

基于空芯光纤的温度、湿度、应变同时测量光纤传感器

陈鸣¹, 常建华^{1,2*}, 徐遥¹, 金澳博¹, 胡子怡¹

¹南京信息工程大学电子与信息工程学院, 江苏 南京 210044;

²南京信息工程大学江苏省大气环境与装备技术协同创新中心, 江苏 南京 210044

摘要 提出一种基于空芯光纤的温度、湿度和应变同时测量的三参数光纤传感器。该传感器由一段空芯光纤熔接在两段单模光纤之间而成。独特的空芯结构使法布里-珀罗、马赫-曾德尔和反共振 3 种机制在传感器中并存。实验中, 选取反射、透射谱中 3 个干涉谷 dip 1、dip 2、dip 3, 分别测试其谷底位置与温度、湿度和应变的对应关系, 利用传递矩阵消除不同参数间的交叉敏感, 实现了温度、湿度和应变的高灵敏度同步测量。测试结果表明, 该传感器的温度灵敏度、相对湿度灵敏度和应变灵敏度分别可达 22.4 pm/°C、37.5 pm/%、1.22 pm/με, 在结构健康监测方面有望获得重要应用。

关键词 光纤光学; 空芯光纤; 反共振效应; 马赫-曾德尔; 法布里-珀罗; 多参数传感

中图分类号 O436 文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231145

1 引言

随着光纤通信技术的发展, 光纤传感器因其体积小、抗电磁干扰、抗腐蚀、可远程监控等优势得到广泛应用^[1-3]。光纤传感器中常用的传感机制有光纤光栅 (FBG)^[4-6]、法布里-珀罗 (FP)^[7]、马赫-曾德尔 (MZ)^[8-9]、迈克耳孙^[5]、萨格纳克^[10]、反共振 (AR) 效应^[12, 11]和表面等离子体共振 (SPR) 效应^[12-13]等。其中, 干涉型光纤传感器因其较低的制备要求和较高的灵活性被广泛用于温度、湿度、折射率、应变、曲率等^[14-18]参数的测量。近年来, 随着光纤传感技术的发展和环境监测要求的提高, 多参数的同时测量受到越来越多的关注。2019 年, Wu 等^[19]使用锥形光纤 MZ 干涉仪进行温度传感, 其最佳温度灵敏度为 186.6 pm/°C。2020 年, Wang 等^[20]使用填充磁流体的光子晶体光纤熔接 FBG 进行温度和磁场测量, 温度灵敏度为 162.55 pm/°C, 磁场灵敏度达到 924.63 pm/mT。2021 年, Li 等^[13]提出一种基于双通道 SPR 的葡萄糖浓度和温度传感器, 其中一个通道涂有金膜和聚二甲基硅氧烷 (PDMS), 用于检测环境温度, 另一个通道涂有银膜, 用于检测葡萄糖浓度, 其葡萄糖检测的灵敏度为 2.882 nm/%, 温度灵敏度为 -2.904 nm/°C。2022 年, Hu 等^[21]提出一种基于微气泡的全硅 FP 干涉仪并用于温度和压强的同时测

量, 在室温 (20 °C) 下, 0~4 MPa 范围内的压强灵敏度达到 -5.083 nm/MPa, 温度灵敏度在 20~700 °C 范围内达到 12.715 pm/°C。但是上述传感器仅能实现 1~2 个参数的测量, 难以满足复杂环境中对多个参数同时测量的需求。例如, 在桥梁等大型建筑的结构健康监测中, 需要同时监测应变、温度和湿度, 现有传感方案大多是多个传感器同时测量, 或是采用级联结构进行三参数测量^[15], 这些方案大多结构复杂、成本较高。因此, 利用单个结构实现温度、湿度和应变同时监测的多参数光纤传感器具有较高的研究价值。

本文提出一种基于单模-空芯-单模 (S-H-S) 结构的温度、湿度、应变同时测量光纤传感器, 并分析传感器结构参数对 3 种传感机制的调控效果。利用 S-H-S 结构实现 FP、MZ、AR 的共存, 用氧化石墨烯 (GO) 和聚乙烯醇 (PVA) 混合增敏, 选取 3 个干涉谷, 分别测量它们对温度、湿度和应变的灵敏度。利用三阶矩阵消除不同参数间的交叉敏感, 实现温度、湿度和应变的同时测量。所提出的传感器结构简单、工艺要求低、尺寸小, 便于集成和分布式测量, 在桥梁结构健康监测领域具有良好的应用前景。

2 传感器结构与原理分析

将包层直径为 125 μm、空芯直径为 10 μm 的空芯

收稿日期: 2023-06-15; 修回日期: 2023-07-11; 录用日期: 2023-08-09; 网络首发日期: 2023-09-22

基金项目: 国家自然科学基金 (62175114)

通信作者: *jianhuachang@nuist.edu.cn

光纤(HCF)熔接在两根单模光纤(SMF)之间,得到S-H-S的传感结构,如图1所示,其中 L_0 为光从SMF纤芯边缘传输到纤芯-包层界面的长度, L_1 为光从SMF

折射进包层后再反射传输回纤芯-包层界面的长度, d 为HCF的包层厚度。该结构主要激发3种传感机制,依次为FP、MZ和AR。

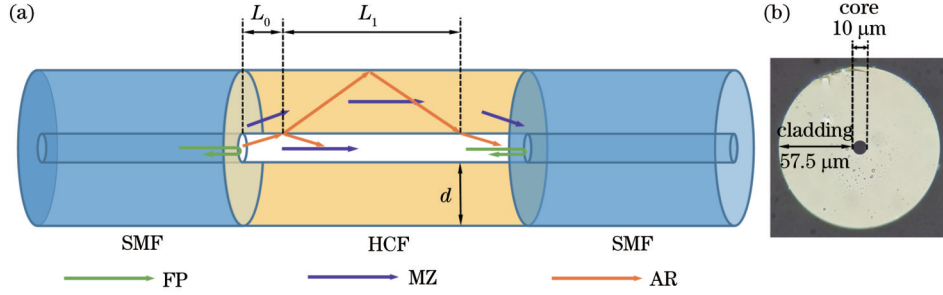


图1 传感器结构示意图。(a)S-H-S结构示意图;(b)HCF端面图

Fig. 1 Schematic of sensor structure. (a) Schematic of S-H-S structure; (b) HCF endface diagram

SMF纤芯中的光在第一个熔接点发生反射和折射后,通过HCF继续向前传播,在第二个熔接点发生反射,然后从第一个熔接点透射回SMF,与第一个熔接点处的反射光发生FP干涉。HCF的长度为 L ,双光束的光程差为 $2L$,相位差 $^{[22]}\varphi_{FP}$ 为

$$\varphi_{FP} = \frac{4\pi n_0 L}{\lambda}, \quad (1)$$

式中: n_0 为空气芯的折射率; λ 为波长。当相位差为 $(2k+1)\pi$ 时,对应波长的光相消干涉,此时FP的干涉谷波长 λ_{FP} 为

$$\lambda_{FP} = \frac{4n_0 L}{2m+1}, \quad (2)$$

式中: m 为干涉阶数。自由光谱范围(FSR)为干涉的相邻波谷的波长间隔,其大小直接影响传感器的性能,FP的自由光谱范围 $d_{FSR, FP}$ 为

$$d_{FSR, FP} = \frac{\lambda_m \lambda_{m+1}}{2Ln_0}, \quad (3)$$

式中: λ_m 为第 m 阶干涉谷的波长; λ_{m+1} 为第 $m+1$ 阶干涉谷的波长。

由于SMF的模场直径为 $10.3 \mu\text{m}$,大于HCF的空芯直径,部分光通过第一个熔接点直接进入HCF包层,另一部分通过纤芯继续向前传播,两部分光在第二个熔接点耦合进SMF的纤芯并发生MZ干涉,双光束的相位差 $^{[23]}\varphi_{MZ}$ 为

