

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2312167

基于微纳光纤谐振环的温度传感器研究^{*}

夏 凤, 杨乃凡, 林倩如, 杨力凝, 刘 博

(沈阳工业大学信息科学与工程学院 沈阳 110870)

摘 要:该项工作制作并验证了基于微纳光纤结型谐振环的高灵敏度且扩大测量范围的温度传感器。在微纳光纤谐振环中产生多个模式并参与谐振, 多个模式谐振的光谱相互叠加, 形成带包络的游标光谱。通过提取游标光谱的包络线, 实现高灵敏度的温度测量, 灵敏度高达 $-10\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ 。但计算得到利用游标光谱时的温度测量范围仅约为 4°C 。为解决测量范围过小的问题, 将包络光谱与单一频率组分对应的谐振光谱相结合, 使测量范围扩大至约 20°C 。相比于单一频率组分对应的谐振光谱, 利用游标包络光谱实现了灵敏度约 1 600 倍的放大。该方案利用游标效应提高温度测量灵敏度的同时, 利用单一频率组分对应的谐振光谱扩大了游标光谱的温度测量范围, 提高了传感器的性能和实用性。

关键词: 光纤传感器; 微纳光纤谐振环; 游标光谱; 温度测量; 高灵敏度; 测量范围扩展

中图分类号: TH741 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.4035

Research on the temperature sensor based on microfiber resonator

Xia Feng, Yang Naifan, Lin Qianru, Yang Lining, Liu Bo

(College of Information Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: This work fabricates and demonstrates a temperature sensor with high sensitivity and an expanded measuring range based on the microfiber knot resonator. Multiple-modes are generated in the microfiber knot resonator and participate in the resonance. The spectra of multiple mode resonance is superimposed on each other to form a vernier spectrum with envelope. By extracting the envelope of the vernier spectrum, high-sensitivity temperature measurement can be achieved with the sensitivity of up to $-10\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$. However, the temperature measurement range using the vernier spectrum is calculated to be only about 4°C . To solve the problem of too small measurement range, the envelope spectrum and single frequency component spectrum are combined to expand the measurement range to about 20°C . Compared with the resonance spectrum corresponding to the single frequency component, the vernier envelope spectrum achieves an amplification of sensitivity of about 1 600 times. This scheme uses the vernier effect to improve the sensitivity of temperature measurement. Meanwhile, the temperature measuring range of the vernier spectrum is expanded by using the resonant spectrum corresponding to a single frequency component, which improves the performance and practicability of the sensor.

Keywords: optical fiber sensor; microfiber resonator; vernier spectrum; temperature measurement; high sensitivity; measurement range expanding

0 引 言

光纤传感器具有体积小、重量轻、抗电磁干扰、本质安全等特性, 被学者广泛研究并用于温度^[1-2]、湿度^[3-4]、磁场^[5-7]、气体浓度^[8-9]等参数的测量。微纳光纤传感器因具有倏逝场强、柔韧性好和弯曲损耗低等特点而受到

广泛关注^[10], 主要包括微纳光纤干涉仪^[11]、微纳光纤耦合器^[12]、微纳光纤谐振器^[13]、微纳光纤光栅^[14]等, 其中微纳光纤谐振器因其光谱具有较高的品质因子受到学者的广泛研究。2014 年, Yang 等^[15]提出了基于微纳光纤结型谐振环(microfiber knot resonator, MKR)的海水温度传感器, 谐振光谱的品质因子达到 10^4 , 温度测量灵敏度最大约 $22.81\text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ 。2019 年, Xiao 等^[16]提出了利用

收稿日期: 2023-11-17 Received Date: 2023-11-17

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(62103290)、辽宁省教育厅面上项目(LJKZ0137)、辽宁省科技厅联合计划项目(2023JH2/101700277)资助

MKR 和光纤布拉格光栅实现温度和折射率的同时测量, MKR 的温度灵敏度为 $12.1 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ 。可以看出, 虽然 MKR 谐振光谱的品质因子很高, 但其测量灵敏度较低。同年, Liu 等^[17] 提出了高热光系数的聚二甲基硅氧烷 (polydimethylsiloxane, PDMS) 封装微纳光纤谐振环, 将 MKR 结合温度敏感材料, 以提高温度测量灵敏度, 但其灵敏度仍然较低, 为 $-42 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ 。此外, 游标效应也是提高光学传感器灵敏度的有效方式之一。Xu 等^[18] 于 2015 年提出了双微纳光纤谐振环级联的游标效应传感结构, 2017 年提出了具有游标效应且灵敏度可调控的 θ 形微纳光纤谐振环折射率传感器^[19]。2021 年, Dang 等^[13] 在单个 MKR 中产生游标效应, 实验证明了 PDMS 封装的 MKR 的游标光谱温度灵敏度达 $-8.48 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ 。2022 年, Yang 等^[20] 利用两个 MKR 级联产生游标效应, 游标光谱的温度灵敏度为 $0.92 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ 。虽然通过结合敏感材料, 以及引入游标效应等方式可使光纤传感器获得较高的测量灵敏度, 但由于存在周期性光谱, 其测量范围通常被限制在有限的范围内。根据自由光谱范围除以灵敏度, 可计算出温度检测范围。灵敏度为 $12 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ 的 MKR^[16] 的温度测量范围约为 124°C ; 灵敏度为 $-42 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ 的 MKR^[17] 的温度测量范围约为 12°C ; 灵敏度为 $-8.48 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ 的游标效应 MKR^[13] 的温度测量范围约为 7°C ; 灵敏度为 $920 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ 的 MKR^[20] 的温度测量范围约为 38°C 。由此可以看出, 测量范围大的 MKR 的测量灵敏度低, 而测量灵敏度高的 MKR 测量范围小, 其高灵敏度与大测量范围之间存在一定的制约关系。

