

超高品质因子微棒腔的制备封装及传感应用

赵义轩^{1,2}, 李 昶^{1,2}, 张 璇^{1,2}, 潘廷炀^{1,2}, 段 冰^{1,2}, 杨大全^{1,2*}

(1. 北京邮电大学信息光子学与光通信国家重点实验室, 北京 100876; 2. 北京邮电大学信息与通信工程学院, 北京 100876)

摘要: 作为回音壁模式(Whispering Gallery Mode, WGM)光学微腔的重要参数之一,超高的品质因子意味着微腔可以在非线性光学、相干光通信以及微波光子学等领域具备更优异的特性,更广阔的应用前景. 为了提高微腔的品质因子,本文基于自动化程序控制微腔制备,并优化了抛光以及退火工艺,所制备得到的二氧化硅微棒腔具有超高品质因子、低成本、高效率等特点,品质因子最高可达 3×10^9 . 基于集成温控的模块化封装方案,提高了微腔耦合系统的抗干扰能力,1 h的频率偏移量可以降低为原来的1/10. 超高品质因子带来了超低的非线性效应阈值功率(低至 $266 \mu\text{W}$),本文基于微棒腔产生的克尔光频梳进行了传感应用实验,实现了传感灵敏度为 $8.40 \text{ pm}/^\circ\text{C}$,测量范围超过 30°C 的环境温度多模传感. 本文的研究成果为高精度传感、大容量光通信、低阈值激光器等应用提供了强有力的工具.

关键词: 回音壁模式(WGM);超高品质因子微腔;自动化制备;微腔封装;光频梳传感

基金项目: 北京市自然科学基金(No.Z210004)

中图分类号: TP212.1

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2025)01-0041-10

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20240414

Fabrication, Packaging and Sensing Application of Ultra-High Quality Factor Microrod Cavity

ZHAO Yi-xuan^{1,2}, LI Chang^{1,2}, ZHANG Xuan^{1,2}, PAN Ting-yang^{1,2}, DUAN Bing^{1,2}, YANG Da-quan^{1,2*}

(1. State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and

Telecommunications, Beijing 100876, China;

2. School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: As one of the important parameters of the whispering gallery mode (WGM) optical microcavity, the high quality factor means that the microcavity can have better characteristics and broader application prospects in the fields of nonlinear optics, coherent optical communication and microwave photonics. In order to improve the quality factor of the microcavity, this paper controls the fabrication of the microcavity based on the automatic program, and optimized the polishing and annealing processes. The prepared silica microrod cavity has the characteristics of ultra-high quality factor, low cost and high efficiency, and the quality factor can reach up to 3×10^9 . Based on the modular package scheme of integrated temperature control, the anti-interference ability of the microcavity coupling system is improved, and the frequency offset of one hour can be reduced by 10 times. With the ultra-low nonlinear threshold power (as low as $266 \mu\text{W}$) brought by the ultra-high quality factor, this paper conducts sensing application experiments based on the Kerr optical frequency comb-generated by the microrod cavity, and realizes the multi-mode ambient temperature sensing with a sensing sensitivity of $8.40 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ and a measuring range of more than 30°C . The research results of this paper provide a powerful tool for high precision sensing, large capacity optical communication, low threshold laser and other applications.

Key words: whispering gallery mode (WGM); ultra-high quality factor microcavity; automatic fabrication; packaged microcavity; optical comb sensing

Foundation Item(s): Natural Science Foundation of Beijing Municipality (No.Z210004)

1 引言

得益于高品质因子(Q)和小模式体积,回音壁模式(Whispering Gallery Mode, WGM)光学微腔可以将光长时间局限在一个极小的范围内,在高精度传感^[1-3]、大容量光通信^[4,5]、低阈值激光器^[6-8]等应用中具有显著优势. WGM 光学微腔的高品质因子可以帮助微腔在应用中提高传感的灵敏度、降低非线性效应的阈值、减小激光器的线宽.

随着现代加工工艺和材料体系的不断发展和完善,目前 WGM 光学微腔最常见的制备原料包括硅、二氧化硅、晶体材料等. 由于具备低损耗、低成本、易于加工以及出色的光学性能等显著特性,二氧化硅被广泛认为是制备微腔的理想选择. 2010 年,文献[9]通过对内部高压的毛细管进行激光加热进而膨胀成泡状,首次制备得到了二氧化硅微泡腔. 虽然 Q 值只有 10^6 ,但是天然的微流通道使得微泡腔具有很大的应用潜力. 由于微球腔和微泡腔的形状和尺寸都难以控制,所以在 2013 年,文献[10]使用激光熔融石英棒,通过修改制备参数精准调整微腔的形状和尺寸,最终制备得到了直径为 $200\ \mu\text{m} \sim 8\ \text{mm}$ 的二氧化硅微棒腔,微腔体积的增加使得 Q 值最高可以超过 10^9 . 2022 年,文献[11]对制备参数进行优化,在 $6\ \text{mm}$ 直径的微棒腔上将 Q 值提升到了 4.5×10^9 . 为了更好地提高微腔的应用能力,微腔正借助日臻完善的蚀刻工艺逐步实现片上集成化. 2006 年,文献[12]在制备过程中精确操控氢氟酸和氟化氙气体的蚀刻过程,反复调整二氧化硅微盘腔的楔形边缘,成功将微盘腔的 Q 值提升至 5×10^7 . 2012 年,文献[13]使用浅楔角将模式与微腔外缘附近的光刻瑕疵隔离开来,成功将二氧化硅微盘腔的 Q 值提高 20 倍,达到了 8.75×10^8 . 2020 年,文献[14]通过精准控制蚀刻时间,严格管理制备过程中的温度参数,并巧妙地运用退火技术去除水分、释放应力,从而有效降低了微腔的损耗. 在此基础上,该研究进一步通过调整锥形光纤的耦合位置,成功抑制了微盘腔侧面的机械振动,并首次微盘腔上实现了超过 10^9 的 Q 值(1.1×10^9).

正是由于高品质因子, WGM 微腔可以将光的能量限制在一个非常小的空间内,被限制住的光子将会在回音壁的边缘产生一个存在于微腔介质之外的倏逝场. 处于腔内的光子会与倏逝场中存在的物质发生相互作用. 这种相互作用相比光子与物质直接接触有着指数级的增强,因此基于微腔的传感应用具备很高的灵敏度. 微腔传感机制主要有三种:模式偏移^[15]、模式分裂^[16]、模式展宽^[17]. 模式偏移是微腔传感技术中常用的一种机制. 当外界物质介入或环境发生变化时,微腔的谐振模式会发生偏移. 通过监测这种谐振模式的偏移,不仅能够精确测量单个分子的尺寸或特定化合

物的浓度级别^[18],还能有效监测微腔周围温湿度、磁场、气压等环境信息的变化^[19-21]. 但传统传感方法仍存在局限. 目前,微腔传感主要依赖于透射谱模式,除了以上几种单模传感,还有基于多模式的多模传感^[22,23]. 然而,单模传感虽然简单,但信息获取量相对有限;而多模传感虽然能提供更多信息,但由于不同模式对同一传感信息的灵敏度不同,需要进行复杂的解耦处理,增加了分析的难度.

