

注：国家自然科学基金委员会青年科学基金项目（NO. 61603265）；沈阳师范大学博士科研项目启动基金（NO. BS201702）

摘要：近年来，随着光纤传感器技术研究领域的不断发展，各式各样的光纤传感结构脱颖而出。其中，采用光子晶体光纤与 Mach-Zehnder 干涉相结合方式的传感研究引起了学术界广泛关注。分析了国内外基于 Mach-Zehnder 干涉的光子晶体光纤传感技术的研究进展，介绍了这种技术在折射率测量、温度和多参数测量、应变与曲率测量等应用的传感结构，并对其发展前景进行了展望。

关键词：光子晶体光纤；Mach-Zehnder 干涉；传感技术

中图分类号：TN253

文献标识码：A

文章编号：1006-883X(2018)02-0007-05

收稿日期：2017-12-20

基于 Mach-Zehnder 干涉的光子晶体光纤传感技术研究进展

韩博 高朋*

沈阳师范大学物理科学与技术学院，辽宁沈阳 110034

一、引言

光子晶体光纤（Photonic Crystal Fiber, PCF）是近年来发展起来的一种新型微结构光纤。最早的 PCF 制作于 1996 年，在纯石英光纤上沿横向周期性排列空气孔，形成周期性的折射率分布。随着对 PCF 的深入研究，按照导光机制可将 PCF 分为折射率导光型 PCF 和光子带隙型 PCF。

PCF 作为传感器光子晶体光纤的敏感元件所具备的优势是普通光纤无法比拟的。普通光纤由于掺杂物质对温度较为敏感，在测量其他物理量时，存在着严重的交叉敏感问题，必须采用温度补偿设备才可以避免。PCF 一般是由单一的石英材料制造，其纤芯区域可以是石英或空气，包层区域是空气孔和纯石英组成，石英具有低的热光系数，因此，PCF 传感器具有常规光纤所不能比拟的温度稳定性，可以降低环境温度的不利影响，提高测量精度，无需额外的温度补偿设备。另外，PCF 内沿着光纤轴向方向分布的空气孔，其大小和排列方式的改变将会影响光的输出特性，因此可按需设计结构，极大地提高了传感器的设计灵活性，

满足各种技术需求。空气孔内还可填充材料，丰富了传感器的应用场合。因此利用 PCF 的巨大优势与普通光纤相结合来做成光纤传感器更加受到研究者的青睐。

Mach-Zehnder 干涉（Mach-Zehnder Interference, MZI）是指由光源发出的两个频率相同、偏振方向一致、相位差恒定的光波，在相遇的空间区域会发生光强重新分配的现象，即双光束干涉现象。MZI 结构的优势包括制造工艺容易，采取熔接、拉锥方式即可实现，更容易形成稳定的干涉，受外界干扰小，稳定性强，具有结构紧凑、易于制作、成本低廉等优点，在光纤传感技术中得到青睐。

MZI 与 PCF 的完美结合，即基于 MZI 的 PCF（MZI-PCF）传感设备，通过熔接、塌陷等技术可激发纤芯模式与包层模式的耦合产生干涉，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。

对 MZI-PCF 结构的研究具有重要意义，其应用领域非常广阔，应用前景看好，如可用于生物制药中制药成分折射率的检测，作为分析检测仪器；在钢铁、

造纸、石化、食品、电力等领域中，相关到热加工生产或者高温作业等方面进行温度检测，预防火灾事故发生；用于工业生产等领域的曲率和形变检测；在环境安全监测中气体浓度监测等。

本文对当前 MZI-PCF 传感技术研究进展进行了简要分类整理并进行分析，主要介绍了基于 MZI-PCF 结构对于折射率传感、温度传感、应变及曲率传感、浓度传感等方面的研究现状。

二、基于 MZI-PCF 的折射率传感技术研究

折射率 (Refractive Index, RI) 的精确测量在工业生产、生物制药中制药成分检测、生化样本分析等许多应用领域中具有重要意义，其重要性不言而喻。基于 MZI-PCF 测量折射率的主要思路是将 MZI-PCF 置于待测外界介质中，当外界介质折射率发生变化时，干涉谱也会随之改变，此时再研究介质折射率变化与干涉谱漂移之间的关系，实现折射率传感。基于 MZI-PCF 的 RI 传感器具有结构简单、成本低廉、灵敏度高等优点。

