

# 多模光纤模间干涉传感器研究进展

任乃奎 熊燕玲 吴明泽 李炜峰

哈尔滨理工大学应用科学学院, 黑龙江 哈尔滨 150080

**摘要** 多模光纤模间干涉传感器因其自身结构简单、成本低廉、重量轻、灵敏度高、集成度好、不受电磁干扰等优点成为光纤传感器的研究热点,广泛应用于大型结构安全监测中应力、温度、振动、位移等物理量的测量。多模光纤模间干涉传感器的研究主要以迈克耳孙干涉和马赫-曾德尔干涉为主。传感器的传感臂由单模光纤和多模光纤构成,通过不同光纤的熔接实现模式耦合。通过腐蚀传感光纤并涂覆相应的敏感材料,实现折射率、浓度、磁场等物理量的测量。光纤模间干涉传感器的制作主要是传感光纤、光纤熔接方式的选择及参数的优化。综述了近年来国内外多模光纤模间干涉传感器的研究进展并分析了各自的优缺点。

**关键词** 光纤光学; 光纤传感器; 模间干涉; 多模光纤; 模式耦合

**中图分类号** TN253 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP53.070001

## Progress in Multimode-Fiber Modal Interferometric Sensors

Ren Naikui Xiong Yanling Wu Mingze Li Weizheng

College of Applied Science, Harbin University of Science and Technology, Harbin, Heilongjiang 150080, China

**Abstract** The multimode-fiber modal interferometric sensor has been the research focus in the fiber optic sensor field in virtue of its simple structure, low cost, lightweight, high sensitivity, excellent degree of integration, and resistance to electromagnetic interference. It is widely applied to safety monitoring in large-sized architectures for measurement of such physical parameters as stress, temperature, vibration, and displacement. Early fiber optic modal interferometric sensors are mainly based on the reflective Michelson interferometer and the Mach-Zehnder interferometer. The single-mode fiber and the multimode fiber are used as the sensing fiber. Mode coupling is achieved by the fusion splicing of different fibers. Modal interferometric sensor can be used to measure refractive index, concentration and magnetic field *etc.* by etching the sensing fiber and coating the fiber with corresponding sensitive material. The fabrication of fiber optical modal interferometric sensor mainly depends on fiber fusion methods and fiber types, as well as the optimization of fiber physical parameters. The progress in the multimode-fiber modal interferometric sensor at home and abroad is reviewed, and the merits and drawbacks are analyzed.

**Key words** fiber optics; optic fiber sensor; modal interference; multimode-fiber; mode coupling

**OCIS codes** 060.2370; 060.2300; 280.4788

## 1 引言

多模光纤模间干涉传感器灵敏度高、结构紧凑、抗电磁干扰能力强、耐腐蚀,在桥梁、隧道及石油管道等的安全监测中具要较好的应用前景,是目前光纤传感技术研究的一个重要方向。

多模光纤模间干涉传感器是利用多模光纤(MMF)制作的光纤模间干涉传感器,主要采用马赫-曾德尔干涉或迈克耳孙干涉方式,不同光纤模式的光进行马赫-曾德尔干涉或迈克耳孙干涉,通过干涉谱波长或光强的变化实现对外界环境参量的监测,利用单臂光纤中的模式干涉实现了高度集成化的多模光纤模间干涉

**收稿日期:** 2016-01-19; **收到修改稿日期:** 2016-03-03; **网络出版日期:** 2016-06-01

**基金项目:** 黑龙江教育厅科研项目(12541163)

**作者简介:** 任乃奎(1990—),男,硕士研究生,主要从事光纤模间干涉方面的研究。E-mail: 664634541@qq.com

**导师简介:** 熊燕玲(1964—),女,博士,教授,主要从事光纤传感及测试技术方面的研究。

E-mail: xyling1964@163.com(通信联系人)

传感器。1974年 Crosignani 等<sup>[1]</sup>提出了光纤中模式干涉的概念。随着研究的进行,实现了单臂光纤模间干涉,用单臂光纤中的光纤熔接替代了传统马赫-曾德尔干涉或迈克耳孙干涉光路中耦合器的分光和合光作用,用基模和高阶模式的传输取代参考光纤臂和传感光纤臂的作用。多模光纤传感器可以直接测量温度、应变、曲率等参量,并且随着涂覆技术的发展,通过腐蚀模间干涉传感器传感光纤,涂覆相应的敏感材料替代传感光纤包层,可以间接监测敏感参数,如涂覆磁流体可监测磁场,涂覆聚乙烯醇可监测湿度等。针对不同的测量需求可以定制不同的光纤模间干涉传感器,有利于该类型传感器的广泛应用。

多模光纤模间干涉传感器主要是利用不同的手段实现光纤中传输光的模式干涉,利用模间干涉进行传感。本文综合论述了近年来国内外利用多模光纤及单模光纤(SMF)制作模间干涉传感器的技术和应用前景,并对其优缺点进行了分析。

## 2 制作技术

多模光纤模间干涉传感器的模间干涉类型主要分为马赫-曾德尔干涉和迈克耳孙干涉两类,制作技术主要是熔接单模光纤与多模光纤,通过光纤的错位熔接、凸锥与凹锥熔接、不同芯径光纤的熔接和长周期光栅熔接等实现模式激发及耦合,这些熔接方式的优化组合构成了测量应变<sup>[2]</sup>、温度<sup>[3-4]</sup>、振动<sup>[5]</sup>及曲率的模间干涉型传感器。为了扩大光纤模间干涉传感器的应用,可以对传感光纤进行腐蚀并涂覆对于某一参量敏感的材料,实现对折射率、浓度<sup>[6]</sup>、磁场、液面位置<sup>[7]</sup>等参量的测量。

