doi:10.13756/j.gtxyj.2025.230177.
光电器件研究与应用
余振芳,李云飞,郭明亮,等.基于多模干涉的光纤传感器研究进展[J]. 光通信研究, 2025(1): 230177.
Yu Z F, Li Y F, Guo M L, et al.A Brief Review of Optical Fiber Sensor based on Multimode Interference[J]. Study on Optical Communications, 2025(1): 230177.

基于多模干涉的光纤传感器研究进展

余振芳[1,2],李云飞[1],郭明亮[1],罗 兵[1],罗心怡[2],耿东晛[1,2]
(1.四川省分析测试服务中心,成都 610015; 2.四川省科学器材公司,成都 610015)

摘要:多模干涉(MMI)光纤传感器凭借其高灵敏度和便于制作等特性受到了广泛关注。文章重点阐述了 5 大类基于单模—多模—单模(SMS)结构的 MMI 光纤传感器的研究进展,总结了其传感结构、传感性能、实用领域和测量灵敏度,指出目前所面临的挑战并展望了未来发展的趋势。希望文章可以为未来 MMI 光纤传感器的研究与发展提供帮助。
关键词:光纤传感器;多模干涉;多模光纤;单模—多模—单模
中图分类号:TN253 **文献标志码**:A

A Brief Review of Optical Fiber Sensor based on Multimode Interference

YU Zhenfang[1,2], LI Yunfei[1], GUO Mingliang[1], LUO Bing[1], LUO Xinyi[2], GENG Dongxian[1,2]
(1. Analytical and Metrical Center of Sichuan Province, Chengdu 610015, China;
2. Scientific Equipments Company of Sichuan Province, Chengdu 610015, China)

Abstract: Optical fiber sensors based on Multimode Interference (MMI) have received widespread attention due to their distinguished advantages, such as high sensitivity and easy fabrication. In this article, we focus on the progress of five main categories of Single-mode Multimode Single-mode (SMS) structures-based optical MMI fiber sensors. We also summarize their sensing structures, performance, practical application scenarios and measurement sensitivities. Finally, we show the current challenges and prospect future development trend. It is expected that this paper can provide guidance for the research and development of MMI based fiber sensors in the future.
Key words: optical fiber sensor; MMI; multimode fiber; SMS.

0 引 言

多年来,光纤传感器由于结构简单、灵敏度高和抗电磁干扰等特性得到了广泛而深入的研究[1-2]。随着光纤制造技术的进步,已研制出如长周期光栅(Long Period Grating,LPG)[3]和光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)[4]等多种类型光纤传感器。然而,这些配置的制造成本较高。为解决此问题,Mehta 等[5]首次报道了一种基于多模干涉(MultiMode Interference,MMI)的更简单和低成本的光纤结构。从此,人们对多模波导中存在的 MMI 进行了全面而深入的研究。MMI 光纤传感器的基本结构是单模—多模—单模(Single-mode Multimode Single-mode,SMS)结构,由在两段单模光纤(Single Mode Fiber,SMF)之间熔接特定长度的多模光纤(MultiMode Fiber,MMF)组成。由于其光谱特性和高灵敏度等特性[6]而被用于温度[7]和应变[8]等不同参量的测量。

本文综述了近 10 年来 MMI 光纤传感器用于测量折射率(Refractive Index,RI)等传统物理量的研究进展。首先,介绍了 MMI 光纤传感器的基本原理;其次,总结了不同 SMS 结构类型光纤传感器的结构、测量方法和传感特性;然后,提出了当前存在的挑战和未来的前景,为存在的问题和未来发展提供了潜在的解决方案;最后,对 SMS 光纤传感器进行了总结和展望。

1 MMI 光纤传感器基本原理

MMI 光纤传感器需要一个多模波导来产生 MMI,其可在光纤中轻松实现。MMI 光纤传感器的基本结构为 SMS 结构,如图 1 所示,通过在两段 SMF 之间熔接一段 MMF 制成。入射光沿着输入端 SMF 进入,被引导到 MMF 输入时,多个高阶本征模在 MMF 段中被激发,产生 MMI 现象。由于 MMF

收稿日期:2023-12-12; 修回日期:2024-01-24; 纸质出版日期:2025-02-10
基金项目:四川省科技计划资助项目(2021JDRC0022,2022YFSY0023,2020YFH0054,2023JDXG0011)
作者简介:余振芳(1984—),女,河南卫辉人。副研究员,博士,主要研究方向为光纤传感和偏振检测成像等。
通信作者:余振芳,副研究员。E-mail:yuzhenfang111@163.com

激发出的高阶模的模式传输系数和光纤耦合时的模式耦合系数受外界环境参数调制，即模式传输系数和模式耦合系数随 MMF 参数（如纤芯和包层有效 RI、长度和直径）的改变而变化，而 MMF 这些参数随外界参数（如温度、RI 和应变等）的变化而变化，进而影响 MMI 效应实现传感。由于外界参数会影响输出功率，例如单模－无芯－单模（Single Mode-No-Core Fiber-Single Mode，SNS）结构光纤传感器，氢氧根（OH－）离子长期作用会增加传感器损耗从而影响输出功率，导致光纤传感的重复性差。近年来，MMI 光纤传感器已得到广泛而深入的研究，在前期研究中可得到 MMI 的原理及数学分析[9-10]。

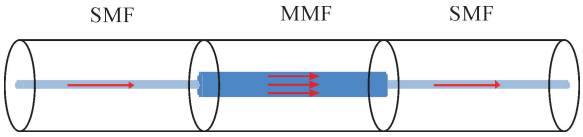


图 1　SMS 光纤传感结构

Figure 1　Schematic diagram of the SMS fiber structure

2　MMI 光纤传感器的应用

MMI 光纤传感器可被用于 RI 等不同参量的传感，而对高灵敏度和多参量传感应用的需求推动了各种 MMI 光纤传感器的研究。本节总结了各种光纤传感器的不同结构配置、工作原理和工作特性。

