

基于包层腐蚀优化折射率敏感的光子晶体光纤 马赫-曾德尔干涉仪

黄国家¹, 马诗章², 王恋¹, 李仕平¹, 冯文林^{2,3*}

¹广州特种承压设备检测研究院, 广东 广州 510663;

²重庆理工大学理学院, 重庆 400054;

³绿色能源材料技术与系统重庆市重点实验室, 重庆 400054

摘要 为了减小光纤包层厚度并提升干涉仪的折射率灵敏度,设计一种结构简单、容易制作的光子晶体光纤马赫-曾德尔干涉仪。首先,在两根单模光纤之间熔接一段光子晶体光纤(PCF);然后,在自制的腐蚀槽中采用氢氟酸进行化学腐蚀来减小包层厚度,并通过控制变量的方法,研究光子晶体光纤的长度、腐蚀时间,以及环境温度对制得的干涉仪灵敏度的影响。结果表明,随着光纤长度增加,制得的干涉仪的灵敏度提高。将 3 cm 的 PCF 在质量分数为 40% 的氢氟酸溶液中腐蚀 40 min 后,制得的干涉仪的灵敏度增加了约 3 倍。环境温度对制得的干涉仪的灵敏度几乎无影响。

关键词 光纤光学; 光子晶体光纤; 马赫-曾德尔干涉仪; 腐蚀优化; 消逝场

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.170629

Photonic Crystal Fiber Mach-Zehnder Interferometer Based on Refractive Index Sensitivity of Cladding Corrosion Optimization

Huang Guojia¹, Ma Shizhang², Wang Lian¹, Li Shiping¹, Feng Wenlin^{2,3*}

¹Guangzhou Special Pressure Equipment Inspection and Research Institute, Guangzhou, Guangdong 510663, China;

²College of Science, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China;

³Chongqing Key Laboratory of Green Energy Materials Technology and Systems, Chongqing 400054, China

Abstract In order to reduce the thickness of fiber cladding and improve the refractive index sensitivity of the interferometer, a simple photonic crystal fiber (PCF) Mach-Zehnder interferometer which is easy to fabricate is developed. First, a PCF is fused between two single-mode fibers; then, in a self-made etching tank, hydrofluoric acid is used to reduce the thickness of the cladding. The effects of the length, corrosion time, and ambient temperature on the sensitivity of PCFs are studied by controlling the above variable factors. The results show that the sensitivity increases with the increasing length of the optical fiber, and increases about three times after 40 min corrosion in hydrofluoric acid solution with mass fraction of 40% for 3 cm PCF. The ambient temperature has little influence on the sensitivity of the PCF Mach-Zehnder interferometer.

Key words fiber optics; photonic crystal fiber; Mach-Zehnder interferometer; corrosion optimization; evanescent field

OCIS codes 060.5295; 060.2370; 350.3850

1 引言

光纤传感技术的迅速发展始于 1977 年,如今日

趋成熟,相位调制型光纤传感器是近年来最热门的光纤传感技术研究方向之一。其基本原理是,利用被测对象对敏感元件的作用,使敏感元件的折射率

收稿日期: 2019-05-09; 修回日期: 2019-06-06; 录用日期: 2019-06-24

基金项目: 国家自然科学基金(51574054)、国家质检总局科技计划(2017QK109)、广州市科技计划(201804010395)、重庆市高校创新团队(CXTDX201601030)

* E-mail: wenlinfeng@126.com

或者传播常数发生变化,从而导致光的相位产生变化,通过检测光的相位变化得到被测对象的信息。其中,光纤折射率传感器具有体积小、设计灵活、免疫电磁干扰等优点,可实现远程和在线检测。由于许多基质的检测都可以利用折射率来进行测量,因此光纤折射率传感器在生物和化学研究方面极具潜力目前,在不同的技术基础上已发展起来各种基于光纤的折射率传感器,如 D 型光纤设备^[1]、表面布拉格光栅^[2]、长周期光纤光栅^[3]、光纤布拉格光栅^[4]、倾斜光纤光栅^[5]、微光纤谐振腔^[6]、金属包层锥型光纤^[7]、光子晶体光纤干涉仪^[8]等。