基于此, 本文制作并验证了基于 MKR 的高灵敏度且扩大范围的温度传感器, 旨在保证 MKR 高灵敏度的同时, 扩大其测量范围。在结型谐振环内多个谐振模式产生游标光谱, 通过利用游标包络光谱实现灵敏度的放大与高灵敏测量, 灵敏度高达 $-10 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$, 利用自由光谱范围除以温度灵敏度, 计算得到利用游标光谱时的温度测量范围仅约为 4°C 。为了解决测量范围过小的问题, 基于频谱分析与带通滤波, 提取谐振环的单一频率组分对应的谐振光谱, 结合包络光谱与单一频率组分对应的谐振光谱, 使测量范围由约 4°C 扩大至约 20°C 。实现在不增加传感结构复杂度的同时, 扩大了高灵敏度 MKR 传感器的测量范围, 同时也为其他光纤传感结构扩大测量范围提供了参考思路。本文实现高灵敏度的核心原理为利用多个谐振光谱叠加产生游标放大效应, 实现灵敏度的放大, 获得高灵敏度; 本文在高灵敏度的前提下, 同时实现大量程的核心原理为利用高灵敏度但小测量范围的包络光谱与低灵敏度但大测量范围的单频组分谐振光谱优势互补, 大测量范围的单频组分谐振光谱用于指示量程, 高灵敏度的包络光谱用于指示高灵敏度的精确测量。该传感器具有 0.001°C 数量级的高分辨率和几十摄氏度的

量程, 适用于用于磁热疗癌症治疗过程中的温度监测^[21], 在磁热疗癌症治疗过程中, 为避免对正常组织的伤害并有效杀伤癌细胞, 需对加热区精确控温, 温度通常控制在 $42^{\circ}\text{C} \sim 55^{\circ}\text{C}$ 范围内。

1 结构与原理

1.1 结构制作

PDMS 封装的微纳光纤谐振环结构及制作过程如图 1 所示。首先, 利用拉锥系统 (Idealphotonics, IPCS-5000-SMT) 将普通单模光纤加热, 并拉制成锥腰区均匀且直径约为几微米的微纳光纤, 如图 1(a) 所示。然后, 将微纳光纤进行弯曲、打结, 如图 1(b) 和 (c) 所示, 在微纳光纤的均匀锥腰区得到一个大的环。然后通过拉动微纳光纤的两个自由端来调整环的大小, 如图 1(d) 所示。最后将微纳光纤谐振环两端固定在载玻片上, 用胶体与固化剂比例为 10:1 的 PDMS 混合剂对环形区域封装固定, 并放置在 80°C 的恒温箱中固化 2 小时, 得到如图 1(e) 所示的 PDMS 封装的微纳光纤谐振环传感结构, PDMS 的厚度约为 3 mm , 在波长为 589.3 nm , 温度为

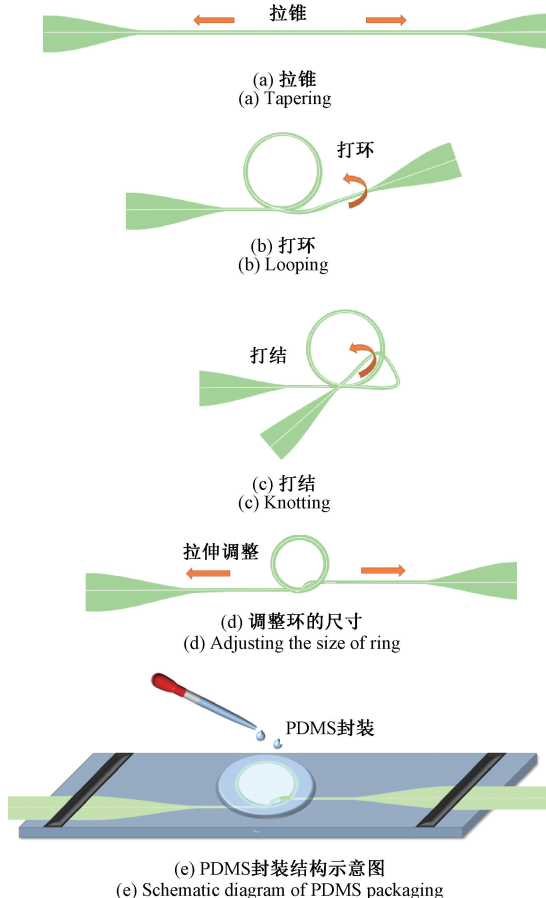


图 1 PDMS 封装的微纳光纤谐振环制作过程示意图
Fig. 1 Diagram of fabrication process of PDMS-packaged MKR

24℃时,PDMS的材料折射率约为1.405。由于PDMS材料的折射率低于光纤材料折射率,与PDMS结合后,微纳光纤结构的损耗仍可以处于较低水平。

由于拉锥过程采用拉锥系统进行,使微纳光纤锥的制作一致较好。为了保证传感器制作的一致性,在打环的过程中,可将锥形光纤探针作为辅助调整工具,用锥形光纤探针调节环的形态、尺寸,以及在微纳光纤锥上的位置,此外,可搭建在线的显微观测系统,使打环操作及调整过程在显微镜下操作,在观测环的形态、尺寸、以及位置的同时,对其做进一步的调整,以保证传感器制作的一致性。