2.1　传统 SMS 光纤传感器

传统 SMS 光纤传感器可直接或间接测量 RI 等不同物理参数。2015 年，Arifin 等[11]提出了一种基于 SMS 结构的位移传感器，其位移灵敏度为 6.293 mdB/mm；2019 年，Noor 等[12]提出了一种新型的光纤温度传感器，可稳定测量温度，线性度超过 99%，在 31.4 ～80.2 ℃ 温度范围内的灵敏度为 21 pm/℃；2021 年，Sakata 等[13]提出了一种温度传感器，在 40～70 ℃温度范围内实现了最大温度灵敏度 2 nm/℃，在 125 ～200 ℃温度范围内实现了最小灵敏度 0.13 nm/℃；2022 年，Wang 等[14]提出了一种温度传感器，在应变恒定时对温度进行测量，在 0～1 100 με 应变范围内的温度灵敏度平均为 6.14 pm/℃，标准偏差为 0.39 pm/℃，表明温度传感器具有良好的稳定性和对应变不敏感性。

综上可知，传统 SMS 光纤传感器是一种典型的 MMI 光纤传感器，因其在宽范围（可测 RI 范围为 1.33～1.44）检测方面具有潜力而受到极大关注，这归因于通过 MMI 实现的自成像效应。此类传感器因 MMF 的包层过厚而导致其对外界参量的变化不特别敏感（当 RI 在 1.33～1.45 范围内时灵敏度为 5.4×10^{-5} RIU），需要改进其结构来提升传感性能。另外，温度变化会引起交叉敏感问题，进而影响测量准确性，需要采取一些有效的方法来降低交叉敏感问题[15]。

2.2　基于无芯光纤的 MMI 光纤传感器

由于传统 SMS 光纤传感器对外部参量变化不够敏感，在检测方面存在局限性，采用没有包层的无芯光纤（No-Core Fiber，NCF）替代传统 SMS 结构中的 MMF，提升检测灵敏度，用于温度和 RI 等参量的传感，其结构如图 2 所示。

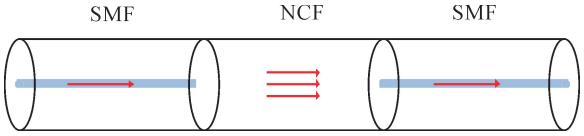


图 2　由 NCF 组成的基于 MMI 光纤传感器结构示意图

Figure 2　Schematic of the MMI based fiber sensor with NCF

2014 年，Chen 等[16]设计了 SNS 结构的 RI 传感器，在 1.333～1.381 RI 范围内实现了最大 259.85 nm/RIU 的灵敏度；同时，Meng 等[17]设计了一种光纤传感器对液体盐度进行测量，在 3.86%～21.62%NaCl 溶液盐度范围内实现了 19.4 pm/% 的灵敏度；2015 年，Ma 等[18]设计了一种温度传感器，灵敏度为 38.7 pm/℃；2015 年，Bai 等[19]研究了具有不同长度 NCF 的 SNS 结构中由自成像效应引起的带通光谱的 RI 传感特性，在 RI 为 1.334～1.434 范围内的最大灵敏度为 1 923 nm/RIU；2021 年，Taher 等[20]设计了 SNS 结构的应变传感器，当 NCF 长度为 3.1 cm 时，获得最大－16.37 pm/με 的应变灵敏度；2020 年，Yi 等[21]提出了一种基于 NCF 和聚二甲基硅氧烷涂层结构的温度传感器，在 40～80 ℃温度范围内的灵敏度高达 200.2 pm/℃，最大温度偏差＜1.6%，具有良好的一致性和重复性。在 NCF 表面沉淀或涂覆 SiO_2[22]等敏感材料可提高传感器的灵敏度并能够实现特定参量的测量，但涂覆或沉积敏感材料增加了传感器制造复杂性及成本，且敏感膜不便于重复使用。

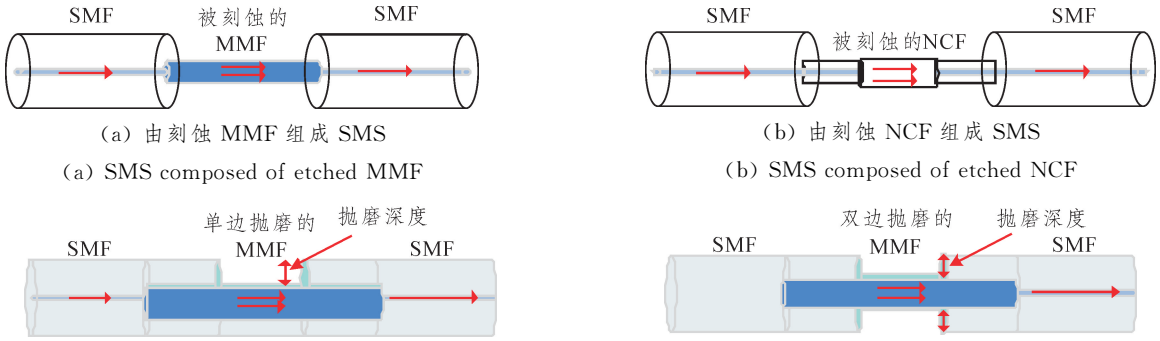
相比于传统 SMS 光纤传感器，SNS 结构的光纤传感器能直接感知周围物理量的变化，且制作简单、测量方便，已被用于测量 RI 和温度等物理参量。然而，仍需提升 SNS 结构传感器的灵敏度以满足应用需求。

