

引用本文:周建明,李小金,侯丹,等.基于光纤柔性板的共封装光学机箱温度传感研究[J].光通信技术,2026,50(4):65-71.

基于光纤柔性板的共封装光学机箱温度传感研究

周建明^{1,2},李小金²,侯丹²,郑敏^{2*},杜路平^{1*}

(1.深圳大学微纳光电子学研究院,广东深圳518000;

2.深圳太辰光通信股份有限公司广东省光纤传感(太辰光)工程技术研究中心,广东深圳518000)

摘要:针对共封装光学(CPO)机箱高热流密度的热管理需求,提出一种基于光纤柔性板(FOFC)的CPO机箱温度传感方案。该方案利用FOFC中任意两通道构建非平衡马赫-曾德尔干涉仪,通过监测干涉光谱波长漂移实现温度测量。实验结果表明:在30~70℃内,该方案的温度灵敏度为13.7~16.2 pm/℃,测量准确度为±1.5℃,且灵敏度不随通道组合不同而发生较大变动,具有良好的应用潜力。

关键词:光纤柔性板;光纤传感;共封装光学;温度传感;数据中心

中图分类号:TN256 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2026)04-0065-07

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2026.04.010

Research on temperature sensing for co-packaged optics chassis based on fiber optic flexible board

ZHOU Jianming^{1,2}, LI Xiaojin², HOU Dan², ZHENG Min^{2*}, DU Luping^{1*}

(1. Institute of Microscale Optoelectronics, Shenzhen University, Shenzhen Guangdong 518000, China; 2. Optical Fiber Sensing Engineering Technology R&D Center of Guangdong Province, T&S Communications Co., Ltd., Shenzhen Guangdong 518000, China)

Abstract: To address the thermal management requirements arising from the high heat flux density of co-packaged optics (CPO) chassis, this paper proposes a temperature sensing scheme for the CPO chassis based on fiber optic flexible circuits (FOFC). The scheme utilizes any two channels within the FOFC to construct an unbalanced Mach-Zehnder interferometer, achieving temperature measurement by monitoring the wavelength shift of the interference spectrum. Experimental results demonstrate that within the temperature range of 30~70℃, the proposed scheme achieves a temperature sensitivity of 13.7~16.2 pm/℃ and a measurement accuracy of ±1.5℃. Moreover, the sensitivity does not vary significantly with different channel combinations, indicating good application potential.

Key words: fiber optic flexible board, fiber optic sensing, co-packaged optics, temperature sensors, data centers

0 引言

近年来,人工智能(AI)技术^[1-2]重塑各行各业,展现出前所未有的经济增长与社会变革潜力。共封装

收稿日期:2026-03-12。

基金项目:深圳市科技计划项目(KJZD20230923114415031)资助;深圳高新区发展专项计划创新平台建设项目(91440300724721938J)资助。

作者简介:周建明(1993—),男,博士后,毕业于暨南大学,现为深圳大学与太辰光通信联合培养博士后。研究方向为CPO高密度光连接器、光纤柔性板、新型光纤传感器及玻璃基波导芯片。已发表SCI论文4篇、EI论文2篇、中文核心1篇,授权发明专利1项。

***通信作者1:**郑敏(1981—),男,博士,高级工程师。主要从事光纤传感技术研究工作。

***通信作者2:**杜路平(1986—),男,特聘教授,博士生导师,国家优青,教育部自然科学二等奖获得者。主要从事纳米光子学研究工作。



光学(CPO)^[3-5]通过光电共封装技术突破传输瓶颈,为AI计算提供高速互联解决方案。然而,在数据中心系统级功率密度持续攀升的态势下,CPO技术方案引发了一系列严峻的散热问题和热量管理挑战^[6]。此外,交换机箱内还分布着光引擎、外置激光器、印刷电路板(PCB)上的阻容元件等多种发热器件。因此,对机箱内环境温度进行热管理监测,同样具有重要意义^[6-9]。传统的电学温度传感器在数据中心这一特定运用场景中,存在抗电磁干扰能力弱,动态响应速度不佳,长期稳定性差,以及增加系统热量的问题^[10]。CPO机箱的高热流密度和复杂布线环境同样限制了电学传感器的应用,因此开发新型低能耗、低成本、抗干扰、稳定性佳的光学温度传感监测方案具有潜在的市场需求。

周建明, 李小金, 侯丹, 等: 基于光纤柔性板的共封装光学机箱温度传感研究

超低能耗的光纤柔性板(FOFC)作为CPO机箱的关键无源器件,其相关研究和工程应用方案受到了英伟达、康宁等公司^[1]的密切关注。FOFC是光通信领域一项关键创新技术,实现了类似PCB的灵活布线能力与光纤的大带宽、低损耗传输特性的结合^[12-15]。除信号传输功能外,FOFC在CPO机箱中占据着较大面积,紧贴PCB和各种发热元件。若利用FOFC既有的覆盖范围和紧贴发热元件的天然位置,将光纤直接作为传感元件,则可在不改变机箱原有结构、不引入额外传感器、不额外增加能耗的前提下,赋予FOFC“感知-传输”一体化的功能。因此,结合光纤传感技术,FOFC亦可尝试作为机箱内部的温度监测传感器,对CPO机箱内的芯片运行环境温度进行实时检测^[16]。

