

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2026.02.10

基于模式间距匹配的微腔宽谱温度测量方法

陈颖聪¹, 蔡静^{1*}, 叶茜¹, 常海涛¹, 费凡²

(1. 中国航空工业集团北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095;

2. 南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 针对传统微环谐振器测温方法依赖单一谐振峰跟踪, 导致测量范围受自由光谱范围限制的问题, 提出一种基于横电/横磁(Transverse Electric/Transverse Magnetic, TE/TM)模式间距匹配的微腔宽谱温度测量方法。构建由宽调谐激光器、氮化硅微环谐振器、法布里-珀罗干涉仪及水蒸气吸收参考单元组成的测温系统, 采用相对波长标度校准与绝对波长锚定相结合的两级校准策略, 提取谐振峰中心波长并建立模式间距标准库, 实现温度反演。实验结果表明: 在 $-10 \sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下, 模式间距与温度呈良好线性关系, 决定系数为0.998; 测得横电单模温度灵敏度为 18.356 pm/K , 横磁单模温度灵敏度为 17.283 pm/K ; 传统单谐振峰跟踪法的测温误差为 $\pm 0.05\text{ K}$, 而基于模式间距匹配的微腔宽谱温度测量方法的测温误差为 $\pm 0.035\text{ K}$, 在提高测量精度的同时拓宽了测量范围, 且提升了系统的鲁棒性和响应效率, 为微腔光子温度测量的工程应用提供了重要参考。

关键词: 回音壁模式微腔; 微环谐振器; 模式间距匹配; 宽调谐激光器; 波长校准; 光子温度; 宽谱测量; 温度传感

中图分类号: TB94; TH811; O43

文献标志码: A

文章编号: 1674-5795 (2026) 02-0120-10

Broadband temperature measurement method for microcavities based on mode spacing matching

CHEN Yincong¹, CAI Jing^{1*}, YE Xi¹, CHANG Haitao¹, FEI Fan²

(1. AVIC Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China; 2. School of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: To address the limitation of traditional micro-ring resonator thermometry, which relies on tracking a single resonance peak, thereby restricting the measurement range to within the free spectral range, we propose a wide-spectrum microcavity temperature measurement method based on the matching of transverse electric (TE) and transverse magnetic (TM) mode spacing. A temperature measurement system was constructed, comprising a widely tunable laser, a silicon nitride micro-ring resonator, a Fabry-Pérot interferometer, and a water vapor absorption reference unit. Employing a two-stage calibration strategy that combines relative wavelength scale calibration with absolute wavelength anchoring, the system extracts the center wavelengths of resonance peaks and establishes a standard library of mode spacing values, thereby enabling temperature retrieval. Experimental results demonstrate that within the temperature range of $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, the mode spacing exhibits a strong linear correlation with temperature, yielding a coefficient of determination of 0.998. The measured temperature

收稿日期: 2026-03-20; 修回日期: 2026-04-14; 录用日期: 2026-04-14; 发表日期: 2026-04-28

基金项目: “十四五”技术基础科研项目宽光谱流场精细测量(JSJLXXXXXX)

引用格式: 陈颖聪, 蔡静, 叶茜, 等. 基于模式间距匹配的微腔宽谱温度测量方法[J]. 计测技术, 2026, 46(2): 120-129.

Citation: CHEN Y C, CAI J, YE X, et al. Broadband temperature measurement method for microcavities based on mode spacing matching[J]. Metrology & Measurement Technology, 2026, 46(2): 120-129.



sensitivity for the TE single mode is 18.356 pm/K, while that for the TM single mode is 17.283 pm/K. The temperature measurement error of the traditional single resonance peak tracking method is ± 0.05 K, while the error of the microcavity broadband temperature measurement method based on mode spacing matching is ± 0.035 K. This approach not only improves measurement accuracy but also expands the measurement range, enhances system robustness and response efficiency, and provides important references for the engineering applications of microcavity photonic temperature measurement.

Key words: whispering gallery mode microcavity; microring resonator; mode spacing matching; widely tunable laser; wavelength calibration; photonic temperature; wide-spectrum measurement; temperature sensing

0 引言

温度测量是科学研究和工程应用中的基础任务之一,广泛应用于环境监测、工业过程控制、医疗诊断等领域^[1-3]。精确的温度测量不仅为实验研究提供可靠的数据支持,还有助于保障过程安全和产品质量稳定。随着技术的不断进步,温度传感的应用场景日益多样化,对小型化、便携化和高精度的温度测量设备的要求也日益提高,从而推动了新型测量技术的出现^[4]。传统电温度传感器(如热电偶)经过多年发展,技术已较为成熟。然而,其性能仍然受到工作原理和结构配置的限制;在强电磁场或强辐射等极端环境下,这些传感器可能精度下降,需要频繁重新校准^[5-6]。相比之下,基于波长、频率读出的光子温度测量方案可在一定程度上降低对电学敏感环节的依赖,为高稳定性、可溯源的测温提供了新的实现路径^[7]。

回音壁模式(whispering-gallery mode, WGM)微环谐振器具有高品质因子、小模式体积及对折射率与几何尺寸微扰的高响应特性,是构建片上高灵敏温度传感器的重要器件平台^[8]。依托成熟的互补金属氧化物半导体(Complementary Metal-Oxide-Semiconductor, CMOS)制造与封装工艺,硅基微环谐振器在批量一致性、长期重复性与系统集成方面具有优势,在封装后也可维持较好的光学稳定性^[9-10]。因此,基于微环谐振器的光子温度计有望在芯片尺度实现非接触式、高灵敏与可集成的温度测量,并面向复杂环境形成模块化、工程化的测温方案。在航空发动机等复杂热环境测量领域,国内研究人员围绕表面温度场在线测量与辐射测温误差抑制,形成了多光谱测温系统与红外辐射测温方法等代表性技术路线^[11-12]。