1.2 结构原理

当宽带光入射到传感结构时,以基模式入射光将在锥形过渡区被激发到高阶模。当拉制的微纳光纤保持圆对称特性时,光场应该是呈类高斯型对称分布,由于 HE_{1n} 模式与 HE_{11} 模式具有相同的角向方位对称特性,而其他模式与 HE_{11} 模式不具有相同的角向方位对称特性,因此只能激发 HE_{1n} 模式。FIELDING A J等人在1999年通过用聚焦的离子束切平多模微米光纤腰区,然后利用电荷耦合器件(charge coupled device, CCD)和光束分析仪观察多模微米光纤的光场分布,实验证明了多模微米光纤中只会存在 HE_{1n} 模式^[22]。在微纳光纤谐振环的打结处,即两部分微纳光纤耦合的区域,一部分光耦合到谐振环中,不同模式独立地在环中循环传播,谐振输出的光强 I_{output} 可表示为:

$$I_{\text{output}} = \sum_{n=1}^N (1 - \gamma_n) I_{HE_{1n}} \quad (1)$$

其中, N 代表参与谐振的模式总个数, n 代表第 n 个模式($1 \leq n \leq N$), γ_n 为耦合强度损失比例。 $I_{HE_{1n}}$ 表示在谐振环中 HE_{1n} 模式的谐振谱强度,可表示为^[23]:

$$I_{HE_{1n}} = 1 - \frac{(1 - K_{HE_{1n}})^2}{(1 + K_{HE_{1n}})^2 + 4K_{HE_{1n}} \sin^2 \left(\frac{\beta_{HE_{1n}} L}{2} - \frac{\pi}{4} \right)} \quad (2)$$

式中: $K_{HE_{1n}}$ 为耦合区域 HE_{1n} 模式的耦合强度比; $\beta_{HE_{1n}}$ 为 HE_{1n} 模式的传播常数; L 是环形区域的周长。

由此可知,不同模式独立地在微纳光纤谐振环中循环传播,并产生谐振现象,不同模式的谐振光谱经叠加输出。

2 实验与结果

2.1 温度测量实验

通过温度测量实验研究了微纳光纤谐振环的温度响应特性,温度测量实验系统如图2所示。温度测量实验系统包括宽谱光源(KG-ASE-CL,北京康冠),光谱分析仪

(AQ6370D,日本横河),微纳光纤谐振环,恒温箱,铂电阻温度计(F200,英国ASL)。光谱分析仪的分辨力设置为0.02 nm,在1520~1610 nm的波长范围内采样次数为22501次,采样间距为0.004 nm。微纳光纤谐振环的一端连接宽谱光源,另一端连接光谱分析仪。将微纳光纤谐振环放入温度可控的恒温箱中,由于恒温箱的控温精度较低(0.1℃),因此将分辨率为0.001℃的铂电阻温度计放入恒温箱中靠近微纳光纤谐振环的位置,作为参考温度计,用于光纤传感器的标定。控制恒温箱的温度逐步升高,当温度稳定在恒温箱设定的温度值时,且当铂电阻温度计的示数稳定不变时(持续时长约为几秒钟)采集并保存输出光谱。

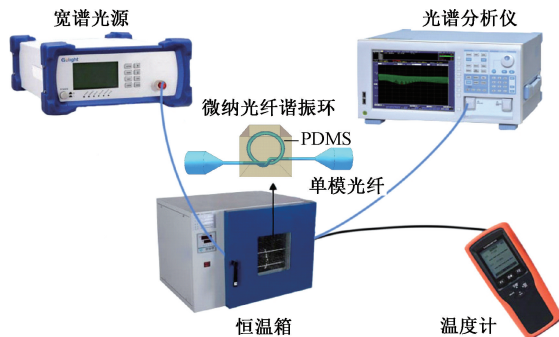
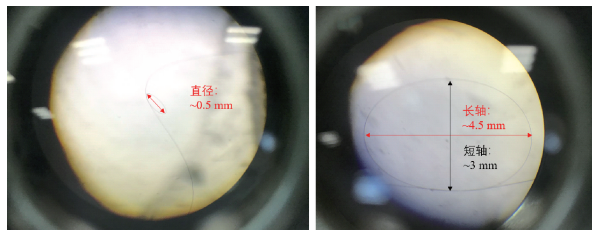


图2 温度传感实验系统

Fig. 2 Temperature sensing experimental system

2.2 实验结果与分析

实验制作的两个谐振环显微镜照片分别如图3(a)和(b)所示,两个谐振环分别命名为谐振环1和谐振环2。谐振环1的直径约为0.5 mm,谐振环2的长轴和短轴尺寸分别约为4.5和3 mm。



(a) 谐振环1
(a) Resonant ring 1

(b) 谐振环2
(b) Resonant ring 2

图3 实验制作谐振环的显微照片

Fig. 3 Micrographs of the fabricated resonant rings

不同温度下采集的微纳光纤谐振环1和微纳光纤谐振环2的透射光谱分别如图4(a)和(b)所示。可以看出谐振环1和谐振环2的透射光谱均为较密的周期性光谱,且较密的光谱上存在着明显的包络。由于谐振环2的环区尺寸大于谐振环1的环区尺寸,谐振环2的光谱周期小于谐振环1的光谱周期,表现为谐振环2的透射

光谱比谐振环 1 的透射光谱更密。谐振环 1 和谐振环 2 的较密光谱周期分别为 0.86 和 0.148 nm。由于包络光谱是由微纳光纤谐振环内多个谐振模式产生的多个谐振光谱叠加而形成,使得到的包络光谱不像仅由两个不同周期的光谱叠加而成的包络光谱的周期性好,在不同波长处的谐振光谱叠加情况不同,因此包络线在不同波长处的光谱形态存在一定的差异,使得包络线的幅值不均匀、周期不明显,且条纹对比度较低。