$$\varphi_{MZ} = \frac{2\pi L(n_2 - n_0)}{\lambda}, \quad (4)$$

式中: n_2 为HCF包层的折射率。当相位差等于 $(2k+1)\pi$ 时,对应波长的光相消干涉,此时MZ干涉谷波长 λ_{MZ} 为

$$\lambda_{MZ} = \frac{2L(n_2 - n_0)}{2m+1}. \quad (5)$$

用 $m+1$ 阶干涉谷波长减去 m 阶干涉谷波长得到MZ的自由光谱范围 $d_{FSR, MZ}$:

$$d_{FSR, MZ} = \frac{\lambda_m \lambda_{m+1}}{(n_2 - n_0)L}. \quad (6)$$

由于HCF具有独特的低-高-低折射率分布,光在传输到HCF后进入包层并回到空气芯激发AR,如图1所示。SMF中的光通过第一个熔接点进入空气芯,传播 L_0 距离后到达空气芯-包层界面,发生反射和折射后部分光进入包层,其最大入射角 $\arcsin \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ 由SMF的数值孔径(NA)决定。光在包层中传播 L_1 距离后部分折射回纤芯,图1中 $L_0 + L_1$ 为AR产生的临界长度。由于HCF的纤芯直径为 $10 \mu\text{m}$,与SMF的纤芯直径相当, L_0 可以忽略不计, L_1 的计算公式 $^{[24]}$ 为

$$L_1 = 2d \sqrt{\frac{n_0^2 - n_1^2 + n_2^2}{n_1^2 - n_0^2}}. \quad (7)$$

AR的第 m 阶干涉谷波长 λ_m 和自由光谱范围 $^{[25]}d_{FSR, AR}$ 为

$$\lambda_m = \frac{2d}{m} \sqrt{n_2^2 - n_0^2}, \quad (8)$$

$$d_{FSR, AR} = \frac{\lambda_m \lambda_{m+1}}{2d \sqrt{n_2^2 - n_0^2}}. \quad (9)$$

AR可以用以下模型解释:HCF的高折射率包层被夹在低折射率空气芯和外界空气中,可以认为是FP谐振腔 $^{[26]}$,如图2所示。在FP谐振腔中,谐振腔的共振波长对应于低折射率空气芯中透射谱的波谷,FP谐振腔反共振波长对应于低折射率空气芯透射谱的波峰。进入HCF的纤芯后,由于空气芯折射率低于包层折射率,不满足全反射条件,光在传播到空气芯-包层界面后会折射进包层并继续向前传播。传播过程中,包层中的光会在空气芯-包层界面不断折射和反射并部分回到空气芯中。包层中,满足共振条件的光会不断增强并继续向前传播,不满足共振条件的光会产生损耗,直到消失。空气芯中,回到空气芯的折射光 $\text{Att}r'^{2n+1}$ 和反射光Ar发生多光束干涉,满足共振条件的光束数量减少,具体表现为透射谱中AR的波谷更尖锐。

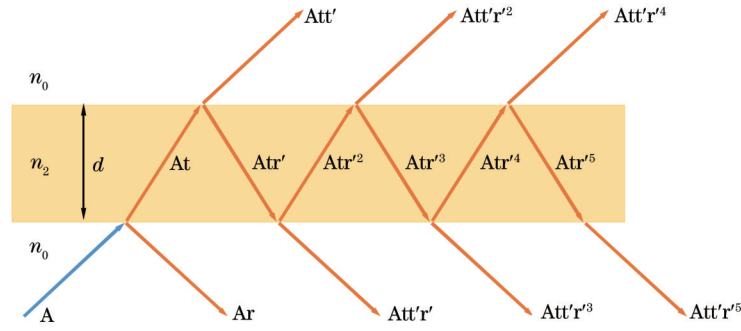


图2 FP谐振腔光传播示意图

Fig. 2 Schematic of optical transmission in FP resonant cavity

3 实验结果与研究

3.1 结构参数对传感性能的影响

对不同参数HCF制备的传感器进行光谱测试,分析3种传感机制在传感器中的作用,优化传感器结构参数。当HCF长 $580\ \mu\text{m}$ 时,将传感器固定在载玻片上,用滴管向载玻片滴加去离子水,直到完全浸没传感臂,测得传感器在空气和水中的反射谱与透射谱,如图3所示。通过计算,FP、MZ、AR在 $1550\ \text{nm}$ 附近的自由光谱范围理论值分别为 $2.07\ \text{nm}$ 、 $8.95\ \text{nm}$ 、 $19.56\ \text{nm}$ 。图3(a)显示了传感器在空气中的反射谱与透射谱,透射谱表现为MZ和AR的混叠,两尖锐波谷之间的距离为 $18.92\ \text{nm}$,与AR自由光谱范围的理

论计算结果相符,在透射谱上还有一些由MZ干涉导致的较小的干涉谷。反射谱表现为FP的干涉条纹和AR的包络,相邻波谷之间的距离为 $2.03\ \text{nm}$,与FP自由光谱范围的理论计算结果相符。在反射谱中FP形成了均匀的包络,这是因为AR影响了空气芯中不同波长反射光的强度。图3(b)显示了传感器在水中的反射谱与透射谱,透射谱中相邻波谷之间的距离为 $8.57\ \text{nm}$,也与MZ的理论计算结果相符。图3(b)的透射谱中仅存在MZ而反射谱中仅存在FP,这是因为水破坏了HCF低-高-低的折射率分布,即破坏了FP谐振腔的谐振条件,使得光更多地泄漏到环境中,屏蔽了AR^[2]。利用AR的这一性质,可以更好地判断光谱中各种机制的成分。

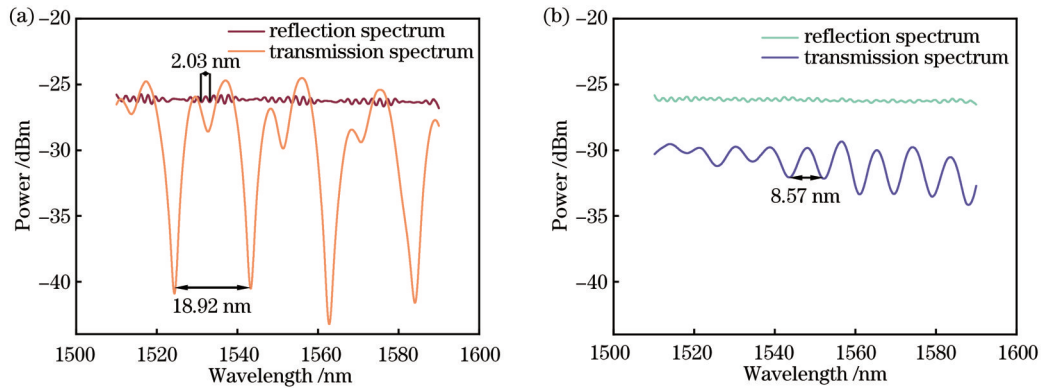


图3 传感器的透射谱和反射谱。(a)在空气中;(b)在水中

Fig. 3 Transmission and reflection spectra of the sensor. (a) In the air; (b) in the water

为了比较HCF长度对3种机制的影响,分别制备HCF长度为 50 、 380 、 520 、 580 、 780 、 $990\ \mu\text{m}$ 的样品。将外径为 $125\ \mu\text{m}$ 、内径为 $10\ \mu\text{m}$ 的HCF和标准SMF切割平整,选用FUJIKURA的熔接机(FSM-60S)熔接HCF与SMF,在目标长度处切割HCF后熔接另一根SMF,重复上述过程得到6个目标样品,其显微图像如图4所示,6个样品的结构均完好。

测试6个传感器的反射谱与透射谱,结果如图5所示。由理论计算可得,在包层直径为 $125\ \mu\text{m}$ 、空芯直径为 $10\ \mu\text{m}$ 的传感器中,AR产生的临界长度约为 $106.5\ \mu\text{m}$ 。如图5(a)所示,HCF长 $50\ \mu\text{m}$,小于AR激