近年来,研究人员在提升微环光子温度计的

测量灵敏度、分辨力、准确性等方面开展了大量探索。LEE H S 等人在 293 ~ 303 K 条件下实现了 165 pm/K 的温度灵敏度与 0.1 K 的分辨力^[13]; KLIMOV N 等人系统分析了制造均匀性、封装应力与读出链路对测温性能的影响,给出了约 80 μ K 的噪声基底,为可溯源光子温度标度研究提供了关键支撑^[14]。文献[15-16]提出通过结构改进、材料平台选择与热-光耦合建模优化温度响应并控制系统误差来源。面向工程应用,德国物理技术研究院(Physikalisch-Technische Bundesanstalt, PTB)、德国创新微电子研究所(IHP GmbH-Innovations for High Performance, IHP)与加拿大国家研究委员会(National Research Council Canada, NRC)等机构相继开展了接触式测温、长期稳定性评估与完整不确定度预算的研究,为实际部署提供了可参考的路径^[17-18]。

传统微环谐振器测温方法依赖单个谐振峰的跟踪与锁定,这类方法的测量范围会受到微环自由光谱范围 F_{FSR} (Free Spectral Range, FSR) 及模式识别的约束。为提升量程与灵敏度,部分研究人员探索了级联微环游标(Vernier)结构等方案,以实现测量范围与灵敏度的协同增强^[19];另有研究人员利用横电/横磁(Transverse Electric/Transverse Magnetic, TE/TM)两组谐振序列构造光谱指纹,并开展模式相关与识别的工作,证明该思路可用于温度反演与波长标定的联合实现^[20]。这些研究为发展多谐振协同测温提供了研究思路,但在宽光谱条件下实现轻量化的数据处理与稳健反演,仍有待进一步探索。

针对上述问题,本文构建了一种宽调谐激光器驱动的微腔光子温度测量系统,并提出一种利用宽带 TE/TM 模式间距匹配的温度反演方法。该系统由光源与偏振控制模块、片上氮化硅微腔温

度传感器、光谱采集模块及波长校准与谐振峰提取模块组成,可在单次扫描中获取包含TE/TM双偏振谐振的透射光谱。水蒸气参考池与法布里-珀罗干涉仪共同提供绝对与相对波长基准,其中水分子吸收线的谱线参数可依据HITRAN等权威光谱数据库实现可溯源标定^[21]。通过提取多组TE/TM模式间距构建温度相关阵列,与预校准数据库进行匹配,实现温度快速反演。开展实验对该方法的线性特性、测温误差、量程扩展能力及计算效率进行验证,为促进微腔光子温度测量技术的工程应用提供借鉴。

1 回音壁模式微腔测温原理

微环谐振器是一种采用集成光波导技术实现的微型谐振器件,其结构是回音壁模式在环形波导中的导模等效实现。当入射光通过耦合区注入微环后,光场在环形波导中多次往返传播并形成稳定的相位叠加。当满足谐振条件时,透射谱中将出现一系列窄带谐振凹陷(或峰),其线型通常可近似为洛伦兹型。谐振峰的中心波长对有效折射率与等效光程的微小扰动高度敏感,可用于实现高灵敏温度感知。

温度变化将同时引起两类效应:①材料的热光效应,导致波导有效折射率随温度变化;②器件结构的热弹性/热膨胀效应,使环形光程随温度发生微小变化。二者共同改变了谐振相位匹配条件,表现为谐振峰中心波长的可测漂移。谐振波长偏移与温度变化的对应关系如式(1)所示。

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda\Delta T}{n_g} \left(\frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial T} + \frac{n_{\text{eff}}}{L} \frac{\partial L}{\partial T} \right) \quad (1)$$

式中: λ 为谐振波长, $\Delta\lambda$ 为谐振波长的变化量, T 为微腔温度, ΔT 为微腔温度的变化量, n_g 为腔群的折射率, L 为微环的等效光程, n_{eff} 为腔模的有效折射率。

等效光程随温度变化的相对伸长率通常由热膨胀系数 α_{CTE} 描述,定义如公式(2)所示,用于表征 L 对温度的一阶响应。

$$\alpha_{\text{CTE}} = \frac{1}{L} \frac{\partial L}{\partial T} \quad (2)$$

计算得到 $\alpha_{\text{CTE}} = 2.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 。氮化硅的热光效应可以用相应的热光系数 α_{TOC} 来表征,其表达

式为

$$\alpha_{\text{TOC}} = \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial T} \approx \frac{\partial n_{\text{Si}_3\text{N}_4}}{\partial T} \quad (3)$$

式中: $n_{\text{Si}_3\text{N}_4}$ 为氮化硅的有效折射率。计算得到 $\alpha_{\text{TOC}} \approx 2.45 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$

通过计算得到热光效应温度灵敏度贡献 S_{TO} 为 0.0174 nm/K ;热膨胀效应温度灵敏度贡献 S_{TE} 为 0.0036 nm/K ,总温度灵敏度 S_T 计算公式为

$$S_T = S_{\text{TO}} + S_{\text{TE}} \quad (4)$$

计算得到 $S_T \approx 0.0210 \text{ nm/K}$ 。

在常见的硅、氮化硅等介质波导平台中,热光项通常是谐振漂移的主要来源,而热膨胀项多表现为较小的修正贡献^[22],实际应用中,可根据材料与封装条件将其纳入模型或不确定度计算。由于TE与TM模式在边界条件与场分布上存在差异,两者的热光响应一般并不相同,导致两种偏振模式的谐振波长随温度变化的漂移速率存在差异。这一差异为后续利用TE/TM模式间距构造温度光谱指纹并实现宽光谱温度反演提供了物理基础。

