

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2023.04.03

回音壁模式光学微腔传感研究进展

温棚宇¹, 龙桂鲁^{1,2,3}, 王敏^{2*}

(1.清华大学 物理系 低维量子国家重点实验室, 北京 100084;

2.北京量子信息科学研究院, 北京 100193; 3.量子信息前沿科学中心, 北京 100084)

摘要: 简要回顾了近几年回音壁模式光学微腔在传感研究中的应用, 其涉及领域包括位移传感、力传感、加速度传感、质量传感、纳米粒子传感、温度传感、角速度传感和奇异点增强传感。对回音壁模式光学微腔在不同领域的传感机理进行了简单介绍, 并且对重要的实验工作进行了介绍, 指出了提高传感精度的重要因素, 为之后的理论和实验研究提供了一定的参考。

关键词: 回音壁模式; 光学微腔; 传感; 光力学

中图分类号: TB939

文献标志码: A

文章编号: 1674-5795(2023)04-0033-11

Review of whispering-gallery-mode microcavity sensing

WEN Pengyu¹, LONG Guilu^{1,2,3}, WANG Min^{2*}

(1.Department of Physics, State Key Laboratory of Low-Dimensional Quantum Physics, Tsinghua University,

Beijing 100084, China; 2.Beijing Academy of Quantum Information Sciences, Beijing 100193, China;

3.Frontier Science Center for Quantum Information, Beijing 100084, China)

Abstract: The applications of whispering-gallery-mode microcavities in sensing research, including displacement sensing, force sensing, acceleration sensing, mass sensing, nanoparticle sensing, temperature sensing, angular velocity sensing and exceptional points enhanced sensing, in recent years have been reviewed. The basic theory of different sensing schemes and some related important experimental work are introduced, and the important factors that may help improve sensing accuracy are illustrated, which will provide reference for the following theoretical and experimental research.

Key words: whispering-gallery-mode; optical microcavity; sensing; optomechanics

0 引言

早在 20 世纪初, Lord Rayleigh 就发现圣保罗大教堂的圆形墙壁存在这样一种现象: 当一个人在墙壁的某一处轻声说话, 隔很远的另一个人也能听得很清楚。Lord Rayleigh 将这种声学现象称为回音壁模式(Whispering-Gallery-Mode, WGM)。而如

今, 利用全反射将光场囚禁在有旋转对称性的回音壁模式光学微腔已经成为研究光与物质相互作用的一个重要方式。随着微纳加工水平的提高, 回音壁模式光学微腔的几何构型也变得多种多样, 包括微球腔^[1]、微芯圆环腔^[2]、微盘腔^[3]、微环腔^[4]、微瓶腔^[5]、微泡腔^[6]等, 不同的结构有着不同的应用场景。回音壁模式光学微腔具有模式

收稿日期: 2023-04-18; 修回日期: 2023-04-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61727801, 62131002); 国家重点研发计划项目(2017YFA0303700); 中国科学技术协会青年人才托举工程资助项目(2022QNRC001); 广东省重点领域研发计划(2018B030325002); 北京未来芯片创新中心, 清华大学自主科研计划项目

引用格式: 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.

Citation: WEN P Y, LONG G L, WANG M. Review of whispering-gallery-mode microcavity sensing[J]. Metrology & Measurement Technology, 2023, 43(4): 33-43.



体积小、品质因子高、光与物质相互作用强、易于集成等特点，备受研究者青睐，在光力学研究^[7]、基态冷却^[8]、量子信息处理^[9]、高灵敏度传感^[10]、非线性光学^[11]、光频梳^[12]、激光物理^[13]、非厄米物理^[14]、光学器件^[15]等领域取得了重要进展。