本文首先对二氧化硅微棒腔中所存在的各种损耗进行了分析,减少微腔表面水分子对光的吸收是提升二氧化硅微棒腔品质因子的有效途径. 进而基于自动化制备程序制备出了具备超高品质因子的二氧化硅微棒腔,制备时间少于 $1\ \text{min}$;并使用氢焰加热的方式减少微腔表面水分子,实现微腔品质因子最高可达 3.0×10^9 . 为了保证微腔性能的稳定,本文提出了一种微棒腔封装方案. 本方案通过非接触封装和引入温控模块的方式将微棒腔封装,封装后微腔的 Q 值可以基本维持不变. 经过 $1\ \text{h}$ 的测试,谐振模式仅偏移 $0.2165\ \text{pm}$,是封装前相同时间下偏移量的 $1/10$. 除此之外,基于超高品质因子微棒腔可以产生具有超低阈值的克尔光频梳,凭借光频梳天生具备的多梳齿特性,本文实现了环境温度的多模传感. 该方案的传感灵敏度达到了 $8.40\ \text{pm}/^\circ\text{C}$,测量范围超过 $30\ ^\circ\text{C}$. 本文所提出的微棒腔在高精度传感、大容量光通信、低阈值激光器等研究方向具有巨大的优势和潜力.

2 WGM 光学微腔的基本性质

2.1 品质因子

作为 WGM 微腔最重要的参数之一, Q 值表征了微腔储存光的能力,这与微腔体系所存在的损耗直接相关,定义为

$$Q = \omega \frac{I}{P} = \omega \tau \quad (1)$$

式中, ω 表示谐振模式的频率; I 表示光场能量; P 表示能量损失速率; τ 表示光子寿命. Q 值高意味着微腔的损耗小、光子寿命长,微腔中光与物质相互作用强.

除了耦合系统引入的外部损耗外,其核心决定因素在于微腔自身固有的本征损耗. 这种本征损耗与微腔的固有特性紧密相连,具体涵盖了材料吸收损耗 Q_{mat}^{-1} 、散射损耗 Q_{ss}^{-1} 、辐射损耗 Q_{rad}^{-1} 以及水层吸收损耗 Q_{water}^{-1} . 综合考虑这些损耗因素,推导出在不考虑耦合损耗情况下的本征损耗 Q_0^{-1} ,表达式为

$$Q_0^{-1} = Q_{\text{mat}}^{-1} + Q_{\text{ss}}^{-1} + Q_{\text{rad}}^{-1} + Q_{\text{water}}^{-1} \quad (2)$$

在四种主要损耗中,由于微棒腔的尺寸达到了毫米级,所以散射损耗、辐射损耗对于 Q 值的限制比较微弱,可以忽略. 故起主要限制的材料吸收损耗和水层吸

收损耗,可以通过选购羟基含量更小的原料以及在制备过程中通过搭建无水环境防止微腔表面水层进一步变厚.

2.2 模式体积

模式体积(V_m)表征了微腔在空间维度上对光子的束缚效果,定义为能量密度在耦合空间内的积分与能量密度峰值的比值,计算式为

$$V_m = \frac{\int n^2(r) |E(r)|^2 d^3r}{\max(n^2(r) |E(r)|^2)} \quad (3)$$

式中, $n(r)$ 表示相对介电常数; $E(r)$ 表示电场分布.通常而言,当微腔的半径减小时,其模式体积会相应减小.这一变化增强了微腔对光子的空间限制能力,使得微腔内部的光场更为集中.

2.3 WGM光学微腔与锥形光纤的耦合理论

在本文的研究中,选择了具有高耦合效率的锥形光纤进行耦合.微腔内谐振频率为 ω_0 的光场 $A(t)e^{-i\omega_0 t}$ 可以用它的旋转坐标系振幅 A 来描述,将其归一化后可以使得 $|A|^2$ 对应于谐振腔模式中的光子数.腔内光场的时间演化可以表示为

$$\frac{dA(t)}{dt} = -\frac{\kappa_0}{2} A(t) \quad (4)$$

式中, κ_0 为微腔的本征损耗率.将泵浦光通过锥形光纤耦合到微腔之后,表达式可以转换为

$$\frac{dA(t)}{dt} = -\frac{\kappa}{2} A(t) + \sqrt{\kappa_{\text{ext}}} s_{\text{in}}(t) e^{-i(\omega_p - \omega_0)t} \quad (5)$$

式中,右侧的后一个相位信息表示了泵浦频率 ω_p 相较于谐振频率 ω_0 的失谐.由于锥形光纤的入射光场 S_{in} 与回音壁光学微腔之间的耦合引入了耦合损耗 κ_{ext} ,故微腔的损耗转换为总损耗 $\kappa = \kappa_0 + \kappa_{\text{ext}}$.应用相变 $a(t) = A(t) e^{i(\omega_p - \omega_0)t}$ 将式(5)转换为旋转坐标系,即

$$\frac{da(t)}{dt} = -\left(i(\omega_0 - \omega_p) + \frac{\kappa}{2}\right) a(t) + \sqrt{\kappa_{\text{ext}}} s_{\text{in}}(t) \quad (6)$$

当式(6)左侧为0(即腔内振幅达到稳态)时,可以得到

$$a = \frac{\sqrt{\kappa_{\text{ext}}}}{i(\omega_0 - \omega_p) + \frac{\kappa}{2}} s_{\text{in}} \quad (7)$$

在该稳态下,腔内的光子数量可以表示为

$$|a|^2 = \frac{\kappa_{\text{ext}}}{(\omega_0 - \omega_p)^2 + \left(\frac{\kappa}{2}\right)^2} |s_{\text{in}}|^2 \quad (8)$$

另外,根据能量守恒,光子通量 $|s_{\text{out}}|^2$ 等于入射光子通量 $|s_{\text{in}}|^2$ 与腔内耗散光子之间的差,表达式为

$$|s_{\text{out}}|^2 = |s_{\text{in}}|^2 - \kappa_0 |a|^2 = \left(1 - \frac{\kappa_{\text{ext}} \kappa_0}{(\omega_0 - \omega_p)^2 + \left(\frac{\kappa}{2}\right)^2}\right) |s_{\text{in}}|^2 \quad (9)$$

可以区分图1所示的三种耦合状态:欠耦合($\kappa_{\text{ext}} < \kappa_0$)、过耦合($\kappa_{\text{ext}} > \kappa_0$)和临界耦合($\kappa_{\text{ext}} = \kappa_0$).在临界耦合状态,射入微腔中的全部光子都会在腔内耗散,实现传输的完全消光.