2 测温系统和方法

本文构建了基于宽频可调谐激光器和片上氮化硅微环谐振器的TE/TM双偏振微腔光子测温系统。该系统可在设定的频带内进行连续波长扫描,同时获取包含TE/TM谐振峰的宽带透射光谱、水分子吸收光谱以及用于校准的法布里-珀罗干涉光谱。通过波长校准和谐振峰计算模块,将时间轴精确映射到波长轴,提取不同温度条件下的TE/TM模式间隔特性,并结合标准库实现温度反演。

图1为微腔温度测量系统的整体结构。系统由光源模块、片上氮化硅微腔温度传感器、波长校准参考模块以及光谱采集和数据处理模块组成。宽调谐激光器的输出光经过偏振控制器调整偏振态后,耦合到1:1:1光纤耦合器。三束分束光分别引导至扫描式法布里-珀罗干涉仪、固定光程的空气柱以及上传-下载型微环谐振器传感芯片。三束输出光经InGaAs光电探测器转换为电信号,由数据采集卡同步采集,并传输至主机进行光谱处理和波长提取,实现对微环透射光谱中谐振峰的高精度波长测量以及后续的温度读数。本设计有

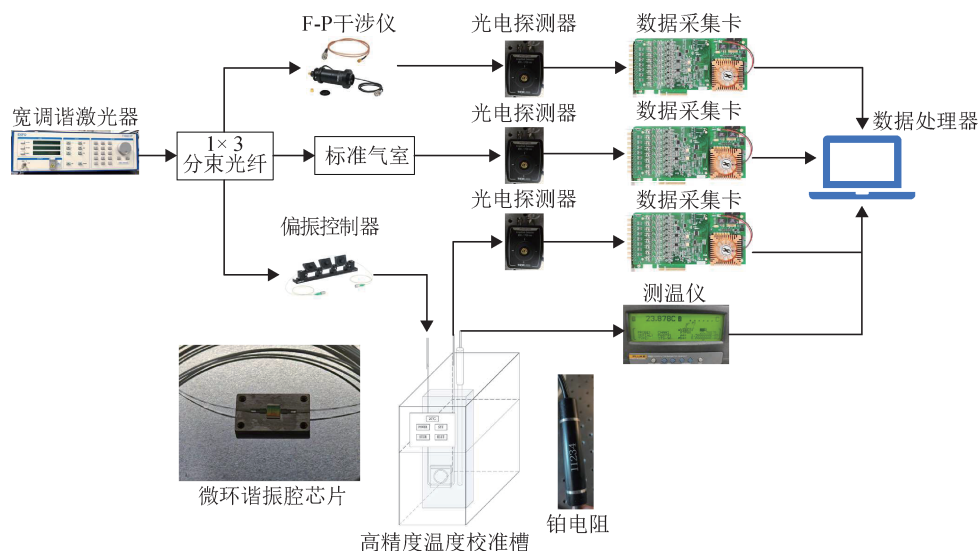


图1 微腔光子测温系统图

Fig.1 Diagram of microcavity photonic temperature measurement system

机集成了激光扫描、波长参考、片上传感装置、电子采集和处理功能,形成了一个完整的TE/TM双偏振微腔光子测温系统。

2.1 光源模块

光源模块由1台宽调谐激光器和1个偏振控制器组成。为了扩展系统的可操作温度范围并确保共振读出所需的足够信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR),采用1台EXFO T100S-HP宽调谐激光器作为探测光源,该激光器具有窄线宽、宽调谐范围和高信噪比等特点;其1 350 ~ 1 510 nm的波长调谐范围使其能够在单次扫描中获取包含多组共振峰的微环透射光谱。偏振控制器(Polarization Controller, PC)通过3个可旋转的内部波片($\lambda/4$ 或 $\lambda/2$)的组合来调节入射光的偏振态,可以抑制不需要的偏振模式,并增强目标偏振共振的对比度,同时提高透射光谱中共振特征的稳定性和重复性。

2.2 片上氮化硅微腔温度传感器

芯片采用集成光波导工艺制造,并集成了多种微环谐振器结构,包括单微环腔和不同腔长的螺旋微环谐振器,以满足不同的温度灵敏度和动态范围要求。图2展示了氮化硅回音壁模式微环谐振器芯片实物。

系统采用的传感元件是上传-下载型微环谐振器,其结构示意图如图3所示。该谐振器的固有品质因数 Q 约为 4×10^6 ,负载因数约为 2×10^6 ,有效

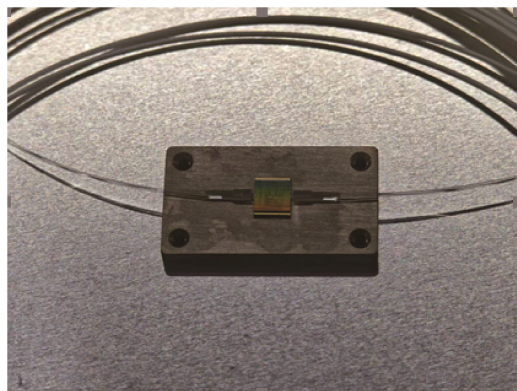


图2 氮化硅微环谐振器实物图

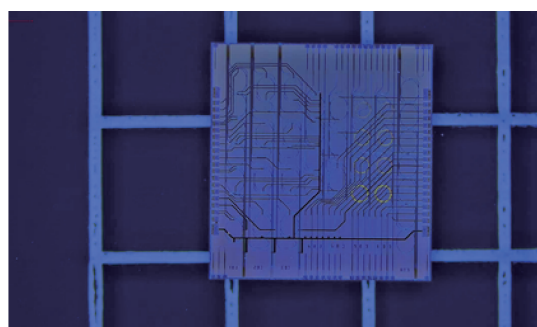
Fig.2 Physical diagram of silicon nitride micro-ring resonator

