

# 小区域腐蚀的长周期光纤光栅迈克耳孙干涉仪 传感特性研究

何如双<sup>1</sup> 张斌<sup>1</sup> 陶卫东<sup>1</sup> 颜飞彪<sup>1</sup> 段天臣<sup>2</sup> 董建峰<sup>3</sup>

<sup>1</sup>宁波大学理学院微电子科学与工程系和光学研究所, 浙江 宁波 315211

<sup>2</sup>宁波大学材料科学与化学工程学院, 浙江 宁波 315211

<sup>3</sup>宁波大学信息学院, 浙江 宁波 315211

**摘要** 基于尾纤端面镀金属反膜的单根长周期光纤光栅,提出了一种包层部分腐蚀的长周期光纤光栅迈克耳孙干涉仪结构,提高了长周期光纤光栅(LPFG)的灵敏度。应用干涉原理,得出了长周期光纤光栅迈克耳孙干涉仪干涉波峰随外界环境折射率的变化关系。并从实验上对腐蚀前的长周期光纤光栅迈克耳孙干涉仪和带腐蚀结构的长周期光纤光栅迈克耳孙干涉仪的折射率传感灵敏度进行对比。结果表明,包层部分腐蚀的长周期光纤光栅迈克耳孙干涉仪反射谱中的干涉峰值对折射率传感的灵敏度得到了显著的提高,对于折射率为1.333和1.352的液体,干涉峰值的移动量从0.9 nm增加到3.4 nm。

**关键词** 光纤光学;长周期光纤光栅;传感;腐蚀;灵敏度

中图分类号 O438 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.080604

## Research on Sensing Characteristic of a Micro-Region Etched Long-Period Fiber Grating Michelson Interferometer

He Rushuang<sup>1</sup> Zhang Bin<sup>1</sup> Tao Weidong<sup>1</sup> Yan Feibiao<sup>1</sup> Duan Tianchen<sup>2</sup>  
Dong Jianfeng<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Microelectric Science and Engineering, Institute of Optics, Faculty of Science,  
Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China

<sup>2</sup>Faculty of Materials Science and Chemical Engineering, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China

<sup>3</sup>Faculty of Information Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China

**Abstract** Based on a single long period fiber grating (LPFG) with optical fiber pigtail coated with high-reflective film, a LPFG Michelson interferometer with partly etched fiber cladding LPFG is designed. It improves the LPFG sensitivity. By applying interference principle, the change of interference peaks along with environment refractive index is obtained. The refractive index sensitivity of no etched LPFG Michelson interferometer is compared with that of the etched LPFG Michelson interferometer, results show that the change of the refractive index sensitivity is significantly improved. The peak wavelength of interferometer shifts from 0.9 nm to 3.4 nm when liquid refractive index is 1.333 and 1.352.

**Key words** fiber optics; long-period fiber grating; sensing; etch; sensitivity

**OCIS codes** 060.2370 ; 060.3738 ; 060.4510

## 1 引言

近年来,随着微纳加工技术的快速发展,光纤光栅传感器正朝着灵敏、精确、适应性强、小巧和智能化的方向发展<sup>[1-3]</sup>。光纤光栅传感器主要分为长周期光纤光栅(LPFG)和布拉格光纤光栅(FBG)传感器,其中长周期光纤光栅对外界环境有着更高的灵敏度<sup>[4-6]</sup>。但是长周期光纤光栅传感器的透射谱谐振波峰宽度较大,一

收稿日期: 2014-01-15; 收到修改稿日期: 2014-03-03; 网络出版日期: 2014-07-02

基金项目: 国家自然科学基金(61078060)、浙江省重中之重学科开放基金(XKZWL05)

作者简介: 何如双(1989—),男,硕士研究生,主要从事光纤光栅传感方面的研究。E-mail: rshuanghe@sina.cn

导师简介: 陶卫东(1969—),男,博士,教授,主要从事光纤光栅技术和飞秒激光双光子微加工等方面的研究。

E-mail: taoweidong@nbu.edu.cn(通信联系人)

