

光学学报

基于氧化石墨烯涂层的侧抛光纤马赫-曾德尔干涉仪 温湿度传感器

张平, 刘彬*, 刘正达, 刘娟, 王梦宇, 伏燕军, 万生鹏, 何兴道, 吴强**

南昌航空大学无损检测教育部重点实验室, 江西 南昌 330063

摘要 对基于微锥的侧抛光纤马赫-曾德尔干涉仪(MZI)结构进行了理论和实验研究。与传统没有经过侧边抛磨的光纤 MZI 相比,可以看出控制光纤侧抛深度可以有效地提高 MZI 结构的折射率传感性能。研究结果表明:侧抛深度达 $41.7 \mu\text{m}$ 时,折射率在 1.34 附近的传感灵敏度达 -117.145 nm/RIU 。利用侧抛光纤 MZI 结构结合亲水性材料氧化石墨烯(GO),通过将其沉积在侧抛光纤 MZI 表面,实现了对温度和湿度双参量的同时测量。温度和相对湿度(RH)的传感灵敏度分别达 $131.77 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 和 $-76.1 \text{ pm}/\% \text{RH}$ 。所提侧抛光纤 MZI 传感器结构具有灵敏度高、低成本和制备简单等优点,在生物化学传感领域具有广泛的应用前景。

关键词 光纤光学; 马赫-曾德尔干涉仪; 侧边抛磨; 氧化石墨烯; 温湿度传感

中图分类号 TN25

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0306003

Temperature and Humidity Sensor Based on a Graphene Oxide-Coated Side-Polished Fiber Mach-Zehnder Interferometer

Zhang Ping, Liu Bin*, Liu Zhengda, Liu Juan, Wang Mengyu, Fu Yanjun,
Wan Shengpeng, He Xingdao, Wu Qiang**

*Key Laboratory of Nondestructive Test (Ministry of Education), Nanchang Hangkong University,
Nanchang, Jiangxi 330063, China*

Abstract In this paper, we carried out theoretical and experimental research on the structure of a side-polished fiber Mach-Zehnder interferometer (MZI) based on a microtaper. To be specific, after the side-polished depth of the fiber was appropriately controlled, the refractive index (RI) sensing performance of the MZI was much better than that of a traditional fiber MZI without side polishing. Besides, the research results showed that when the side-polished depth reached $41.7 \mu\text{m}$, the sensitivity of RI sensing was -117.145 nm/RIU at the RI of about 1.34. Furthermore, we measured the temperature and humidity simultaneously by depositing the hydrophilic graphene oxide (GO) on the surface of the side-polished fiber MZI, obtaining the sensitivity of temperature and relative humidity sensing of $131.77 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ and $-76.1 \text{ pm}/\% \text{RH}$, respectively. In conclusion, the proposed side-polished fiber MZI has the advantages of high sensitivity, low cost, and simple fabrication, thus displaying a wide range of application prospects in the field of biochemical sensing.

Key words fiber optics; Mach-Zehnder interferometer; side-polishing; graphene oxide; temperature and humidity sensing

OCIS codes 060.2370; 130.6010; 120.6780

收稿日期: 2020-08-17; 修回日期: 2020-09-15; 录用日期: 2020-09-18

基金项目: 国家自然科学基金(11864025)、江西省自然科学基金(20192ACBL21051, 20192ACB20031)

* E-mail: liubin_d@126.com

1 引言

近年来,光纤传感器因其突出的优点,如抗电磁干扰、体积小、无标签传感等,受到了研究者极大的关注,在环境监测和生物化学等领域得到了广泛的研究^[1-2]。随着社会的发展需求与传感技术的进步^[3],许多不同原理的光纤传感器被研制出来,如法布里-珀罗(FP)干涉型光纤传感器^[4]、迈克耳孙干涉型光纤传感器^[5-6]、萨格纳克干涉型光纤传感器^[7]和马赫-曾德尔(MZ)干涉型光纤传感器^[8]等,其中马赫-曾德尔干涉仪(MZI)具有制作简单、重复性好、灵敏度高优点,是用于各种传感检测的新型干涉仪,常用于折射率、温度、曲率、液位等参数的测量^[9-13]。马赫-曾德尔干涉仪通常是通过在两个独立的光纤模态耦合接头处分裂和重组不同的光学模式(如纤芯模和包层模)形成的。光纤锥型^[14]、双核光纤^[15]、偏芯熔接^[16]、单模-多模-单模结构^[17]都可以制作成模态耦合接头。Wu等^[18]基于两个花生形状的结构,提出了一个简单且低成本 MZI,当干涉长度为 22 μm 时,温度灵敏度为 46.8 $\text{pm}/^\circ\text{C}$,应力灵敏度为 1.4 $\text{pm}/\mu\text{e}$ 。Tong等^[19]提出了一种基于单模凹锥光纤和多模光纤的双参数光纤传感器,实验结果测得温度灵敏度为 0.02 $\text{nm}/^\circ\text{C}$ 和 0.031 $\text{nm}/^\circ\text{C}$,液位灵敏度为 0.022 nm/mm 和 0.07 nm/mm ,可实现温度和液位的同时测量。Chiu等^[20]提出一种涂覆氧化石墨烯(GO)涂层、用于湿度传感的倾斜光纤光栅传感器,其湿度灵敏度为 -0.01 $\text{nm}/\% \text{RH}$ 。Vaz等^[21]提出了一种用于相对湿度传感的光纤 FP 干涉仪结构,在传感光纤上涂覆聚偏二氟乙烯(PVDF)薄膜后,传感器在恒定温度下的灵敏度为 32.54 $\text{pm}/\% \text{RH}$,对于温度变化的灵敏度为 -15.2 $\text{pm}/^\circ\text{C}$ 。Liu等^[22]提出了一种基于涂覆 GO 的芯偏置光纤 MZI 的新型湿度传感器,在相对湿度为 30%~60%的条件下,测得灵敏度为 0.104 $\text{dB}/\% \text{RH}$ 和 0.0272 $\text{nm}/\% \text{RH}$ 。光纤 MZI 传感器因其体积紧凑、价格低廉、制作简

单、灵敏度高特点而成为光纤传感领域的一个研究热点。然而,由于光纤包层的隐失场很弱,因此 MZI 光纤传感器的 RI 灵敏度相对较低。此外,由于光纤光栅传感测量中的交叉敏感机制,目前大多数光纤 MZI 传感器只能测量单个物理参数,不能满足同时测量多个物理参数的要求。近年来,人们将光纤加工技术应用于光纤传感器的性能提升,取得了良好的效果,如光纤拉锥^[23]、腐蚀^[24]、扭转^[25]和侧抛^[26]等。