国外在光纤模间干涉传感器方面的研究较早。Eickhoff<sup>[8]</sup>将 He-Ne 激光器经过偏振器发出的偏振光通过透镜后入射到一段 2.15 m 长的双折射光纤中传输,通过沃拉斯顿棱镜将光分成相互垂直的两束 HE<sub>11</sub> 光,然后利用光电探测器接收两束光,经过电路处理之后观察输出电压的变化,实验装置如图 1 所示。其原理为双折射光纤的双折射效应,即模式在不同的偏振方向上传播速度不同。一束 HE<sub>11</sub> 模式的偏振光入射到双折射光纤中,HE<sub>11</sub> 模式的两种相互垂直的偏振光将以不同的速度传播,通过沃拉斯顿棱镜将这两种传播速度不同的偏振光分离形成两束光,然后进行干涉。该装置与双光纤干涉相比,温度灵敏度提高了 50 倍,有进一步研究的价值。但整个光路中涉及到光学元件、电路和光路准直等,系统设计复杂,且温度传感部分过长,不利于定点测量温度变化。

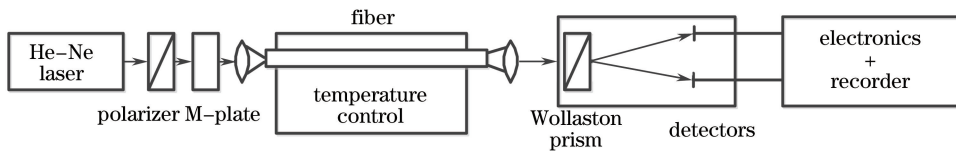


图 1 双折射光纤的单臂光纤模式干涉实验装置

Fig. 1 Experimental setup of one-fiber interferometer with birefringent fiber

1993年 Kanellopoulos 等<sup>[9]</sup>在椭圆芯高双折射光纤中刻写两束光诱导偏振摆动滤波器,实现单臂光纤的马赫-曾德尔干涉,偏振摆动滤波器的作用与传统的马赫-曾德尔干涉仪中耦合器的作用相似。该系统实现了单臂集成模间干涉,大幅简化了传感器模式耦合的复杂程度,但干涉波长为 787 nm 且带宽为 18 nm,不利于传感解调。

1995年 Sharma 等<sup>[10]</sup>提出一种单臂双模光纤干涉结构,如图 2 所示。光源发出 LP<sub>02</sub> 模式的光,通过第一个机械微弯点时,由于光纤弯曲使部分在纤芯中传输的 LP<sub>02</sub> 模式光泄漏到包层,激发出 LP<sub>21</sub> 模式,使光纤中传输光的模式 LP<sub>02</sub> 和 LP<sub>21</sub> 共存,在多模光纤中传输时受温度影响,两种模式的光存在相位延迟。通过第二个机械微弯点时,LP<sub>02</sub> 和 LP<sub>21</sub> 混合干涉,将干涉光强沿光纤输出。这是早期多模光纤模间干涉传感器的雏形,在这种传感器中模式固定,易于形成规则的干涉条纹,但由于机械装置的抖动,采用机械装置弯曲光纤时,会干扰模式的激发和耦合。

多模光纤模间干涉传感器的大规模研究始于 2000 年,主要采用放大自发辐射光源,利用光谱仪观察光谱的漂移进行传感解调。传感器通过熔接不同结构的多模光纤与单模光纤实现光纤中的模间干涉,主要分为迈克耳孙干涉和马赫-曾德尔干涉。

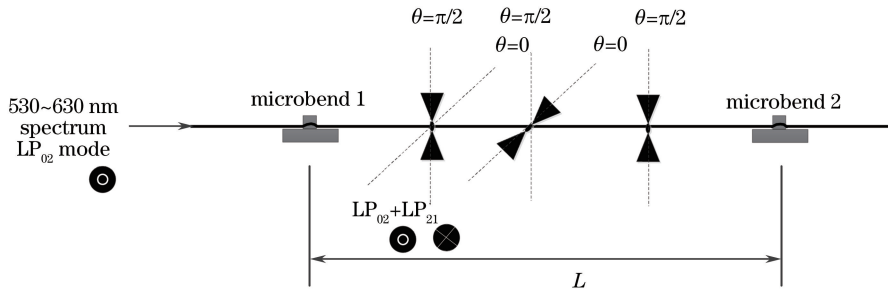


图2 双模光纤的模间干涉实验装置

Fig. 2 Experimental setup of modal interference with dual-mode fiber

## 2.1 迈克耳孙干涉

多模光纤模间干涉传感器的研究最初以构建迈克耳孙干涉型传感器为主,逐步发展到马赫-曾德尔干涉传感器。2003年 Mehta 等<sup>[11]</sup>利用单模光纤与多模光纤的熔接,将多模光纤末端切平,相隔一段间隔后放置反射镜,构成迈克耳孙干涉仪,实验装置如图3所示。通过移动平面镜的位置增加或减小干涉臂的长度,使干涉光谱发生漂移,通过测量干涉谱的变化来测量微位移,实验测得的灵敏度与有限差分光束传播法计算的灵敏度基本相符,分别为 $-4067.8 \mu\text{m}/\mu\text{m}$ 和 $-3909.7 \mu\text{m}/\mu\text{m}$ 。这种模间干涉传感器结构简单,利用平面镜的镜面反射测量微位移,但由于平移过程中需要保持平面镜镜面与多模光纤端面平行,在实际操作中不易实现。2006年 Li 等<sup>[12]</sup>利用单模光纤拼接多模光纤,抛光多模光纤末端构成迈克耳孙干涉仪,实现温度测量,该传感器在温度变化范围为 $100\sim 750\text{ }^\circ\text{C}$ 时,温度灵敏度为 $15 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 。光纤的耐高温特性使得模间干涉传感器的温度测量范围大幅提高。

