ 是AWG的中心波长; L 是相邻阵列波导的长度差。以上参数中, n 、 n_i 、 d_i 、 L 都是由AWG器件本身的特性所决定的,不随输入光波长不同而发生变化; θ_i 是由输入波导的位置所决定的,对第*i*个波导而言,也是固定值,因此只有 θ_o 是随波长变化的。 θ_o 由入射光的波长 λ 所决定,当入射光中包含多个波长 λ_1 、 λ_2 、...、 λ_n 时,对应的就有不同的 θ_{o1} 、 θ_{o2} 、...、 θ_{on} 。当WDM合波光(其中不同的波长分量的传播方向一致)经两根相邻的阵列波导传播后,其中不同的波长分量的波阵面的倾斜程度不同,即它们的传播方向各不相同,从而达到了分光的目的。

WDM合波光中的任意一个单一波长分量经阵列波导传播后怎样能聚焦于某一点,即某输出波导的入口,这就是聚焦问题。因为每个阵列波导的波导相位差为 2π 的整数倍,不同的波长在不同的波导间会形成一等相位面,在进入输出端自由传播区时聚焦于Rowland圆上的不同位置,因此只要在这些不同的聚焦点上摆入输出波导,就可达到不同波长由不同波导输出的功能。

AWG有一个重要性能参数:自由频谱范围FSR。FSR定义为在同一衍射级数下,可得到的最大带宽,它限制了AWG能够分离的波长范围。

2 光纤FP传感器的复用系统

光纤传感器是自20世纪70年代起随光纤通讯等相关技术发展而飞速发展的新型传感器,具有灵敏度和分辨率高、体积小、重量轻、耐高温、抗腐蚀、抗电磁干扰且能在易燃易爆的环境下可靠运行等优点。法布里-珀罗(F-P)传感器是目前历史最长、技术最为成熟、应用最为普遍的一种光纤传感器。当外界参量以一定方式作用到FP传感器上时,传感器的腔长发生变化,从而导致其干涉输出信号也发生相应变化。因此,从干涉信号的变化就能解调出腔长乃至外界参量的变化,实现多参量的传感。光纤FP传感器的信号解调主要有强度解调与相位解调两大类。强度解调一般利用单色光源,直接利用反射光的强度求解出腔长;而相位解调则是应用宽带或波长可调谐光源,利用输出信号随波长的变化,通过强度、相位和腔长的关系求出腔长。

在工业生产中常需要用多个传感器,如果一套解调系统只能完成一个传感器的信号解调,那么解调成本将会非常昂贵.为了解决这个问题,光学传感器通常采用光开关进行信号切换,然后接到一台光纤 FP 解调仪上进行多个传感器的信号解调.然而由于光开关的切换速度很慢,不能保证多个传感器的同时采样,加上光开关是一种精密的光学器件,对使用环境的要求很高,当光纤 FP 传感器安装在野外恶劣环境下时,采用光开关很难达到长期测量的要求.因此近几年来光纤 FP 传感器的复用技术受到了广泛的关注.光纤传感器的复用技术按信号的复用方式一般可分为时分复用、空分复用、频分复用、波分复用、偏振复用几种.对于强度调制解调传感系统,复用的方法很多,有时分复用、波分复用、偏振复用.对于相位调制解调传感系统,主要讨论波分复用和空分复用.波分复用是系统采用不同中心波长的宽带光源,由于传统的相位调制法珀传感系统采用峰值记数法(双峰法、多峰法、复合法),只要两宽带光源光谱范围间隔足够远,通过选定不同的范围就完全可以实现波分复用系统的解调.空分复用有串连和并联复用两种结构.随着制作工艺的不断提高,AWG 以其独特的性能引起了很多研究者的注意,很多应用 AWG 的光纤传感器复用系统见诸报导^[5,6].