腔长为 $446\pi \mu\text{m}$,波导宽度为 $1.65 \mu\text{m}$ 。

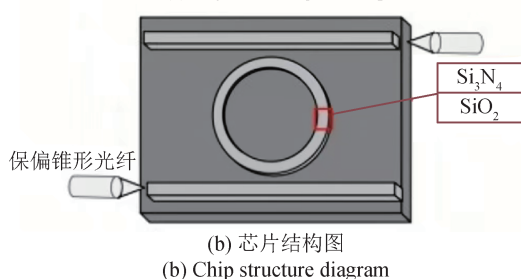
图4展示了芯片与光纤的耦合方案。封装前,将光纤锥与耦合波导精确对准,并采用端面耦合方式实现光纤与片上波导之间的高效耦合,从而在保持高 Q 值的同时,确保系统的稳定性和可操作性。

2.3 光谱采集模块

光谱的采集模块采用PDA20CS2 InGaAs光电探测器(Photodetector, PD),其工作波长为800 ~ 1 700 nm,并提供可调增益。PD将法布里-珀罗干涉仪、水蒸气吸收池和微环谐振器的3个光信号转换为电信号,再输入到16位数据采集卡,实现多通道同步采样。在采集过程中,严格保证法布里-珀罗干涉光谱、水蒸气吸收光谱和微腔透射光谱



(a) 芯片实物图
(a) Physical image of chip



(b) 芯片结构图
(b) Chip structure diagram

图3 微环谐振器芯片示意图

Fig.3 Schematic diagram of a microring resonator chip

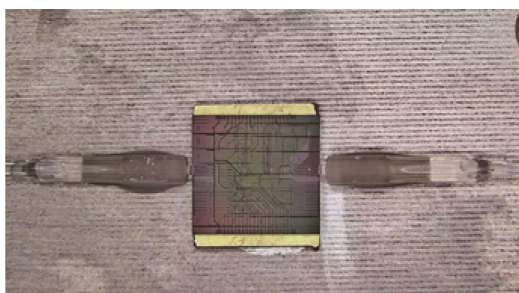


图4 封装耦合实物图

Fig.4 Encapsulation coupling physical diagram

之间的时间对准,为后续峰值提取、波长校准和温度反演提供可靠的数据基础。

2.4 波长校准和谐振峰提取模块

相关研究表明:稳定的频率参考与锁定策略是提升激光光谱测量精度和重复性的关键基础,这也说明在扫频测量系统中引入绝对参考与相对标度联合校准具有必要性^[23]。在微腔光子测温系统中,谐振波长的精度直接影响后续温度反演的可靠性。宽调谐激光器在扫描过程中不可避免地存在扫描非线性、启停波长漂移与机械滞后等弊端;若直接以采样时间或采样点序号作为横轴,将会把上述非理想效应等效映射为波长轴上的系统误差。故本文采用相对标度校准+绝对参考锚

定的两级校准策略,在共振峰位置确定阶段引入基于线型模型的精细拟合,以获得高精度、可重复的谐振中心波长。

波长校准模块由扫描式法布里-珀罗干涉仪(型号为SA200-12B)与置于空气中的水蒸气吸收池构成。法布里-珀罗通道提供固定 F_{FSR} 对应的等频(等间隔)干涉条纹,用于建立高分辨力的相对波长标尺;水蒸气吸收通道在1445~1460 nm波段提供清晰分子吸收线,作为绝对波长参考。

构建相对波长标度,需要从法布里-珀罗通道中提取相邻干涉条纹的时间位置。利用相邻条纹对应固定频率间隔的特性,对扫描过程建立波长-时间映射函数并进行拟合,补偿激光扫描的非线性。锚定绝对波长参考,从水吸收通道中选取1445~1460 nm波长内若干特征吸收线,将实测吸收光谱与HITRAN数据库给出的标准水蒸气谱线进行拟合,得到吸收线的中心波长;再将这些中心波长约束代入映射函数,实现全局波长偏移的校正与绝对波长标定。最终可将透射光谱的时间轴一致地映射为绝对波长轴。

在共振峰提取与波长计算方面,本文采用窗口粗定位结合洛伦兹线型精拟合的两步方法,以降低噪声与采样分辨率对峰位估计的影响,具体流程如图5所示。

根据微环典型共振间隔设置搜索窗口,对波长校准后的透射光谱进行区间化搜索,获得每个谐振峰的初始位置(粗略波峰位置 λ_0 或对应时间点)。在初值附近截取局部波长窗口,对谐振峰采用洛伦兹线型模型进行非线性最小二乘拟合,精确提取谐振中心波长及线宽参数。对于透射谐振峰谱线,采用包含背景项的洛伦兹模型。波长为 λ 时微环透射光谱的透射响应值 $T(\lambda)$ 计算公式为

$$T(\lambda) = T_{\text{bg}}(\lambda) - \frac{A}{1 + [(\lambda - \lambda_0)/\gamma]^2} \quad (5)$$