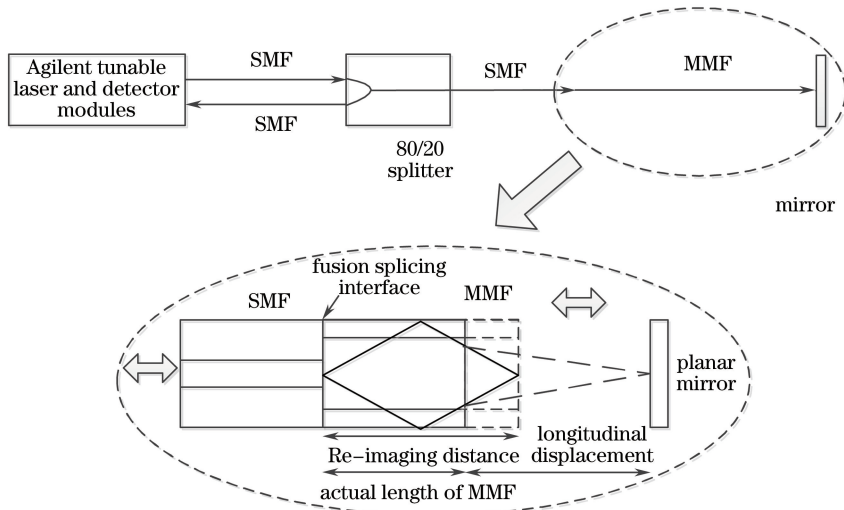


图3 单模光纤-多模光纤迈克耳孙干涉微位移传感器

Fig. 3 Micro displacement sensor based on SMF-MMF Michelson interference

2015年 Zhao 等<sup>[13]</sup>在单模光纤上熔接小段多模光纤,而后熔接单模光纤作为传感光纤,将末端抛光当作反射镜面构成迈克耳孙干涉仪,实现折射率和温度的测量,实验装置如图4所示。其中多模光纤的作用是将光激发出高阶模式然后进入传感的单模光纤中传输。实验中将传感头放入液体中,利用单模光纤与液体的交界面对光进行反射,反射的光再次经过多模光纤进行模式耦合发生干涉,通过耦合器将干涉条纹传输到光谱仪中。同时为了固定传感器,将传感头放入毛细管中,单模光纤抛光的一侧裸露出一小段端口用胶固定,一般情况下这种方式使模间干涉传感器对温度的响应由红移转变为蓝移,这是由于所用胶的热膨胀系数较大使得光纤末端发生弯曲,因此光纤模间干涉传感器产生蓝移。由于不同折射率的液体对光的反射率不同,通过观察干涉光谱的消光比可以实现折射率的测量。在同时测量折射率和温度的传感实验中,通过观察干涉条纹的对比度可以监测折射率,实验测得的温度灵敏度和折射率灵敏度分别为 $-92.6 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 和

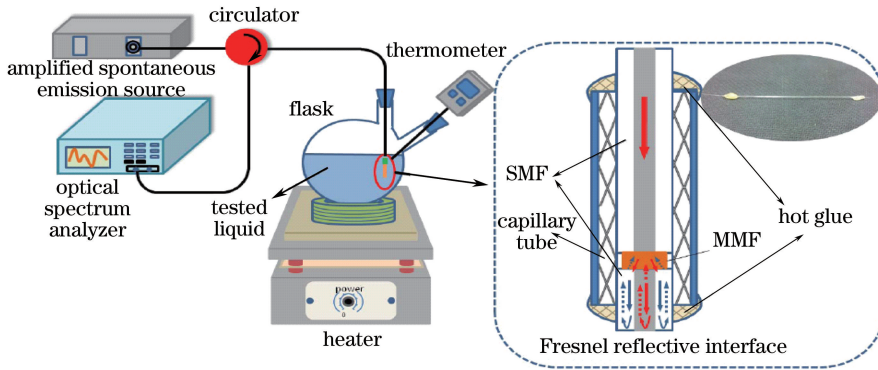


图 4 单模光纤-多模光纤-单模光纤结构的迈克耳孙温度与折射率传感器

Fig. 4 Michelson temperature and refractive index sensor based on SMF-MMF-SMF structure

-67.9 dB/RIU。该传感器最大的特点是光谱受温度影响产生蓝移。该方法提供了一种新的测温方式,通过温度影响结构的变化进而影响光谱的波动,这种温度间接影响光谱漂移的方法具有较好的研究价值。

全光纤迈克耳孙干涉利用光纤末端的反射实现模式干涉,因此光纤末端的光滑程度对传感器的影响较大,为此在光纤末端镀上高反射率的材料以制作迈克耳孙干涉型的模间干涉传感器。2008年 Tian 等<sup>[14]</sup>通过对单模光纤拉锥并在光纤端面上镀金充当反射镜面构成迈克耳孙干涉,测量折射率变化,在折射率变化范围为 1.315~1.3618 时,灵敏度为  $5.1 \times 10^{-4} \text{ nm}^{-1}$ 。用金层充当反射面增大对光的反射率,同时也提高了传感器的抗干扰能力。2014年 Hu 等<sup>[15]</sup>利用凸锥形成模式的激发和耦合,在光纤末端涂覆银以提高反射率,构成迈克耳孙干涉模间干涉传感器,并在光纤上涂覆壳聚糖实现对湿度的监测,实验装置如图 5 所示。虽然涂覆使干涉传感器测量参量种类增多、灵敏度提高,但镀银会增大传感器的制作成本。迈克耳孙干涉利用光纤末端反射的方法易受光纤末端端面平滑度的影响,不利于大规模应用。

