光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2020.06.008

基于双锥形光子晶体光纤的折射率传感器

王婷婷*，杨凌旭，李　帅，王　菲

（南京信息工程大学 电子与信息工程学院，南京 210044）

摘　要： 设计了一种基于光子晶体光纤的双锥形马赫-曾德尔干涉仪，并对其折射率传感特性进行了研究。在FDTD Solutions光学仿真平台中建立了干涉仪结构模型，研究了该结构的透射光谱对环境折射率的响应。仿真结果表明，透射光谱随环境折射率的增加发生红移，灵敏度为95.906 nm/RIU。利用熔接与拉锥工艺制备了干涉仪样品，搭建了实验系统，在不同浓度甘油溶液中对其透射谱进行了检测，实验结果表明，折射率在1.322 2～1.353 8范围内，透射谱偏移灵敏度为121.95 nm/RIU。该传感器具有体积小、重量轻、易于制备、灵敏度高等优点，适用于生化和物理传感领域。

关键词： 光子晶体光纤；马赫-曾德尔干涉仪；光纤传感器；双锥形；折射率

中图分类号： TN253　**文章编号：** 1001－5868(2020)06－0798－04

Research on Mach-Zehnder Interferometer Based on Biconical Photonic Crystal Fiber

WANG Tingting, YANG Lingxu, LI Shuai, WANG Fei

(School of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, CHN)

Abstract: A biconical Mach-Zehnder interferometer based on photonic crystal fiber is designed, and its refractive index (RI) sensing characteristics are studied. The sensor performance was simulated by FDTD Solutions, and the results show that the transmission spectrum is red-shifted with the increasing RI and the sensitivity is 95.906 nm/RIU. An experimental platform was built to test the sensor under different concentrations of glycerin solution, and the response relationship between its transmission spectrum and external refractive index was studied. The experimental results show that with RI changing from 1.322 2 to 1.353 8, the sensitivity is 121.95 nm/RIU@1 550 nm. The RI sensor with the characteristics of high RI sensitivity, easy fabrication and low-cost is suitable for applications in the biochemical and physical sensing fields.

Key words: photonic crystal fiber; Mach-Zehnder interferometer; fiber optic sensor; biconical; refractive index

0　引言

基于马赫-曾德尔干涉仪（Mach-Zehnder Interferometer，MZI）的光纤传感器被广泛应用于物理、化学和生物领域，其制造工艺简单、受外界干扰小、稳定性强，在光纤传感技术中得到众多学者的青睐[1]。近几十年来，光子晶体光纤（Photonic Crystal Fiber，PCF）传感器的发展开辟了光纤传感器制造的新领域，锥形PCF改变了其内部结构和传输特性，在传感中表现出良好的特性。与锥形单模光纤（Single Mode Fiber，SMF）相比，锥形PCF灵敏度更高，在折射率、电场和温度的测量中具有更大的潜力。通过熔接、拉锥等方式，可以激发出PCF

收稿日期：2020－07－18.

基金项目：国家自然科学基金项目(61405094)；江苏高校优势学科Ⅲ期建设工程项目("信息与通信工程"优势学科)；南京信息工程大学大学生实践创新训练计划项目(201910300080Y).

* **通信作者：**王婷婷　**E-mail：** wtt79812@163.com

的包层模式，形成干涉，实现折射率、温度、曲率等物理量的传感，具有制备简单和结构紧凑的优势[2-15]。

2016 年，Dash 等[4]提出一种基于 PCF 的 MZI，在此结构上涂覆氧化石墨烯以监测分析溶液的折射率，此结构可用作高精度检测生化分析物的尖端传感器。2017 年，Zhao 等[5]通过在两个 SMF 之间级联一段有半锥形塌陷区域的 PCF，构建了一种基于 PCF 的 MZI，通过增强 MZI-PCF 的倏逝场，使其与周围介质更充分地相互作用，增强折射率测量的灵敏度。2018 年，王建丰等[6]提出将 PCF 与碳基材料相结合，待一段 PCF 两端与 SMF 熔接在一起后在结构表面涂覆石墨烯，形成了基于 PCF 的 MZI。