传感在科技发展进程中起着重要作用，对诸如速度、质量、加速度、角速度、磁场等物理量的传感使人们能更好地感知周围物理环境的变化，从而制定适宜的生产、生活的方案。此外，对于生物分子的传感也促进了医学的发展，造福了人类。传感本质上是利用熟知的物理体系对周围相互作用的改变所产生的反馈，而这种反馈的质量将会影响到传感的质量。与含有Johnson噪声的电信号测量相比，光学测量有着测量噪声小的特点，理论上能够达到量子测量极限。因此，利用光学体系进行高精度传感测量是近期研究的热门方向，在已经发表的相关综述文章中也做过详细的介绍^[10, 16]。随着该领域的迅猛发展，近几年不断涌现出来相关的优秀工作。作为对前面工作的补充，本文主要介绍了最近几年回音壁模式光学微腔在传感中的进展和应用，包括在位移传感、力传感、加速度传感、质量传感、纳米粒子传感、温度传感、磁传感、奇异点(Exceptional Point, EP)增强传感、角速度传感等领域的应用。

1 回音壁模式光学微腔

如引言所述，“回音壁模式”最早作为一种声学现象被人们熟知。而作为一种光学现象，回音壁模式光学微腔利用全反射将光场束缚在尺寸为微米级别的腔体里，极大增强了光与物质的相互作用，是研究量子光学、非线性光学等物理问题的良好平台。为了实现全反射条件，并在此基础上减少材料吸收，回音壁模式光学微腔的制备材料一般选用折射率和透射率都较高的材料，比如二氧化硅、硅。近几年，铈酸锂微腔因具有良好的非线性光学性质，受到了人们的广泛关注^[17]。

回音壁模式光学微腔的主要性质由品质因子 Q 、模式体积 V_{mode} 、光谱精细度 F 描述。

品质因子 Q 描述的是光场储存在微腔里的时间，定义为光场总能量 E 与每个光程周期 T 损耗能

量的比值，即

$$Q = -2\pi \frac{E}{(dE/dt)T} \quad (1)$$

式中： E 为回音壁模式光学微腔的腔内能量。

一般假设腔内能量 E 以 κ 的速率指数衰减，结合腔的共振频率 ω ，可以得到品质因子 Q 与耗散率 κ 的关系为

$$Q = \frac{\omega}{\kappa} = \frac{\omega}{\Delta\omega} \quad (2)$$

式中： $\Delta\omega$ 为线宽，在实验测量中对应洛伦兹谱线的线宽，其应用场景更多。上述计算品质因子 Q 中用到的 κ 考虑了所有耗散通道，即本征耗散 κ_0 和耦合耗散 κ_{ex} 。耦合耗散与微腔具体耦合距离有关，在实验中可以实时调控。而本征耗散则由腔自身的吸收损耗、散射损耗、辐射损耗贡献。

除品质因子 Q 外，模式体积 V_{mode} 是另一个刻画光与微腔相互作用的物理量。模式体积 V_{mode} 为光场在微腔中分布体积的大小，定义为

$$V_{\text{mode}} = \frac{\int \epsilon(r)|E(r)|^2 d^3r}{\max(\epsilon(r)|E(r)|^2)} \quad (3)$$

式中： $\epsilon(r)$ 代表位置 r 处的介电常数。很明显，模式体积越小，光场局部分布密度越大，光与微腔局部相互作用越强，更有利于开展某些需要激发非线性效应的实验。

光谱精细度 F 与品质因子 Q 类似，描述的是光子从微腔逃逸出前的环绕周数，其定义为

$$F = \frac{\Delta\omega_{\text{FSR}}}{\kappa} \quad (4)$$

式中： $\Delta\omega_{\text{FSR}}$ 为微腔支持的相邻谐振模式间的角频率之差。

2 位移、力、加速度传感

本节主要介绍回音壁模式光学微腔在位移、力、加速度这些物理量的传感应用。由于光力作用的形式为光学振子和力学振子的相互耦合，人们很早就考虑利用回音壁模式光学微腔的光力相互作用对位移进行传感是一种很自然的想法。在此，先简单介绍一下光力学的基本物理图像。

一个光力学体系可以简化为两个相互耦合的简谐振子，分别是以 ω_c 为频率振动的光学振子和以 ω_m 为频率振动的力学振子。其哈密顿量为

$$H = \hbar\omega_c c^\dagger c + \hbar\omega_m b^\dagger b + \hbar g_0 (b + b^\dagger) c^\dagger c + H_d \quad (5)$$

