

激光与光电子学进展

裸露纤芯边孔光纤布拉格光栅制备及其折射率传感特性研究

蒙云清, 董贤, 武创*, 李杰, 关柏鸥

暨南大学光子技术研究院广东省光纤传感与通信技术重点实验室, 广东 广州 511443

摘要 提出并实现了两种结构的裸露纤芯边孔光纤布拉格光栅(SH-FBGs)的折射率传感器。第一种,采用光纤侧面抛磨法抛磨刻有FBG的边孔光纤(SHF)的一个空气孔,得到D形横截面SH-FBG传感器,在1.380折射率附近灵敏度约为24.0 nm/RIU(RIU为单位折射率)。另一种,通过化学腐蚀法腐蚀刻有FBG的边孔光纤的两个空气孔,得到X形横截面SH-FBG传感器,在1.333~1.340折射率范围内,折射率灵敏度约为15.1 nm/RIU,该数值可通过腐蚀方案进一步得到优化。由于X形SH-FBG传感器对应两个偏振的模式,表现出对外部折射率变化的响应不同而对温度变化的响应相同的特性,因此可作为与温度无关的折射率传感器。设计的两种传感器具有的空气孔可以作为微流通道,有助于实现在线检测和给药,具有结构简单、操作方便等优点,在生物化学、医学等领域中拥有良好的应用前景。

关键词 光纤光学; 光纤布拉格光栅; 光纤传感器; 折射率灵敏度; 边孔光纤

中图分类号 TN253

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0106003

Fabrication and Refractive Index Sensing Characteristics of Exposed-Core Side-Hole Fiber Bragg Grating

Meng Yunqing, Dong Xian, Wu Chuang*, Li Jie, Guan Baiou

Guangdong Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Communications, Institute of Photonics Technology, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 511443, China

Abstract Herein, two refractive index sensors based on exposed-core side-hole fiber Bragg gratings (SH-FBGs) with D-shaped and X-shaped fiber cross sections were proposed and demonstrated. One SH-FBG sensor with the D-shaped fiber cross section was fabricated using the side-polishing technique, in which an air hole of the side-hole fiber (SHF) engraved with the FBG is polished. Another SH-FBG sensor with the X-shaped fiber cross section was developed using the wet chemical etching method, in which two air holes of the SHF engraved with the FBG are etched. The refractive index sensitivities of the first and second sensors are measured to be 24.0 and 15.1 nm/RIU (RIU is the unit refractive index), respectively, for the refractive index of approximately 1.380 and 1.333–1.340, respectively. The 15.1 nm/RIU value can be further optimized using the corrosion scheme. Because the X-shaped SH-FBG sensor shows two polarized reflection peaks owing to birefringence and exhibits different responses to changes in external refractive index yet the same response to temperature variations, it can be used as a temperature-independent refractive index sensor. The air holes of the designed two sensors can be used as microfluidic channels,

收稿日期: 2021-03-11; 修回日期: 2021-04-08; 录用日期: 2021-04-14

基金项目: 国家自然科学基金(62075087)、广东省自然科学基金(2014A030306040, 2018A030313440)、广东省特支计划科技创新青年拔尖人才项目(2016TQ03X124, 2019TQ05X136)、广州市珠江科技新星项目(201806010197)

通信作者: *wuchuang.ipt@gmail.com

potentially simultaneously facilitating online detection and drug delivery. Our device is characterized by structural simplification and easy operation and thus is potentially useful for biosensing and medical applications.

Key words fiber optics; fiber Bragg grating; fiber optics sensor; refractive index sensitivity; side-hole fiber

1 引言

光纤光栅传感器具有灵敏度高、体积小、易于复用、可实现分布测量等优点,是光纤传感领域需求最大的光纤器件之一。自 20 世纪 90 年代初以来,光纤布拉格光栅(FBG)传感器已经引起许多研究者的关注^[1-3]。基于 FBG 的折射率传感器是研究最多的光纤折射率传感器类型之一^[4-9]。长周期光纤光栅也被证明对周围介质的折射率具有高灵敏度^[10-11],但是它们的多个共振峰和数十纳米的宽透射共振特征限制了测量精度和复用能力。为了提高折射率(RI)灵敏度,研究者们通过熔融拉锥^[11]、侧边抛磨^[12]或化学腐蚀^[13-18]等方法来增强光纤的倏逝场与环境相互作用。光纤折射率传感器主要应用于免标记生化传感,而生化反应通常发生于水溶液环境中,折射率范围为 1.33~1.38,研究者们对该区间尤其是 1.33 附近的折射率灵敏度特别感兴趣^[19]。Liao 等^[20]通过侧面抛磨单模光纤制作了 D 形 FBG 折射率传感器,该传感器在 1.36~1.38 RI 范围内的折射率灵敏度约为 2 nm/RIU(RIU 为单位折射率)。Lowder 等^[21]在 D 形光纤上制作表面浮雕式光纤光栅传感器,在 1.38 RI 附近折射率灵敏度约为 11 nm/RIU。由于边孔光纤(SHF)的空气孔可以作为微流通道集成到测试系统中,因此,研究者们对边孔光纤光栅传感器也产生了很大的兴趣^[22-23]。Frazão 等^[22]通过化学腐蚀方法在边孔光纤上设计 H 形 FBG 折射率计,然而仅打开边孔,纤芯包层的厚度较大,在 1.34~1.39 RI 范围内,其快、慢轴的折射率灵敏度分别为 0.20 nm/RIU 和 0.14 nm/RIU。