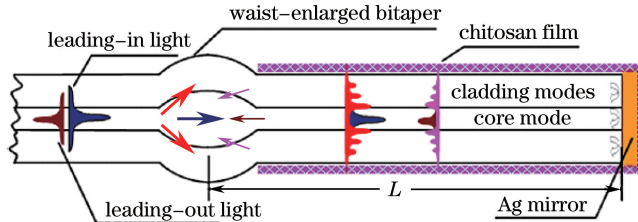


图 5 涂覆壳聚糖的单模光纤迈克耳孙湿度传感器

Fig. 5 Chitosan-coated Michelson humidity sensor based on SMF structure

## 2.2 马赫-曾德尔干涉

马赫-曾德尔干涉型模间干涉传感器的研究主要集中在 2009 年之后,2009 年之前对此研究较少。马赫-曾德尔干涉型传感器通过错位熔接、不同芯径光纤的熔接、拉凸锥和凹锥熔接等制作方法实现单模光纤和多模光纤间模式的激发和耦合,传感臂光纤为单模光纤或多模光纤。

### 2.2.1 不同芯径光纤熔接

2003年 Kumar 等<sup>[16]</sup>研究了多模光纤两端熔接单模光纤构成单模-多模-单模(SMS)结构的传输特性,分析了多模光纤长度对透射谱的影响,说明了 SMS 结构作为微弯传感器和光学滤波器的可能性。2006年刘丰等<sup>[17]</sup>通过实验和仿真验证了椭圆芯保偏光纤的模间干涉特性可以用于物理参量的测量,应用前景较好。

2007年 Liu 等<sup>[18]</sup>利用单模光纤-渐变型多模光纤-单模光纤结构实现低成本的高灵敏度应变和温度传感,灵敏度分别达到  $18.6 \text{ pm}/\mu\epsilon$  以及  $58.3 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ ,在当时属于高灵敏度的传感器。选用的单模光纤和小段多模光纤价格低廉,制作过程简单,但由于采用的是模间干涉,因此实验中限定光源波长范围时,较难产生理想的干涉条纹。2014年 Kumar 等<sup>[19]</sup>对 SMS 结构进行实验研究,多模光纤采用阶跃型多模光纤和渐变型多模光纤,实验得出渐变型多模光纤构成的 SMS 结构温度灵敏度优于阶跃型多模光纤。

2008年 Nguyen 等<sup>[20]</sup>提出利用无涂覆层的单模光纤两端熔接多模光纤构成温度传感器,结构如图 6 所

示。其中单模光纤为传感臂光纤,多模光纤将传输光纤中的基模激发出高阶模式,当光进入单模光纤时,由于多模光纤的纤芯直径比单模光纤的纤芯直径大,因此在多模光纤中激发出的高阶模式会在单模光纤的包层中传输,最后在传感单模光纤与多模光纤的熔接点处将包层模式和纤芯模式进行干涉耦合输出。当温度变化范围为  $0\sim 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,温度灵敏度为  $0.088\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ 。虽然结构中由多模光纤激发在传感单模光纤中传输的包层模和基模时易产生多个干涉条纹,便于多波长测量,但该结构中由于多模光纤的长度约为  $1\text{ mm}$ ,且左右对称,实际操作中难以实现。2014年 Su 等<sup>[21]</sup>在上述结构的基础上用多模光纤取代中间的单模光纤,熔接三段多模光纤,中间多模光纤的纤芯直径较两端的多模光纤纤芯直径更细,两端的多模光纤激发出高阶模在多模光纤的纤芯和包层中传输,构成马赫-曾德尔干涉,虽然传感多模光纤中存在的包层模式易受外界折射率的影响,但纤芯模式不受外界折射率影响,所以该传感器可以同时测量温度和折射率。2015年刘丰等<sup>[22]</sup>在保偏光子晶体光纤两端熔接单模光纤构成弯曲传感器,实验发现当弯曲半径介于  $10\sim 30\text{ mm}$  时,双空气孔结构的保偏光子晶体光纤中  $\text{LP}_{01}$  和  $\text{LP}_{11}$  模间干涉输出光强分布与弯曲半径之间具有良好的线性关系,可以通过探测模间干涉的输出光强实现光纤弯曲半径的测量。