式中： \hbar 为普朗克常数， $c^\dagger c$ 和 $b^\dagger b$ 分别为光学模式和力学模式的湮灭(产生)算符， g_0 为单个光子和单个声子之间的光力耦合强度， H_d 表示振幅为 α_m ，频率为 ω_d 的驱动光场， $H_d = \hbar\alpha_m(c e^{-i\omega_d t} + h.c.)$ 。一般来讲，驱动光场频率 ω_d 和光腔共振光场 ω_c 的频率用失谐量 Δ 来表示，即 $\Delta = \omega_d - \omega_c$ 。一般将 $\Delta < 0(\Delta > 0)$ 称之为红(蓝)失谐。在以 ω_d 为频率的旋转坐标系中，上述哈密顿量变为

$$H' = \hbar[-\Delta + g_0(b + b^\dagger)]c^\dagger c + \hbar\omega_m b^\dagger b + H'_d \quad (6)$$

相互作用项是三次项的，可以引起很多的物理现象，比如光子阻塞、光学双稳态等。一般来讲，单光子声子耦合强度 g_0 与其他能量相比尺度较小，一般采取标准的线性化处理上述哈密顿量。用 α 为平均光场，则有光场涨落 $\delta c = c - \alpha$ ，线性化的哈密顿量为

$$H_{lin} = -\hbar\Delta\delta c^\dagger\delta c + \hbar\omega_m b^\dagger b + \hbar G(\delta c^\dagger + \delta c)(b^\dagger + b) \quad (7)$$

式中： G 为光力耦合强度， $G = g_0|\alpha|$ ，与驱动光场强度相关。为了方便表示，用 c 代替 δc ，上述线性化哈密顿量写为

$$H_{lin} = -\hbar\Delta c^\dagger c + \hbar\omega_m b^\dagger b + \hbar G(c^\dagger + c)(b^\dagger + b) \quad (8)$$

若继续作变换，在 $-\hbar\Delta c^\dagger c + \hbar\omega_m b^\dagger b$ 的相互作用绘景下，线性化哈密顿量变为

$$H'_{lin} = \hbar G(c^\dagger e^{-i\Delta t} + ce^{i\Delta t})(b^\dagger e^{i\omega_m t} + be^{-i\omega_m t}) \quad (9)$$

当 $\Delta = -\omega_m$ 时，通过旋波近似舍弃 $\pm 2\omega_m$ 的高频震荡项，上述线性化哈密顿量简化为 $\hbar G(cb^\dagger + c^\dagger b)$ ，相当于两个频率相同的谐振子交换粒子。这一参数下的光力系统可用于力学模式的基态冷却。当 $\Delta = \omega_m$ 时，采用旋波近似，上述哈密顿量简化

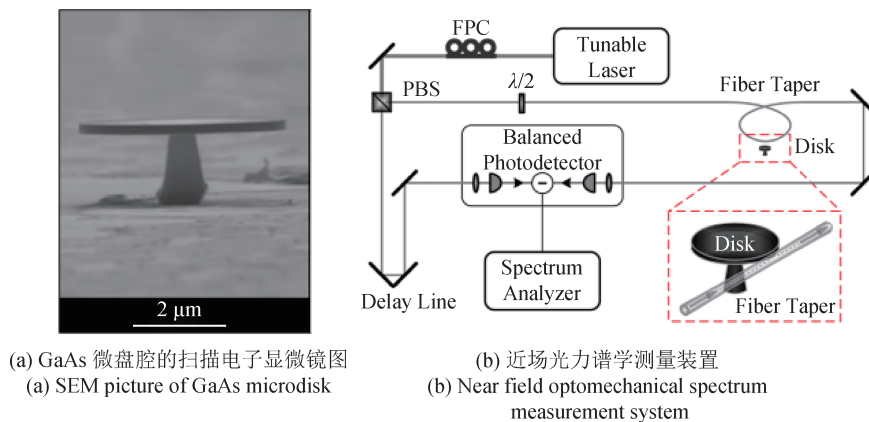
为 $\hbar G(cb^\dagger + c^\dagger b)$ ，这一参数下的光力系统可用于光子声子纠缠态的产生。当 $\Delta = 0$ 时，上述哈密顿量为 $\hbar G(c + c^\dagger)(b^\dagger e^{i\omega_m t} + be^{-i\omega_m t})$ ，这一参数下的光力系统可用于光力位移探测。