在光纤中,光子晶体光纤(PCF)拥有独特的优势,能在很大范围内支持光的单模传输,同时还具有可控的非线性、低弯曲损耗、大模场和可调节的奇异性色散等物理特性。因此,近年来 PCF 干涉仪被广泛研究^[9],并已应用于不同领域,如应变、温度传感等,或者通过光纤与材料的结合,制成折射率传感型的气体、湿度、pH 等传感器^[10-13]。2017 年,梁红勤等^[14]通过有限单元法(FEM)数值模拟研究了基于双芯 PCF 的椭圆侧芯表面等离子体共振(SPR)折射率传感结构,该结构在 1.45~1.50 折射率间的灵敏度为 $10412 \text{ nm} \cdot \text{RIU}^{-1}$ 。2018 年,杨远洪等^[15]对基于实芯保偏 PCF 的干涉型 PCF 陀螺技术进行研究,开发了专用的制备技术、耦合技术和熔接工艺。近年来,一种利用单模光纤(SMF)和 PCF 构成的干涉仪,因制造简单、结构稳定、经济高效而受到了广泛的关注^[16-17],其制作方式是将 PCF 熔接到两根单模光纤之间。由于包层模式对外界环境敏感,因此通过消逝场和包层外样品的相互作用,即可实现折射率的传感测量。若对包层镀上敏感膜,消逝场通过膜与其他参量相互作用,这样就能通过敏感膜充当媒介实现间接测量。通过分析可知,这种光纤折射率改变型传感器的工作原理与包层消逝场有关,然而过大的光纤尺寸会限制包层消逝场,进而影响传感器的折射率灵敏度。因此,通过腐蚀包层来增强消逝场的激发,有助于提高光纤传感器的折射率灵敏度。

本文采用化学腐蚀法来提高干涉仪的灵敏度。腐蚀液采用质量分数为 40% 的氢氟酸(HF)溶液,通过控制 PCF 的长度和腐蚀时间,研究包层腐蚀对提升 PCF 马赫-曾德尔干涉仪灵敏度的作用。

2 实验系统与步骤

2.1 腐蚀装置

图 1 为腐蚀装置示意图。装置的制作步骤为:

1)用透明胶包裹玻片,以免受 HF 的腐蚀;2)在玻片表面涂抹两次热熔胶,在表面构建一个腐蚀槽。因为腐蚀槽的间距较小,所以腐蚀液滴入腐蚀槽后在表面张力的作用下不会向两边流动,这样就可以控制腐蚀液滴入的长度。

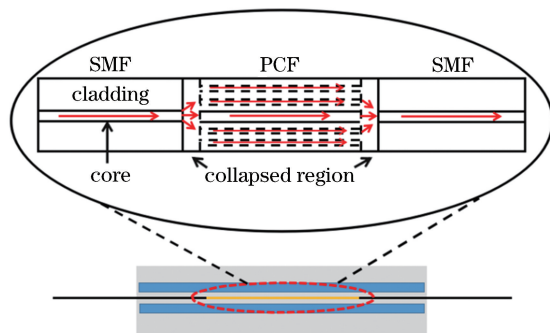


图 1 腐蚀装置示意图

Fig. 1 Diagram of corrosion device

2.2 实验步骤

腐蚀液采用质量分数为 40% 的 HF 溶液。首先,将清洗干净的干涉仪放入腐蚀槽中,采用移液器将腐蚀液滴入腐蚀槽中,腐蚀之后,取出干涉仪,用去离子水清洗干净。腐蚀液倒入事先配制好的 GaCl_2 溶液中中和多余的氟离子。