发的临界长度,反射谱中仅存在FP干涉,透射谱中仅存在MZ干涉,此时的HCF中并没有产生AR。在HCF长度大于 $106.5\ \mu\text{m}$ 的传感器光谱中均可以看到AR的存在。由理论计算公式可知,AR的自由光谱范围仅与波长和包层厚度有关。如图5所示,随着HCF长度的增加,AR的自由光谱范围几乎没有变化。同时,FP和MZ的自由光谱范围随着HCF长度的增加而减小,这与理论计算结果相符。

为了比较包层厚度对3种机制的影响,选取外径为 $125\ \mu\text{m}$ 、内径为 $10\ \mu\text{m}$ 、长度为 $520\ \mu\text{m}$ 的HCF和标准SMF制备传感器样本,分别使用氢氟酸溶液腐蚀

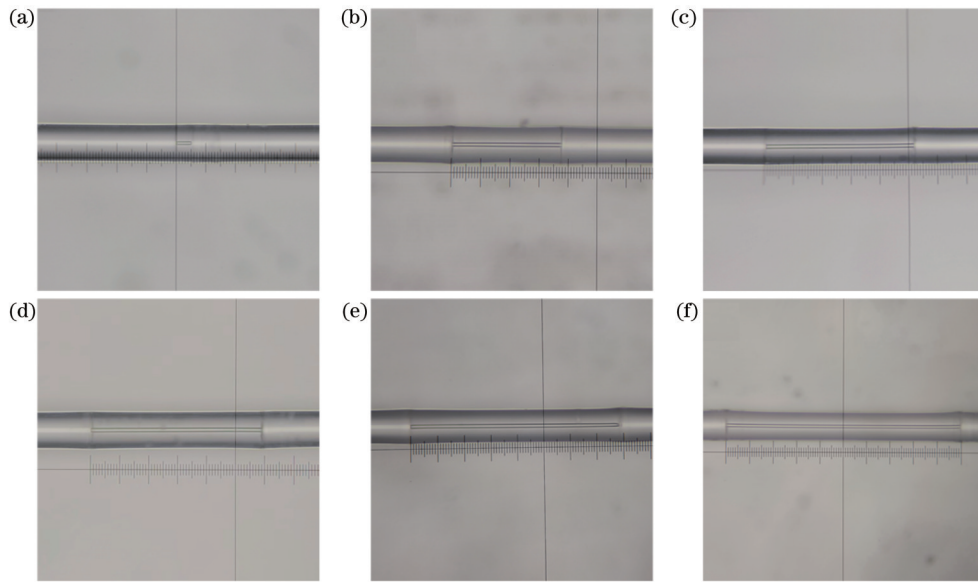


图 4 不同 HCF 长度的传感器显微图像。(a) 50 μm ; (b) 380 μm ; (c) 520 μm ; (d) 580 μm ; (e) 780 μm ; (f) 990 μm

Fig. 4 Microscope diagrams of sensors with different lengths of HCF. (a) 50 μm ; (b) 380 μm ; (c) 520 μm ; (d) 580 μm ; (e) 780 μm ; (f) 990 μm

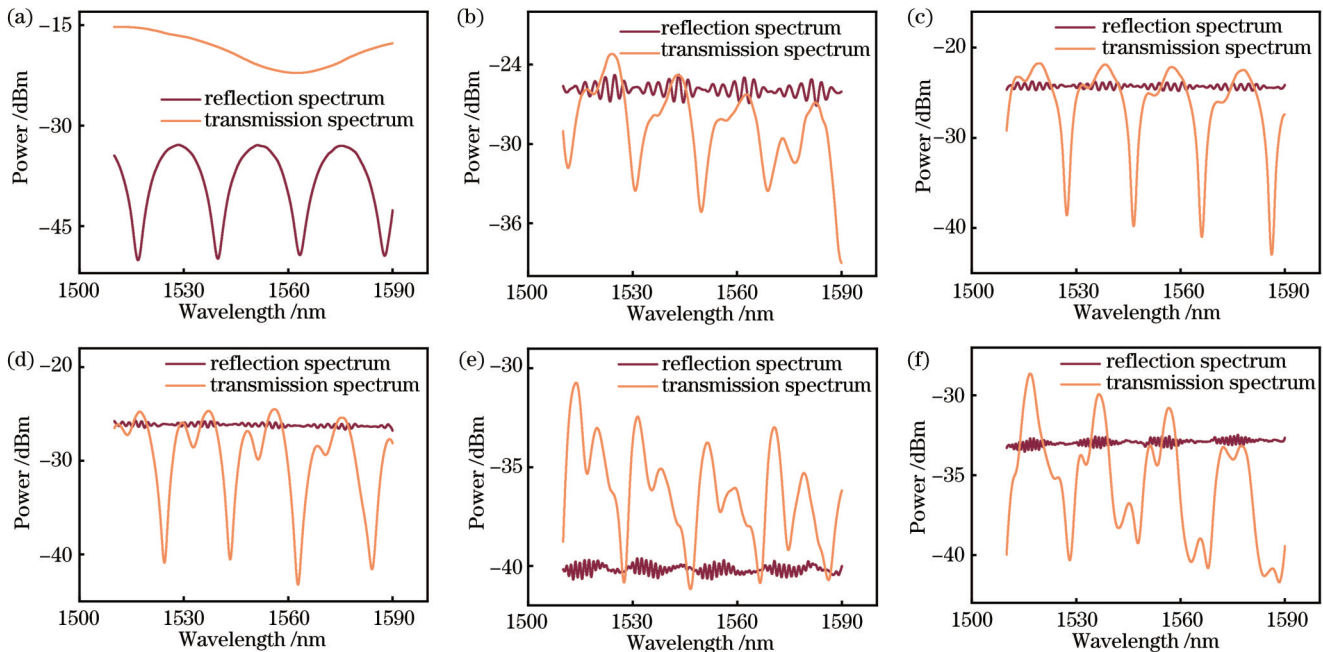


图 5 不同 HCF 长度的传感器的反射谱与透射谱。(a) 50 μm ; (b) 380 μm ; (c) 520 μm ; (d) 580 μm ; (e) 780 μm ; (f) 990 μm

Fig. 5 Reflection and transmission spectra for sensors with different lengths of HCF. (a) 50 μm ; (b) 380 μm ; (c) 520 μm ; (d) 580 μm ; (e) 780 μm ; (f) 990 μm

HCF 包层直径至 125、100、90、80、65、50 μm ，测试其反射谱和透射谱，结果如图 6 所示。6 个样品中，AR 的自由光谱范围分别为 19.20、23.72、28.76、31.35、39.26、58.56 nm，与 19.50、25.00、28.12、32.14、40.91、56.24 nm 的理论值接近。FP 和 MZ 的自由光谱范围不受包层厚度变化的影响，AR 的自由光谱范围随着包层厚度的减小而增大，该结论与理论计算公式所包含的结论一致。图 6(d)、(f) 中，AR 的干涉谷并不明显且没有在反射谱中形成明显的 AR 包络，这是

由光纤腐蚀不均匀导致的。

综上所述，除了长度、包层直径外，FP、MZ、AR 的干涉谷位置和自由光谱范围还受到纤芯直径和熔接效果的影响。纤芯直径可以控制 MZ 干涉的产生和条纹对比度，好的熔接效果可以抑制多模干涉的干扰。通过调整这些参数，可以实现对 FP、MZ 和 AR 的控制，灵活运用三种机制的共存。