光学模式和力学模式相互耦合，一个回音壁模式光学微腔的透射谱里往往蕴藏着其力学模式的位移信息，因此，可以用来进行位移探测。位移传感的灵敏度为 $\sqrt{S_{xx}(\omega)}$ ， $S_{xx}(\omega)$ 为位移算符的噪声谱，单位为 $m/Hz^{1/2}$ ，定义为

$$S_{xx}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \langle x(t)x(0) \rangle e^{i\omega t} dt \quad (10)$$

一个回音壁模式光学微腔的光学模式和力学模式的品质因子越高、光力相互作用越强、所处环境温度越低，则越能实现高精度传感测量。

2008年，Schliesser等人^[18]在微芯圆环腔体系中利用零差探测的方法实现了精度为 $10^{-19} m/Hz^{1/2}$ 的位移测量，其测量精度受散粒噪声的限制。2009年，Schliesser等人利用边带冷却技术对微芯圆环腔体系进行基态冷却，实现了接近海森堡不确定性极限的位移测量精度，测量到背景噪声为 $1.5 \times 10^{-18} m/Hz^{1/2}$ 。2009年，Anetsberger等人^[19]利用光纤锥-微芯圆环腔和纳米力学振子耦合，实现了精度为亚飞米每 $Hz^{1/2}$ 的位移测量，其测量不确定度逼近了标准量子极限。2010年，Lu等人^[20]用GaAs微盘腔实现了高达 $100 GHz/nm$ 的光力耦合强度，在室温条件下实现了精度为 $10^{-17} m/Hz^{1/2}$ 的布朗运动测量，相关实验装置如图1所示。2012年，Grudinin等人^[21]提出将两片微盘腔耦合在一



(a) GaAs 微盘腔的扫描电子显微镜图
(a) SEM picture of GaAs microdisk

(b) 近场光力谱学测量装置
(b) Near field optomechanical spectrum measurement system

注：FPC-光纤偏振控制器；PBS-偏振分束器。

图1 用于测量布朗运动的微盘腔装置^[20]

Fig.1 Microdisk system used for measurement of Brownian motion^[20]

起, 获得了能与法布里-珀罗腔媲美的位移测量精度。2013年, Tallur 等人^[22]提出用 Rayleigh 散射提升回音壁光力位移探测的方案。2015年, Wilson 等人^[23]在一热退相干时间尺度内对一个微盘腔中机械频率为 4.3 MHz 的力学模式实现了精度高达零点量子涨落的测量, 对其基态制备有着重要意义。

位移探测的成功能激发人们思考利用回音壁模式光学微腔进行力的传感。在光力体系中, 力 $F(\omega)$ 和位移 $x(\omega)$ 通过响应因子 $\chi(\omega)$ 联系起来, 即

$$F(\omega) = \frac{x(\omega)}{\chi(\omega)} \quad (11)$$

因此, 可以通过光力相互作用实现力的传感测量。此外, 力传感的测量精度 $\sqrt{S_{FF}(\omega)}$ 与位移

的测量精度 $\sqrt{S_{xx}(\omega)}$ 也可以通过响应因子 $\chi(\omega)$ 联系起来。

2008年, Ioppolo 等人^[24]利用挤压高分子微球腔的方法对压力进行了测量, 得出了由压力引起的回音壁模式共振波长的移动为 7.664 nm/N。2009年, Himmelhaus 等人^[25]利用掺杂了荧光染料的微球腔对生物细胞中的生物力进行了测量。2012年, Gavartin 等人^[26]将微盘腔和氮化硅纳米悬臂梁耦合在一起, 在室温下实现了精度为 74 aN/Hz^{1/2} 的力测量。2013年, Harris 等人^[27]利用微芯圆环腔从实验上验证了力传感与反馈通道无关, 其实验装置如图 2 所示。2015年, Zhou 等人^[28]在 高分子回音壁腔中实现了 19.7 pm/ μ N 的力学传感测量。