2.3　基于蚀刻/抛磨 MMF 的 MMI 传感器

为了提升传统 SMS 光纤传感器的灵敏度，人们通过腐蚀/抛磨 MMF 以减小其部分直径。通常使

用的基于刻蚀/抛磨 MMF 的 MMI 传感器结构如图 3 所示。2014 年，Zhao 等[23]提出了一种高灵敏度的 RI 传感器，如图 3(a)所示，将 MMF 芯径腐蚀到 40 μm 时，RI 在 1.330 0～1.377 5 范围内的灵敏度为 286.2 nm/RIU，但其 RI 测量范围受 MMF 纤芯 RI 限制；2017 年，Cardona-Maya 等[24]采用 NCF 设计了 RI 传感器，如图 3(b)所示，研究发现可通过在 NCF 表面涂覆铟锡氧化物(ITO)来提高灵敏度，且薄膜厚度会影响灵敏度，RI 在 1.32～1.35 范围内的最大灵敏度为 1 442 nm/RIU；同一年，Fuentes 等[25]设计了一种液位传感器，将 NCF 直径腐蚀到 50 μm 时获得了最大为 0.41 nm/mm 的灵敏度，为腐蚀前灵敏度的 2.77 倍；2020 年，Hamza 等[26]设计了一种高灵敏度的 RI 传感器，当 NCF 直径腐蚀到 50 μm 时，RI 在 1.333～1.382 范围内获得了 1 012 nm/RIU 的灵敏度。化学腐蚀可提升传感器的灵敏度，但存在难以精确控制腐蚀光纤的直径和粗糙度及对人体有害等问题。

2017 年，Tang 等[27]提出了一种侧面抛磨的 SMS 结构用于 RI 测量，如图 3(c)所示，当侧抛深度为20.6 μm 时，RI 在 1.43～1.45 范围内的最大灵敏度为 65 nm/RIU，侧面抛磨 MMF 可容易地对 MMF 表面的各种材料进行抛磨处理；2018 年，Wang 等[28]首次报道了双面抛磨的 SMS 结构用于 RI 测量，如图 3(d)所示，RI 在 1.345～1.405 范围内的最大灵敏度为 151.29 nm/RIU。采用传统轮式抛磨技术提高了传感性能，但其制作的 RI 传感器灵敏度较低，且更大的传感区域会引起更多模间色散，从而导致检测范围显著降低[29]。为了克服这些问题，2023 年，Li 等[30]采用激光飞秒抛磨的 SMS 结构测量液体 RI，在 0.062 RIU 的宽 RI 检测范围内灵敏度为 161.40 nm/RIU，但由于其制作成本高且难度大，应用受到限制。



(a) 由刻蚀 MMF 组成 SMS

(a) SMS composed of etched MMF

(b) 由刻蚀 NCF 组成 SMS

(b) SMS composed of etched NCF

(c) 由侧面抛磨 MMF 组成 SMS

(c) SMS composed of side-polished MMF

(d) 由双面抛磨 MMF 组成 SMS

(d) SMS composed of double-polished MMF

图 3 由腐蚀/抛磨 MMF(或 NCF)组成的 SMS 光纤结构示意图

Figure 3 Schematic of SMS fiber structure composed of etched/polished MMF (or NCF)

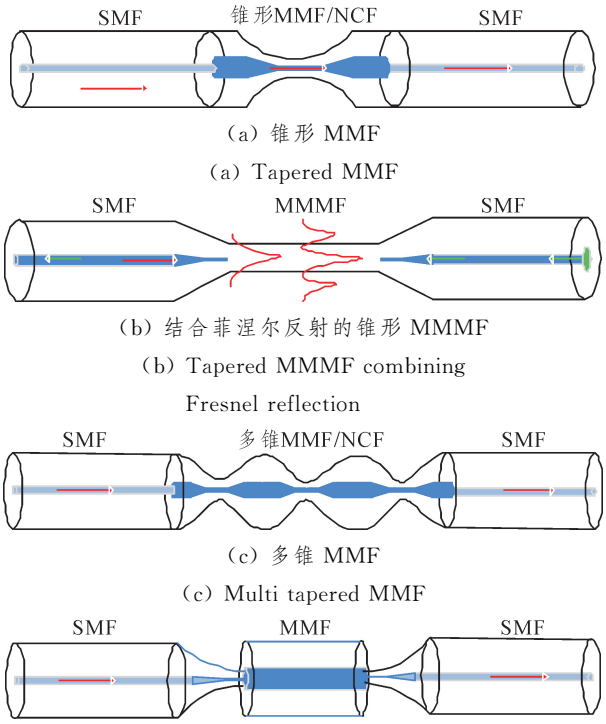
2.4 基于锥形的 MMI 光纤传感器

尽管基于刻蚀/抛磨 MMI 结构的光纤传感器具有许多优点，但其存在制作难度大且其感应表面粗糙度影响测量灵敏度的问题。光纤拉锥可减小光纤直径从而提升灵敏度，故采用如图 4(a)所示的锥形结构替代刻蚀/抛磨 MMF。2018 年，Yang 等[31]提出了一种基于锥形结构的曲率传感器，该传感器的最佳腰区直径为 68.7 μm，在 0.706 4～1.912 9 m^{-1}范围内的平均曲率灵敏度为－21.734 dB/m^{-1}，在曲率为 1.912 9 m^{-1}时灵敏度高达－144.876 dB/m^{-1}；2019 年，Zhang 等[32]提出了一种基于 NCF 锥的 RI 传感器，如图 4(a)所示，当锥腰直径为 13 μm 时，在 RI 为 1.333～1.350 范围内的最大灵敏度为 686 nm/RIU。然而，锥形结构很脆弱，降低了传感器的机械强度。

