

文章编号: 0258-7025(2009)05-1134-06

# 基于侧边抛磨光纤光栅双反射峰的折射率传感器

范若岩<sup>1,2</sup> 陈 哲<sup>1,2</sup> 刘林和<sup>2</sup> 肖雅婷<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup>暨南大学“重大工程灾害与控制”教育部重点实验室, 广东 广州 510630; <sup>2</sup>暨南大学光电工程系, 广东 广州 510630)

**摘要** 介绍了一种利用具有双布拉格反射峰效应的侧边抛磨光纤光栅(SPFBG)进行折射率测量的新型光纤折射率传感器。该传感器基于由轮式侧边抛磨法加工而成的侧边抛磨光纤光栅,通过将折射率液覆盖一部分抛磨区的方法在一根光纤光栅上获得两个布拉格反射峰。这两个布拉格反射峰差值与覆盖材料折射率有关,而与光纤光栅所受应力与环境温度无关,因此用这两个布拉格反射峰差值作为测量量对折射率测量,可减小应力与环境温度的影响,实现高精度的折射率传感测量。实验表明,当维持环境温度恒定时,光纤光栅轴向应变在线性变化范围内,该传感器测量折射率时不受应力与温度变化的影响。折射率液在 1.4298~1.4479 范围内,该传感器的折射率测量分辨率为 0.0001。

**关键词** 传感器; 光纤光栅; 侧边抛磨; 反射峰; 光纤传感器; 折射率

**中图分类号** TN253; TP212.14 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093605.1134

## Optical Fiber Refractive Sensor with Double Reflective Wavelengths Based on Side Polished Fiber Bragg Grating

Fan Ruoyan<sup>1,2</sup> Chen Zhe<sup>1,2</sup> Liu Linhe<sup>2</sup> Xiao Yating<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Disaster Forecast and Control in Engineering, Ministry of Education, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510630, China  
<sup>2</sup>Department of Opto-Electron Engineering, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510630, China

**Abstract** A novel optical fiber refractive sensor is proposed and demonstrated experimentally. It is based on side polished fiber Bragg grating (SPFBG) manufactured by wheel side polishing method. When about half of SPFBG is overlaid by refractive index liquids, the reflective Bragg wavelength is split into two. The difference between the two reflective Bragg wavelengths has related with the refractive index of overlaid material, but their strain responses are the same, which have no-reference to the ambient temperature. Hence the difference between two reflective wavelengths can be used to measure the changes of the outer refractive index accurately, and to reduce the effect of strain during the measurement. The experiments show that the resolution of the sensor is 0.0001 with outer refractive index in the range of 1.4298 to 1.4479.

**Key words** sensors; optical fiber Bragg grating; side polishing; reflective wavelength; optical fiber sensor; refractive index

## 1 引 言

光纤光栅以其轻便、不受电磁干扰、成本低廉以及传感响应速度快等优点而在传感领域得到了广泛的应用。近年来,人们又在研究利用光纤光栅进行

折射率测量的方法。由于普通光纤光栅对外部折射率的变化不敏感,所以需要对其进行加工,使得光纤光栅包层厚度减小。当包层厚度减小到一定程度时,光纤光栅的布拉格(Bragg)反射波长将随外部折

收稿日期: 2008-09-12; 收到修改稿日期: 2008-12-31

基金项目: 国家自然科学基金 NSAF 项目(10776009)、国家自然科学基金(60877044)和广州市科技计划(2007Z2-D0091)资助课题。

作者简介: 范若岩(1983—),男,硕士研究生,主要从事光纤光栅传感技术方面的研究。E-mail: fanruoyan@yahoo.com.cn

导师简介: 陈 哲(1957—),男,博士,教授,主要从事新型光纤无源器件、光纤通信与光纤传感技术、光电检测技术、光学设计、光学及光电系统计算机仿真等方面的研究。E-mail: thzhechen@jnu.edu.cn (通信联系人)

射率的改变而发生变化<sup>[1]</sup>。A. Iadicicco 等<sup>[2~5]</sup>分别报道了采用腐蚀法对光纤光栅进行加工并用于折射率测量的方法；C. F. Chan 等<sup>[6]</sup>报道了采用侧边抛磨光纤光栅 (SPFBG) 整体覆盖蔗糖溶液测量其折射率的实验，Chen Xianfeng 等<sup>[7~9]</sup>采用在 D 形光纤上写入的光纤光栅进行了温度与外部折射率的测量。由于采用腐蚀法加工而成的光纤光栅机械强度差，而 D 形光纤制作成本高，在实际的传感应用中有很大的局限性。另外，由于光纤光栅自身对应力以及温度等参数的敏感特性，直接应用布拉格波长随外部折射率变化的特性来进行折射率测量，将受到外界应力等因素对光纤光栅测量折射率精度的影响<sup>[10~13]</sup>。