2013 年，P. Dhara 和 V. K. Singh 用 MZI-PCF 传感器测量 RI，传感头采用单模光纤 (Single Mode Fiber, SMF) - 多模光纤 (Multimode Fiber, MMF) - PCF-SMF 结构进行熔接，得出 SMF 末端的输出强度随纤芯和包层模式的相对相位差呈正弦变化^[1]；

2014 年，Yong Zhao, Di Wu 等人提出了一种 SMF-锥形 PCF-SMF 结构的 MZI 的 RI 传感器，实验获得良好的干涉谱，实现了 $51.902\mu\text{m}/\text{RIU}$ 的高灵敏度^[2]；

2015 年，Y. C. Tan 等人介绍了一种基于光纤的 RI 传感器的示范性实验，传感元件是通过将 SMF 熔接到 PCF 的每一端，然后使用喷枪将石墨烯沉积到裸露的 PCF 上，高 RI 的石墨烯覆盖层改良了 MZI RI 传感器的传感能力，传感器对于 1.33~1.38 和 1.38~1.43 范围内的 RI 灵敏度分别达到了 $9.4\text{dB}/\text{RIU}$ 和 $17.5\text{dB}/\text{RIU}$ ^[3]；

2016 年，Jitendra Narayan Dash 报告一种以 PCF 为基础的 Mach-Zehnder 干涉仪，将此结构涂覆氧化石墨烯 (Graphene Oxide, GO) 监测分析物 (蔗糖) 的 RI，最后得到传感器的强度和波长灵敏度分别为 $130\text{dB}/\text{RIU}$ 和 $212\text{nm}/\text{RIU}$ ，此结构可用作高精度检测生化分析物的尖端传感器^[4]；

2017 年，Yong Zhao 等人提出了 MZI-PCF 的 RI 传感器结构，如图 1 所示，该传感器在两个 SMF 之间级联一段有半锥形塌陷区域 (HTCR) 的 PCF，通过增强 MZI-PCF 的消逝场，提供消逝场与周围介质 RI (SRI) 之间更充分的相互作用，增强 RI 测量的灵敏度，传感器实验中采用三种长度相同但塌陷区域长度和最大锥径依次增大的 MZI-PCF 的 RI 传感器，实验测得 RI 灵敏度也逐渐增大^[5]。

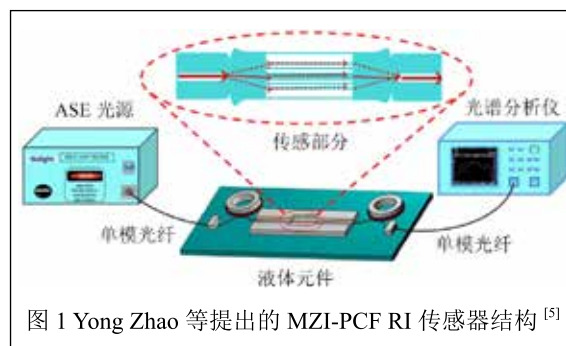


图 1 Yong Zhao 等提出的 MZI-PCF RI 传感器结构^[5]

在基于 MZI-PCF 结构对于 RI 测量的传感器研究过程中，人们正在尝试着通过对 PCF 进行拉锥熔接、错位熔接、过熔塌陷、涂覆氧化石墨烯等各种方法提高 MZI-PCF 结构的灵敏度和传感能力，通过对传感系统整体光路的分析，找出外界影响因素，查找分析传感器结构本身不完善造成的影响。提高 MZI-PCF 结构传感能力不但是研究重点，同时也是研究难点，这需要研究者在实验过程中不断探索，找到提升测量灵敏度和减小噪声的关键方法。

三、基于 MZI-PCF 的温度和多参数传感技术研究

钢铁、造纸、石化、食品、电力等领域中，相关到热加工生产或者高温作业等方面均需要进行温度监测，预防火灾事故发生。基于 MZI-PCF 结构的温度传感主要思路是将 PCF 空气孔内填充液体，并且该液体的热敏系数一般较高，对温度变化敏感。当外界温度变化时，液体受到影响，通过该 MZI-PCF 结构的干涉谱会发生漂移，此时我们再研究外界温度变化与干涉谱漂移之间的关系，实现温度传感。基于 MZI-PCF 的温度传感具有结构简单，成本低廉，灵敏度高等优点。

2014 年，Youfu Geng 等人提出了一种选择性充

液 PCF 的 MZI 超灵敏温度传感器, 传感器由完全渗入液体的 PCF 和两个标准 SMF 错位熔接组成, 实现了 $-1.83\text{nm}/^{\circ}\text{C}$ 的高温灵敏度^[6];