本文提出一种基于微锥结构的侧抛光纤 MZI 传感器,并对其传感性能进行了理论和实验研究。该传感器制作过程简单。制作过程为:利用光纤熔接机在一段单模光纤上制作两个微锥结构后,通过微锥点激发包层模,使其与纤芯模实现 MZ 干涉;通过设计光纤侧边抛磨系统,对两微锥点中间的单模进行侧边抛磨。理论和实验结果表明:减小包层直径可以有效增强包层模的隐失场强度,从而使传感器对外界环境变化的感应更加灵敏。实验测试了不同侧抛深度的光纤 MZI 结构的折射率和温度的响应特性。最后,选择折射率灵敏度较高的侧抛光纤 MZI 结构,在其传感区域沉积 GO 薄膜,分析其在温度和湿度双参量同时测量方面的应用。

2 传感器的原理与仿真

基于微锥结构的侧抛光纤 MZI 传感器结构如图 1 所示,是由一根单模光纤经过熔接机(Fujikura 80C)放电形成微锥结构后进行侧边抛磨制成。光在光纤中传输时,绝大部分被束缚在纤芯中,损耗极小,不会出现干涉现象。我们所制作的微锥点相当于分束器与耦合器,传输光经过第一个微锥点时,单模光纤的模场失配会激发出包层模,随后光在纤芯与包层中传输一段距离后经过第二个微锥点重新耦合进纤芯,由于纤芯模与包层模的相位差产生不同的干涉光强,从而发生 MZ 干涉。

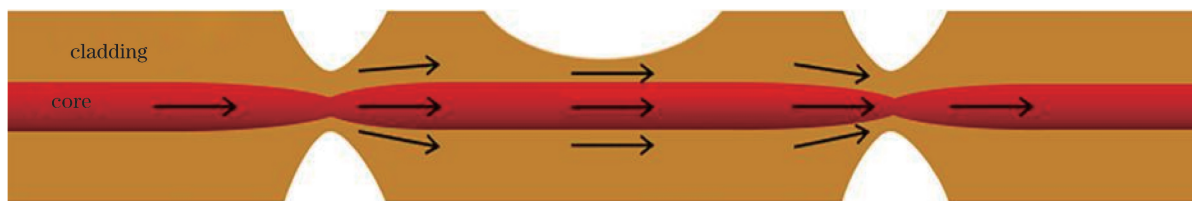


图 1 微锥侧抛光纤 MZI 原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of micro taper side-polished fiber MZI

干涉后的光强 I 可表示为^[3,27]

$$I = I_{\text{core}} + I_{\text{clad}} + 2\sqrt{I_{\text{core}} + I_{\text{clad}}} \cos\left(2\pi \frac{n_{\text{eff}}^{\text{core}} - n_{\text{eff}}^{\text{clad},j}}{\lambda} L\right), \quad (1)$$

式中： I_{core} 和 I_{clad} 分别表示在纤芯和包层中传输光的强度； $n_{\text{eff}}^{\text{core}}$ 和 $n_{\text{eff}}^{\text{clad},j}$ 分别表示为纤芯模和第 j 阶包层模的有效折射率； λ 表示光在空气中的波长； L 表示传感器的长度。光在传感器中传输一段距离后产生的相位差 $\Delta\phi$ 可表示为^[8]

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

当相位满足 $2\pi \frac{n_{\text{eff}}^{\text{core}} - n_{\text{eff}}^{\text{clad},j}}{\lambda} L = (2K + 1)\pi$ 时， $\Delta n_{\text{eff}} = n_{\text{eff}}^{\text{core}} - n_{\text{eff}}^{\text{clad},j}$ 为纤芯模与包层模的有效折射率差，其中 K 为正整数。干涉谱中第 k 个干涉峰的波长可表示为

$$\lambda_k = \frac{2\Delta n_{\text{eff}} L}{2k + 1}. \quad (3)$$

干涉光的强度和波长与光纤 MZI 中光纤长度、纤芯和包层的有效折射率等参量有关。在传输过程中，包层中传输光的相位会受到外界环境折射率的影响，而纤芯中传输光的相位则不会受到影响。当外界环境变化作用于传感光纤时，干涉光的强度和波长会发生变化，透射光谱的形状也会相应地改变。实验中，可以通过监测干涉光谱的波长变化来测量外界环境折射率和温度的变化。

利用光束传播法(BPM)对所设计的微锥侧抛光纤 MZI 结构进行数值仿真。本研究采用 2D 模型， X 和 Z 方向单元网格大小分别设为 $0.1 \mu\text{m}$ 和 $1 \mu\text{m}$ ；边界条件采用完全匹配层。单模光纤纤芯和包层直径分别设置为 $8 \mu\text{m}$ 和 $125 \mu\text{m}$ ，相应的折射率为 1.4682 和 1.4628。两个微锥结构中间段单模光纤长度为 3 cm，侧抛深度为 $44 \mu\text{m}$ ，侧抛平坦区域和过度区域长度分别设置为 7 mm 和 6 mm。数值模拟了该结构在折射率 1.34 附近的折射率响应光谱，如图 2(a)所示。可以看到，随着环境折射率的增大，干涉光谱会发生明显的偏移现象。图 2(b)为其折射率响应线性拟合，折射率传感灵敏度达 $-115.5 \text{ nm}/\text{RIU}$ (RIU 为单位折射率)。图 2(c)和图 2(d)分别是干涉波谷(A)和干涉波峰(B)的光场传输图。

利用光束传播法(BPM)对所设计的微锥侧抛光纤 MZI 结构进行数值仿真。本研究采用 2D 模型， X 和 Z 方向单元网格大小分别设为 $0.1 \mu\text{m}$ 和 $1 \mu\text{m}$ ；边界条件采用完全匹配层。单模光纤纤芯和包层直径分别设置为 $8 \mu\text{m}$ 和 $125 \mu\text{m}$ ，相应的折射率为 1.4682 和 1.4628。两个微锥结构中间段单模光纤长度为 3 cm，侧抛深度为 $44 \mu\text{m}$ ，侧抛平坦区域和过度区域长度分别设置为 7 mm 和 6 mm。数值模拟了该结构在折射率 1.34 附近的折射率响应光谱，如图 2(a)所示。可以看到，随着环境折射率的增大，干涉光谱会发生明显的偏移现象。图 2(b)为其折射率响应线性拟合，折射率传感灵敏度达 $-115.5 \text{ nm}/\text{RIU}$ (RIU 为单位折射率)。图 2(c)和图 2(d)分别是干涉波谷(A)和干涉波峰(B)的光场传输图。

