

薄膜铌酸锂微环高精度微波光子温度传感器

王慧婕 常祺伟 游亚军 杨绪磊 贺文君 何剑 刘毅 丑修建

High-precision microwave photonic temperature sensor using thin-film lithium niobate micro-ring

WANG Hui-jie, CHANG Qi-wei, YOU Ya-jun, YANG Xu-lei, HE Wen-jun, HE Jian, LIU Yi, CHOU Xiu-jian

引用本文:

王慧婕, 常祺伟, 游亚军, 杨绪磊, 贺文君, 何剑, 刘毅, 丑修建. 薄膜铌酸锂微环高精度微波光子温度传感器[J]. 中国光学, 优先发表. doi: 10.37188/CO.2025-0121

WANG Hui-jie, CHANG Qi-wei, YOU Ya-jun, YANG Xu-lei, HE Wen-jun, HE Jian, LIU Yi, CHOU Xiu-jian. High-precision microwave photonic temperature sensor using thin-film lithium niobate micro-ring[J]. *Chinese Optics*, In press. doi: 10.37188/CO.2025-0121

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2025-0121>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于马赫曾德尔调制器的倍频因子和输出相位可调的微波光子移相器

Microwave photonic RF frequency multiplying phase shifter with tunable multiplication factor and a full 360-deg tunable range
中国光学 (中英文). 2023, 16(4): 948 <https://doi.org/10.37188/CO.EN.2022-0019>

基于荧光强度比的毛细管液芯光纤温度传感器

Capillary liquid-core optical fiber temperature sensor based on fluorescence intensity ratio
中国光学 (中英文). 2024, 17(3): 528 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0160>

基于铰链杠杆结构光纤光栅温度压力传感器

Fiber Bragg grating temperature and pressure sensor based on hinge lever structure
中国光学 (中英文). 2025, 18(1): 63 <https://doi.org/10.37188/CO.2024-0090>

耦合区数量对鼎形微环谐振器输出的影响

The influence of the number of coupling regions on the output of the ding-shaped microring resonator
中国光学 (中英文). 2023, 16(6): 1493 <https://doi.org/10.37188/CO.EN-2023-0009>

光读出高精度惯性传感器残余气体噪声仿真研究

Simulation of residual gas noise in high-precision inertial sensors with optical readout
中国光学 (中英文). 2025, 18(3): 612 <https://doi.org/10.37188/CO.2024-0186>

哈特曼-夏克波前传感器高精度球面波标定方法研究

High-precision spherical wavefront calibration method for shack-hartmann wavefront sensor
中国光学 (中英文). 2024, 17(3): 521 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0148>

文章编号 2097-1842(xxxx)x-0001-09

薄膜铌酸锂微环高精度微波光子温度传感器

王慧婕^{1,3}, 常祺伟^{2,4}, 游亚军^{2,4*}, 杨绪磊^{2,4}, 贺文君^{2,3}, 何剑^{1,3}, 刘毅^{1,3}, 丑修建^{1,2,3}

(1. 极限环境光动态测试技术与仪器全国重点实验室, 山西太原 030051;

2. 铁电物理微纳器件与系统山西省重点实验室, 山西太原 030051;

3. 中北大学仪器与电子学院, 山西太原 030051;

4. 中北大学航空宇航学院, 山西太原 030051)

摘要:为实现高精度温度传感, 本文提出了一种基于高品质因子薄膜铌酸锂微环谐振器与微波光子读取技术的温度传感器。该系统中, 薄膜铌酸锂微环谐振器(线宽为 2.87 pm, Q 值高达 10^6)同时作为温度感知单元和微波光子滤波器的核心处理部件, 利用热光效应将温度变化转换为光学谐振波长偏移, 并创新性地借助微波光子技术将其线性映射为微波通带频率变化, 采用矢量网络分析仪对微波频率响应进行精确探测, 通过高精度频率响应变化实现温度测量, 最终建立了温度与频率偏移量之间的定量关系模型。与传统直接检测光学波长变化的方法相比, 微波光子学读取技术通过将微小的光学谐振波长偏移量线性地转换为微波通带中心频率的变化, 突破了光谱仪固有的波长检测分辨率限制。实验结果表明, 传感器灵敏度达 27 MHz/°C, 分辨率可达 0.002 °C, 在 0.01 °C 实验温度变化条件下, 保持良好的线性响应。本研究有效解决了传统光学测温中灵敏度与分辨率之间的权衡问题, 为片上集成高精度温度传感提供了新方案。

关键词:微环谐振器; 温度传感; 薄膜铌酸锂; 微波光子

中图分类号: TN252; 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2025-0121 CSTR: 32171.14.CO.2025-0121

High-precision microwave photonic temperature sensor using thin-film lithium niobate micro-ring

WANG Hui-jie^{1,3}, CHANG Qi-wei^{2,4}, YOU Ya-jun^{2,4*}, YANG Xu-lei^{2,4}, HE Wen-jun^{2,3}, HE Jian^{1,3},

LIU Yi^{1,3}, CHOU Xiu-jian^{1,2,3}

(1. State key Laboratory of Extreme Environment Optoelectronic Dynamic Measurement Technology and Instrument, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Shanxi Key Laboratory of Ferroelectric Physical Micro-nano Devices and Systems, Taiyuan 030051, China;

3. School of Instrument and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, China;

4. School of Aerospace Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

* Corresponding author, E-mail: yajunyou@nuc.edu.cn

Abstract: This paper presents a high-precision temperature sensor based on a high-quality factor thin-film

