

熔融拉锥型光子晶体光纤马赫-曾德尔干涉仪传感特性

纪玉申¹ 付广伟^{1,2} 付兴虎^{1,2} 申 远¹ 毕卫红^{1,2}

(¹ 燕山大学信息科学与工程学院, 河北 秦皇岛 066004
² 河北省特种光纤与光纤传感重点实验室, 河北 秦皇岛 066004)

摘要 基于熔融拉锥型光子晶体光纤(PCF)的马赫-曾德尔(M-Z)干涉仪是在一段实芯 PCF 两端分别熔接单模光纤后进行熔融拉锥制作而成的,该传感器透射光谱的干涉条纹对比度可达 2.23 dB。利用该传感器实现了对不同质量浓度氯化钠溶液传输光谱的检测,研究了其传输光谱与外界折射率的响应关系。实验结果表明,在折射率变化范围为 1.333~1.349 时,该传感器对于不同质量浓度氯化钠溶液的折射率测量灵敏度为 210.075 nm/RIU;在温度测量范围为 20 ℃~70 ℃时,其温度灵敏度约为 0.0018 nm/℃,在测量中能够克服温度交叉敏感问题。

关键词 传感器;光子晶体光纤;熔融拉锥;干涉仪;折射率

中图分类号 TN253 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.1006005

Sensing Characteristics of Mach-Zehnder Interferometer Based on the Fused Tapered Photonic Crystal Fiber Sensor

Ji Yushen¹ Fu Guangwei^{1,2} Fu Xinghu^{1,2} Shen Yuan¹ Bi Weihong^{1,2}

(¹ School of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China
² Key Laboratory for Special Fiber and Fiber Sensor of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

Abstract Based on the fused tapered photonic crystal fiber (PCF), a Mach-Zehnder interferometer is proposed. The both ends of PCF is joined in a splice with a single-mode fiber and the interference fringe contrast of the transmission spectra is 2.23 dB. The transmission spectra of sodium chloride solutions with different mass concentrations are obtained. The corresponding relationships between the transmission spectra and external refractive index are analyzed. The experimental results show that the refractive index sensitivity of the sensor is 210.075 nm/RIU in the index range of 1.333~1.349, by measuring different mass concentrations of the sodium chloride solutions. In the temperature range of 20 ℃~70 ℃, the temperature sensitivity is about 0.0018 nm/℃. This sensor is able to overcome the problem of cross sensitivity of temperature in the measurement.

Key words sensors; photonic crystal fiber; fused taper; interferometer; refractive index

OCIS codes 060.2310; 060.2370; 060.2340

1 引 言

光子晶体光纤(PCF)^[1-3]是一种新型光纤,其包层区域是由平行于光纤轴向的微孔阵列构成,其特殊的结构组成和导光机制以及具有单模光纤无可比拟的诸多优点为其在传感等领域的应用提供了广

阔的空间。近年来,随着 PCF 制备及其熔接技术的快速发展,国内外研究学者采用熔接法先后制作出多种 PCF 干涉型光纤传感器。如 Villatoroa 等^[4]采用熔接法制作而成的 PCF 干涉型马赫-曾德尔(M-Z)传感器,通过控制熔接点塌陷来激发光在

收稿日期: 2013-04-17; 收到修改稿日期: 2013-05-28

基金项目: 国家 973 计划项目(2010CB327801)、国家自然科学基金(61077067, 61205068)、河北省自然科学基金(F2011203116, F2012203148)、燕山大学博士基金项目(B768)

作者简介: 纪玉申(1986—),男,硕士研究生,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: jiyushen@163.com

导师简介: 付广伟(1974—),男,博士,副教授,主要从事光纤传感与光电检测方面的研究。E-mail: earl@ysu.edu.cn (通信联系人)

PCF 中传输的不同模式而产生干涉; Dong 等^[5]通过在单模光纤绕成的环线圈某处熔接一段高双折射 PCF 制作了一种温度不敏感的双折射光子晶体光纤 Sagnac 干涉仪, 实现了应力的绝对检测; Rao 等^[6]将一小段光子带隙光纤熔接到两根端面平行的普通单模光纤之间, 选择合适的熔接参数尽量避免空气孔塌陷制作了一种低损耗、高对比度的光子带隙光纤 F-P 干涉仪。此外, 国内外学者还采用电弧放电^[7-8]、腐蚀^[9]、CO₂ 激光照射^[10]的方式制作 M-Z 干涉仪, 实现了温度^[11-12]、折射率^[13]和应力^[14-15]等参量的检测。