本文提出了一种基于 PCF 的双锥形马赫-曾德尔干涉仪，该传感器制作简单，仅需在一段较短的 PCF 两端熔接 SMF，并分别对两处熔接点进行拉锥制得。仿真与实验研究了传感器透射光谱与外界折射率的响应关系，其折射率灵敏度为 121.95 nm/RIU，该传感器制作简单，灵敏度高，在检测气体或溶液浓度等方面具有潜在的应用价值。

1　基于 PCF 的双锥形 MZI 传感原理

基于 PCF 的双锥形 MZI 结构如图 1 所示，该 MZI 由两段 SMF、两段锥形区域以及一段 PCF 组成。两段 SMF 分别作为输入、输出光纤与 PCF 进行无损耗熔接后，分别对熔接点进行拉锥形成两段锥形区域，锥形区域充当耦合器的作用，第一个锥区将纤芯中的光信号耦合到光纤包层中，第二个锥区再将包层中的光信号耦合回光纤纤芯中，形成马赫-曾德尔干涉。

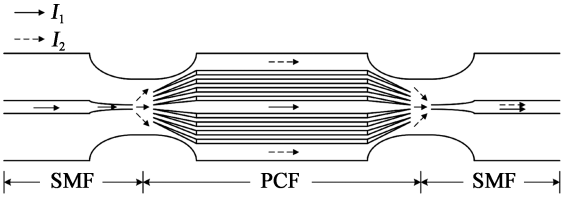


图 1　基于 PCF 的双锥形 MZI 结构示意图

由双光束干涉原理，纤芯模式和包层模式之间的干涉强度可表示为

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}\cos\phi \tag{1}$$

其中，I_1，I_2 分别是纤芯模式和包层模式的光强，ϕ 是两种模式之间的相位差。干涉条纹对比度取决于 I_1 和 I_2 的值。当 $I_1 = I_2$ 时，干涉条纹对比度最大。式中相位差为

$$\phi = \frac{2\pi(n_{\text{eff}}^{\text{core}} - n_{\text{eff}}^{\text{clad}})L}{\lambda} = \frac{2\pi\Delta n_{\text{eff}}L}{\lambda} \tag{2}$$

其中，$n_{\text{eff}}^{\text{core}}$，$n_{\text{eff}}^{\text{clad}}$ 分别是纤芯模式和包层模式的有效折射率，Δn_{eff} 是芯模和包层模之间的有效折射率差，L 是干涉臂的长度，λ 是工作波长。当 $\phi = (2m+1)\pi$ 时，干涉光强最小，即为干涉条纹波谷。m 阶波谷波长可表示为

$$\lambda_m = \frac{2\Delta n_{\text{eff}}L}{2m+1} \tag{3}$$

λ_m 随外部折射率变化。变化值 $\Delta\lambda_m$ 可示为

$$\Delta\lambda_m = \frac{2(\Delta n_{\text{eff}} + \Delta n)L}{2m+1} - \frac{2\Delta n_{\text{eff}}L}{2m+1} = \frac{2\Delta nL}{2m+1} \tag{4}$$

其中，Δn 是 PCF 包层有效折射率随环境折射率的变化值，随着环境折射率的增加，干涉光谱发生红移，由式(4)还可以看出，熔融拉锥增长了干涉臂 L，同时增强了倏逝场与被测液体的作用，从而有效地提高了传感器的灵敏度。但随着 L 的增加，干涉信号的自由光谱范围缩小且传输损耗也会逐渐增加，增加了解调的复杂度，且 L 过长，传感器的抗拉强度将会大大降低，因此 L 并不是越长越好的。