本文介绍了一种利用具有双布拉格反射峰效应的侧边抛磨光纤光栅进行折射率测量的新型光纤折射率传感器，这种侧边抛磨光纤光栅采用轮式光纤侧边抛磨机<sup>[14]</sup>加工而成，用这种方法制成的侧边抛磨光纤光栅具有抛磨区中部平坦不会产生啁啾的优点，且具有很好的机械强度，实用性更强；用两个布拉格反射峰差值为度量对折射率进行传感测量，能有效地去除测量过程中应力与温度变化对测量值的影响，从而提高测量精度。

## 2 基本原理

实验所采用的侧边抛磨光纤光栅是用轮式光纤侧边抛磨法加工而成的。根据光纤布拉格光栅的耦合方程，光纤光栅的布拉格反射波长  $\lambda_B$  表示为<sup>[15]</sup>

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

其中  $n_{\text{eff}}$  为光纤光栅段传导模的有效折射率，其数值与光纤光栅区域的几何结构、纤芯材料及包层材料的折射率等相关； $\Lambda$  为光栅周期常数。

实验证明<sup>[1]</sup>，当光纤光栅区的一侧包层被侧边抛磨到距离纤芯只有  $1 \mu\text{m}$  左右时，由于光纤光栅区域的几何结构发生了变化，其  $n_{\text{eff}}$  就不仅与光纤光栅区域几何结构相关，还与侧边抛磨口处覆盖的材料相关，改变侧边抛磨口处覆盖的材料，将使  $n_{\text{eff}}$  随之改变，从而使得光纤光栅的布拉格反射波长  $\lambda_B$  发生改变。

用轮式光纤侧边抛磨法加工的侧边抛磨光纤光栅的抛磨区形状如图 1 所示。将侧边抛磨光纤光栅的一部分抛磨区覆盖折射率液，如图 2 所示。未覆盖折射率液部分光纤光栅的有效折射率为  $n_{\text{eff1}}$ ，不仅与剩余包层折射率  $n_{\text{cladding}}$  有关，还与抛磨区处空气折射率  $n_{\text{air}}$  有关，覆盖折射率液部分光纤光栅的有效折射率将改变为  $n_{\text{eff2}}$ ，不仅与剩余包层折射率

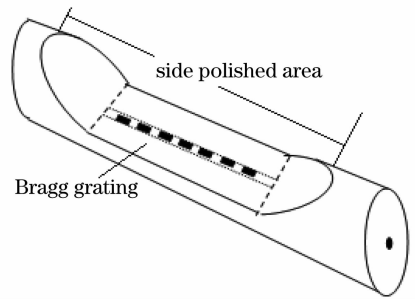


图 1 侧边抛磨光纤光栅示意图

Fig. 1 Side polished fiber Bragg grating

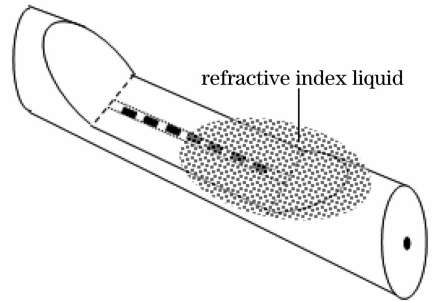


图 2 侧边抛磨光纤光栅覆盖折射率材料示意图

Fig. 2 Side polished fiber Bragg grating overlaid refractive index liquid

$n_{\text{cladding}}$  有关，还与抛磨区所覆盖的外部材料折射率  $n_{\text{oil}}$  有关，由(1)式可知，此时光纤光栅布拉格反射波长  $\lambda_B$  将会变为两部分，即

$$\lambda_{B1} = 2n_{\text{eff1}}\Lambda, \quad (2)$$

$$\lambda_{B2} = 2n_{\text{eff2}}\Lambda, \quad (3)$$

因此，在光谱分析仪中就可以观测到双布拉格反射峰的现象。

实际上，侧边抛磨光纤光栅受到的轴向应力、热负荷以及抛磨区覆盖材料的折射率  $n_{\text{oil}}$  都会对侧边抛磨光纤光栅的布拉格反射波长的改变产生影响。布拉格波长是随  $n_{\text{eff}}$  和  $\Lambda$  而改变的，其变化量为

$$\Delta\lambda_B = 2(n_{\text{eff}} \cdot \Delta\Lambda + \Lambda \cdot \Delta n_{\text{eff}}). \quad (4)$$