收稿日期: 2025-09-18; 修订日期: xxxx-xx-xx

基金项目: 国家自然科学基金(No. U23A20639, No. U2341210, No. 62401524, No. 62371426); 广东省基础与应用基础研究基金委员会(No. 2023A1515110148)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. U23A20639, No. U2341210, No. 62401524, No. 62371426); Basic and Applied Basic Research Foundation of Guangdong Province (No. 2023A1515110148)

lithium niobate microring resonator integrated with a microwave photonic readout system. The microring resonator, with a narrow linewidth of 2.87 pm and a high Q-factor of 10^5 , functions simultaneously as the temperature-sensing element and the core signal processing component of a microwave photonic filter. Through the thermo-optic effect, temperature variations are converted into shifts in the optical resonance wavelength, which are innovatively mapped to linear changes in the passband center frequency of the microwave photonic filter. A vector network analyzer is employed to accurately detect the microwave frequency response, enabling temperature measurement via high-resolution frequency variations and establishing a quantitative model between temperature and frequency shift. In contrast to conventional methods that directly track optical wavelength shifts, the proposed microwave photonic readout technique linearly converts minute resonance wavelength shifts into changes in the microwave center frequency, thereby overcoming the resolution limitations inherent in conventional optical spectrum analyzers. Experimental results demonstrate a sensitivity of 27 MHz/°C and a resolution of 0.002 °C, with excellent linearity maintained under temperature variations as small as 0.01 °C. This work effectively resolves the trade-off between sensitivity and resolution in traditional optical temperature sensing, offering a novel solution for on-chip integrated high-precision temperature monitoring.

Key words: micro-ring resonator; temperature sensor; thin film lithium niobate; microwave photons

1 引言

温度作为现代工业流程、生物医学应用以及集成电路热管理中的关键参数^[1-2],其高精度实时监测对系统性能与可靠性至关重要。传统电子传感器(如铂电阻)受限于电磁干扰敏感、空间分辨率不足和集成难度大等问题,难以满足先进小型化芯片系统测试的严苛需求^[3-6]。因此,研发微结构温度传感器以满足亚微米级检测需求变得尤为迫切。近年来,硅光子学凭借其 CMOS 的兼容性、高集成度以及低成本大批量制造等优势,逐渐发展成为片上光学温度检测的重要平台^[7-13]。作为该平台中关键功能组件,微环谐振器因其具备超高品质因数、亚波长尺度的紧凑结构和强光场局域能力,在高灵敏度光子型温度传感方面展现出显著的潜力^[14-16]。

在发挥微环谐振器上述测温潜力的过程中,波长检测法是解调温度信号的主要技术手段。早期研究主要集中在硅环谐振器^[17]、微光纤线圈谐振器^[18]、微光纤结谐振器^[19]等基本结构,后续创新则逐步拓展至先进结构与新型材料系统。Kim 等人^[20]基于级联维尼尔效应微环实现了 293.9 pm/°C 的灵敏度和 0.18 °C 的温度分辨率,Shi 等人^[21]进一步将灵敏度提升至 303.6 pm/°C。

Biswas 等人^[22]则利用光子晶体微环谐振器获得 3.4 nm/°C 的高灵敏度,但其分辨率未明确报道。在提高分辨率方面,Yang 等人^[23]通过铌酸锂谐振器与棱镜集成,实现了 5.6×10^{-4} °C 的高分辨率,但灵敏度仅为 34.38 pm/°C。上述研究表明,灵敏度与分辨率之间存在固有的权衡关系。具体而言,高灵敏度的配置(如级联环^[20-21]、光子晶体^[22])往往伴随着分辨率下降,系统稳定性降低、制造复杂性和成本增加等问题;而高分辨率方案则受限于本征灵敏度不足,且最终性能受光谱分析仪的波长分辨率制约,难以同时兼顾两方面性能。

针对上述灵敏度与分辨率间的固有矛盾及光谱仪精度限制,本研究提出一种薄膜铌酸锂微环高精度微波光子温度传感器,将纳米级光学波长变化转换为易于高精度测量的微波频率变化,从而突破传统光学测温的分辨率瓶颈。并且基于铌酸锂显著的热光系数与低损耗特性^[24],传感器灵敏度得到进一步提高。实验表明,在实验温度范围内,该传感器表现出良好的线性响应,通过微波光子读取实现了 27 MHz/°C 的灵敏度和 0.002 °C 的高分辨率。该传感器兼具高灵敏度、高分辨率和良好集成性,适用于电磁干扰强、空间受限的芯片级原位分布式温度监测,具有重要的科学研究与工程应用价值。

2 基本原理

本研究所提出的温度传感器以薄膜铌酸锂微环谐振器作为核心转换元件, 其结构示意图如图 1 所示。图 1(a) 为该器件的三维示意图, 主要包括一条总线波导和一个跑道型微环谐振器, 二者通过 500 nm 的耦合间隙实现倏逝波耦合, 微环弯曲半径为 100 μm 。图 1(b) 展示了耦合区域的局部放大视图, 清晰显示出波导间的高度几何对准和光滑侧壁形貌。从横截面透射电镜图像 (图 1(c)) 可清晰看出多层波导结构, 从下至上依次为 525 μm 硅衬底、2 μm 氧化硅下包层、600 nm z 切铌酸锂薄膜核心层以及 2 μm 二氧化硅上包层, 其中铌酸锂层采用部分刻蚀脊型波导结构。具体加工该铌酸锂微环谐振器的工艺如下所述: 通过微纳加工工艺, 将其加工成刻蚀深度为 300 nm 的跑道型微环谐振器, 工艺流程如图 2 所示。首先是基片清洗, 通过丙酮、异丙醇的有机清洗与标准的 RCA 化学清洗, 辅以氧等离子体活化, 旨在彻底去除表面污染物并显著增强光刻胶附着力, 为后续工艺奠定原子级洁净的界面基础。随后进入匀胶与前烘阶段, 通过旋转涂布在基片上形成均匀且厚度可控的电子束光刻胶层, 并在热板上进行前烘以彻底去除溶剂, 使光刻胶固化定型并获得必要的机械稳定性。