本文提出一种熔融拉锥型光子晶体光纤 M-Z 干

涉仪, 研究了该干涉仪传感器对外界不同折射率环境及温度的响应特性, 其折射率测量灵敏度为 210.075 nm/RIU, 温度测量灵敏度约为 0.0018 nm/°C。该传感器结构简单, 灵敏度高, 对温度不太敏感, 在检测溶液和气体浓度等方面具有潜在的应用价值。

2 理论分析

在一段较短的 PCF 两端分别熔接单模光纤 (SMF) 后再进行拉锥, 所形成的熔融拉锥型 PCF 传感器如图 1 所示。

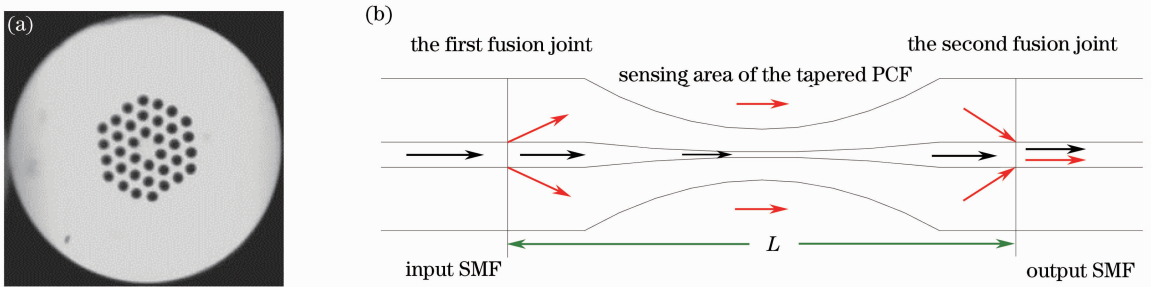


图 1 熔融拉锥型 PCF 传感器。(a) PCF 截面图; (b) 锥形 PCF 传感结构示意图

Fig. 1 Fused tapered photonic crystal fiber sensor. (a) Cross section of the PCF; (b) diagram of the tapered PCF sensing structure

定义两端熔接点之间纤芯以外传输光的区域为“锥形传感区域”。输入端 SMF 中的光束在经过第一熔接点后, 一部分光耦合至 PCF 的纤芯中以纤芯模式继续传输, 作为参考臂; 另一部分光耦合至 PCF 的锥形传感区域中以包层模式传输, 作为信号臂。随着 PCF 锥区逐渐变细, 纤芯模式逐渐向包层模式耦合过渡, 以纤芯模式传输的光能量逐渐减弱, 而在锥形传感区域以包层模式传输的光能量逐渐增强。当其传输到第二熔接点时, 锥形传感区域的包层模与 PCF 纤芯中的纤芯模在输出 SMF 中发生干涉。干涉光强和干涉的中心波长可表示为

$$I = I_1 + I_2 + 2 \sqrt{I_1 I_2} \cos \varphi, \quad (1)$$

$$\lambda_m = \frac{\Delta n_{\text{eff}} L}{m}, \quad (2)$$

式中 I 为输出总光强; I_1 、 I_2 分别为纤芯和锥形传感区域中的光强; φ 为相位差; λ_m 为 m 级干涉的中心波长; L 为干涉长度, 即两个熔接点之间的距离; Δn_{eff} 为 PCF 纤芯折射率和锥形传感区域有效折射率的差值。

当外界环境折射率发生改变时, PCF 信号臂锥形传感区域的有效折射率随着环境折射率的变化而

变化, 而纤芯折射率则保持不变; 外界折射率改变引起的波长漂移量可表示为

$$\Delta \lambda_m = \frac{(\Delta n_{\text{eff}} + \Delta n)L}{m} - \frac{\Delta n_{\text{eff}} L}{m} = \frac{\Delta n L}{m}, \quad (3)$$

式中 $\Delta \lambda_m$ 为第 m 阶干涉条纹中心波长漂移量, Δn 为外界环境折射率变化引起的折射率差值的变化量。

从(3)式中可以看出, 波长漂移量受到干涉长度 L 和折射率差值 Δn 变化的影响。在干涉长度 L 一定时, 干涉条纹中心波长的漂移量随着外界环境折射率的变化而线性变化。因此, 可以通过检测第 m 阶干涉条纹中心波长的漂移量来测量外界环境的折射率。当 PCF 实现熔融拉锥后, 干涉臂长度增加, 增大了传感区域与外界环境的耦合程度, 从而提高传感器的灵敏度。