2　基于 FDTD 算法的建模与仿真

利用 FDTD Solutions 对基于 PCF 的双锥形 MZI 进行建模仿真，仿真区域选用 2D 模式，建立的物理结构模型如图 2 所示。

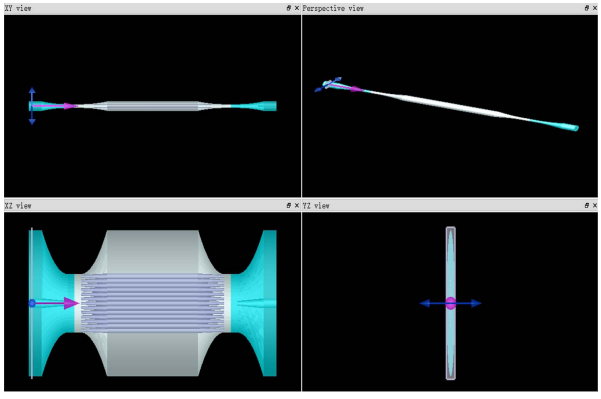


图 2　基于 PCF 的双锥形 MZI 结构模型

输入光纤和输出光纤选择标准单模光纤 SMF-28。选取的 PCF 为长飞 SM-10 型实芯 PCF，含拉锥区域总长为 2 500 μm，两拉锥区域光纤腰椎直径为 50 μm，锥长为 1 000 μm，随着 PCF 逐渐变细，传感区域与外部环境之间的耦合度增加。边界条件使用完美匹配层(Perfectly Matched Layer，PML)，光源选用高斯光源，环境折射率设置为 1.333 3，将网

格精度 mesh 设为 0.08 μm，得到透射谱干涉条纹如图 3 所示。

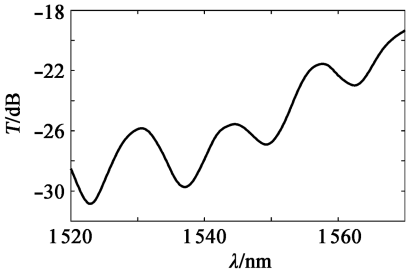


图 3 透射谱干涉条纹图

为了研究传感器的折射率传感性能，仿真了将其置于 5%～45%浓度甘油溶液的透射谱，对比分析其传感特性。1 550 nm 处甘油溶液浓度与折射率的经验公式[9]为

$$n_{1550} = -0.021\,6w^3 + 0.051\,2w^2 + 0.111w + 1.316\,5 \quad (5)$$

其中，w 为溶液浓度，n_{1550} 为 1 550 nm 处溶液折射率。

在不同浓度甘油溶液下的干涉条纹如图 4 所示，透射光谱发生红移，1 560 nm 处波长漂移与环境折射率的关系如图 5 所示，仿真得到的折射率灵敏度为 95.906 nm/RIU。

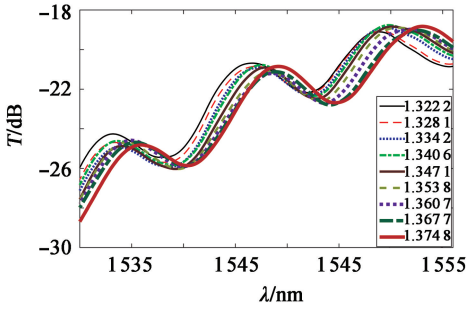


图 4 不同浓度甘油溶液下的透射光谱

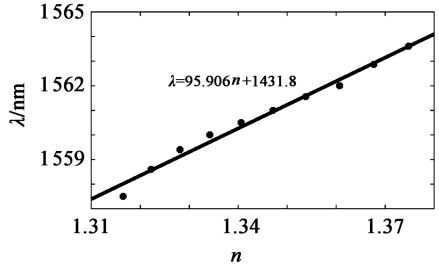


图 5 1 560 nm 处波长漂移与环境折射率的关系

3 实验过程及传感特性分析

用于传感特性研究的传感器样品双锥间隔 3 cm，锥区的金相显微照如图 6 所示，实验测试系统如图 7 所示，传感测试系统的主要部分是 MOI 公司的 SM125 光纤光栅解调仪、光隔离器、传感器样品、配制好的甘油溶液等。将传感器的敏感区浸泡在甘油溶液中，从 SM125 的 CN2 通道发出的激光经光隔离器入射到传感器样品中，透射光由 SM125 的 CN1 通道接收，最后透射出的干涉条纹数据传给电脑保存。

