

Acceleration Sensor Based on Flexible Waveguide Coupling with Integrated Optical Microring Resonator *

Qi Zhenheng¹, ZHANG Tong^{2*}, ZHANG Xiaoyang², HU Dewen¹

{ 1. College of Mechatronics Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;
2. School of Electronic Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China }

Abstract : An acceleration sensor based on flexible waveguide coupling with integrated optical microring resonator is demonstrated in this paper. Deformation of a flexible polymer waveguide caused by acceleration results in change of the distance between itself and the waveguide of the microring resonator, therefore the coupling rate is altered. This variation makes the output characteristics of the microring resonator be altered correspondingly. By detecting the output optical intensity of spectrum of the microring resonator under the condition of optimum resonance, the acceleration is measured effectively. The design of this novel structure is given and the measuring principle together with influence factor of sensitivity are derived and discussed.

Key words : microring waveguide; flexible optical waveguide; coupling rate; acceleration sensing; optical resonator

EEACC: 7230; 4130; 7320E

柔性-微环光波导耦合结构的集成光学加速度传感器 *

齐振恒¹, 张彤^{2*}, 张晓阳², 胡德文¹

{ 1. 国防科技大学机电工程与自动化学院, 长沙 410073; 2. 东南大学电子科学与工程学院, 南京 210096 }

摘要 : 给出了一种利用柔性-微环光波导耦合结构的集成光学加速度传感器, 通过聚合物材料设计的柔性光波导, 在外力作用下产生形变, 该形变改变了柔性光波导与微环光波导的层间距, 从而改变波导耦合器的耦合比, 使得微环光波导谐振腔输出谱特性发生相应改变, 继而有效地实现了加速度的传感。本文给出了这种新型的设计, 推导了其检测原理并同时分析了其灵敏度的影响因素。

关键词 : 微环光波导; 柔性光波导; 耦合比; 加速度传感; 光学谐振腔

中图分类号: V241.5; TH774.5

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2009)03-0337-03

加速度传感器是惯性系统物理量测量的关键器件, 在惯性传感领域起着举足轻重的作用, 广泛地应用在军事、航空、航天等高科技领域。目前的加速度传感器种类繁多, 从传感方式上划分, 主要包括电容式、压电式、压阻式、霍尔效应式、磁阻式、热传输式以及光传输式等。从其结构形式上划分, 主要分为机械式和光学式两大类。与其他各类加速度传感器相比, 基于光信号传感的光学式加速度传感器具有抗电磁干扰、动态范围宽、精度高、适应于恶劣环境工作等优点, 日益受到应用及研究领域工作者的重视。同时, 在惯性器件小型化的客观需求下, 加速度传感器逐渐走向微型化和集成化。目前研究较多

的光学式加速度传感器基本都是基于光纤或光纤光栅结构^[1-4], 而基于集成光学光波导结构的加速度传感器鲜见报道^[5-6]。文献[7-8]报道了利用微环光波导结构设计的加速度传感器, 但其检测输出谱频率差的方法较为复杂, 而且理论精度低。本文给出了一种利用柔性-微环光波导耦合结构的集成光学加速度传感器, 整个器件是基于双层光波导结构, 其中上层光波导是利用聚合物材料设计的柔性光波导, 下层光波导是不具柔性的光波导谐振环, 上下两层的光波导构成耦合器。在外力作用下, 柔性光波导可以产生形变, 该形变使得双层结构光波导层间距发生改变, 从而改变波导耦合器的耦合比, 使得微环