式中: T_{bg} 为局部背景(可取常数或一次线性项); A 为谐振峰幅值参数; λ_0 为谐振中心波长; γ 为与半高宽 F_{WHM} 相关的参数, $\gamma = \frac{1}{2} F_{\text{WHM}}$ 。采用标准非线性最小二乘拟合,以窗口内最小值、半高宽估计等作为初始值以增强收敛稳定性。最终将拟合得到的 λ_0 作为该共振在当前温度下的精确波长;拟合同时输出的线宽可进一步用于计算负载品质因

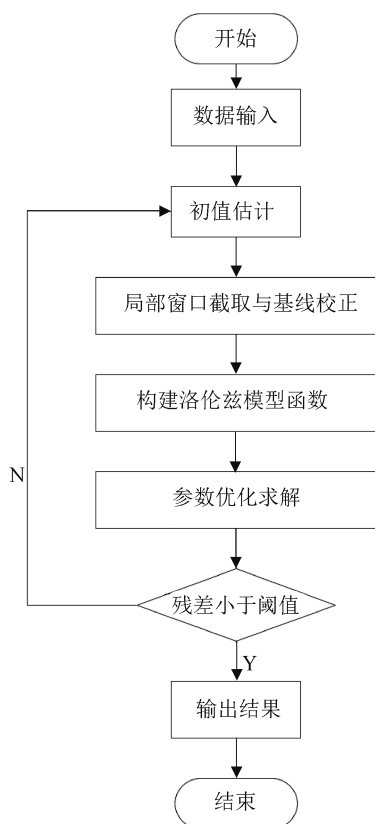


图5 谐振峰波长拟合流程图

Fig.5 Resonance peak wavelength fitting flowchart

数, 可通过残差或拟合优度对异常共振(如耦合漂移、模式混叠导致的畸变线型)进行剔除或降权。

通过上述两级校准与粗定位-洛伦兹拟合的峰位反演策略, 能够有效抑制扫描非线性与短时漂移引入的系统误差, 提高共振中心波长估计的重复性与可比性, 从而为后续TE/TM模式分类、模式间距计算与温度反演提供稳定、可溯源的输入数据。

本文所讨论的温度测量响应时间指当前实验配置下系统输出一次有效温度结果所需的单次温度更新周期, 而非微环谐振腔本征热响应常数。激光扫描波长设定为1 445 ~ 1 465 nm, 扫描速度为1 nm/s, 单次完整光谱采集时间约为20 s。自动化控制测试表明: 从上位机发送扫描指令到激光器开始扫描需约2 s。因此, 在当前实验配置下, 系统单次温度更新周期约为22 s, 在连续扫描模式下, 可近似认为有效更新周期约为20 s。TE/TM模式间距匹配方法仅涉及特征提取、标准库匹配与距离计算, 计算量显著低于全光谱匹配方法,

数据处理部分可近实时完成, 因此当前系统响应时间主要受限于宽谱扫描过程。后续若进一步缩小扫描窗口或提高扫描速度, 系统响应时间仍可进一步压缩。

2.5 基于TE/TM模式间距匹配的测温方法

本研究使用的微环谐振器同时支持TE和TM两种偏振模式, 这两种模式的有效折射率和热光响应不同, 其各自的谐振波长在温度变化时发生不同的绝对偏移, 导致同一透射光谱中TE/TM谱线的相对位置会系统性地发生变化。对于给定的微环结构和封装条件, 在环境折射率等其他非热扰动保持恒定的条件下, 波长校准后的TE/TM模式间距分布可以被视为当前温度的光谱指纹。

首先构建一个TE/TM模式间距的标准库。将微环谐振器置于温控腔中, 并在-10 ~ 40 °C条件下选取11个校准温度点。在每个温度点采集波长校准后的宽带透射光谱。对于每个光谱, 基于获得的谐振峰波长列表, 对光谱中所有稳定可识别的TE和TM模式进行分类和配对, 并利用式(6)计算每对TE/TM模式之间的波长差 $\Delta\lambda_k(T_i)$ 。

$$\Delta\lambda_k(T_i) = \lambda_{TM,k}(T_i) - \lambda_{TE,k}(T_i) \quad (6)$$

式中: $\lambda_{TM,k}(T_i)$ 为 T_i 温度下TE模式对应的波长, $\lambda_{TE,k}(T_i)$ 为 T_i 温度下TM模式对应的波长。

可得温度处的模式间距特征矢量 $D(T_i)$ 为

$$D(T_i) = [\Delta\lambda_1(T_i), \Delta\lambda_2(T_i), \dots, \Delta\lambda_N(T_i)] \quad (7)$$

式中: $\Delta\lambda_N(T_i)$ 为 T_i 温度下不同谐振峰处的模式间距。所有校准温度点 $D(T_i)$ 对应的数值均被存储, 以形成TE/TM模式间距标准数据库。模式配对和排序规则在整个校准过程中保持不变。

在实际测量过程中, 被测微环在未知温度 T_{meas} 下运行。系统获取波长校准的TE/TM宽带透射光谱, 重复上述模式鉴别和配对步骤, 并计算当前模式间距特征向量 D_{meas} 。

$$D_{meas} = [\Delta\lambda_1^{meas}, \Delta\lambda_2^{meas}, \dots, \Delta\lambda_N^{meas}] \quad (8)$$

式中: $\Delta\lambda_N^{meas}$ 为该温度下的不同谐振峰处的模式间距, 将 D_{meas} 与标准库中每个温度点的特征向量 $D(T_i)$ 逐一进行比较。通过最小化模式间距差异的总体偏差, 找到与其最接近的温度点 T_j 。可在相邻温度点之间进行插值, 以获得相应的温度估