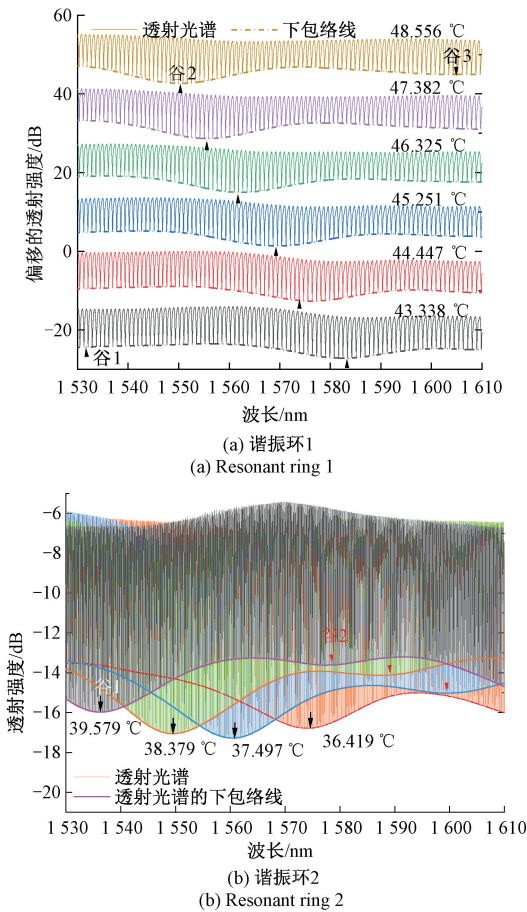


图 4 不同温度下的透射光谱及透射光谱的下包络线
Fig. 4 Transmission spectrum and lower envelope of transmission spectrum at different temperatures

对两个谐振环的透射光谱进行快速傅里叶变换 (fast Fourier transform, FFT), 得到对应的频谱图, 如图 5 所示。由图 5(a) 可以看出, 谐振环 1 的频谱图中包含 3 个清晰的峰值, 代表谐振环 1 的透射光谱由具有 3 个不同频率组分的谐振光谱叠加而成, 3 个不同频率组分的谐振光谱由 3 个不同模式的光在谐振环中传输并谐振产生。3 种谐振模式的传播常数差异较小, 导致 3 种谐振频谱的光谱周期差异较小, 因此叠加后产生游标放大效应, 在透射光谱中观测到了高频谐振光谱的包络。由图 5(b) 可以看出, 谐振环 2 的频谱图中包含更多的峰

值, 说明有更多不同频率组分的谐振光谱产生并相互叠加。不同频率组分的谐振光谱相互叠加产生了具有包络现象的游标光谱, 对游标光谱的下包络线进行提取, 如图 4(a) 中的虚线和图 4(b) 中的粗实线所示。可以看出谐振环 1 和谐振环 2 的包络线均为具有大周期的光谱, 且随着温度的升高, 包络线左移, 即向短波长方向移动。由图 4(a) 中 43.338 °C 时的包络线可以看出, 包络线的谷 1 和谷 2 间波长差约为 53 nm, 且随着温度的升高, 谷 1 移出所观测的波长范围, 当温度升高到 48.556 °C 时, 包络线中有新的谷移动到观测波长范围内, 即图中标记的谷 3。谷 2 和谷 3 之间的波长差约为 55 nm。由图 4(b) 中 39.579 °C 时的包络线可以看出, 包络线的谷 1 和谷 2 间的波长差约为 42 nm, 即包络光谱的周期约为 42 nm。读取不同温度下包络光谱不同波谷的波长, 并通过线性拟合建立包络谷波长与温度间的线性关系, 结果如图 6 所示。

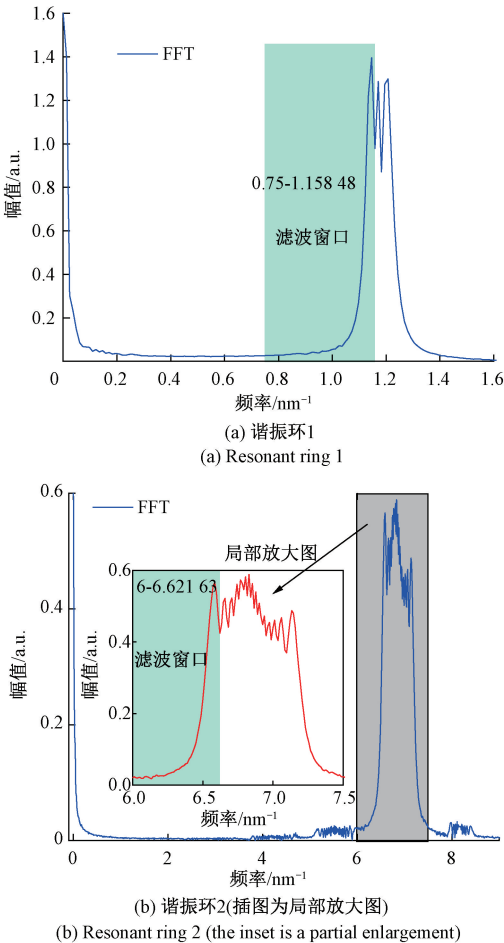


图 5 对透射光谱 FFT 所得频谱图
Fig. 5 Frequency spectra obtained by FFT of transmission spectra

如图 6 所示, 对于谐振环 1, 当温度在 35 °C ~ 55 °C 范围内时, 包络光谱共有 3 个波谷出现在观测的 1 530 ~

1 610 nm 波长范围,即宽带光源的波长范围,分别为图 4(a) 标记的谷 1,谷 2 和谷 3,3 个谷的波长与温度拟合关系分别为: $y_1 = 1\,815.53 - 6.22x$, $y_2 = 1\,844.62 - 6.03x$, $y_3 = 1\,826.37 - 4.51x$,如图 6(a) 所示。根据线性拟合线的斜率可知,谐振环 1 的不同包络谷的温度灵敏度分别约为 -6.22 , -6.03 和 $-4.51\text{ nm}/^\circ\text{C}$ 。同样,对谐振环 2 的包络光谱的不同谷波长与温度进行线性拟合,得到对应的波长与温度间函数关系。