本文基于裸露纤芯的边孔光纤布拉格光栅(SH-FBG),设计了两种反射型探针结构的光纤光栅折射率传感器。第一种是 D 形横截面的 SH-FBG 折射率传感器,采用侧面抛磨法对 SHF 的一个空气孔进行抛磨,形成 D 形横截面光纤,在 1.380 RI 附近获得 24.0 nm/RIU 的折射率灵敏度。第二种是 X 形横截面的 SH-FBG 折射率传感器,该结构与 H 形光纤^[22]类似,通过化学腐蚀法打开 SHF 的两个空气孔,在 1.333~1.340 RI 范围内,折射率灵敏度最高可达 15.1 nm/RIU。由于双折射存在的两个

偏振态对温度的响应相同而对折射率的响应不同^[24],X 形 SH-FBG 传感器可以用作与温度无关的折射率传感器。设计的两种传感器同时具备布拉格光栅和 SHF 的优势,有助于实现折射率在线检测和微流通道给药一体化的功能,具有制作效率高、操作简单等优点,在生物化学、医学等传感领域具有广泛的应用前景。

2 器件结构和工作原理

边孔光纤购买自武汉长盈通光电技术股份有限公司,图 1(a)、(b)分别为边孔光纤的横截面 scanning electron microscope (SEM) 照片和纤芯 SEM 照片,掺锗纤芯尺寸为 $9\ \mu\text{m} \times 5\ \mu\text{m}$,包层尺寸为 $126\ \mu\text{m} \times 112\ \mu\text{m}$,空气孔尺寸为 $41\ \mu\text{m} \times 36\ \mu\text{m}$,三者的长短轴方向一致。采用波长为 193 nm 的准分子激光器和 1067.17 nm 的相位掩模板,在边孔光纤上刻写一段长为 3 mm 的布拉格光栅,如图 1(c)所示。该光栅的中心波长在 1550 nm 附近,透射深度为 15 dB,如图 1(d)示。值得注意的是,虽然光纤的纤芯为椭圆形,但其长短轴的尺寸分别为波长的 6 倍和 3 倍,所以初始几何双折射很小,在透射光谱中没有观察到双折射现象。

FBG 传感器的工作原理是,通过紫外曝光在光纤轴向形成周期性折射率调制,当宽带光输入时,只有满足布拉格谐振条件的光波被反射,从而在反射光谱形成反射峰,外界参量改变光纤模式的有效折射率和光栅周期,使反射峰发生波长漂移,通过追踪反射峰的波长漂移即可实现对外界参量的传感。众所周知,布拉格谐振条件^[1]可以表示为

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

式中: n_{eff} 是光纤的有效折射率; Λ 是光栅周期; λ_B 是布拉格波长。

在普通单模光纤中,光波被束缚在纤芯区域,其基模的有效折射率不受光纤外部介质折射率变化的影响。然而,当光纤包层直径减小使纤芯裸露时,外部介质的折射率变化将引起光纤模式有效折射率 n_{eff} 的变化,但不会改变光栅周期 Λ ,故 FBG 作为折射率传感器时灵敏度^[25]为

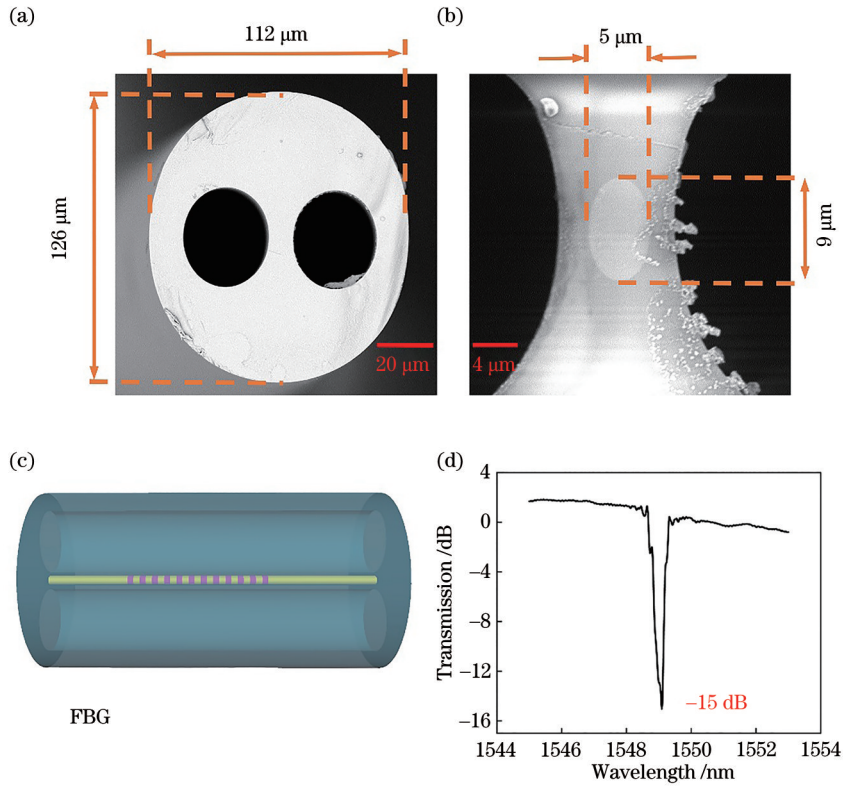


图 1 边孔光纤。(a)(b)边孔光纤横截面 SEM 照片和纤芯 SEM 照片;(c)(d)布拉格光栅示意图及对应的透射光谱图
 Fig. 1 Diagram of side hole fiber. (a)(b) SEM photos of cross-section and core of side-hole fiber; (c)(d) diagram of Bragg grating and corresponding transmission spectrum

$$K_n = \frac{d\lambda_B}{dn_m} = 2\Lambda \cdot \frac{dn_{eff}}{dn_m}, \quad (2)$$