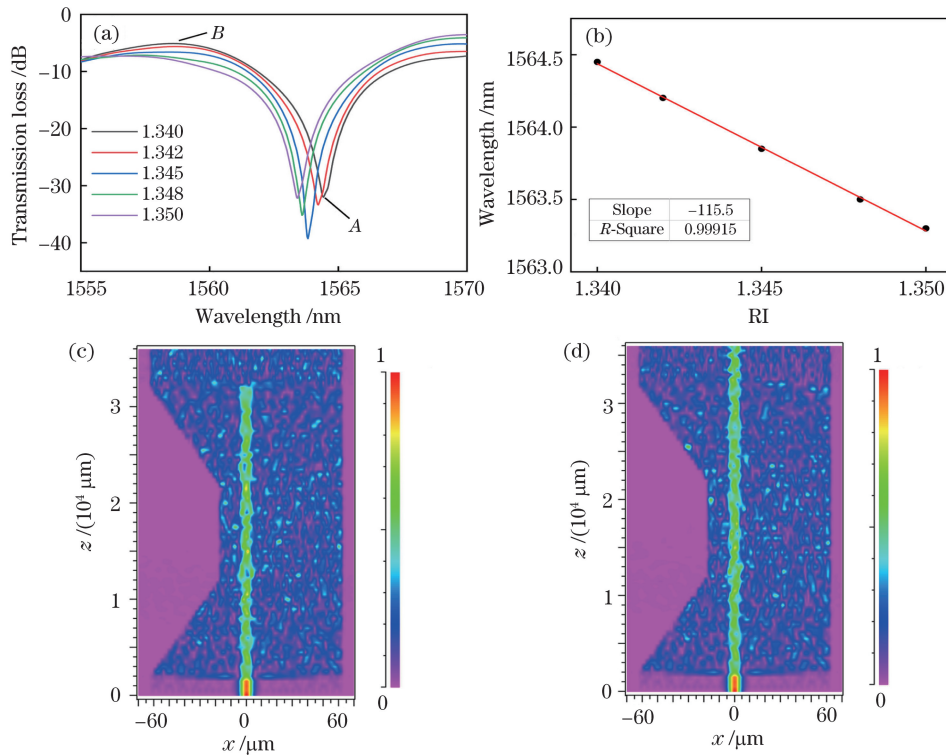


图 2 微锥侧抛光纤 MZI 结构仿真结果。(a) 不同折射率下的干涉光谱；(b) 折射率传感线性拟合曲线图；(c) 波长为 1564 nm (dip A) 的光场传输图；(d) 波长为 1558 nm (peak B) 的光场传输图

Fig. 2 Simulation results of the micro taper side-polished fiber MZI structure. (a) Interference spectra under different refractive indexes; (b) linear fit curve diagram of refractive index sensing; (c) light field transmission diagram at wavelength of 1564 nm (dip A); (d) light field transmission diagram at wavelength of 1558 nm (peak B)

3 传感器制作与实验研究

3.1 侧抛光纤 MZI 结构制作

使用普通单模光纤(G652D), 首先将熔接机设置为 SM-SM 的手动熔接模式, 放电功率为 100 bit, 放电时间为 2000 ms, 然后把剥去 5 cm 涂覆层的单模光纤放置在光纤熔接机中进行放电, 最后使得光纤受热软化, 在相距 3 cm 的位置制作成两个锥点, 两个锥点的锥径均为 $80\ \mu\text{m}$, 如图 3 所示。

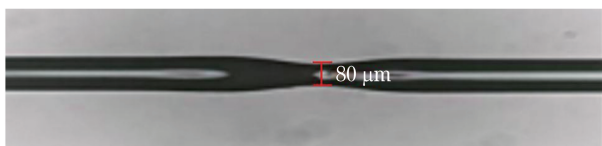


图 3 微锥熔接点显微图

Fig. 3 Micrograph of micro taper welding point

在微锥结构基础上进行侧边抛磨加工, 利用如图 4(a) 所示的光纤侧边抛磨系统, 将制作好的光纤

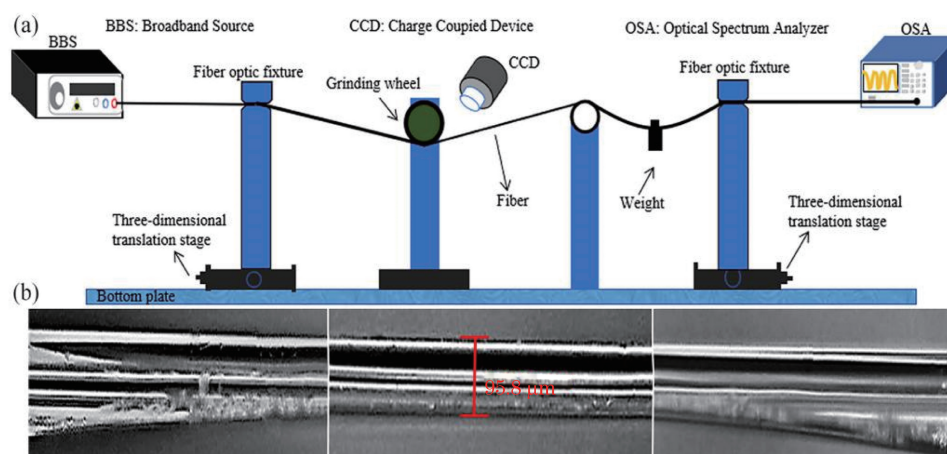


图 4 光纤侧边抛磨系统与侧抛区域显微图。(a) 侧边抛磨加工平台; (b) 光纤侧抛区域显微图

Fig. 4 Fiber side-polished system and the micrograph of side-polished area. (a) Fiber side-polished system; (b) micrograph of fiber side-polished area

3.2 折射率与温度传感特性

图 5 演示了折射率和温度测量的实验装置, 其中微锥侧抛光纤结构的输入/输出为单模光纤, 分别连接到宽带光源(BBS)和光谱分析仪(OSA), 用于发射/接收宽带光信号。在本实验中, 将制作好的传感器固定在与待测溶液装置中, 选择二甲基亚砷溶液作为折射率变化诱导液, 通过往去离子水中逐渐滴加二甲基亚砷溶液, 待其与水混合来改变待测溶液的折射率值, 保证了传感器在测量过程中的稳定性和重复性。在每次测量之前, 先用无水乙醇和去离子水对传感区域进行多次清洗, 避免其他物质对测试结果的影响。然后,

水平放在粘有砂纸的研磨轮上, 两端通过可旋转夹具夹紧, 另一端通过滑轮垂钩一个小型砝码使光纤绷直, 砝码的大小决定拉力的大小, 这样便于对光纤的操作和封装。实验过程中, 利用小型电机控制研磨轮(直径约 6 cm)的转速对光纤进行匀速研磨, 采用不同粒径的研磨砂纸对双锥的中间部分进行粗磨、细磨和精磨三种不同程度的抛磨, 同时通过显微镜连接计算机, 对光纤抛磨部分进行放大观察, 借助光谱仪可以实现对抛磨过程中光纤抛磨深度、抛磨长度和抛磨面平整度的监测。通过上述工艺的精确操作, 成功地制作了基于微锥结构的两种不同抛磨深度的光纤传感器样品, 侧抛深度分别为 $29.2\ \mu\text{m}$ 和 $41.7\ \mu\text{m}$, 图 4(b) 为侧面抛磨区域的显微镜视图, 包括抛磨后的过渡区域(约 6 mm)和中间的平坦区域(约 7 mm)。将没有经过侧抛的传感器样品记为 S1, 侧抛深度为 $29.2\ \mu\text{m}$ 和 $41.7\ \mu\text{m}$ 的传感器样品分别记为 S2、S3, 并对其传感特性进行实验分析。