普通 FBG 对外界温度  $T$  及应力是敏感的，但对外界折射率的变化是不敏感的。应力对布拉格波长的影响是由于光栅周期的伸缩以及弹光效应引起的，而温度对布拉格波长影响是由于热膨胀和热光效应引起的，因此，当温度、应变同时发生变化时，总的布拉格波长位移应为热移动分量和应变移动分量之和<sup>[15]</sup>，于是(4)式改写为<sup>[15]</sup>

$$\Delta\lambda_B(T, l) = 2\left(n_{\text{eff}} \frac{\partial\Lambda}{\partial T} + \Lambda \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial T}\right)\Delta T + 2\left(n_{\text{eff}} \frac{\partial\Lambda}{\partial l} + \Lambda \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial l}\right)\Delta l, \quad (5)$$

其中  $\Delta\lambda_B$  为中心波长的变化,  $T$  为光栅处的温度,  $l$  为光栅的长度。抛磨区覆盖材料的折射率  $n_{oil}$  并不会影响光栅周期, 其对布拉格波长的影响是由于  $n_{oil}$  会影响光纤光栅的有效折射率。考虑到这些因素, 由于应力、温度和侧边抛磨区覆盖材料的折射率等的变化引起的布拉格反射波长变化量为

$$\Delta\lambda_B(T, l) + \Delta\lambda_{Boil} = 2\left(n_{eff} \frac{\partial\Delta}{\partial T} + \Delta \frac{\partial n_{eff}}{\partial T}\right)\Delta T + 2\left(n_{eff} \frac{\partial\Delta}{\partial l} + \Delta \frac{\partial n_{eff}}{\partial l}\right)\Delta l + 2\Delta \frac{\partial n_{eff}}{\partial n_{oil}} n_{oil}, \quad (6)$$

式中  $\partial n_{eff}/\partial n_{oil}$  为侧边抛磨光纤光栅抛磨区上所覆盖材料折射率  $n_{oil}$  的变化引起侧边抛磨光纤光栅的有效折射率的改变。将(6)式应用到测量折射率时的没有覆盖折射率液和覆盖了折射率液的二个侧边抛磨光纤光栅段上, 可分别得到侧边抛磨光纤光栅两个布拉格反射波长为

$$\begin{aligned} \lambda_{Bair} &= \lambda_B + \Delta\lambda_B(T, l) = \\ & \lambda_B + 2\left(n_{eff} \frac{\partial\Delta}{\partial T} + \Delta \frac{\partial n_{eff}}{\partial T}\right)\Delta T + \\ & 2\left(n_{eff} \frac{\partial\Delta}{\partial l} + \Delta \frac{\partial n_{eff}}{\partial l}\right)\Delta l, \quad (7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \lambda_{Boil} &= \lambda_B + \Delta\lambda_B(T, l) + \Delta\lambda_{Boil} = \\ & \lambda_B + \Delta\lambda_B(T, l) + 2\Delta \frac{\partial n_{eff}}{\partial n_{oil}} n_{oil}, \quad (8) \end{aligned}$$

所以, 两个布拉格反射峰的峰值波长之差可表示为

$$|\lambda_{Bair} - \lambda_{Boil}| = \Delta\lambda_{Boil} = 2\Delta \frac{\partial n_{eff}}{\partial n_{oil}} n_{oil}. \quad (9)$$

(9)式表明, 侧边抛磨光纤光栅两布拉格波长的差仅与覆盖材料的折射率有关, 并不受光纤布拉格光栅轴向应变和环境温度的影响, 因此利用两个布拉格反射峰的差值作为测量量可实现用侧边抛磨光纤光栅对折射率进行高精度的传感测量, 减小光纤布拉格光栅所受应变或环境温度对折射率测量的影响。

## 3 实验与分析

### 3.1 实验装置

实验中用于制作侧边抛磨光纤光栅的普通光纤布拉格光栅是采用 Corning SMF-28e 标准单模光纤由相位模版法制成的。光栅长度为 15 mm, 光栅中心波长为 1547.76 nm。采用轮式光纤侧边抛磨法对其进行侧边抛磨后, 用测量准确度为 0.1  $\mu\text{m}$  的细丝测量仪对其抛磨深度进行测量, 实测数据如图 3 所示。可以看出, 此侧边抛磨光纤光栅的抛磨区长度为 22 mm, 抛磨区平坦部分长度为 17 mm, 刻有光栅的光栅区就位于此平坦部分, 保证了外界对侧

