

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2022.06.01

硅基微腔光子学测温技术研究进展

潘奕捷¹, 王瑾¹, 张诚^{1,2}, 屈继峰¹, 段宇宁¹

(1. 中国计量科学研究院, 北京 100029; 2. 北京理工大学 光电学院, 北京 100081)

摘要: 硅基微腔光子学测温包括基于热折变效应的协议温度测量以及基于光机谐振原理的热力学温度测量, 国际温度咨询委员会(CCT)在2018–2027战略规划中, 将硅基微腔光子学测温确定为接触测温新兴技术的主要发展方向。本文简要介绍上述两种测温理论机理, 综述近年来美国国家标准与技术研究院(NIST)、欧洲计量合作组织(EURAMET)等发达国家计量院与计量组织在上述领域的研究进展, 以及来自于学术界的探索性研究内容; 最后介绍中国计量科学研究院在毫开尔文(mK)级微腔光子温度计制备与测试、基于法诺共振的亚mK级分辨力提升方法、基于氮化硅微腔的亚mK级自热温升抑制等研究进展。

关键词: 温度计量; 光学微腔; 光子学测温; 热折变效应; 光机械

中图分类号: TB94

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2022)06-0001-10

Research progress of silicon microcavity photonic temperature measurement

PAN Yijie¹, WANG Jin¹, ZHANG Cheng^{1,2}, QU Jifeng¹, DUAN Yuning¹

(1. National Institute of Metrology, Beijing 100029, China;

2. School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Silicon microcavity photonic temperature measurement includes International Temperature Scale (ITS) temperature measurement based on the thermo-refractive effect and thermodynamic temperature sensing based on optomechanical principle. In the 2018–2027 development strategy of the Consultive Committee of Temperature (CCT), silicon microcavity photonic thermometry was designated as the first priority within the emerging contact temperature measurement techniques. This paper briefly introduces the mechanisms of the two photonic temperature measurement techniques, and summarizes the research progress of metrology institutes and metrology organizations such as NIST in the United States and EURAMET in Europe in the above fields in recent years, as well as the exploratory research achievement from academia. Finally, the latest research results of the National Institute of Metrology, China are introduced including the fabrication and testing of self-developed photonic thermometers with a milli-Kelvin (mK) level resolution, the sub-mK level resolution enhancement approach by means of the Fano resonance, and the sub-mK level self-heating suppression by Si₃N₄ microcavity.

Key words: temperature metrology; optical microcavity; photonic thermometry; thermo-refractive effect; optomechanical

0 引言

温度是最为古老且应用最为广泛的测量量值。传统的接触式温度传感器, 如铂电阻、热敏电阻、

热电偶温度计主要依靠温度变化带来的电阻和热电势变化进行温度测量, 该方法统称为电子学测温方法。经过近一百年的发展, 电子学测温法的测量精度已达到mK量级, 测温范围覆盖mK至

收稿日期: 2022-10-25; 修回日期: 2022-11-26

基金项目: 科技部重点研发计划项目(2022YFF0608304); 国家自然科学基金(62075206, 62205324)

引用格式: 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.

Citation: PAN Y J, WANG J, ZHANG C, et al. Research progress of silicon microcavity photonic temperature measurement[J]. Metrology and measurement technology, 2022, 42(6): 1–10.



3000 K,但在强场、高辐照、高振动等极端环境下,其测量结果可能出现严重失准甚至失效。因此,亟需开展面向上述条件的新型高稳定、高准确测温方法的研究。随着2018年完成温度基本单位“开尔文”重新定义,国际温度计量咨询委员会(CCT)开始努力探寻温度测量新方法,并在其“接触测温工作组”下创建了“新兴测温技术任务组”^[1]。CCT在2017年发布的中长期发展战略规划中明确部署,将在2018–2022年开展基于热折变效应的硅基微腔光子学协议温度测量与计量研究,并在2023–2027年开展基于上述理论与器件的原级测温方法研究^[2]。与此同时,2018年欧盟在欧洲计量合作组织(EURAMET)的欧洲计量创新与研究计划(EMPIR)中设置了Photonic and Optomechanical Sensors for Nano-scaled and Quantum Thermometry (PhotOQuanT)项目,同期开展相关研究^[3]。预期在未来5~10年内微腔光子温度测量可实现:具有1000 K范围、mK级不确定度的温度测量方案及评价方法;面向极端环境,对电学测温方法的部分替代;有限温区内原级温度测量。

本文围绕硅基微腔光子温度测量,综述美国、德国等发达国家计量院在基于热折变效应的微腔光子协议温度测量领域的研究进展,回顾来自学术界的相关前沿研究,梳理基于光机械效应的热力学测温进展,最后介绍中国计量科学研究院在微腔光子协议温度测量的器件制备与测试、分辨力提升、自热温升抑制等研究成果。

1 基于热折变效应的微腔光子学测温

硅基微腔包括微环、布拉格光栅、一维微孔光子晶体等多种几何结构,其透射光谱如图1所示^[4]。图1中腔体的品质因子(Q)值决定透射谱半高全宽,影响测量分辨力;自由光谱频程(FSR)决定重复频率,影响测温范围;腔体材料影响测温灵敏度。