3 实验结果与讨论

3.1 不同长度 PCF 对干涉仪折射率灵敏度的影响

设置 PCF 的长度分别为 2, 3, 4, 5 cm, 配制质量分数为 0~25% 的 NaCl 溶液,测试不同 PCF 长度的干涉仪对外界折射率的灵敏度。

从图 2 可以看出,对于 PCF 长度为 2 cm 的干涉仪而言,随着外界折射率的增大,光谱偏移呈现红移(往波长增大的方向移动)趋势,经过拟合可知,光谱偏移与外界折射率呈线性关系,拟合度 $R^2 = 0.986$ 。从表 1 可以看出,由不同长度的 PCF 构成的干涉仪对外界折射率的灵敏度不一,随着 PCF 长度增加,灵敏度增大。

表 1 由不同长度的 PCF 构成的干涉仪的折射率灵敏度

Table 1 Refractive index sensitivity of PCF with different lengths

PCF length /cm	Sensitivity /($\text{nm} \cdot \text{RIU}^{-1}$)
2	184.307
3	190.174
4	206.179
5	227.711

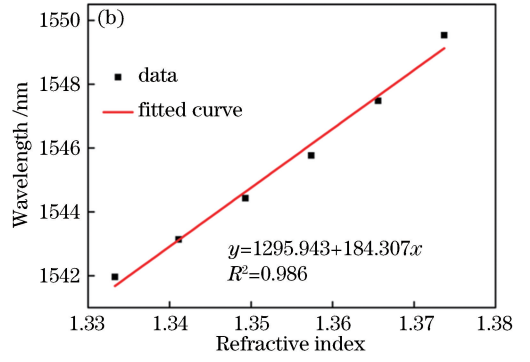
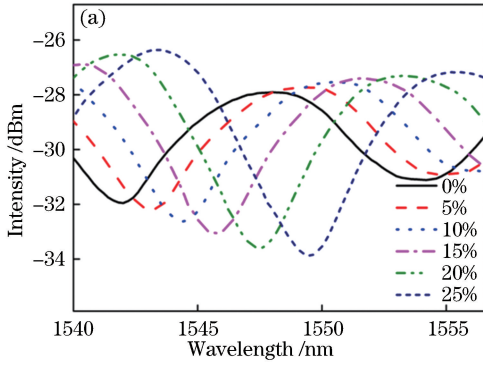


图2 由2 cm长的PCF构成的干涉仪对外界折射率的灵敏度。(a)波长偏移图;(b)波长偏移拟合图

Fig. 2 Sensitivity of 2 cm PCF to external refractive index. (a) Image of wavelength shift; (b) fitting image of wavelength shift

从图1可以看出,光从左边的单模光纤进入,在单模光纤与PCF的熔接处有一部分光被激发至包层中传输,在第二个熔接处发生会聚,产生马赫-曾德尔干涉,其干涉光强为^[18]

$$I = I_{\text{cor}} + I_{\text{cla}} + 2\sqrt{I_{\text{cor}}I_{\text{cla}}}\cos\Delta\varphi, \quad (1)$$

式中: I_{cor} 和 I_{cla} 分别为PCF中传输的芯层光强与包层中的光强; $\Delta\varphi$ 为两束光的相位差,可表示为

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi\Delta n_{\text{eff}}L}{\lambda}, \quad (2)$$

式中: λ 为传输光的波长; L 为两个塌陷层之间的干涉长度; Δn_{eff} 是光纤纤芯有效折射率 $n_{\text{eff}}^{\text{cor}}$ 和包层有效折射率 $n_{\text{eff}}^{\text{cla}}$ 的差值。当 $\Delta\varphi = (2m+1)\pi$ 时,发生干涉相消, m 阶干涉波谷可以表示为

$$\lambda_m = \frac{2\Delta n_{\text{eff}}L}{2m+1}. \quad (3)$$

对(3)式求 λ 的全微分,可得

$$d\lambda_m = \frac{2}{2m+1}(Ld\Delta n_{\text{eff}} + \Delta n_{\text{eff}}dL). \quad (4)$$