边抛磨光纤光栅布拉格波长的影响是一致的, 较好地避免了啁啾效应; 抛磨后的剩余厚度为 69.7  $\mu\text{m}$ , 距离纤芯约为 2  $\mu\text{m}$ 。实验证明<sup>[1,16,17]</sup>, 在此剩余厚度时, 侧边抛磨光纤光栅的布拉格波长对外部折射率变化是敏感的。

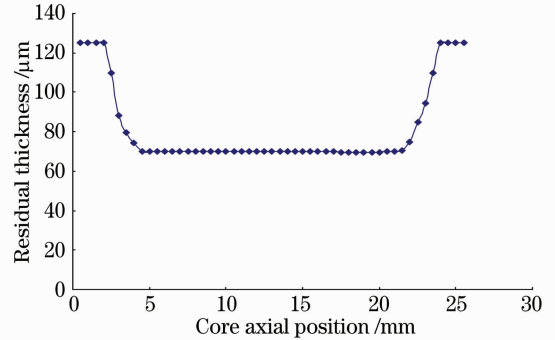


图 3 侧边抛磨光纤光栅剩余厚度曲线

Fig. 3 Measured graph of the side polished depth of a side polished FBG

将制备好的符合要求的侧边抛磨光纤光栅按图 4 所示的光路进行连接, 使得侧边抛磨光纤光栅抛磨区的一部分位于玻璃槽中。在玻璃槽中加入不同的折射率液, 使得该部分抛磨区完全被折射率液覆盖, 此时, 在光纤光谱分析仪上就可以观测到侧边抛磨光纤光栅的布拉格反射峰由一个变为两个, 如图 5 所示。

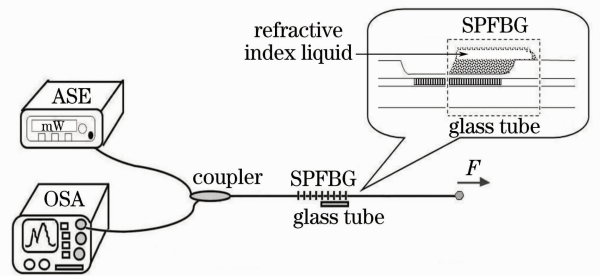


图 4 传感器实验装置图

Fig. 4 Experimental setup for refractive sensor fabrication and characterization

### 3.2 实验结果及分析

逐渐增加图 4 中侧边抛磨光纤光栅所受到的轴向应力  $F$ , 可以测得轴向应力在 0, 10 g, 20 g, 30 g, 40 g, 50 g, 60 g, 70 g 等各个状态时两个布拉格反射峰值的变化情况。表 1 所示为覆盖材料折射率值为 1.4198 (对应光波长为 1.55  $\mu\text{m}$ ) 时, 轴向应力变化与侧边抛磨光纤光栅的两个反射峰值的变化关系。

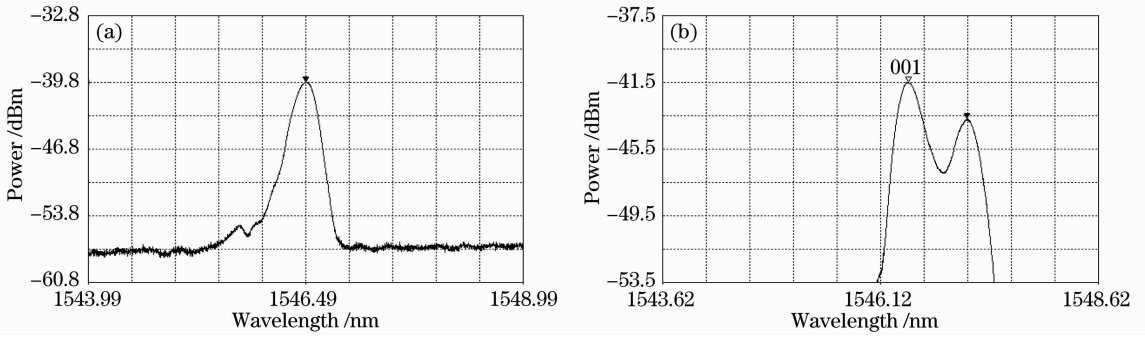


图 5 部分光栅区覆盖折射率液前后布拉格反射峰的变化

Fig. 5 Reflective spectrum of SPFBG in air or overlaid partly by refractive index liquid