式中： n_m 是光纤外部待测介质的折射率。当FBG的外部待测介质折射率越接近包层或者纤芯折射率时，FBG的折射率灵敏度就会越大，呈非线性关系^[10-11]。

在折射率传感的过程中，传感器不可避免地受到环境温度变化的影响。对于FBG而言，其温度敏感机制主要包括两方面：热光效应引起光纤材料折射率的变化，从而导致光纤模式有效折射率 n_{eff} 的变化；轴向热膨胀效应导致光栅周期 Λ 的变化。此外，由于纤芯和包层材料组分略有差别，它们的热膨胀系数、杨氏模量、泊松比也会不同，因此温度变化导致光纤横截面热应力分布发生变化，产生弹光效应，进而也会引起光纤横截面折射率分布和光纤模式有效折射率 n_{eff} 的变化。对于绝大部分情况，热光效应和轴向热膨胀效应占主导作用，横向热膨胀引起的弹光效应基本可忽略。故FBG的温度灵敏度^[26]为

$$K_T = \lambda_B \left(\frac{1}{n_{eff}} \cdot \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} + \frac{1}{\Lambda} \cdot \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) = \lambda_B (\delta + \alpha), \quad (3)$$

式中： δ 和 α 分别为石英的热光系数和线热膨胀系数。可以看出，FBG中心波长与外界温度呈较好的线性关系。

3 D形SH-FBG传感器

利用侧边抛磨系统制作D形SH-FBG折射率传感器，如图2所示。将一段长为3 cm的边孔光纤熔接在两段单模光纤之间，FBG刻写在边孔光纤中间位置。单模光纤由光纤盘缠绕固定，悬挂20 g砝码以保持抛磨光纤的恒定张力。通过三维程控步进位移平台调节砂轮位置，沿边孔光纤短轴方向抛磨，保证光栅在抛磨的中间区域。实验中可以通过显微镜CCD观测系统来观察光纤侧视图，判断光纤抛磨程度。本实验设置抛磨长度为6 mm，抛磨深度为56 μm 。

实验中，光源由Golight公司提供，其光谱范围为1250~1650 nm。采用Yokogawa公司提供的型号为AQ6370D的光学光谱分析仪(OSA)记录器件光谱，分辨率为0.02 nm。依据光纤的侧面抛磨实验，发现抛磨初期光功率是没有变化的，光损耗与抛磨深度有关。随着包层厚度的减小，FBG中心波

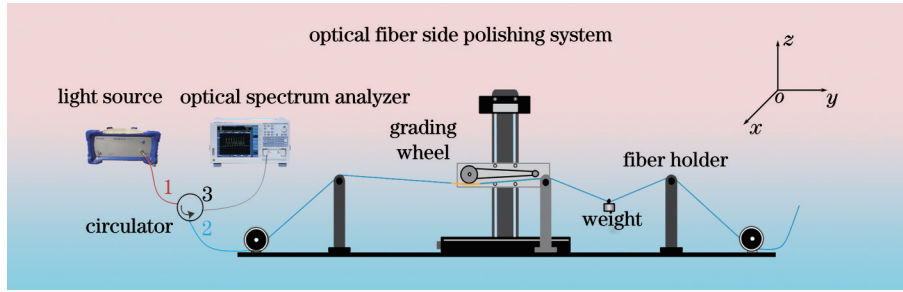


图 2 光纤侧面抛磨系统

Fig. 2 Diagram of optical fiber side polishing system

长的峰值功率下降,当光纤被抛磨到纤芯附近时,随着纯石英壁包层的变薄,空气孔区域距离纤芯越来越近,而空气的折射率远低于被抛磨掉的石英壁,所以光纤模式的有效折射率越来越小,从而使FBG中心波长向短波方向漂移^[27]。图3(a)表示抛磨前后

的光栅反射光谱图,插图为观察到的D形光纤横截面SEM图。结果显示,未抛磨光纤光栅峰值反射波长为1549.060 nm,侧抛光纤光栅的峰值反射波长为1547.484 nm,FBG中心波长蓝移了1.576 nm,抛磨前后光栅反射谱光功率损耗约为-4 dB。