用光谱仪记录透射谱的变化。与此同时, 用该装置继续进行温度测量实验, 通过对电热板加热, 用热电偶检测温度的变化, 从而实现对温度可靠的测量。

实验中, 对三种不同侧抛深度的传感器 S1、S2、S3 在折射率为 1.34 附近的折射率响应进行了测试分析, 其折射率响应光谱如图 6(a)~(c) 所示。结果表明, 随着环境折射率的升高, 三种微锥光纤 MZI 结构的光谱都发生了蓝移现象。其相应的折射率响应线性拟合曲线如图 6(d)~(f) 所示。可以看到, 没有经过侧抛的光纤 MZI 传感器 S1 的折射率传感灵敏度仅为 $-35.112\ \text{nm}/\text{RIU}$, 对外

界环境折射率变化不太敏感。而经过侧抛加工后的传感器 S2 和 S3 的折射率传感灵敏度分别提高到 $-80.610 \text{ nm}/\text{RIU}$ 和 $-117.145 \text{ nm}/\text{RIU}$, 并且

侧抛越深, 其折射率传感灵敏度越高。侧抛深度为 $41.7 \mu\text{m}$ 的传感器 S3 的实验结果与图 2 的数值仿真结果符合得很好。

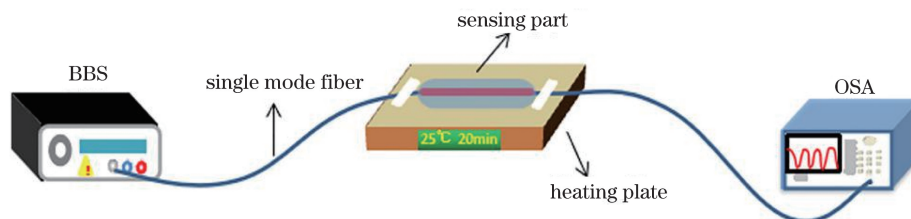


图 5 折射率和温度测量的实验装置

Fig. 5 Experimental device for refractive index and temperature measurement

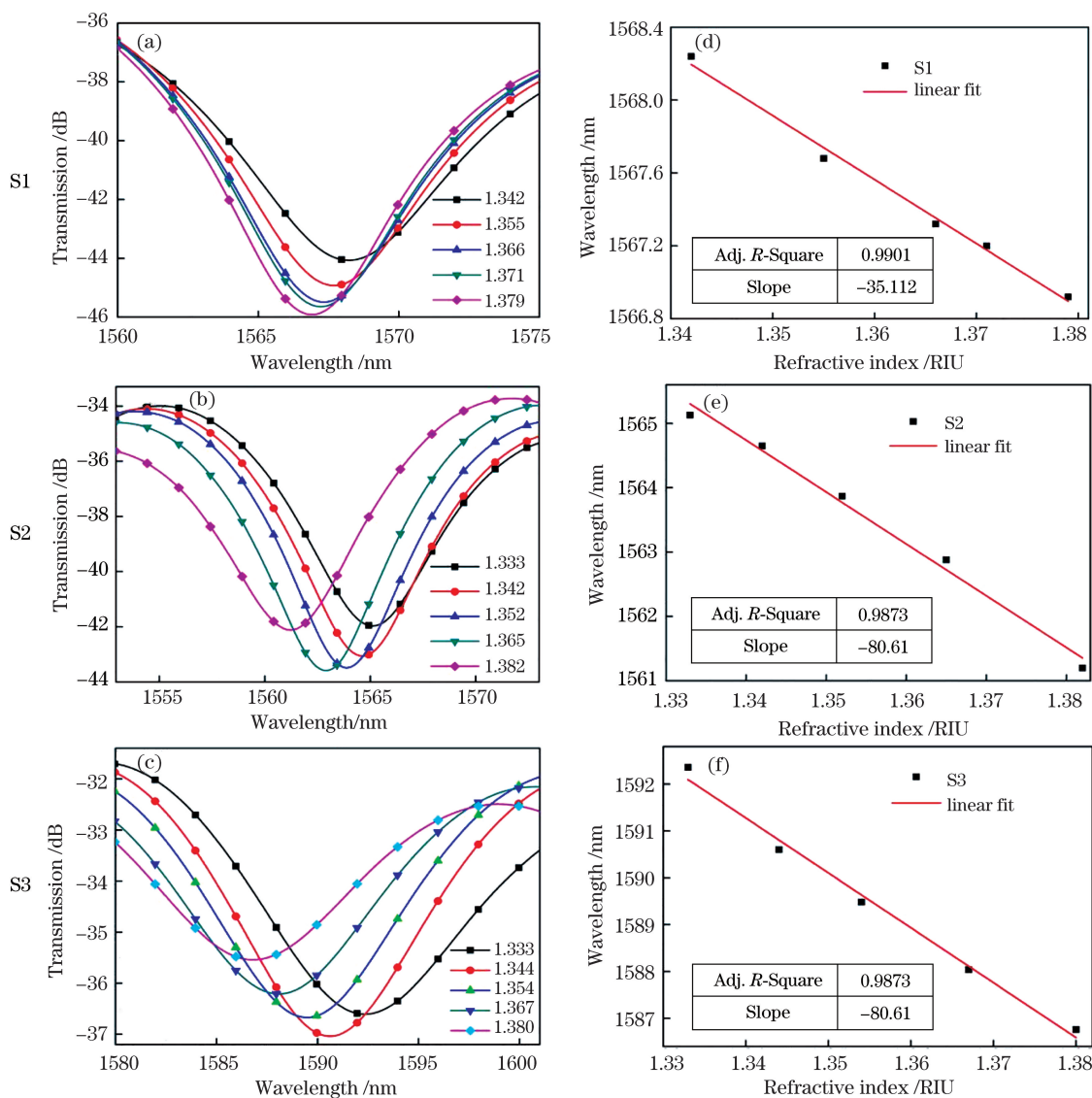


图 6 微锥 MZI 结构不同折射率下的传感曲线图。(a)~(c) 侧抛深度为 $0, 29.2, 41.7 \mu\text{m}$ 的微锥 MZI 结构的折射率响应光谱; (d)~(f) 对应的传感曲线线性拟合