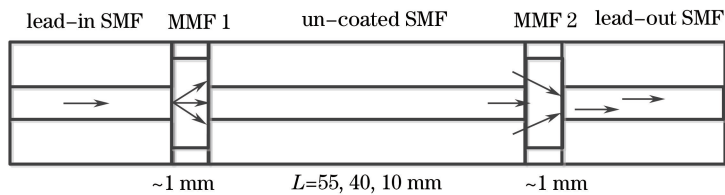


图6 多模光纤-单模光纤-多模光纤马赫-曾德尔温度传感器

Fig. 6 Mach-Zehnder temperature sensor based on MMF-SMF-MMF structure

随着微观操作技术的发展,利用氢氟酸腐蚀部分光纤实现折射率的监测。2011年 Wu 等<sup>[23]</sup>腐蚀 SMS 结构中的多模光纤区域,结构如图 7 所示,实验验证了传感多模光纤的直径与折射率灵敏度的关系,得出光纤越细灵敏度越高的结论,这种结构虽对外界环境的折射率变化敏感,但光纤腐蚀过细容易造成光纤传感器的断裂。2012年 Rong 等<sup>[24]</sup>在此结构基础上对入射端单模刻蚀光纤布拉格光栅(FBG),实现对温度和折射率的同时测量。2014年 Xue 等<sup>[25]</sup>对 SMS 结构中的多模光纤进行包层腐蚀,将传感器竖直放入液体中监测液面,这种传感器利用波导模-泄漏模-波导模的结构进行设计,测得的液体折射率大于光纤纤芯的折射率,增大了测量范围,且液面距离与输出强度间有较好的线性关系,该结构所测的液面距离受多模光纤长度的影响,测量的液面距离小。2015年郭璇等<sup>[26]</sup>利用氢氟酸腐蚀椭芯保偏光纤的包层,以增强被测溶液折射率对光纤内传输模式的调制效应,制作出了折射率传感器。整个实验中采用激光器作为光源,激光器发出的光通过光纤偏振器变成线性偏振光进入椭芯光纤中激发出  $\text{LP}_{01}$  和  $\text{LP}_{11}$  两个线性偏振模,经过椭芯保偏光纤的腐蚀区域后,由于待测溶液的影响,这两种模式的有效折射率发生调制,从而使得椭芯保偏光纤中左右边瓣的光强发生变化,通过对瓣光强的数据处理得出外界环境的折射率变化。研究表明当光源入射波长为  $980\text{ nm}$  时,折射率约为  $1.39$ ,半径为  $8\text{ }\mu\text{m}$  的传感头对折射率的灵敏度为  $-7.1\text{ RIU}^{-1}$  (即归一化光强与 RIU 之比)。

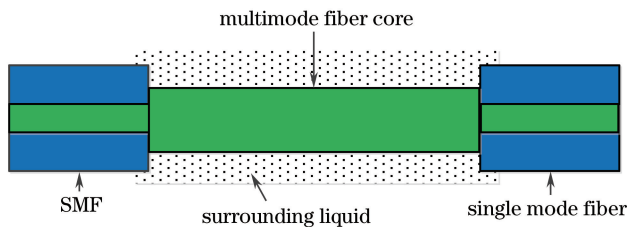


图7 SMS 结构多模光纤包层腐蚀的折射率传感器

Fig. 7 MMF cladding etched refractive index sensor based on SMS structure

### 2.2.2 拉锥结构熔接

2003年 Guo 等<sup>[27]</sup>研究了多模光纤在拉圆锥时结构的传输特性及拉锥区倏逝波的吸收特性,通过折射率传感实验证实带包层多模光纤凹锥的灵敏度低于无包层多模光纤凹锥,但是可以通过增加多模光纤锥区的长度提高灵敏度。这种结构的机械强度较大,可以用于化学传感器。但在锥体的制作过程中需要采用高

温拉锥,且折射率测量范围较小。

2011年 Wang 等<sup>[28]</sup>利用 CO<sub>2</sub>激光器对多模光纤区域光纤两端施加重力,将多模光纤拉细到 30 μm 芯径,锥区长度为 675 μm,大幅提高传感的灵敏度,结构如图 8 所示,当外界折射率约为 1.44 时灵敏度高达 1913 nm/RIU。对多模光纤拉细锥虽然可以提高折射率的灵敏度,但相应传感器的机械强度下降,极易因操作不当使传感器断裂,不利于实际应用。

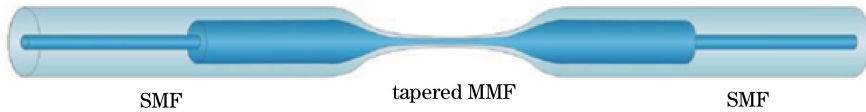


图 8 凹锥多模光纤干涉型折射率传感器

Fig. 8 Interferometric refractive index sensor with tapered MMF structure

为了提升模间干涉传感器的机械性能,除了对多模光纤进行拉凹锥外,还研究了多模光纤与单模光纤扩腰处理(凸锥)。2013年 Shao 等<sup>[29]</sup>通过多模光纤两端扩腰熔接单模光纤构建马赫-曾德尔干涉传感器,实现对折射率和温度的测量,结构如图 9 所示。

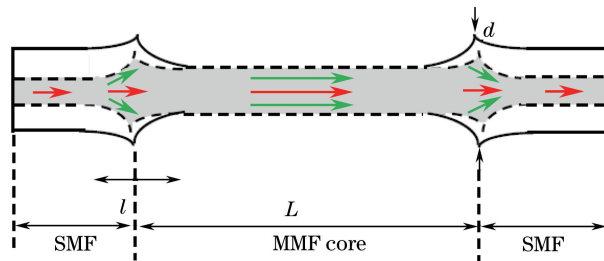


图 9 多模光纤两端熔接双凸锥的马赫-曾德尔折射率传感器

Fig. 9 Mach-Zehnder refractive index sensor based on MMF core sandwiched between two waist-enlarged fiber tapers

这种结构机械性能强,但操作中不易实现尖形锥体,一般操作方式是利用光纤熔接机进行大幅度推进熔接一次成型,良品率低。也可以利用光纤熔接机对光纤进行手动放电,在光纤上打孔,形成凹锥结构进行模间干涉,该过程中可进行多次放电,通过观察透射光谱对结构进行修正和优化,构建理想的模间干涉结构。