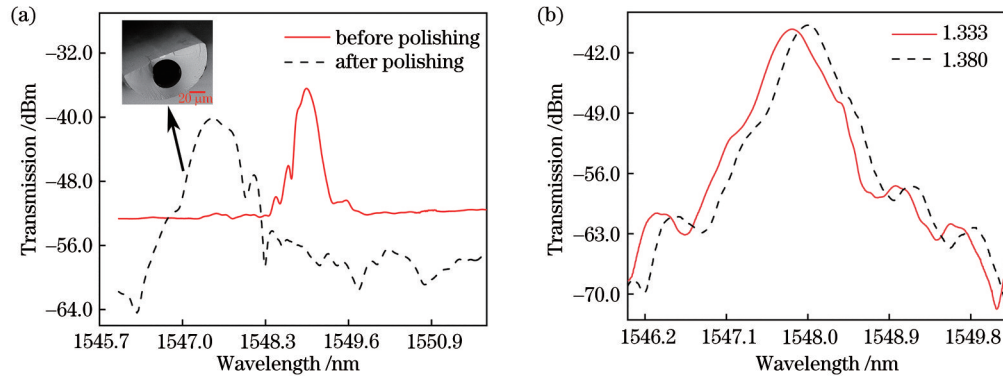


图 3 D形SH-FBG的反射光谱图。(a)光纤抛磨前、后的反射光谱,插图为对应的光纤端面SEM图;
(b)传感器在不同折射率下的反射光谱

Fig. 3 Reflection spectra of the D-shaped SH-FBG. (a) Diagram of reflection spectra before and after polishing, inset is the corresponding SEM photo of fiber end view; (b) reflection spectra of the sensor at different refractive index

3.1 折射率灵敏度

将制作好的D形SH-FBG传感器用食人鱼溶液浸泡30 min,清洗抛磨处的碎屑,用酒精二次清洗,末端仅保留抛磨区长度6 mm的D形SH-FBG作为传感探头。

为研究D形SH-FBG传感器的折射率响应特性,不同折射率溶液由不同浓度的食盐溶液实现,折射率变化范围为1.333~1.380。将D形SH-FBG探头完全浸入食盐溶液试管中,记录在不同折射率溶液里反射光谱的变化。为提高实验的准确性,每次记录完数据后,用酒精和去离子水清洗光纤探头,待光谱恢复到原来的位置时,再进行下一组溶液的记录。图3(b)为传感器在不同折射率下反射光谱的漂移情况,布拉格光栅的中心波长随着折射率的增加而发生红移。如图4(a)所示,布拉格波长

和液体折射率之间观察到非线性关系,与(2)式吻合。在折射率更高的范围,传感器的折射率灵敏度也更高,在1.380折射率附近观察到24.0 nm/RIU的折射率灵敏度。

3.2 温度灵敏度

为得到传感器的温度响应特性,将整个器件置于温控盒中,通过可变电阻实时控制温度。将温控盒的温度 T 从30℃逐步升高至100℃,待光谱稳定后对光谱信息每间隔10℃进行一次记录。图4(b)为传感器在30~100℃温度变化范围内波长的变化情况,随着温度的升高,FBG的中心波长发生了较为均匀的红移,呈线性关系,与(3)式吻合。通过线性拟合,得D形SH-FBG传感器的温度灵敏度为14.48 pm/℃。

从上述结果可知,D形SH-FBG传感器可以较好

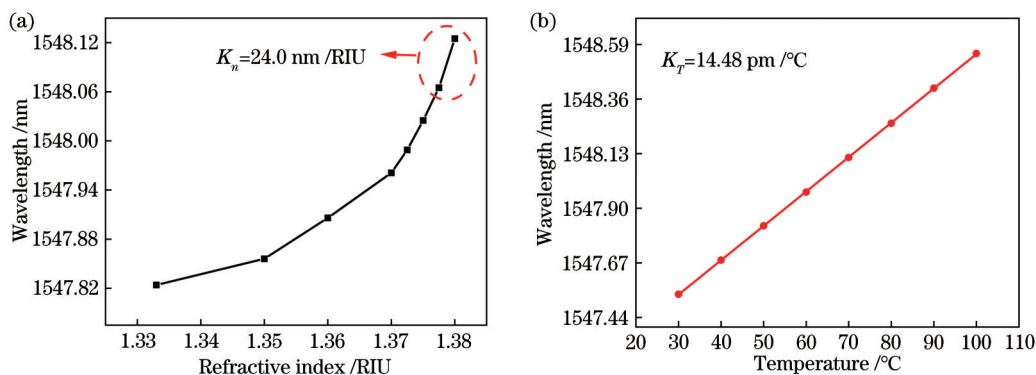


图 4 D形 SH-FBG 的折射率和温度响应曲线。(a) FBG 波长与折射率的变化关系;(b) FBG 波长与温度的变化关系
Fig. 4 Refractive index and temperature response characteristics of D-shaped SH-FBG sensor. (a) FBG wavelength as function of the refractive index; (b) FBG wavelength as function of the temperature

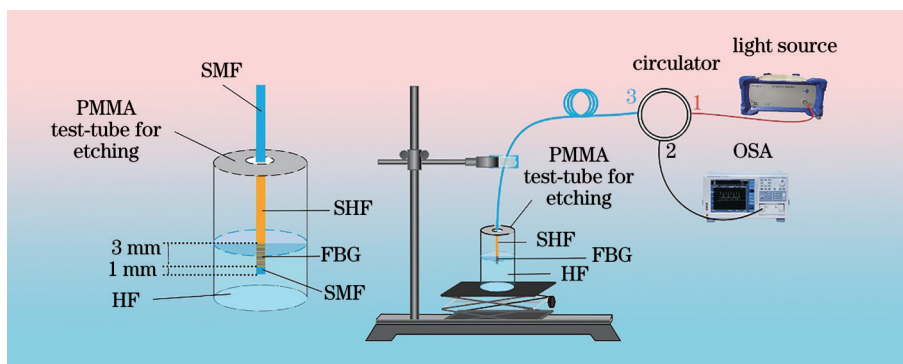
地检测液体折射率的变化,保留一个空气孔时可以保持良好机械性能,有助于集成到微流系统中进行样品的输送和填充,在折射率传感领域有较好前景。