光纤传感技术^[17-20]以其低能耗、高灵敏度、抗电磁干扰及良好的稳定性等优势,已成为温度、折射率、振动、位移等物理量测量的重要手段^[21-24],常见技术路线主要包括光纤光栅(FBG)、马赫-曾德尔干涉仪(MZI)、萨格奈克干涉仪(SI)及长距离分布式传感等^[25-28]。鉴于CPO机箱中芯片运行环境温度检测的重要性,本文提出一种基于FOFC的CPO机箱温度传感方案,其具有低能耗、结构紧凑、集成度高及稳定性优良等优势,适用于CPO机箱内环境温度的实时监测。

1 FOFC结构与传感原理

1.1 FOFC结构

传统的以太网交换机主要功耗来自外部大量的可插拔光模块中的数据处理芯片。新型CPO机箱将外部数据处理的核心单元集成在芯片周围进行统一热管理,具有显著的功耗优势。FOFC作为一种超高密度的光纤互连组件,在CPO机箱中占据着较大的内部平面空间,紧紧贴合在机箱内部,具备多功能应用的开发潜力,是一种潜在的温度监测单元。FOFC在CPO机箱中的位置及结构如图1所示。可以看出,

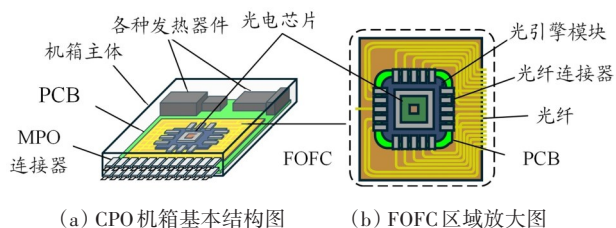


图1 FOFC在CPO机箱中的位置及结构

CPO机箱基本结构主要包含多芯光纤连接器(MPO)和机箱主体,内部主要有PCB、FOFC、光电芯片及各种发热器件(如外置激光器、供电模块、电容电阻等)。FOFC区域主要包含光纤连接器、光纤走线以及柔性板下部的PCB;同时,超大容量的CPO机箱中存在大量的光纤走线,并以FOFC的形式高效集成,这是光纤传感技术的一个绝佳潜在应用场景。

1.2 MZI传感原理

本文利用FOFC中任意两通道构建非平衡MZI。光纤MZI干涉传感的基本原理为双光束干涉。当外界应变、温度和振动等物理参量作用于光纤干涉臂后,光纤的折射率发生改变,导致光程差变化,进而引起MZI相位变化和干涉特征光谱的变化,从而实现物理传感参量与波长、功率或特征波形变化之间的映射。

非平衡MZI两臂的相位差 $\Delta\varphi$ 表达式为

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi n\Delta L}{\lambda} \quad (1)$$

式中: n 为初始光纤折射率, ΔL 为非平衡MZI的臂长差, λ 为入射波长。

自由光谱宽度(FSR)频率域间隔 $\Delta\nu_{\text{FSR}}$ 与折射率、臂长差、光速的关系为

$$\Delta\nu_{\text{FSR}} = \frac{c}{n\Delta L} \quad (2)$$

式中: c 为光速。

FSR波长域间隔 $\Delta\lambda_{\text{FSR}}$ 与折射率、臂长差、波长关系为

$$\Delta\lambda_{\text{FSR}} = \frac{\lambda^2}{n\Delta L} \quad (3)$$

在实际工程应用时,MZI传感灵敏度分2种情况进行分析:一种是将两臂同时放入温度场中进行传感测量,另一种是仅将传感臂放在温度场进行分析。

光程差(OPD)与干涉波长关系的整体表达式为

$$\Delta_{\text{OPD}} = n\Delta L = j\lambda \quad (4)$$

式中: Δ_{OPD} 为光程差, j 为MZI干涉级次。上述2种情况的光程差 $\Delta_{\text{OPD}}^{(1)}$ 、 $\Delta_{\text{OPD}}^{(2)}$ 与波长的关系式可以写为

$$\begin{cases} \Delta_{\text{OPD}}^{(1)} = n(T)\Delta L(T) = j\lambda \\ \Delta_{\text{OPD}}^{(2)} = n(T)L_s(T) - nL_r = j\lambda \end{cases} \quad (5)$$