当光学微腔温度发生变化时,热折变效应改变材料及腔体折射率,热弹效应改变谐振腔长度,由上述效应引起的透射光谱谐振峰中心波长偏移可表示为

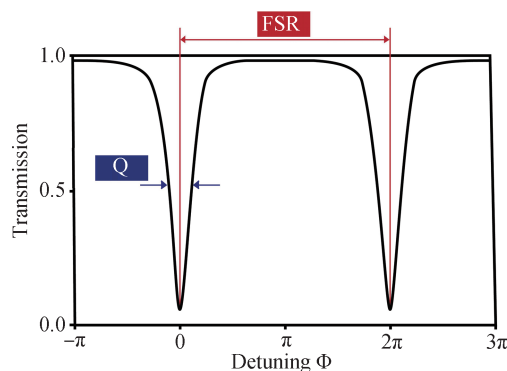


图1 微腔透射光谱示意图

Fig.1 Illustration of transmission spectrum of optical microcavity

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

式中: λ , $\Delta\lambda$ 分别为谐振波长、谐振波长变化量; ΔT 为温度变化量; L 为微腔等效长度; n_g 为腔体群折射率; n_{eff} 为腔体有效折射率; $\frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial T}$ 为腔体有效折射率-温度变化率; $\frac{\partial L}{\partial T}$ 为腔长-温度变化率。

硅基材料的热弹系数比热光系数小两个数量级,因此,热弹效应可忽略不计。通过提前在各个温度点下标定谐振波长,并在待测温度下测量腔体透射峰位置,即可实现温度传感。

1.1 NIST研究进展

NIST的Ahmed首次将硅基微腔引入到温度计量,并在器件几何结构方面系统地研究了波导宽度、波导-微环间距、微环半径对腔体Q值与FSR的影响^[5]。结果表明,波导宽度大于600 nm,波导与微环间距约为130 nm,微环半径大于10 μm为稳定区,可获得低损耗、高灵敏、高一一致性的工作在1550 nm波长的传感器。如图2(a)所示,该团队在绝缘体上硅材料上制备出Q值为 5.2×10^4 的微环谐振腔^[6]。传统波长扫描测温方法记录整个透射光谱并拟合计算谐振频率,根据波长计0.1 pm分辨力以及77 pm/K的传感器灵敏度,Ahmed估算该方法测温分辨力约为1 mK。此外,他还提出将功率稳定的激光锁定在透射谱边沿,并利用透射谱平移引起的光功率变化测量温度改变,即边沿锁定测温法。如图2(b)所示,根据Allan方差预估该方法测温分辨极限可低至80 μK。

图3中,Ahmed研究了基于布拉格光栅以及一

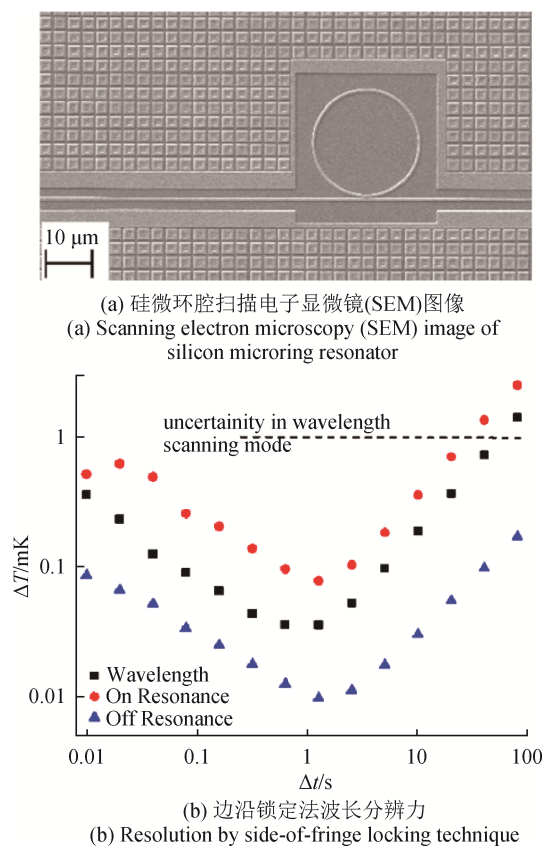


图2 NIST研制的硅基微环腔及其分辨率

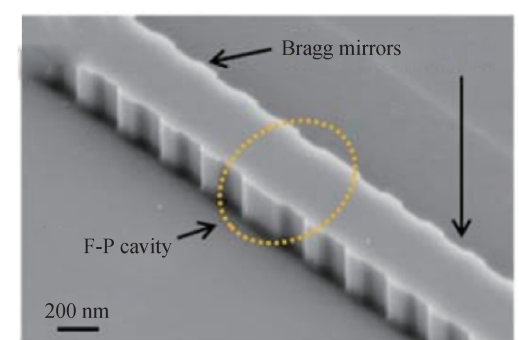
Fig.2 Silicon microring resonator developed by NIST and its resolution

维光子晶体结构的微腔温度传感器^[7], 分别实现了 3.1×10^3 和 2.6×10^4 的Q值。与回音壁模式微环腔体相比, 一维光子晶体微腔没有FSR限制且具有较高Q值, 因此可实现高分辨力、宽温区温度传感。

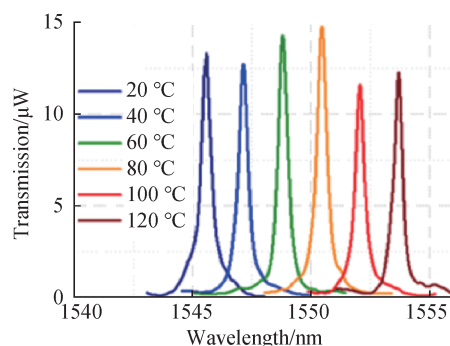
2018年, 该团队进一步实现基于垂直光栅耦合的微腔光子温度计封装, 器件实物如图4所示。对相同加工批次的光子温度计进行一致性评估并得出结论: 通过工艺控制可实现小于 0.2°C 的互换性, 达到与电阻温度计相同水平^[8]。同年, Ahmed 研究了强辐射环境下器件的稳定性, 研究结果表明在总辐射剂量 1 MGy 的条件下, 微腔透射光谱位置、Q值、FSR和灵敏度等器件特性未出现显著的系统性偏差^[9]。