一般为30~100 nm,严重限制其精度和应用。1998年,Gu等<sup>[7]</sup>发现,把两个完全相同的长周期光纤光栅串联,在光纤光栅的每个谐振峰内将会因纤芯模和包层模间耦合产生马赫-曾德尔(M-Z)干涉效应而出现很多的小谐振峰,有效地提高了器件透射谱的读取精度。而长周期光纤光栅迈克耳孙干涉仪(LPFG-Michelson)通过在长周期光纤光栅一端尾纤上镀金属反射镜,达到了类似级联长周期光纤光栅的效果<sup>[8]</sup>。由于其是单端口传感器件,这就使得长周期光纤光栅迈克耳孙干涉仪成为一种十分具有前景的传感器<sup>[9]</sup>。随着学科交叉的深入,长周期光纤光栅迈克耳孙干涉仪在生物传感上的优势日益明显<sup>[10]</sup>,对长周期光纤光栅迈克耳孙干涉仪的灵敏度和结构要求也逐渐提高<sup>[11-13]</sup>。所以,本文利用氢氟酸对光纤制作出了一种小区域、高灵敏度的长周期光纤光栅迈克耳孙干涉仪,并从实验上测试了腐蚀前后长周期光纤光栅迈克耳孙干涉仪对折射率传感灵敏度的变化。

## 2 器件制备

### 2.1 LPFG-Michelson干涉仪的制作

这里的长周期光纤光栅是采用自行搭建的LPFG刻蚀系统,用准分子激光器(ATLEX-300SL)作为光源,通过掩模板在载氢光纤上刻写出来的。然后,取一长度约为5 cm的光纤,去除涂覆层后将端面切平整,采用磁控溅射的方法在其端面上镀一层厚为数百纳米的Ag膜。最后,将端面镀膜的光纤焊接到长周期光纤光栅上,构成了长周期光纤光栅迈克耳孙干涉仪。实验中对长周期光纤光栅迈克耳孙干涉仪局部进行了腐蚀,腐蚀后的结构模型如图1所示,长周期光纤光栅后面有一长度为 $D$ 的尾纤,其中 $L_1$ 段的部分光纤包层被腐蚀, $L_2$ 段完好。纤芯的半径为 $a_0$ ,腐蚀前后的包层半径分别为 $b_1$ 和 $b_2$ 。

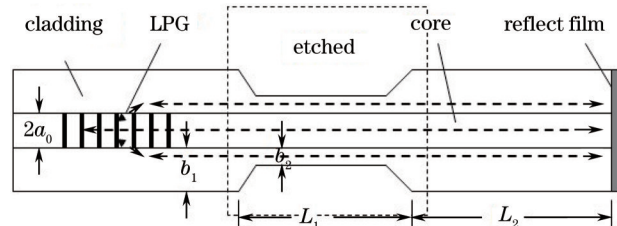


图1 腐蚀长周期光纤光栅迈克耳孙干涉仪的结构模型

Fig.1 Structural model of etched LPFG-Michelson interferometer

### 2.2 腐 蚀

为制备如图1所示的长周期光纤光栅迈克耳孙干涉仪,可以利用三层溶液法,腐蚀装置如图2所示。装置中,使用宽带光源作为光源,光信号在长周期光纤光栅迈克耳孙干涉仪上反射回来之后,再通过光纤环形器进入光谱仪(Yokogawa AQ6370)。通过光谱仪上光谱的变化,可以实时监测腐蚀情况。

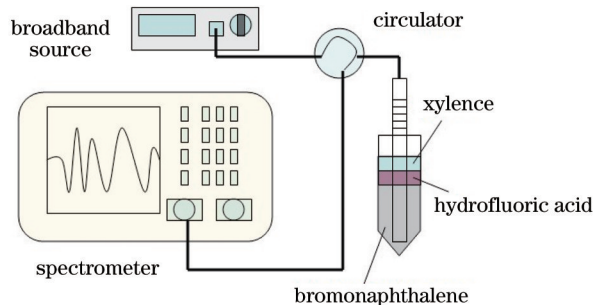


图2 腐蚀试验装置

Fig.2 Experimental setup for etching process

参考液体的密度以及溶解性,可选用体积分数为40%的氢氟酸(HF)做腐蚀液,用溴代萘保护反射端面及部分尾纤,用二甲苯覆盖氢氟酸,防止腐蚀液液面因挥发而下降。腐蚀开始时,将长周期光纤光栅迈克耳孙干涉仪插入图2所示的腐蚀装置中,依次往装置中添加溴代萘、氢氟酸和二甲苯,其中氢氟酸的高度为6 mm。腐蚀15 min后,将光纤取出后插入无水乙醇中清洗。腐蚀后的长周期光纤光栅迈克耳孙干涉仪的局部如图3所示。