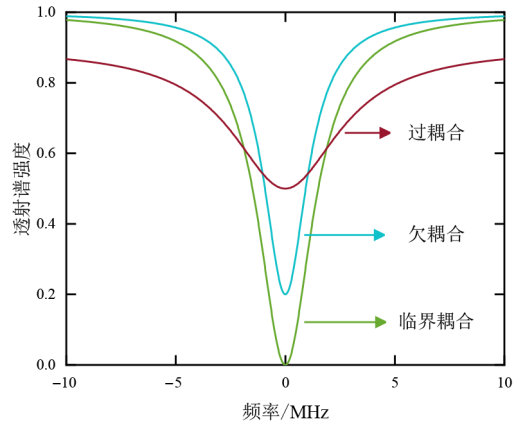


图1 欠耦合、过耦合、临界耦合三种耦合状态下微腔透射谱强度图

3 超高品质因子微棒腔的制备

3.1 超高品质因子微棒腔的自动化制备

二氧化硅因其低廉的生产成本、较低的加工难度以及宽泛的尺寸可调范围,已成为WGM微腔的首选材料.相较于晶体腔,二氧化硅在加工过程中产生的粉尘对人体无害,确保了制备过程的安全性.此外,二氧化硅的极低材料损耗特性,使其在大距离通信领域得到广泛应用,也为微腔实现超高品质因子的目标提供了可能.在本工作中,选择高纯度(超过99.9%)、低羟基含量(小于 0.1×10^{-6})的二氧化硅光纤预制棒作为微腔的原材料.本研究通过二氧化碳激光器对旋转的玻璃棒进行激光融刻,在特定位置之间二氧化硅重熔,形成了圆度均匀、表面光滑的WGM区域.这一区域能够有效地将入射光限制在微小范围内,展现出优异的光学性能.

微棒腔的制备装置如图2所示,该装置主要由二氧化碳激光器(最大输出功率为30 W)、信号发生器、步进电机、硒化锌(ZnSe)聚焦透镜、高速转轴、步进电机及控制器组成.以下是二氧化硅微棒腔加工的主要步骤:

(1)抛光.尽管实验采用了高纯度的光纤预制棒,但直接由工厂产出的玻璃棒表面难免存在污染、划痕等瑕疵.为确保微腔的最终性能,首先对玻璃棒表面进行了细致的抛光处理.针对表面污染,采用无水乙醇进行彻底清洗;而对于表面平整度的问题则设计了一套精密的抛光方案:利用信号发生器产生占空比为30%

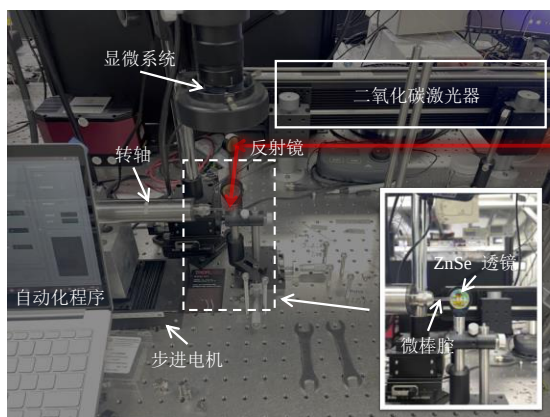


图2 二氧化硅微棒腔的制备装置图

的方波信号,以此周期性地控制二氧化碳激光器进行初步的粗抛光.使用ZnSe透镜将二氧化碳激光聚焦在玻璃棒上.通过调整玻璃棒相对于透镜焦点的位置,选择较大的光斑尺寸进行激光照射.此时,步进电机以0.2 mm/s的速度平稳运作,驱动旋转的玻璃棒(转速设置为400 转/min)进行左右往复移动.由于二氧化硅在该激光波长下的高效吸收,照射区域的材料迅速融化,并在转轴旋转产生的离心力作用下迅速重新固化.随后,将占空比设置为20%,重复上述步骤,以完成更为精细的抛光处理,抛光后的玻璃棒表面呈现出极高的光滑度和均匀性.

(2)融刻.在这一步骤中,首先将信号发生器的信号占空比设置为75%,以显著提升激光的输出功率.随后,调整玻璃棒与聚焦透镜之间的距离,确保照射到玻璃棒上的光斑尺寸达到最佳状态.这里将转轴的转速提升至600 转/min,步进电机的移动速度设定为0.5 mm/s.在相距500 μm 的两个预定位置进行了交替融刻操作.在融刻过程中,由于表面张力的作用,融刻区域的二氧化硅迅速融化,并向两侧堆积.同时,也有部分二氧化硅因高温而蒸发,飘散到空气中.经过这一系列操作,两个融刻位置都形成了显著的凹槽,而中间区域则呈现出光滑且均匀的盘状结构,标志着微棒腔的主体形貌已基本完成.

(3)回融.尽管经过融刻后,微棒腔的基本形态已经呈现,但由于融刻过程中激光功率较大,会观察到有白烟(即二氧化硅颗粒)产生.这些颗粒会附着到盘状区域,增加微腔表面的粗糙度,影响其光学性能.为了消除这些颗粒,采取了回融处理.首先将光斑尺寸调大,并将占空比降低至25%,以减小激光功率.同时,将步进电机的移动速度降低至0.2 mm/s,确保激光在两个凹槽之间平稳地来回扫射.这一过程中,附着在表面的二氧化硅颗粒逐渐融化并重新分布.随后,将占空比进一步降至20%,并重复上述步骤.虽然这一步骤耗时较长,但它是确保微腔表面光滑度的必要过程.经过回融

处理后,微棒腔表面的固体颗粒被完全清除,呈现出非常光滑的状态.

经过如图3(a)上所示的三个主要步骤,微棒腔就可以成功制备完成.鉴于制备流程的高度标准化,各仪器的设置参数均可重复利用,为提高制备效率并降低学习成本,本文特别开发了一款基于Python的程序.如图3(b)所示,该程序能够自动化控制仪器参数设置,并全程引导完成制备流程.借助这一自动化程序,微棒腔的制备过程得以在极短的时间内高效完成,通常仅需1 min.此外,该程序还展现出高出品率与可重复等显著优点,有效提升了微棒腔制备效率.