1.2 欧洲 PhotOQuant 项目进展

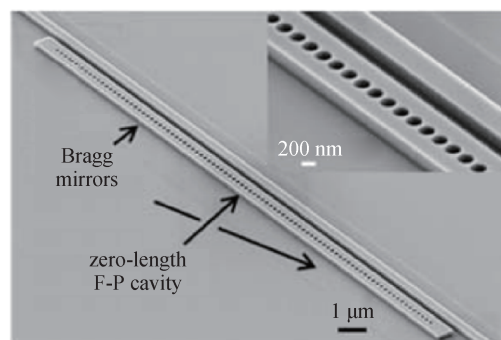
为实现可溯源至SI的微腔光子温度传感, 2021年德国联邦物理技术研究院(PTB)的Krennek提出利用HCN气室特征吸收谱线标定谐振峰位置, 如图5所示, 在保证读出速度与传统传感器相当的



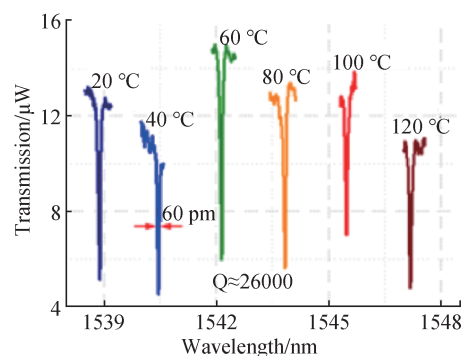
(a) 硅基片上布拉格光栅微腔SEM图像
(a) SEM image of silicon on-chip bragg grating microcavity



(b) 硅基片上布拉格光栅微腔随温度变化透射光谱
(b) Transmission spectrum of silicon on-chip bragg grating microcavity varied with temperature



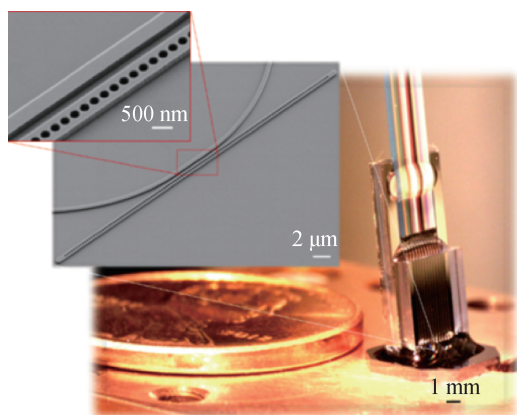
(c) 硅基一维光子晶体微腔SEM图像
(c) SEM image of silicon one-dimensional photonic microcavity



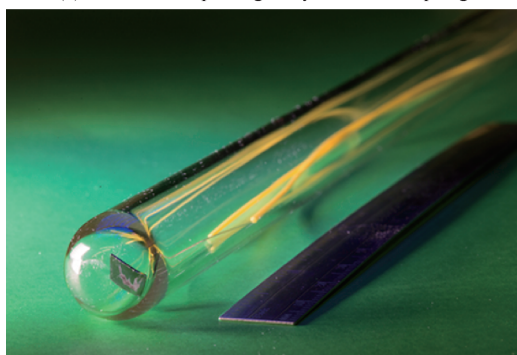
(d) 硅基一维光子晶体微腔随温度变化透射光谱
(d) Transmission spectrum of silicon one-dimensional photonic microcavity varied with temperature

图3 NIST研制的非微环腔体及其温度光谱响应

Fig.3 Non-microring cavities developed by NIST and their temperature-spectrum response



(a) 垂直耦合封装的传感探头
(a) Sensor head packaged by vertical coupling



(b) 光子温度计
(b) Photonic thermometer

图4 NIST研制的光子温度计

Fig.4 Photonic thermometer developed by NIST

情况下, 基于Q值为 1.5×10^6 的光学微腔实现了24 h内2.6 mK的系统稳定性, 以及90 °C测温范围内小于10 mK的测量重复性^[10]。

微腔光子温度传感器在测试过程中, 自热温升是影响其测温准确性的重要因素。西班牙微纳米技术研究所 Weituschat 对比了硅、金刚石和氮化镓三种材料制备的光学微环谐振腔, 通过多种有限元方法模拟了其温度分布, 预测了腔体谐振频率与温度系数。对三种材料微环腔体双光子吸收和相关的自热对温度测量精度的影响进行了分析。结果表明, 由于不存在固有的双光子吸收过程, 金刚石和氮化镓的自热要低于硅材料微腔^[11]。

1.3 其他国家计量院研究进展

为使回音壁模式微腔温度传感器的测温范围可以突破器件FSR的限制, 加拿大国家计量院(NRC)的Janz等人提出模式识别方法测量较宽波长范围内的全光谱, 利用不同模式的热光系数差异, 建立模式族谱与温度之间的映射关系(如图6), 对待测温度下的光谱进行自相关运算可以获得当前温度, 大幅扩展了测温范围^[12]。