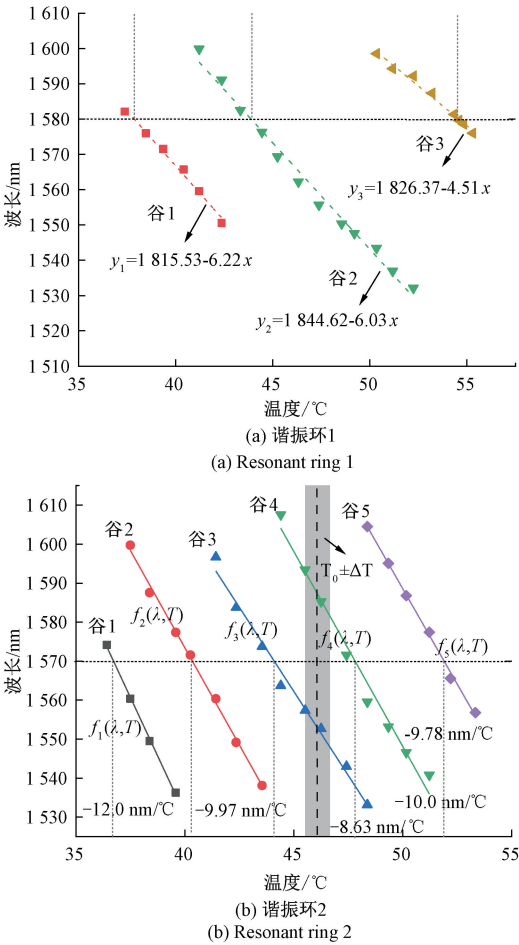


图 6 透射光谱下包络线的不同谷的波长与温度间的线性拟合关系

Fig. 6 Linear fitting relationships between wavelength of different dips of the lower envelope of the transmission spectrum and temperature

由图 6(b) 可知,谐振环 2 的不同包络谷的温度灵敏度分别约为 -12.0 , -9.97 和 $-8.63\text{ nm}/^\circ\text{C}$, -10.0 和 $-9.78\text{ nm}/^\circ\text{C}$,远高于其他微纳光纤谐振环的温度灵敏度^[15,17]。具有高灵敏度主要是由 PDMS 的高热光系数,以及游标效应的放大作用贡献的。图 6 中同一个谐振环包络中不同波谷的温度灵敏度不同是由于包络光谱是由多个具有不同周期的谐振光谱叠加而成(由图 5 所示的

频谱图可以看出)。由于多个谐振光谱的叠加,使得到的包络光谱不像仅由两个不同周期的光谱叠加而成的包络光谱的周期性好,在不同波长位置下的包络谷具有不同的谐振光谱叠加情况,此外,谐振光谱的周期及灵敏度也与波长有关,因此不同包络谷的光谱形态及温度灵敏度存在一定的差异。这将使通过不同包络谷得到的温度值之间存在一定的微小差异。通过求不同包络波谷所指示的温度值的算术平均值可降低该现象对测量结果造成的影响。值得注意的是,由于包络光谱具有多个波谷,且具有较高的温度灵敏度,即包络光谱随着温度的变化移动量较大,当温度变化超过一定范围时,将出现不同的包络谷“混叠”现象。如图 4(b) 所示,当温度由 39.579°C 继续升高时,包络光谱将继续向左移动,将会与 36.419°C 时的包络谱谷 1 处于相同的波长位置。在 $35^\circ\text{C} \sim 55^\circ\text{C}$ 温度范围内,存在 3 个温度值使谐振环 1 的包络谷波长位于 $1\,580\text{ nm}$ 处,存在五个温度值使谐振环 2 的包络谷波长位于 $1\,570\text{ nm}$ 处,如图 6 中的虚线所示。因此,无法通过读取波长值判断所观测到的波谷为哪个波谷,即出现波谷“混叠”现象。因此,可识别的温度测量范围受到此现象的限制,对于谐振环 1,可识别的温度测量范围大小约为 10°C ,对于谐振环 2,可识别的温度测量范围大小约为 4°C 。

为了扩大可识别的温度测量范围,提出了将具有高灵敏度但小测量范围的游标包络光谱与具有低灵敏度但大测量范围的单频对应的谐振光谱相结合的方式,保证游标包络光谱的高灵敏度优势同时,扩大其测量范围。基于对图 5 所示频谱的分析,通过对图 4 的透射光谱应用 FFT 带通滤波器,滤波后即可获得单个频率组分(即图 5 中单个峰值)对应的透射谐振光谱,结果分别如图 7(a) 和(b) 所示。谐振环 1 和谐振环 2 的单频组分对应的滤波光谱的自由光谱范围,即光谱周期分别为 0.89 和 0.15 nm 。对谐振环 1 和谐振环 2 设置带通滤波频率窗口分别为 $0.75 \sim 1.15848\text{ nm}^{-1}$ 和 $6 \sim 6.62163\text{ nm}^{-1}$,如图 5 中矩形阴影区域所示。只要保证下限频率处的幅值接近于 0,上限频率处的幅值为局域极小值(即两个峰值交界处的频率),FFT 带通滤波器滤波窗口宽度的选择对滤波结果几乎没有影响。不同温度下谐振环透射谱对应的频谱几乎没有改变,因此,不同温度对单个频率组分对应的透射谱的提取没有影响。此外,当滤波窗口选择的是滤出频谱最右边峰时,所得出结果与滤出频谱最左边峰时结果接近。谐振环 1 的单频组分对应的滤波光谱随着温度的升高向短波长方向移动,谐振环 2 的单频组分对应的滤波光谱随着温度的升高向长波长方向移动。两个谐振环的单频组分对应的滤波光谱随着温度的升高移动方向不同,且灵敏度数值相差较大,可能是由于两个谐振环的形态及 PDMS 封装状态不同(如图 3 所示,谐振环 1 为垂直于状