3.2 微棒腔制备过程中的退火工艺

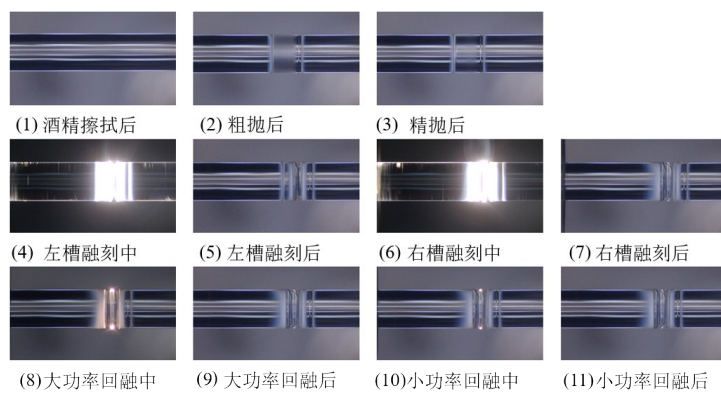
由于二氧化硅材料中所存在的羟基是一种亲水基,所以二氧化硅微棒腔的表面会吸附空气中的水分子,而水在1 550 nm波段的吸收系数很高,会大大降低微棒腔的 Q 值.本文使用氢焰对微棒腔进行加热,以蒸发表面水分子,减少水层厚度.氢焰退火实验装置如图4所示.由于氢焰在空气中燃烧的温度极高,超过1 000 $^{\circ}\text{C}$,为防止其破坏微腔结构将微棒腔固定在氢焰上方3 cm处,加热位置选在微腔盘状区域附近,避免直接加热盘状区域.本研究分别尝试了30 s、60 s和120 s的加热时间,发现30 s的加热效果最佳.经过30 s的退火处理,微腔的最高 Q 值从 2.2×10^9 提升至 3.0×10^9 ;更换微腔重复操作,也实现了从 2.1×10^9 到 2.9×10^9 的 Q 值提升.

上述实验结果表明,使用氢焰退火能够有效提升微腔的 Q 值,这主要得益于氢焰加热能够有效蒸发微腔表面的水分子.然而,值得注意的是,从加热完成到测量完成的过程中,由于存在时间差,空气中的水分子可能会重新附着到微腔表面,从而显著削弱退火效果.因此,为了长久维持二氧化硅微棒腔的超高 Q 值,仍需对微腔进行更为深入的模块化封装处理,以确保其性能的持久稳定.

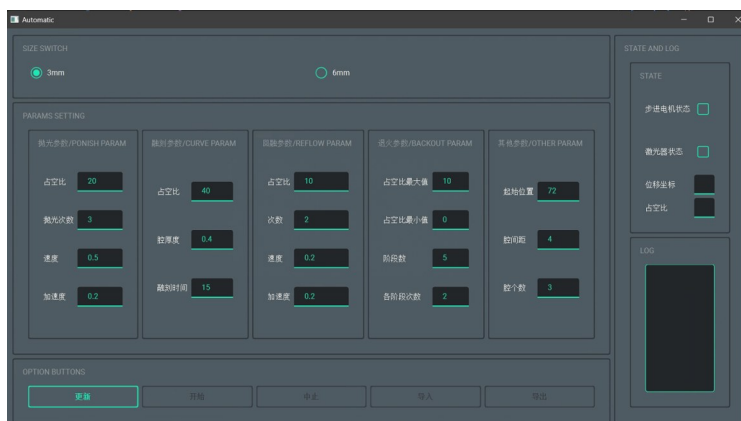
4 超高品质因子微棒腔的封装

4.1 传统微腔耦合系统的分析

传统的微腔-锥形光纤耦合方案在实际应用中存在一些难题.首先,实验室中微棒腔的使用通常需要借助锥形光纤进行耦合,但这一耦合条件并不稳定.由于空气流动和实验台震动的影响,耦合状态容易发生变化,从而导致透射光谱的稳定性无法长时间保持.对于需要长时间运行的应用场景,这种耦合状态的不稳定性会导致实验结果变得难以控制,并且使得从透射谱中获取有效信息变得困难.其次,虽然二氧化硅相比晶体材料如氟化镁、氟化硅等具有更低的热光系数和更强的热稳定性,但实验中发现,由于光学微腔对环境变化非常敏感,即使是使用低热光系数的二氧化硅制备的

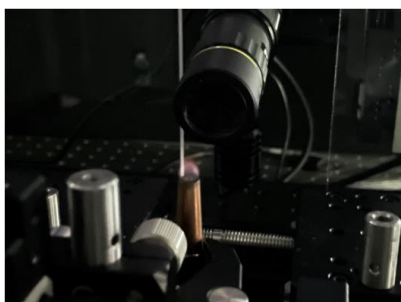


(a) 微棒腔的加工制备步骤

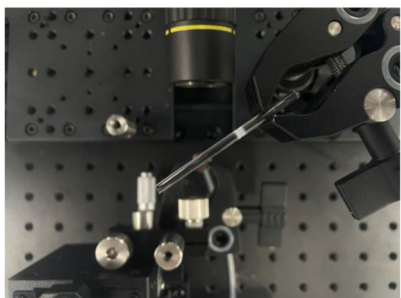


(b) 微棒腔自动化制备控制界面

图3 微棒腔的制备及自动化



(a) 氢焰发生装置



(b) 微棒腔加热装置的俯视图

图4 氢焰退火实验装置图

微腔,也容易受到环境温度的影响而发生模式偏移,这会对实验的进行造成不利影响.此外,微腔耦合系统需要两套位移平台的精准控制才能实现耦合,这使得耦合系统的移动性较差,只能在固定位置进行实验.如果更换实验场景就需要重新搭建耦合系统,并且很难完美复现之前的耦合状态,这增加了实验的复杂性和不确定性.最后,由于二氧化硅中含有强亲水性的羟基,长时间将微腔暴露在空气中会导致其持续吸收空气中的水分子,进而使微腔的 Q 值大幅度降低,严重影响其性能.同时,锥形光纤在空气中也容易吸附尘埃颗粒,这些颗粒会增加光纤的损耗,降低光纤透过率,影响光在耦合系统中的传输效果.