此外, NRC的Dedyulin提出了一种采用超材料表面耦合光栅实现自由空间光与回音壁模式微腔

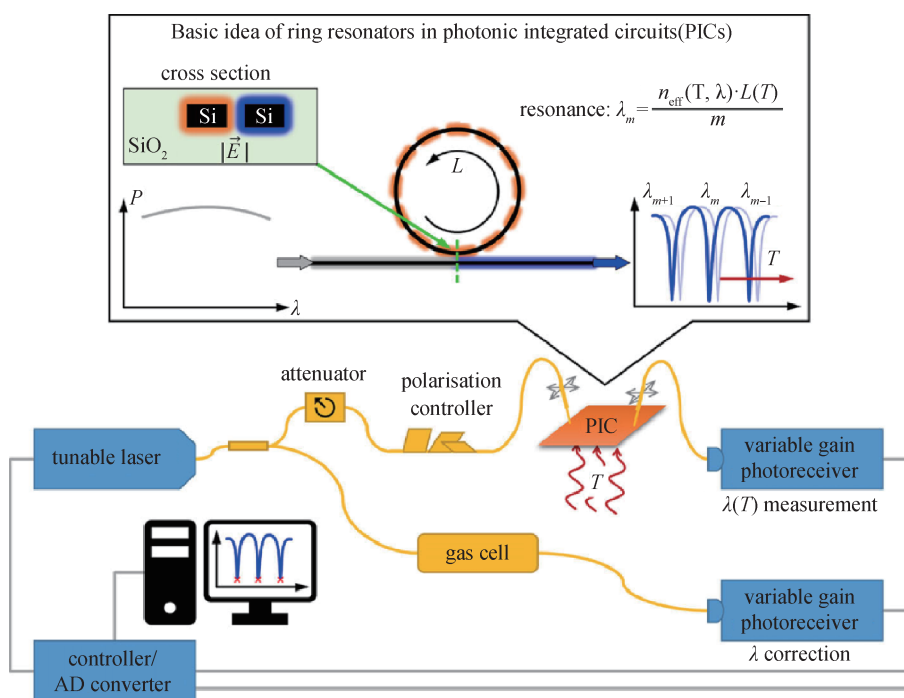


图5 PTB利用参考气室标定并实现光子温度传感

Fig. 5 Photonic sensing approach with reference gas cell calibration developed by PTB

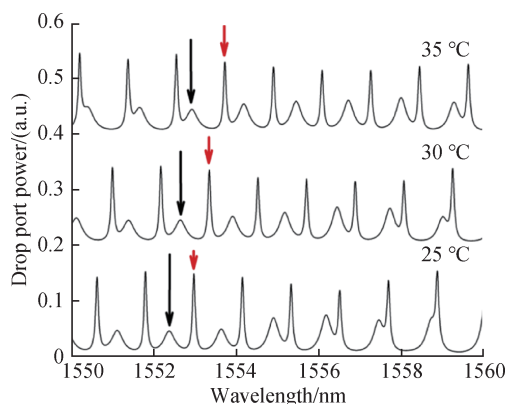


图6 NRC测量得到的腔体透射光谱模式族谱

Fig.6 Transmission spectrum mode families of microcavity measured by NRC

之间的光学耦合,这种耦合方法可以避免光纤直接固化到芯片表面产生的温度和应力弛豫效应。40℃至60℃的变温实验结果显示,测温重复性小于80 mK,10 h内漂移小于50 mK^[13]。

1.4 其他研究进展

传统的微腔测温依靠单一透射谱线,测温分辨率受到Q值限制,测温范围受到FSR限制。2021年华盛顿大学杨兰课题组利用微腔回音壁模式的多模式及其唯一性,基于条形码模式识别方法提高了微腔绝对测温精度与范围,分别达到0.002℃与60℃^[14],如图7所示。

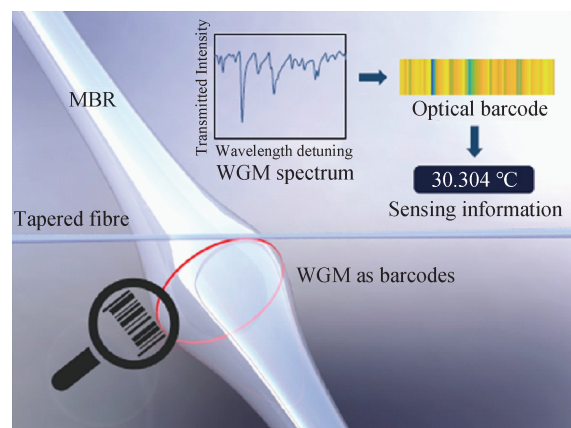


图7 华盛顿大学提出的条形码方法实现宽温区、高精度、绝对量值测量

Fig. 7 Wide range, high resolution and absolute temperature measurement by barcode approach proposed by University of Washington

中国科学技术大学的董春华课题组利用PDMS材料的导热特性,实现了灵敏度高达0.245 nm/K的微球腔温度传感器^[15]。在小型化系统方面,杨兰课题组早在2016年就实现了手机尺寸的小型化微腔温度测量系统^[16]。如图8所示,研究组于2018年首次实现面向物联网应用的小型化温度测量系统观念,搭载于无人机对开阔场景进行温度传感,实测温度范围10℃,但具有较大的测温偏差^[17]。