由于 L 在测量过程中不会发生变化,始终保持常数,所以 $dL=0$ 。将(3)式代入(4)式,可得

$$d\lambda_m = \frac{\lambda_m}{\Delta n_{\text{eff}}}d\Delta n_{\text{eff}}. \quad (5)$$

由于包层模式的有效折射率是波长和外界折射率的函数,即 $n_{\text{cla}}(\lambda, n_{\text{ext}})$,其中 n_{ext} 是外界折射率,而纤芯模式只是波长的函数,即 $n_{\text{cor}}(\lambda)$,则有 $\Delta n_{\text{eff}} = n_{\text{cor}}(\lambda) - n_{\text{cla}}(\lambda, n_{\text{ext}})$,且满足

$$d\Delta n_{\text{eff}} = \frac{\partial\Delta n_{\text{eff}}}{\partial\lambda}d\lambda + \frac{\partial\Delta n_{\text{eff}}}{\partial n_{\text{ext}}}dn_{\text{ext}}, \quad (6)$$

$$\frac{\partial\Delta n_{\text{eff}}}{\partial n_{\text{ext}}} = \frac{\partial\Delta n_{\text{eff}}}{\partial n_{\text{cla}}} \frac{\partial n_{\text{cla}}}{\partial n_{\text{ext}}}. \quad (7)$$

将(7)式代入(6)式,再将(6)式代入(5)式,可得

$$\left(1 - \frac{\lambda_m}{\Delta n_{\text{eff}}} \frac{\partial\Delta n_{\text{eff}}}{\partial\lambda}\right)d\lambda = \frac{\lambda_m}{\Delta n_{\text{eff}}} \frac{\partial\Delta n_{\text{eff}}}{\partial n_{\text{cla}}} \frac{\partial n_{\text{cla}}}{\partial n_{\text{ext}}}dn_{\text{ext}}, \quad (8)$$

因为 $\frac{\partial\Delta n_{\text{eff}}}{\partial n_{\text{cla}}} = -1$,则由(8)式可得

$$\frac{d\lambda_m}{dn_{\text{ext}}} = \frac{-\lambda_m}{1 - \frac{\lambda_m}{\Delta n_{\text{eff}}} \frac{\partial\Delta n_{\text{eff}}}{\partial\lambda}} \frac{\partial\Delta n_{\text{eff}}}{\partial n_{\text{ext}}} = \frac{-2L}{1 - \frac{\lambda_m}{\Delta n_{\text{eff}}} \frac{\partial\Delta n_{\text{eff}}}{\partial\lambda}} \frac{\partial\Delta n_{\text{cla}}}{\partial n_{\text{ext}}}. \quad (9)$$

(9)式即为包层-纤芯模式的马赫-曾德尔干涉结构对外界折射率灵敏度的计算公式^[19]。由(9)式可知,该灵敏度与干涉长度成正比。图3是不同长度的PCF与干涉仪灵敏度的关系,随着PCF长度增加,干涉仪的折射率灵敏度增大。经过拟合可知,PCF长度与干涉仪的折射率灵敏度成正比,拟合度 $R^2=0.917$,与(9)式相符。