从多模光纤拉锥技术发展到单模光纤双拉锥技术实现了模间干涉。2008年 Tian 等<sup>[30]</sup>在单模光纤上串联两个锥体构成马赫-曾德尔干涉仪,制备了折射率传感器,当两锥体间的单模光纤长度为 55 mm 时,灵敏度为  $5.85 \times 10^{-2} \text{ nm}^{-1}$ 。2009年 Wei 等<sup>[31]</sup>利用 CO<sub>2</sub>激光器在单模光纤上制作两个凹锥构成马赫-曾德尔干涉仪,结构如图 10 所示,当两个凹锥间距为 5 mm 时,该干涉仪的灵敏度为  $8.17 \times 10^{-2} \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 。凹锥在制作过程中可以观察透射光谱,修正凹锥,制作过程比较简单,但凹锥的机械性能差。

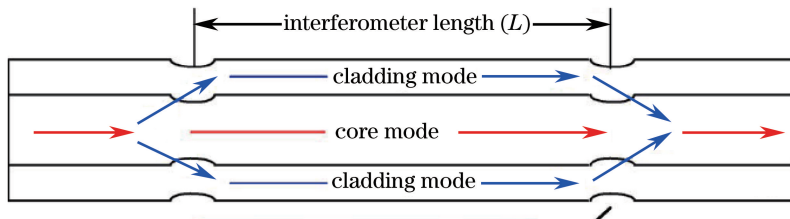


图 10 CO<sub>2</sub>激光器两点刻蚀的马赫-曾德尔干涉传感器

Fig. 10 Mach-Zehnder interferometric sensor fabricated by two-point CO<sub>2</sub> laser irradiation

### 2.2.3 错位结构熔接

2008年 Dong 等<sup>[32]</sup>对单模光纤熔接纤芯和包层直径分别为 1.9 μm 和 15.7 μm 的多模光纤,再错位熔接单模光纤构成压力传感器,结构如图 11 所示。通过观察消光比的变化读取侧向压力信息,此传感器虽然受温度影响使谱形发生红移,但温度对消光比无影响。

与一般的芯径对准熔接法相比,错位熔接法使光在错位熔接处的激发模式更方便,当错位量较大时激发出包层模式。在实际操作中主要采用光纤熔接机手动熔接实现错位结构,实验发现,错位熔接易于改善干涉

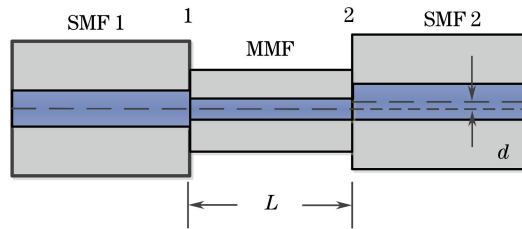


图 11 纤芯错位多模光纤干涉的横向力传感器

Fig. 11 Lateral force sensor based on core-offset MMF interference

条纹的对比度,通过调节错位量可以产生良好的干涉条纹。当光纤错位熔接时,必须优化放电参数,否则制作出的错位结构极易破坏干涉条纹,使干涉条纹消失。

2014年Fan等<sup>[33]</sup>将错位熔接和不同芯径熔接的方式相结合,在单模光纤末端错位熔接单模光纤,再熔接小段多模光纤,最后熔接传输光的单模光纤,结构如图12所示。错位熔接处易激发包层模式,多模光纤的芯径较大,能够接收较多的光信号进行模式耦合。由于错位熔接光纤熔接处部分暴露在液体中,部分光在熔接点处泄漏到外界环境中,再经过外界环境传输后进入光纤中传输,因此能够感知外界的折射率变化。错位熔接会使光在错位熔接点附近损耗较大,不利于长距离传输。随着激发模间干涉模式的探索和熔接制作技术的发展,能够实现单模光纤中将错位熔接与扩腰熔接相结合产生马赫-曾德尔干涉结构进行传感<sup>[34-35]</sup>。

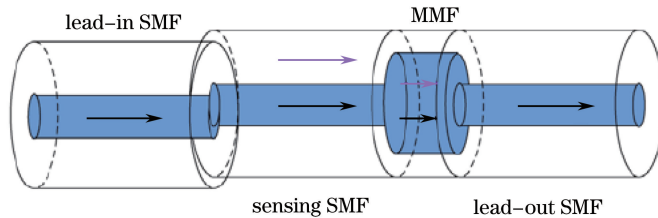


图 12 单模光纤错位-单模光纤-多模光纤模间干涉传感器

Fig. 12 Modal interferometric sensor based on SMF-core offset-SMF-MMF structure

#### 2.2.4 敏感材料涂覆

上述模间干涉传感器能够测量温度、应变、折射率等物理量,但随着社会技术的发展,还需监测磁场、气体浓度等物理量。随着敏感材料的发现,人们开始将敏感材料与模间干涉传感器相结合,扩大了传感器检测物理量的范围。2013年An等<sup>[36]</sup>利用SMS结构,腐蚀多模光纤,并在多模光纤上涂覆聚乙烯醇制备湿度传感器,灵敏度为 $0.09 \text{ nm}/\%$ (%为相对湿度单位)。2013年Wang等<sup>[37]</sup>在多模-单模干涉结构的基础上腐蚀多模光纤并涂覆磁流体,以磁流体作为多模光纤的包层实现磁场的测量,磁场灵敏度最大可达 $-16.86 \text{ pm}/\text{Oe}$ ( $1 \text{ Oe} \triangleq 79.578 \text{ A}/\text{m}$ )。2014年张荣香等<sup>[38]</sup>利用SMS结构和磁流体制作出全光纤电流互感器,通过检测透射光谱的特征波长漂移得到的电流灵敏度为 $1243.7 \text{ pm}/\text{A}$ ,通过检测传输损耗变化得出的电流灵敏度最大为 $506.2 \text{ dB}/\text{A}$ 。2014年Wen等<sup>[39]</sup>采用气相沉积技术在SMS结构的多模光纤处腐蚀包层镀上ZnO薄膜实现湿度和乙醇浓度的监测。