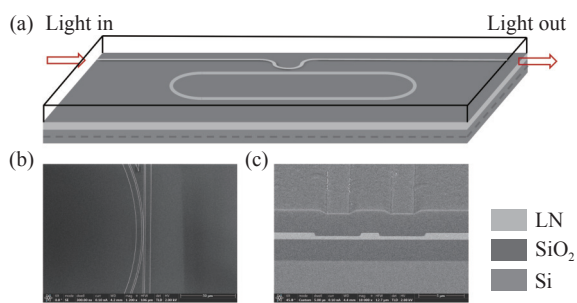


图 1 结构示意图。(a) 微环谐振器的三维示意图; (b) 耦合区域的扫描电子显微镜显微图像; (c) 显示硅/二氧化硅/铌酸锂 (Si/SiO₂/LN) 异质界面的横截面透射电镜显微图像

Fig. 1 Schematic diagram of the structure. (a) 3D schematic of the micro-ring resonator; (b) SEM micrograph of the coupling region; (c) Cross-sectional SEM image revealing Si/SiO₂/LN heterointerfaces

下一步核心工序是电子束曝光, 通过高能电子束直写技术, 将设计好的包含亚微米级耦合间

隙的跑道型微环谐振器图形精确地转移到光刻胶上, 此过程中曝光剂量的精准优化是保证关键尺寸、特别是狭窄耦合间隙得以完美复现的决定性因素。曝光后的基片需经过显影与定影处理, 利用特定显影液选择性溶解曝光区域的光刻胶, 从而暴露出下方待刻蚀的铌酸锂区域, 并通过异丙醇漂洗和氮气吹干以终止反应并获得清晰无误的胶形貌。

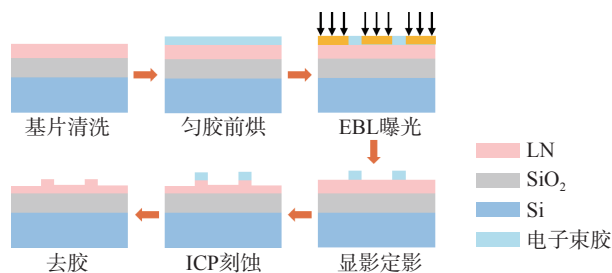


图 2 加工流程示意图

Fig. 2 Processing flowchart

之后是较为困难的 ICP 刻蚀步骤, 以光刻胶为掩模, 在优化的 Ar/Cl₂ 等气体氛围中, 通过精确调控感应耦合等离子体功率与射频偏压功率的平衡, 实现以物理轰击与化学反应相结合的方式, 对各向异性要求极高的铌酸锂进行刻蚀, 并利用激光干涉终点检测系统实时监控, 确保 300 nm 刻蚀深度被精准控制的同时, 获得侧壁陡直、光滑的波导结构, 这对于降低光散射损耗、提升微环谐振器的品质因子至关重要。最终, 通过丙酮湿法去胶与氧等离子体灰化相结合的步骤, 彻底去除残留的光刻胶及其他有机污染物, 完成整个加工流程, 得到表面洁净、结构完整的薄膜铌酸锂微环谐振器器件。

光输入沿总线波导传播, 在相互作用区域通过倏逝波耦合将部分功率传输至微环。经过一圈循环往返后, 环内场与总线波导场之间的干涉在相位匹配波长处产生谐振增强。随后达到耦合平衡, 将谐振波长限制在循环传播中, 而非谐振光则通过直通端口射出。在该结构中, 微环的基本相位匹配谐振方程为^[25]:

$$n_{\text{eff}}L = m\lambda \quad (1)$$

其中, m 为阶数, L 表示环周长, n_{eff} 为有效折射率, λ 为谐振波长。

环境扰动通过倏逝场相互作用调节微环的有效折射率 n_{eff} 和周长 L , 使谐振波长 λ 发生光谱位

移。这种转换机制将外部刺激转化为可量化的 λ 漂移。在测温应用中,热膨胀会改变 L ,而热光效应则主导 n_{eff} 的变化,两者共同作用导致与温度相关的 λ 偏移。温度引起的谐振波长总偏移量 $\Delta\lambda$ 由热光效应 ($\Delta\lambda_T$) 和热膨胀效应 ($\Delta\lambda_L$) 共同诱导^[26],

$$\Delta\lambda = \Delta\lambda_L + \Delta\lambda_T = \alpha_w \frac{n_{\text{eff}}}{n_g} \lambda \Delta T + \frac{\sigma_T}{n_g} \lambda \Delta T \quad , \quad (2)$$

其中, n_{eff} 表示环形波导的有效折射率, n_g 表示环形波导的群折射率, ΔT 代表温度变化量, α_w 为热膨胀系数,而 σ_T (定义为 $\sigma_T \equiv \partial n_{\text{eff}} / \partial T$) 对应热光系数。薄膜铌酸锂波导作为微环谐振器的核心材料,在通信波段展现出 $1.6 \times 10^{-5} / \text{K}$ 的热光系数和 $2 \times 10^{-6} / \text{K}$ 的热膨胀系数^[27-28]。由于薄膜铌酸锂的热膨胀可忽略不计,与折射率变化相比,温度引起的波导长度变化可忽略。因此,薄膜铌酸锂微环的温度响应主要由折射率调制主导。

图 3 展示了所提出的采用微波光子分析技术的薄膜铌酸锂微环谐振温度传感器的实验装置。在实验室环境中,采用温度控制器 (SenseFuture TEC103) 为薄膜铌酸锂微环谐振器模拟环境温度