4 X形 SH-FBG 传感器

众所周知,检测极限是评价传感器性能的一个重要参数,为了使传感器在更低的折射率范围内达到更高的灵敏度,第二个研究是通过化学腐蚀法来制作 X 形 SH-FBG 折射率传感器。

化学腐蚀装置如图 5 所示,完成 FBG 刻写之

后,边孔光纤末端保留 1 mm 左右长的单模光纤,另一端通过单模光纤连接光路。保留末端单模光纤的目的是避免溶液进入气孔内部达到 HF 酸溶液,从气孔外壁开始均匀腐蚀。腐蚀实验显示,腐蚀初期光栅的中心波长出现红移,这是光纤材料的化学反应引起的热量导致的^[28]。随着包层厚度的减小,FBG 中心波长会发生蓝移,这是因为被腐蚀掉的石英部分变为 HF 溶液,导致包层一部分区域折射率降低,而纤芯折射率不变,所以光纤模式有效折射率变低^[16]。



PMMA: polymethyl methacrylate; SMF: single mode fiber

图 5 化学腐蚀装置图

Fig. 5 Diagram of chemical etching setup

在腐蚀前,空气孔区域距离纤芯较远,对纤芯内模式的模场和有效折射率影响很小,纤芯周围的包层在短轴方向和长轴方向都是纯石英,可近似认为包层的折射率分布是各向同性的,此时光纤只有纤芯的椭圆双折射;当石英壁被腐蚀变薄之后,空气孔区域距离纤芯越来越近,长轴方向的包层依然是纯石英,但短轴方向空气孔区域的折射率对纤芯内模式的模场和有效折射率影响增

强,且其折射率明显低于纯石英,形成包层折射率在长轴方向和短轴方向的非一致分布,从而加剧了双折射,使得反射峰逐渐分裂为两个偏振态的反射峰。

腐蚀过后的传感器上面有少许 HF 酸溶液残留,将腐蚀完成的 X 形 SH-FBG 用碱性(饱和碳酸氢钠)溶液浸泡 15 min,再用酒精清洗干净,放在通风橱中烘干后进行传感实验。

4.1 折射率灵敏度

为得到传感器的折射率响应特性,用食盐溶液配制折射率变化范围为 1.333~1.340,间隔为 0.001 的溶液。利用如 D 形 SH-FBG 传感器测量折射率的方法,每次测试完成后,将传感器清洗干净,待光谱恢复原样时,再测定下一组溶液的折射率。

实验采用体积分数为 20% 的 HF 酸腐蚀光纤,

将边孔光纤空气孔打开,再通过 10% 体积分数的 HF 酸分别腐蚀 10, 25, 30 min,通过尽可能减小纤芯包层厚度,来实现更强的倏逝场相互作用。处理后得到的器件反射光谱如图 6(a)~(c)所示,插图为对应的器件横截面图。如图 6(a)所示,腐蚀时间较短时,光栅反射谱为一个反射峰,折射率灵敏度为 1.1 nm/RIU。在 1.333 RI 下,如图 6(b)所示,双折