光纤模间干涉传感器为干涉型传感器,对温度、应变以及其他外界环境参量的灵敏度较高,在测温过程中其他环境参量的变化会导致干涉谱形的漂移,对温度的测量造成影响,使得传感器的温度稳定性变差。针对这种情况,现行解决方法主要有两种,一是利用光纤模间干涉传感器直接测量温度,但在测量过程中需固定传感器,防止其他参量对温度测量造成影响;二是间接测量温度<sup>[13]</sup>。传统的测温过程中温度的变化直接影响光纤物理量的变化,对光纤进行涂覆处理后,温度的变化先引起涂覆层物理量的变化进而引起光纤物理量的变化,在此过程中由于温度间接作用于光纤,有利于提高测温的稳定性。

### 3 结束语

综述了近10年来多模光纤模间干涉传感器的发展趋势,介绍了模间干涉传感器的传感光纤种类及模式耦合的结构类型,分析了各种模间干涉传感器的优缺点,针对实际需求选择不同的结构类型和熔接方式并加

以优化。虽然多模光纤模间干涉传感器的研究已经取得了长足进展,但仍有一些关键技术值得深入探索。目前对多模光纤模间干涉传感器的研究主要集中在以下两方面,一是微加工处理多模光纤及单模光纤使其对外界参量变化的灵敏度提高,采用的微加工手段主要有错位、拉锥等;二是将敏感材料与多模光纤模间干涉传感器相结合,使模间干涉传感器的测量参量类型增多。模间干涉传感器将向着单模光纤经过微加工处理后直接构成干涉结构的趋势发展,以降低传感器的成本。同时磁流体、聚乙烯醇等对外界磁场和湿度敏感的材料涂覆在光纤传感器上,实现了磁场及湿度等参量的测量。通过材料学与模间干涉传感的结合,模间干涉传感器发展前景更为广阔。

### 参 考 文 献

- 1 Crosignani B, Daino B, Di Porto P. Interference of mode patterns in optical fibers[J]. *Optics Communications*, 1974, 11(2): 178-179.
- 2 Li Enbang. An optic fiber strain sensor based on interference of higher-order modes[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2007, 18(9): 1055-1057.  
李恩邦. 基于高阶模干涉的光纤应变传感器[J]. *光电子 • 激光*, 2007, 18(9): 1055-1057.
- 3 Hernandez-Romano I, Monzon-Hernandez D, Moreno-Hernandez C, *et al.*. Highly sensitive temperature sensor based on a polymer-coated microfiber interferometer[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(24): 2591-2594.
- 4 Lü Weiwei, Xu Feng, Yu Benli. All-fiber Mach-Zehnder temperature sensor based on inter-modal interference[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(5): 050605.  
吕卫卫, 徐峰, 俞本立. 基于模间干涉原理的全光纤马赫-曾德尔温度传感器[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(5): 050605.
- 5 Zhao Y, Li X G, Meng F C, *et al.*. A vibration-sensing system based on SMS fiber structure[J]. *Sensors and Actuators A*, 2014, 214: 163-167.
- 6 Zhao Y, Cai L, Li X G, *et al.*. Liquid concentration measurement based on SMS fiber sensor with temperature compensation using an FBG[J]. *Sensors and Actuators B*, 2014, 196: 518-524.
- 7 Liu Y, Li Y, Yan X J, *et al.*. High refractive index liquid level measurement via coreless multimode fiber[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(20): 2111-2114.
- 8 Eickhoff W. Temperature sensing by mode-mode interference in birefringent optical fibers[J]. *Optics Letters*, 1981, 6(4): 204-206.
- 9 Kanellopoulos S E, Handerek V A, Rogers A J. Compact Mach-Zehnder fiber interferometer incorporating photoinduced gratings in elliptical-core fibers[J]. *Optics Letters*, 1993, 18(12): 1013-1015.
- 10 Sharma A, Posey R. Dual-mode fiber-optic interferometer: A novel design[J]. *Optics Letters*, 1995, 20(22): 2345-2347.
- 11 Mehta A, Mohammed W, Johnson E G. Multimode interference-based fiber-optic displacement sensor[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2003, 15(8): 1129-1131.
- 12 Li E B, Wang X L, Zhang C. Fiber-optic temperature sensor based on interference of selective higher-order modes[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(9): 091119.
- 13 Zhao Y, Cai L, Li X G. High sensitive modal interferometer for temperature and refractive index measurement[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(12): 1341-1344.
- 14 Tian Z, Yam S S, Loock H P. Refractive index sensor based on an abrupt taper Michelson interferometer in a single-mode fiber[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(10): 1105-1107.
- 15 Hu P B, Dong X Y, Ni K, *et al.*. Sensitivity-enhanced Michelson interferometric humidity sensor with waist-enlarged fiber bitaper[J]. *Sensors and Actuators B*, 2014, 194: 180-184.
- 16 Kumar A, Varshney R K, Sharma P. Transmission characteristics of SMS fiber optic sensor structures[J]. *Optics Communications*, 2003, 219(1): 215-219.
- 17 Liu Feng, Bi Weihong, Guo Xuan. Research on modular interference of elliptical-core polarization maintenance fiber[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2008, 19(8): 1019-1022.  
刘丰, 毕卫红, 郭璇. 椭圆芯保偏光纤模间干涉的研究[J]. *光电子 • 激光*, 2008, 19(8): 1019-1022.
- 18 Liu Y, Wei L. Low-cost high-sensitivity strain and temperature sensing using graded-index multimode fibers[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(13): 2516-2519.