3.2 传感器性能分析

HCF 越短，FP 的 FSR 越大、量程越大；HCF 越

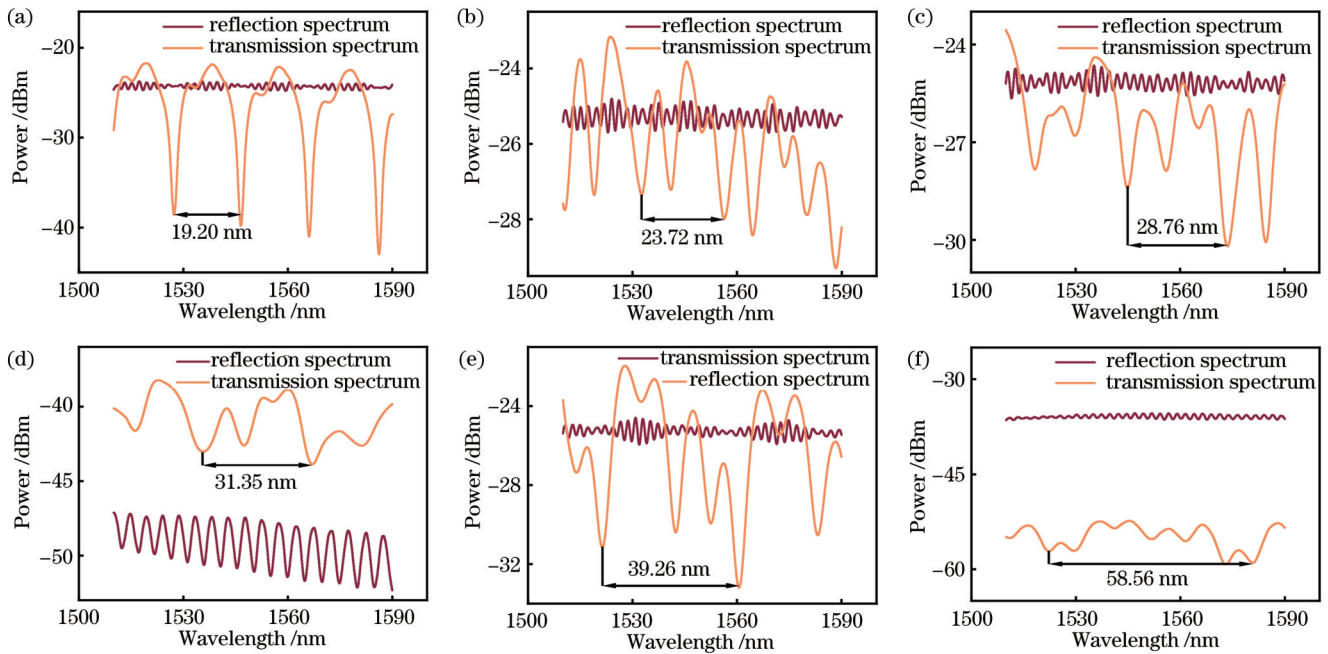


图 6 HCF 长 $520 \mu\text{m}$ 时,不同包层直径传感器的反射谱与透射谱。(a) $125 \mu\text{m}$; (b) $100 \mu\text{m}$; (c) $90 \mu\text{m}$; (d) $80 \mu\text{m}$; (e) $65 \mu\text{m}$; (f) $50 \mu\text{m}$
 Fig. 6 Reflection and transmission spectra for sensors with different cladding diameters when HCF length is $520 \mu\text{m}$. (a) $125 \mu\text{m}$; (b) $100 \mu\text{m}$; (c) $90 \mu\text{m}$; (d) $80 \mu\text{m}$; (e) $65 \mu\text{m}$; (f) $50 \mu\text{m}$

长, AR 的干涉谷越尖锐。当 HCF 长度为 $500 \mu\text{m}$ 左右时, FP 的 FSR 和 AR 的干涉谷深度均较为理想, 综合考虑选择长度为 $470 \mu\text{m}$ 的 HCF 进行传感器制备。使用的熔接机为 FUJIKURA 制造的 FSM-60S, 为了避免空芯塌陷抑制多模干扰, 调整放电强度为 -50 bit , 放电时间为 400 ms , 重叠长度为 $12 \mu\text{m}$ 。SMF 为 CORNING 生产的标准 SMF, 包层直径为 $125 \mu\text{m}$, 1550 nm 波长下模场直径为 $10.3 \mu\text{m}$, 纤芯折射率为 1.467 , 包层折射率为 1.463 ; HCF 包层直径为 $125 \mu\text{m}$, 空芯直径为 $10 \mu\text{m}$, 包层折射率为 1.463 , 空芯

折射率为 1。将 HCF 和 SMF 切割平整, 用熔接机熔接 HCF 与 SMF, 在 $470 \mu\text{m}$ 处切割 HCF 后熔接另一根 SMF。GO 为江苏先丰纳米材料科技有限公司生产的 XF020, 质量浓度为 0.5 mg/mL 。将 0.5 g PVA 粉末加入去离子水制备质量分数为 5% 的 PVA 溶液, 其间使用加热台加热至 $90 \text{ }^\circ\text{C}$ 以提高溶解速度。将 GO 溶液和 PVA 溶液按 $1:1$ 的质量比混合为 GO-PVA 溶液, 通过毛细管提拉法在传感器表面自然风干成膜, 提高传感器的湿度灵敏度。传感器的实物图和温度、湿度、应变实验装置图如图 7 所示。

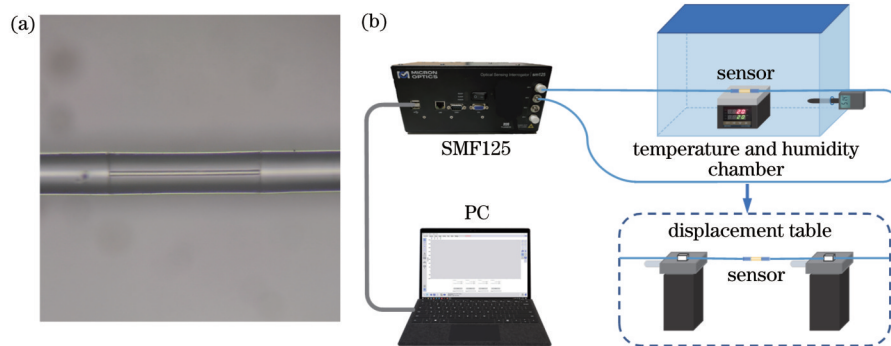


图 7 传感器显微图和实验装置图。(a) 传感器显微图; (b) 实验装置图

Fig. 7 Micrograph of sensor and diagram of experimental setup. (a) Micrograph of sensor; (b) diagram of experimental setup

图 7(b) 展示了温度、湿度、应变的实验装置图, 温湿度箱的温度调控范围为 $30 \sim 100 \text{ }^\circ\text{C}$, 相对湿度调控范围为 $10\% \sim 90\%$ 。光谱仪选用美国 Micron Optics 生产的 SMF125 光纤光栅解调仪, 解调范围为 $1510 \sim 1590 \text{ nm}$, 分辨率为 0.005 nm 。光从光纤光栅解调仪发出, 通过放在温湿度箱中或位移平台上的传感器, 再

回到光纤光栅解调仪, 数据通过网线传输到计算机。将实验装置连接好后, 选取 3 个干涉谷 (dip 1~3), 分别测试它们对温度、湿度、应变的灵敏度, 其中 dip 1 为反射谱中 FP 干涉的波谷, dip 2 和 dip 3 为透射谱中受 MZ 和 AR 影响的波谷, 它们在光谱中的位置如图 8 所示。

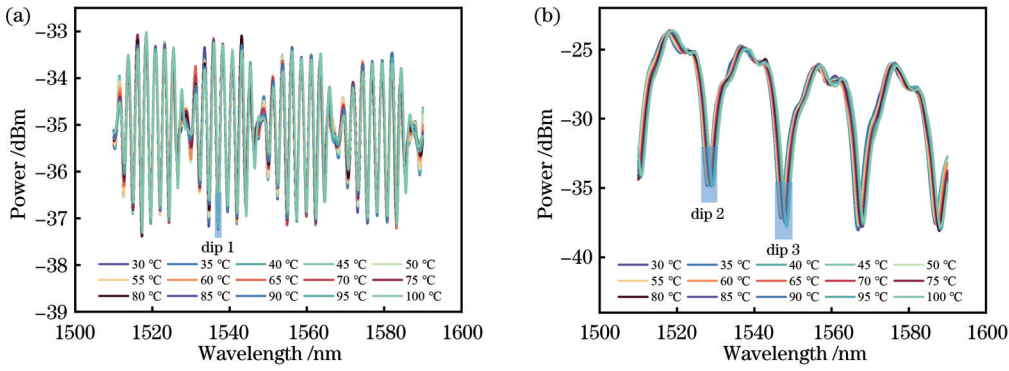


图 8 干涉谷的位置示意图。(a)dip 1;(b)dip 2和dip 3
Fig. 8 Schematic of the position of descending. (a) dip 1; (b) dip 2 and dip 3

