

文章编号: 0253-2239(2006)11-1623-4

用于光纤光栅解调的波长敏感光纤耦合器^{*}

柳春郁^{1,2} 叶红安¹ 曹雪¹

(¹ 黑龙江大学电子工程学院, 哈尔滨 150080
² 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068)

摘要: 为了拓宽光纤耦合器的使用范围,开发光纤耦合器的新功能,采用熔锥技术制作波长敏感耦合器,该耦合器在分光的同时对波长敏感。通过耦合理论验证实验结果,实验数据与理论值相符合。实验中得到波长灵敏度最大值为 17.86 %/nm 的耦合器。采用拉锥工艺制作波长敏感耦合器工艺简单,耦合比峰值对应波长控制易于实现。该耦合器可用于光纤光栅布拉格波长漂移解调。令待解调光纤光栅布拉格波长与耦合器波长灵敏度最大值对应的波长一致,当波长发生漂移时,耦合器输出耦合比发生变化。自制的波长敏感耦合器实现了对布拉格波长为 1566.71 nm 光纤光栅波长漂移的解调,波长漂移 1.80 nm,耦合比变化 20.34%。此种解调方式具有光路简单,易于与光纤匹配的优点,可以应用在大型建筑中光纤光栅的健康监测。

关键词: 光纤光学; 波长敏感光纤耦合器; 熔锥型; 光纤光栅解调
中图分类号: TN253 文献标识码: A

Fiber Coupler Sensitive to Wavelength Used to Demodulate Wavelength Shift of Fiber Bragg Grating

Liu Chunyu^{1,2} Ye Hongan¹ Cao Xue¹

(¹ Department of Electronic Engineering, Heilongjiang University, Harbin 150080
² Xian Institute of Optics and Precision Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Xian 710068)

Abstract: In order to extend the application of the fiber couplers and develop the new function of fiber couplers, by utilizing the fused-taper technology, a fiber coupler sensitive to wavelength is obtained. The couplers can split light beam and simultaneously is sensitive to wavelength. The experimental value agrees with the theoretical value. In experiment, the wavelength sensitivity of the coupler is maximized to be 17.86 %/nm. The coupler sensitive to wavelength is easy to be produced by the fused-taper technology and the peak wavelength of the coupling ratio can be well controlled. The coupler can be used to demodulate wavelength shift of fiber Bragg gratings (FBGs). When the Bragg wavelength of FBG agrees with the maximum sensitivity wavelength, the shift of the Bragg wavelength will influence coupling ratio of the coupler output. FBG with 1566.71 nm Bragg wavelength is demodulated by the self-made coupler. When the shift of wavelength reaches 1.80 nm, the coupling ratio varies about 20.34%. The demodulation system is simple and compatible with fiber device. It can be used in health monitoring for huge buildings.

Key words: fiber optics; fiber coupler sensitive to wavelength; fused taper; demodulation for fiber Bragg grating

1 引 言

光纤布拉格光栅(FBG)以其波长编码的优势,激发了人们对其传感应用的兴趣,已广泛应用于温度^[1]、压力^[2]、振动检测^[3,4],尤其是在大型桥梁建筑

的智能健康监测中^[5~7]。解调技术是光纤光栅传感技术的关键环节之一,采用光谱仪对波长漂移测量^[2,5~7]最为精确,但仪器体积大、重量大,不利于现场工作,而且解调成本高。利用干涉解调^[8~10]能够

* 黑龙江省教育厅电子工程重点实验室项目(DZZD2006-11)和黑龙江省教育厅科技项目(11511301)资助课题。

作者简介: 柳春郁(1975~),女,黑龙江省海林市人,黑龙江大学电子工程学院讲师,硕士,主要从事光纤无源、有源器件以及光纤传感的研究。E-mail: liuchunyu@hlju.edu.cn