4.2 微棒腔的封装与性能表征

鉴于传统耦合系统存在的诸多问题,对微腔耦合系统进行封装设计显得尤为重要.为此,本文设计并实现了二氧化硅微棒腔封装模块,如图5(a)所示.该模块的主要功能包括非接触式地固定耦合位置、减少与空气的接触以及添加温控模块.封装盒分为内外盒子,二者之间会放置温控片.内盒子留有长为4.5 cm,宽为3 mm,高为3 mm的凹槽,用来放置微棒腔.两侧留有

稍浅一些的平台用来固定光纤,预留小孔引入温控片和热敏电阻的导线。

具体封装过程主要分为以下几个步骤:

(1)将封装盒的内盒与外盒通过螺丝紧密组装在一起,并在二者之间夹入温控片(TECF1S, 20 mm × 20 mm),使用导热胶固定温控片的位置。随后,将温控片的两条引线从侧壁的小孔中穿出,确保温控功能的正常使用。接着,将制备好的微棒腔放入内盒的凹槽中,并使用胶水固定其两端,确保微棒腔的稳固。最后,通过侧壁上的小孔将热敏电阻(TH10K, 10 kΩ)搭在微棒腔上与其直接接触,以实时监控微棒腔的温度信息。

(2)利用位移平台的精准控制,完成微腔的耦合过程。在此过程中,需要注意两个关键点:一是光纤的锥形区域长度需适中,避免封装完成后裸露在盒子外部,导致损坏;二是耦合状态需保持在欠耦合状态,以应对后续滴胶过程中由于重力因素可能导致的锥形光纤下压,从而加深耦合。

(3)耦合完成后,将低损耗紫外胶滴在光纤与内外盒子的边缘位置。观察到光纤均处于胶水内部时,快速调整耦合位置并观察模式 Q 值变化,令其保持在 10^9 以上,此时视为微棒腔达到良好的耦合状态。随后,使用紫外灯照射固化胶水,注意少量多次,确保胶水固化均匀。在胶水完全固化之前,需持续监视耦合状态,以便在耦合脱离时进行微调。胶水固化后,依次盖上内外盒子并拧紧固定螺丝,完成封装。

从图5(c)中可以看到,当未启用温度控制时,由于环境温度的波动,模式会发生显著的热偏移,60 min的偏移

量达到了2.144 6 pm。然而,一旦开启温度控制并将目标温度设定为某一特定值(这里本研究选择室温24 °C),比例-积分-微分控制器(Proportion-Integral-Derivative, PID)反馈电路便会实时调整温控片的输入电流,确保微棒腔的温度稳定在预设范围内。经过60 min的连续监控,观察到模式的偏移量仅为0.216 5 pm。由此可见,相比开启温度控制模块之前封装腔的表现,温控模块将微棒腔的模式偏移量降低至原来的1/10,这使得微棒腔可以适用于更多环境复杂的应用场景。目前,采用此方法封装的微腔已在多项研究中得到应用,成功实现了孤子光梳的稳定产生^[24]、大容量通信^[25]以及波长转换^[26]等应用,展现了其巨大的应用潜力。

5 基于封装微棒腔的光频梳温度传感

5.1 微腔光频梳在传感应用中的优势分析

传统的微腔温度传感技术主要依赖于单模式的模式偏移来监测温度变化,这种方法虽然直观,但仅利用单个特定模式,所获取的传感信息相对有限。鉴于微腔通常拥有众多模式,为了更全面地捕捉微腔对温度变化的响应,研究者发展出多模传感技术。这一方法通过同时监测多个模式的偏移量变化,丰富了传感信息的维度。然而,不同模式对温度变化的响应度存在差异,因此,需要借助复杂的特征方程来解耦传感信号,但增加了操作难度。

相较之下,本研究所生成的图灵态微腔光频梳具有多个梳齿,这些梳齿均基于同一模式产生,因此,它们对温度的响应能力保持一致。通过测量所有梳齿的频率偏移并计算其平均值,能够使得到的结果更具有准确性,实现更加精准的温度传感。这种方法不仅提高了传感的精确度,还避免了传统多模传感中繁琐的信号解耦步骤,简化了操作过程。此外,图灵态光频梳具有较低的噪声水平,不易受到噪声干扰,从而使结果更加具有可靠性与稳定性。

在WGM光学微腔中,谐振模式的波长受到多种热力学效应的综合影响,主要有热光效应、腔体热膨胀效应。其中,热光效应和腔体热膨胀效应尤为显著。鉴于这两种热力学效应的作用,回音壁光学微腔的谐振波长 λ_r 不仅与腔体温度紧密相关,还会受到非腔体温度以及环境温度的影响。这一复杂的关联关系可以通过特定的表达式进行描述^[27]:

$$\lambda_r = \lambda_0 + \frac{dn_{\text{eff}}}{dT_1} \frac{\lambda_0}{n_{\text{eff}}} (T_1 - T_0) + \frac{\partial \lambda_0}{\partial T_2} (T_2 - T_0) \quad (10)$$

式中, λ_0 表示在较低泵浦功率下测得的微腔谐振波长,通常被称为冷腔谐振波长; T_0 、 T_1 、 T_2 分别表示微腔所处环境的温度、微腔上腔体区域的温度以及微腔上非腔区域的温度; n_{eff} 表示该谐振模式的有效折射率。鉴于

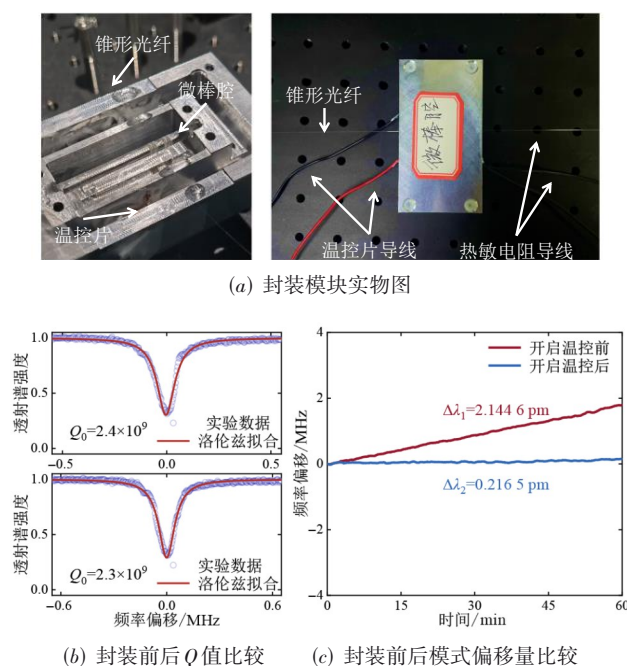


图5 微腔封装及性能表征

本研究主要基于微腔中的热光效应展开,因此,式(10)可以进一步简化为仅考虑热光效应的表达式,即

$$\Delta\lambda(\Delta T) = \lambda_0 \left(\frac{1}{n} \frac{dn}{dT} + \frac{1}{D} \frac{dD}{dT} \right) \quad (11)$$

式中, λ_0 、 D 、 n 分别表示冷腔的谐振波长、有效直径和折射率; dn/dT 和 dD/dT 分别表示微腔腔体的热折射系数(微腔腔体材料的折射率随温度变化的变化率)和热膨胀系数(微腔腔体尺寸随温度变化的变化率).由于二氧化硅的热折射系数和热膨胀系数分别为 $1.8 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 和 $4 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$,所以在这里只考虑热折变系数^[28].又由于存在转换关系:

$$\frac{dn}{dT} = \frac{df}{dT} \frac{n}{f_0} \quad (12)$$

通过计算可以得到,基于微腔光频梳的温度传感的灵敏度理论值为 $8.7 \text{ pm}/^\circ\text{C}$.