为了测试 GO-PVA 对传感器的湿度增敏效果,选取 dip 3 测试提拉 GO-PVA 薄膜前后传感器的湿度响应特性,结果如图 9 所示。图 9(a)、(b)分别显示了提拉前和提拉后传感器透射谱的波长漂移情况,图 9(c)、(d)

分别显示了对应的拟合曲线,提拉前传感器的相对湿度灵敏度为 4.6 pm/%,提拉后相对湿度灵敏度为 6.07~37.5 pm/%。可见,传感器提拉 GO-PVA 薄膜后相对湿度灵敏度提高了 32%~715%,效果显著。

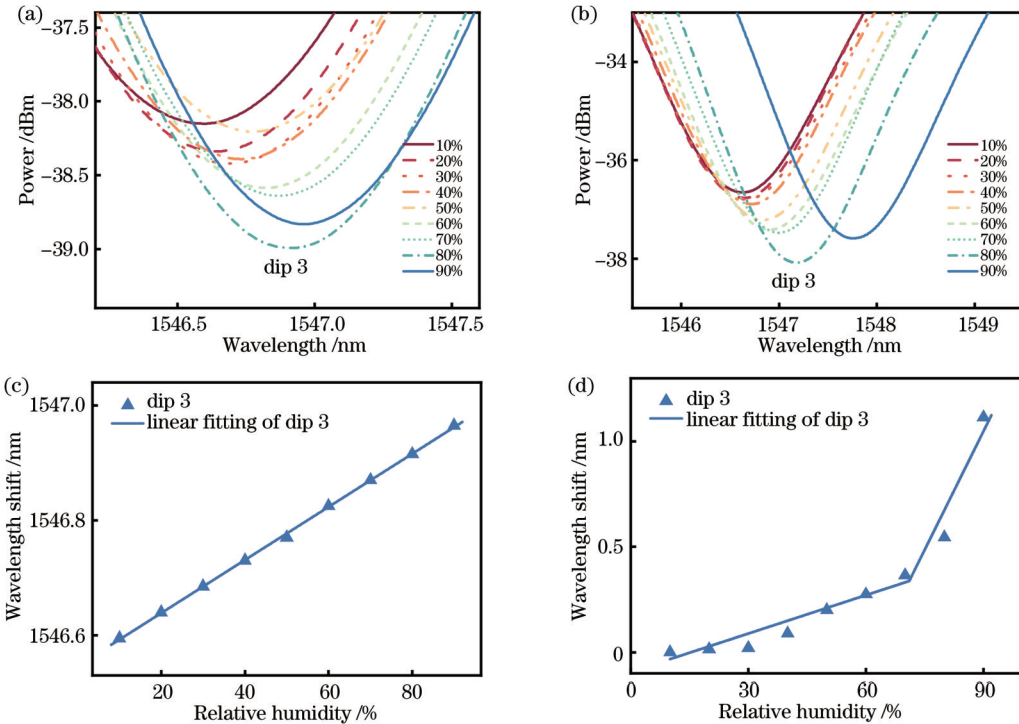


图 9 随相对湿度变化的 dip 3 波长漂移及线性拟合结果。(a)提拉前波长漂移;(b)提拉后波长漂移;(c)提拉前的线性拟合;(d)提拉后的线性拟合
Fig. 9 Wavelength shift of dip 3 and their linear fitting results changed with relative humidity. (a) Wavelength shift before soak-raise; (b) wavelength shift after soak-raise; (c) linear fitting before soak-raise; (d) linear fitting after soak-raise

将传感器放在温湿度箱中,设定相对湿度为 40%,控制温度从 30 °C 逐步上升到 100 °C,每隔 5 °C 记录一次数据,总共测得 15 组数据,如图 10 所示。热膨胀效应导致 HCF 的长度发生变化,热光效应导致包层的有效折射率改变,因此随着温度升高,FP、MZ、AR 的干涉谷发生波长漂移。图 10(a)~(c)分别显示了 dip 1、dip 2、dip 3 随温度变化的波长漂移情况,图 10(d)显示了 3 个波谷波长漂移的线性拟合结果。如图

10(d)所示,dip 1 的温度灵敏度 K_{T_1} 为 2.2 pm/°C,线性度为 0.994;dip 2 的温度灵敏度 K_{T_2} 为 21.9 pm/°C,线性度为 0.993;dip 3 的温度灵敏度 K_{T_3} 为 22.4 pm/°C,线性度为 0.996。

设定温湿度箱的温度为 20 °C,控制相对湿度从 10% 逐步上升到 90%,每隔 10% 让相对湿度保持 1 min 后记录数据,总共测得 9 组数据,如图 11 所示。图 11(a)~(c)分别显示了 dip 1、dip 2、dip 3 波长随相

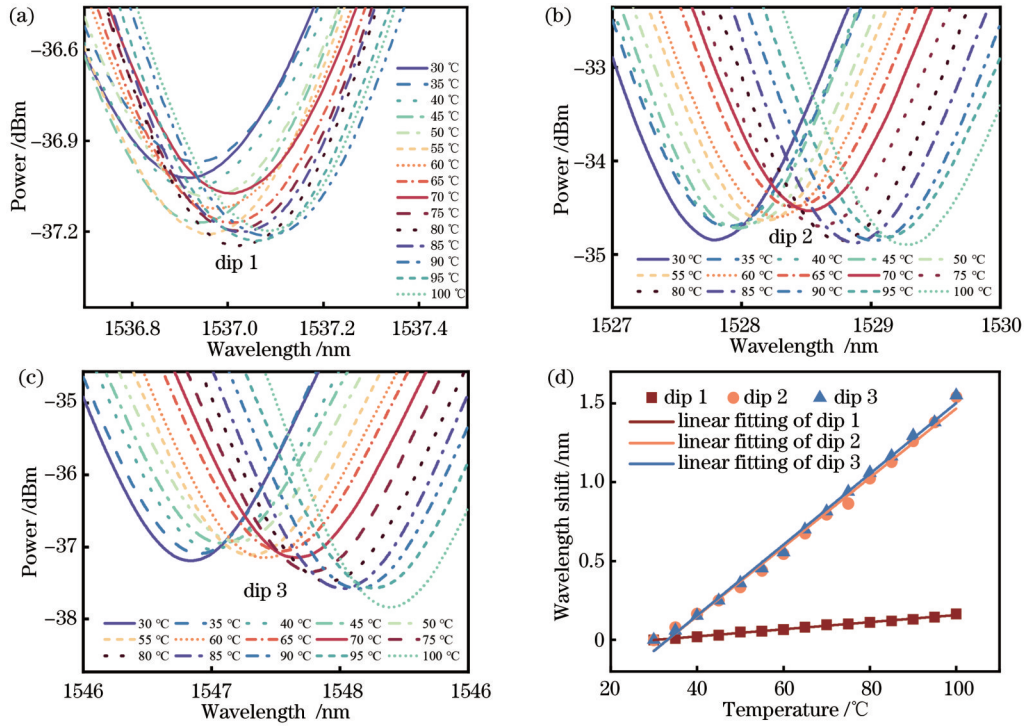


图 10 随温度变化的干涉谷波长漂移及线性拟合结果。(a) dip 1; (b) dip 2; (c) dip 3; (d) 线性拟合结果

Fig. 10 Wavelength shift of descending and their linear fitting results changed with the temperature. (a) dip 1; (b) dip 2; (c) dip 3; (d) linear fitting results