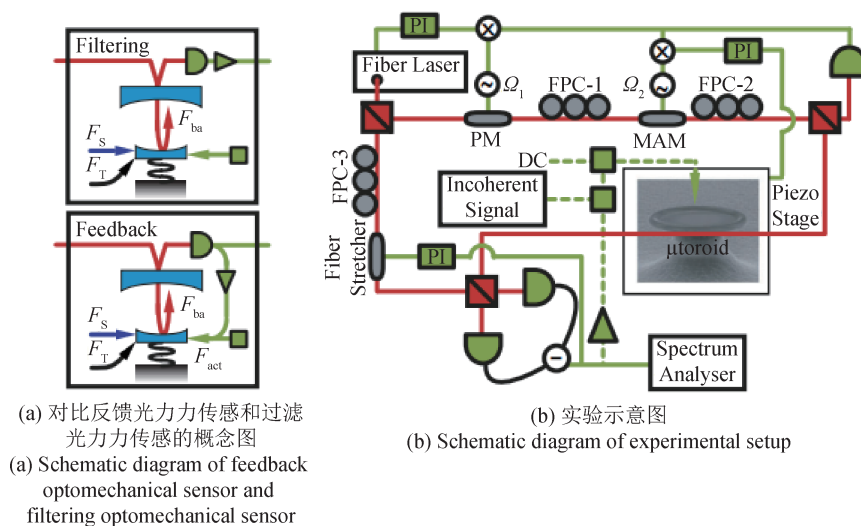


图 2 利用微芯圆环腔验证力传感与反馈通道无关^[27]

Fig.2 Verification of the independence of force sensing and feedback channels using microtoroid^[27]

类似地, 还可以通过光力相互作用实现加速度传感。加速度的传感也可以与位移量发生关联, 如式 (12)。

$$x(\omega) = m_{\text{eff}} a(\omega) \chi(\omega) \quad (12)$$

式中: m_{eff} 为力学振子的有效质量, $a(\omega)$ 为所测量的加速度。

用光学手段进行加速度传感具有传感精度高、抗电磁干扰能力强的特点, 用回音壁模式光学微腔进行加速度传感已经成为研究热点。2013年, Dong 等人^[29]以回音壁环腔为基础制备了一种片上的加速度传感器, 在低功率操控下的传感精度为

19.7 pm/g (g 为重力加速度)。2018年, Li 等人^[30]利用微球腔的光力相互作用提出了一种便携、可配电池、可编程门阵列自动化的加速度传感仪, 在 2~7 kHz 的频率下获得了 40 μ g/Hz^{1/2} 的传感精度。同年, 他们还用微球腔取得了 4.5 μ g/Hz^{1/2} 的加速度传感精度, 并指出其在地球上或太空中短程引力测量方面的潜在应用^[31]。2019年, Savchenkov 等人^[32]用高品质回音壁模式光学微腔在 1~200 Hz 的带宽内且热传感度不超过 12 MHz/ $^{\circ}$ C 的情况下, 实现了精度为 $5 \times 10^{-11} g^{-1}$ (g 为重力加速度) 的加速度测量。

3 质量、纳米粒子传感

质量传感和微小物体传感也是传感领域研究的核心内容。因其结构尺度在微米级别，回音壁模式光学微腔很适合应用于微小质量传感和纳米粒子传感。当微腔表面附有微小物体时，微腔的等效质量 m_{eff} 发生了 δm_{eff} 大小的变化。而 m_{eff} 与力学模式的振动频率 ω_m 密切相关，故可以用力学模式的振动频率变化量 $\delta\omega_m$ 来反映微小物体质量 δm_{eff} ，这是回音壁微腔质量传感基本原理的一种。此外，这种微小物体(纳米粒子)的引入也会引起回音壁微腔中光学模式的散射，尤其是简并的顺时针模式和逆时针模式之间的相互散射，可能会引起透射谱中洛伦兹曲线的劈裂。而这种劈裂的大小通常与纳米粒子的尺寸密切相关，通过测量透射谱中劈裂的大小，可以反推出纳米粒子的尺寸。对于吸收或者散射作用比较强的纳米粒子，其存在也会导致微腔耗散率的变化，可以通过透

射谱线宽的变化推测出纳米粒子的尺寸信息。最后需要考虑的一点的是，纳米粒子的折射率与回音壁微腔不同，纳米粒子的存在可能会导致回音壁模式的光程变化，从而反映在共振波长的变化上。因此，通过探测共振波长的频移也可以反映纳米粒子的信息。以上三种作用可能同时存在，具体选用何种机制作为探测手段需要考察纳米粒子的具体行为，即考察哪一种作用是主导因素。