态,谐振环2为水平状态),且两个环的尺寸相差较大(圆形谐振环1的直径约为0.5 mm,椭圆形谐振环2的长轴约为4.5 mm,短轴约为3 mm)造成的。

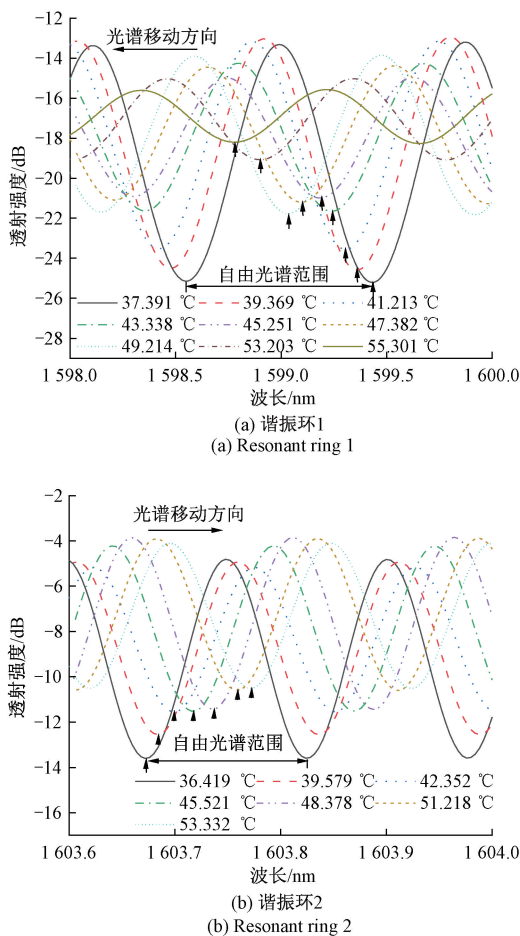


图7 带通滤波所得不同温度下的单频组分对应的谐振光谱

Fig. 7 Resonant spectra corresponding to the single frequency component obtained by bandpass filtering at different temperatures

当温度由约35℃升高至约55℃时,单频组分对应的滤波光谱的波长移动量均未超过一个自由光谱范围。单频组分对应的滤波光谱的波长与温度间的线性拟合关系如图8所示,谐振环1和和谐振环2的单频对应的谐振光谱温度灵敏度分别为-33.11和6.08 pm/℃。游标包络光谱与单频对应的谐振光谱的结合方式为,首先将单频组分对应的滤波光谱的波谷波长值代入对应的线性函数关系式中,得到温度测量值 T_0 。由于单频组分对应的滤波光谱的灵敏度不高,由其确定的温度测量值 T_0 不是很精确,因此将温度 T_0 扩展为小的温度区间 $T_0 \pm \Delta T$ (其中 ΔT 的值依据实验经验确定),如图6(b)中矩形阴影所示,确定游标包络光谱在观测波长窗口(1 530~1 610 nm)范围内与

$T_0 \pm \Delta T$ 温度区间存在交集的包络谷及其波长-温度函数关系 $f_1(\lambda, T), f_2(\lambda, T), \dots, f_m(\lambda, T)$ 。然后将在观测波长窗口范围内读取的 m 个包络光谱波长值依次代入以上 m 个波长-温度函数关系式中,得到 m^2 个温度值 $T_1, T_2, \dots, T_k (k = m^2)$ 。之后计算 $T_1, T_2, \dots, T_k$ 与 T_0 的差值,将 m 个差值最小的温度值取算数平均值即为输出的温度值,即取包络光谱中所有的 m 个包络谷所指示的温度值的算数平均值作为输出的温度值。通过此种两类光谱结合利用的方式,保证了游标光谱的高灵敏度作用,同时针对游标光谱由于光谱周期限制导致测量范围过小的问题,实现了其测量范围的扩大。

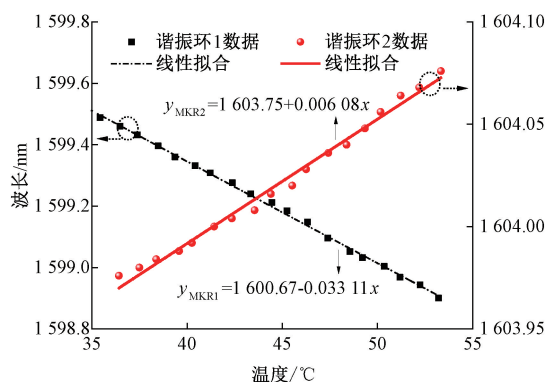


图8 谐振环1和谐振环2的单频对应的谐振光谱谷的波长与温度间的线性拟合关系

Fig. 8 Linear fitting relationships between wavelength of dip of resonant spectra corresponding to the single frequency component and temperature of resonant ring 1 and resonant ring 2

综上,通过提取游标光谱的包络线,实现了高灵敏度的温度测量,谐振环1和谐振环2的游标包络光谱灵敏度分别高达-5 nm/℃左右和-10 nm/℃左右,相比于单频对应的谐振光谱,利用游标包络光谱分别实现了灵敏度约150倍和1 600倍的放大。对于谐振环1和谐振环2,利用游标包络光谱的可识别温度测量范围分别约为10℃和4℃,利用单频对应的谐振光谱的可识别温度测量范围分别约为26℃和24℃。通过结合包络光谱与单一频率组分对应的谐振光谱,可实现保证游标包络光谱的高灵敏度同时,将其测量范围扩大至单频对应的谐振光谱的测量范围。谐振环2与谐振环1相比,谐振环2的环尺寸大,单频组分对应的谐振光谱周期小,包络光谱内包含的谐振光谱个数多,形成的游标效应的灵敏度放大能力比谐振环1强。值得一提的是,本文中在单个谐振环中产生的游标效应,不同于传统的级联结构产生的游标效应,对于传统并联或级联两个谐振环或干涉仪形成的游标效应^[18,24-25]来说,游标包络的自由光谱范围和灵敏度都为单个干涉仪的 M 倍数,由于温度检测范围等于自由光谱范围除以灵敏度,因此游标包络和单个干涉