式中: T 为环境温度, L_s 为传感臂长度, L_r 为参考臂长度,臂长差 $\Delta L = L_s - L_r$ 。

温度改变后,对式(5)两端求导有

$$\frac{d\Delta_{\text{OPD}}^{(1)}\Delta_{\text{OPD}}^{(2)}}{dT} = j\frac{d\lambda}{d\lambda} \quad (6)$$

先对式(6)等号左端算式求导有

$$\begin{aligned}\frac{d\Delta_{\text{OPD}}^{(1)}}{dT} &= \frac{d(n(T)\Delta L(T))}{dT} = \\ &\Delta L \frac{dn}{dT} + n \frac{d(\Delta L)}{dT} = \Delta L \left(\frac{dn}{dT} + na \right) \\ \frac{d\Delta_{\text{OPD}}^{(2)}}{dT} &= \frac{d(n(T)L_s(T) - nL_r)}{dT} = \\ &L_s \frac{dn}{dT} + n \frac{d(L_s)}{dT} = L_s \left(\frac{dn}{dT} + na \right) \quad (7)\end{aligned}$$

式中: dn/dT 为光纤的热光系数 ($\xi \approx 1 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$), a 为光纤的热膨胀系数 ($a \approx 0.55 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$)。

由式(4)可得式(8)。

$$j = \frac{n\Delta L}{\lambda} \quad (8)$$

再代入式(6)和式(7)的结果, 整体求温度导数有

$$\begin{cases} \Delta L \left(\frac{dn}{dT} + na \right) = j \frac{d\lambda}{dT} = \frac{n\Delta L}{\lambda} \frac{d\lambda}{dT} \\ L_s \left(\frac{dn}{dT} + na \right) = j \frac{d\lambda}{dT} = \frac{n\Delta L}{\lambda} \frac{d\lambda}{dT} \end{cases} \quad (9)$$

最终, 2种测量方式下的波长灵敏度为

$$\begin{cases} S_{\lambda}^{(1)} = \frac{\lambda}{n} \left(\frac{dn}{dT} + na \right) \\ S_{\lambda}^{(2)} = \frac{\lambda}{n} \left(\frac{dn}{dT} + na \right) \frac{L_s}{\Delta L} \end{cases} \quad (10)$$

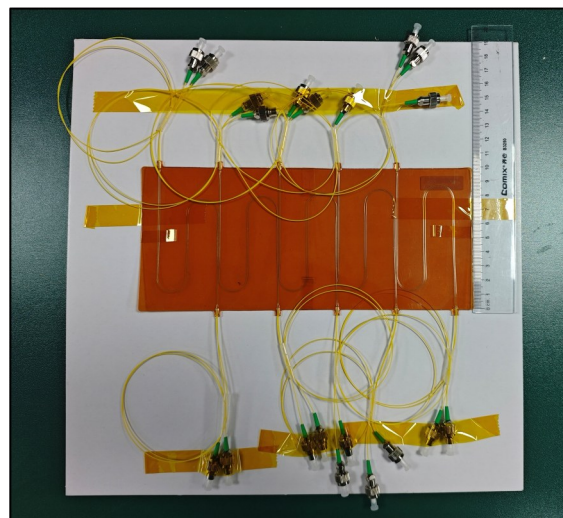
式中: $S_{\lambda}^{(1)}$ 为双臂同时传感的温度变化波长灵敏度, $S_{\lambda}^{(2)}$ 为只将传感臂放入温度测试的波长灵敏度, $L_s/\Delta L$ 为 MZI 灵敏度放大系数。观察式(10)可以得到结论, 当双臂同时放入温度测试环境中时, 波长灵敏度只与入射波长、初始折射率、材料热光系数和热膨胀系数有关, 而与初始臂长差 ΔL 无关。在 1 550 nm 附近, 光纤折射率值取 1.468 时, 光纤 MZI 温度灵敏度理论值约为 11.4 pm/ $^\circ\text{C}$ 。

对比式(10)的结果可以得出结论: 当只将传感臂放入温度测试环境中时, 波长灵敏度 $S_{\lambda}^{(2)}$ 会多出一个放大因子, 即波长灵敏度会乘以一个温度传感实际长度与初始长度差的比值。这 2 种工程试验方式各有应用场景, 使得光纤 MZI 传感器既具备灵敏度解调的稳定性, 又可以实现简单设计后的灵敏度增敏需求。