表 1 轴向应力变化与侧边抛磨光纤光栅的两个反射峰值的变化关系

Table 1 Effect of strain of FBG the two wavelengths of the SPFBG

Strain /g	The first reflective spectrum /nm	The second reflective spectrum /nm
0	1546.178	1546.700
10	1546.416	1546.932
20	1546.684	1547.204
30	1546.852	1547.370
40	1547.140	1547.650
50	1547.266	1547.774
60	1547.596	1548.102
70	1547.706	1548.212

图 6 给出了覆盖材料折射率值为 1.4198(对应光波长为 1.55 μm)情况下,施加轴向应力为 0, 20 g,

40 g 与 70 g 时侧边抛磨光纤光栅的两个反射峰值的变化情况,当施加轴向应力  $F=0$  时,侧边抛磨光纤光栅的两个反射峰值分别为 1546.178 nm 和 1546.700 nm,当施加轴向应力  $F=20$  g 时,侧边抛磨光纤光栅的两个布拉格反射峰值分别为 1546.684 nm 和 1547.204 nm,当  $F$  增加至 40 g 时,侧边抛磨光纤光栅的两个反射峰值分别为 1547.140 nm 和 1547.650 nm,当  $F$  增加至 70 g 时,侧边抛磨光纤光栅的两个布拉格反射峰值分别为 1547.706 nm 和 1548.212 nm。

由图 6 可以看出,当所受轴向应力增加时,两个布拉格反射峰的中心波长都向长波长方向漂移,这说明侧边抛磨光纤光栅的布拉格反射波长受到光纤光栅的应力影响。图 6 中两个布拉格反射峰幅度大小不同是由于覆盖折射率液部分的光栅区与剩余光