仪的检测范围是相等的。而本文中谐振环中游标效应的产生是由于多个谐振模式产生的谐振光谱叠加而形成,而不是传统干涉仪中两个谐振光谱/干涉光谱叠加形成的,由图 5 的频谱图可以看出,谐振环 1 中存在 3 个谐振模式,谐振环 2 中存在多个谐振模式。因此,本结构产生的游标效应的灵敏度和自由光谱范围不是单个谐振光谱的 M 倍,故单频带滤波的谐振光谱和游标包络光谱的温度检测范围会存在差别,因此可以分别利用单频带滤波的谐振光谱的测量范围优势与游标包络光谱的灵敏度的优势,实现二者优势互补,保证高灵敏度的同时,扩大测量范围。该方案为解决具有周期性光谱的光纤传感结构的灵敏度与测量范围之间的矛盾问题提供了新思路。不同的 MKR 温度传感性能对比如表 1 所示,可以看出,仅产生谐振的单个 MKR 传感结构的温度灵敏度较低,约为 $0.012\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ [16],由自由光谱范围除以灵敏度计算出其温度检测范围约为 124°C ,可见其灵敏度低,但测量范围大。嵌入至 PDMS 中 MKR 的谐振光谱获得了较参考文献[16]略高一些的温度灵敏度,为参考文献[16]灵敏度的 3.5 倍,约为 $-0.042\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ [17],二者灵敏度处于相同的数量级,处于较低水平。计算可得参考文献[17]中的温度检测范围约为 12°C ,可见其灵敏度低,同时测量范围也较小。将双 MKR 级联产生游标效应后,由于游标光谱具有放大效应,将 MKR 的温度灵敏度提升了一个数量级,达到了 $0.92\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ [20],其测量范围约 38°C ,其温度灵敏度及测量范围均处于中等水平。在 PDMS 封装的单个 MKR 中产生游标效应,获得了比参考文献[20]又高出一个数量级的灵敏度,达到了 $-8.48\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ [13],灵敏度处于较高水平。但由温度检测范围等于自由光谱范围除以灵敏度可计算出,参考文献[13]的测量范围仅约为 7°C ,当温度变化超过 7°C 后,将出现包络谷“混叠”现象,因此参考文献[13]中可识别的测量范围仅约为 7°C ,测量范围非常窄。本文的研究内容在 PDMS 封装的单个 MKR 中产生游标效应,利用游标光谱的包络线,实现高灵敏度的温度测量,灵敏度高达 $-10\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$,但经计算,利用游标光谱可识别的测量范围仅约为 4°C 。为了解决具有周期性光谱的光纤传感结构测量范围与高灵敏度矛盾的问题,提出了保持高灵敏度的同时扩大测量范围的方法,使测量范围由约 4°C 扩大至约 20°C 。分别利用单一频率组分对应的谐振光谱的测量范围优势与游标包络光谱的灵敏度的优势,实现二者优势互补,利用游标效应提高温度测量灵敏度的同时,利用单一频率组分对应的谐振光谱扩大了游标光谱的温度测量范围,进而提高了传感器的性能和实用性。通过以上 MKR 传感器温度传感性能的对比,本文的 MKR 传感器在灵敏度上远高于除了参考文献[13]以外的其他参考文献中报道的 MKR 传感器,与参考文献[13]中 MKR

传感器在灵敏度上处于相同水平,在此基础上对保持高灵敏度的同时扩大测量范围提出了解决方案,实现在不增加传感结构复杂度的同时,扩大了高灵敏度 MKR 传感器的测量范围,同时也为其他光纤传感结构扩大测量范围提供了参考思路。

表 1 微纳光纤谐振环温度传感性能对比
Table 1 Temperature sensing performance comparison of microfiber resonators

结构	温度灵敏度	测量范围	参考文献
单个 MKR	$0.012\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$	$\sim 124^{\circ}\text{C}$	[16]
嵌入于 PDMS 的 MKR	$-0.042\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$	$\sim 12^{\circ}\text{C}$	[17]
具有游标效应的双 MKR	$0.92\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$	$\sim 38^{\circ}\text{C}$	[20]
具有游标效应的 PDMS 封装 MKR	$-8.48\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$	$\sim 7^{\circ}\text{C}$	[13]
具有游标效应的 PDMS 封装 MKR	$-10\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$	$\sim 20^{\circ}\text{C}$	本文 (谐振环 2)

3 结 论

本文制作并证明了基于单个微纳光纤谐振环的高灵敏度且扩大测量范围的温度传感器。在单个谐振环内传输的不同模式产生谐振光谱,不同频率组分的谐振光谱叠加产生游标效应,通过提取游标光谱的包络线,实现高灵敏度的温度测量。对于谐振环 2,包络谱的温度灵敏度高达 $-10\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ 左右,由于光谱分析仪的分辨力为 0.02 nm ,该传感器理论上可实现的温度分辨力为 0.002°C 左右。包络谱的光谱周期约为 42 nm ,利用包络谱可识别的温度测量范围约为 4°C 。提取谐振环的单一频率组分光谱,其温度灵敏度约为 $6.08\text{ pm}/^{\circ}\text{C}$,单频对应的谐振光谱的光谱周期约为 0.15 nm ,利用单频对应的谐振光谱可识别的温度测量范围约为 25°C 。此外,相比于单频组分对应的谐振光谱,利用游标包络光谱实现了灵敏度约 1 600 倍的放大。通过结合包络光谱与单频组分对应的谐振光谱,使包络光谱的测量范围由约 4°C 扩大至约 20°C ,保持游标光谱高灵敏度的同时,扩大了测量范围,提高了传感器的性能和实用性。该方案为解决具有周期性光谱的光纤传感结构的灵敏度与测量范围之间的矛盾问题提供了新思路。该传感器具有制作简单、结构稳定、灵敏度高等优点,在温度测量领域具有广阔的应用前景。

参考文献

[1] ZHAO Z K, NI W J, YANG C Y, et al. Sensitivity amplification of high temperature fiber sensor based on