下面讨论温度对干涉仪透射谱调制的影响。考虑到温度引起的 m 级干涉峰中心波长的漂移^[16]

$$\Delta \lambda'_m = (\alpha + p_1) \lambda_m \Delta T, \quad (4)$$

式中 α 为干涉仪材料的热膨胀系数, 而纯 SiO₂ 的热膨胀系数约为 $5 \times 10^{-7} / ^\circ\text{C}$; $p_1 = (1/\Delta n) \partial(\Delta n) / \partial T$ 为温度变化导致的两个干涉模式之间有效折射率差

的变化; ΔT 是温度的变化。

由于锥形 PCF 中的纤芯模和包层模都在无掺杂的 PCF 中传输,温度对发生干涉的纤芯模和包层模的影响是相同的,故 $p_t = 0$;而热膨胀系数 $\alpha \approx 5 \times 10^{-7} / ^\circ\text{C}$,数值很小。因此, $\Delta\lambda'_m \approx 0$ 。综上所述,该种熔融拉锥型干涉仪传感器对温度不太敏感。

3 实验过程与结果分析

3.1 传感器的制作

实验中所用的 PCF 为 SM-10 型实芯 PCF,其外包层直径为 $125 \mu\text{m}$,纤芯直径为 $9.5 \mu\text{m}$,具有 3 层空气孔,呈六边形结构排列,空气孔直径约为 $2.73 \mu\text{m}$,孔间距约为 $3.35 \mu\text{m}$;选用的熔接机是 Ericsson 公司的 FSU-995PM 型保偏光纤熔接机;光纤拉锥机采用的是 SCS-4000 型光纤熔融拉锥系统;光源为 ASE 宽带光源 ($1520 \sim 1610 \text{ nm}$),并使用 AQ6317B 型光谱仪进行检测。

在制作过程中,首先调节熔接机熔接参数,采用手动熔接方式进行 PCF 和 SMF 的熔接。熔接完成后,中间段 PCF 长度为 22 mm 。然后利用光纤拉锥

机对 PCF 进行拉锥,获得 PCF 锥区长度为 8.33 mm ,拉锥附加损耗 6.76 dB 。PCF 锥区的显微成像如图 2 所示。

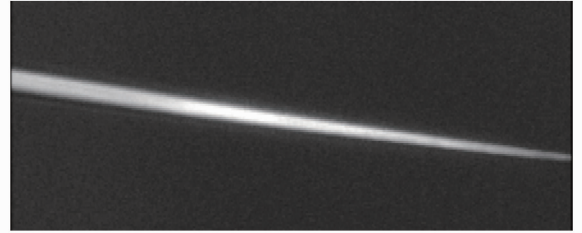


图 2 PCF 锥区显微图

Fig. 2 Microscopic image of the tapered PCF

3.2 溶液浓度和折射率传感实验

配置质量浓度为 $20 \sim 100 \text{ mg/mL}$ 的 NaCl 溶液,并使用阿贝折射仪进行溶液折射率的测量,其折射率变化范围为 $1.333 \sim 1.349$ 。

将制备的 PCF 传感器放入样品池中,加入不同浓度的 NaCl 溶液,直至锥形 PCF 传感器完全浸没到溶液中,最后测量传输光谱。每次测量之前要用蒸馏水对 PCF 锥区进行清洗并烘干。ASE 光源输出功率为 16 dBm 。实验系统如图 3 所示。