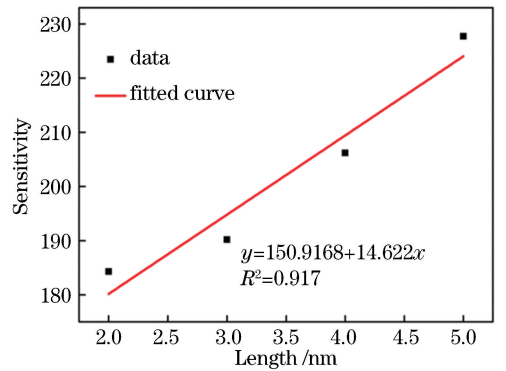


图3 不同长度的PCF与干涉仪折射率灵敏度的关系

Fig. 3 Relationship between sensitivity and length of PCF

3.2 不同长度的PCF腐蚀前后对干涉仪折射率灵敏度的影响

保持腐蚀时间为20 min,对长度分别为2,3,4,5 cm的PCF进行腐蚀,探究其对干涉仪折射率灵敏度的影响。从图4可以看出,对于由3 cm的PCF制成的干涉仪,随着外界折射率的增大,光谱偏移呈现红移趋势,经过拟合可知,光谱偏移与外界折射率呈线性关系,拟合度 $R^2=0.999$ 。从表2可以看出,

经过腐蚀之后,由不同长度 PCF 构成的干涉仪,其折射率灵敏度均得到了提升:由 2 cm 的 PCF 构成的干涉仪,折射率灵敏度从 184.307 nm · RIU⁻¹ 提高到 214.071 nm · RIU⁻¹;由 3 cm 的 PCF 构成的干涉仪,折射率灵敏度从 190.174 nm · RIU⁻¹ 提高到 254.717 nm · RIU⁻¹;由 4 cm 的 PCF 构成的干

涉仪,折射率灵敏度从 206.179 nm · RIU⁻¹ 提高到 274.441 nm · RIU⁻¹;由 5 cm 的 PCF 构成的干涉仪,折射率灵敏度从 227.71 nm · RIU⁻¹ 提高到 242.24 nm · RIU⁻¹。需要指出的是,本研究是从 PCF 的角度提升传感器折射率灵敏度,在实际应用中,也可从敏感材料的改性和结构两个方面进行提升。

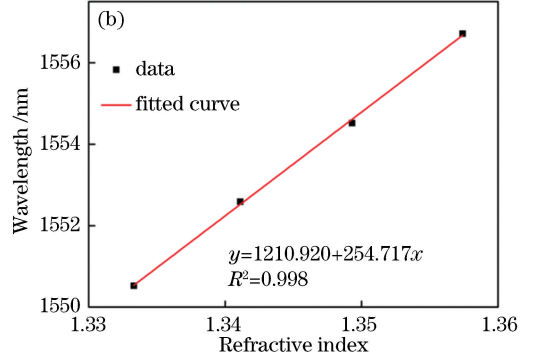
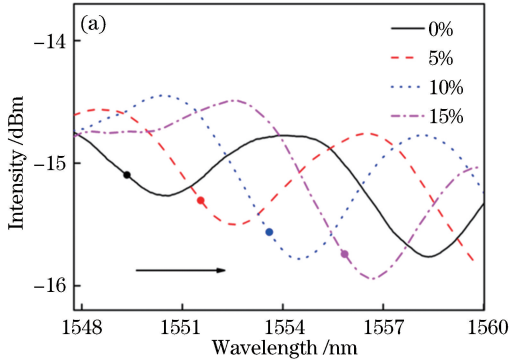


图 4 由腐蚀 20 min 的 3 cm PCF 构成的干涉仪对外界折射率的灵敏度。(a)波长偏移图;(b)波长偏移拟合图
Fig. 4 Sensitivity of interferometer with 3 cm PCF to external refractive index after corrosion for 20 min.

(a) Image of wavelength shift; (b) fitting image of wavelength shift

表 2 由长度 3 cm 的腐蚀前后的 PCF 构成的干涉仪对外界折射率的灵敏度

Table 2 Sensitivity of interferometer with 3 cm PCF to external refractive index before and after corrosion

Length / cm	Sensitivity before corrosion / (nm · RIU ⁻¹)	Sensitivity after corrosion / (nm · RIU ⁻¹)
2	184.307	214.071
3	190.174	254.717
4	206.179	274.441
5	227.711	242.246

$$\Delta n = (n_{\text{eff}}^{\text{cor}} - n_{\text{eff}}^{\text{cla}'}) - (n_{\text{eff}}^{\text{cor}} - n_{\text{eff}}^{\text{cla}}) = n_{\text{eff}}^{\text{cla}} - n_{\text{eff}}^{\text{cla}'}, \quad (11)$$

