

# 一种新型光纤光栅温度传感特性的实验研究

杨秀峰<sup>1,2</sup> 张春雨<sup>1,2</sup> 童峥嵘<sup>1,2</sup> 曹 晔<sup>1,2</sup> 杨寅飞<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 天津理工大学计算机与通信工程学院通信器件教育部工程研究中心, 天津 300384)  
<sup>2</sup> 天津理工大学薄膜电子与通信器件天津市重点实验室, 天津 300384)

**摘要** 研制出一种具有微结构缺陷的新型光纤光栅, 并对其温度特性进行了实验研究。该光栅是利用不同浓度的氢氟酸溶液对光纤布拉格光栅进行选择刻蚀得到的, 刻蚀区域改变了光纤的局部有效折射率, 引入附加相移从而形成两个谐振峰。实验研究结果表明该新型光栅具有不同的温度灵敏系数, 在 20 °C ~ 90 °C 的温度范围内, 随温度升高两谐振峰波长分别向长波方向移动了 0.8127 nm 和 0.7329 nm, 其温度灵敏系数分别为 0.01161 nm/°C 和 0.01047 nm/°C, 线性拟合度分别为 0.991 和 0.998, 新型光纤光栅两谐振峰随温度的变化呈现良好的线性关系。

**关键词** 光纤光学; 新型光纤光栅; 双参量; 刻蚀; 温度

**中图分类号** TN253; TP212.14 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0405005

## Experimental Research of Temperature Sensing Properties of a Novel Fiber Grating

Yang Xiufeng<sup>1,2</sup> Zhang Chunyu<sup>1,2</sup> Tong Zhengrong<sup>1,2</sup> Cao Ye<sup>1,2</sup> Yang Yinfei<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> Engineering Research Center of Communication Devices, Ministry of Education, School of Computer and Communication Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China  
<sup>2</sup> Tianjin Key Laboratory of Film Electronic and Communication Device, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

**Abstract** A novel fiber Bragg grating with micro-structured defect is proposed and demonstrated. Its temperature characteristics are studied experimentally. It was obtained by wet chemical etching part of fiber Bragg grating in different concentrations of hydrofluoric acid solutions. The change of the local effective refractive index in the etched area induces two resonant peaks. Experimental results show that the two resonant peaks have different temperature sensitive coefficients. The wavelengths of the two resonant peaks become 0.8127 nm and 0.7329 nm longer while the temperature increases from 20 °C to 90 °C, and the temperature sensitive coefficients are 0.01161 nm/°C and 0.01047 nm/°C respectively. The fitting linearity is 0.991 and 0.998 respectively. So the two resonant peaks of novel fiber grating present good linear relationship with temperature.

**Key words** fiber optics; novel fiber grating; double parameters; etch; temperature

**OCIS codes** 060.2270; 060.2280; 060.2370; 060.2390; 350.3950

## 1 引 言

光纤布拉格光栅(FBG)是 20 世纪 90 年代以来新兴的一种最有前途的无源传感器件之一, 因其具有体积小、插入损耗低、灵敏度高、抗干扰能力强、易与光纤耦合且耦合损耗小等诸多优点<sup>[1~4]</sup>, 在光通信和传感领域有重要的应用价值。FBG 的波长随温度、应力、应变等物理量的变化而移动, 而波长随温度的变化是最主要和最直接的应用之一<sup>[5~8]</sup>。温

度影响光纤光栅透射波长是由热膨胀效应和热光效应引起的。

随着对多功能光栅需求的不断增加, 人们的关注主要集中于如何提升已有的技术, 并在已有研究基础上引入更多新设备和新器件, 尤其是在微结构光纤(MOFs)上发展新型光学器件的研究越来越受到人们的关注。1999 年, Eggleton 等<sup>[9]</sup>制造了第一根微结构光纤光栅(MSFBG), 其制作方法是

收稿日期: 2010-12-14; 收到修改稿日期: 2011-01-09

基金项目: 天津市自然科学基金(08JCYBJC14400)资助课题。

作者简介: 杨秀峰(1964—), 女, 博士, 教授, 主要从事光纤通信方面的研究。E-mail: yangxfbee@163.com

242 nm的激光在一根具有六边形周期空气孔晶格的掺锗微结构光纤芯径上进行刻写。A. Iadicicco等<sup>[10,11]</sup>于2005年成功地制备出第一根具有微结构缺陷的光纤光栅,其基本原理是在光纤布拉格光栅的包层中引入凹槽,即缺陷。目前,微结构光纤光栅凭借其独特的传感优势已广泛应用于生物化学、微流体研究和医药化学等领域,成为科学界广泛研究的对象<sup>[12~16]</sup>。