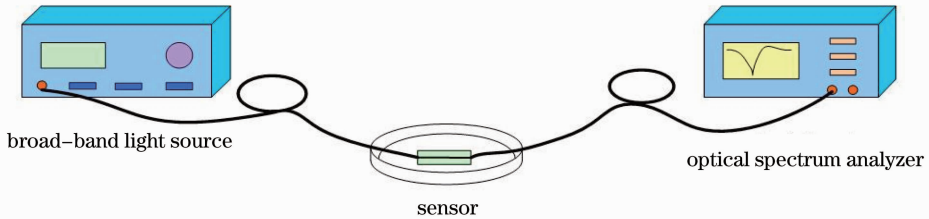


图 3 熔融拉锥型 PCF 传感系统

Fig. 3 Schematic system of the fused tapered PCF sensor

测量不同质量浓度 NaCl 溶液的传输光谱,实验结果如图 4 所示。由图 4 可见,随着溶液质量浓度的增加,其传输损耗光谱整体趋势向右发生漂移。

为了进一步考察其细节,取波长 1597.89 nm 附近的波谷作为观察点,得到传输光谱随 NaCl 溶液浓度的具体变化情况,如图 5 所示。

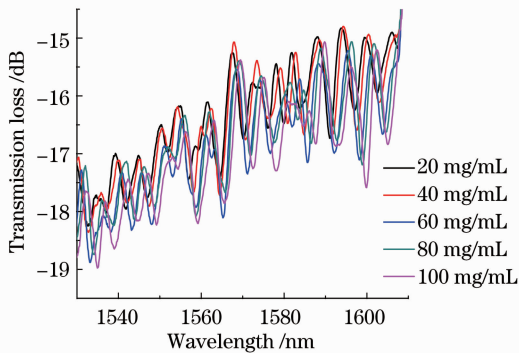


图 4 不同质量浓度 NaCl 溶液的传输损耗光谱

Fig. 4 Transmission spectra of NaCl solutions with different mass concentrations

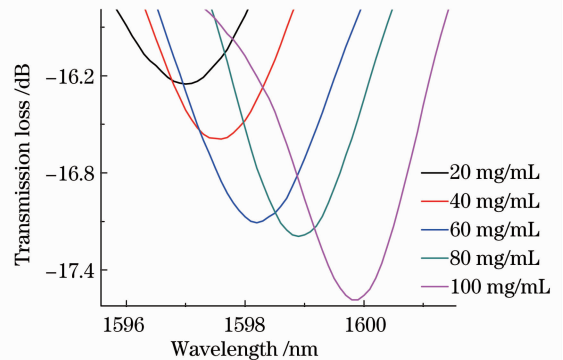


图 5 波长 1597.89 nm 附近 NaCl 溶液的传输光谱

Fig. 5 Transmission spectra in NaCl solutions at wavelength of 1597.89 nm

由图 5 可见,随着溶液浓度的增加,传输光谱向长波方向移动。重复实验,并进行数据拟合后可得到波长漂移量与溶液折射率的关系,如图 6 所示。

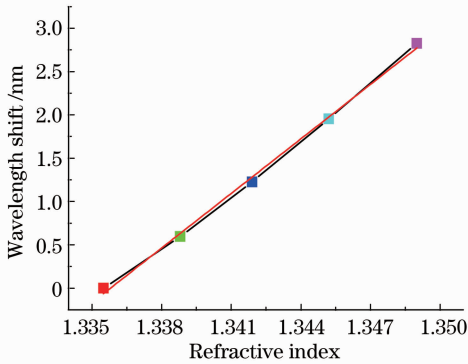


图 6 波长漂移与折射率的关系

Fig. 6 Relationship between wavelength shift and refractive index

由图 6 可见,随着溶液折射率的增大,干涉波长向长波方向漂移,且呈现良好的线性关系,折射率灵敏度为 210.075 nm/RIU。

3.3 温度传感特性

将制作的熔融拉锥型 PCF 传感器放到不同温度中,测量 20 °C 上升到 70 °C 然后再下降到 20 °C 的温度变化过程,每变化 10 °C 进行一次光谱的测量。在波长为 1597.89 nm 时,温度与传输光谱的变化关系如图 7 所示。

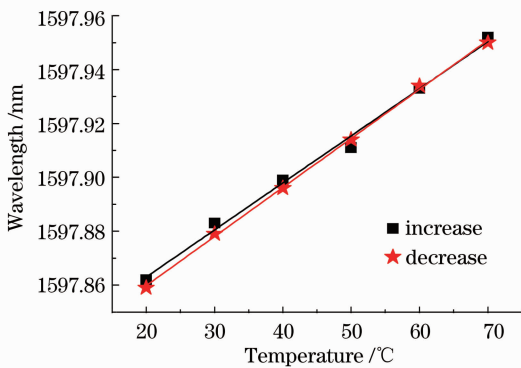


图 7 传输波长随温度的变化

Fig. 7 Relationship between temperature and wavelength

由图 7 可见,在 20 °C~70 °C 温度范围内,随着温度的升高,该传感器传输光谱向长波方向发生微弱漂移,传感器的温度灵敏度约为 0.0018 nm/°C,表明该传感器对温度变化不太敏感,能够克服温度交叉敏感问题,提高传感器的折射率测量灵敏度。