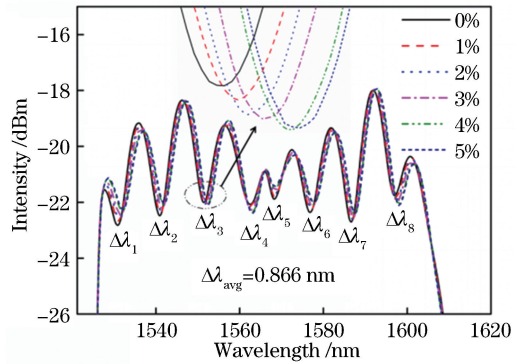


图 5 由未腐蚀的 3 cm PCF 构成的干涉仪在不同 NaCl 溶液中的折射率灵敏度
Fig. 5 Refractive index sensitivity of interferometer with 3 cm PCF in NaCl solution before corrosion

表 3 3 cm PCF 在不同腐蚀时间下的光谱数据

Table 3 Spectral data of 3 cm PCF with different corrosion time

Corrosion time / min	Number of detectable troughs	Average spectral shift / nm
0	8	0.866
10	4	1.372
20	6	1.425
30	5	2.192
40	5	2.638
50	2	2.223

3.3 PCF 腐蚀时间对干涉仪折射率灵敏度的影响

选用长度 3 cm 的 PCF 构成干涉仪,研究不同腐蚀时间对干涉仪折射率灵敏度的影响。为了观察多个干涉波谷的移动,需要减小外界折射率的变化,因此将测试用的 NaCl 溶液浓度设置为 0~5%。

在图 5 中, $\Delta\lambda_i$ ($i = 1, 2, \dots, 8$) 表示第 i 个检测波谷的光谱偏移, $\Delta\lambda_{\text{avg}}$ 为平均光谱偏移。从图 5 和表 3 可以看出,随着腐蚀时间延长,当外界折射率变化一样时,光谱的偏移呈现增大的趋势。由(3)式可以推导出

$$\Delta\lambda_m = \frac{2\Delta nL}{2m + 1}, \quad (10)$$

式中: Δn 为纤芯和包层有效折射率之差的变化量。因为纤芯的 $n_{\text{eff}}^{\text{cor}}$ 是不变的,所以有

式中： $n_{\text{eff}}^{\text{cl}a'}$ 是变化之后的包层有效折射率。 $n_{\text{eff}}^{\text{cl}a'}$ 的变化是由包层腐蚀和外界折射率变化引起的。当外界折射率变化一样时，随着腐蚀时间延长，包层腐蚀程度增加， $n_{\text{eff}}^{\text{cl}a'}$ 减小， Δn 增大，所以光谱的偏移呈现增大的趋势。

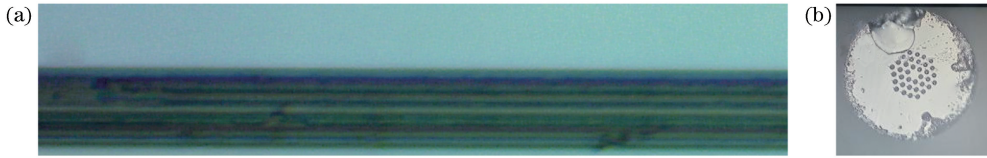


图6 PCF 形貌图。(a)腐蚀 60 min 后的光纤显微镜图；(b)未腐蚀端面图

Fig. 6 Patterns of PCF. (a) Microscope image of fiber after corrosion for 60 min; (b) end face before corrosion

将由长度 2 cm 的 PCF 构成的干涉仪置于 30~60 °C 的环境中，研究环境温度对波长偏移的影响。通过图 7 可以看出，环境温度对于波长偏移的影响很小，说明该干涉仪对温度不敏感。上述实验的折射率均是在室温下测量的，因此温度对实验结果的影响可以忽略。在稳定性方面，需要对光纤结构进行固定，以保证光纤在传感过程中不发生弯曲，避免引入弯曲敏感性，从而保证传感器的工作稳定性。