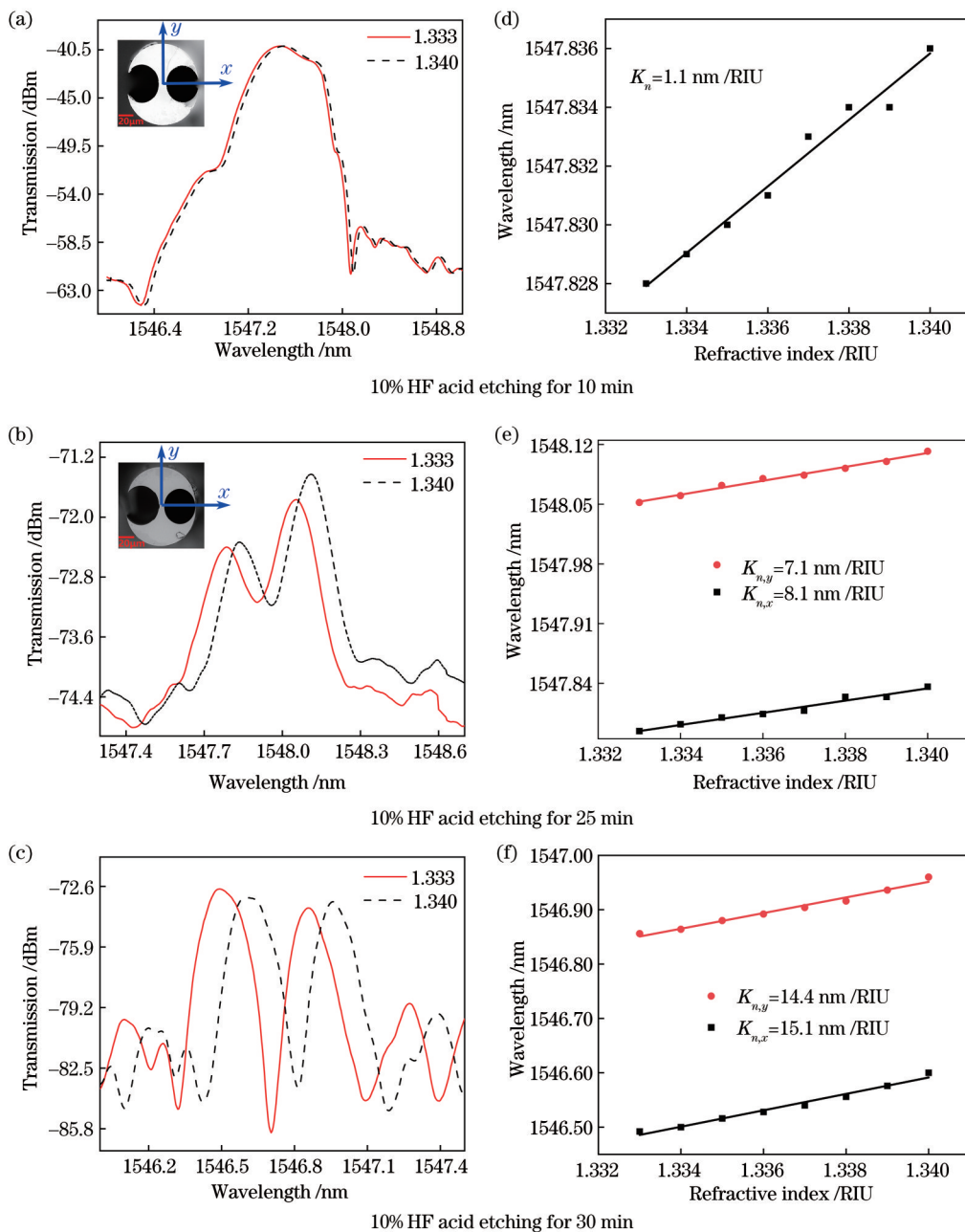


图 6 X 形 SH-FBG 的折射率响应特性。(a)~(c)不同腐蚀时间下,传感器的反射光谱在不同折射率下的变化;(d)~(f)对应的反射波长的折射率响应

Fig. 6 Refractive index response characteristic of X-shaped SH-FBG. (a)–(c) Change of reflection spectra of the sensor under different refractive index under different corrosion time; (d)–(f) refractive index response corresponding to the reflection wavelength

射两个反射峰的波长差是 0.268 nm, x 和 y 偏振对应的折射率灵敏度分别为 8.1 nm/RIU 和 7.1 nm/RIU。图 6(c) 中双折射两个反射峰的波长差是 0.364 nm, x 和 y 偏振对应的折射率灵敏度分别为 15.1 nm/RIU 和 14.4 nm/RIU。这表明石英壁越薄, 光纤的倏逝场越强, 对应的折射率灵敏度越高^[25]; 由于光纤具有双折射, 所以不同偏振态具有不同的折射率灵敏度。

4.2 温度灵敏度

为研究 X 形 SH-FBG 传感器的温度响应特性, 利用温控盒调节温度, 检测传感器在 30~100 °C 范围内的温度响应。通过线性拟合, 得到光栅的反射波长随温度升高呈线性关系, 与(3)式吻合。如图 7 所示, 当出现双折射时, 两个偏振态对温度的响应基本相同。3 种不同的腐蚀状态的传感器温度灵敏度分别约为 11.27 pm/°C, 11.93 pm/°C, 12.78 pm/°C。