波动,该控制器的控制稳定性为 $\pm 10 \text{ mK}$; 双光开关架构能够将光路切换至并行的光谱分析和微波光子处理分支。在光谱表征方面,放大自发辐射 (ASE) 产生的宽带光源通过倏逝耦合激发薄膜铌酸锂微环谐振器中的谐振模式,输出的透射光谱由光谱分析仪 (OSA, 中电科思仪 6362D) 监测,在温度升高过程中可观察到谐振谷逐渐红移 (图 3(c))。当光开关接入 1550 nm 激光源 (ID Photonics Cobrite) 时,微波光子频率响应分析启动。激光输出经过光隔离器以抑制回波,随后通过偏振控制器 1 进行偏振优化。如图 3(e) 所示,在电压源驱动下进行后续的频率调制,经偏振控制器 2 进一步优化偏振后,进入掺铒光纤放大器 (EDFA, Keopsys CEFA-C)。经上述处理的光信号经由光电探测器 (PD, Finisar XPDV2120R) 转换得到的电信号,通过矢量网络分析仪 (VNA, KEYSIGHT E5071C) 进行频率响应表征 (图 3(f))。至关重要的是,温度升高会导致微波分析中的谐振频率下移 (图 3(g)),这与光谱观测到的红移趋势一致,从定量角度验证了双域传感的相关性。

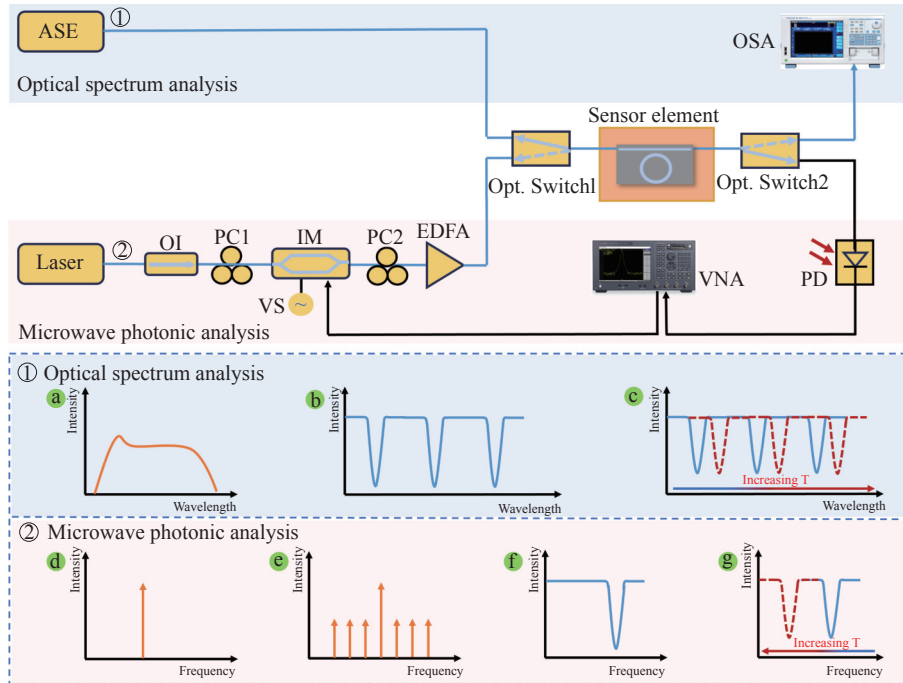


图 3 温度传感系统示意图及工作原理。(ASE: 放大自发辐射; OI: 光隔离器; PC: 偏振控制器; IM: 强度调制器; VS: 电压源; EDFA: 掺铒光纤放大器; Opt. Switch: 光开关; PD: 光电探测器; VNA: 矢量网络分析仪; OSA: 光谱分析仪)

Fig. 3 Schematic of the temperature sensing system and operational principle. (ASE: amplified spontaneous emission; OI: optical isolator; PC: polarization controller; IM: intensity modulator; VS: Voltage source; EDFA: Erbium-doped Optical Fiber Amplifier; Opt. Switch: optical switch; PD: photodetector; VNA: vector net analyzer; OSA: optical spectrum analyzer)

3 分析与讨论

图 4 系统性地表征了所提出的基于铌酸锂微环谐振器的温度传感器在光学频域的响应特性与传感机制。图 4(a) 为室温下测得的透射光谱, 其自由光谱范围(Free Spectral Range, FSR)为 0.072 nm, 实验中选取第一个谐振谷作为温度感测单元进行后续分析。该谐振谷的线宽经测定为 2.87 pm(图 4(c)), 对应品质因子(Q 值)约 5.4×10^5 , 表现出良好的光学性能^[29], 为高灵敏度传感奠定了基础。随温度从 25 °C 升至 31 °C 过程中, 图 4(a) 选定的谐振谷发生显著连续红移, 其中心波长从 1549.984 nm 偏移至 1550.728 nm,

总漂移量为 0.744 nm, 如图 4(b) 所示。通过线性拟合建立波长(λ)与温度(T)的关系如图 4(d) 所示, 拟合函数为 $\lambda = 0.12T + 1546.8855$, 其斜率明确表征传感器的光谱灵敏度为 0.12 nm/°C, 与 6 °C 温升下的平均漂移速率(0.744 nm / 6 °C \approx 0.124 nm/°C)高度一致, 显示出良好的线性响应。依据检测极限为谐振线宽的 1/10 原则^[30], 则该传感器理论温度分辨率为 0.002 °C。然而, 受限于所用光谱分析仪 0.02 nm 的波长分辨率, 实际温度分辨率仅为 0.16 °C。为突破该限制, 本研究引入微波光子读取技术, 将光学波长偏移线性映射至微波频率域, 利用高精度微波测量手段显著提升系统探测精度。