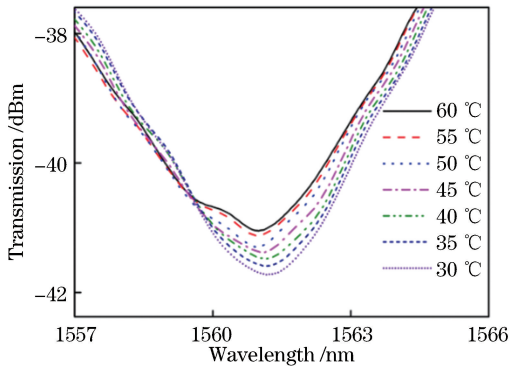


图7 波长偏移量随温度的变化

Fig. 7 Variation of wavelength offset with temperature

4 结 论

利用 PCF 与单模光纤构建马赫-曾德尔干涉结构，其对外界折射率的灵敏度与传感长度成正比。采用质量分数为 40% 的 HF 溶液，通过化学腐蚀的方法减小 PCF 包层的厚度，研究了由不同长度的 PCF 构成的马赫-曾德尔干涉仪腐蚀前后的折射率灵敏度变化。结果表明，腐蚀 PCF 可以提高该干涉结构对外界折射率的灵敏度。当 PCF 长度一定时，随着腐蚀时间延长，灵敏度呈现增大趋势，但当腐蚀达到一定程度后，会导致光纤直径过小，从而使结构遭到破坏。对于由 3 cm 的 PCF 构成的马赫-曾德尔干涉仪，在质量分数为 40% 的 HF 溶液中腐蚀

本文中使用的 PCF 包层直径为 $(125 \pm 2) \mu\text{m}$ ，纤芯直径为 $(9.5 \pm 0.5) \mu\text{m}$ ，纤芯外有 3 层空气孔（图 6），呈正六边形结构排列。当腐蚀时间延长到 60 min 时，由于此时光纤直径过小（约 $30 \mu\text{m}$ ），当从腐蚀液中取出 PCF 时，其在液体张力的作用下折断。

40 min 后，灵敏度增加了约 3 倍。在 30~60 °C 条件下，环境温度对干涉仪的折射率灵敏度几乎无影响，说明此马赫-曾德尔干涉仪对温度不敏感。通过对腐蚀工艺的优化，可制造出在较宽温度应用范围下灵敏度更高、干涉更为明显的 PCF 干涉仪。

参 考 文 献

- [1] Violakis G, Korakas N, Pissadakis S. Differential loss magnetic field sensor using a ferrofluid encapsulated D-shaped optical fiber [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(1): 142-145.
- [2] Lin C P, Liao C R, Wang J, *et al.* Fiber surface Bragg grating waveguide for refractive index measurements [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(9): 1684-1687.
- [3] An J, Wang Y J, Li F, *et al.* Highly sensitive LPG temperature sensor employing polyamic acid-coating [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(8): 0822002.
- [4] Peng X L, Li B, Li Y L. Research progress of refractive index and concentration sensors based on micro-nanofiber Bragg grating [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(12): 120010. 彭星玲, 李兵, 李玉龙. 微纳光纤布拉格光栅折射率与浓度传感器研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(12): 120010.
- [5] Zhang Y J, Wang M, Wang Z F, *et al.* Research progress of tilted fiber Bragg gratings [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(7): 070005. 张宇菁, 王蒙, 王泽锋, 等. 倾斜光纤光栅研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(7): 070005.
- [6] Xu F, Brambilla G. Demonstration of a