Fig. 6 Sensing curves of micro taper MZI structures under different refractive indexes. (a)~(c) Refractive index response spectra of micro taper MZI structures with side-polished depths of $0, 29.2, \text{ and } 41.7 \mu\text{m}$; (d)~(f) linear fit of sensing curve

由上述实验结果验证得出, 没有经过侧抛的微锥光纤 MZI 传感器的折射率灵敏度比较低, 对

光纤传感器传感区域进行侧抛且侧抛深度在一定范围内时, 其传感区域的侧抛深度越深, 传感器对

环境折射率的变化越敏感,且有较好的线性拟合度,由此说明可以通过对该光纤结构进行侧边抛磨来改善传感器的性能,增大其隐失场的强度,提高其对折射率的灵敏度,且折射率灵敏度可以提高数倍。

另外,还研究了侧抛加工对光纤 MZI 结构温度传感特性的影响。对 3 个不同侧抛深度的光纤 MZI 结构进行了温度响应测试。温度响应测试实验中,通过加热板改变传感器周围的温度,使用热电偶对温度进行标定。实验温度大致在 30~80 °C 范围内,每间隔 10 °C 左右记录一次数据,测量其对温度的敏感特性,将传感器 S1、S2、S3 依次进行温度响应测

量实验,其温度响应光谱如图 7(a)~(c)所示,对应的线性拟合曲线如图 7(d)~(f)所示。测试结果对比发现,三个不同侧抛深度光纤 MZI 结构的温度传感灵敏度分别为 111.52, 114.39, 113.27 pm/°C。当传感器传感区域的侧抛深度在一定范围内时,没有经过侧抛的传感器和经过侧抛后的传感器温度灵敏度相同,它们的温度传感灵敏度数值大小存在些许差异,这是由于光纤熔接机在熔接双锥的过程中,测量双锥之间的距离及锥径大小会存在微小差异,并且温湿箱的温度显示精度会导致实验测量结果存在些许偏差。所以,侧抛加工对光纤 MZI 结构的温度响应特性几乎没有影响。

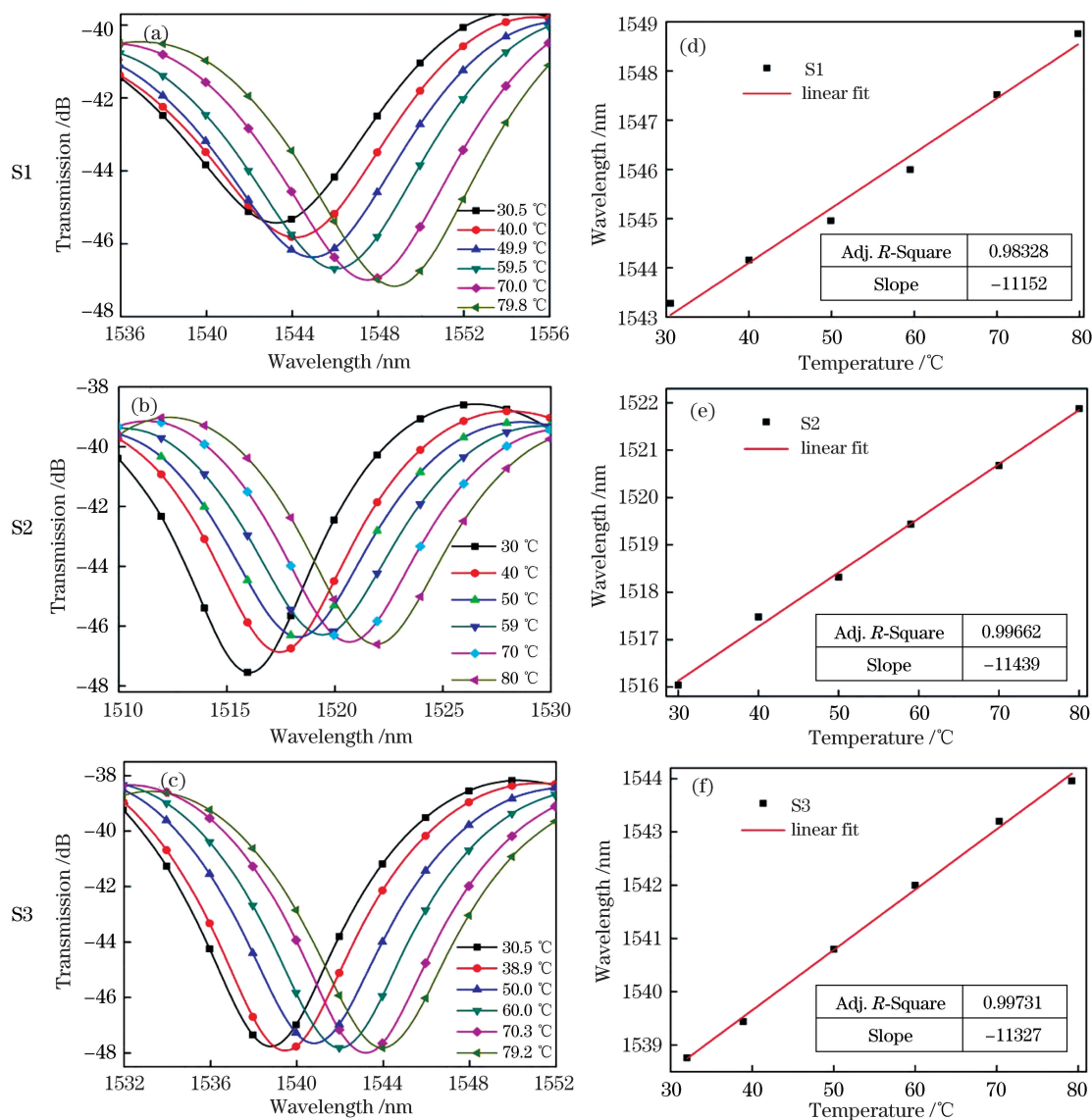


图 7 微锥 MZI 结构不同温度下的传感曲线图。(a)~(c) 侧抛深度为 0, 29.2, 41.7 μm 的微锥 MZI 结构的温度响应光谱; (d)~(f) 对应的传感曲线线性拟合

Fig. 7 Sensing curves of micro taper MZI structures under different temperatures. (a)–(c) Temperature response spectra of micro taper MZI structures with side-polished depths of 0, 29.2, and 41.7 μm ; (d)–(f) linear fit of sensing curve