计值 $\hat{t}$ 。

基于上述TE/TM模式间距标准库和匹配策略,可将未知温度下的宽带透射光谱特征映射为对应的温度估计值。与依赖单一谐振峰漂移的传统方法相比,该方法利用多组TE/TM模式间距的联合特征进行判别,有助于提高温度表征的唯一性与鲁棒性,并减弱模式混叠对测量结果的影响。

3 结果与分析

本实验采用高精度温度校准槽为微环谐振腔芯片提供稳定的环境温度,并使用一级标准铂电阻作为温度分辨力对比参考。将微环谐振腔和标准铂电阻置于与密封铜金属气室相同的位置后,将气室浸入硅油中。经过至少6 h的温度传递,可认为微环谐振腔、铜金属气室和硅油浴已达到相同温度。实验中,使用微环谐振腔温度测量系统采集包含温度和多个TE/TM谐振峰波长的实验数据。数据集涵盖 $-10 \sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度和 $1\,445 \sim 1\,465\text{ nm}$ 波长。基于水的分析吸收峰,进行波长校准和谐振峰计算,提取不同温度下的TE/TM模式间隔特性,并与标准铂电阻温度计的读数进行比较。在此基础上,进一步从模式间距与温度的响应关系、测温误差与残差分布、与传统单峰跟踪法的量程和精度对比等方面,对所提方法的测温性能进行分析。

传统的基于微环谐振器的温度测量方法依赖于单个谐振峰的漂移进行温度反演,其有效温度测量范围受 F_{FSR} 的限制:当温度变化导致谐振峰跨越多个 F_{FSR} 或模式重叠时,容易产生混叠,需要进行分段校准。利用本文方法完成波长校准后,基于TE/TM模式间距标准库,采用传统的单模传感方法测量不同温度点的温度。结果表明:微环谐振腔的TE单模温度灵敏度为 18.356 pm/K ,TM单模温度灵敏度为 17.283 pm/K 。两种模式温度灵敏度的差异会体现在微腔温度测量透射谱中,导致模式间距发生变化。通过匹配间距序列并查表,即可获得相应的温度值。

微环在 $1\,450\text{ nm}$ 波段的实测 F_{FSR} 约为 0.7 nm 。传统单峰跟踪法要求累计波长漂移必须限制在一个 F_{FSR} 以内,一旦超过一个 F_{FSR} ,谐振峰将移入相邻 F_{FSR} 区间,导致模式混叠和整周期跳变,温度反

演需要重新分段标定。采用基于模式间距匹配的微腔宽谱温度测量方法在同一微环上完成了 $-10 \sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的连续测量验证,对应温区跨度为 50 K ,已超过单 F_{FSR} 无模糊范围。

如图6所示,TE/TM组间距随温度的整体变化幅度小于单个谐振峰的偏移量。在相同的温度步长下,间距增量小于单模波长漂移增量。温度反演不依赖于单个谐振峰的位置或间距量的斜率,而是依据整个TE/TM间距特征与预先建立的标准库之间的整体匹配度。本方法通过引入一组组间间距特征来压缩和重构多模态光谱信息,最终的温度估计依赖于整套间距特征与校准库之间的匹配关系。

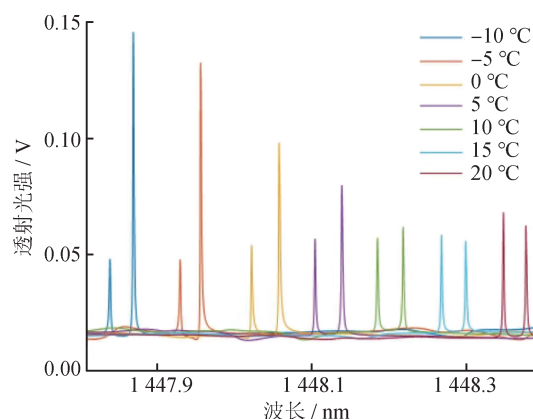


图6 TE/TM模式间距分布图

Fig.6 TE/TM mode spacing distribution diagram

模式间距随温度变化呈现近似线性趋势,如图7所示。线性拟合决定系数 R^2 为 0.998 ,表明在 $-10 \sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下,模式间距随温度变化具有良好的单调性和可区分性,说明该特征量能够稳定表征温度变化趋势。与依赖单个谐振峰绝对漂移量的传统方法相比,模式间距特征更强调不同偏振模式之间的相对变化关系,因此在存在共同波长漂移扰动时具有更好的鲁棒性。

为了评估TE/TM模式间距匹配法的准确性和稳定性,实验中将微环谐振腔和标准铂电阻温度计同时置于温控箱中,并在 $-10 \sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下记录测量结果,如表1所示。

将TE/TM模式间距匹配法的输出温度与铂电阻温度计的读数进行比较,发现:TE/TM模式间距匹配法的测量结果在整个温度范围内与铂电阻

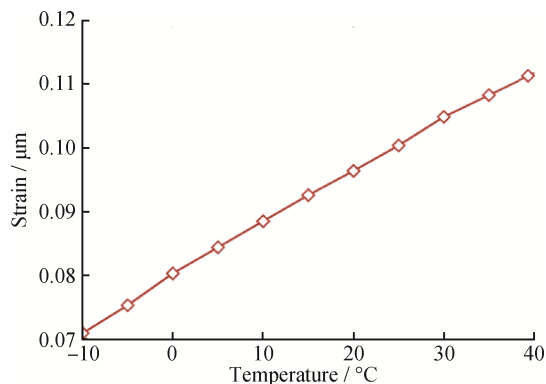


图7 TE/TM间距-温度曲线
Fig.7 TE/TM spacing-temperature curve

表1 测量结果
Tab.1 Measurement results

单位: °C		
设置温度	测量结果	铂电阻温度计数据
-10	-9.981	-9.993
-5	-5.013	-4.992
0	-0.022	-0.012
5	5.026	5.003
10	9.983	10.002
15	14.974	15.008
20	20.012	19.997
25	25.035	25.007
30	29.981	29.991
35	34.979	35.001
40	40.026	40.004