2008年，Vollmer等人^[33]在一个半径为39 μm的微球腔里利用763 nm的激光激发了品质因子Q为6.4 × 10⁵的光学模式，并且利用该光学模式的频移探测得到了一种病毒的半径信息，结合其密度得到了质量为5.2 × 10⁻¹⁶ g。2011年，Shopova等人^[34]提出利用赤道平面的电介质纳米粒子和束缚在粒子赤道上的等离子体纳米粒子的相互作用来提高频移探测的方案。2012年，Dantham等人^[35]利用单偶极子激发的纳米壳作为微腔频移放大器，在一个品质因子只有4 × 10⁵的微球腔里实现了

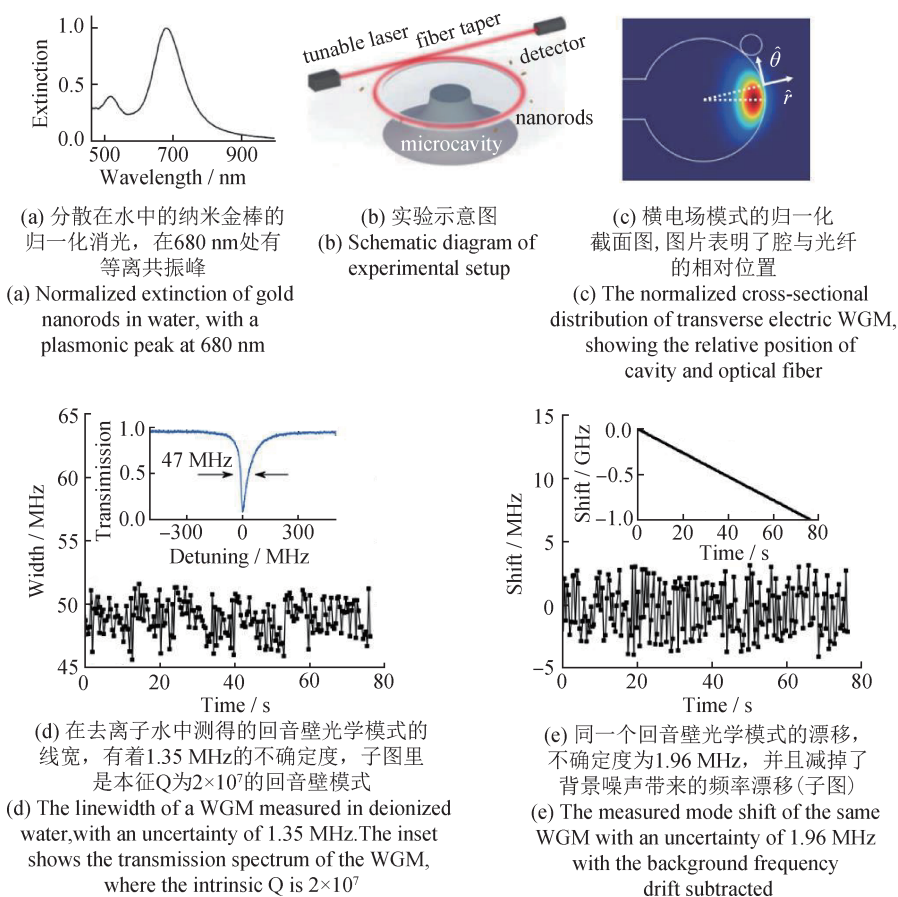


图3 利用回音壁光学微腔对金属纳米棒进行探测^[39]

Fig.3 Detection of metal nanorods using whispering gallery mode microcavity^[39]