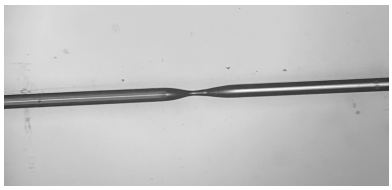


图 6 锥区金相显微图

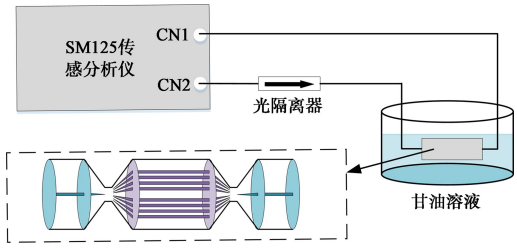


图 7 实验测试系统

通过光谱分析仪得到 MZI 在不同浓度甘油溶液中的传输光谱如图 8 所示。当甘油浓度增加时，传输光谱发生红移，由图可知最大漂移量为 5 nm，为了进一步考察其细节，取波长 1 550 nm 附近的波谷作为观察点，波长漂移与环境折射率的关系如图 9 所示，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，传感器在波长 1 550 nm 处的灵敏度为 121.95 nm/RIU。

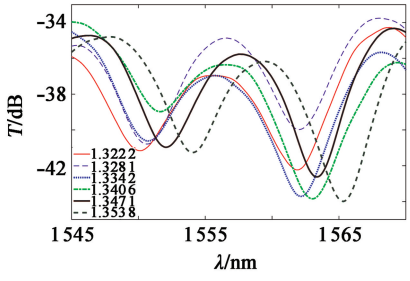


图 8 不同浓度甘油溶液中的传输光谱

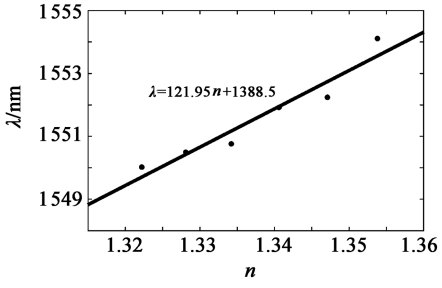


图 9 1 550 nm 附近波长漂移与环境折射率的关系

4　结论

本文设计了一种基于光子晶体光纤的双锥形马赫-曾德尔干涉仪，并采用仿真与实验相结合研究了其传感特性。通过 FDTD Solutions 光学仿真软件对该传感器进行了传感性能仿真，搭建实验平台对传感器进行了不同浓度甘油溶液下的实验检测，研究了其透射光谱与外界折射率的响应关系。实验结果表明，将传感器浸入不同浓度甘油溶液时，随着溶液浓度的增加，其传输光谱的中心波长向长波方向漂移，在折射率变化范围为 1.322 2～1.353 8 时，该传感器在透射光谱波长 1 550 nm 处的灵敏度为 121.95 nm/RIU。

参考文献：

[1] 付兴虎，谢海洋，朱洪彬，等. 基于锥形光子晶体光纤马赫-曾德尔干涉的曲率传感器实验研究[J]. 光学学报，2015，35(5)：78-83.
Fu Xinghu，Xie Haiyang，Zhu Hongbin，et al. Experimental research of curvature sensor based on tapered photonic crystal fiber Mach-Zehnder interferometer[J]. Acta Optica Sinica，2015，35(5)：78-83.

[2] Deng Ming，Liu Leiguang，Zhao Yong，et al. Highly sensitive temperature sensor based on an ultra-compact Mach-Zehnder interferometer with side-opened channels[J]. Opt. Lett.，2017，42(18)：3549-3552.