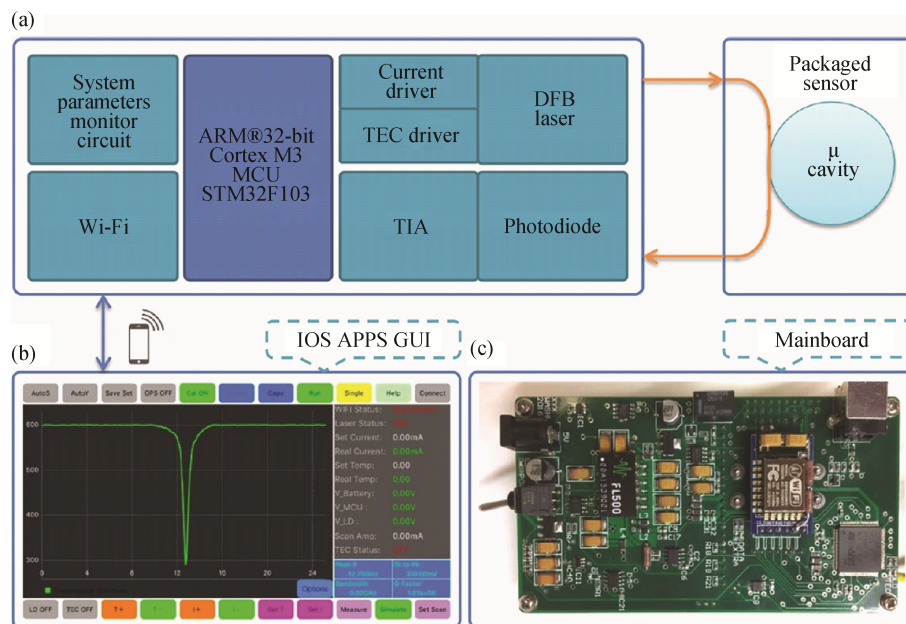


图8 华盛顿大学实现的小型化光子测温硬件系统

Fig.8 Miniaturized photonic thermometer hardware system implemented by University of Washington

在低温测量方面,上海交通大学的刘景全课题组基于硅基微环谐振腔在180 K的低温环境下首次实现了微腔温度传感,其测温灵敏度为63.9 pm/K,测温分辨力为31.3 mK^[18]。在多环境变量传感方面,浙江大学的时尧成课题组基于双偏振态的硅基微环谐振腔,实现了对于温度以及湿度的同时测量,其中TE模式温度灵敏度为69.0 pm/K^[19]。

2 基于光机械效应的微腔光子热力学温度测量

类似于通过电压读出电阻热涨落的电学噪声温度测量法,光学噪声温度测量方法利用光学频率测量热涨落在微腔上引起的机械振荡。在热平衡态下,腔体平均位移与热力学温度之间的关系为

$$\langle x^2 \rangle = \frac{1}{2} \int_0^\infty S_{xx}(\omega) d\omega = \frac{k_B T}{\omega^2 m_{\text{eff}}} \quad (2)$$

式中: m_{eff} 为腔体有效质量; ω 为机械振荡本征频率; $S_{xx}(\omega)$ 为随机热涨落力的率谱密度。

因此,测量机械振荡在宽谱内的功率谱密度积分并且通过测算方法得到有效质量,即可实现原级测温^[20]。

值得一提的是,有效质量与微腔的实际质量存在量级上的差异,其测算有两种方法:一是通过数值模拟方法获得;二是通过测量非线性过程中的阈值功率获得。两种方法均存在较大的不确定度,因此实现量子标定的测温或者通过已知温度点标定有效质量可分别实现原级测温或次级的原级测温。

2017年,NIST的Purdy针对机械腔体在光学读出中的相位噪声特性,以及振幅、相位噪声的关联关系,提出了一种互相关方法分离热噪声与光压散粒噪声的量子反向作用测量方法^[21]。其通过调整外差式测量系统的初始相位,并计算不同相位条件下的振幅-相位互相关函数,再根据涨落耗散定理,获得热噪声功率谱密度,进而求解其热力学温度。该方法的初衷是在室温热噪声条件下测量光学压力噪声,进而实现室温下的微腔量子传感。该方法首次实现了量子标定的微腔热力学原级测量,但是,由于其本质是准确提取光压散粒噪声,因此热噪声与光压散粒噪声的幅值量级

关系决定了测温的准确度。如图9所示,依据Allan方差推断,在室温条件下测温准确度仍具有K量级的偏差。

对于上述提到标定 m_{eff} 的测温方法,其逆过程是机械腔体量子基态冷却。2020年PhotOQuanT项目中的荷兰Delft理工大学团队面向室温下腔体量子基态冷却,设计了一种鱼骨结构的光机械腔体,如图10(a)所示。该方法突破了原有 10^{12} 量级的机械本征频率、机械品质因子带宽积,使得腔体冷却初始温度可提升至百K量级,如图10(b)所示,蓝色曲线代表1.2 mK基态光谱,实现1.2 mK的基态冷却。因此理论上,通过在三相点下的 m_{eff} 标定可实现室温测量^[22]。

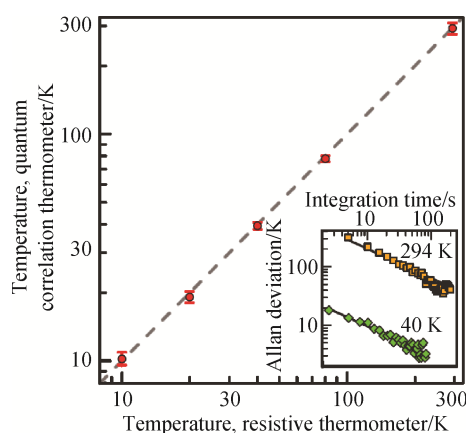


图9 NIST基于量子反向作用的室温原级热力学温度测量偏差

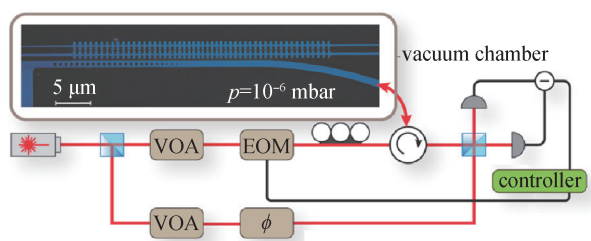
Fig.9 Error of the NIST proposed room-temperature thermodynamic temperature measurement by quantum back action