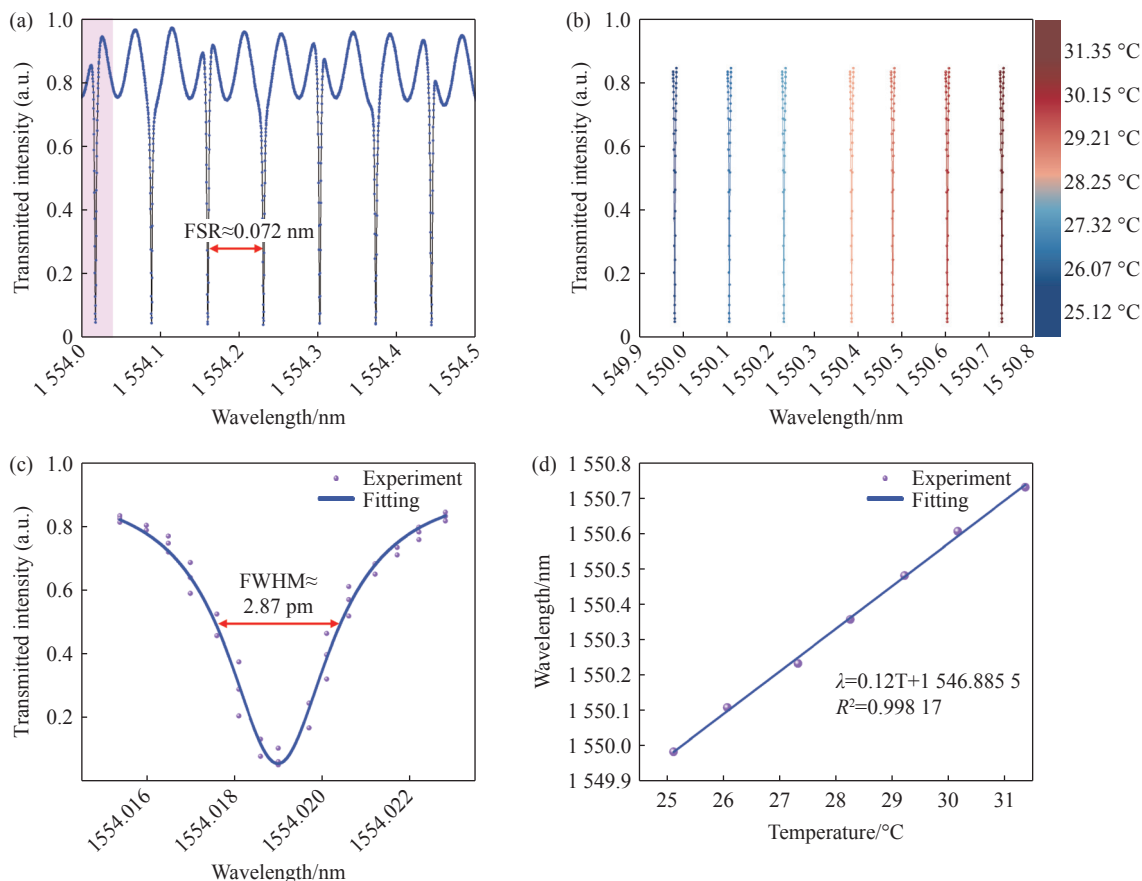


图 4 波长检测法。(a)微环谐振器透射光谱;(b)25 °C 至 31 °C 温度调制下的谐振波长漂移;(c)微环谐振器线宽表征;(d)温度-波长的线性相关性及其拟合函数

Fig. 4 Wavelength detection method. (a) Transmission spectrum of a micro-ring resonator; (b) Resonant wavelength drift under thermal modulation from 25 °C to 31 °C; (c) Full width at half maximum of the micro-ring resonator; (d) Linear temperature-wavelength correlation with fitting function

图 5 系统展示了采用微波光子技术解调温度信号的全过程。图 5(a) 为微环谐振器在频率域

下的谐振响应, 选取第一个谐振谷作为后续温度感测单元, 随着温度从 18.93 °C 升高至 34.56 °C,

谐振频率呈现出显著的规律性偏移,从初始温度下的 5.38 GHz 逐渐漂移至 5.02 GHz。这一现象源于铈酸锂材料的热光效应,温度升高引起材料折射率随温度发生显著变化。铈酸锂热光系数为正值,温度升高时折射率增大,导致谐振频率随温度升高向低频方向移动。为了进一步量化频率与温度之间的数量关系,图 5(c)通过数据拟合与统计分析,得出二者呈现出良好的线性关系,其函数表达式为 $f = -0.027T + 5.915$,其中斜率的绝对值 $0.027 \text{ GHz}/^\circ\text{C}$,即 $27 \text{ MHz}/^\circ\text{C}$,为该传感器在微波光子探测模式下的灵敏度,反映出传感器对温度变化的高响应能力。同时,拟合结果显示出较高的预测精度,其 95% 置信区间和预测区间均表明模型与实测数据吻合良好。为进一步验证传感器在微小温度变化下的响应能力,在 25°C 至 25.06°C 的范围内以 0.01°C 为步长进行实验。如图 5(d)所示,温度变化与频率偏移仍保持优良

线性,线性拟合相关系数 R^2 为 0.93972 ,斜率为 $-24.3 \text{ MHz}/^\circ\text{C}$,即温度变化 0.01°C 时,频率漂移 243 kHz ,与前文得到的灵敏度 $27 \text{ MHz}/^\circ\text{C}$ 高度相符。关于相关性系数需要说明的是,在实验温度范围内,薄膜铈酸锂波导本身的有效折射率随温度的变化可能显现出轻微的非线性特性^[31];其次,测试过程环境的微小波动会引入额外的噪声,以及温度控制精度与测量系统的微小漂移可能在长时间宽温区测试中累积形成系统误差,故影响了线性度的优异性。在分辨率方面,基于公式 $\Delta T = \Delta f/S$,计算出矢量网络分析仪可以分辨的温度高达 $5.5 \times 10^{-6}^\circ\text{C}$,其中矢量网络分析仪的频率分辨率 Δf 由中频带宽决定,本实验中设置为 150 Hz , S 为 $27 \text{ MHz}/^\circ\text{C}$,显著优于传统光谱检测方法,突显了微波光子读取技术在提升微环传感器分辨率方面的巨大优势。