本文结合时分复用和波分复用,利用 AWG 构成了一种应用 AWG 的光纤 FP 传感器复用系统.光源采用可调谐激光器,输出光的波长随时间改变,实现了时分复用;而不同波长的光由 AWG 不同的通道引出,实现了波分复用. AWG 多通道、高性能的特点增强了系统的复用能力,保证了系统解调的准确性.图 2 即为应用 AWG 的光纤 FP 传感器的复用系统.该系统用 AWG 的 8 个通道复用了 8 个光纤 FP 传感器.投射到传感器上的都是单色光,且在时间上是分离的,所以 8 个传感器单独工作,彼此之间没有干扰.入射光和传感器的反射光由于在时间上的分离性,用 2 个 PD 探测器就可以接收 8 个传感器的 16 路信号.对传感器信号的解调可以采用强度法,反射光的强度除以入射光的强度就是传感器的反射率.当传感器腔长改变很小时,反射率与腔长存在一定的关系,根据腔长的改变量与待测量的关系就可以推出要测试的温度、应力或压力.

系统中,光源为安捷伦的可调谐激光器,波长范围为 1 520 ~ 1 630 nm; AWG 为 40 通道,平顶型,通道范围为 1 529.5 ~ 1 561.4 nm,FSR 为 31.9 nm,通道间隔 100 GHz,选取 1 550 nm 附件的 8 个通道(通道中心波长 1 548.0 ~ 1 553.6 nm);可调激光光源从 1 548 nm 开始,间隔 0.8 nm 发出 8 个不同波长的光,经 AWG 先后从相邻的 8 个通道输出,每个通道输出的都是单色光.一个通道的光经一个 2 × 2 的耦合器分成两路,一路入射到传感器上,经反射后,再次通过耦合器被光电探测器 PD2 接收;另外一路直接被光电探测器 PD1 接收,这路光和入射到传感器上的光功率近似相同.两个探测器将光功率转化为相应大小的电流,经 I/V 变化后由 NI 采集卡的两个通道同时采集.

采用图 3 所示的实验系统,对选用的 8 个通道进行了测试.所用 ASE 光源波长覆盖 C 波段,光谱分析仪为安腾的 AQ6317C 型,波长范围 600 ~ 1 750 nm.测试结果如表 1 所示.

表 1 AWG 各通道参数

通道	中心波长 /nm	功率 /dBm	信道间隔 /nm	3 dB 带宽 /nm
1	1 548.011	- 39.57	—	0.66
2	1 548.828	- 40.27	0.817	0.67
3	1 549.618	- 40.41	0.789	0.77
4	1 550.403	- 39.50	0.785	0.68
5	1 551.240	- 39.92	0.837	0.71
6	1 552.012	- 43.13	0.772	0.79
7	1 552.832	- 42.64	0.819	0.78
8	1 553.628	- 40.25	0.797	0.71

为了验证解调方法的可行性和传感器间无串扰,选取 AWG 的两个通道按照图 2 所示的系统进行实验,通道的中心波长分别为 1 549.618 和 1 550.403 nm,参数如表 1 的通道 3 和通道 4 所示.先在通道 1 通

过耦合器接一个光纤 FP腔压力传感器 1,传感器反射的信号以及入射到传感器的信号经过 PD 接收转换,比值作为传感器的反射率 R 。利用标准活塞式压力计给压力传感器加压,从 0.3 MPa 开始,间隔 0.05 MPa 对传感器 1 施加压力,测出每个压力对应的传感器的反射率 R 。并以压力为横坐标,传感器反射率为纵坐标对实验数据进行线性拟合。拟合的直线方程为: $y = 0.323\ 28 + 0.224\ 39x$,拟合率达到 0.977,均方根误差为 0.006 6。再在两个传感器复用的情况下,测出传感器 1 的反射率与施加压力的对应关系,并将结果与不复用时的进行比较,如图 4 所示。复用时的拟合直线为: $y = 0.320\ 02 + 0.232\ 67x$,拟合率达到 0.974,均方根误差为 0.007 4。由此可看出,复用对传感器的影响很小,传感器之间基本没有串扰。