3.3 温湿度双参量同时测量

本文设计的微锥光纤 MZI 结构,是通过包层模和纤芯模形成 MZ 干涉。对 MZI 光纤进行侧边抛磨后,可以有效打破光纤包层截面的圆对称性,包层模式解简并形成偏振方向垂直和平行于侧抛面的两个包层模式,这两种正交偏振包层模具有不同的折射率响应性能^[23]。相比于垂直侧抛面的包层模,偏振方向平行于侧抛面的包层模具有更强的隐失场。因此,它们与纤芯模干涉峰对周围环境折射率变化的响应是不同的^[28]。再结合侧抛加工对该光纤 MZI 结构温度传感没有影响的特性,提出利用侧抛光纤 MZI 结构沉积 GO 薄膜,通过结合 GO 的亲水特性,实现对湿度和温度双参量的同时测量。GO 是石墨烯通过强酸氧化得到的产物,是一种独特的含氧功能材料,长久以来被视为亲水性物质,其表面存在很多含氧官能团,它们对分子具有很好的吸附能力^[29],尤其是极性分子,具有良好的亲水性。GO 吸收周围水分子会改变包层模的有效折射率从而影

响输出光谱特性。随着湿度的增加,GO 吸附外界水分子后,增加了 GO 层之间的距离,导致 GO 层膨胀^[30],使 GO 电导率下降,改变其折射率,GO 薄膜和水分子之间发生电荷转移,折射率的虚部随着湿度的增加而变化,有效折射率随之改变,导致光吸收发生变化^[31-33],进而影响光场的强度与波长漂移,通过监测强度或波长的变化,测算空气中的湿度。

选择折射率灵敏度较高的传感器样品 S3 进行 GO 纳米薄膜的沉积,选用单层 GO 原液(10 mg/mL)作为沉积 GO 薄膜的原材料,加入去离子水进行离心振荡稀释成 2 mg/mL,取 1 mL 稀释后的 GO 水溶液滴在光纤传感区表面,放入设置为 70 °C 的鼓风干燥箱中干燥 3 h,使 GO 溶液的水分蒸发后在传感区域沉积为一层薄膜。氧化石墨烯湿度传感机理如图 8(a)所示,对沉积的 GO 薄膜进行表征,透射电镜图如图 8(b)所示,浓度为 2 mg/mL 的 GO 溶液沉积后,光纤表面形成了一层较为均匀的 GO 薄膜,厚度约为 227.3 nm。

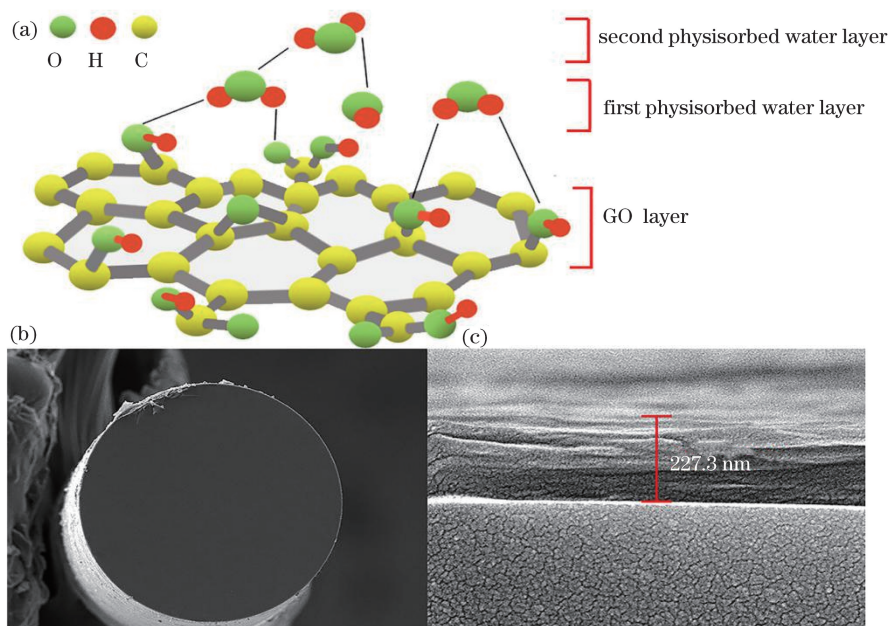


图 8 氧化石墨烯的湿度传感机理和显微镜图。(a) 湿度传感机理;(b) 涂覆 GO 薄膜的光纤截面;
(c) 2 mg/mL GO 溶液沉积后的薄膜厚度

Fig. 8 Humidity sensing mechanism and microscope image of GO. (a) Humidity sensing mechanism; (b) cross section of fiber coated with GO film; (c) nanolayer thickness after deposition with GO concentration of 2 mg/mL

对制作好的侧抛光纤 MZI 传感器进行温湿度测量,该步骤在恒温恒湿箱中完成,如图 9 所示,将温湿箱的温度设置成恒温 30 °C,测试湿度为 40%RH~80%RH 范围内的传感特性。之后,将湿度保持在 40%RH,进行了 30~80 °C 范围内的温度传感响应测试,结果如图 10 所示。

图 10(a)和图 10(b)分别为实验测得两个干涉谷 dip1 和 dip2 随湿度和温度变化的响应光谱,图 10(c)和图 10(d)为对应的湿度和温度传感线性拟合曲线。从实验结果可以看出,传输光谱的不同干涉峰谷对湿度响应不同,而对温度的响应特性基本一致,故可以利用传感器的湿度温度传感特性,结