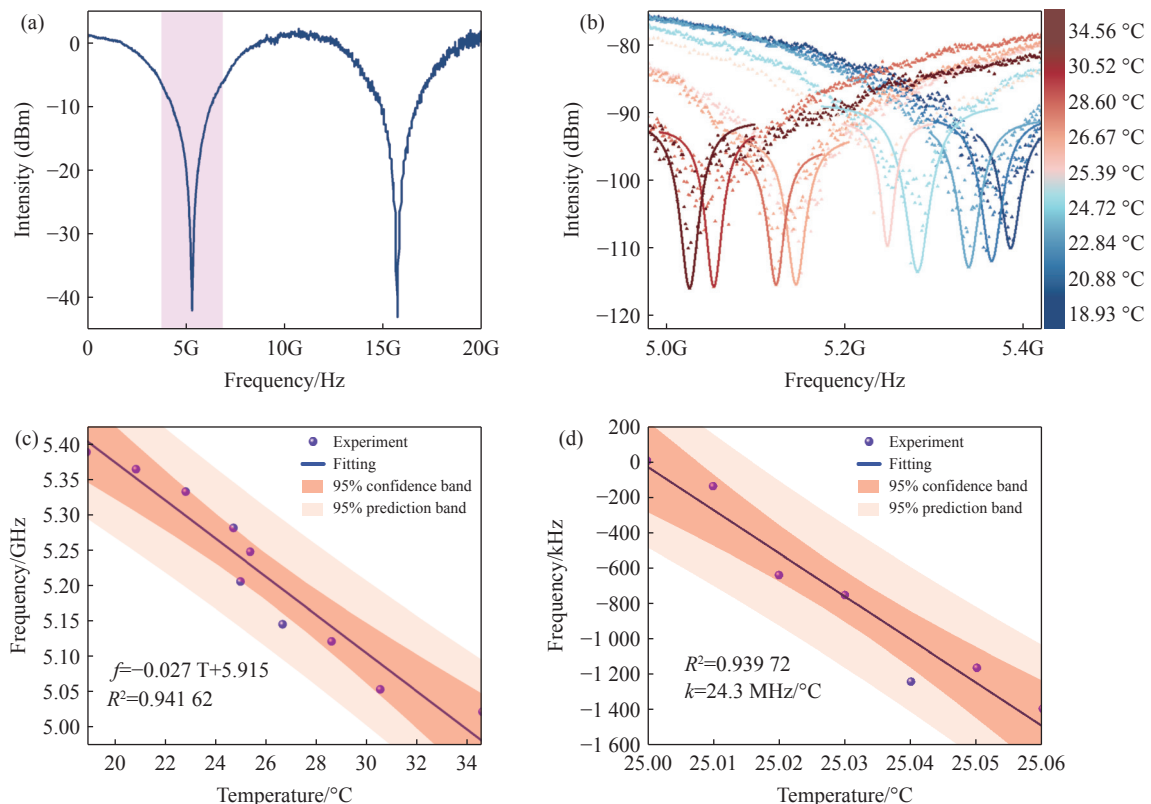


图 5 频移检测法。(a) 0-20 GHz 范围内的谐振谱;(b) 18 °C 至 34 °C 温度调制下的谐振频率偏移;(c) 变化 1 °C 温度-频率的线性相关性及其拟合函数;(d) 变化 0.01 °C 温度-频率的线性相关性及其拟合函数

Fig. 5 Frequency shift detection method. (a) Resonant response over the 0-20 GHz range; (b) Resonant frequency drift under thermal modulation from 18 °C to 34 °C; (c) Linear temperature-frequency relationship (per 1 °C) and fitting function; (d) Linear temperature-frequency relationship (per 0.01 °C) and fitting function

在 25°C 时对传感器每隔 5 分钟进行了持续

1 小时的监测,如图 6 所示,由数据可以看出其频

率的波动范围为 ± 69 kHz。相对于平均频率值波动比率为 1.32×10^{-5} , 这一结果证明, 传感系统在小时量级上具备了优异的读数稳定性, 其本征漂移小, 为实际应用提供了有力支撑。

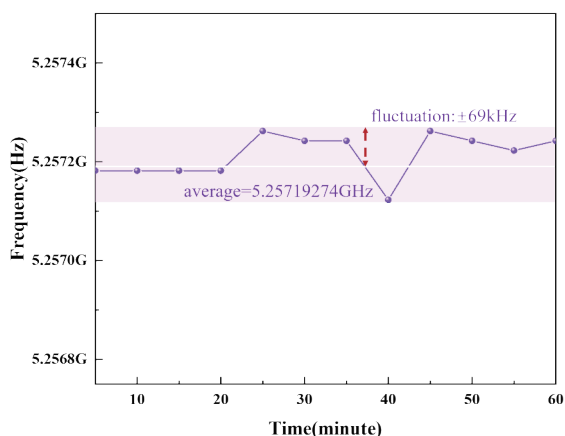


图 6 稳定性测试

Fig. 6 Stability testing

图 7 对比展示了传统光谱检测法与微波光子频率检测法的基本原理。传统方法基于微环谐振器的热光效应, 通过光谱分析仪监测谐振谷波长随温度的漂移, 并建立波长偏移与温度的线性关系。然而, 该方法的测量精度受限于光学衍射极限及光谱仪机械稳定性, 例如本实验所用光谱仪分辨率仅为 20 pm, 难以探测低于该限的微小波长变化。相比之下, 微波光子技术通过光-微波域转换, 将光学波长偏移线性映射为微波频率变化, 巧妙规避了光学衍射极限的限制。结合高精度矢量网络分析仪(频率分辨率达 150 Hz)及微波信号处理技术, 显著提升了系统的整体探测精度。

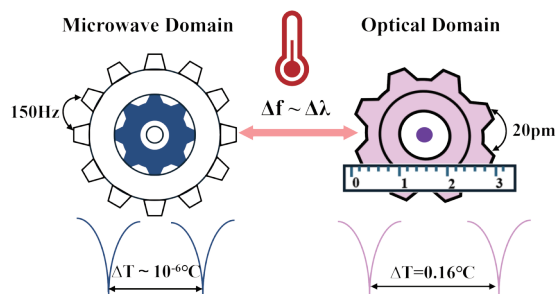


图 7 光-微波域转换示意图

Fig. 7 Optical-to-Microwave domain conversion diagram

表 1 将所提出的高精度薄膜铌酸锂微环谐振温度传感器与其他温度传感器在灵敏度和分辨率方面进行了基本对比。分析表明, 传统光学谐振式温度传感器普遍面临灵敏度与分辨率之间的固