3 结论

本文详细描述了 AWG 的结构和分光、聚焦的原理,简单介绍了其性能特点,在此基础上提出了用 AWG 实现光纤法布里-珀罗 (F-P) 传感器复用的方案,简要阐述了如何采用传统的强度法对传感器进行解调。该系统由于可调谐激光器的使用而使得波长在时间上被分离开来,又通过 AWG 将波长分配到每个传感器,同时实现了时分复用和波分复用。传感器单独工作,每个传感器的反射信号时间上彼此分开,没有串扰,通过一个 PD 就能接收,较好地实现了光纤 FP 传感器的复用。由于实验所用的活塞式压力计只能同时对两个传感器施加压力,故本文选取了 AWG 的两个通道进行光纤压力传感器的复用,将施加的压力和传感器反射率进行拟合,得出拟合公式,从而对传感器进行解调。实验表明,用 AWG 实现光纤传感器复用的方案切实可行,解调简单,传感器之间的串扰很小。该系统的复用能力取决于可调谐光源的带宽、AWG 的通道数和自由频谱范围。目前可调谐光源的范围可以覆盖 C+L 波段,而 AWG 的通道数可以达到 256 个。因此,理论上说,该系统可以复用 256 个。光纤 FP 传感器和采用多个普通激光器相比,该系统减少了单个传感器的使用成本,并且减少了所使用光源和 PD 的数目,使得系统结构更加简单和紧凑。因此,在工业生产中或在气体、油田等恶劣环境下需要同时使用多个光纤传感器进行测量时,该系统具有明显的优势。

[参考文献] (References)

- [1] 黄章勇. 光纤通信用新型光无源器件 [M]. 北京:北京邮电大学出版社, 2003.
HUANG Zhangyong. Novel Passive Device for Fibre Communication [M]. Beijing: Beijing Post and Telecommunication University Press, 2003. (in Chinese)
- [2] 万莉, 王跃林. 阵列波导光栅的最近研究进展 [J]. 真空电子技术, 2003 (5): 56~ 61.
WAN Li, WANG Yuelin. Research advances in arrayed waveguide grating [J]. Vacuum Electronics, 2003 (5): 56~ 61. (in Chinese)
- [3] 廖延彪. 我国光纤传感技术现状和展望 [J]. 光电子技术与信息, 2003, 16 (5): 1~ 6.
LIAO Yanbiao. The promotion of OFS to the development of industry [J]. Optoelectronic Technology and Information, 2003, 16 (5): 1~ 6. (in Chinese)
- [4] 李远红, 杨俊. AWG 复用器的原理设计以及应用 [J]. 光电子技术与信息, 2004, 17 (3): 34~ 38.
LI Yuanhong, YAN Jun. Principle, design and application of arrayed-waveguide grating wavelength multiplexers [J]. Optoelectronic Technology and Information, 2004, 17 (3): 34~ 38. (in Chinese)
- [5] LI Weizhuo, ABEYSNGHE DON C, BOYD JOSEPH T. Wavelength multiplexing of microelectromechanical system pressure and temperature sensors using fiber Bragg gratings and arrayed waveguide gratings [J]. Opt Eng, 2003, 42 (2): 431~ 438.
- [6] BOYD JOSEPH T, YASUKAZU SANO, TOSH IHI KO YOSHINO. Fast optical wavelength interrogator employing arrayed waveguide grating for distributed fiber bragg grating sensors [J]. Journal of Lightwave Technology, 2003, 21 (1): 132~ 139.

[责任编辑:丁 蓉]

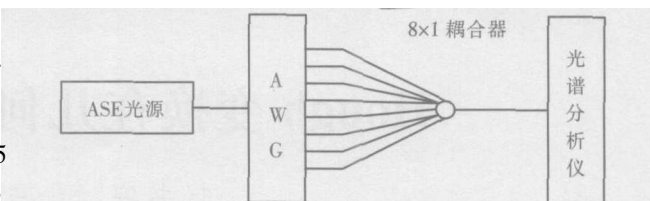


图3 AWG的通道测试系统

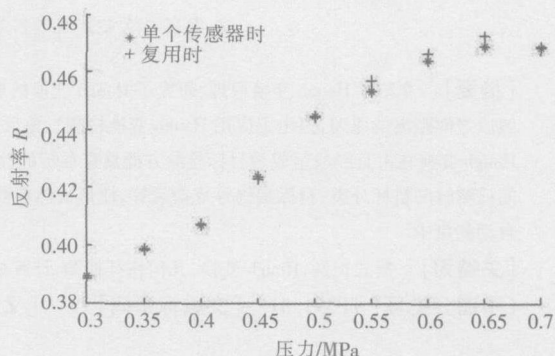


图4 复用和不复用传感器1的反射率与压力的关系比较