温度计的读数具有良好的 consistency, 温度测量误差控制在 $\pm 0.035\text{ K}$, 且未表现出明显的系统性偏移或随温度升高而快速累积的趋势。不同温度点的测量偏差整体较小, 表明该方法具有较好的重复性与短期稳定性。将TE/TM模式间距匹配法与传统单峰跟踪法的关键指标进行对比可知: 传统单峰跟踪法的有效测量温区跨度为 35 K , TE/TM模式间距匹配方法的有效测量温区跨度为 50 K , 有效测量温区跨度显著提升。同时, 传统单峰跟踪法的测温误差约为 $\pm 0.05\text{ K}$, TE/TM模式间距匹配方法的测温误差约为 $\pm 0.035\text{ K}$, 绝对误差降低 0.015 K , 相对降幅约 30% 。

图8展示了TE/TM模式间距匹配法在全温区

测量中的残差分布箱式图, 所有温度点的残差箱体较均匀紧凑, 且围绕零误差线分布, 上下触须范围窄于单谐振峰线性拟合方法, 说明该方法利用多个模式对的间距构成的指纹特征, 有效平均了单峰随机噪声, 克服了传统方法在边界温度点误差增大的问题。

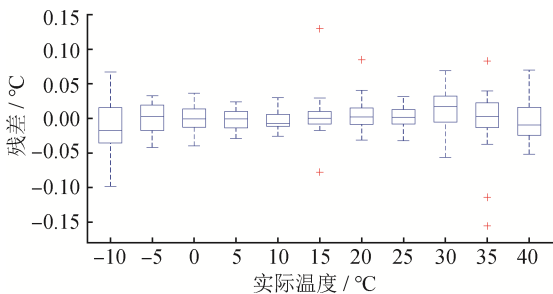


图8 模式间距匹配法测温残差箱式图
Fig.8 Box plot of temperature measurement residuals by the mode spacing matching method

TE/TM模式间距匹配法的特征量源于TE和TM两种模式之间的相对漂移, 不受单个谐振峰是否位于固定光谱段的影响。在实际应用中, 通过合理选择光谱测量窗口和器件结构, 可以将间隔法的线性有效范围扩展得更宽。

从计算效率角度分析, 传统全光谱相似度匹配方法需要将整张透射光谱与标准光谱库逐一进行相似性计算, 其计算复杂度可表述为 $O(L_0 \times N_0)$, 其中, L_0 为数据库标定光谱数量, N_0 为光谱采样点数; 当采样点数较大时, 该方法涉及大规模矩阵运算, 计算耗时较长。TE/TM模式间距匹配法将温度反演转化为特征向量快速检索, 其计算过程主要包括特征提取、数据库匹配与欧氏距离计算, 计算复杂度可表述为 $O(\log_2 L_0 \times K_0)$, 其中, K_0 为模式间距特征向量长度, 且本研究中 K 不超过100。依据前期实验数据处理结果与计算复杂度分析, 在相同数据规模下, 全光谱相似度方法的计算耗时为秒级, 而模式间距匹配法为毫秒级, 说明本文方法显著降低了数据处理量与计算负担。

4 结论

本文提出了一种基于TE/TM模式间距匹配的微腔宽谱温度测量方法, 并构建了相应的宽调谐激光测温系统。实验结果表明: 在 $-10 \sim 40\text{ }^\circ\text{C}$ 条件

下, TE/TM 模式间距与温度呈良好的线性关系, 线性拟合决定系数 R^2 为 0.998; 系统温度测量误差约为 ± 0.035 K。相较传统单峰跟踪法, 该方法在同一器件上实现了有效测量温区跨度为 50 K 的验证, 突破了单个 F_{FSR} 对无模糊测温范围的限制, 并将温度反演由全光谱匹配转化为特征向量快速检索, 显著降低了数据处理量与计算负担。该方法为微腔光子温度测量的宽量程、高鲁棒性与工程化应用提供了新的实现思路。

本文的实验验证主要在高精度恒温槽环境中完成, 以确保方法量程、精度与鲁棒性的定量评估, 为后续面向实际场景应用的研究提供了技术基础。本文 TE/TM 模式间距特征来源于不同偏振模式之间的相对漂移, 对共同作用于各谐振峰的波长漂移和环境扰动具有较强抑制能力, 适用于存在噪声背景和系统漂移的测量场景; 将温度反演过程转化为特征提取与标准库匹配问题, 计算量小、响应速度快, 可基于单片机等嵌入式平台实现实时温度解调, 便于系统小型化和现场部署; 基于片上微环谐振腔的便携式温度传感装置已实现实验室外高精度测量, 说明该类系统具备明确的工程应用前景。后续将围绕便携式封装、连续扫描控制以及实际环境下的连续温度跟踪开展进一步实验。