对湿度变化的漂移情况,图 11(d)显示了 3 个波谷波长漂移的线性拟合结果。由于湿度对传感器的影响不是完全线性的,本实验将 dip 2 和 dip 3 的波长随相对湿度漂移曲线分为 10%~70% 和 70%~90% 两段进行线性拟合。dip 1 的相对湿度灵敏度 K_{H_1} 为 0。在 10%~70% 的相对湿度范围内, dip 2 的相对湿度灵敏度 K_{H_2} 为 6.59 pm/%, 线性度为 0.95; dip 3 的相对湿度灵敏度 K_{H_3} 为 6.07 pm/%, 线性度为 0.93。在 70%~90% 的相对湿度范围内, dip 2 的湿度灵敏度 K_{H_2} 为 37.5 pm/%, 线性度为 0.92; dip 3 的湿度灵敏度 K_{H_3} 为 37.5 pm/%, 线性度为 0.91。

将传感器固定在两个位移平台上,保持环境温度 20 °C,相对湿度为 40%,两个固定点之间的初始距离为 50 cm。控制一侧的位移平台向外侧移动,每隔 50 μm 记录一次数据,根据 $\epsilon = \Delta L/L_0$,每移动 50 μm 的应变量为 100 $\mu\epsilon$ 。从 0 到 1100 $\mu\epsilon$,一共测得 12 组数据,如图 12 所示。图 12(a)~(c) 分别显示了 dip 1、dip 2、dip 3 随着应变变化的波长漂移情况,图 12(d) 显示了 3 个波谷波长漂移的线性拟合结果。dip 1 的应变灵敏度 K_{S_1} 为 1.22 pm/ $\mu\epsilon$,线性度为 0.997; dip 2 的应变灵敏度 K_{S_2} 为 -0.58 pm/ $\mu\epsilon$,线性度为 0.992; dip 3 的应变灵敏度 K_{S_3} 为 -0.56 pm/ $\mu\epsilon$,线性度为 0.995。

3 个干涉谷存在交叉敏感现象,为了消除温度、湿度和应变之间的交叉敏感,将 3 个参数对 3 个干涉谷的影响用灵敏度表示。其中,相对湿度灵敏度分为两段,

当桥梁镀锌钢丝周围的相对湿度低于 60% 时,桥梁材料通常是耐腐蚀的^[27],因此本实验选取 10%~70% 的相对湿度范围进行重点讨论。当温度、相对湿度和应变同时改变时,3 个干涉谷的波长漂移表现为温度、湿度和应变影响的叠加,用多项式描述为

$$\begin{cases} \Delta\lambda_1 = K_{T_1} \cdot \Delta T + K_{H_1} \cdot \Delta H + K_{S_1} \cdot \Delta\epsilon \\ \Delta\lambda_2 = K_{T_2} \cdot \Delta T + K_{H_2} \cdot \Delta H + K_{S_2} \cdot \Delta\epsilon \\ \Delta\lambda_3 = K_{T_3} \cdot \Delta T + K_{H_3} \cdot \Delta H + K_{S_3} \cdot \Delta\epsilon \end{cases} \quad (10)$$

式中: $\Delta\lambda_1$ 、 $\Delta\lambda_2$ 、 $\Delta\lambda_3$ 分别为 dip 1、dip 2、dip 3 的波长漂移; ΔT 、 ΔH 、 $\Delta\epsilon$ 分别为温度、相对湿度和应变的变化量; K_{T_1} 、 K_{T_2} 、 K_{T_3} 分别为 dip 1、dip 2、dip 3 的温度灵敏度; K_{H_1} 、 K_{H_2} 、 K_{H_3} 分别为 dip 1、dip 2、dip 3 的湿度灵敏度; K_{S_1} 、 K_{S_2} 、 K_{S_3} 分别为 dip 1、dip 2、dip 3 的应变灵敏度。将多项式转换成矩阵,波长漂移与温度湿度和应变的关系表示为

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \\ \Delta\lambda_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{T_1} & K_{H_1} & K_{S_1} \\ K_{T_2} & K_{H_2} & K_{S_2} \\ K_{T_3} & K_{H_3} & K_{S_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta H \\ \Delta\epsilon \end{bmatrix} \quad (11)$$

式(11)两边乘逆矩阵,将已经测得的温度、相对湿度和应变灵敏度代入矩阵,可得

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta H \\ \Delta\epsilon \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.2 & 0 & 1.22 \\ 21.9 & 6.59 & -0.58 \\ 22.4 & 6.07 & -0.56 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \\ \Delta\lambda_3 \end{bmatrix} \quad (12)$$

求解式(12)中的逆矩阵,得到

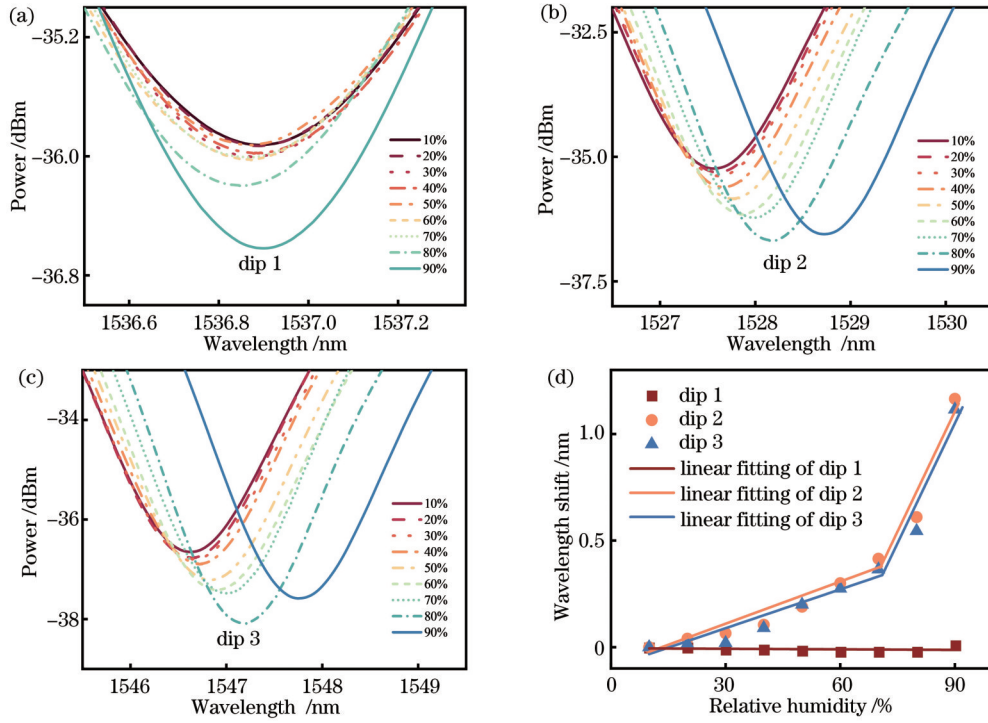


图 11 随相对湿度变化的干涉谷波长漂移及线性拟合结果。(a)dip 1; (b)dip 2; (c)dip 3; (d)线性拟合结果
Fig. 11 Wavelength shift of descending and their linear fitting results changed with relative humidity. (a) dip 1; (b) dip 2; (c) dip 3; (d) linear fitting results