2015 年，Sun 等[33]提出了一种基于菲涅尔反射的马赫-曾德尔光纤传感器，如图 4(b)所示，用于同时测量 RI 和温度，通过解调频谱的边缘功率和自由光谱范围(Free Spectrum Range，FSR)，RI 灵敏度分别为－72.247 dB/RIU 和 68.122 nm/RIU，温度灵敏度分别为 0.028 3 dB/℃和－17 pm/℃；2015 年，Zhao 等[34]提出了一种多锥形级联的 RI 传感器，如图 4(c)所示，当锥形数为 8 时，最大 RI 灵敏度可达 261.9 nm/RIU，可通过增加锥形结构的数量提高灵敏度，但存在降低传输光谱强度、多干扰峰值灵敏度不一致和 RI 检测范围受限等问题；2016 年，Sun 等[35]提出了一种 MMF 夹在两个半锥形 SMF 之间的 RI 传感器，如图 4(d)所示，RI 在 1.333～1.411 范围内时传感器的最大灵敏度为 500.6 nm/RIU。

光纤拉锥可提升传感器的灵敏度、测量精度和应用范围，但拉锥使传感器变得脆弱，且需要精确控

制和优化制造参数如锥形深度等，导致制作难度大且降低了传感器的稳定性。因此，锥形结构光纤传感器未来应用的主要方向之一是制造出可靠且可重复的器件。



(a) 锥形 MMF

(a) Tapered MMF

(b) 结合菲涅尔反射的锥形 MMMF

(b) Tapered MMMF combining Fresnel reflection

(c) 多锥 MMF

(c) Multi tapered MMF

(d) MMF 夹在两个半锥形 SMF 之间

(d) MMF sandwiched between two half tapered SMFs

注：MMMF 为多模微光纤

图 4　基于锥形光纤的 SMS 结构示意图

Figure 4　Schematic of SMS structure with tapered fiber

2.5　基于级联的 MMI 光纤传感器

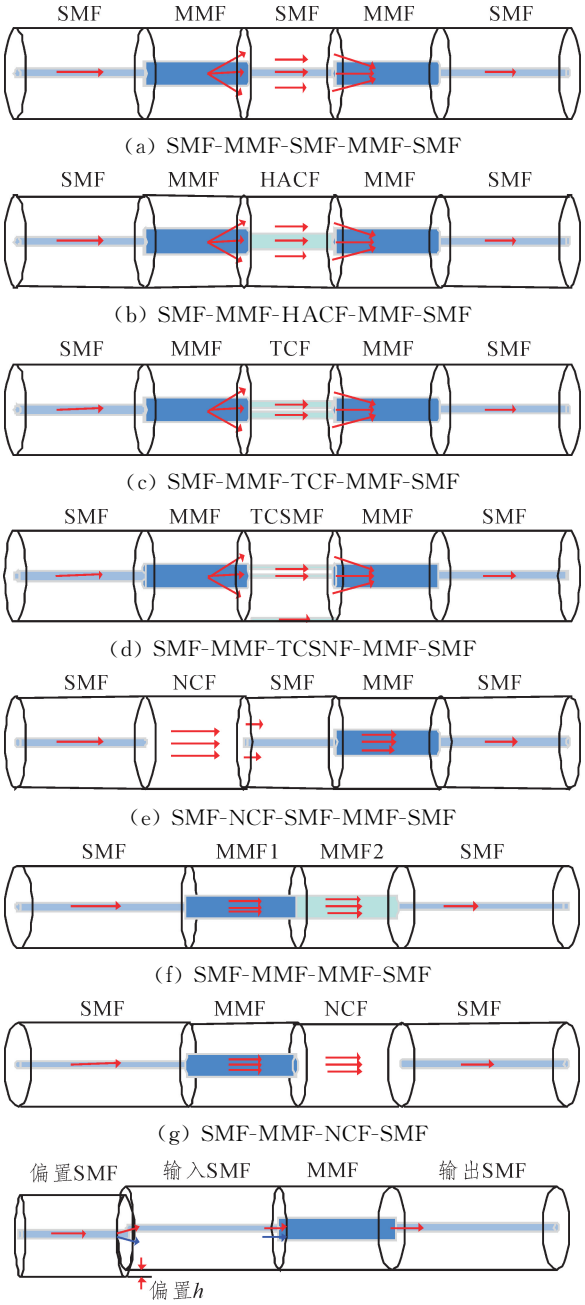
随着 MMI 结构的发展，人们开发出了一些新结构并将其应用到不同领域中，新结构不仅具有易于制作和低成本等优点，同时还具有多参量测量和高灵敏度等特性。

2014 年，Xiong 等[36]设计了一种级联的 RI 和温度双参量传感器，如图 5(a)所示，结果表明，RI 在 1.310 5～1.351 7 范围内的灵敏度为－37.932 2 nm/RIU 和在 25～85 ℃温度范围内的灵敏度为 0.052 2 nm/℃；同时，Tong 等[37]也研究了一种级联的 RI 和温度双参量传感器，传感器可实现最大为0.138 5 nm/℃和 100.97 nm/RIU 的温度和 RI 灵敏度；2016 年，Yin 等[38]研究了一种级联的应变和温度双参量传感器，在 0～2 000 με 应力范围内的灵敏度为 0.709 6 pm/με，在 10～70 ℃温度范围内的灵敏度为 44.12 pm/℃；2022 年，Sun 等[39]设计了一种基于 NCF 级联的多参量传感器，在 30～75 ℃温度范围内的灵敏度为 0.248 7 nm/℃，在 0.489 8～1.296 1 m^{-1} 曲率范围内的灵敏度为－18.806 nm/m^{-1}，在 0～1 000 με 应变范围内的灵敏度为－2.48 pm/με。温度、曲率和应变灵敏度误差分别为 1.3%、1.9%和1.8%。该传感器具有灵敏度高、制造工艺简单和结构紧凑的优点。