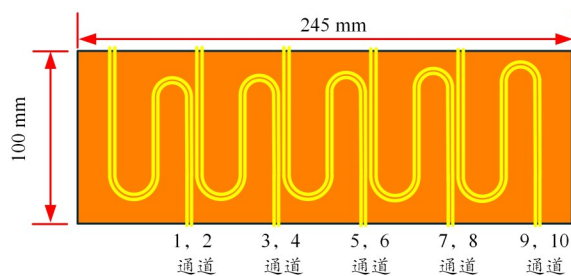
2 实验系统与结果分析

2.1 实验系统与 FOFC

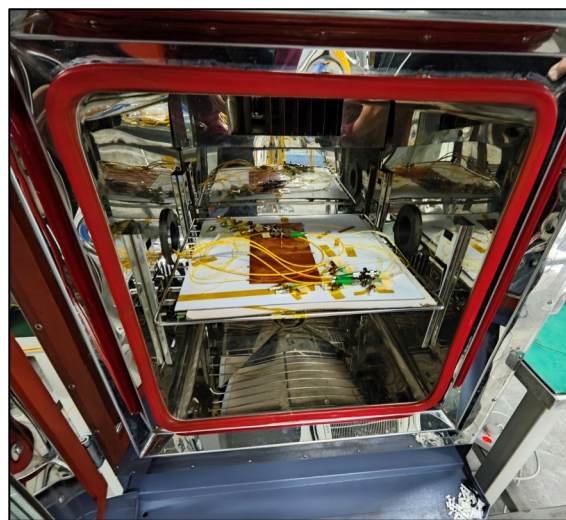
实验所用的 FOFC 由深圳太辰光通信股份有限公司根据企业内部标准制作。FOFC 的基本情况如图 2



(a) FOFC 实物图



(b) 尺寸参数和通道路径图



(c) 环境温度测试实物图

图2 FOFC的基本情况

所示。该柔性板将光纤走线束缚在 100 mm $\times$ 245 mm 的二维平面内, 厚度小于 1 mm, 共 5 组、10 个通道。同组通道间的光程差约为 0, 相邻组通道间的光程差为 5 mm, 便于非平衡 MZI 传感器的搭建。

FOFC 温度传感光路基本原理图如图 3 所示。本

周建明, 李小金, 侯丹, 等: 基于光纤柔性板的共封装光学机箱温度传感研究

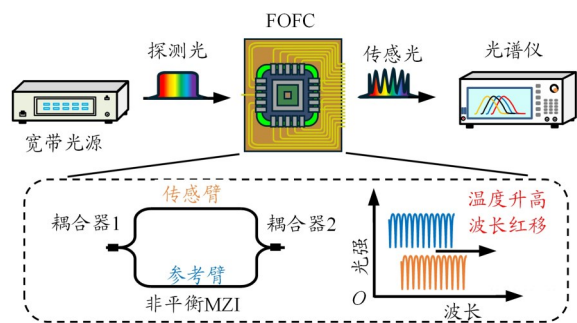


图3 FOFC温度传感光路基本原理图

文将CPO机箱中的FOFC等效简化为一个非平衡MZI型传感器。传感系统可采用外置宽带光源,或利用光电芯片交换过程中的光信号作为光源。具体光路如下:探测光经50:50分光比的3 dB耦合器1分光后,2束光分别进入FOFC的任意2个通道,再经另一个相同分光比的3 dB耦合器2合束,产生双光束干涉,最终通过光谱仪测得干涉光谱的波长偏移量,实现温度传感。为验证该方案的灵敏度不随通道组合不同而发生显著变化,本文选取通道1分别与通道2、3、5、7组成干涉传感器进行实验。

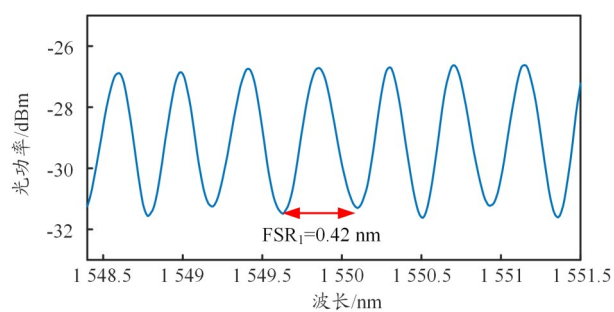
2.2 干涉光谱与温度漂移特征

通道1分别与通道2、3、5、7组成干涉仪后测得的干涉光谱图如图4所示。根据式(3),在波长为1550 nm、光纤折射率为1.468的条件下,各通道组合的FSR实验值分别为0.42、1.4、0.27、0.14 nm,由此反推通道1与通道2、3、5、7的实际起始臂长差分别为3.9、1.1、6.1、11.1 mm。作为对比,FOFC的理论设计光程差分别为0、5、10、15 mm。实验值与理论值之间的系统性偏差源于耦合器1和耦合器2引入了约-3.9 mm的附加光程差(主要由耦合器尾纤长度差异引起),这一偏差在商业化产品中较为常见,且不改变干涉谱特征,不影响后续温度传感实验的有效性。