3 中国计量科学研究院微腔光子测温研究进展

中国计量科学研究院在2019–2021年制备了基于热折变效应的微腔光子学温度传感器,实测获得mK级测温分辨力,并首次提出基于法诺共振原理的亚mK量级测温分辨力提升方法,首次提出基于氮化硅微环腔体的亚mK级非线性自热温升抑制方法与技术。

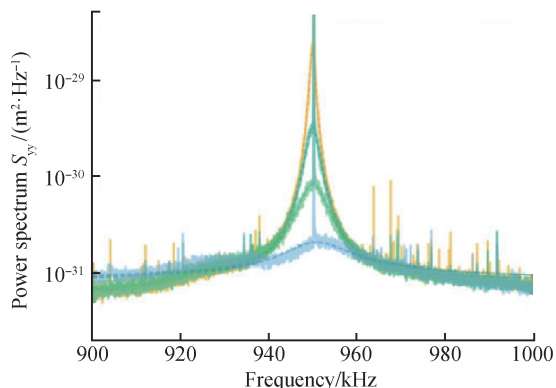
3.1 传感器制备与测试

课题组通过对硅材料微环腔与耦合光栅的几何参数仿真与设计,加工制备出单基模硅材料微环谐振腔,Q值为 7.6×10^4 ,实现与光纤之间光栅耦合封装,耦合效率31%。采用边沿锁定方法,



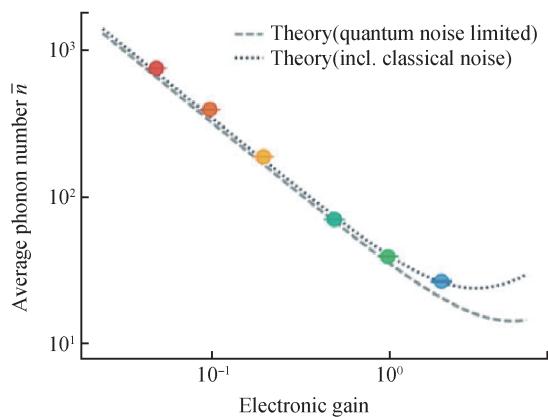
(a) 鱼骨结构腔体与测量光路

(a) Fish-bone structured microcavity and measurement system



(b) 冷却光谱

(b) Cooling spectrum



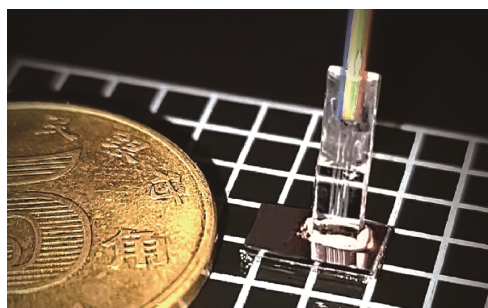
(c) 平均声子数

(c) Averaged phonon numbers

图10 Delft理工大学提出的热力学温度测量方法

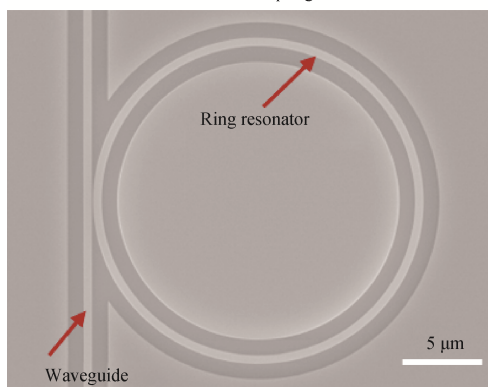
Fig.10 Thermodynamic temperature measurement approach proposed by Delft University

在实验光路中搭建基于AOM的入射光功率与偏振主动稳定回路，使光功率相对波动由5‰降低到2‰。采用边沿锁定法进行浴槽变温测试，利用PT100铂电阻作为温度测量参考进行实测分辨力验证。如图11所示，在温度升高10 mK左右时，铂电阻所测得温度变化趋势与微腔透射谱光功率变化趋势一致。采用稳定状态下采集的数据标准差作为测量分辨力，得到边沿锁定微腔光子测温系统实测分辨力为2.9 mK。器件可实现-30℃~



(a) 垂直耦合封装的光子温度传感探头

(a) Photonic temperature sensor head packaged by vertical coupling



(b) 硅基微环腔体与波导耦合SEM图

(b) SEM image of silicon microring resonator and waveguide coupling



(c) 垂直耦合光栅SEM图像

(c) SEM image of vertical coupling grating

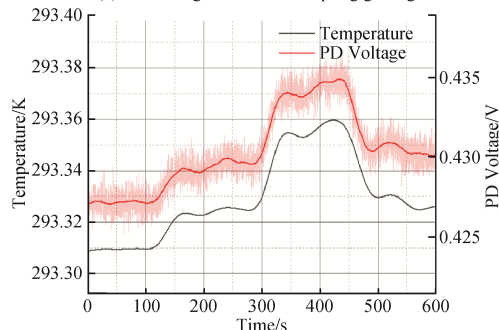
(d) 光子温度计与校准后的铂电阻温度计测温分辨力对比
(d) Comparison of resolutions between photonic thermometer and calibrated standard platinum resistance thermometer