Zhang 等[40]提出了一种基于中空环形芯光纤(Hollow Annular Core Fiber，HACF)级联的应变和温度双参量传感器，如图 5(b)所示，在 30～100 ℃温度范围内的最大灵敏度为 30 pm/℃，在 0.555～5.405 m^{-1} 曲率范围内，最大可见度变化达到 32.4 dB。类似地，可使用双芯光纤(Twin Core Fiber，TCF)、三芯单模光纤(Three-Core Single Mode Fiber，TC-SMF)等其他特种光纤来代替 HACF。2017 年，Wu 等[41]提出了一种基于 TCSMF 的马赫-曾德尔干涉仪，如图 5(c)所示，用于同时测量曲率和应变，传感器在 0.24～0.60 m^{-1} 曲率范围内的最高灵敏度为 103.35 nm/m^{-1}，在 0～1 400 με 应力范围内的最高灵敏度为－4.01 pm/με；同年，Zhao 等[42]提出了一种基于 TCSMF 的曲率传感器，如图 5(d)所示，在 2.79～3.24 m^{-1} 曲率范围内获得最大为 －28.29 nm/m^{-1} 的灵敏度。TCSMF 传感器具有精度高和灵敏度高等优点，但 TCSMF 很难获得且成本昂贵。2016 年，Chen 等[43]提出一种基于 NCF 级联的 RI 和温度双参量传感器，如图 5(e)所示，该传感器在 RI 为 1.333～1.381 范围内的最大灵敏度为 113.66 nm/RIU，在 30～95 ℃温度范围内的灵敏度为 9.2 pm/℃；此外，Wu 等人[44]提出了一种基于 MMF 级联的双参量传感器，如图 5(f)所示，通过该结构中的 MMF1 和 MMF2 分别由温度和应变引导的光谱变化的不同来实现温度和应变的同时测量，该传感器的应变灵敏度为 0.35 pm/με，温度灵敏度为 11.16 pm/℃。

2015 年，Luo 等人[45]提出了一种将 MMF 与 SNS 结构级联的多参量传感器，如图 5(g)所示，该传感器可用于如 RI 和应变等不同参量的传感。在该结构中，NCF 作为传感区，MMF 充当模式耦合器，这为拓展这种光纤结构的应用提供了潜力。最近，人们采用光子晶体光纤(Photonic Crystal Fiber. PCF)[46]和细芯光纤[47]等特种光纤来代替 MMF 以实现不同的应用。Han 等人[48]通过以纤芯偏置的方式与 SMF 拼接，改进传统的 SMS 传感器，如图 5(h)所示，利用选定波谷(Dips)对所测参量的不同敏感度来实现同时测量温度和液位，两个选定 Dips 分别具有 0.081 5(Dip1)和 0.063 6(Dip2) nm/℃的温度灵敏度。Dip1 对液位不敏感，而 Dip2 对水溶液和氯化钠溶

液的灵敏度分别为 0.14 和 0.29 nm/mm。



(a) SMF-MMF-SMF-MMF-SMF

(b) SMF-MMF-HACF-MMF-SMF

(c) SMF-MMF-TCF-MMF-SMF

(d) SMF-MMF-TCSNF-MMF-SMF

(e) SMF-NCF-SMF-MMF-SMF

(f) SMF-MMF-MMF-SMF

(g) SMF-MMF-NCF-SMF

(h) 传统的 SMS 结构结合纤芯偏置的 SMF

(h) Conventional SMS spliced with core-offset SMF

图 5 级联 SMS 光纤结构示意图

Figure 5 Schematic diagram of cascaded SMS fiber structure

3 讨论

由近 10 年 MMI 光纤传感器的发展历程可知，MMI 光纤传感器在测量 RI 等传统物理参量方面具有广泛而深入的研究，但其在应用中仍面临许多问题与不足，本文针对这些问题提出了一些技术展望。

3.1 当前存在的问题

MMI 光纤传感器已被广泛应用于如 RI 等传统物理变量的传感，具有制造简单和灵敏度高等优点，其潜在商业化前景光明，也已取得了很大的进步，但将其应用到实际环境中还存在一些挑战。

首先，在单个传感器方面，需要在再现性、可重复性、特异性、长期稳定性和大规模制造方面进行改进。在系统层面上，光纤传感缺乏标准，用户无法从不同供应商那里可靠地获得系统的不同元件，也无法确保这些元件能够很好地协同工作，光纤在光通信中取得成功的一个关键是具有高水平的标准化，因此，MMI 光纤传感器在标准化方面还有很多工作要做。其次，MMI 光纤传感器可分为光谱调制型和强度调制型，光谱调制型主要是通过获取透射光谱中的 Dip 或谐振峰(peak)的波长偏移来实现对外界参数的传感。传感器的灵敏度由波长偏移的线性拟合来评估。然而，波长偏移和被测量之间的关系通常是非线性的或仅在有限范围内为线性，这对设计多参量商业光纤传感器可能是一个相当大的挑战[49]。此外，单一参量传感器存在交叉传感问题，导致测量结果不可靠，无法满足实际应用需求，需消除或补偿交叉传感问题，努力提高选择性测量参数的能力以满足应用需求。实际应用要求 MMI 光纤传感器朝小型化和集成化的方向发展，小型化、集成化是一个挑战，但也为 MMI 光纤传感器商业化提供了机会。为了最小化传感器的大小和传感器询问子系统，需要最小化 MMF、NCF 的长度或使用反射式传感器结构来优化传感器的尺寸及进一步降低询问子系统的成本、体积或开发新调制技术来实现传感系统的小型化。另外，许多实际应用需要在恶劣条件下进行传感，然而，光纤传感器的特性和结构限制了测量范围。例如，采用传统 SiO_2 材料设计的 RI 光纤传感器，其特性导致检测范围不能超过 1.45[50]。针对此问题，人们采用锥形等结构来实现特定范围的测量以提高测量性能，但锥形区域导致了稳定性和耐久性下降，其只能用于具有中等应变或温度的应用中，寻求克服限制的解决方案至关重要。