- bragg hollow-core fiber and harmonic Vernier effect[J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(20): 24575-24582.
- [2] 赵勇,赵健,吕日清,等. 基于无芯光纤与光栅级联的反射式大量程高分辨力海水温度传感器[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(3): 178-185.
- ZHAO Y, ZHAO J, LYU R Q, et al. Reflective large-range high-resolution seawater temperature sensor based on no-core fiber combined with fiber Bragg grating[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(3): 178-185.
- [3] LIU S, ZHANG X, WANG Q, et al. Integrated and robust Fabry-Perot humidity sensor based on metal-organic framework onto fiber-optic facet [J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(12): 12906-12914.
- [4] Chen N, LIU C, CHEN L, et al. Femtosecond laser-inscribed fiber-optic sensor for simultaneous temperature and relative humidity measurements[J]. Optics & Laser Technology, 2023, 164: 109463.
- [5] 王希鑫,赵勇,吕日清,等. 具有温度补偿的拱形增敏微纳光纤磁场传感器[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(4): 199-205.
- WANG X X, ZHAO Y, LYU R Q, et al. Arched sensitized microfiber magnetic field sensor with temperature compensation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(4): 199-205.
- [6] ZHANG C C, PU S L, HAO Z J, et al. Magnetic field sensing based on whispering gallery mode with nanostructured magnetic fluid-infiltrated photonic crystal fiber[J]. Nanomaterials, 2022, 12(5): 862.
- [7] ZHANG H T, XIE Z W, YAN H T, et al. High sensitivity and large measurement range magnetic field micro-nano fiber sensor based on Mach-Zehnder interference[J]. Optics & Laser Technology, 2022, 156: 108455.
- [8] ZHANG Y N, WANG M Y, ZHU N S, et al. Optical fiber hydrogen sensor based on self-assembled PDMS/Pd-WO₃ microbottle resonator[J]. Sensors and Actuators B-Chemical, 2023, 375: 132866.
- [9] HE T Y, WANG W, HE B G, et al. Review on optical fiber sensors for hazardous-gas monitoring in mines and tunnels[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72: 7003722.
- [10] ZHANG Y N, GAO J, XIA F, et al. Microfiber knot resonators: Structure, spectral properties, and sensing applications [J]. Laser & Photonics Review, 2023, 18(1).
- [11] NIU Y L, LU H L, YANG L, et al. High-sensitivity microfiber interferometer water hardness sensor [J]. Measurement, 2022, 201: 111710.
- [12] WEN J J, YAN X Y, GAO X, et al. Axial strain sensor based on microfiber couplers operating at the dispersion turning point[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(5): 4090-4095.
- [13] DANG H T, CHEN M S, LI J. A Highly-sensitive temperature-sensor based on a microfiber knot-resonator packaged in polydimethylsiloxane [J]. IEEE Photonics Journal, 2021, 13(1): 7100208.
- [14] LIU Z M, CHEN N, LI S Y, et al. Modeling and calibration of micro/nano FBG temperature probe for scanning probe microscopy[J]. Optics Express, 2023, 31(12): 19453-19462.
- [15] YANG H J, WANG S S, WANG X, et al. Temperature sensing in seawater based on microfiber knot resonator[J]. Sensors, 2014, 14(10): 18515.
- [16] XIAO Y Y, CAI X P, CHEN H. Simultaneous measurement of temperature and refractive index based on microfiber knot resonators and FBGs[J]. Optik, 2019, 191: 116-120.
- [17] LIU Z L, XIAO H F, LIAO M M, et al. PDMS-assisted microfiber m-z interferometer with a knot resonator for temperature sensing [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2019, 31(5): 337-340.
- [18] XU Z L, SUN Q Z, LI B R, et al. Highly sensitive refractive index sensor based on cascaded microfiber knots with Vernier effect [J]. Optics Express, 2015, 23(5): 6662.
- [19] XU Z L, LUO Y Y, LIU D M, et al. Sensitivity-controllable refractive index sensor based on reflective θ -shaped microfiber resonator cooperated with Vernier effect[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 1-8.
- [20] YANG H J, KONG L X, LI L J, et al. Enhanced-sensitive dual microfiber knot resonators based sensor with vernier effect for simultaneous measurement of refractive index and temperature[J]. Optik, 2022, 250: 168350.
- [21] HUANG H S, HAINFELD J F. Intravenous magnetic

- nanoparticle cancer hyperthermia [J]. International Journal of Nanomedicine, 2013, 8: 2521-2532.
- [22] FIELDING A J, EDINGER K, DAVIS C C. Experimental observation of mode evolution in single-mode tapered optical fibers [J]. Journal of Lightwave Technology, 1999, 17(9): 1649-1656.
- [23] LE A D D, HAN Y G. Relative humidity sensor based on a few-mode microfiber knot resonator by mitigating the group index difference of a few-mode microfiber [J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 36 (4): 904-909.
- [24] XIE L Q, SUN B, CHEN M M, et al. Sensitivity enhanced temperature sensor with serial tapered two-mode fibers based on the Vernier effect [J]. Optics Express, 2020, 28(22): 32447-32455.
- [25] WANG Z R, HUANG L, LIU C, et al. Sensitivity-enhanced fiber temperature sensor based on Vernier effect

and dual in-line Mach-Zehnder interferometers [J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19 (18): 7983-7987.

作者简介



夏凤(通信作者),2015 年于东北大学秦皇岛分校获得学士学位,2020 年于东北大学获得博士学位(直博),现为沈阳工业大学副教授,主要研究方向为基于干涉仪的光纤传感器,微纳光纤传感等先进光纤传感技术。

E-mail: xiafeng@sut.edu.cn

Xia Feng (Corresponding author) received her B. Sc. degree from Northeastern University at Qinhuangdao in 2015, and received her Ph. D. degree from Northeastern University in 2020. She is currently an associate professor at Shenyang University of Technology. Her main research interests include optical fiber sensor based on interferometer and micro-nano optical fiber sensing technology.