参考文献

- [1] GANGWAR R K, KUMARI S, PATHAK A K, et al. Optical fiber based temperature sensors: a review[J]. *Optics*, 2023, 4(1): 171-197.
- [2] 王超. 硅酸盐稀土掺杂荧光粉在温度传感中的研究及应用[J]. *石化技术*, 2024, 31(10): 57-58, 158.
WANG C. Research and application of silicate rare-earth-doped phosphors in temperature sensing[J]. *Petrochemical Industry Technology*, 2024, 31(10): 57-58, 158. (in Chinese)
- [3] JING L, YU H, TONG Z, et al. Temperature-insensitive optical fiber sensor based on SMF-NCF-FMF-NCF-SMF spindle-shaped structure for refractive index measurement[J]. *Applied Physics B*, 2024, 130(8): 151.
- [4] ROSS PINNOCK D, MAROPOULOS P G. Review of industrial temperature measurement technologies and research priorities for the thermal characterisation of the factories of the future[C]// *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2016, 230(5): 793-806.
- [5] 温棚宇, 龙桂鲁, 王敏. 回音壁模式光学微腔传感研究进展[J]. *计测技术*, 2023, 43(4): 33-43.
WEN P Y, LONG G L, WANG M. Research progress of whispering-gallery-mode optical microcavity sensing[J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2023, 43(4): 33-43. (in Chinese)
- [6] 潘奕捷, 王瑾, 张诚, 等. 硅基微腔光子学测温技术研究进展[J]. *计测技术*, 2022, 42(6): 1-10.
PAN Y J, WANG J, ZHANG C, et al. Research progress of silicon-based microcavity photonic thermometry[J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2022, 42(6): 1-10. (in Chinese)
- [7] XU H, HAFEZI M, FAN J, et al. Ultra-sensitive chip-based photonic temperature sensor using ring resonator structures[J]. *Optics Express*, 2014, 22(3): 3098-3104.
- [8] FOREMAN M R, SWAIM J D, VOLLMER F. Whispering gallery mode sensors[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2015, 7(2): 168-240.
- [9] GUGLIANDOLO G, TABANDEH S, ROSSO L. Whispering gallery mode resonators for precision temperature metrology applications[J]. *Sensors*, 2021, 21(8): 2844.
- [10] WANG J, PAN Y, GAO J, et al. An on-chip silicon photonics thermometer with milli-kelvin resolution[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(8): 3713.
- [11] 张学聪, 董磊, 胡玮宸, 等. 基于多光谱的涡轮叶片表面温度场测量系统[J]. *计测技术*, 2025, 45(1): 88-95.
ZHANG X C, DONG L, HU W C, et al. Surface temperature field measurement system for turbine blades based on multispectral method[J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2025, 45(1): 88-95. (in Chinese)
- [12] 高山, 熊新梦, 刘海龙. 基于红外辐射的发动机涡轮叶片温度测量方法综述[J]. *计测技术*, 2024, 44(4): 1-28.
GAO S, XIONG X M, LIU H L. Review of temperature measurement methods for engine turbine blades based on infrared radiation[J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2024, 44(4): 1-28. (in Chinese)
- [13] LEE H S, KIM G D, LEE S S. Highly sensitive integrated photonic temperature sensor exploiting a polymeric microring resonator[J]. *Korean Journal of Optics and*

- Photonics, 2008, 19(3): 224–228.
- [14] KLIMOV N, BERGER M, AHMED Z. Towards reproducible ring resonator based temperature sensors[J]. Sensors & Transducers, 2015, 191(8): 63–66.
- [15] MOHAMAD A, BAHADORAN M, AHMAD NOORDEN A F, et al. Modified add-drop microring resonator for temperature sensing[J]. Journal of Computational and Theoretical Nanoscience, 2015, 12(10): 3188–3193.
- [16] WEITUSCHAT L M, DICKMANN W, GUIMBAO J, et al. Photonic and thermal modelling of microrings in silicon, diamond and GaN for temperature sensing[J]. Nanomaterials, 2020, 10(5): 934.
- [17] EISERMANN R, KRENEK S, WINZER G, et al. Photonic contact thermometry using silicon ring resonators and tuneable laser-based spectroscopy[J]. TM-Technisches Messen, 2021, 88(10): 640–654.
- [18] DEDYULIN S, GRZETIC-MUFFO A, JANZ S, et al. Practical ring-resonator thermometer with an uncertainty of 10 mK[J]. Measurement, 2023, 221: 113453.
- [19] 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.
- [20] JANZ S, CHERITON R, XU D X, et al. Photonic temperature and wavelength metrology by spectral pattern recognition[J]. Optics Express, 2020, 28(12): 17409–17423.
- [21] GORDON I E, ROTHMAN L S, HARGREAVES R J, et al. The HITRAN2020 molecular spectroscopic database[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2022, 277: 107949.
- [22] 阚拓, 郑晔, 赵天剑, 等. 基于迁移学习的片上多模微环谐振腔温度传感研究[J]. 电脑与信息技术, 2023, 31(1): 54–57.
- KAN T, ZHENG Y, ZHAO T J, et al. Research on on-chip multimode microring resonator temperature sensing based on transfer learning[J]. Computer and Information Technology, 2023, 31(1): 54–57. (in Chinese)
- [23] 张晓菁, 白金海, 胡栋. 激光器自动锁频方法研究综述[J]. 计测技术, 2024, 44(1): 60–72.
- ZHANG X J, BAI J H, HU D. Review of automatic laser frequency-locking methods[J]. Metrology & Measurement Technology, 2024, 44(1): 60–72. (in Chinese)
- (本文编辑: 刘圣晨 李成成)



第一作者: 陈颖聪(2001—), 男, 广西玉林人, 硕士研究生, 主要从事微腔温度测量相关研究。



通信作者: 蔡静(1976—), 女, 河北石家庄人, 研究员, 博士, 2005年毕业于中国科学院电工研究所, 研究方向为热学计量与测试。从2005年工作至今, 主持“十一五”“十二五”“十三五”等基金项目多项, 获奖多项。