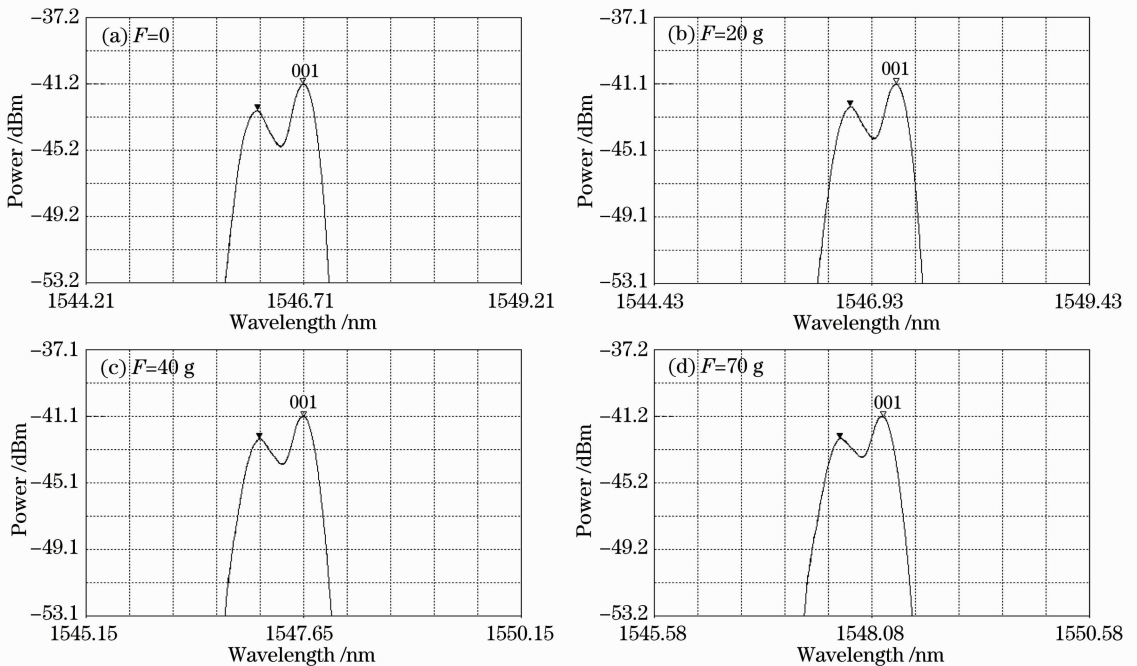


图 6 两个布拉格反射峰随轴向应力变化的演变

Fig. 6 Spectra of SPFBG at different strain

栅区的长度不同所致。

使环境温度保持恒定,在图 4 所示的侧边抛磨光纤光栅上覆盖折射率值分别为 1.4097, 1.4198, 1.4298, 1.4318, 1.4338, 1.4358, 1.4378, 1.4398, 1.4418, 1.4439, 1.4459, 1.4479 (对应光波长为 1.55  $\mu\text{m}$ ) 的折射率液(生产厂家为美国 Cargille Labs, 样品最小折射率间隔为 0.002), 不断增加侧边抛磨光纤光栅所受到的轴向应力, 通过分辨率为 0.01 nm 的光谱分析仪来测量侧边抛磨光纤光栅两个布拉格反射峰的间距。可以得到两个布拉格反射峰的差值的折射率响应曲线如图 7 所示, 两个布拉格反射峰的差值的应变响应曲线如图 8 所示。图 8 中已经将轴向应力换算为轴向应变, 换算时的估算方法是<sup>[18]</sup>, 根据弹性体力学中的胡克定律, 当应变较小时, 光纤光栅的应变值  $\epsilon$  与其所受应力  $F$  成正比

$$\epsilon = \frac{F}{Y} = \frac{mg}{SY}, \quad (10)$$

式中石英的杨氏模量取  $Y = 7.31 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ , 通常直径为 125  $\mu\text{m}$  的光纤横截面积  $S = 1.23 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ , 重力加速度  $g = 9.80 \text{ m/s}^2$ , 设侧边抛磨光纤光栅抛磨区的横截面积约为 125  $\mu\text{m}$  的光纤横截面积的 2/3, 即  $S = 8.2 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ , 利用(10)式即可将所受轴向应力换算成侧边抛磨光纤光栅的应变数值。

从图 7 可看出, 侧边抛磨光纤光栅的两个布拉格反射峰的差值是随着折射率的增大而单调非线性地增大的, 这表明两个布拉格反射峰差值与侧边抛磨区覆盖材料的折射率单调相关, 在覆盖折射率为 1.4097~1.4298 (对应光波长为 1.55  $\mu\text{m}$ ) 时, 侧边抛磨光纤光栅的两个布拉格反射峰的差值变化较缓慢, 变化量为 0.27 nm, 在覆盖折射率为 1.4298~1.4479 (对应光波长为 1.55  $\mu\text{m}$ ) 时, 侧边抛磨光纤光栅的两个布拉格反射峰的差值变化较显著, 变化量为 1.51 nm。可见, 此侧边抛磨光纤光栅在该区

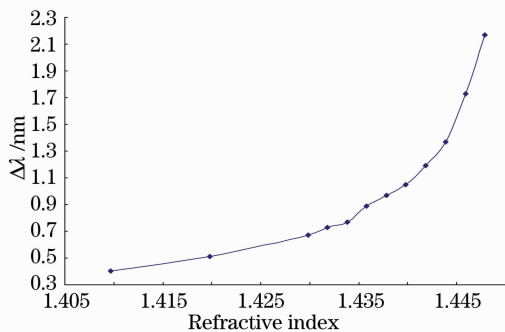


图 7 折射率变化对两个布拉格反射峰差值的影响

Fig. 7 Difference between the two Bragg wavelengths versus refractive index of liquid partly overlaid on the SPFBG

域适合用作折射率光纤传感器。

从图 8 中可以看出, 在温度为室温条件下, 覆盖不同折射率液时侧边抛磨光纤光栅两个布拉格反射峰差值的轴向应变曲线基本呈一组平行的直线。这就表明, 侧边抛磨光纤光栅的两个布拉格反射峰的差值在测量误差范围内几乎是不随轴向应变的变化而变化的, 而仅随折射率的变化而变化。将此侧边抛磨光纤光栅用作光纤折射率传感器测量折射率时, 对外界应力变化不敏感, 提高了测量的可靠性和精度。

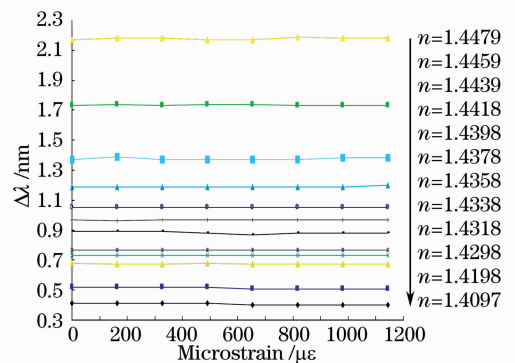


图 8 轴向应变对覆盖不同折射率液时两个布拉格反射峰差值的影响

Fig. 8 Effect of strain of FBG on the difference between the two wavelengths of the SPFBG at different refractive index