收稿日期: 2006-01-19; 收到修改稿日期: 2006-04-19

克服光谱仪的缺点,然而受环境影响大,必须保证工作环境温度恒定,不受振动影响。还可以采用匹配光纤光栅对解调^[3,4],能够克服环境温度,振动的影响,但是需要制作布拉格波长匹配的光纤布拉格光栅,成对的光纤布拉格光栅只能通过写入光纤布拉格光栅后对某些局部进行紫外修正得到,参量很难控制,给器件的制备带来了许多困难,导致光纤光栅对价格昂贵,且器件不稳定。这里提出利用熔锥型光纤耦合器在过耦合情况下对波长敏感的特性,来实现光纤布拉格光栅波长漂移解调。光纤耦合器在解调过程中不仅作为传光元件,同时作为功能性解调元件,拓展了光纤耦合器的使用范围。

2 原 理

耦合器的耦合比 $R(\lambda)$ 是耦合长度 z 和光源波长 λ 的函数。在熔锥制作过程中,如果耦合周期级次大于零,那么这时器件处于过耦合状态,耦合周期级次越高,耦合比与波长的依赖关系越明显,形成的振荡越剧烈,耦合器的耦合比定义为

$$R(\lambda) = \sin^2(Cz), \quad (1)$$

其中 C 是耦合系数,是波长、纤芯半径的函数。定义耦合比随波长变化曲线的斜率 $dR(\lambda)/d\lambda$ 为波长灵敏度:

$$\frac{dR(\lambda)}{d\lambda} = \cos(2Cz) \cdot z \cdot \frac{dC}{d\lambda}, \quad (2)$$

(2) 式中可以看出波长灵敏度由三项因子决定: 第一项 $\cos(2Cz)$, 波长灵敏度将表现出余弦周期变化,耦合长度 z 越大,周期越小; 第二项耦合长度 z , z 越大,波长灵敏度余弦振幅越大; 第三项 $dC/d\lambda$ 耦合系数对波长的导数, z 越大,相同的 λ 变化引起的 C 越大,波长灵敏度余弦振幅越大。综合以上三点,对于过耦合器件,在四分之一周期的奇数倍数时,波长灵敏度有最大值,且最大值随着 z 增大而增大。

这时 $R(\lambda)$ 与波长 λ 近似地可用下式描述^[11,12]:

$$R(\lambda) = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \sin \left[\frac{2\pi}{\Delta\lambda} (\lambda - \lambda_k) \right] \right\}, \quad (3)$$

式中 $\Delta\lambda$ 是耦合比随波长变化周期; $2\pi\lambda_k/\Delta\lambda$ 是相位参量。

如图 1 所示,在耦合比达到 50% 时,也就是在 $\Delta\lambda/4$ 的奇数倍数时波长灵敏度最大; 在耦合比为 100% 或 0 时,即 $\Delta\lambda/4$ 的偶数倍数时,波长灵敏度最小。熔锥型波分复用器、宽带耦合器就是利用这一原理制作的。在其他条件保持一致的情况下,那么 50% 耦合比的器件波长灵敏度优于 100% 耦合比的