5.2 光频梳的产生

光学频率梳是指一系列激光,它们具有相同的频率间隔并以稳定的相位关系离散地结合在一起,形成一种独特的物理现象.一个重复频率为 f_r 的光频梳在频域上

呈现为一组频率稳定且按严格间距整齐排列的“梳齿”,而在时域上则表现为周期为 $1/f_r$ 的超短光脉冲输出序列.在频域上,光频梳的第 n 根梳齿的频率 f_n 可以表示为

$$f_n = f_0 + n f_r \quad (13)$$

式中, f_0 表示光频梳的初始频率,实际代表光频梳整个载波包络的频率偏移,因此也可被称作偏置频率.通过如图6(a)所示的典型微腔光频梳产生装置,将连续脉冲激光泵入WGM光学微腔中.在腔内高能量密度的光场作用下,通过简并和非简并两种四波混频过程发生参量振荡,从而实现频率变换.由于所有梳齿的间距严格相等,可以利用光电二极管的光电转换效应,成功地探测到梳齿间的拍频信号.

微腔光频梳的特性,如梳齿的间距、宽度以及整体光谱的形态,均受到微腔物理特性和激光调控方式的深刻影响.通过精确调控激光器的波长移动速率和方向,本研究能够优化光频梳的输出特性,以满足不同应用场景的需求.最终,本研究成功获得了如图6(d)所示的稳定光频梳输出.

本文产生光频梳所采用的微棒腔最为显著的特征

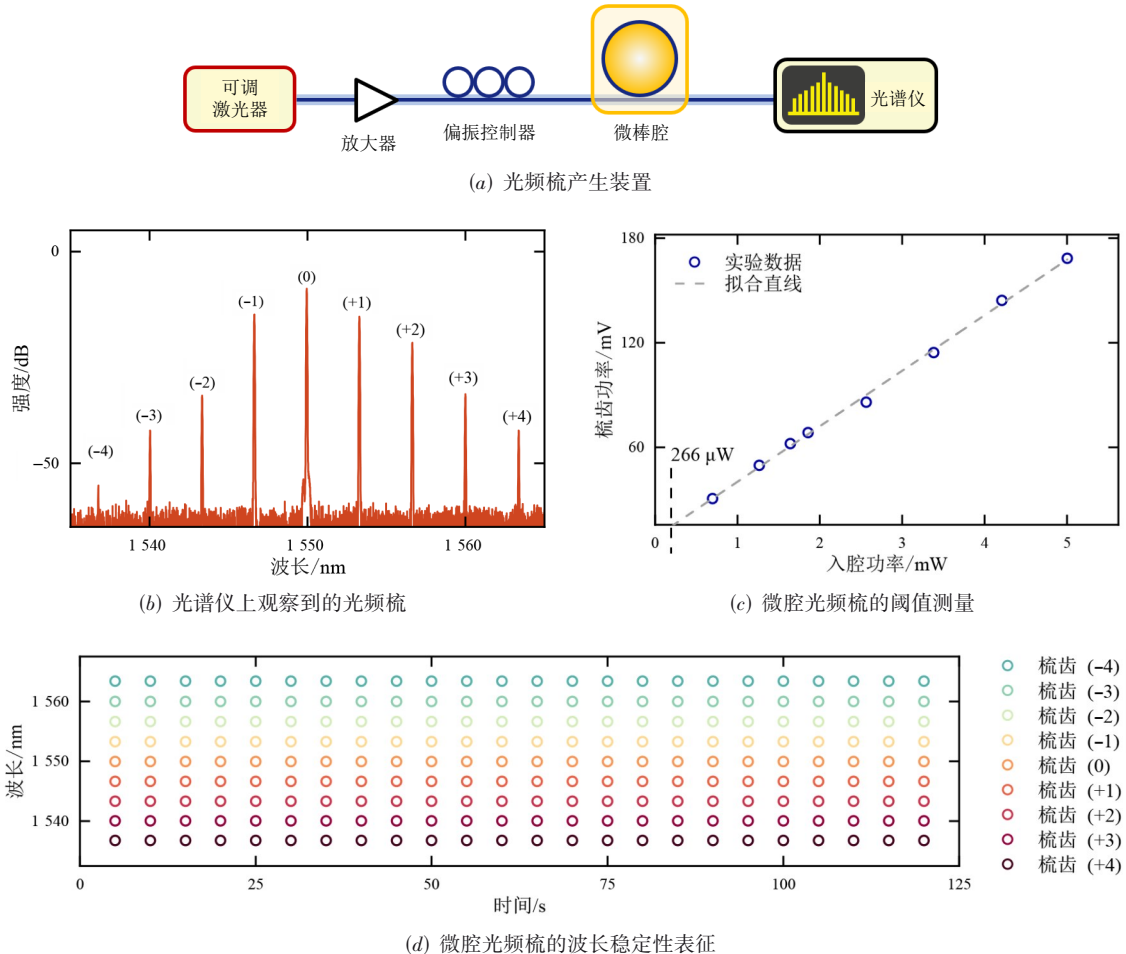


图6 基于二氧化硅微棒腔产生的微腔光频梳

在于其超高 Q 值. 由于之前已提及微腔光频梳的产生阈值 P_{th} 与微腔的 Q 值的平方成反比关系, 因此, 本文根据已知的阈值计算公式来估算当前微腔在理论上的阈值大小. 具体的计算式为^[29]

$$P_{th} = \frac{\pi n_0 \omega_0 V_m}{4 \eta n_2 D_1 Q_L^2} \quad (14)$$

式中, n_0 表示微腔材料的线性折射率; n_2 表示微腔材料的非线性折射率; ω_0 表示微腔的谐振频率; D_1 与微腔的自由光谱范围 (Free Spectrum Range, FSR) 相等; 而 V_m 表示微腔的模式体积, 反映了微腔内部光场分布的空间范围; η 被定义为 Q_L/Q_c , 其中 Q_L 是结合了微腔的本征损耗 Q_0^{-1} 以及耦合损耗 Q_c^{-1} 的负载品质因子. Q_L 的计算依据公式 $Q_L^{-1} = Q_0^{-1} + Q_c^{-1}$. 经过对封装后的二氧化硅微棒腔进行精确测量, 本研究详细表征了该微腔的 Q 值、模式体积以及自由光谱范围, 并将这些参数代入上式中, 计算出该微腔的光频梳产生阈值约为 $200 \mu\text{W}$.