- 19 Kumar M, Kumar A, Tripathi S M. A comparison of temperature sensing characteristics of SMS structures using step and graded index multimode fibers[J]. *Optics Communications*, 2014, 312(1): 222-226.
- 20 Nguyen L V, Hwang D, Moon S, *et al.*. High temperature fiber sensor with high sensitivity based on core diameter mismatch[J]. *Optics Express*, 2008, 16(15): 11369-11375.
- 21 Su J, Tong Z R, Cao Y, *et al.*. High sensitivity multimode-multimode-multimode structure fiber sensor based on modal interference[J]. *Optics Communications*, 2014, 315(15): 112-115.
- 22 Liu Feng, Feng Xiaolong, Guo Xuan, *et al.*. Research on the bending sensing characteristics of PM-PCF based on intermodal interference[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(9): 0905005.  
刘丰, 冯晓龙, 郭璇, 等. 基于模间干涉的保偏光子晶体光纤弯曲传感特性研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(9): 0905005.
- 23 Wu Q, Semenova Y, Wang P F, *et al.*. High sensitivity SMS fiber structure based refractometer-analysis and experiment [J]. *Optics Express*, 2011, 19(9): 7937-7944.
- 24 Rong Q Z, Qiao X G, Guo T, *et al.*. Temperature-calibrated fiber-optic refractometer based on a compact FBG-SMS structure[J]. *Chinese Optics Letters*, 2012, 10(3): 030604.
- 25 Xue L L, Che D, Yang L. Liquid level sensing based on leaky mode attenuation in a guided-mode-leaky-mode-guided-mode fiber structure[J]. *Optics Communications*, 2014, 325(30): 160-164.
- 26 Guo Xuan, Liu Feng, Xu Xiang, *et al.*. Refractive index sensing characteristics of cladding-etched elliptical core polarization maintaining fiber based on intermodal interference[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(7): 0706002.  
郭璇, 刘丰, 徐香, 等. 模间干涉的包层腐蚀型椭芯保偏光纤折射率传感特性[J]. *光学学报*, 2015, 35(7): 0706002.
- 27 Guo S P, Albin S. Transmission property and evanescent wave absorption of cladded multimode fiber tapers[J]. *Optics Express*, 2003, 11(3): 215-223.
- 28 Wang P F, Brambilla G, Ding M, *et al.*. A High-sensitivity, evanescent field refractometric sensor based on a tapered, multimode fiber interference[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(12): 2233-2235.
- 29 Shao M, Qiao X G, Fu H W, *et al.*. High sensitivity refractive index sensing of Mach-Zehnder interferometer based on multimode fiber core sandwiched between two waist-enlarged fiber tapers[J]. *Optics Communications*, 2013, 311(15): 359-363.
- 30 Tian Z, Yam S S H, Barnes J, *et al.*. Refractive index sensing with Mach-Zehnder interferometer based on concatenating two single-mode fiber tapers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, 20(8): 626-628.
- 31 Wei T, Lan X W, Xiao H. Fiber inline core-cladding-mode Mach-Zehnder interferometer fabricated by two-point CO<sub>2</sub> laser irradiations[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009, 21(10): 669-671.
- 32 Dong B, Zhou D P, Wei L, *et al.*. Temperature- and phase-independent lateral force sensor based on a core-offset multimode fiber interferometer[J]. *Optics Express*, 2008, 16(23): 19291-19296.
- 33 Fan J, Zhang J, Lu P, *et al.*. A single-mode fiber sensor based on core-offset inter-modal interferometer[J]. *Optics Communications*, 2014, 320(1): 33-37.
- 34 Yao Q Q, Meng H Y, Wang W, *et al.*. Simultaneous measurement of refractive index and temperature based on a core-offset Mach-Zehnder interferometer combined with a fiber Bragg grating[J]. *Sensors and Actuators A*, 2014, 209(1): 73-77.
- 35 Wang M M, Jiang L, Wang S M, *et al.*. A robust fiber inline interferometer sensor based on a core-offset attenuator and a microsphere-shaped splicing junction[J]. *Optics & Laser Technology*, 2014, 63: 76-82.
- 36 An J L, Zhao Y, Jin Y X, *et al.*. Relative humidity sensor based on SMS fiber structure with polyvinyl alcohol coating [J]. *Optik*, 2013, 124(23): 6178-6181.
- 37 Wang H, Pu S, Wang N, *et al.*. Magnetic field sensing based on singlemode-multimode-singlemode fiber structures using magnetic fluids as cladding[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(19): 3765-3768.
- 38 Zhang Rongxiang, Han Qun, Liu Tiegeng, *et al.*. Investigation of characteristics of single mode-multimode-single mode all-fiber optic current sensor with broadband light source inputting[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(7): 0705003.  
张荣香, 韩群, 刘铁根, 等. 宽带光源入射下单模-多模-单模全光纤电流传感器特性研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(7): 0705003.
- 39 Wen X Y, Huang J, Xiao H, *et al.*. ZnO-coated SMS structure interrogated by a fiber ring laser for chemical sensing[J]. *Measurement Science Technology*, 2014, 25(11): 114002.