波长灵敏度。我们研制的波长敏感光纤耦合器就是基于这一原理。

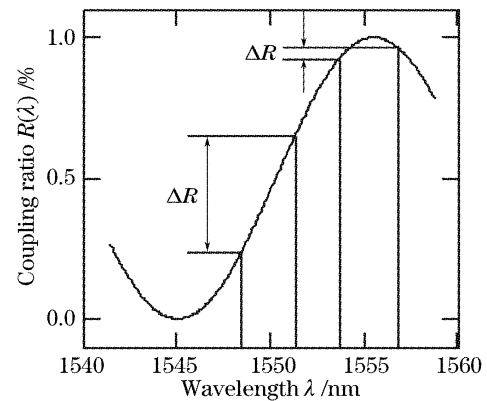


图 1 波长灵敏度与耦合比的关系图

Fig. 1 Relationship between wavelength sensitivity and coupling ratio

3 实 验

采用康宁 SMF-28 光纤,利用拉锥机熔融拉锥制作波长敏感光纤耦合器,设定实验参量: 初始位置 5000 μm , 拉锥速度 110 $\mu\text{m/s}$, 氢气流速 71% (0.18 MPa), 耦合周期级次为 150。理论上耦合周期的级次越大,耦合长度越大,耦合比的波长灵敏度最大值越大。但是实验中耦合周期级次增加同时会引起附加损耗加大; 而且随着耦合周期级次增加,耦合器尺寸变大,耦合区域光纤芯径变得很小,不利于器件的封装,因此耦合周期的级次要适当,选用 150, 能够获得一定的波长灵敏度、且附加损耗较小; 耦合比的选取参考实验原理中波长灵敏度最大值出现 3 dB 耦合处,也就是 50% 耦合。实验给出耦合比随波长变化曲线,如图 2 中“◇”所示,图 2 中实线为理论模拟的波长耦合比变化曲线。在 (1542 ~ 1582 nm) 范围内其耦合比随波长变化呈周期振荡,其周期大约为 20 nm,每一周期内耦合比由峰值(最

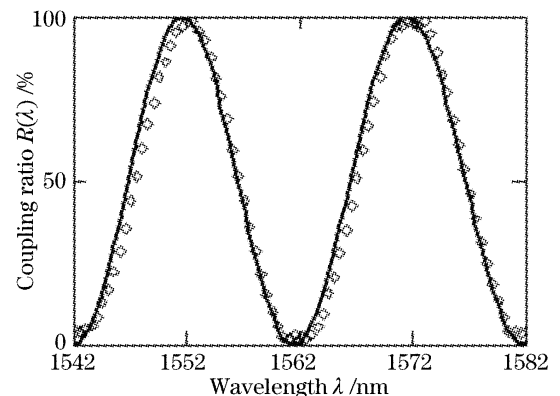


图 2 耦合比随波长变化曲线图

Fig. 2 Curve for coupling ratio versus wavelength

大)到谷值(最小)再到峰值(最大),在 1547 nm、1557 nm、1567 nm、1577 nm 波长处,斜率最值处波长灵敏度存在最大值;在 1567 nm 附近波长变化 10 nm 时耦合比由峰值(接近 98.97%)变化到谷值(接近 2.58%),计算耦合比波长曲线的斜率,得到最大波长灵敏度 17.86%/nm。与理论曲线图 2 中实线相一致。图 2 中实验数据是单一样品的结果,但样品制作的重复率很高,多次实验的结果基本一致。

图 2 中实验曲线表现出耦合比达不到 100%,如表 1 数据所示,给出了 1552 nm、1572 nm 附近的耦合比随波长的变化数据。应是发生了非对称耦合^[13],由于过耦合拉锥长度较大,光纤芯径较细,两根光纤的微小差别就会导致不对称比增大。实验中通过调节光纤打结点与火炬的相对位置来控制耦合比峰值对应波长,调节波长灵敏度最大值对应的波长。

表 1 部分实验数据

Table 1 Section of the experimental value

Wavelength λ /nm	Coupling ratio R /%	Wavelength λ /nm	Coupling ratio R /%
1551.0	95.32	1571.0	97.42
1551.5	97.37	1571.5	98.60
1552.0	98.68	1572.0	98.46
1552.5	98.92	1572.5	97.27
1553.0	95.52	1573.0	98.97

为实现对光纤布拉格光栅(布拉格波长为 1566.71 nm)的解调,制作了波长灵敏度最大值在 1567 nm 波长处的光纤耦合器。图 3 为该波长敏感耦合器的透射谱,图中 1 为入射宽带光源,2 为宽带光源经过波长敏感耦合器的透射谱,可见当波长发生变化时耦合器输出光功率呈现振荡输出,分别在 1563 nm、1567 nm 附近有最大的斜率,波长灵敏度有最大值,此耦合器可以解调具有中心波长对应这些值的光纤布拉格光栅。