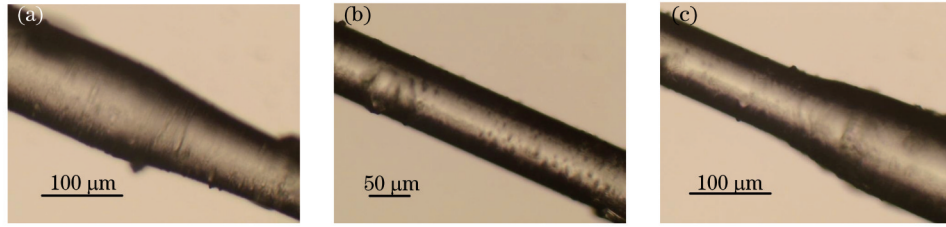


图3 腐蚀后的长周期光纤光栅迈克耳孙干涉仪局部照

Fig.3 Microphoto of etched LPFG Michelson interferometer

### 3 理论分析

对于长周期光纤光栅迈克耳孙干涉仪,入射光经过长周期光纤光栅时一部分被耦合到包层中传播,一部分继续沿纤芯传播。当两束光传播到尾纤之后,遇到端面高反膜又被反射回来再次经过长周期光纤光栅,包层中的光被重新耦合到纤芯中传播,与纤芯中被反射回来的光发生干涉,根据文献[14]可得出其两束光的相位差为

$$\Psi = 2\Phi_{\text{LPFG}}(\lambda, L) - 2[\beta_{\text{co}}(\lambda) - \beta_{\text{cl}}(\lambda)]D, \quad (1)$$

式中  $\beta_{\text{co}}$ 、 $\beta_{\text{cl}}$  分别是光纤纤芯模传播常数和包层模传播常数,  $D$  是指 LPFG 离反射端面的距离。且根据文献[15],反射谱中所形成的干涉条纹的宽度可表示为

$$S = \frac{\pi}{d\Phi_{\text{LPFG}}/d\lambda - D[d(\beta_{\text{co}} - \beta_{\text{cl}})/d\lambda]}. \quad (2)$$

式中  $S$  代表干涉谱线两个吸收谷之间的间距。可以想象,只有当  $\Psi = 2\pi$  的时候,才会出现吸收谷,即  $S$  表示  $\Psi$  变化  $2\pi$  时,吸收谷的移动距离;且在外界环境恒定的情况下,纤芯模的传播常数不随外界环境折射率的变化而变化,所以,干涉波峰的移动可表示为

$$\Delta\lambda = \frac{\Delta\Psi}{2\pi} S. \quad (3)$$

由(2)式可知  $\Phi_{\text{LPFG}}$  的取值范围为  $-2/\pi \sim 2/\pi$ , 远小于  $(\beta_{\text{co}} - \beta_{\text{cl}})D$ , 且一般纤芯模传播常数又不随外界环境折射率变化,所以反射光谱波长随外界环境折射率的变化可以近似表达为

$$\Delta\lambda \approx \frac{\Delta\beta_{\text{cl}}}{d(\beta_{\text{co}} - \beta_{\text{cl}})/d\lambda}. \quad (4)$$

根据(4)式,可以给出长周期光纤光栅迈克耳孙干涉仪波长移动随外界环境折射率变化关系的理论值。经计算得到反射光谱波长与外界环境折射率和光纤包层半径的关系,外界环境的折射率越大,或光纤包层半径越小,峰值会向短波长方向移动得越明显,如图4所示。

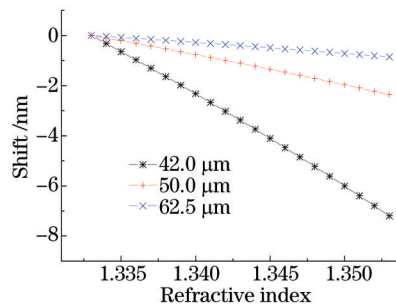


图4 不同包层半径 LPFG-M 干涉仪的波长移动与外界折射率的变化关系

Fig.4 Wavelength shift of different cladding radii of LPFG-M with ambient refractive index change

### 4 实验与结果讨论

实验中,制备的长周期光纤光栅迈克耳孙干涉仪反射谱如图5中的 Michelson 曲线所示。依据 2.2 节中的方法腐蚀,得到长周期光纤光栅迈克耳孙干涉仪的反射谱如图5所示的腐蚀曲线。