Marlen A. Gonzalez-Reyna 等人在 2015 年介绍了一种基于 MZI 的环形光纤激光器的温度传感器, 传感器使用光纤布拉格光栅作为传感头, MZI 是通过在两段 SMF 之间熔接一块 PCF 来实现, 在 1550nm 处实现了 $18.8\mu\text{m}/^{\circ}\text{C}$ 的温度灵敏度^[7];

Xue-Gang Li 等人在 2016 年设计并实现了一种基于复合干涉结构的新型双参数传感器, 它可看作是 SMF-MMF-PCF-SMF 结构的一个级联, 同时形成一个反射法布里-珀罗干涉仪 (Fabry-Pérot Interferometer, FPI) 和一个传输型 MZI, 传感器可通过分别监测反射光谱和透射光谱的漂移来测量 RI 和温度, 实验测得温度和 RI 的灵敏度可分别达到 $27.5\text{pm}/^{\circ}\text{C}$ 和 $108\text{nm}/\text{RIU}$ ^[8];

2017 年 Jitendra Narayan Dash 等人报告了一种高灵敏度的多参数传感器, 如图 2 所示。此传感器基于与高双折射光子晶体光纤 (HiBi PCF) 串联的锥形光纤, 其中锥形光纤用于测量曲率和温度, 而用 SMF 拼接的 HiBi PCF 用于监测分析物 RI 的变化, 此实验提出的 MZI 的曲率灵敏度为 $14.77\text{nm}/\text{m}^{-1}$, 分辨率为 $6.77 \times 10^{-4}\text{m}^{-1}$, RI 灵敏度为 $257\text{nm}/\text{RIU}$, 分辨率为 $3 \times 10^{-5}\text{RIU}$, 温度灵敏度为 $311\text{pm}/^{\circ}\text{C}$ ^[9]。

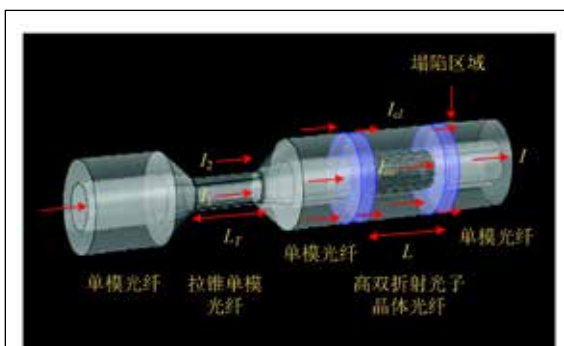


图 2 Jitendra Narayan Dash 等人报告的一种高灵敏度的多参数传感器^[9]

基于 MZI-PCF 的温度和多参数传感技术研究具有重要意义, 温度监测并预防火灾的发生关系到了工业生产等领域的安全问题。基于 MZI-PCF 构成的温度传感器具有成本低、耐腐蚀、稳定性高等优点, 在此基

础上形成的分布式光纤温度传感器能够实现多点分布的实时监测。但是 MZI-PCF 结构温度传感器正处于初步探索阶段, 距离真正将此类结构传感器用于实际应用工程还为时尚早, 还需要研究者对 MZI-PCF 结构类型更为深入的研究。该结构的温度传感器将成为未来主要发展趋势之一, 在实际工程的领域监测中将发挥重要作用。

四、基于 MZI-PCF 的其他传感技术研究

除了检测折射率及温度外, 在工业生产、工艺产品加工等多项领域, 对于应变、曲率等物理量的测量也有很高的要求, 在环境安全监测中气体浓度监测等也具有重要意义。

1、应变测量

应变是反映物体形变的参数, 是衡量一个物体的使用寿命和安全性能的重要标准。基于 MZI-PCF 测量应变的传感器结构相对于一般光纤传感器具有更强的抗电磁干扰性、稳定性, 适用范围广等众多优点。

2012 年, Jihee Han 等人制作了非对称双芯光子晶体光纤 (Asymmetric Two-core Photonic Crystal Fiber, AS-TC-PCF), 并在此基础上监测了 Mach-Zehnder 干涉仪的应变响应, AS-TC-PCF 的应变敏感性是通过用干涉条纹移动来测量, 随着应变的增加, 干涉条纹向短波长方向移动, 应变灵敏度为 $-0.53\text{pm}/\mu\epsilon$, $-0.23\text{pm}/\mu\epsilon$ ^[10]。