光纤传感器的折射率测量分辨率可根据图 8 中折射率变化引起的波长差的变化来计算。图 8 中最小波长差变化对应的折射率分别为 1.4097~1.4198 范围。当侧边抛磨光纤光栅部分光栅区覆盖折射率为 1.4097 (对应光波长为 1.55  $\mu\text{m}$ ) 的折射率液时, 两个布拉格反射峰的峰值波长差为 0.4 nm; 当覆盖折射率增大为 1.4198 (对应光波长为 1.55  $\mu\text{m}$ ) 时, 两个反射峰的差值为 0.51 nm。在此过程中, 折射率值变化了 0.0101, 而两个布拉格反射峰的差值变化了 0.11 nm。由于传感器实验所采用的光谱分析仪的分辨率为 0.01 nm, 所以可推算该传感器的折射率测量分辨率在此区域为 0.0009。由图 7 可知, 折射率值为 1.4298~1.4479 时, 两个布拉格反射峰差值变化达到 1.51 nm, 分辨率可达 0.0001, 所以此传感器在这一区域有较高的折射率分辨率。

由于实验中所用美国 Cargille Labs 公司的折射率液的折射率值本身随温度变化, 即折射率液的温度系数不为零, 因此用此光纤光栅传感器进行初步的温度效应实验时, 对于同一折射率液样品, 侧边抛磨光纤光栅传感器的两个布拉格反射峰不仅随光纤光栅的温度效应而变化, 而且随覆盖的折射率液的温度效应而变化, 这就导致两个布拉格反射峰差值与

温度变化相关。但(9)式的分析表明,此利用双反射峰的光纤光栅传感器是可以减小环境温度影响的。

## 4 结 论

实验证明,应用轮式光纤侧边抛磨法将光纤布拉格光栅的一侧包层抛磨至剩余厚度为  $1\mu\text{m}$  左右时,将侧边抛磨光纤光栅的一部分抛磨区覆盖折射率液,可以改变覆盖部分光栅区的有效折射率,从而可在光谱分析仪中观测到侧边抛磨光纤光栅的反射光谱将由未覆盖折射率液之前的单一布拉格反射峰变为双布拉格反射峰。在环境温度不变的情况下,对于某一折射率液,改变侧边抛磨光纤光栅所受应力大小,这两个布拉格反射峰的峰值波长随应力的增大向长波长方向变化,而双反射峰的差值则保持恒定。利用两个布拉格反射峰的差值作为折射率测量的测量量可以减小光纤光栅的应力影响,实现用侧边抛磨光纤光栅对折射率进行高精度的传感测量。实验表明,当环境温度恒定时,应用该传感器测量折射率时所测得的折射率值基本不受应力变化影响。折射率液在  $1.4298\sim 1.4479$ (对应光波长为  $1.55\mu\text{m}$ ) 范围内,该传感器的折射率测量分辨率为  $0.0001$ ,从而较好地解决了光纤光栅传感过程中折射率与应力等参量交叉敏感的问题,提高了折射率测量的可靠性和精度。

采用轮式光纤侧边抛磨法制作的侧边抛磨光纤光栅折射率传感器相比采用 HF 酸对光纤光栅进行腐蚀的方法,具有制作简单、可重复性好、精度容易控制、机械拉力强等优点;相比于在 D 型光纤上加工的光纤光栅,具有成本低以及易于普通单模光纤熔接的优点<sup>[8]</sup>。这种基于侧边抛磨光纤光栅双布拉格反射峰的折射率传感器大大提高了折射率测量的可靠性和精度且更具实用意义,可用于制作各种生物或化学材料的传感器。