4 结 论

在 PCF 两端分别熔接 SMF,并采用熔融拉锥法对 PCF 进行拉锥,制作成熔融拉锥型 PCF 干涉型传感器。实验结果表明,将制作的熔融拉锥型 PCF 传感器浸入到不同质量浓度的 NaCl 溶液中时,随着溶液浓度的增加,其传输光谱中心波长向长波方向漂移,测量不同质量浓度氯化钠溶液的折射率灵敏度为 210.075 nm/RIU;在 20 °C~70 °C 温度测量范围内,传感器的温度灵敏度约为 0.0018 nm/°C,可以克服温度交叉敏感问题。

参 考 文 献

- 1 T A Birks, J C Knight, P St J Russell. Endlessly single-mode photonic crystal fiber [J]. Opt Lett, 1997, 22(13): 961-963.
- 2 A Ortigosa-Blanch, J C Knight, W J Wadsworth, *et al.*. Highly birefringent photonic crystal fibers [J]. Opt Lett, 2000, 18(25): 1325-1327.
- 3 Yu Chongxiu, Yuan Jinghui, Shen Xiangwei. Recent progress of study on photonic crystal fiber [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(9): 0900139.
余重秀, 苑金辉, 申向伟. 光子晶体光纤的研究新进展[J]. 光学学报, 2011, 31(9): 0900139.
- 4 Joel Villatoroa, Vittoria Finazzi. Temperature-insensitive photonic crystal fiber interferometer for absolute strain sensing [J]. Appl Phys Lett, 2007, 91(9): 091109.
- 5 X Dong, H Y Tam, P Shum. Temperature-insensitive strain sensor with polarization-maintaining photonic crystal fiber based Sagnac interferometer [J]. Appl Phys Lett, 2007, 90(15): 19-21.
- 6 Y J Rao, T Zhu, X C Yang, *et al.*. In-line fiber-optic etalon formed by hollow-core photonic crystal fiber [J]. Opt Lett, 2007, 18(32): 2662-2664.
- 7 H Y Choi, M J Kim, B H Lee. All-fiber Mach-Zehnder type interferometers formed in photonic crystal fiber [J]. Opt Express, 2007, 15(9): 5711-5720.
- 8 Tang Changping, Deng Ming, Zhu Tao, *et al.*. Photonic crystal fiber based M-Z interferometer for refractive index measurement [J]. J Optoelectronics·Laser, 2011, 22(9): 1304-1308.
唐昌平, 邓明, 朱涛, 等. 基于光子晶体光纤 M-Z 干涉仪的折射率传感器研究[J]. 光电子·激光, 2011, 22(9): 1304-1308.
- 9 Liu Qi, Qin Wang. Refractive index sensor based on tapered PCF in-line interferometer [J]. Chin Opt Lett, 2012, 10(9): 090601.
- 10 T Wei, X Lan, H Xiao. Fiber in line core-cladding-mode Mach-Zehnder interferometer fabricated by two point CO₂ laser irradiations [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2009, 21(10): 669-671.
- 11 Y Wang, Y H Li, C R Liao, *et al.*. High-temperature sensing using minaturized fiber in-line Mach-Zehnder interferometer [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2010, 22(1): 39-41.
- 12 Yan Liu, Bo Liu, Hao Zhang, *et al.*. Mach-Zehnder interferometer based on core-cladding mode coupling in single mode fibers [J]. Frontiers of Optoelectronics, 2010, 3(4): 364-369.
- 13 Z Tian, S S H Yam, J Barnes, *et al.*. Refractive index sensing with Mach-Zehnder interferometer based on concatenating two single mode fiber tapers [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2008, 20(8): 626-628.

- 14 Chen Weiguo, Lou Shuqin, Wang Liwen, *et al.*. Mach-Zehnder interferometer based on dual-core photonic crystal fiber and its strain characteristics [J]. *J Optoelectronics•Laser*, 2011, 22(2): 175–179.
陈卫国, 娄淑琴, 王立文, 等. 双芯光子晶体光纤 Mach-Zehnder 干涉仪及其应力特性 [J]. *光电子·激光*, 2011, 22(2): 175–179.
- 15 Hae Young Choi, Myoung Jin Kim, Byeong Ha Lee. All-fiber Mach-Zehnder type interferometers formed in photonic crystal fiber [J]. *Opt Express*, 2007, 15(9): 5711–5720.
- 16 Li Can. Study on Fiber-Optic Mach-Zehnder Sensor Based on Mode Interference [D]. Hefei: Anhui University, 2011. 22–24.
李 灿. 基于模间干涉的光纤 Mach-Zehnder 干涉型传感器的研究[D]. 合肥: 安徽大学, 2011. 22–24.

栏目编辑: 张 腾