3.2 技术展望

综上，未来需要进一步探索新结构、结构改进及有效的解调方法使 MMI 光纤传感器向高灵敏度、宽检测范围、小型化、多参量和高稳定性的方向发展。

①探索新结构：首先，需要简化结构以实现低成本批量生产，拓宽传感器的应用范围。一些独特的 SMS 光纤传感器以其新颖的结构具有突出的测量特性，如 S 锥形光纤结构[51]和 U 锥形光纤结构[52]

等。然而，这些结构的传感器由于重复制造性差且制作成本高而不被期望。其次，光纤传感器的尺寸是实际应用中需要考虑的另一个关键因素，需进一步减小传感器尺寸以满足实际应用需求。上述各种结构的传感器主要为透射型，不适用于实际应用。采用反射型传感结构可大大缩小传感器尺寸[53]，例如反射配置的 SMS 传感器的尺寸理论上可以是透射配置的传统 SMS 光纤传感器尺寸的一半[54]，这为实现传感器小型化提供了一个新方案。将透射型结构转换为反射型，形成探针型传感元件，具有明显的实际应用意义。最后，测量环境中不可避免的交叉传感问题，可通过设计多参量传感器的方式来解决，多参量传感一直是未来应用的主要焦点。目前已提出几种不同结构使 MMI 光纤传感器具有双参量传感的能力，但仍需进一步研究和探索实现多参量传感，使 MMI 光纤传感器具备多参量测量、高测量灵敏度和宽检测范围等特性。

②新的补偿方法：实际应用需要 MMI 光纤传感器具有更高灵敏度，以实现高精确测量。灵敏度补偿通常采用以下两种方法：a.将 SMS 结构与其他不同结构配置相结合；b.传感头涂覆各种敏感材料。将 SMS 结构与法布里-珀罗（Fabry-Perot，F-P）[55]等其他结构级联来进一步扩展传感器的传感应用，实现多参量的高精度和宽范围测量。此外，通常在 SMS 结构中的 MMF 区涂覆如石墨烯[56]等敏感材料涂层以实现特定参量的高灵敏精确测量。这些研究表明，通过适当校准和补偿的方法可提高灵敏度、测量范围和精度。然而，此类方法大多为特定应用而设计，需进一步研究和探索适用于一般场景的结构和新材料。

③使用新型光纤：基于传统光纤（如 SMF 等）的传感器已应用到各传感领域，但由于存在低灵敏度等缺陷无法满足一些特殊应用需求。随着新型光纤的出现，研究人员将其应用于新型光纤传感器，并证明了其实现传感的可行性和优势，如 PCF[57-58]、空心光纤[59]和薄芯光纤[60]。基于新型光纤的传感器在未来可用于如 RI 等物理参量的传感，但存在制造困难、成本高等问题，需进一步研究以促进其商业化应用。

④使用有效的解调方式：MMI 光纤传感器有时很难通过波长调制或强度调制从透射或反射光谱中解调测量参数。波长调制型依赖于体积大、价格昂贵的光谱分析仪（Optical Spectrum Analyzer，OSA）的分辨率，当频谱偏移超过一个 FSR 时，很难对测量参数进行解调，且传感系统复杂、成本高、体积大，不利于商业化应用。因此，设计一个小体积、低成本、高精度、高灵敏度和多参量的解调方法非常有利于 MMI 光纤传感器的推广。

4　结束语

本文主要阐述了近 10 年来 MMI 光纤传感器的发展历程。首先简要介绍了 MMI 的基本原理；然后，系统综述了 MMI 光纤传感器用于常规物理变量传感的 SMS 结构配置的发展历程，包括传统 SMS 光纤传感器、基于 NCF 的 SMS 光纤传感器、基于刻蚀/抛磨 MMF 的 SMS 光纤传感器、锥形 SMS 光纤传感器和级联光纤传感器；最后，讨论了 MMI 光纤传感器目前存在的挑战和未来的发展方向。综上所述，MMI 光纤传感器凭借其高灵敏度等特性而在各个传感领域具有广阔的应用前景。采用其他类型的光纤替代 MMI 光纤传感器中的 MMF 可实现特定的测量需求，其应用范围也得到了扩展。未来随着时代的进步，MMI 光纤传感器的设计会层出不穷且传感性能更优，这对实际应用具有重要意义。

参考文献：

[1] Wang X D，Wolfbeis O S. Fiber-optic Chemical Sensors and Biosensors（2015－2019）[J]. Analytical Chemistry，2020，92(1)：397－430.

[2] Wang K，Dong X，Köhler M H，et al. Advances in Optical Fiber Sensors based on Multimode Interference（MMI）：a Review[J]. IEEE Sensors Journal，2021，21(1)：132－142.

[3] Wang Y. Review of Long Period Fiber Gratings Written by CO_2 Laser[J]. Journal of Applied Physics，2010，108(8)：081101.

[4] Hill K O，Meltz G. Fiber Bragg Grating Technology Fundamentals and Overview[J]. Journal of Lightwave Technology，1997，15(8)：1263－1276.

[5] Mehta A，Mohammed W，Johnson E G. Multimode Interference-based Fiber-optic Displacement Sensor[J]. IEEE Photonics Technology Letters，2003，15(8)：1129－1131.

[6] Olivero M，Vallan A，Orta R，et al. Single-mode-multimode-single-mode Optical Fiber Sensing Structure with Quasi-two-mode Fibers[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement，2018，67(5)：1223－1229.

[7] 周舟，陶青，刘顿. 基于多模干涉原理的新型光纤传感器特性研究[J]. 传感器与微系统，2023，42(4)：47－50.
Zhou Z，Tao Q，Liu D. Characterization Research of Novel Fiber-optic Sensor based on Multimode Interfer-

ence Principle[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2023, 42(4): 47－50.