本文使用两种浓度的氢氟酸溶液选择性刻蚀普通光纤布拉格光栅得到一种新型光纤光栅,由于包层直径发生突变,光纤光栅的有效折射率也会随之变化,因此导致相位延迟使缺陷态向长波长方向漂移,使其由原来的一段光栅变成折射率不同的两段光栅,出现两个谐振峰,通过实验观测两个谐振峰波长随温度的变化。

## 2 原 理

FBG的中心波长 $\lambda_B$ 满足

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda, \quad (1)$$

式中 $n_{\text{eff}}$ 为FBG的有效折射率; $\Lambda$ 为FBG的周期。则有

$$\Delta\lambda_B = K_T\lambda_B\Delta T, \quad (2)$$

式中 $K_T$ 为FBG的温度灵敏系数,即FBG波长的漂移与温度的变化成线性关系。

刻蚀的主要目的是形成缺陷态,被刻蚀部分的光纤光栅两端包层直径减小,因而周围介质折射率的变化导致有效折射率的突变,从而导致光纤布拉格光栅的波长移动,形成法布里-珀罗(F-P)腔效应。选择性刻蚀会引起相变,这个过程可以看作是在光纤布拉格光栅的刻蚀区域内引入一个相位延迟。因此相移量 $\Delta\phi$ 为

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda}\Delta n_{\text{eff}}L_{\text{Th}}, \quad (3)$$

式中 $\lambda$ 为工作波长, $\Delta n_{\text{eff}}$ 的大小与刻蚀后的包层直径 $D_{\text{Th}}$ 和周围介质折射率有关, $L_{\text{Th}}$ 为光纤光栅被刻蚀区域的长度。

根据传输矩阵法,相位变化可用传输矩阵 $\mathbf{F}_\phi$ 表示

$$\mathbf{F}_\phi = \begin{pmatrix} \exp(-i\phi/2) & 0 \\ 0 & \exp(i\phi/2) \end{pmatrix}, \quad (4)$$

采用传输矩阵级联的方法推导出新型光纤光栅的传输函数为

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_1\mathbf{F}_\phi\mathbf{F}_2 = \begin{pmatrix} F_{11} & F_{12} \\ F_{21} & F_{22} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

式中 $\mathbf{F}_1, \mathbf{F}_2$ 为未被刻蚀的光纤光栅的传输矩阵,可表示为

$$\mathbf{F}_k = \begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{pmatrix}_k, \quad (6)$$

其中各矩阵元可表示为

$$\begin{cases} T_{11} = \cosh(q\delta L_k) - i\frac{\zeta^+}{q}\sinh(q\delta L_k) \\ T_{22} = \cosh(q\delta L_k) + i\frac{\zeta^+}{q}\sinh(q\delta L_k) \\ T_{21} = i\frac{\kappa}{q}\sinh(q\delta L_k) \\ T_{12} = -i\frac{\kappa}{q}\sinh(q\delta L_k) \end{cases}, \quad (7)$$

式中 $\delta L_k$ 为第 $k$ 个小光栅的长度, $\zeta^+$ 和 $\kappa$ 为光栅的耦合系数, $q = \sqrt{\kappa^2 - \zeta^{+2}}$ 。将边界条件代入就可以得到整个新型光纤光栅的光谱特性,此时该光栅的反射特性 $R$ 和透射特性 $T$ 可分别表示为

$$R = |F_{21}/F_{22}|^2, \quad T = 1 - R. \quad (8)$$

## 3 实验结果

### 3.1 新型光纤光栅的制作

新型光纤光栅是通过对比包层直径为125  $\mu\text{m}$ 的普通布拉格光纤光栅化学刻蚀得到的。将FBG与宽带光源(BBS)和光谱分析仪(OSA)连接,如图1所示,其中OSA的分辨率为0.07 nm,FBG中心为被腐蚀栅区,两边为未被腐蚀栅区。