为了检验腐蚀前后长周期光纤光栅迈克耳孙干涉仪对折射率灵敏度是否有变化,可以利用如图6所示



## 6 结 论

制作了一种新型的长周期光纤光栅迈克耳孙干涉仪,由于部分包层的直径减少,包层模式耦合到外界环境中,故而有效地提高了长周期光纤光栅迈克耳孙干涉仪对外界环境折射率变化的灵敏度,且可以避免包层模被大量耦合到外界环境中而使干涉波峰消失。因此,这种既能提高灵敏度,又能减少其损耗和谐振波峰移动的长周期光纤光栅迈克耳孙干涉仪是十分有研究意义的。

### 参 考 文 献

- 1 Gu Z, Lan J, Chen H, *et al.*. Characteristics and design of coated LPPFG sensor based on mode transition[C]. Vancouver: 2013 13th International Conference on Numerical Simulation of Optoelectronic Devices (NUSOD), 2013. 51-52.
- 2 Yang J, Huang J, Li X, *et al.*. High-sensitivity long-period fiber grating sensor with SAN/cryptophane A for coal mine gas detection[J]. *Chin Opt Lett*, 2013, 11(8): 080601.
- 3 Chen H, Gu Z. Design of a gas sensor based on a cladding-reduced long period fiber grating coated with a sensitive film [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2013, 124(3): 219-224.
- 4 Zeng X, Wei L. Fast analyses and designs of long-period fiber grating devices with cosine-class apodizations by using Fourier mode coupling theory[J]. *Appl Opt*, 2013, 52(31): 7609-7617.
- 5 Pilla P, Trono C, Baldini F, *et al.*. Giant sensitivity of long period gratings in transition mode near the dispersion turning point: an integrated design approach[J]. *Opt Lett*, 2012, 37(19): 4152-4154.
- 6 Wang Jieyu, Tong Zhengrong, Yang Xiufeng, *et al.*. Simultaneous measurement of temperature and refraction index based on multimode interference and long-period fiber grating[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(9): 0905003.  
王洁玉, 童峥嵘, 杨秀峰, 等. 基于多模干涉和长周期光纤光栅的温度及折射率同时测量[J]. *中国激光*, 2012, 39(9): 0905003.
- 7 Gu X J. Wavelength-division multiplexing isolation fiber filter and light source using cascaded long-period fiber gratings[J]. *Opt Lett*, 1998, 23(7): 509-510.
- 8 He Huiling, Qu Ronghui, Gao Kan, *et al.*. Single long-period grating based on Michelson interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(12): 1693-1696.  
何慧灵, 瞿荣辉, 高侃, 等. 单长周期光栅迈克耳孙干涉仪特性研究[J]. *光学学报*, 2005, 25(12): 1693-1696.
- 9 Zhao Hongxia, Cheng Peihong, Bao Jilong, *et al.*. Research on spectral characteristic of a semi-etched long-period fiber grating[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(12): 1205005.  
赵洪霞, 程培红, 鲍吉龙, 等. 半腐蚀长周期光纤光栅光谱特性研究[J]. *中国激光*, 2012, 39(12): 1205005.
- 10 Carrasquilla C, Xiao Y, Xu C Q, *et al.*. Enhancing sensitivity and selectivity of long-period grating sensors using structure-switching aptamers bound to gold-doped macroporous silica coatings[J]. *Analytical Chemistry*, 2011, 83(20): 7984-7991.
- 11 Yang Zhangcheng, Xu Hanfeng, Dong Xinyong. Research development of high-temperature resistant fiber gratings[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(5): 050003.  
杨章成, 徐汉峰, 董新永. 高温光纤光栅的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(5): 050003.
- 12 Jang H S, Park K N, Kim J P, *et al.*. Sensitive DNA biosensor based on a long-period grating formed on the side-polished fiber surface[J]. *Opt Express*, 2009, 17(5): 3855-3860.
- 13 Akowuah E K, Gorman T, Ademgil H, *et al.*. Numerical analysis of a photonic crystal fiber for biosensing applications [J]. *IEEE J Quantum Electronics*, 2012, 48(11): 1403-1410.
- 14 Kim D W, Zhang Y, Cooper K L, *et al.*. In-fiber reflection mode interferometer based on a long-period grating for external refractive-index measurement[J]. *Appl Opt*, 2005, 44(26): 5368-5373.
- 15 Lee B H, Nishii J. Dependence of fringe spacing on the grating separation in a long-period fiber grating pair[J]. *Appl Opt*, 1999, 38(16): 3450-3459.