图11 中国计量科学研究院制备的光子温度传感器及性能

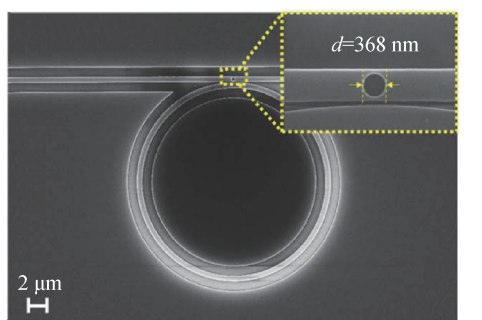
Fig.11 Photonic thermometer developed by NIM and its performance

120 °C的温度耐受范围,具有稳定的温度灵敏度与线性度^[23]。

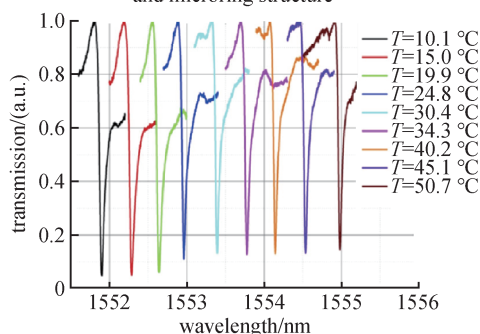
3.2 基于法诺共振的测温分辨力提升

基于边沿锁定的温度测量方法其分辨力依赖于透射谱斜率,而传统波导-微环结构传感器的透射光谱呈现对称的洛伦兹线型。为进一步提高透射谱斜率,课题组提出了一种基于法诺共振的亚mK级分辨力测温方法^[24]。该方法使用简单的微孔波导-微环结构实现法诺谐振。其特点是在宽温度范围内保持其高灵敏度和分辨力。

如图12所示,在波导耦合区引入空气孔,通过耦合区的有效折射率控制连续态谐振的初始相位,从而获得特定的法诺参数和高品质因数的法诺共振。利用热折射效应和热弹性效应引起法诺共振光谱的波长偏移,同时波导-微环结构确保了离散态谐振和连续态谐振的特征频率之间的差异在宽温度范围内是一个常数。因此,共振的法诺参数和品质因数具有很高的稳定性。



(a) 法诺共振波导微环器件SEM图像
(a) SEM image of Fano resonance waveguide and microring structure



(b) 法诺共振温度光谱响应
(b) Fano resonance temperature-spectrum response

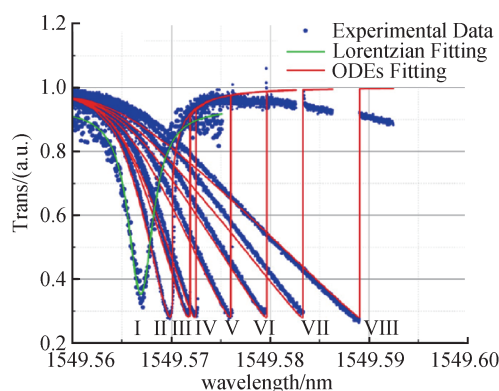
图12 中国计量科学研究院提出的基于法诺共振的分辨力提升方法

Fig.12 Resolution enhancement method based on Fano resonance proposed by NIM

实验结果表明,该结构的品质因数和法诺参数在较宽的温度范围内保持不变。波长-温度灵敏度为75.3 pm/°C,10 °C至90 °C范围内的测温分辨力为0.25 mK。

3.3 非线性自热温升抑制

传统基于微腔的传感器依赖于高品质因数带来的高精度。但与铂电阻等电学测温方法的线性特性不同,由于微腔具有高Q值,光子吸收具有强烈的非线性特性,因此mW量级测量功率甚至会引起K级别的腔内温升,引入严重偏差。为了评价微腔腔内自热带来的系统误差,课题组提出了一种微腔光子温度计等效自热温升评价方法并实现了基于Si₃N₄微环谐振器的mK量级自热效应抑制^[25]。



(a) 氮化硅微环等效自热温升光谱拟合
(a) Si₃N₄ microcavity based equivalent self-heating spectrum fitting

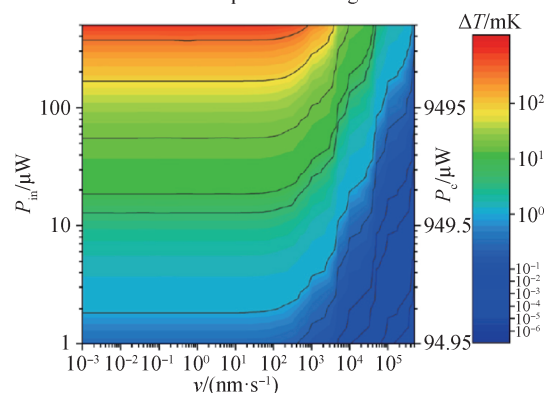


图13 中国计量科学研究院提出的mK级自热温升抑制方案
Fig.13 mK level self-heating mitigation method proposed by NIM

课题组通过分析Si₃N₄微环谐振腔的腔内动态光场及热过程,建立了Si₃N₄微环谐振器的等效自热温升模型。如图13(a)所示,通过热展宽透过的拟合测算了有效吸收损耗和热弛豫时间,并