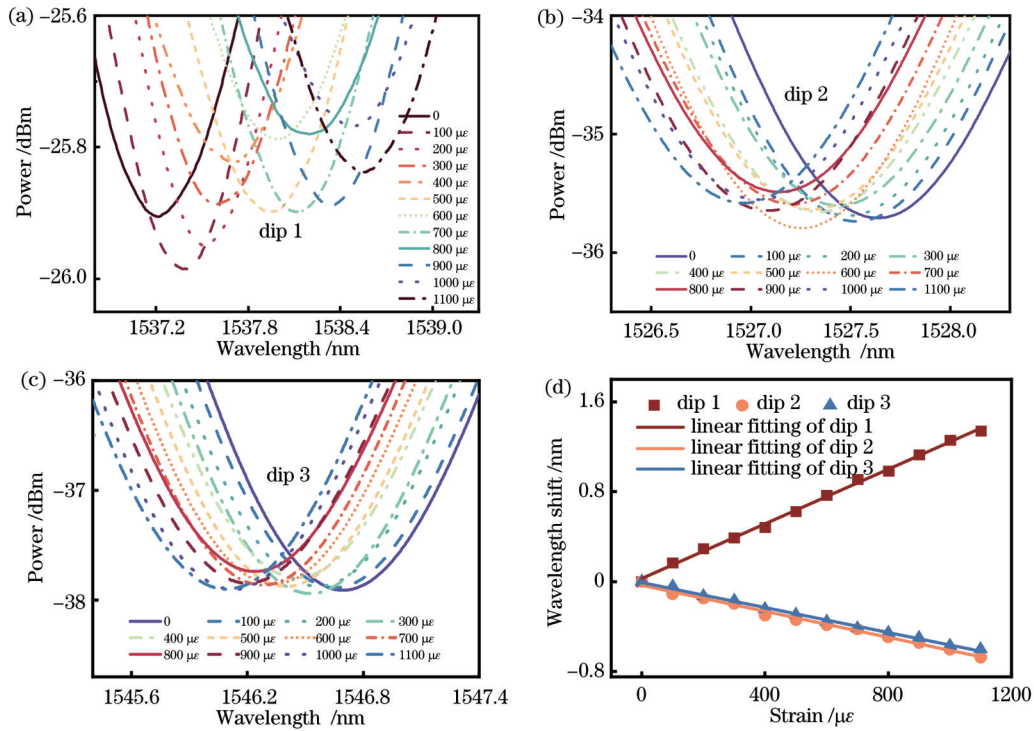


图 12 随应变变化的干涉谷波长漂移及线性拟合结果。(a)dip 1; (b)dip 2; (c)dip 3; (d)线性拟合结果
Fig. 12 Wavelength shift of descending and their linear fitting results changed with the strain. (a) dip 1; (b) dip 2; (c) dip 3; (d) linear fitting results

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta H \\ \Delta \epsilon \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0093 & -0.4050 & 0.4396 \\ 0.0398 & 1.5618 & -1.5308 \\ 0.8029 & 0.7303 & -0.7928 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \lambda_1 \\ \Delta \lambda_2 \\ \Delta \lambda_3 \end{bmatrix}, \quad (13)$$

在式(13)中代入 dip 1、dip 2、dip 3 的波长漂移, 可以求得此时的温度、湿度和应变的改变量, 加上初始温度、湿度和应变变量后, 就可实现对温度、湿度和应变的

监测。表 1 给出了同类型多参数传感器的比较,说明所设计的传感器具有一定优势。

表 1 同类型多参数传感器比较
Table 1 Comparison of multi-parameter sensors of the same type

Ref.	Sensing principle	Temperature sensitivity / ($\text{pm}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$)	Humidity sensitivity / ($\text{pm}\cdot\%^{-1}$)	Strain sensitivity ($\text{pm}\cdot\mu\epsilon^{-1}$)
[15]	Cascade FP cavity and MZI	20.4	14.6	4.8
[17]	Cascade FP and FBG	14.92	—	3.42
[28]	Cascade FBG and MFBG	9.72	17.629	—
[29]	Cascade FPI and FBG	12	348	—
This work	S-H-S	22.4	37.5	1.22

4 结 论

分析了 S-H-S 结构中 FP、MZ、AR 的共存,讨论了不同参数对 3 种机制的调控效果,发掘了该结构在多参数传感领域的灵活性。针对桥梁结构健康监测的需要,设计了温度、相对湿度和应变同时测量的光纤传感器,并利用 GO-PVA 混合增敏。实验结果表明,该传感器的最高温度灵敏度为 $22.4 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$,最高相对湿度灵敏度为 $37.5 \text{ pm}/\%$,最高应变灵敏度为 $1.22 \text{ pm}/\mu\epsilon$,均具有良好的线性度。通过传递矩阵消除交叉敏感,实现了单个结构进行 3 个参数同时测量。所提出的传感器在保证性能的同时实现了更多参数的同时测量,以单一结构降低了传感器尺寸和成本,在桥梁长距离监测等领域具有重要的应用价值。

参 考 文 献

- [1] Zhao J, Zhao Y, Peng Y, et al. Simultaneous measurement of salinity and temperature based on Fabry-Perot interference and anti-resonance effect[J]. *Sensors and Actuators B*, 2022, 369: 132248.
- [2] Liu D J, Li W, Wu Q, et al. Strain-, curvature- and twist-independent temperature sensor based on a small air core hollow core fiber structure[J]. *Optics Express*, 2021, 29(17): 26353-26365.
- [3] Xiong Y F, Xu F. Multifunctional integration on optical fiber tips: challenges and opportunities[J]. *Advanced Photonics*, 2020, 2(6): 064001.
- [4] Guo K K, He J, Li H, et al. High-spatial-resolution high-temperature sensor based on ultra-short fiber Bragg gratings with dual-wavelength differential detection[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(7): 2166-2172.
- [5] Chen Y H, Li C, Yang X Z. Simultaneous measurement of trace dimethyl methyl phosphate and temperature using all fiber Michaelson interferometer cascaded FBG[J]. *Optics Express*, 2023, 31(4): 6203-6216.
- [6] Li D R, Wang N N, Zhang T Y, et al. Label-free fiber nanograting sensor for real-time *in situ* early monitoring of cellular apoptosis[J]. *Advanced Photonics*, 2022, 4(1): 016001.
- [7] 孙萌萌, 葛益娴, 沈令闻, 等. 基于电弧放电优化的光纤法珀湿度传感器[J]. *光学学报*, 2022, 42(10): 1006002.
Sun M M, Ge Y X, Shen L W, et al. Optical fiber Fabry-Perot humidity sensor based on arc discharge optimization[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(10): 1006002.
- [8] Wei Y, Jiang T C, Liu C L, et al. Sawtooth fiber MZ vector bending sensor available for multi parameter measurement[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(17): 6037-6044.
- [9] Yi D, Liu F, Geng Y F, et al. High-sensitivity and large-range fiber optic temperature sensor based on PDMS-coated Mach-Zehnder interferometer combined with FBG[J]. *Optics Express*, 2021, 29(12): 18624-18633.
- [10] He X L, Ma C, Wang X B, et al. Pressure vector sensor based on an orthogonal optical path Sagnac interferometer[J]. *Optics Express*, 2020, 28(6): 7969-7979.
- [11] Huang Z Y, Liu D J, Wu Q, et al. Light transmission mechanisms in a SMF-capillary fiber-SMF structure and its application to bi-directional liquid level measurement[J]. *Optics Express*, 2022, 30(12): 21876-21893.
- [12] Zheng W L, Zhang Y N, Li L K, et al. A plug-and-play optical fiber SPR sensor for simultaneous measurement of glucose and cholesterol concentrations[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2022, 198: 113798.
- [13] Li B, Yan X, Zhang X N, et al. No-core optical fiber sensor based on surface plasmon resonance for glucose solution concentration and temperature measurement[J]. *Optics Express*, 2021, 29(9): 12930-12940.
- [14] Yang W L, Pan R, Zhang L Y, et al. Highly sensitive fiber-optic temperature sensor with compact hybrid interferometers enhanced by the harmonic Vernier effect[J]. *Optics Express*, 2023, 31(9): 14570-14582.
- [15] 彭敏, 鲁志琪, 刘昌宁. FP腔与MZI级联的三参量同时测量的光纤传感器[J]. *光学学报*, 2023, 43(1): 0106003.
Peng M, Lu Z Q, Liu C N. Fiber optic sensor for simultaneous measurement of three parameters in FP cavity and MZI cascade [J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(1): 0106003.
- [16] Zou T, Zhong J L, Liu S, et al. Helical intermediate-period fiber grating for refractive index measurements with low-sensitive temperature and torsion response[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(20): 6678-6685.
- [17] Liang J Q, Yu Y, Bian Q, et al. Metal-coated high-temperature strain optical fiber sensor based on cascaded air-bubble FPI-FBG structure[J]. *Optics Express*, 2023, 31(10): 16795-16811.
- [18] Xiao D R, Wang G Q, Yu F H, et al. Optical curvature sensor with high resolution based on in-line fiber Mach-Zehnder interferometer and microwave photonic filter[J]. *Optics Express*, 2022, 30(4): 5402-5413.
- [19] Wu Y Q, Yan D, Chen N K, et al. High sensitivity micro-fiber Mach-Zehnder interferometric temperature sensors with a high index ring layer[J]. *Optics Express*, 2019, 27(23): 34247-34257.
- [20] Wang J, Pei L, Wang J S, et al. Magnetic field and temperature dual-parameter sensor based on magnetic fluid materials filled photonic crystal fiber[J]. *Optics Express*, 2020, 28(2): 1456-1471.
- [21] Hu Y, Wei H M, Ma Z W, et al. Microbubble-based optical fiber Fabry-Perot sensor for simultaneous high-pressure and high-temperature sensing[J]. *Optics Express*, 2022, 30(19): 33639-33651.
- [22] Zhang X B, Pan H Y, Bai H W, et al. Transition of Fabry-Perot and antiresonant mechanisms via a SMF-capillary-SMF