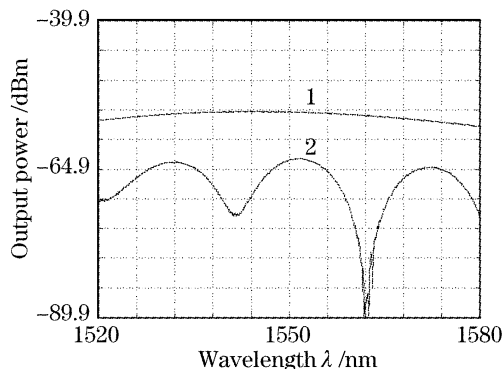


图 3 波长敏感光纤耦合器透射光谱图

Fig. 3 Transmission spectra of fiber coupler sensitive to wavelength

为验证波长敏感耦合器对光纤光栅波长漂移的解调功能,设计实验装置如图 4 所示。 C_1 为单模宽带耦合器(其工作带宽为 40 nm,中心波长为 1550 nm),波长平坦; C_2 为自行研制的波长敏感光纤耦合器。宽带光源(LED)发出的宽带光经过隔离器(ISO)、 C_1 后被光纤布拉格光栅反射,再次通过 C_1 到达 C_2 ,由 C_2 两端输出,探测器 D_1 、 D_2 探测后送入除法器(DIV)处理,得到耦合比。当光纤布拉格光栅反射的布拉格波长发生漂移时,除法器输出耦合比变化。图 4 中“☆”代表折射率匹配液,消除光纤端面反射。

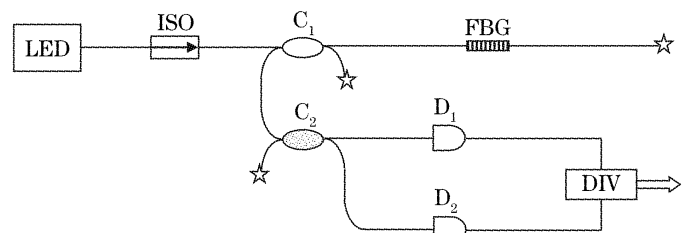


图 4 解调光纤光栅装置图

Fig. 4 Setup for fiber Bragg grating demodulation

调节光纤布拉格光栅布拉格反射波长,得到耦合比与波长变化关系如图 5 所示,图中“◇”为实验测量值,布拉格波长每次变化 0.10 nm,总计变化 1.80 nm,耦合比由 50.19%变化到 70.53%,平均波长灵敏度为 11.30%/nm。实验数据近似为一直线,分析实验数据偏离线性变化的原因:1) 波长敏感耦合器对波长响应的非线性;2) C_2 耦合器输出后两路光纤传输损耗不同。采用图 4 所示装置,对两路光输出功率做除法处理,消除了光源、以及传输过程中光功率不稳造成的影响,同时也可以避免振动造成的误差。

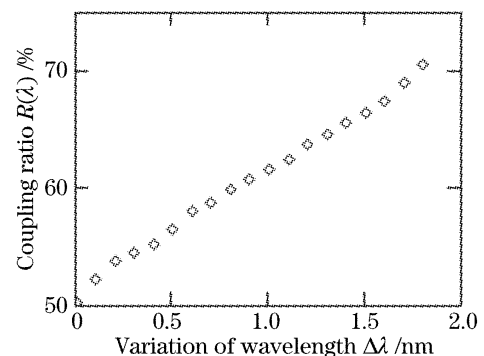


图 5 耦合器解调光纤光栅输出曲线

Fig. 5 Output curve for coupler demodulating FBG

4 结 论

利用过耦合理论,自行研制了熔锥型波长敏感

光纤耦合器,开发了光纤耦合器的新功能,在多个波长处具有波长敏感特性,耦合比峰值对应波长可控制,得到最大波长灵敏度 17.86%/nm;对布拉格波长为 1566.71 nm 的光纤布拉格光栅波长漂移进行了解调,解调范围达到 1.80 nm。采用两路光强除法处理,消除环境振动影响。此种解调方案用于光纤布拉格光栅数量较少的传感网络,方法简便,能够大幅度降低解调成本,可以用于大型建筑物如桥梁、大坝、石油平台等的健康监测。