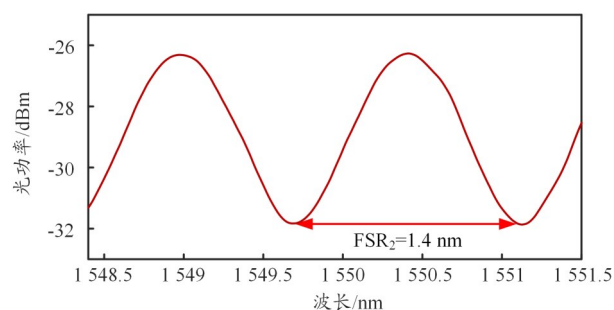
温度从30℃升至70℃(步长为5℃)过程中,MZI干涉光谱的相对光功率和波长漂移情况如图5所示。图中箭头标明了1550 nm附近标记波谷的方向与偏移量。可以看出,随着温度升高,各通道组合的干涉光谱整体向长波长方向发生红移,且与图中箭头的倾斜程度基本一致,表明不同通道组合的波长偏移量相近,初步验证了该方案灵敏度的一致性。

2.3 灵敏度标定与稳定性分析

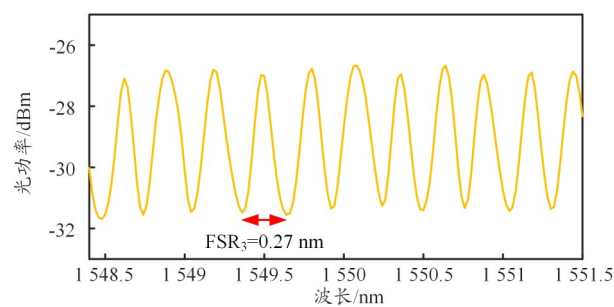
各通道组合在不同温度下的特征波长变化及其线性拟合结果如图6所示。由图6拟合结果可知,各通道组合的特征波长与温度呈良好线性关系。图中



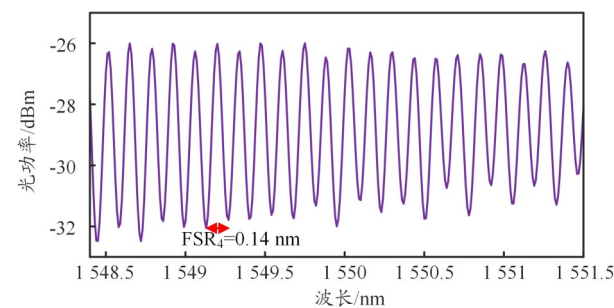
(a) 通道1与通道2



(b) 通道1与通道3



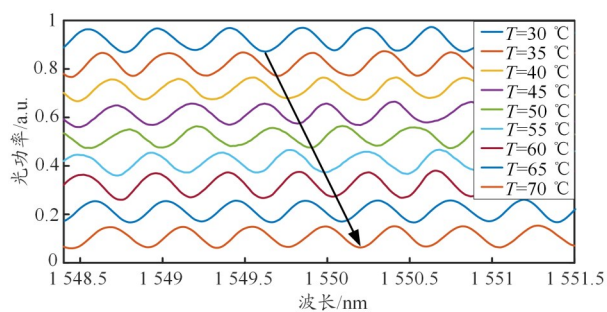
(c) 通道1与通道5



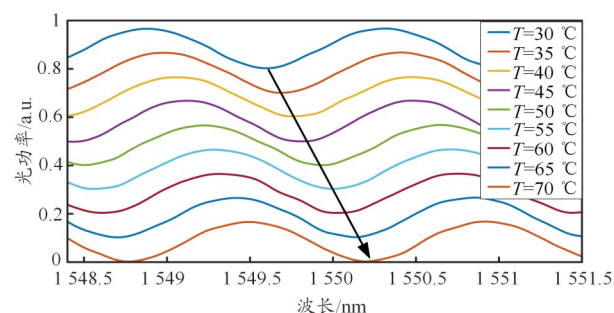
(d) 通道1与通道7

图4 通道1分别与通道2、3、5、7组成干涉仪后测得的干涉光谱图

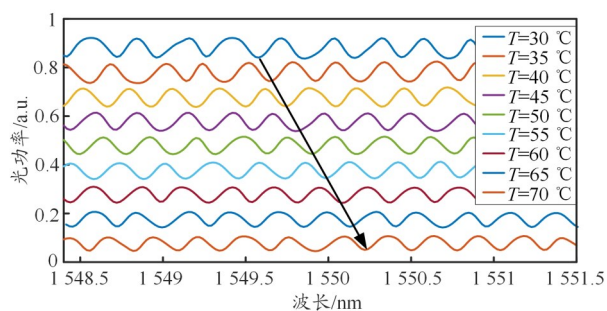
斜率 S 即为温度灵敏度,通道1与通道2、3、5、7组合对应的温度灵敏度依次为0.013 7、0.014 7、0.016 2、0.015 8 nm/℃(即13.7、14.7、16.2、15.8 pm/℃), R^2 依次为0.992、0.996、0.996、0.998。上述结果与式(10)的理论值(11.4 pm/℃)相近。在实际实验中,每次将耦合器