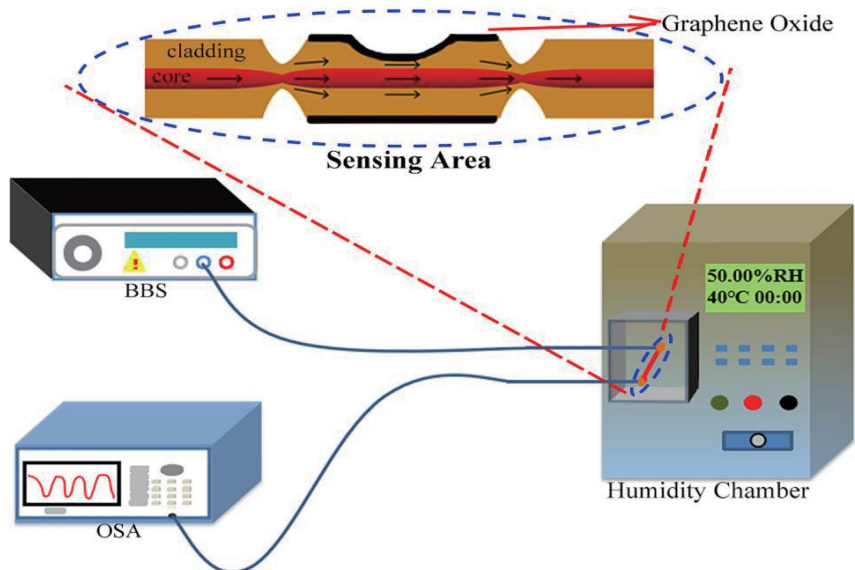


图 9 湿度测量实验装置

Fig. 9 Experimental device for humidity measurement

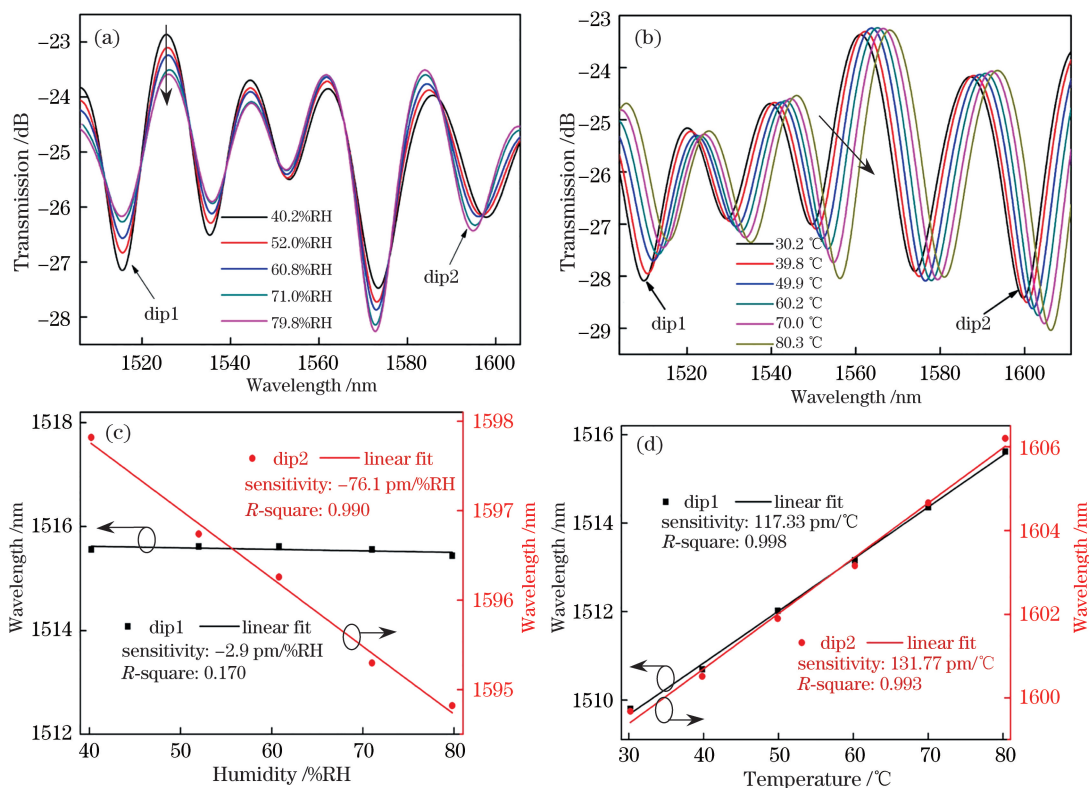


图 10 温湿度双参量传感曲线。(a)(b) dip1、dip2 随湿度和温度变化的光谱响应；(c)(d) 湿度和温度传感线性拟合

Fig. 10 Temperature and humidity sensing curves. (a) (b) Spectrum responses of dip1 and dip2 with humidity and temperature, respectively; (c) (d) linear fits of humidity and temperature sensing curve

合敏感系数矩阵,进行温度和湿度的双参量同时测量,实验中测得两个干涉峰谷 dip1 和 dip2 随着湿度的升高发生蓝移,其灵敏度分别为 $-2.9 \text{ pm}/\%RH$ 和 $-76.1 \text{ pm}/\%RH$ 。考虑到实验会不可避免地受到环境微小影响且 dip1 的湿度灵敏度相对于 dip2

较小,因此在实际测量中湿度影响可以忽略,本研究在敏感系数矩阵中将 dip1 的湿度参量记为 0。进行温度传感实验后两个干涉峰发生红移,灵敏度分别为 $117.33 \text{ pm}/^\circ C$ 和 $131.77 \text{ pm}/^\circ C$,相比之前的温度传感,灵敏度有所提高,这是由氧化石墨烯的热光

学效应引起的。

由上可知,结合敏感系数矩阵可以实现对温度和湿度双参量的同时测量,传感器的敏感系数矩阵可表示为^[34]

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{T_1} K_{H_1} \\ K_{T_2} K_{H_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta H \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中: $\Delta\lambda_1$ 、 $\Delta\lambda_2$ 分别为波谷 dip1 和 dip2 特征波长的变化量; K_{T_1} 、 K_{T_2} 和 K_{H_1} 、 K_{H_2} 分别为 dip1 和 dip2 的温度和湿度响应灵敏度; ΔT 、 ΔH 分别为温度和湿度的改变量。对(4)式进行变换,并将 dip1 和 dip2 的温度和湿度灵敏度代入(4)式中可得

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 117.33 \text{ pm}/^\circ\text{C} & 0 \\ 131.77 \text{ pm}/^\circ\text{C} - 76.1 \text{ pm}/\% \text{RH} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

因此,通过(5)式计算,可由 dip1 和 dip2 的波谷漂移量得到湿度和温度的变化量,进而可以实现湿度和温度的同时测量。

4 结 论

提出一种基于微锥的侧抛光纤 MZI 传感器结构,利用光纤熔接机制作微锥结构,激发包层模与纤芯模,实现 MZ 干涉。通过设计光纤侧边抛磨系统,对光纤 MZI 结构进行侧抛加工,提升了包层模的隐失场强度。光纤 MZI 传感器经过侧边抛磨后能够有效地增强其对环境折射率传感响应,其折射率传感灵敏度随着抛磨深度的增加获得明显提升。当抛磨深度为 44.2 μm 时,折射率传感灵敏度可达 -117.145 nm/RIU,提高了近 3 倍。与此同时,侧抛加工对该光纤 MZI 传感器的温度响应特性几乎没有影响。最后,采用浸涂法在侧抛光纤 MZI 表面沉积 GO 薄膜,利用 GO 亲水性结合敏感系数矩阵实现了对温度和湿度双参量的同时测量,其中湿度灵敏度达到 -76.1 pm/%RH。该侧抛光纤 MZI 传感器具有制作简单、成本低、灵敏度高、多参数同时测量等优点,可应用于化学和生物传感领域。