基于微腔腔内热力学模型数值研究了输入功率、扫描速度、峰值腔内功率和峰值等效自热温升之间的关系,并遍历扫描给出全局优化策略,结果如图13(b)所示。通过控制探测光的输入功率和扫描速度,获得了极低的自热温升245 μ K。在当前校准条件下,预测温升具有负偏差且不超过8%。

4 结论与展望

随着CCT新兴测温技术任务组的成立,硅基微腔光子测温得到了主要发达国家计量院的深入研究。硅基微环器件品质因数已达 10^6 量级、测温灵敏度80 pm/K,测温动态范围大于100 K,具有较高的稳定性与互换性,在极端环境场景硅基光子测温有望挑战电学测温性能,具有广泛的应用前景。在协议温度测量方面,亟需发展突破FSR限制的宽温区、高精度、绝对量值测量方法。在热力学温度测量方面,由于互相关测量在室温条件下热噪声显著高于光压噪声,因此仍需发展新量子标定的原级测温方法。值得一提的是,突破芯片级量子计量标准中的片上光谱仪与微腔光学频率梳,从根本上提升光谱分辨性能,是提升小型化、实用化硅基微腔光子温度计的必由之路。

参考文献

- [1] DUAN Y, PICARD S. Consultative Committee for Thermometry (CCT)[EB/OL]. <https://www.bipm.org/en/committees/cc/cct/wg/cct-tg-cth-et>, 2021-11-17.
- [2] CCT WORKING GROUPS. Coordinating the world-wide measurement system to ensure comparable and internationally accepted measurement results[EB/OL]. <https://www.bipm.org/utis/en/pdf/CCT-strategy-document.pdf>.
- [3] BRIAUDEAU S. Photonic and optomechanical sensors for nanoscaled and quantum thermometry: The EU Project PhotOQuanT[C]//2018 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2018). 2018.
- [4] TAN Y, DAI D. Silicon microring resonators[J]. Journal of optics, 2018.
- [5] KLIMOV N, BERGER M, AHMED Z. Towards reproducible ring resonator based temperature sensors[J]. Sensors & transducers, 2015, 191(8): 63.
- [6] 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.
- [7] KLIMOV N N, PURDY T P, AHMED Z. On-chip integrated silicon photonic thermometers[J]. Sensors & transducers, 2015, 191(8): 67.
- [8] KLIMOV N, AHMED Z. Ring resonator thermometry[C]//2016 IEEE Photonics Conference (IPC), 2016.
- [9] AHMED Z, CUMBERLAND L T, KLIMOV N N, et al. Assessing radiation hardness of silicon photonic sensors[J]. Scientific reports, 2018, 8(1): 1-7.
- [10] TRISTAN B, STEPHAN K, ANDREA C, et al. Photonic and optomechanical thermometry[J]. 2022, 3(2): 159-176.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] DEDYULIN S, TODD A, JANZ S, et al. Packaging and precision testing of fiber Bragg grating and silicon ring resonator based thermometers: current status and challenges[J]. Measurement science and technology, 2020, 31(7): 074002.
- [14] LIAO J, YANG L. Optical whispering-gallery mode barcodes for high-precision and wide-range temperature measurements[J]. Light: science & applications, 2021, 10(1): 1-11.
- [15] ZHOU Z, SHU F, SHEN Z, et al. High-Q whispering gallery modes in a polymer microresonator with broad strain tuning[J]. Science China physics, mechanics & astronomy, 2015, 58(11): 1-5.
- [16] XU X, JIANG X, ZHAO G, et al. Phone-sized whispering-gallery microresonator sensing system[J]. Optics express, 2016, 24(23): 25905-25910.
- [17] XU X, CHEN W, ZHAO G, et al. Wireless whispering-gallery-mode sensor for thermal sensing and aerial mapping[J]. Light: science & applications, 2018, 7(1): 1-6.
- [18] YOU M, LIN Z, LI X, et al. Chip-scale silicon ring resonators for cryogenic temperature sensing[J]. Journal of

- lightwave technology, 2020, 38(20): 5768–5773.
- [19] DING Z, LIU, P, CHEN J, et al. On-chip simultaneous sensing of humidity and temperature with a dual-polarization silicon microring resonator [J]. Optics express, 2019, 27(20): 28649–28659.
- [20] BRIANT T, KRENEK S, CUPERTINO A, et al. Photonic and optomechanical thermometry [J]. Optics, 2022, 3(2): 159–176.
- [21] PURDY T P, GRUTTER K E, SRINIVASAN K, et al. Quantum correlations from a room-temperature optomechanical cavity [J]. Science, 2017, 356(6344): 1265–1268.
- [22] GUO J, NORTE R, GRÖBLACHER S. Feedback cooling of a room temperature mechanical oscillator close to its motional ground state [J]. Physical review letters, 2019, 123(22): 223602.
- [23] 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.
- [24] ZHANG C, KANG G, XIONG Y, et al. Photonic thermometer with a sub-millikelvin resolution and broad temperature range by waveguide-microring Fano resonance [J]. Optics express, 2020, 28(9): 12599–12608.
- [25] ZHANG C, KANG G G, WANG J, et al. Photonic thermometer by silicon nitride microring resonator with millikelvin self-heating effect [J]. Measurement, 2020, 188: 110494.

(本文编辑:朱俊真)



第一作者: 潘奕捷 (1980—), 男, 副研究员, 博士, 主要研究方向为硅基微腔光子测温及芯片级量子计量。