实验中可以通过逐渐减小泵浦激光功率, 持续记录边带梳齿强度的变化, 绘制出如图 6(c) 所示的入腔功率与梳齿强度关系图. 由于两者间存在线性关系^[11], 通过延长线的方式确定了曲线与横轴的交点. 这一交

点具有实际意义: 当泵浦功率超过该交点值时, 光频梳的边带信号将开始显现, 即发生四波混频效应并产生光频梳边带, 也就是阈值功率的大小.

本实验中得到的光频梳产生泵浦功率阈值预测值为 $266 \mu\text{W}$, 尽管与理论计算值存在一定差距, 但仍处于极低水平. 这意味着在需要低功耗的应用场景中, 本研究制备的微棒腔能够胜任工作. 若未来能进一步优化微腔的耦合条件, 并改进锥形光纤的拉锥过程以提升光纤透过率, 光频梳边带产生的泵浦阈值有望进一步降低.

鉴于温度传感对光频梳各梳齿的波长稳定性有极高要求, 本文对图 6(b) 中的 5 根光频梳的梳齿进行了波长稳定性表征. 如图 6(d), 通过间隔 5 s 共 44 次采样进行对比分析, 发现光频梳的梳齿表现出较强的波长稳定性, 这为后续温度传感应用的精确提供了坚实保障.

5.3 光频梳温度传感实验

通过对 PID 电路的精准调控, 将温控片的温度从 30°C 逐步提升至 60°C , 每次提升 2°C , 并持续追踪光频梳的变化, 如图 7 所示. 观察发现, 泵浦波长从初始的 1553.084 nm 移动至 1553.346 nm . 图 7(a) 展示了光频梳各梳齿波长位置随温度变化的偏移情况.

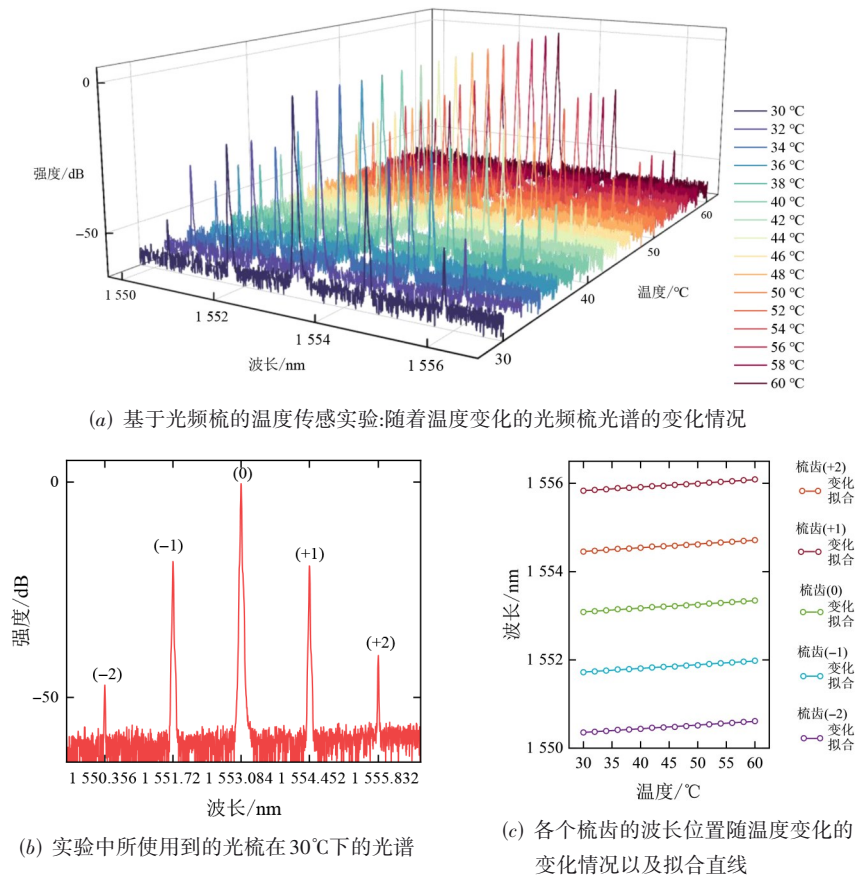


图7 基于光频梳的温度传感实验

由图 7(b)中的光梳强度曲线可知,在实验测量范围内信噪比最高可达 41.97 dB. 此外,详细的波长变化数值记录在图 7(c)中. 分析数据可见,这 5 根梳齿的变化幅度大致相同,变化率分别为 8.35 pm/°C、8.39 pm/°C、8.51 pm/°C、8.45 pm/°C 和 8.32 pm/°C. 通过取平均值,得出本文温度传感的分辨率为 8.40 pm/°C.

6 总结

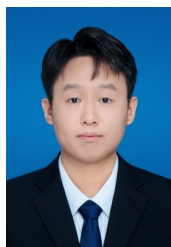
本文提出了一种二氧化硅微棒腔的自动化制备工艺,并通过优化制备流程,增加抛光、退火工艺,实现了 3.0×10^9 的超高品质因子,整个制备流程在 1 min 以内即可完成. 为了进一步提高微棒腔的应用能力和抗干扰能力,本文还对传统的锥形光纤-微棒腔耦合系统进行了集成温控的非接触式模块化封装,在保证维持微腔超高品质因子特性的同时,增强了其抗干扰能力,使其可以适用于更多复杂的实际应用场景. 此外,本文还基于超高品质因子微棒腔产生了具有超低阈值的克尔光频梳,并利用光频梳的多梳齿特性,实现了具有高灵敏度、大测量范围的环境温度传感实验. 本文所实现的超高品质因子微棒腔在精密光谱、精密测距、大容量通信等领域具有广阔的应用前景,所提出的基于光频梳多梳齿的温度传感方案为微腔传感的发展提供了新思路.