2015 年, Shun Wang 和 Ping Lu 等人提出并演示了一种基于双通道 Mach-Zehnder 干涉仪 (dual-pass Mach-Zehnder interferometer, DP-MZI) 和 Sagnac 干涉仪 (Sagnac interferometer, SI) 的级联干涉仪结构, 用于同时测量应变和横向应力, 研究表明这种级联干涉仪的反射光谱由两部分组成: 由 SI 引起的大频谱包络和由 DP-MZI 引起的干涉条纹, SI 分别达到了 $1.28\text{nm}/\text{kPa}$ 和 $0.78\text{pm}/\mu\epsilon$ 的横向应力和应变的灵敏度, DP-MZI 分别达到了 $-0.009\text{nm}/\text{kPa}$ 和 $5.65\text{pm}/\mu\epsilon$, 证明了双参数测量的高精度^[11]。

2、曲率测量

弯曲测量问题是生产生活中的一个重要问题, 如道路的路基沉降问题、桥梁或者铁轨的弯曲变形、一些重要建筑物结构的弯曲变形问题等。测量弯曲问题

的传统方法又存在很大的局限性,如不便于分布式测量、测量稳定性差、容易受到外界电磁干扰等,但是基于 MZI-PCF 测量曲率的传感器能在较稳定的基础上提高测量灵敏度,避免交叉敏感问题,拥有巨大的潜在应用价值。

Bing Sun 等人在 2015 年展示了一种基于 PCF-MZI 实现的高灵敏度曲率传感器,干涉仪由一个花生状的部分和一个使用优化的电弧放电技术实现的突变锥体组成,此独特的结构在 $0\text{m}^{-1}\sim 2.8\text{m}^{-1}$ 的范围内表现出 $50.5\text{nm}/\text{m}^{-1}$ 的高曲率灵敏度^[12];

同样在 2015 年,付兴虎等人提出了 SMF-TPCF (Tapered PCF)-SMF 结构,随着传感器曲率的增加,传输光谱出现蓝移,在 $0\text{m}^{-1}\sim 1.16\text{m}^{-1}$ 的曲率范围内,其曲率灵敏度为 $-5.39297\text{nm}/\text{m}^{-1}$,具有良好的线性度^[13]。

3、气体浓度测量

气体浓度检测在工业过程控制、环境保护、安全生产、国防等领域具有重要作用。基于 MZI-PCF 的气体传感器利用外界气体对传感探头的影响,通过建立气体传感系统来探测气体浓度。

2016 年,Chuanyi Tao 等人报道了一种 PCF 同轴 Mach-Zehnder 干涉仪,用作对爆炸性三硝基甲苯(TNT)的高灵敏度气体传感器探测装置,传感头是通过在标准 SMF 之间嵌入一段大模面积的柚子型 PCF 熔接耦合形成的,实验通过测量了 TNT 引起的干涉条纹的变化后又论证了所提出的传感器的传感能力,干涉响应可用于量化 $0\text{ppbv}\sim 9.15\text{ppbv}$ 范围内的 TNT 蒸汽,检测限为 0.2ppbv ^[14];

Xu Feng 等人在 2017 年提出了一种基于石墨烯涂层锥形光子晶体光纤(Graphene-Coated Tapered Photonic Crystal Fiber, GTPCF)的 MZI 硫化氢气体传感器, GTPCF-MZI 是通过在两个 SMF 之间熔接一个较短的锥形 PCF 而形成的,PCF 在熔接区域的气孔完全塌陷,实验通过浸涂和烧结工艺将 GTPCF-MZI 涂覆一层石墨烯,结果表明,随着硫化氢浓度的增加,透过光谱的倾角波长呈现蓝移,在 $0\text{ppm}\sim 45\text{ppm}$ 的测量范围内,获得了 $0.03143\text{nm}/\text{ppm}$ 的高灵敏度和良好的线性关系^[15]。

五、结论

综上所述,PCF 传感器技术以及基于 MZI 的 PCF 传感器装置在生活各个领域内的应用前景非常广泛。本文介绍了国内外基于 Mach-Zehnder 干涉的 PCF 传感技术的研究进展,介绍了折射率传感、温度和多参数传感、应变与曲率等其他传感结构,可见 MZI-PCF 结构已经引起了学术界的足够重视。但是,此结构在应用领域的突破有待进一步拓展,希望接下来 MZI-PCF 的研究能够促进传感器技术的进一步发展完善,期待其能够在日常生活中发挥更为巨大的应用价值。