有权衡问题, 高灵敏度设计往往伴随分辨率的显著劣化, 而高分辨率方案则受限于本征灵敏度不足。针对此问题, 本文创新性地提出了光-微波跨域转换方法, 首先利用铌酸锂优异的热光效应获取温度响应, 再通过微波光子技术将信号转换至微波域进行高精度解调。相较于二氧化硅, 铌酸锂的高热光系数显著降低了对器件 Q 值的苛刻要求, 使得基于该材料的温度传感器在实现高分辨率探测的同时, 降低了高 Q 值微腔制备难度^[30]。该方法巧妙规避了光学衍射极限对温度传感分辨率的制约, 实现了传感灵敏度和分辨率的协同提升, 灵敏度可达 27 MHz/°C, 分辨率可达 0.002 °C。

表 1 各类温度传感器的性能对比

Tab. 1 Performance comparison of various temperature sensors

温度传感器	灵敏度	分辨率
本文 ★	27 MHz/°C	0.002 °C
超细纤维结谐振器 [19]	22.81 pm/°C	0.877 °C
级联微环谐振器 [20]	293.9 pm/°C	0.18 °C
封装铌酸锂谐振器 [23]	34.38 pm/°C	5.6×10^{-4} °C
基于光电振荡器的应变不敏感温度传感器 [32]	1 MHz/°C	0.5 °C
多波长布里渊光纤激光器温度传感器 [33]	13.08 MHz/°C	0.765 °C
基于光电振荡器的片上传感 [34]	7.7 GHz/°C	0.02 °C

4 结论

本文设计并实验验证了一种基于薄膜铌酸锂微环谐振器与微波光子频率响应分析的高精度温度传感器。该传感器利用铌酸锂显著的热光效应, 将温度变化转化为谐振波长与频率的偏移, 并创新性地通过光-微波域转换机制, 将光学信号映射到微波频率域进行检测, 有效突破了传统波长检测方法中的分辨率限制。实验结果表明, 该传感器灵敏度达到 27 MHz/°C, 分辨率优于 0.002 °C, 在实现高响应的同时保持了优异的线性特征与稳定性。该研究为片上集成温度传感提供了一种兼具高灵敏度与高分辨率的可靠解决方案, 在生物医学监测、精密制造、量子信息处理及集成电路热管理等对温度敏感的关键领域具有重要的应用潜力。

参考文献:

- [1] 钟宇, 张瑜, 康秀芝, 等. 单胺类神经递质电化学传感器的研究进展[J]. *分析化学*, 2025, 53(9): 1411-1421.
ZHONG Y, ZHANG Y, KANG X ZH, *et al.*. Research progress on electrochemical sensors for monoamine neurotransmitters[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2025, 53(9): 1411-1421. (in Chinese).
- [2] 刘兰财, 宋巨华, 王涛, 等. 可穿戴电化学汗液传感器的研究进展及其在运动监测中的应用[J]. *分析化学*, 2024, 52(6): 751-762.
LIU L C, SONG J H, WANG T, *et al.*. Research progress of wearable electrochemical sweat sensors and their application in sport monitoring[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2024, 52(6): 751-762. (in Chinese).
- [3] 刘强, 马超, 魏淑辉, 等. 基于铰链杠杆结构光纤光栅温度压力传感器[J]. *中国光学*, 2025, 18(1): 63-69.
LIU Q, MA CH, WEI SH H, *et al.*. Fiber Bragg grating temperature and pressure sensor based on hinge lever structure[J]. *Chinese Optics*, 2025, 18(1): 63-69.
- [4] 钟华秀. NTC 温度传感器设计研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2025.
ZHONG H X. *Study on NTC temperature sensor design*[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2025. (in Chinese).
- [5] WANG T, ZHANG P P, LIU SH Q, *et al.*. A Bi-CP-based solid-state thin-film sensor: preparation and luminescence sensing for bioamine vapors[J]. *Chinese Journal of Inorganic Chemistry*, 2024, 40(8): 1615-1621.
- [6] 曹琳安, 马登岳, 徐刚. 电子导电金属有机框架电化学传感器的研究进展[J]. *无机化学学报*, 2025, 41(10): 1953-1972.
CAO L A, MA D Y, XU G. Research advances in electrically conductive metal-organic frameworks-based electrochemical sensors[J]. *Chinese Journal of Inorganic Chemistry*, 2025, 41(10): 1953-1972. (in Chinese).
- [7] CHEN L Y, CHEN Y J, WU D S, *et al.*. High-sensitivity silicon nitride optical temperature sensor based on cascaded Mach-Zehnder interferometers[J]. *Optical Materials*, 2025, 165: 117139.
- [8] VERMA Y K, KUMARI S, TRIPATHI S M. Grating assisted temperature insensitive micro-ring resonator biosensor[J]. *Journal of Optics*, 2023, 25(12): 125801.
- [9] 后林军, 冯松, 欧阳杰, 等. 硅基微环谐振器研究进展[J]. *光通信研究*, 2024(6): 230084.
HOU L J, FENG S, OU Y J, *et al.*. Research progress of silicon based micro ring resonators[J]. *Study on Optical Communications*, 2024(6): 230084. (in Chinese).
- [10] 王艺蒙, 舒浩文, 韩秀友. 高精度硅基集成光学温度传感器研究[J]. *中国光学*, 2021, 14(6): 1355-1361.
WANG Y M, SHU H W, HAN X Y. High-precision silicon-based integrated optical temperature sensor[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(6): 1355-1361. (in Chinese).
- [11] SONG J, SUN S M, JIANG CH, *et al.*. Ultra-sensitive temperature and pressure sensor based on PDMS-based FPI and Vernier effect[J]. *Optics Letters*, 2023, 48(7): 1674-1677.
- [12] SUN A K, LIU Y J, LI J, *et al.*. Room-temperature high-performance hydrogen gas sensor based on Pd-doped MoO₃/Si heterojunction[J]. *Ceramics International*, 2025, 51(29): 59975-59982.
- [13] HASHEMITAHERI M, EBRAHIMI E, DE SILVA G, *et al.*. Optical sensor for BTEX detection: integrating machine learning for enhanced sensing[J]. *Advanced Sensor and Energy Materials*, 2024, 3(3): 100114.
- [14] WANG J Q, ZHANG H, CHEN S, *et al.*. A silicon microring resonator for refractive index carbon dioxide gas sensing[J]. *ACS Sensors*, 2025, 10(7): 4938-4944.
- [15] LIANG H W, ZHAO Y N, SUN Y, *et al.*. Simultaneous measurement of salinity and temperature based on ring-shaped microfiber resonator[J]. *Optical Fiber Technology*, 2025, 94: 104357.
- [16] LI X L, LI H Q, XIE F L, *et al.*. Characterization of photonic temperature sensors by comparative human body measurements using waveguide Bragg grating and microring resonator-based sensors[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2025, 25(9): 15005-15012.
- [17] OU X P, TANG B, ZHANG P, *et al.*. Microring resonator based on polarization multiplexing for simultaneous sensing of refractive index and temperature on silicon platform[J]. *Optics Express*, 2022, 30(14): 25627-25637.
- [18] CHEN G Y, BRAMBILLA G, NEWSON T P. Inspection of electrical wires for insulation faults and current surges using sliding temperature sensor based on optical Microfibre coil resonator[J]. *Electronics Letters*, 2013, 49(1): 46-47.
- [19] YANG H J, WANG SH SH, WANG X, *et al.*. Temperature sensing in seawater based on microfiber knot resonator[J].