基金项目: 教育部“新世纪优秀人才”支持计划资助(NCET-05-465); 部委项目资助

收稿日期: 2008-12-30 修改日期: 2009-01-10

光学谐振腔输出谱特性发生相应改变^[9],并在谐振点上直接检测输出光强度的变化,继而有效地实现了加速度的传感。

1 基本结构

图1是柔性光波导结构示意图。其上包层和芯层分别是折射率不同的聚合物材料,下包层为空气。

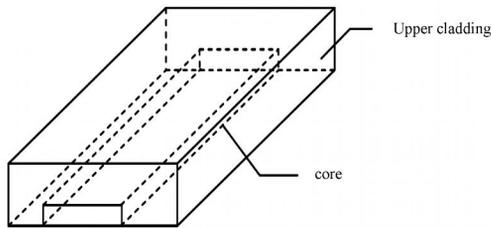


图1 柔性光波导结构示意图

通常制备柔性光波导要选取与下包层粘性较弱的材料做衬底,以便在完成柔性波导芯层制备后,将整个波导从衬底上成功无损剥离。

图2是下层波导谐振环耦合器结构示意图。整个谐振环制备在基底材料上,但将其一部分波导“裸露”构成与上层柔性光波导的耦合器。

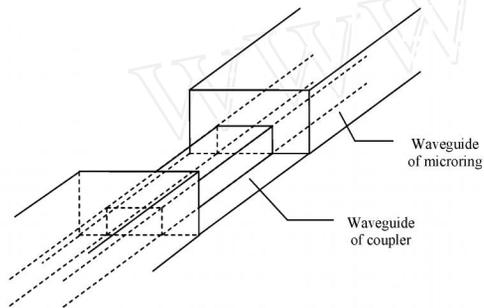


图2 下层波导谐振环耦合器结构示意图

图3是将柔性光波导与谐振环“粘贴”后,构成的双层结构光波导耦合器示意图。其中,图3(a)是柔性光波导不受力,没有形变;图3(b)是柔性光波导受向下的力,产生向下弯曲形变;图3(c)是柔性光波导受向上的力,产生向上弯曲形变。

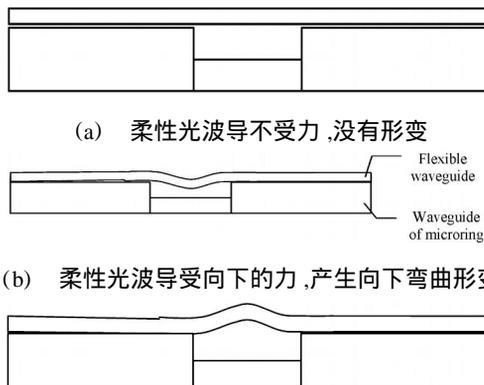


图3 双层结构光波导耦合器示意图

当柔性光波导因受力而产生形变时,上下层波导耦合间距发生改变,从而改变了波导耦合比,继而引起谐振环输出谱特性改变,起到加速度传感的作用。

2 工作原理

对于如图4结构的谐振环,用 E_1 、 E_2 、 E_3 、 E_4 表示各端口的光电场。设定向耦合器的耦合系数为 k ,插入损耗为 M ,单位长度波导谐振环的传输损耗为 α ,其输出光强可以表示为^[10]:

$$|E_4/E_1|^2 = (1 - M) \cdot \left\{ 1 - \frac{(1 - M)k}{[1 + \sqrt{(1 - k)M}f]^2 - 4\sqrt{(1 - k)M}\sin^2(\theta/2)} \right\} \quad (1)$$

其中:

$$M = (1 - \alpha L) \exp(-2L) \quad (2)$$

$$f = \alpha L / 2 = nL / c - \alpha L / 2 \quad (3)$$

n 为谐振环光波导的折射率, L 为谐振环长度。

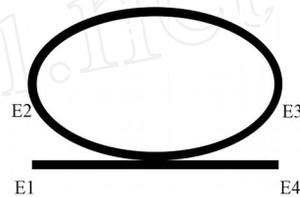


图4 波导环结构示意图

当 $\sin^2(\theta/2) = 1$ 时,即是满足谐振条件,此时有:

$$|E_4/E_1|^2_{\text{Min}} = (1 - M) \cdot \left\{ 1 - \frac{(1 - M)k}{[1 - \sqrt{(1 - k)M}f]^2} \right\} \quad (4)$$

由公式(4)可以看出,在谐振点上,谐振环输出光强是一个耦合系数 k 的函数。如果利用可调谐光源,对于设定长度的波导环,必然可以选取一个谐振频率。在谐振频率点上,不同的耦合系数 k 所对应的输出光强幅值不同,当

$$k = 1 - M \quad (5)$$

可以得到最佳谐振条件。此时的 k 称为最佳耦合比。

最佳耦合比时,其输出幅值最大,其他耦合比时,其归一化输出光强则是(0,1)区间内的一个数值。如图5所示。

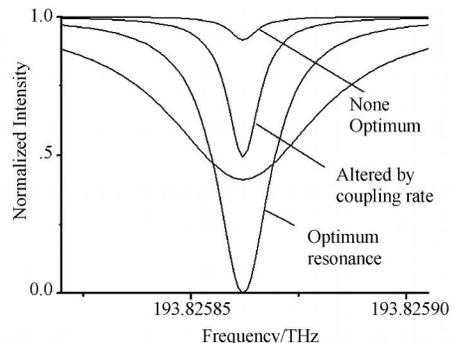


图5 谐振环输出谱线示意图

3 输出特性及传感方式分析

图 6 是 M 为 0.5 时,归一化输出光强随耦合比变化的关系曲线。改变 M 的值,曲线变化趋势一致。由图 6 可以看出:

(1) 当耦合比较小时,其归一化输出光强较大,对应于图 5 中变化较为平坦的曲线,而耦合比较大时,其归一化输出光强较小,对应于图 5 中变化较为陡立的曲线;