- refractometric sensor based on optical microfiber coil resonator [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(10): 101126.
- [7] Kou J L, Qiu S J, Xu F, *et al.* Miniaturized metal-dielectric-hybrid fiber tip grating for refractive index sensing [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(22): 1712-1714.
- [8] Yang Y H, Liu S, Lu L, *et al.* Temperature-insensitive pressure sensing technology based on polarization maintaining photonic crystal fiber Sagnac interferometer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(8): 0802002.
杨远洪, 刘硕, 陆林, 等. 基于保偏光子晶体光纤 Sagnac 干涉仪的温度不敏感压力传感技术 [J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(8): 0802002.
- [9] Ma J, Yu H H, Xiong J G, *et al.* Research progress of photonic crystal fiber sensors [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(7): 070006.
马健, 余海湖, 熊家国, 等. 光子晶体光纤传感器研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(7): 070006.
- [10] Li T Q, Mao X J, Lei J, *et al.* Analysis and comparison of solid-state lasers and fiber lasers on the coupling of rod-type photonic crystal fiber [J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(6): 958-973.
李天琦, 毛小洁, 雷健, 等. 固体激光器与光纤激光器对光子晶体光纤棒耦合的分析与对比 [J]. *中国光学*, 2018, 11(6): 958-973.
- [11] Fan Z K, Zhang Z C, Wang B Z, *et al.* Research progress of photonic crystal fiber refractive index sensors based on surface plasmon resonance effect [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(7): 070004.
范振凯, 张子超, 王保柱, 等. 基于表面等离子体共振效应的光子晶体光纤折射率传感器的研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(7): 070004.
- [12] Li S S, Song X S, Xu F, *et al.* Photonic crystal fibre based modal interferometer with four-beam path interference [J]. *Electronics Letters*, 2011, 47(12): 719-720.
- [13] Ma S Z, Feng W L, Peng Z Q, *et al.* Carbon monoxide gas sensor based on CuO/PANI coated photonic crystal fiber [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(5): 050603.
马诗章, 冯文林, 彭志清, 等. 基于氧化铜/聚苯胺包覆光子晶体光纤的一氧化碳传感器 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(5): 050603.
- [14] Liang H Q, Liu B, Chen J, *et al.* High sensitive elliptic side core surface plasmon resonance refractive index sensing characteristics based on dual-core photonic crystal fiber [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(9): 090601.
梁红勤, 刘彬, 陈佳, 等. 基于双芯光子晶体光纤的高灵敏度椭圆侧芯表面等离子体共振折射率传感特性 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(9): 090601.
- [15] Yang Y H, Yang F L, Lu L, *et al.* Research on interferometer photonic crystal fiber optic gyroscope technology [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 0328004.
杨远洪, 杨福铃, 陆林, 等. 干涉型光子晶体光纤陀螺仪技术研究 [J]. *光学学报*, 2018, 38(3): 0328004.
- [16] Feng D, Zhao Z Q, Fang Q M, *et al.* Analysis of end face damage in lapping for photonic crystal fiber [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(11): 2895-2903.
冯迪, 赵正琪, 房启蒙, 等. 光子晶体光纤端面研磨损伤的分析 [J]. *光学精密工程*, 2017, 25(11): 2895-2903.
- [17] Villatoro J, Minkovich V P, Pruneri V, *et al.* Simple all-microstructured-optical-fiber interferometer built via fusion splicing [J]. *Optics Express*, 2007, 15(4): 1491-1496.
- [18] Huang G J, Peng Z Q, Yang X Z, *et al.* Sensing performance of hydrogen sulfide gas based on Cu/graphene composite membrane coated photonic crystal fiber [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(3): 0306001.
黄国家, 彭志清, 杨晓占, 等. 基于纳米铜/石墨烯包覆光子晶体光纤的硫化氢气体传感性能研究 [J]. *光子学报*, 2019, 48(3): 0306001.
- [19] Wu H B. Fabricating of all-optical fiber sensors and its sensing application research [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2014.
吴鸿宾. 全光纤传感器的制备与传感特性研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2014.