[8] Dong L, Gang T, Bian C, et al. A High Sensitivity Optical Fiber Strain Sensor based on Hollow Core Tapering [J]. Optical Fiber Technology, 2020, 56: 102179.

[9] 程启航. 基于无芯光纤的干涉型折射率传感器的研究[D]. 天津：天津理工大学，2020.
Cheng Q H. Research on Interferometric Refractive Index Sensor based on Coreless Fiber [D]. Tianjin, China: Tianjin University of Technology, 2020.

[10] Hatta A M. Single Mode-multimode-single Mode Optical Fibre Structures for Optical Sensing[D]. Ireland, Dublin: Dublin Institute of Technology,2009.

[11] Arifin A, Hatta A M, Sekartedjo, et al. Long-range Displacement Sensor based on SMS Fiber Structure and OTDR [J]. Photonic Sensors, 2015, 5 (2): 166－171.

[12] Noor S M, Harun S W, Ahmad H, et al. Multimode Interference based Fiber-optic Sensor for Temperature Measurement [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1151: 012023.

[13] Sakata H, Okada K, Mochizuki J. Highly Sensitive Temperature Sensor based on Multimode-interference Fiber Structure with Gel Cladding[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2021, 63 (6): 1647－1651.

[14] Wang K, Mizuno Y, Su X, et al. Core Diameter and Numerical Aperture Dependences on the Performance of Fiber-optic Multimode Interference Sensing[J]. Applied Physics Express, 2023, 16(1): 012003.

[15] Chen Y, Han Q, Liu T, et al. Self-temperature-compensative Refractometer based on Singlemode-multimode-singlemode Fiber Structure[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2015, 212: 107－111.

[16] Chen Y, Han Q, Liu T, et al. Wavelength Dependence of the Sensitivity of All-fiber Refractometers based on the Singlemode-multimode-singlemode Structure[J]. IEEE Photonics Journal, 2014, 6(4): 6801807.

[17] Meng Q, Dong X, Ni K, et al. Optical Fiber Laser Salinity Sensor based on Multimode Interference Effect [J]. IEEE Sensors Journal, 2014, 14(6): 1813－1816.

[18] Ma L, Kang Z, Qi Y, et al. Fiber-optic Temperature Sensor based on a Thinner No-core Fiber[J]. Optik, 2015, 126(9-10): 1044－1046.

[19] Bai X, Wang H, Wang S, et al. Refractive Index Sensing Characteristic of Single-mode-multimode-single-mode Fiber Structure based on Self-imaging Effect [J]. Optical Engineering, 2015, 54 (10): 106103.

[20] Taher H J. The Influence of No-core Fiber Length on the Sensitivity in Fiber Optic Strain Sensor[J]. Iraqi Journal of Laser, 2021, 20(1): 13－20.

[21] Yi D, Huo Z, Geng Y, et al. PDMS-coated No-core Fiber Interferometer with Enhanced Sensitivity for Temperature Monitoring Applications [J]. Optical Fiber Technology, 2020, 57: 102185.

[22] Zhao Y, Zhao J, Zhao Q. Review of No-core Optical Fiber Sensor and Applications[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2020, 313: 112160.

[23] Zhao Y, Cai L, Li X G, et al. Investigation of the High Sensitivity RI Sensor based on SMS Fiber Structure[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2014, 205: 186－190.

[24] Cardona-Maya Y, Del Villar I, Socorro A B, et al. Wavelength and Phase Detection based SMS Fiber Sensors Optimized with Etching and Nanodeposition[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35 (17): 3743－3749.

[25] Fuentes O, Del Villar I, Vento J R, et al. Increasing the Sensitivity of an Optic Level Sensor with a Wavelength and Phase Sensitive Single-mode Multimode Single-mode Fiber Structure [J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(17): 5515－5522.

[26] Hamza N. Enhanced Refractive Index Sensor based on Etched Coreless Fiber[J]. Test Engineering and Management,2020,83(6):10440－10451.

[27] Tang J, Zhou J, Guan J, et al. Fabrication of Side-polished Single Mode-multimode-single Mode Fiber and Its Characteristics of Refractive Index Sensing [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2017, 23(2): 5600708.

[28] Wang X, Zhang J, Tian K, et al. Investigation of a Novel SMS Fiber based Planar Multimode Waveguide and Its Sensing Performance [J]. Optics Express, 2018, 26(20): 26534－26543.

[29] Dey K, Roy S. Detailed Investigation of Spectral Properties of SMS Fiber Segment and Its Sensing Performance under Varying Multimode Fiber Lengths[J]. Infrared Physics & Technology, 2022, 127: 104356.

[30] Li J, Jiang S, Aberdeen S, et al. Highly Efficient Refractive Index Sensor based on a Dual-side Polished SMS Fiber Enabled by Femtosecond Laser Writing[J]. Sensors, 2023, 23(7): 3651.

[31] Yang B, Niu Y, Yang B, et al. High Sensitivity Curvature Sensor with Intensity Demodulation based on Single-mode-tapered Multimode-single-mode Fiber[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(3): 1094－1099.

[32] Zhang M, Zhu G, Lu L, et al. Refractive Index Sensor based on Ultrafine Tapered Single-mode Nocladding Single-mode Fiber Structure[J]. Optical Fiber Technology, 2019, 48: 297－302.

[33] Sun Q, Luo H, Luo H, et al. Multimode Microfiber Interferometer for Dual-parameters Sensing Assisted by Fresnel Reflection [J]. Optics Express, 2015, 23(10): 12777－12783.

[34] Zhao Y, Cai L, Hu H F. Fiber-optic Refractive Index Sensor based on Multi-tapered SMS Fiber Structure [J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15 (11): 6348－6353.