## 参 考 文 献

- Liu Linhe, Chen Zhe, Bai Chunhe *et al.*. The effect of refractive index of material overlaid side polished area of FBG on Bragg wavelength[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(5): 865~868  
刘林和,陈哲,白春河等. 侧边抛磨区材料折射率对光纤光栅波长的影响[J]. *光子学报*, 2007, **36**(5): 865~868
- A. Iadicco, A. Cusano, A. Cutolo *et al.*. Thinned fiber Bragg gratings as high sensitivity refractive index sensor[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(4): 1149~1151
- A. Iadicco, A. Cusano, S. Campopiano *et al.*. Thinned fiber Bragg gratings as refractive index sensors[J]. *IEEE Sen. J.*, 2005, **5**(6): 1149~1151
- A. Iadicco, S. Canpopiano, A. Cutolo *et al.*. Thinned fiber Bragg gratings for sensing applications [J]. *IEEE Computer Society*, 2005, **2005**: 204~209
- Xuefeng Huang, Zhemin Chen, Liyang Shao *et al.*. Design and characteristics of refractive index sensor based on thinned and microstructure fiber Bragg grating[J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(4): 504~511
- C. F. Chan, G. A. Ferrier, D. J. Thomson *et al.*. Evanescent field fiber Bragg grating sensors for index of refraction sensing with applications to structural health monitoring [C]. *SPIE*, 2006, **6176**: 614~617
- Chen Xianfeng, Zhou Kaiming, Zhang Lin *et al.*. Simultaneous measurement of temperature and external refractive index by use of a hybrid grating in D fiber with enhanced sensitivity by HF etching[J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(2): 178~182
- Zhou Kaiming, Chen Xianfeng, Zhang Lin *et al.*. Optical chem-sensors based on etched fiber Bragg gratings in D-shape and multimode fibers[J]. *International Society for Optical Engineering*, 2005, **5855**(Part I): 158~161
- Shi Zhidong, Dong Xiaopeng, Tang Mingjue *et al.*. Fabrication and measurement of D-shape fiber and its few-mode Bragg grating [J]. *J. Shanghai University (Natural Science Edition)*, 2007, **13**(4): 415~420  
石志东,董小鹏,唐明珏等. D形光纤样品制备及其 Bragg 光栅的实验测量[J]. *上海大学学报(自然科学版)*, 2007, **13**(4): 415~420
- Huang Rui, Cai Haiwen, Qu Ronghui *et al.*. Separately measurement of strain and temperature using a single fiber Bragg grating[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(2): 232~235  
黄锐,蔡海文,瞿荣辉等. 一种同时测量温度和应变的光纤光栅传感器[J]. *中国激光*, 2005, **32**(2): 232~235
- Dong Kai, Wang Meiting, Li Zhiqian. Study on the chirp characteristic in strain measurement by fiber Bragg grating[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(6): 877~880  
董凯,汪梅婷,李志全. 光纤 Bragg 光栅应变测量中啁啾特性的研究[J]. *光子学报*, 2006, **35**(6): 877~880
- Shen Le, Zheng Shilie, Zhang Xianmin. The response of side-polished FBG to external refractive index [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(7): 1036~1038  
沈乐,郑先烈,章献民. 侧面研磨光纤 Bragg 光栅的外部折射率敏感性研究[J]. *光子学报*, 2005, **34**(7): 1036~1038
- Li Zhizhong, Zhu Hai, Tang Zhihong *et al.*. Research on fiber Bragg grating side-hole package technology [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6): 993~998  
李智忠,朱海,汤志宏等. 光纤光栅边孔封装技术[J]. *光学学报*, 2007, **27**(6): 993~998
- Jiang Peifan, Chen Zhe, Zeng Yingxin *et al.*. Optical propagation characteristics of side-polished fibers [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2006, **27**(5): 578~581  
江沛凡,陈哲,曾应新等. 侧边抛磨光纤的光传输特性研究[J]. *半导体光电*, 2006, **27**(5): 578~581
- Rao Yunjiang, Wang Yiping, Zhu Tao. Principle and Applications of Fiber Bragg Grating[M]. Beijing: Science Press, 2006. 137~140  
饶云江,王义平,朱涛. 光纤光栅原理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006. 137~140
- Chen Zhe, Liu Linghe. Temperature compensation of fiber Bragg grating based on side polishing and overlay [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(6): 889~892  
陈哲,刘林和. 基于侧边抛磨与覆盖材料的光纤光栅温度补偿新方法[J]. *中国激光*, 2008, **35**(6): 889~892
- Zhang Yuncong, Chen Zhe, Jiang Peifan *et al.*. All-fiber thermo-optical variable optical attenuator [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(8): 1110~1114  
张云聪,陈哲,江沛凡等. 全光纤热光型可变光衰减器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(8): 1110~1114  
Sun Weimin, Jiang Fuqiang, Liu Zhihai *et al.*. Temperature compensation in strain measurement using erbium-doped fluorescent fiber gratings [J]. *J. Harbin Engineering University*, 2007, **28**(6): 719~722  
孙伟民,姜福强,刘志海等. 利用掺铒光纤光栅实现应变测试中的温度补偿[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2007, **28**(6): 719~722