参考文献

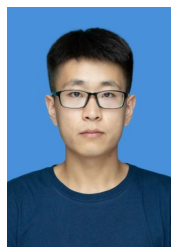
- [1] LIHACHEV G, RIEMENSBERGER J, WENG W L, et al. Low-noise frequency-agile photonic integrated lasers for coherent ranging[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 3522.
- [2] RIEMENSBERGER J, LUKASHCHUK A, KARPOV M, et al. Massively parallel coherent laser ranging using a soliton microcomb[J]. *Nature*, 2020, 581(7807): 164-170.
- [3] LUKASHCHUK A, RIEMENSBERGER J, KARPOV M, et al. Dual chirped microcomb based parallel ranging at megapixel-line rates[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 3280.
- [4] FUJII S, TANAKA S, OHTSUKA T, et al. Dissipative Kerr soliton microcombs for FEC-free optical communications over 100 channels[J]. *Optics Express*, 2022, 30(2): 1351-1364.
- [5] GUIDRY M A, LUKIN D M, YANG K Y, et al. Quantum optics of soliton microcombs[J]. *Nature Photonics*, 2022, 16: 52-58.
- [6] LIU B Y, GENG Y, ZHANG Q, et al. All-optical carrier recovery for self-homodyne detection via injection locked Brillouin laser in whispering-gallery-mode microcavity[J]. *Chinese Optics Letters*, 2021, 19(11): 111901.
- [7] YUAN Z Q, WANG H M, WU L, et al. Linewidth enhancement factor in a microcavity Brillouin laser[J]. *Optica*, 2020, 7(9): 1150.
- [8] MOILLE G, PEREZ E F, STONE J R, et al. Ultra-broadband Kerr microcomb through soliton spectral translation[J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 7275.
- [9] SUMETSKY M, DULASHKO Y, WINDELER R S. Optical microbubble resonator[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(7): 898.
- [10] DEL' HAYE P, DIDDAMS S A, PAPP S B. Laser-machined ultra-high-Q microrod resonators for nonlinear optics[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(22): 221119.
- [11] YAO L, LIU P, CHEN H J, et al. Soliton microwave oscillators using oversized billion Q optical microresonators[J]. *Optica*, 2022, 9(5): 561.
- [12] KIPPENBERG T J, KALKMAN J, POLMAN A, et al. Demonstration of an erbium doped microdisk laser on a silicon chip[C]//2006 Conference on Lasers and Electro-Optics and 2006 Quantum Electronics and Laser Science Conference. Piscataway: IEEE, 2006: 1-2.
- [13] LEE H, CHEN T, LI J, et al. Chemically etched ultrahigh-Q wedge-resonator on a silicon chip[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6: 369-373.
- [14] WU L, WANG H M, YANG Q F, et al. Greater than one billion Q factor for on-chip microresonators[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(18): 5129-5131.
- [15] SANTIAGO-CORDOBA M A, BORISKINA S V, VOLLMER F, et al. Nanoparticle-based protein detection by optical shift of a resonant microcavity[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(7): 073701.
- [16] ZHU J G, OZDEMIR S K, XIAO Y F, et al. On-chip single nanoparticle detection and sizing by mode splitting in an ultrahigh-Q microresonator[J]. *Nature Photonics*, 2010, 4: 46-49.
- [17] SHAO L B, JIANG X F, YU X C, et al. Detection of single nanoparticles and lentiviruses using microcavity resonance broadening[J]. *Advanced Materials*, 2013, 25(39): 5616-5620.
- [18] VOLLMER F, ARNOLD S, KENG D. Single virus detection from the reactive shift of a whispering-gallery mode[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105(52): 20701-20704.
- [19] NAWROCKA M S, LIU T, WANG X, et al. Tunable silicon microring resonator with wide free spectral range[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(7): 071110.
- [20] MALLIK A K, FARRELL G, LIU D J, et al. A coated spherical microresonator for measurement of water vapor

- concentration at PPM levels in very low humidity environments[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(13): 2667-2674.
- [21] YAO B C, YU C B, WU Y, et al. Graphene-enhanced brillouin optomechanical microresonator for ultrasensitive gas detection[J]. Nano Letters, 2017, 17(8): 4996-5002.
- [22] YANG D Q, CHEN J H, CAO Q T, et al. Operando monitoring transition dynamics of responsive polymer using optofluidic microcavities[J]. Light, Science and Applications, 2021, 10(1): 128.
- [23] WU Y R, DUAN B, SONG J E, et al. Simultaneous temperature and pressure sensing based on a single optical resonator[J]. Optics Express, 2023, 31(12): 18851-18861.
- [24] CHEN W, YAO L, LI C, et al. Ultrahigh-Q packaged silica microrod cavity for microcomb generation[C]//2022 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO). Piscataway: IEEE, 2022: 1-2.
- [25] LI C, CHEN W, DUAN B, et al. A highly stable and 2.4×10^9 quality factor packaged microrod resonator[C]//2023 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO). Piscataway: IEEE, 2023: 1-2.
- [26] YANG D Q, GUO Y Y, CHEN W, et al. Ultrahigh efficiency four-wave mixing wavelength conversion in packaged silica microrod resonator[J]. Journal of Lightwave Technology, 2023, 41(6): 1768-1774.
- [27] WANG J, ZHU B W, HAO Z Z, et al. Thermo-optic effects in on-chip lithium niobate microdisk resonators[J]. Optics Express, 2016, 24(19): 21869-21879.
- [28] LIU S P, FENG J B, TIAN Y, et al. Thermo-optic phase shifters based on silicon-on-insulator platform: State-of-the-art and a review[J]. Frontiers of Optoelectronics, 2022, 15(1): 9.
- [29] YI X, YANG Q F, YANG K Y, et al. Soliton frequency comb at microwave rates in a high-Q silica microresonator[J]. Optica, 2015, 2(12): 1078.

作者简介



赵义轩 男, 2000年出生于陕西省安康市. 北京邮电大学信息与通信工程学院生物医学工程专业硕士研究生. 主要研究方向为光学微腔制备和生物传感应用.
E-mail: zhaoyixuan@bupt.edu.cn



潘廷扬 男, 1999年出生于山东省临沂市. 北京邮电大学信息与通信工程学院信息通信工程专业博士研究生. 主要研究方向为太赫兹超表面和光学微腔纳米颗粒传感.
E-mail: panty6210@bupt.edu.cn



李昶 男, 1999年出生于安徽省六安市. 北京邮电大学信息与通信工程学院生物医学工程专业硕士研究生. 主要研究方向为光学微腔自动化制备.
E-mail: li_chang@bupt.edu.cn



段冰 女, 1996年出生于山东省菏泽市. 北京邮电大学信息与通信工程学院信息通信工程专业博士研究生. 主要研究方向为光学微腔传感和光学频率梳.
E-mail: duanbing@bupt.edu.cn



张璇 女, 1988年出生于山东省济宁市. 北京邮电大学信息与通信工程学院工程师. 主要研究方向为现代通信技术.
E-mail: zhangxuanbupt@bupt.edu.cn



杨大全 男, 1986年出生于山东省临沂市. 北京邮电大学信息与通信工程学院教授、博士生导师. 主要研究方向为微纳光学和光学微腔传感. 中国电子学会会员编号: E190014545S.
E-mail: ydq@bupt.edu.cn