参考文献

- [1]P. Dhara, V. K. Singh. Photonic crystal fiber Mach-Zehnder interferometric refractive index sensor[A]. In: 2013 Workshop on Recent Advances in Photonics (WRAP)[C]. IEEE, 2014: 1-2.
- [2]Yong Zhao, Di Wu, Qi Wang. All-fiber Mach-Zehnder interferometer using a tapered photonic crystal fiber for refractive index measurement[A]. 2014 IEEE Sensors[C]. IEEE, 2014: 1080-1083.
- [3]Y. C. Tan, Z. Q. Tou, K. K. Chow, C. C. Chan. Graphene-deposited photonic crystal fibers for continuous refractive index sensing applications[J]. Optics Express, 2015, 23(24): 31286-31294.
- [4]Jitendra Narayan Dash, Rajan Jha. Temperature insensitive PCF interferometer coated with graphene oxide tip sensor[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(9): 1006-1009.
- [5]Yong Zhao, Feng Xia, Hai-feng Hu, Mao-qing Chen. A novel photonic crystal fiber Mach-Zehnder interferometer for enhancing refractive index measurement sensitivity[J]. Optics Communications, 2017, 402: 368-374.
- [6]Youfu Geng, Xuejin Li, Xiaoling Tan, et al. Compact and ultrasensitive temperature sensor with a fully liquid-filled photonic crystal fiber Mach-Zehnder interferometer[J]. IEEE Sensors Journal, 2013, 14(1): 167-170.
- [7]Marlen A. Gonzalez-Reyna, Edgar Alvarado-Mendez, Julian M. Estudillo-Ayala, et al. Laser Temperature Sensor Based on a Fiber Bragg Grating[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(11): 1141-1144.
- [8]Xue-Gang Li, Yong Zhao, Lu Cai, Qi Wang. Simultaneous measurement of RI and temperature based on a composite interferometer[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(17): 1839-1842.
- [9]Jitendra Narayan Dash, Sumit Dass, Rajan Jha. Microfiber Assisted Highly Birefringent PCF-Based Interferometric

Sensors[J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(5): 1342-1346.

[10] Jihee han, Bongkyun Kim, Khurram Naeem, Youngjoo Chung. Strain response of Mach-Zehnder interferometer with asymmetric two-core photonic crystal fiber[A]. In: 2012 17th Opto-Electronics and Communications Conference[C]. IEEE, 2012: 395-396.

[11] Shun Wang, Ping Lu, Lili Mao, et al. Cascaded interferometers structure based on dual-pass Mach-Zehnder interferometer and Sagnac interferometer for dual-parameter Sensing[J]. Optics Express, 2015, 23(2): 674-680.

[12] Bing Sun, Yijian Huang, Shen Liu, et al. Asymmetrical in-fiber Mach-Zehnder interferometer for curvature measurement[J]. Optics Express, 2015, 23(11): 14596-14602.

[13] 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): 70-75.

[14] Chuanyi Tao, Heming Wei, Wenlin Feng. Photonic crystal fiber in-line Mach-Zehnder interferometer for explosive detection[J]. Optics Express, 2016, 24(3): 2806-2817.

[15] Xu Feng, Wenlin Feng, Chuanyi Tao, et al. Hydrogen sulfide gas sensor based on graphene-coated tapered photonic crystal fiber interferometer[J]. Sensors & Actuators B Chemical, 2017, 247: 540-545.

Research progress in photonic crystal fiber sensing technology based on Mach-Zehnder interference

HAN Bo, GAO Peng*

(Shenyang Normal University, Shenyang 110034, China)

Abstract: In recent years, with the increasing development in the research field of optical fiber sensor technology, various kinds of optical fiber sensing structure stand out. Among them, the sensing research combining the photonic crystal fiber(PCF) and Mach-Zehnder interference(MZI) has attracted wide attention in the academic circle. The research progress of PCF sensing technology based on MZI(MZI-PCF) at home and abroad is presented. Then the sensing structures in the applications of refractive index sensing, temperature and multi-parameter sensing, strain and curvature sensing are introduced. An outlook of prospects of MZI-PCF is provided at last.

Key words: photonic crystal fiber(PCF); Mach-Zehnder interference(MZI); sensing technology

作者简介

韩博: 沈阳师范大学物理科学与技术学院, 硕士研究生, 研究方向为光纤传感。

高朋(通讯作者): 沈阳师范大学物理科学与技术学院, 副教授, 研究方向为先进光纤传感与光电检测技术。

通讯地址: 辽宁省沈阳师范大学物理科学与技术学院

邮编: 110034 邮箱: gaopengsysd@126.com