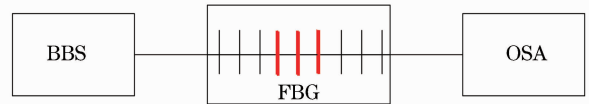


图1 实验装置

Fig. 1 Experimental setup

实验所用光栅的栅区为10 mm,通过电烙铁可确定光栅的栅区。确定栅区的位置后,首先抽取体积分数为30%的氢氟酸溶液刻蚀栅区中心位置大约4 mm,10 min后光纤光栅的包层被氢氟酸溶液刻蚀掉一部分,包层直径变小;由于高浓度溶液刻蚀速度比较快,所以改用体积分数为10%的氢氟酸溶液代替以减缓刻蚀的速度,这样可以保护纤芯;边记录刻蚀的时间边观测OSA上透射谱的变化来控制刻蚀的情况;经过40 min刻蚀得到新型光纤光栅。室温下测得新型光纤光栅两谐振峰所对应的中心波长分别为1546.8202 nm和1547.0512 nm,波长差为0.2310 nm,其透射谱如图2曲线a所示。

选择另一根光纤光栅,其中心波长和透射谱与

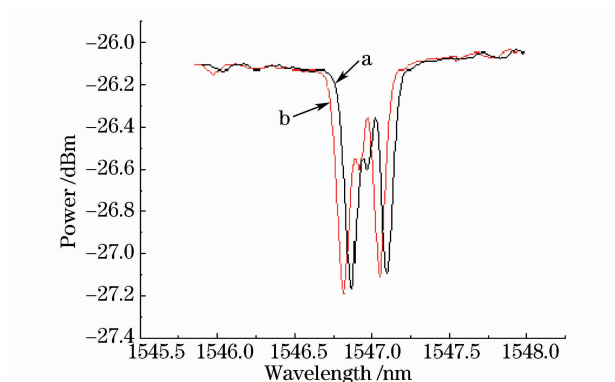


图2 新型光纤光栅的透射谱

Fig. 2 Transmission spectra of novel fiber grating

第1根光纤光栅基本相同。使用氢氟酸溶液对其刻蚀,刻蚀方法和步骤、氢氟酸溶液浓度及刻蚀时间等都与第1根光纤光栅相同,50 min后得到第2根新型光纤光栅。此新型光纤光栅两谐振峰中心波长分别为1546.7732 nm和1547.0062 nm,波长差为0.2330 nm。其透射谱如图2曲线b所示,从图中可以看出,对初始透射谱相近的光纤光栅,在酸的浓度、刻蚀时间都相同的情况下,所得到的最终光栅光谱是基本一致的。

由于实验环境和刻蚀条件的不稳定性造成刻蚀不均匀导致两谐振峰之间产生一个次级峰,改善刻蚀条件和实验环境将会消除次级峰。

### 3.2 新型光纤光栅的温度响应性能分析

实验装置包括宽带光源、光谱分析仪、温控箱、新型光纤光栅,使用温控箱加热新型光纤光栅,测量温度在20℃~90℃范围内,每隔5℃记录一次数据。在20℃~90℃的温度范围内,第1根新型光纤光栅的两个谐振峰波长随温度的变化曲线如图3所示。

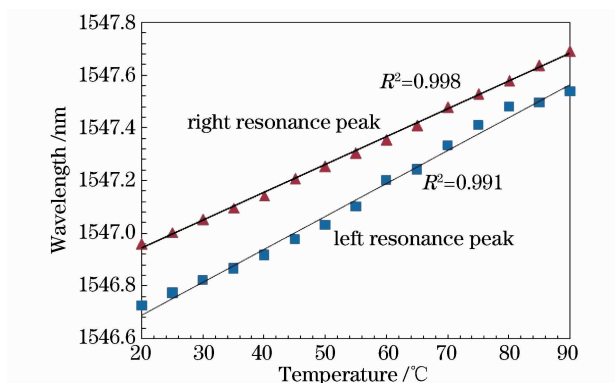


图3 温度响应曲线

Fig. 3 Temperature response curves

由图可以看出,两谐振峰的波长随着温度的增加都向长波方向移动,分别移动了0.8127 nm和

0.7329 nm。温度灵敏系数分别为0.01161 nm/℃和0.01047 nm/℃。新型光纤光栅两个谐振峰波长的线性拟合度 $e^2$ 分别为0.991和0.998,都与温度有良好的线性关系。由于此种光栅的两个谐振峰波长具有不同的温度灵敏系数,故可用其进行双参量(温度和折射率或者温度和应变等)的测量。

## 4 结 论

通过两种浓度的氢氟酸溶液选择性刻蚀光纤布拉格光栅制作出一种具有两个谐振峰的新型光纤光栅,并对其温度特性进行了实验研究。两个谐振峰的温度灵敏系数分别为0.01161 nm/℃和0.01047 nm/℃,线性拟合度分别为0.991和0.998,因此新型光纤光栅两谐振峰波长随温度的变化呈现良好的线性关系。所研制的新型光纤光栅具有体积小、制作过程简单、可靠、成本低和灵活性等优点,在双参量测量领域有很好的应用前景。