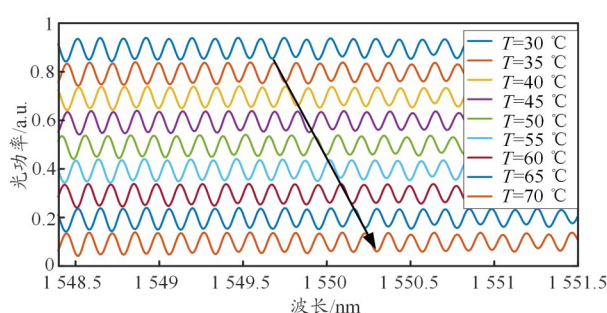
(a) 通道1与通道2



(b) 通道1与通道3



(c) 通道1与通道5

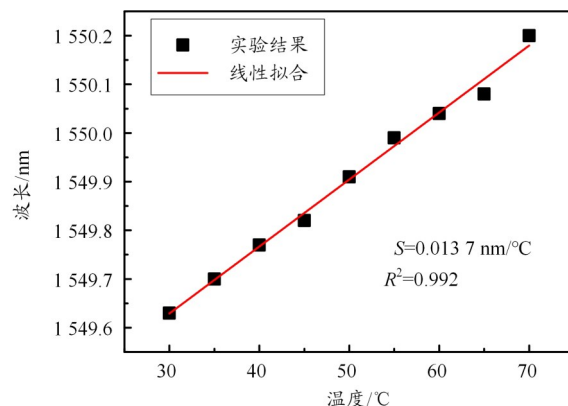


(d) 通道1与通道7

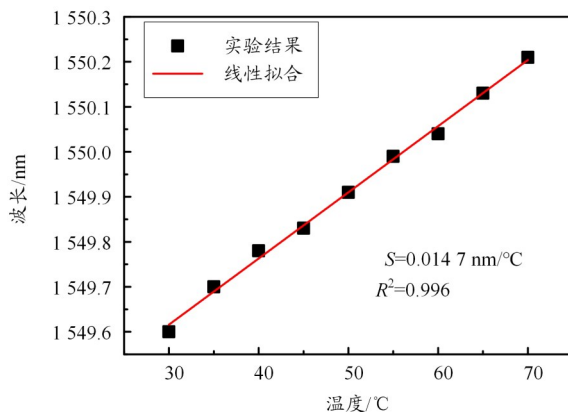
图5 温度传感测试中干涉光谱的相对光功率和波长漂移图

放入恒温箱时,两臂实际参与温度传感的长度无法保证完全一致,即式(10)中的MZI灵敏度放大系数 $\left(\frac{L_s}{\Delta L} \neq \frac{\Delta L}{\Delta L}\right)$ 存在微小波动。例如,初始光程差为3.9 mm、耦合器尾纤引入约1 mm的附加长度偏差时,

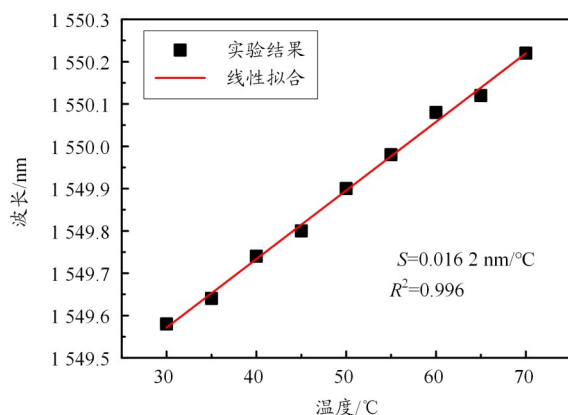
理论灵敏度变为 $11.4 \times 4.9/3.9 = 14.32 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 。虽然这种情况几乎不可避免,但是后期可以通过完美封装、改进温控实验条件、耦合器小型集成化来解决,整体实验结果与预期推导结论基本一致。拟合结果表明,在该测量方案下,无论选取哪个通道组合,FOFC的温度灵敏度均保持一定的稳定性。上述结果表明,该方案具备解调流程简洁、标定参数保持恒定、波长-温度响应线性度良好等优势。