[3] 曹　晔，刘　文，赵　舜，等. 基于光子晶体光纤和单模光纤错芯结构的光纤传感器[J]. 光电子·激光，2015，26(7)：1233-1237.
Cao Ye，Liu Wen，Zhao Shun，et al. A fiber sensor based on the core-offset structure of PCF to SMF[J]. J. of Optoelectronics·Laser，2015，26(7)：1233-1237.

[4] Dash J N，Jha R. Temperature insensitive PCF interferometer coated with graphene oxide tip sensor[J]. IEEE Photonics Technol. Lett.，2016，28(9)：1006-1009.

[5] Zhao Yong，Xia Feng，Hu Haifeng，et al. A novel photonic crystal fiber Mach-Zehnder interferometer for enhancing refractive index measurement sensitivity[J]. Opt. Commun.，2017，402：368-374.

[6] 王建丰，孙　兵，杨从浩，等. 基于石墨烯涂覆光子晶体光纤的折射率传感器[J]. 光通信技术，2018，42(8)：33-36.
Wang Jianfeng，Sun Bing，Yang Conghao，et al. Refractive index sensor based on graphene-deposited photonic crystal fiber[J]. Optical Communication Technology，2018，42(8)：33-36.

[7] Zhao Yong，Li Xuegang，Cai Lu，et al. Refractive index sensing based on photonic crystal fiber interferometer structure with up-tapered joints[J]. Sensors and Actuators B，2015，221：406-410.

[8] 蒋友华，傅海威，丁继军，等. 基于倏逝波的锥形光纤马赫-曾德尔湿度传感器[J]. 应用光学，2017，38(1)：140-146.
Jiang Youhua，Fu Haiwei，Ding Jijun，et al. Tapered optical fiber Mach-Zehnder interferometer humidity sensor based on evanescent wave[J]. J. of Appl. Opt.，2017，38(1)：140-146.

[9] Saunders J E，Sanders C，Chen H，et al. Refractive indices of common solvents and solutions at 1 550 nm[J]. Appl. Opt.，2016，55(4)：947-953.

[10] Fu Xinghu，Liu Fan，Zhang Yu，et al. A refractive-index sensitivity-enhanced sensor by core-offset splicing the triple cladding quartz specialty fiber[J]. Optical Fiber Technol.，2018，46：63-67.

[11] Tan Y C，Tou Z Q，Chow K K，et al. Graphene-deposited photonic crystal fibers for continuous refractive index sensing applications[J]. Opt. Express，2015，23(24)：31286-31294.

[12] 陈家乐，陶玉敏，梅笑冰，等. 双锥结构的 SMS 干涉型温度传感[J]. 光通信技术，2018，42(9)：55-58.
Chen Jiale，Tao Yumin，Mei Xiaobing，et al. SMS interferometric temperature sensor based on two down-tapers structure[J]. Optical Commun. Technol.，2018，42(9)：55-58.

[13] Wang Q，Wang B T，Kong L X，et al. Comparative analyses of bi-tapered fiber Mach-Zehnder interferometer for refractive index sensing[J]. IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement，2017：1-7.

[14] 吴　蓉，张璐瑶，严清博，等. 用于液体传感的高双折射新型光子晶体光纤结构[J]. 应用光学，2020，41(3)：637-644.
Wu Rong，Zhang Luyao，Yan Qingbo，et al. New photonic crystal fiber structure with high birefringence for liquid sensing[J]. J. of Appl. Opt.，2020，41(3)：637-644.

[15] 贾振安，段维维，刘颖刚，等. 波长和强度同时响应的锥形多模光纤温度传感器[J]. 应用光学，2017，38(2)：331-335.
Jia Zhen'an，Duan Weiwei，Liu Yinggang，et al. Tapered multi-mode fiber temperature sensor based on simultaneous response of wavelength and intensity[J]. J. of Appl. Opt.，2017，38(2)：331-335.

作者简介：

王婷婷(1979—)，女，江苏南通人，博士，副教授，研究领域为光纤传感和光信号处理。