## 参 考 文 献

- Zhang Hongjie, Deng Fanping, Xiao Jian *et al.*. Study on temperature response of fiber Bragg grating at liquid helium temperature [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2008, **19**(5):581~583
- 张红洁,邓凡平,肖剑等. 光纤Bragg光栅液氦环境下温度传感特性的研究[J]. *光电子·激光*, 2008, **19**(5):581~583
- J. F. Botero-Cadavid, J. D. Causado-Buelvas, P. Torres. Spectral properties of locally pressed fiber Bragg gratings written in polarization maintaining fibers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2010, **28**(9):1291~1297
- Ke Wen, Rong Wang, Min Wang *et al.*. A new temperature sensor based on fiber Bragg grating in photonic crystal fibers [C]. *International Conference on Communication Systems*, 2008. 1218~1221
- Qiao Xueguang, Jia Zhen'an, Fu Haiwei *et al.*. Theory and experiment about in-fiber Bragg grating temperature sensing [J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(2):494~497
- 乔学光,贾振安,傅海威等. 光纤光栅温度传感理论与实验[J]. *物理学报*, 2004, **53**(2):494~497
- Li Xuejin, Yu Yongqin, Hong Xueming *et al.*. Analysis on temperature sensing properties of photonic crystal fiber based on liquid filling [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(5):1140~1144
- 李学金,于永芹,洪学明等. 基于液体填充的光子晶体光纤温度传感特性分析[J]. *中国激光*, 2009, **36**(5):1140~1144
- Ning Tigang, Qin Xi, Pei Li *et al.*. A novel way to measure the temperature characteristic of polarization-maintaining fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(8):1078~1080
- 宁提纲,秦曦,裴丽等. 新型保偏光纤温度特性的测试方法[J]. *中国激光*, 2006, **33**(8):1078~1080
- Zheng Buxiang, Song Yonglun, Zhang Dongsheng *et al.*. Experimental study on temperature and strain sensing characteristics of fiber Bragg grating [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2008, (11):12~15,23
- 郑卜祥,宋永伦,张东生等. 光纤Bragg光栅温度和应变传感特性的试验研究[J]. *仪表技术与传感器*, 2008, (11):12~15,23
- Zhang Zhulin, Yang Zhenkun, Wu Huihua *et al.*. Temperature

- and strain-sensed researches of double fiber Bragg gratings [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2004, **38**(6):607~610  
张祝林,杨振坤,伍辉华等. 双光纤布拉格光栅温度和应变传感研究[J]. 西安交通大学学报, 2004, **38**(6):607~610
- 9 B. J. Eggleton, P. S. Westbrook, R. S. Windeler *et al.*. Grating resonances in air-silica micro-structured optical fibers [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(21):1460~1462
- 10 A. Iadicicco, A. Cusano, S. Campopiano *et al.*. Refractive index sensor based on micro-structured fiber Bragg grating [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(5):1250~1252
- 11 A. Cusano, A. Iadicicco, D. Paladino *et al.*. Micro-structured fiber Bragg gratings. Part I : Spectral characteristics [J]. *Opt. Fiber Technol.*, 2007, **13**(4):281~290
- 12 A. Cusano, A. Iadicicco, D. Paladino *et al.*. Micro-structured fiber Bragg gratings. Part II : Towards advanced photonic devices [J]. *Opt. Fiber Technol.*, 2007, **13**(4):291~301
- 13 Agostino Iadicicco, Andrea Cusano, Stefania Campopiano *et al.*. Thinned fiber Bragg gratings as refractive index sensors [J]. *IEEE Sens. J.*, 2005, **5**(6):1288~1295
- 14 Marco Pisco, Agostino Iadicicco, Stefania Campopiano *et al.*. Structured chirped fiber Bragg gratings [J]. *J. Technol.*, 2008, **26**(12):1613~1625
- 15 Zhao Yu, Jin Yongxing, Dong Xinyong *et al.*. Experimental studies of multimode interference based fiber optic refractive index sensors [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6):1516~1519  
赵宇,金永兴,董新永等. 基于多模干涉的光纤折射率传感器的实验研究[J]. 中国激光, 2010, **37**(6):1516~1519
- 16 Jin Yongxing, Dong Xinyong, Gong Huaping *et al.*. Refractive-index sensor based on tilted fiber Bragg grating interacting with multimode fiber [J]. *Microwave Opt. Technol. Lett.*, 2010, **52**(6):1375~1377