(2) 耦合比较小时,归一化输出光强变化量较大,即图 6 中曲线在 较小时斜率较大;而在耦合比较大时,归一化输出光强变化量较小,即图 6 中曲线在 较大时斜率较小;

(3) 当耦合比接近最佳耦合比时,归一化输出光强接近为零。

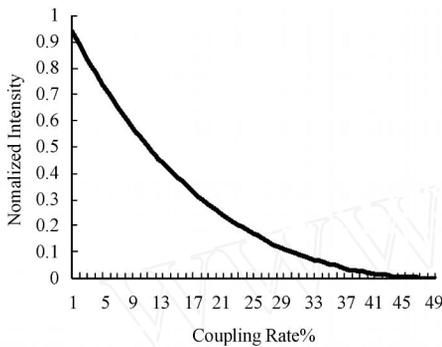


图 6 M 为 0.5 时,归一化输出光强随耦合比变化的关系曲线

因此,当耦合比的数值越远离最佳耦合比时,输出光强的变化量越大,传感精度越高;而在最佳耦合比附近,传感精度最低。该种传感方式,与利用可调谐激光光源扫描,从而检测归一化输出光强变化的传感方式正好相反,后者需要在最佳耦合比时,输出谱线最陡峭时,光强的相对变化量最大,从而传感精度最高。同时,利用可调谐激光光源扫描难以实现加速度量的瞬态测量,而在实际应用中,有很多场合存在加速度的瞬态测量问题,这也在一定程度上限制了后者的直接应用。另外,与检测谐振频率差的检测方法相比,由于频率差比较难以检测,将频率差转化为可输出的物理量也需要非常复杂的电路;而本文所用的检测光强变化量的方法电路简单且比较容易实现,这也是该方法的优点之一。

4 结论

从前文的论述可以看出,利用双层微环光波导结构的集成光学加速度传感器,通过改变聚合物柔性光波导与光波导谐振环之间的耦合比,使得微环光学谐振腔输出谱特性发生相应改变,实现了加速度的传感;同时,利用直接检测在谐振点上输出光强

的方法,检测电路简单,方便可行。因此,双层微环光波导结构的集成光学加速度传感器是一种很有前景的微型化加速度传感器。

参考文献:

- [1] Kim Dae-Hyun and Feng Maria Q. Real-Time Monitoring of Structural Vibration Using a Novel Fiber Optic Accelerometer System[C]// Proc. of SPIE, 2006, 6178, No 617801-1.
- [2] Teng li, Feng lishuang, Lin heng, Zhang bo, Liu chunzhi, A New Fiber Bragg Grating Accelerometer[C]// Proc. of SPIE, 6357, 63574C, 2006.
- [3] Geoffrey A. Cranch and Philip J. Nash, High-Responsivity Fiber-Optic Flexural Disk Accelerometers [J]. Journal of Lightwave Technology, 2000, 18(9):1233-1243.
- [4] Meng Pang, Zhou H P, Zhang M, Lin F, Zeng N, Liao Y B, Analysis and Amelioration about the Cross-Sensitivity of a Fiber-Optic Accelerometer Based on Compliant Cylinder [J]. Journal of Lightwave Technology, 2008, 26(3):365-372.
- [5] Andreu Llobera, Volker Seidemann, Jos é A, Plaza, V éctor Javier Cadarso, and Stephanus B ütgenbach, Characterization of Optical Accelerometers Based on UV-Sensitive Polymers [J]. IEEE Sensors Journal, 2006, 6(2):412-419.
- [6] Sathish Malathi and Talabatulla Srinivas, Design and Analysis of ARROW Based Racetrack Resonator Vibration Sensor for Inertial Navigation Application[C]// Proc. of SPIE, 7100, 710018-1.
- [7] Bipin Bhola and William H. Steier, A Novel Optical Microring Resonator Accelerometer [J]. IEEE Sensors Journal, 2007, 7(12):1759-1766.
- [8] Bipin Bhola, Hyun-Chae Song, Hidehisa Tazawa, and William H. Steier, Polymer Microresonator Strain Sensors, IEEE Photonics Technology Letters, 2005, 17(4):867-869.
- [9] Zhang Xiaoyang, Zhang Tong, Cui Yiping. Analysis of Ring Resonator of Integrated Optical Waveguide Gyroscope [C]// Proc. of SPIE, 2007, 6722, 67222M.
- [10] Zhang T, Zhang X Y, Ji CL, Cui Y P. Study of Characteristics of Ring Resonator in Integrated Optical Waveguide Gyroscope [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2006, 19(6):2467-2469.



齐振恒(1971-),男,博士研究生,研究方向为导航与自动控制,xiaojuany@126.com



张 彤(1967-),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为集成光学与纳光子学,tonnyz@263.net