- structure[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(10): 2268-2271.
- [23] Li W W, Wang D N, Wang Z K, et al. Fiber in-line Mach-Zehnder interferometer based on a pair of short sections of waveguide[J]. *Optics Express*, 2018, 26(9): 11496-11502.
- [24] Yu Y, Zhang X B, Wang K H, et al. Coexistence of transmission mechanisms for independent multi-parameter sensing in a silica capillary-based cascaded structure[J]. *Optics Express*, 2021, 29(17): 27938-27950.
- [25] Liu S Q, Ji Y K, Cui L G, et al. Humidity-insensitive temperature sensor based on a quartz capillary anti-resonant reflection optical waveguide[J]. *Optics Express*, 2017, 25(16): 18929-18939.
- [26] Litchinitser N M, Abeeluck A K, Headley C, et al. Antiresonant reflecting photonic crystal optical waveguides[J]. *Optics Letters*, 2002, 27(18): 1592-1594.
- [27] Yanaka Y, Kitagawa M. Maintenance of steel bridges on Honshu-Shikoku crossing[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2002, 58(1): 131-150.
- [28] Tian M, Huang Y H, Li C, et al. High-performance humidity sensor based on a micro-nano fiber Bragg grating coated with graphene oxide[J]. *Optics Express*, 2020, 28(18): 26395-26406.
- [29] Liu D, Cai Z H, Li B Z, et al. Simultaneous measurement of humidity and temperature based on fiber-tip microcantilever cascaded with fiber Bragg grating[J]. *Optics Express*, 2023, 31(5): 8738-8747.

Optical Fiber Sensor for Simultaneous Measurement of Temperature, Humidity, and Strain Based on Hollow Core Fiber

Chen Ming¹, Chang Jianhua^{1,2*}, Xu Yao¹, Jin Aobo¹, Hu Ziyi¹

¹*School of Electronics & Information Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, Jiangsu, China;*

²*Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, Jiangsu, China*

Abstract

Objective In recent years, with the development of fiber optic sensing technology and increasing environmental monitoring demands, simultaneous multiple parameter measurement has caught more attention. However, currently various available sensors can only achieve measurement of 1-2 parameters, making it difficult to meet the requirements for simultaneous multiple parameter measurement in complex environments. For example, in structural health monitoring of large buildings such as bridges, it is necessary to simultaneously monitor strain, temperature, and humidity. However, existing sensor solutions mostly rely on multiple sensors for simultaneous measurement or adopt cascaded structures for three-parameter measurement, which is generally complex and costly. Therefore, the utilization of a single structure to achieve simultaneous monitoring of temperature, humidity, and strain in a multi-parameter fiber optic sensor has research significance. We propose a fiber optic sensor for simultaneously measuring temperature, humidity, and strain based on a single-mode-hollow-core-single-mode (S-H-S) structure. By utilizing the S-H-S structure to excite the coexistence of Fabry-Perot (FP), Mach-Zehnder (MZ), and anti-resonance (AR) effects, the simultaneous measurement of temperature, humidity, and strain is achieved within a single structure. We hope that our research can provide a more stable, low-cost, and compact solution for bridge health monitoring.

Methods We achieve simultaneous measurement of three parameters by utilizing the coexistence of three sensing mechanisms in the S-H-S structure. Firstly, the coexistence principles of the three mechanisms are analyzed, and the performance parameter calculation formulas for FP, MZ, and AR effects are derived in this structure. Meanwhile, we analyze the generation principle of the AR effect, fabricate S-H-S structures with different structural parameters, and test the influence of structural parameters on sensing performance. Then, S-H-S structures with optimal parameters are fabricated and GO-PVA thin films are coated on the air-core fiber to enhance humidity sensitivity. The sensor performance changes before and after sensitivity enhancement are tested. In response to the humidity sensitivity varying with humidity changes, the humidity sensitivity range has been divided into two segments based on the application scenario, which leads to a higher linear correlation of humidity sensitivity. Finally, a temperature, humidity, and strain testing platform is set up to conduct performance tests for the three parameters. The matrix method is employed to eliminate cross-sensitivity among the three parameters, enabling the simultaneous measurement of the three parameters.

Results and Discussions The proposed S-H-S structure achieves the sensing mechanism coexistence of FP, MZ, and AR effects. In this structure, when the air core size of the hollow core fiber (HCF) is smaller than 10 μm , the reflection and transmission spectra of the S-H-S structure coexist with these three sensing mechanisms. The reflection spectrum of

this structure exhibits FP interference and the envelope of AR fringes, while the transmission spectrum shows the superposition of MZ interference and AR (Fig. 3). S-H-S structures with different structural parameters are fabricated (Fig. 4), and the changes in reflection and transmission spectra under different parameters are compared (Figs. 5 - 7) to determine the optimal parameters for yielding the desired spectral fringe effects. The S-H-S structure is coated with GO-PVA to enhance sensitivity, improving the relative humidity sensitivity by 32%-715% (Fig. 9). Sensitivity tests for temperature, relative humidity, and strain demonstrate that the highest temperature sensitivity is 22.4 pm/°C (Fig. 10), the highest relative humidity sensitivity is 37.5 pm/% (Fig. 11), and the highest strain sensitivity is 1.22 pm/ $\mu\epsilon$ (Fig. 12). The temperature, relative humidity, and strain sensing of the sensor exhibit good linearity and stability within the target range. Comparison reveals that the proposed sensor outperforms traditional approaches in terms of smaller size, better performance, and lower cost.

Conclusions We analyze the coexistence of FP, MZ, and AR effects in the S-H-S structure. The modulation effects of different parameters on the three mechanisms are discussed to highlight the flexibility of this structure in multi-parameter sensing. To meet the needs of bridge structural health monitoring, we design a optical fiber sensor capable of simultaneous measurement of temperature, humidity, and strain, and utilize GO-PVA hybrid sensitization. Experimental results demonstrate that the sensor achieves a maximum temperature sensitivity of 22.4 pm/°C, a maximum humidity sensitivity of 37.5 pm/%, and a maximum strain sensitivity of 1.22 pm/ $\mu\epsilon$, all with good linearity. By adopting transfer matrix techniques to eliminate cross-sensitivity, the simultaneous measurement of the three parameters is achieved within a single structure. The proposed sensor ensures performance and enables the simultaneous measurement of multiple parameters, while the single structure reduces the sensor's size and cost. It has significant application potential in areas such as long-distance bridge monitoring.

Key words fiber optics; hollow core fiber; anti-resonant effect; Mach-Zehnder; Fabry-Perot; multi-parameter sensing