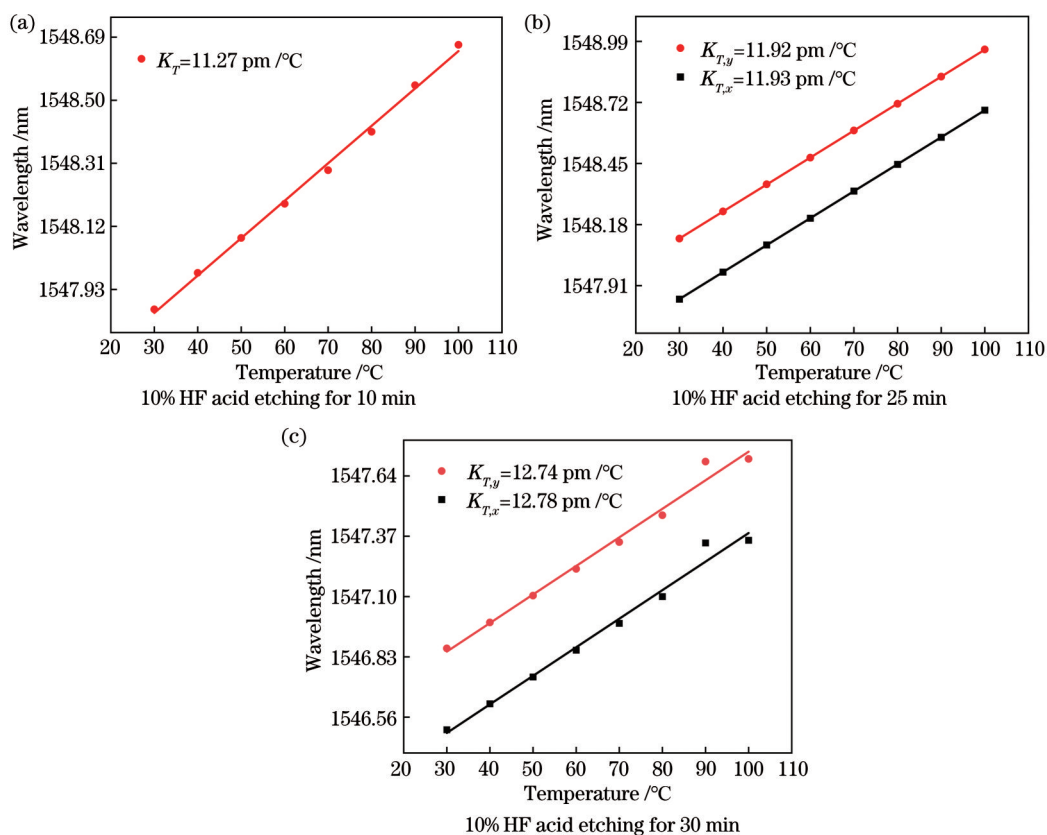


图 7 X 形 SH-FBG 的温度响应特性。(a)~(c) 图 6(a)~(c) 光谱对应的 FBG 波长与温度的变化关系

Fig. 7 Temperature response characteristics of X-shaped SH-FBG. (a)~(c) Relationship between FBG wavelength and temperature corresponding to spectra in Fig. 6(a)~(c)

通过以上分析可知, 当折射率和温度同时变化时, X 形光纤传感器对应于两种偏振的模式, 对外部折射率变化的响应不同, 但对温度的响应相同。原因是 X 形 SH-FBG 传感器的两个偏振态是几何双折射产生的, 光纤的模式能量限制在光纤内部, 分布特性大体相同, 因而 X 形光纤传感器双折射反射峰的波长差是不受温度影响的, 因此所设计的传感器可用于与温度无关的折射率传感。注意到, 三个 X 形 SH-FBG 的温度灵敏度略有不同, 这是因为腐蚀时间不同导致包裹纤芯的纯石英外壁厚度不同, 温度变化时光纤横向变形导致热应力分布变化不

同, 由于弹光效应, 温度对光纤基模有效折射率变化的贡献也不同。

不同结构的裸露纤芯微结构光纤 FBG 折射率传感器相继被报道, 它们的折射率灵敏度如表 1 所示。所设计的 X 形 SH-FBG 折射率传感器在 1.333~1.340 折射率范围(水的折射率附近), 得到了 15.1 nm/RIU 的折射率灵敏度。通常情况下, 这种基于倏逝场的 FBG 折射率传感器在越接近石英折射率 1.444 时, 越容易获得高灵敏度。所设计的 X 形 SH-FBG 传感器与文献报道的实验结果相比, 在更低的折射率范围取得更高的折射率灵敏度。

表 1 不同裸露纤芯微结构 FBG 折射率灵敏度对比

Table 1 Comparison of refractive index sensitivity of FBG with different exposed-core microstructures

Device structure	Refractive index range	Refractive index sensitivity / (nm·RIU ⁻¹)	Reference
Structure 1	1.340–1.390	0.4	[22]
Structure 2	1.330–1.380	1.1	[29]
Structure 3	1.333–1.345	4.1	[30]
Structure 4	1.333–1.340	15.1	This work

5 总 结

通过侧面抛磨法和腐蚀法去除边孔光纤包层,实现探针结构的 D 形和 X 形横截面的光纤折射率传感器。实验所得的 D 形 SH-FBG 传感器保留一个空气孔,可以保持良好的机械性能,抛磨损耗约为 -4 dB 时,在 1.380 RI 附近获得 24.0 nm/RIU 的折射率灵敏度。通过化学腐蚀法获得的 X 形 SH-FBG 传感器在 1.333~1.340 折射率范围内的最高灵敏度可达 15.1 nm/RIU。根据 X 形 SH-FBG 传感器的两种偏振态对折射率的响应不同,但对温度的响应相同的特点,可实现与温度无关的 X 形 SH-FBG 折射率传感。两种 FBG 折射率传感器利用大空气孔的结构优势,均可以在微流系统中得到进一步发展应用,有望实现在线检测和给药的功能,以解决传统光纤折射率传感器中存在的诊疗一体化问题。所设计的传感器具有结构简单、设备易于实现和稳定性好等优点,在生物化学和医学等传感领域中具有良好的应用潜力。