[35] Sun G, Wu G, Wang F, et al. High-stress Resistance Fiber Refractometer based on MMF Sandwiched between Two SMF Half-Tapers[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(12): 1336－1339.
[36] Xiong R, Meng H, Yao Q, et al. Simultaneous Measurement of Refractive Index and Temperature based on Modal Interference[J]. IEEE Sensors Journal, 2014, 14(8): 2524－2528.
[37] Tong Z, Su J, Cao Y, et al. Simultaneous Measurement based on Composite Interference Structure[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(13): 1310－1313.
[38] Yin B, Li Y, Liu Z B, et al. Investigation on a Compact In-line Multimode-single-mode-multimode Fiber Structure[J]. Optics & Laser Technology, 2016, 80: 16－21.
[39] Sun J, Wang T, Wang X, et al. Multiparameter Measurement Sensor based on No-core Fiber[J]. Applied Optics, 2022, 61(11): 3247－3253.
[40] Zhang Y, Zhou A, Qin B, et al. Simultaneous Measurement of Temperature and Curvature based on Hollow Annular Core Fiber[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(11): 1128－1131.
[41] Wu Y, Pei L, Jin W, et al. Highly Sensitive Curvature Sensor based on Asymmetrical Twin Core Fiber and Multimode Fiber[J]. Optics & Laser Technology, 2017, 92: 74－79.
[42] Zhao Y, Cai L, Li X G. Temperature-insensitive Optical Fiber Curvature Sensor based on SMF-MMF-TCSMF-MMF-SMF Structure[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2017, 66(1): 141－147.
[43] Chen Y, Wang Y, Chen R, et al. A Hybrid Multimode Interference Structure-based Refractive Index and Temperature Fiber Sensor[J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(2): 331－335.
[44] Wu Q, Semenova Y, Wang P, et al. Fibre Heterostructure for Simultaneous Strain and Temperature Measurement[J]. Electronics Letters, 2011, 47(12): 713.
[45] Luo Y, Xia L, Yu C, et al. Multi-parameter Optical Fiber Sensor based on Enhanced Multimode Interference[J]. Optics Communications, 2015, 344: 120－124.
[46] Yang F, Wang Z K, Wang D N. A Highly Sensitive Optical Fiber Strain Sensor based on Cascaded Multimode Fiber and Photonic Crystal Fiber[J]. Optical Fiber Technology, 2019, 47: 102－106.
[47] Zhang X, Liu C, Liu J, et al. Single Modal Interference-based Fiber-optic Sensor for Simultaneous Measurement of Curvature and Strain with Dual-differential Temperature Compensation[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(20): 8375－8380.
[48] Han W, Tong Z, Cao Y. Simultaneous Measurement of Temperature and Liquid Level base on Core-offset Singlemode-multimode-singlemode Interferometer[J]. Optics Communications, 2014, 321: 134－137.
[49] Pevec S, Donlagi ć. Multiparameter Fiber-optic Sensors: a Review[J]. Optical Engineering, 2019, 58(7): 072009.
[50] Song D, Liu W, Yin Z, et al. Mid-infrared Refractive Index Sensor with High Sensitivity and Wide Detection Range based on Multimode Interference in Tellurite Optical Fibers[J]. Results in Optics, 2023, 12: 100458.
[51] Tian K, Zhang M, Farrell G, et al. Highly Sensitive Strain Sensor based on Composite Interference Established within S-tapered Multimode Fiber Structure[J]. Optics Express, 2018, 26(26): 33982－33992.
[52] Li P, Chen Y, Hu J, et al. Simultaneous Measurement of Salinity and Temperature of Seawater based on U-shaped Tapered No-core Fiber[J]. Infrared Physics & Technology, 2023, 130: 104617.
[53] Zhou G, Wu Q, Kumar R, et al. High Sensitivity Refractometer based on Reflective Smf-small Diameter no Core Fiber Structure[J]. Sensors, 2017, 17(6): 1415.
[54] Zhou J, Wang Y, Liao C, et al. Intensity Modulated Refractive Index Sensor based on Optical Fiber Michelson Interferometer[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2015, 208: 315－319.
[55] Chen X Y, He W, Li Z H, et al. Dual-parameter Fiber Sensor for Temperature and Strain based on SMS-FP Composite Structure[J]. Mod. Phys. Lett. B, 2023, 38(11): 245006.
[56] Al-Rubaiyee H A, Al-Hayali S K, Al-Janabi A H. Nanostructured Coating of Graphene Nanoparticles Deposited onto a Cladding Etched No-core Optical Fiber for Temperature Measurement[J]. Applied Optics, 2020, 59(15): 4663－4671.
[57] Chen L, Tian J, Wu Q, et al. High-sensitivity Temperature Sensor based on PDMS-coated Photonic Crystal Fiber Interferometer[J]. Optical Fiber Technology, 2023, 80: 103409.
[58] 杨松岩,何巍,张钰民,等. 镀金表面光子晶体光纤温度传感特性仿真分析[J]. 光通信研究,2024(4):230008.
Yang S Y, He W, Zhang Y M, et al. Simulation Analysis of Temperature Sensing Characteristics of Photonic Crystal Fiber with Gold Plated Surface[J]. Study on Optical Communications, 2024(4):230008.
[59] 王磊,张钰民,姚雾峰,等. 单模-空心-单模光纤微结构应变传感特性研究[J]. 半导体光电,2024,45(4): 515－522.
Wang L, Zhang Y M, Yao J F, et al. Research on Strain Sensing Characteristics of Single Mode-hollow Core-single Mode Optical Fiber Microstructure[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2024, 45(4): 515－522.
[60] Zheng Y Y, Yang X Z, Feng W L, et al. Optical Fiber Refractive Index Sensor based on SMF-TCF-NCF-SMF Interference Structure[J]. Optik, 2021, 226(2): 165900.