(a) 通道1和通道2

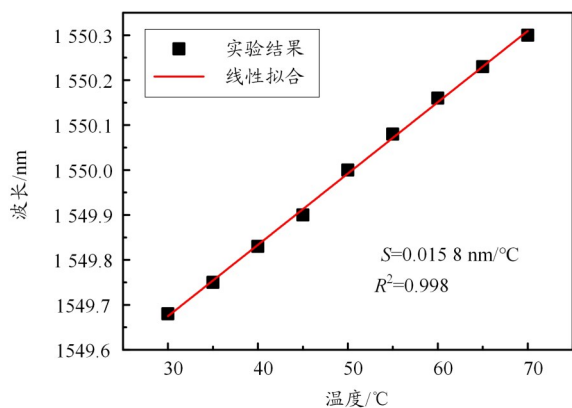


(b) 通道1和通道3



(c) 通道1和通道5

周建明, 李小金, 侯丹, 等: 基于光纤柔性板的共封装光学机箱温度传感研究



(d) 通道1和通道7

图6 温度传感实验数据点的线性拟合结果

为评估该解调方案的长期稳定性, 本文在室温为25℃下对基于FOFC构建的MZI传感系统进行了90 min的干涉光谱稳定性测试, 测试结果如图7所示。特征干涉波长的偏移量约为±0.025 nm, 接近传统商业光谱仪的最大分辨率(0.02 nm)。受实验条件限制, 对应的温度测量准确度约为±1.5℃, 与恒温箱±1℃的控制精度基本接近。误差主要源于光谱仪分辨率、温控精度、散热风扇振动以及光纤未封装等因素。若改善上述条件, 系统稳定性仍有较大提升空间。

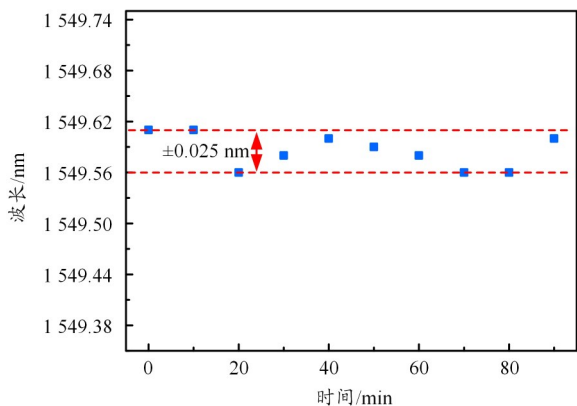


图7 温度传感稳定性测试图

此外, 在实际CPO机箱运行环境中, 热源分布不均、气流扰动等因素可能对FOFC温度传感器的测量性能产生不可忽视的影响。一方面, 机箱内部光电芯片、激光器模块等高发热元件分布不均, 易在局部形成温度梯度, 导致光纤干涉臂产生非均匀热膨胀与折射率变化, 可能引入额外的相位噪声, 影响波长漂移与温度之间的线性映射关系。另一方面, 散热风扇引起的气流扰动不仅会带来机械振动, 还可能造成局部温度波动, 从而对干涉光谱的长期稳定性产生干扰。

上述因素可能是本实验中测量准确度(±1.5℃)略高于恒温箱控制精度(±1℃)的重要原因之一。因此, 在实际部署中, 需结合热仿真优化传感器布放位置, 并对光纤走线进行适当封装, 以抑制环境扰动对传感性能的影响。

3 结束语

随着AI数据中心对基础硬件需求的激增, FOFC作为新型商用产品, 其多功能开发具有现实意义。本文提出了一种基于FOFC的CPO机箱温度传感方案。通过构建非平衡MZI, 模拟机箱整体温变场景, 实验测得该方案的温度灵敏度为13.7~16.2 pm/℃, 测量准确度为±1.5℃。不同光路组合(通道1分别与通道2、3、5、7)所得温度灵敏度分别为13.7、14.7、16.2、15.8 pm/℃, 数值高度一致, 表明方案可行且路径依赖性低。该方案具备解调简易、标定参数通用及易于集成等显著特征, 为高密度数据中心提供了一种兼具低成本与高可靠性的温度监控有效途径。同时, 其波长-温度映射关系良好、标定参数稳定, 适用于大规模联网监控场景, 可为CPO机箱等关键节点的热管理与预警提供潜在技术支持。

参考文献:

- [1] Mukhopadhyay S C, Tyagi S K S, Suryadevara N K, et al. Artificial intelligence-based sensors for next generation IoT applications: a review[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(22): 24920–24932.
- [2] Zang Yaping, Zhang Fengjiao, Di Chongan, et al. Advances of flexible pressure sensors toward artificial intelligence and health care applications[J]. Materials Horizons, 2015, 2(2): 140–156.
- [3] Tan Min, Xu Jiang, Liu Siyang, et al. Co-packaged optics(CPO): status, challenges, and solutions[J]. Frontiers of Optoelectronics, 2023, 16(1): 1.
- [4] Grenier J R, Brusberg L, Wieland K A, et al. Ultrafast laser processing of glass waveguide substrates for multi-fiber connectivity in co-packaged optics[J]. Advanced Optical Technologies, 2023, 12: 1244009.
- [5] Noriki A, Ukita A, Takemura K, et al. Demonstration of silicon-photonics hybrid glass-epoxy substrate for co-packaged optics[J]. Journal of Lightwave Technology, 2023, 41(15): 5078–5083.
- [6] 王珍珍, 王桂奇, 陈国良, 等. 玻璃基共封装光学前沿技术及应用(特邀)[J]. 光学学报, 2026, 46(7): 182–206.
- [7] 杨歆漪. 数据中心机柜微环境测温技术浅析[J]. 测控技术, 2018, 37(2): 63–65, 69.
- [8] Lin Jianpeng, Lin Weiwei, Lin Wenjun, et al. Thermal prediction for air-cooled data center using data driven-based model[J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 217: 119207.
- [9] Liu Qiang, Ma Yujun, Alhussein M, et al. Green data center with IoT sensing and cloud-assisted smart temperature control system[J]. Computer

Networks, 2016, 101: 104–112.