参 考 文 献

- [1] Volanthen M, Geiger H, Trundle K J. Fiber Bragg grating sensors[J]. Proceedings of SPIE, 1997, 3099: 340-347.
- [2] Chen J, Guo Y X, Zhang L P. A glass-fiber packaged fiber Bragg grating strain sensor[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(9): 090601.
陈剑, 郭永兴, 张礼朋. 一种玻璃纤维封装的光纤布拉格光栅应变传感器[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(9): 090601.
- [3] Zhang X, Hou M S, Liu Z C, et al. Surface reconstruction algorithm of plate-shell structure based on fiber Bragg grating sensor[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(9): 090603.
张旭, 侯茂盛, 刘智超, 等. 基于光纤布拉格光栅传感器的板壳结构曲面重构算法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(9): 090603.
- [4] Geng J, Zhu X J, Zhang G A, et al. Bandwidth tunable microfiber-assisted mach-zehnder interferometer based on tapered-drawing fiber Bragg grating[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(3): 0306004.
耿健, 朱晓军, 章国安, 等. 基于光纤布拉格光栅拉锥的带宽可调微光纤马赫-曾德尔干涉仪[J]. 光学学报, 2019, 39(3): 0306004.
- [5] Meng H Y, Shen W, Zhang G B, et al. Fiber Bragg grating-based fiber sensor for simultaneous measurement of refractive index and temperature[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2010, 150(1): 226-229.
- [6] Han M, Guo F, Lu Y. Optical fiber refractometer based on cladding-mode Bragg grating[J]. Optics Letters, 2010, 35(3): 399-401.
- [7] Fang X, Liao C R, Wang D N. Femtosecond laser fabricated fiber Bragg grating in microfiber for refractive index sensing[J]. Optics Letters, 2010, 35(7): 1007-1009.
- [8] Asseh S A, Sandgren H, Ahlfeldt B A. Fiber optical Bragg grating refractometer[J]. Fiber and Integrated Optics, 1998, 17(1): 51-62.
- [9] Ran Y, Tan Y N, Sun L P, et al. 193 nm excimer laser inscribed Bragg gratings in microfibers for refractive index sensing[J]. Optics Express, 2011, 19(19): 18577-18583.
- [10] Shu X W, Huang D X. Highly sensitive chemical sensor based on the measurement of the separation of dual resonant peaks in a 100- μm -period fiber grating[J]. Optics Communications, 1999, 171(1/2/3): 65-69.
- [11] Bhatia V, Vengsarkar A M. Optical fiber long-period grating sensors[J]. Optics Letters, 1996, 21(9): 692-694.
- [12] Zhou K, Chen X, Zhang L, et al. High-sensitivity optical chemsensor based on etched D-fibre Bragg gratings[J]. Electronics Letters, 2004, 40(4): 232-234.
- [13] Chryssis A N, Saini S S, Lee S M, et al. Detecting hybridization of DNA by highly sensitive evanescent field etched core fiber Bragg grating sensors[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2005, 11(4): 864-872.

- [14] Saini S S, Stanford C, Lee S M, et al. Monolayer detection of biochemical agents using etched-core fiber Bragg grating sensors[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2007, 19(18): 1341-1343.
- [15] Chen N, Yun B F, Wang Y P, et al. Theoretical and experimental study on etched fiber Bragg grating cladding mode resonances for ambient refractive index sensing[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2007, 24(3): 439-445.
- [16] Dong L, Cruz J L, Reekie L, et al. Tuning and chirping fiber Bragg gratings by deep etching[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1995, 7(12): 1433-1435.
- [17] Huang X F, Chen Z M, Shao L Y, et al. Design and characteristics of refractive index sensor based on thinned and microstructure fiber Bragg grating[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(4): 504-511.
- [18] Dai J X, Yang M H, Li X B, et al. Magnetic field sensor based on magnetic fluid clad etched fiber Bragg grating[J]. *Optical Fiber Technology*, 2011, 17(3): 210-213.
- [19] Fan X D, White I M, Shopova S I, et al. Sensitive optical biosensors for unlabeled targets: a review[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2008, 620(1/2): 8-26.
- [20] Liao C R, Wang Q, Xu L, et al. D-shaped fiber grating refractive index sensor induced by an ultrashort pulse laser[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(7): 1525-1529.
- [21] Lowder T L, Gordon J D, Schultz S M, et al. Volatile organic compound sensing using a surface-relief D-shaped fiber Bragg grating and a polydimethylsiloxane layer[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(17): 2523-2525.
- [22] Frazão O, Martynkien T, Baptista J M, et al. Optical refractometer based on a birefringent Bragg grating written in an H-shaped fiber[J]. *Optics Letters*, 2008, 34(1): 76-78.
- [23] Zhang Q, Hu L L, Qi Y F, et al. Fiber-optic refractometer based on a phase-shifted fiber Bragg grating on a side-hole fiber[J]. *Optics Express*, 2015, 23(13): 16750-16759.
- [24] Ran Y, Jin L, Sun L P, et al. Bragg gratings in rectangular microfiber for temperature independent refractive index sensing[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(13): 2649-2651.
- [25] Tsigaridas G, Polyzos D, Ioannou A, et al. Theoretical and experimental study of refractive index sensors based on etched fiber Bragg gratings[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2014, 209: 9-15.
- [26] Rao Y J, Webb D J, Jackson D A, et al. In-fiber Bragg-grating temperature sensor system for medical applications[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, 15(5): 779-785.
- [27] Dong X W, Zhao R F. Detection of liquid-level variation using a side-polished fiber Bragg grating[J]. *Optics & Laser Technology*, 2010, 42(1): 214-218.
- [28] Kumar J, Mahakud R, Prakash O, et al. Study on hydrofluoric acid-based clad etching and chemical sensing characteristics of fiber Bragg gratings of different reflectivity fabricated under different UV exposure times[J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(5): 054402.
- [29] Warren-Smith S C, Monroe T M. Exposed core microstructured optical fiber Bragg gratings: refractive index sensing[J]. *Optics Express*, 2014, 22(2): 1480-1489.
- [30] Li J, Wang H, Sun L P, et al. Etching Bragg gratings in Panda fibers for the temperature-independent refractive index sensing[J]. *Optics Express*, 2014, 22(26): 31917-31923.