- Sensors*, 2014, 14(10): 18515-18525.
- [20] KIM H T, YU M. Cascaded ring resonator-based temperature sensor with simultaneously enhanced sensitivity and range[J]. *Optics Express*, 2016, 24(9): 9501-9510.
- [21] BISWAS U, RAKSHIT J K, DAS J, *et al.*. Design of an ultra-compact and highly-sensitive temperature sensor using photonic crystal based single micro-ring resonator and cascaded micro-ring resonator[J]. *Silicon*, 2021, 13(3): 885-892.
- [22] SHI Y Y, CHENG L, YI Y F, *et al.*. High-sensitivity on-chip temperature sensor based on cascaded microring resonators[J]. *Open Physics*, 2023, 21(1): 20230138.
- [23] YANG L, ZHUANG Y Y, ZHANG Y F, *et al.*. Robustly packaged lithium niobate resonator-based temperature sensor[J]. *Journal of Optics*, 2024, 26(12): 125403.
- [24] HU J K, WU J Y, JIN D, *et al.*. Thermo-optic response and optical bistability of integrated high-index doped silica ring resonators[J]. *Sensors*, 2023, 23(24): 9767.
- [25] 张杨博文. 用于 FMCW 激光雷达的环形谐振器波长可调谐特性研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2024.
ZHANG Y B W. *Study on wavelength tunable characteristics of ring resonator for FMCW LiDAR*[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2024. (in Chinese).
- [26] DUMON P. *Ultra-compact integrated optical filters in silicon-on-insulator by means of wafer-scale technology*[D]. Ghent: Universiteit Gent, 2007.
- [27] BAVIKADI S R, PASUNOOTI M, ETHIRAJ R, *et al.*. Thermo optic and thermo polarizability coefficients of lithium rich LiNbO₃ by the point dipole approximation[J]. *International Journal of Current Engineering and Technology*, 2016, 6(1): 112-116.
- [28] MORETTI L, IODICE M, CORTE F G D, *et al.*. Temperature dependence of the thermo-optic coefficient of lithium niobate, from 300 to 515 K in the visible and infrared regions[J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, 98(3): 036101.
- [29] 吴蓉, 张皓辰. 耦合区数量对鼎形微环谐振器输出的影响 (英文)[J]. 中国光学 (中英文), 2023, 16(6): 1493-1500.
WU R, ZHANG H CH. The influence of the number of coupling regions on the output of the ding-shaped microring resonator[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(6): 1493-1500. (查阅网上资料, 本条文献为英文文献, 请确认).
- [30] LIAO J, YANG L. Optical whispering-gallery mode barcodes for high-precision and wide-range temperature measurements[J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10(1): 32.
- [31] SMITH D S, RICCIUS H D, EDWIN R P. Refractive indices of lithium niobate[J]. *Optics Communications*, 1976, 17(3): 332-335.
- [32] FENG D Q, KAI L, ZHU T, *et al.*. High-precision strain-insensitive temperature sensor based on an optoelectronic oscillator[J]. *Optics Express*, 2019, 27(26): 37532-37540.
- [33] XU R H, ZHANG X P. Multiwavelength Brillouin-erbium fiber laser temperature sensor with tunable and high sensitivity[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(3): 1501708.
- [34] CHEW S X, YI X K, YANG W J, *et al.*. Optoelectronic oscillator based sensor using an on-chip sensing probe[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(2): 5500809.

作者简介:



游亚军(1990—), 男, 山西晋中人, 博士, 副教授, 2019年于西北工业大学获得博士学位, 主要从事智能材料多场耦合响应机理、智能微纳结构与传感器件、铁电材料与光电子器件、微纳制造技术等方面研究。E-mail: yajunyou@nuc.edu.cn



刘毅(1984—), 男, 山西长治人, 博士, 教授, 2014年于天津大学获得博士学位, 主要从事铁电声光器件与系统、太赫兹信号产生/光谱测试、光纤激光器/传感器方面的研究。E-mail: liuyi_bs@nuc.edu.cn