[10] 任芳, 徐婉静, 赖凡, 等. 集成电路温度传感器技术研究进展[J]. 微电子学, 2017, 47(1): 110–113.

[11] Tian Wenchao, Hou Huahua, Dang Haojie, et al. Progress in research on co-packaged optics [J]. Micromachines, 2024, 15(10): 1211.

[12] Dangel R, Horst F, Jubin D, et al. Development of versatile polymer waveguide flex technology for use in optical interconnects[J]. Journal of lightwave technology, 2013, 31(24): 3915–3926.

[13] Jiang Linan, Nishant A, Frish J, et al. SmartPrint single-mode flexible polymer optical interconnect for high density integrated photonics[J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(12): 3839–3844.

[14] Shi Ying, Ma Lin, Kaneta M, et al. High-speed performance evaluation of ultra-flexible polymer waveguides supporting meter-scale optical interconnects [J]. Optics Express, 2022, 30(15): 27236–27248.

[15] Shi Ying, Liu Xu, Ma Lin, et al. Optical printed circuit boards with multimode polymer waveguides and pluggable connectors for high-speed optical interconnects[J]. Optics Express, 2023, 31(17): 27776-1–27776-86.

[16] Jiang Qinchuan, Liang Xifa, Chen Zhenshi, et al. Wearable strain sensor integrating mechanoluminescent fiber with a flexible printed circuit[J]. Optics Letters, 2024, 49(5): 1221–1224.

[17] Wang Runlin, Zhang Haozhe, Liu Qiyu, et al. Operando monitoring of ion activities in aqueous batteries with plasmonic fiber-optic sensors[J]. Nature communications, 2022, 13(1): 547.

[18] Liu Huanhuan, Hu D J J, Sun Qizhen, et al. Specialty optical fibers for advanced sensing applications[J]. Opto-Electronic Science, 2023, 2(2): 220025-1–220025-26.

[19] Guo Jiahao, Wang Wei, Zhang Junying, et al. Fiber cladding waveguide phase-shifted FBG encapsulated in flexible material for estimating human blood pressure[J]. Journal of Lightwave Technology, 2024, 43(7): 3261–3268.

[20] Zhou Jianming, Zhi Yanyan, Zhang Junyi, et al. Enhanced vernier effect in cascaded fiber loop interferometers for improving temperature sensitivity[J]. Sensors, 2024, 25(1): 38.

[21] Wang Rongxuan, Wang Ruixuan, Dou Chaoran, et al. Sub-surface thermal measurement in additive manufacturing via machine learning-enabled high-resolution fiber optic sensing[J]. Nature Communications, 2024, 15(1): 7568.

[22] Wang Jin, Wang Li, Su Xueqiong, et al. Temperature, stress, refractive index and humidity multi parameter highly integrated optical fiber sensor[J]. Optics & Laser Technology, 2022, 152: 108086.

[23] Liu Jingxiao, Li Haipeng, Noh H Y, et al. Urban sensing using existing fiber-optic networks[J]. Nature Communications, 2025, 16(1): 3091.

[24] Zhou Jianming, Wang Guangying, Fan Jinying, et al. Sensitivity-enhanced displacement sensing system based on a microwave photonic filter incorporating a figure-eight loop interferometer[J]. IEEE Sensors Journal, 2025, 25(13): 24115–24121.

[25] Xu Dongsheng, Jiang Lin, Qin Yue, et al. High-precision FBG-based sensor for soil settlement monitoring: a comparative study with magnetic settlement gauges and PIV technique[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2024, 366: 114935.

[26] Wang Haoran, Wu Mengyuan, Xie Tongtong, et al. RI and temperature sensor based on hybrid sensing mechanism of SPR and MZI using a four-core fiber[J]. Measurement, 2024, 226: 114154.

[27] Fu Jiahui, Guan Junneng, Ding Shujia, et al. PMF based sagnac interferometric sensor for simultaneous measurement of strain, temperature, and torsion[J]. Optics Communications, 2024, 573: 130883.

[28] Li Jian, Zhang Mingjiang. Physics and applications of Raman distributed optical fiber sensing[J]. Light: Science & Applications, 2022, 11(1): 128.