参 考 文 献

- Zhan Yage, Cai Haiwen, Xiang Shiqing *et al.*. Study on high resolution fiber Bragg grating temperature sensor[J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(1): 83~86 (in Chinese)
詹亚歌,蔡海文,向世清等. 高分辨率光纤光栅温度传感器的研究[J]. 中国激光, 2005, **32**(1): 83~86
- Haiwei Fu, Junmei Fu, Xueguang Qiao. High sensitivity fiber Bragg grating pressure difference sensor[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(11): 621~623
- Yu Youlong, Geng Shunwei, Tam Hwayaw. A novel active fiber Bragg grating sensor system for monitoring mechanical vibration in real-time[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(3): 293~296 (in Chinese)
余有龙,耿淑伟,谭华耀. 用于机械振动实时监测的光纤光栅无源传感装置[J]. 光学学报, 2003, **23**(3): 293~296
- Liu Chunyu, Yu Youlong, Zhang Xinming *et al.*. Passive fiber Bragg grating sensor for the mechanical vibration monitoring based on cantilever beam tuning technology[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(9): 1067~1069 (in Chinese)
柳春郁,余有龙,张昕明等. 基于悬臂梁调谐技术的光纤光栅无源振动监测[J]. 光子学报, 2003, **32**(9): 1067~1069
- Li Dongsheng, Liang Dakai, Pan Xiaowen. Experimental study of fiber grating smart layer system based on fiber Bragg grating sensors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(9): 1166~1170 (in Chinese)
李东升,梁大开,潘晓文. 基于光纤布拉格光栅传感器的光纤光栅智能夹层试验研究[J]. 光学学报, 2005, **25**(9): 1166~1170
- Ou Jinping, Zhou Zhi, Wu Zhanjun *et al.*. Intelligent monitoring of Heilongjiang Hulan River bridge based on FBGs[J]. *China Civil Engineer J.*, 2004, **37**(1): 45~49 (in Chinese)
欧进萍,周智,武湛君等. 黑龙江呼兰河大桥的光纤光栅智能监测技术[J]. 土木工程学报, 2004, **37**(1): 45~49
- Zhou Zhi, Wu Zhanjun, Zhao Xuefeng *et al.*. Smart monitoring technique of concrete structures based on optical fiber Bragg grating sensors[J]. *J. Functional Materials*, 2003, **34**(3): 344~348 (in Chinese)
周智,武湛君,赵雪峰等. 混凝土结构的光纤光栅智能监测技术[J]. 功能材料, 2003, **34**(3): 344~348
- Yu Youlong, Tam Hwayaw, Chung Wenghong. A fiber Bragg grating sensor system with interferometric demodulation technique[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(8): 987~989 (in Chinese)
余有龙,谭华耀,锤永康. 基于干涉解调技术的光纤光栅传感系统[J]. 光学学报, 2001, **21**(8): 987~989
- Jiang Yi, Chen Shufen. Direct demodulation for signal from fiber grating sensors by interferometer based on 3×3 coupler[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(11): 1487~1490 (in Chinese)
江毅,陈淑芬. 用 3×3 耦合器的干涉仪直接解调光纤光栅传感器的信号[J]. 光学学报, 2004, **24**(11): 1487~1490
- Huang Chong, Cai Haiwen, Gen Jianxin *et al.*. Wavelength interrogation based on a Mach-Zehnder interferometer with a 3×3 fiber coupler for fiber Bragg grating sensors[J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(10): 1397~1400 (in Chinese)
黄冲,蔡海文,耿健新等. 基于 3×3 耦合器的马赫-曾德尔干涉仪的光纤光栅波长解调技术[J]. 中国激光, 2005, **32**(10): 1397~1400
- Gu Bingsheng. Study on wide band characteristic of fused fiber couplers[J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(5): 610~615 (in Chinese)
顾炳生. 熔锥型光纤耦合器宽带特性研究[J]. 光学学报, 1995, **15**(5): 610~615
- D. B. Mortimore. Wavelength-flattened fused coupler [J]. *Electron. Lett.*, 1985, **21**(17): 742~743
- Liu Chunyu, Yu Youlong, Gao Yingjun. The combining of beams between single-mode and multimode fibers in fused coupler [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(6): 743~745 (in Chinese)
柳春郁,余有龙,高应俊. 单模与多模光纤耦合器的光束合波[J]. 光学学报, 2005, **25**(6): 743~745