参 考 文 献

- [1] Lu P, Men L Q, Sooley K, et al. Tapered fiber Mach-Zehnder interferometer for simultaneous measurement of refractive index and temperature[J]. Applied Physics Letters, 2009, 94(13): 131110.
- [2] Liu S H, Zhang H L, Li L T, et al. Liquid core fiber interferometer for simultaneous measurement of refractive index and temperature[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2019, 31(2): 189-192.
- [3] Bian J C, Lang T T, Yu W J, et al. Study of fiber sensor for the simultaneous measurement of temperature and strain based on Mach-Zehnder interferometer[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2015, 26(11): 2169-2174.
卞继城, 郎婷婷, 俞文杰, 等. 基于马赫-曾德尔干涉的温度和应变同时测量的光纤传感器研究[J]. 光子学报, 2015, 26(11): 2169-2174.
- [4] Bai Y L, Qi Y H, Dong Y, et al. Highly sensitive temperature and pressure sensor based on Fabry-Perot interference[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(21): 2471-2474.
- [5] Sun H N, Shao M, Han L, et al. Large core-offset based in-fiber Michelson interferometer for humidity sensing[J]. Optical Fiber Technology, 2020, 55: 102153.
- [6] Shao M, Han L, Zhao X, et al. Liquid level sensor based on in-fiber Michelson interferometer[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(3): 0328021.
邵敏, 韩亮, 兆雪, 等. 基于在线型光纤迈克耳孙干涉仪的液位传感器[J]. 光学学报, 2018, 38(3): 0328021.
- [7] Liu T, Zhang H, Xue L F, et al. Highly sensitive torsion sensor based on side-hole-fiber Sagnac interferometer[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(17): 7378-7382.
- [8] Duan S J, Liu W L, Sun C T, et al. High sensitive directional twist sensor based on a Mach-Zehnder interferometer[J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(6): 1-7.
- [9] Li Z, Liao C, Wang Y, et al. Ultrasensitive refractive index sensor based on a Mach-Zehnder interferometer created in twin-core fiber[J]. Optics Letters, 2014, 39(17): 4982-4985.
- [10] Yu X, Zhao C L, Wang J H, et al. Double Mach-Zehnder interferometer temperature sensor based on vernier effect[J]. Optical Communication Technology, 2018, 42(1): 24-27.
俞夏雨奇, 赵春柳, 王家辉, 等. 基于游标效应的双 MZI 温度传感理论研究[J]. 光通信技术, 2018, 42(1): 24-27.
- [11] Liu Y, Deng H C, Yuan L B. Directional torsion and strain discrimination based on Mach-Zehnder interferometer with off-axis twisted deformations[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 120: 105754.
- [12] Yang Y, Zhu X T, Yan L J, et al. A highly accurate curvature sensor based on a rough side-polished single-mode fiber[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(14): 1406004.
杨洋, 朱肖彤, 闫良俊, 等. 基于侧边粗抛磨单模光

- 纤的高精度曲率传感技术研究[J]. 光学学报, 2020, 40(14): 1406004.
- [13] Hsu J M, Lee C L, Chang H P, et al. Highly sensitive tapered fiber Mach-Zehnder interferometer for liquid level sensing[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(14): 1354-1357.
- [14] Tian Z B, 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.
- [15] Liu Y, Li Y, Yan X J, et al. Effect of waist diameter and twist on tapered asymmetrical dual-core fiber MZI filter[J]. Applied Optics, 2015, 54(28): 8248-8253.
- [16] Fu H W, Yan X, Li H D, et al. Study of fiber sensor for simultaneous measurement of refractive and temperature based on a core-mismatch Mach-Zehnder interferometer[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(11): 1106001.
傅海威, 闫旭, 李辉栋, 等. 基于纤芯失配型马赫-曾德尔光纤折射率和温度同时测量传感器的研究[J]. 光学学报, 2014, 34(11): 1106001.
- [17] Xue L L, Yang L. Sensitivity enhancement of RI sensor based on SMS fiber structure with high refractive index overlay[J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(10): 1463-1469.
- [18] Wu D, Zhu T, Chiang K S, et al. All single-mode fiber Mach-Zehnder interferometer based on two peanut-shape structures [J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(5): 805-810.
- [19] Tong Z R, Luan P P, Cao Y, et al. Dual-parameter optical fiber sensor based on concatenated down-taper and multimode fiber [J]. Optics Communications, 2016, 358: 77-81.
- [20] Chiu Y D, Wu C W, Chiang C C. Tilted fiber Bragg grating sensor with graphene oxide coating for humidity sensing[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2017, 17(9): E2129.
- [21] Vaz A, Barroca N, Ribeiro M, et al. Optical fiber humidity sensor based on polyvinylidene fluoride Fabry-Perot[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2019, 31(7): 549-552.
- [22] Liu S, Meng H Y, Deng S Y, et al. Fiber humidity sensor based on a graphene-coated core-offset Mach-Zehnder interferometer [J]. IEEE Sensors Letters, 2018, 2(3): 1-4.
- [23] Sun L P, Yuan Z H, Huang T S, et al. Ultrasensitive sensing in air based on Sagnac interferometer working at group birefringence turning point[J]. Optics Express, 2019, 27(21): 29501-29509.
- [24] 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.
- [25] Tian K, Farrell G, Wang X, et al. Strain sensor based on gourd-shaped single-mode-multimode-single-mode hybrid optical fibre structure[J]. Optics Express, 2017, 25(16): 18885-18896.
- [26] Wang X F, Farrell G, Lewis E, et al. A humidity sensor based on a single mode-side polished multi mode-single mode optical fibre structure coated with gelatin[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(18): 4087-4094.
- [27] Cheng J N. Mach-Zehnder interferometer based on fiber taper and fiber core mismatch for humidity sensing [J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(2): 024212.
程君妮. 基于光纤锥和纤芯失配的 Mach-Zehnder 干涉湿度传感器 [J]. 物理学报, 2018, 67(2): 024212.
- [28] Zhang P, Liu B, Liu J, et al. Investigation of a side-polished fiber MZI and its sensing performance [J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(11): 5909-5914.
- [29] Li J X, Tong Z R, Jing L, et al. Fiber temperature and humidity sensor based on photonic crystal fiber coated with graphene oxide[J]. Optics Communications, 2020, 467: 125707.
- [30] Wang Y Q, Shen C Y, Lou W M, et al. Polarization-dependent humidity sensor based on an in-fiber Mach-Zehnder interferometer coated with graphene oxide [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2016, 234: 503-509.
- [31] Luo Y, Chen C, Xia K, et al. Tungsten disulfide (WS_2) based all-fiber-optic humidity sensor[J]. Optics Express, 2016, 24(8): 8956-8966.
- [32] Leenaerts O, Partoens B, Peeters F M. Adsorption of H_2O , NH_3 , CO , NO_2 , and NO on graphene: a first-principles study[J]. Physical Review B, 2008, 77(12): 125416.
- [33] Zhao Y, Li A W, Guo Q, et al. Relative humidity sensor of S fiber taper based on graphene oxide film [J]. Optics Communications, 2019, 450: 147-154.
- [34] Tan Z, Liao C R, Liu S, et al. Simultaneous measurement sensors of temperature and strain based on hollow core fiber and fiber Bragg grating[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(12): 1206007.
谭展, 廖常锐, 刘申, 等. 基于空芯光纤和光纤布拉格光栅的温度应变同时测量传感器 [J]. 光学学报, 2018, 38(12): 1206007.