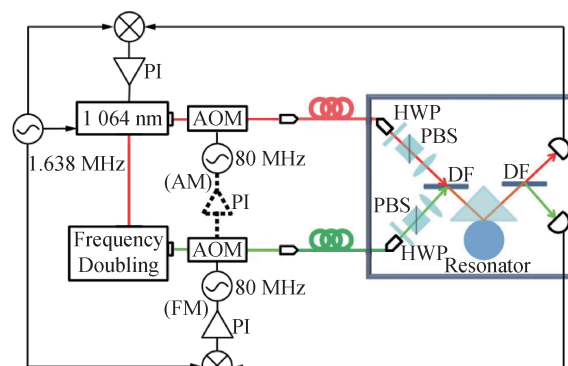
RNA病毒MS2的探测。2014年,Foreman等人^[36]从理论上研究了用回音壁模式光学微腔做生物分子传感的两种模式(频移探测模式和耗散展宽探测模式)的区别,并且给出了用于探测的最优耦合类型—过耦合情形。2016年,Yu等人^[37]利用一个高品质微腔的光弹效应探测牛血清白蛋白分子,其探测效果与使用传统方法探测得到的效果相比提高了若干数量级,在信噪比为16.8的情况下实现了分子重量为66 kDa的探测。2016年,Baaske等人^[38]利用回音壁模式光学微腔检测到了单个锌离子和单个汞离子和耦合在微腔上的等离子金棒之间的相互作用。2016年,Shen等人^[39]利用回音壁模式光学微腔对金纳米棒进行了探测。与传统的色散耦合(Dispersive Coupling)不同,Shen等人采用的是耗散耦合方式(Dissipation Coupling),并且通过检测腔模的线宽变化和漂移对液体环境中的金纳米棒进行了检测,其实验装置图和结果图如图3所示。Shen等人还通过设置表面等离子体共振的探针波长来调节纳米棒的吸收,并以此评估了色散性和耗散性传感方法,表明了耗散性传感方法在检测有损耗的纳米颗粒方面的巨大潜力。2017年,Lin等人^[40]理论上提出用光场的正交分量来探测微小物体质量的方案,在合适的参数选取下这种方案能实现 $\Delta m/m \sim 10^{-8} - 10^{-7}$ 的探测精度。2020年,Guo等人^[41]在一个双曲鼓面的主动掺杂微腔中对生物分子进行探测,实现了生物分子浓度1 ag/mL的探测,并且能实现人工血清中的生物分子的探测,其探测浓度极限为9 ag/mL。2020年,Duan等人^[42]利用回音壁模式光学微腔对乙酰胆碱酯酶进行了探测,由于回音壁模式共振和5 CB分子的共同放大作用,生物进程中的微小变化会在光学频谱里得到增强的反应,最后实现了0.3 pg/mL的测量。2021年,Yu等人利用回音壁微腔的具有高品质因子和高强度电磁场的界面光学模式实现了生物分子探测,得到的精度为0.3 pg/cm²,此外他们还利用等离子增强的界面模式实现了8 kDa的单DNA探测^[43]。

4 温度传感

温度是影响众多物理、化学、生命过程的重要物理量,对温度进行传感至关重要。温度的变

化可以改变回音壁光学微腔的尺寸,也可以影响微腔材料的折射率,从而影响其共振波长,故可以通过频移反应温度的变化。传统的温度传感器难以应用于亚微米尺度,而尺寸在微米级别的回音壁模式光学微腔正好可以解决此问题。

2010年, Ma等人用微球腔对室温(300 K)到低温区(110 K)范围内的温度进行了测量,其不同球腔的半径分布区间为85~435 μm 。Ma等人发现测量灵敏度与球腔半径无明显关系,而频率移动与温度变化有着三次方的关系。随着温度升高,测量精度从4.5 pm/K增大到11 pm/K,此规律和硅的热膨胀和热光效应吻合^[44]。2014年,Weng等人^[45]在同向晶体回音壁光学模式微腔中利用二向色双模技术实现了80 nK/Hz^{1/2}的温度传感。Weng等人同时激发了频率之比为2的两个模式,由于波长和温度对折射率的影响,两个模式的频率比值会发生变化,可作为温度变化的一种反映机制。该温度传感机制能自动压制热膨胀和震动带来的敏感性,且可以通过控制激光强度主动压制谐振器的温度涨落,实验装置如图4所示。



注: HWP—半波片; PBS—偏振分束器; DF—二色向滤光镜; AM—振幅调制; FM—频率调制; PI—比例积分反馈。

图4 实验装置图^[45]

Fig.4 Diagram of experimental setup^[45]

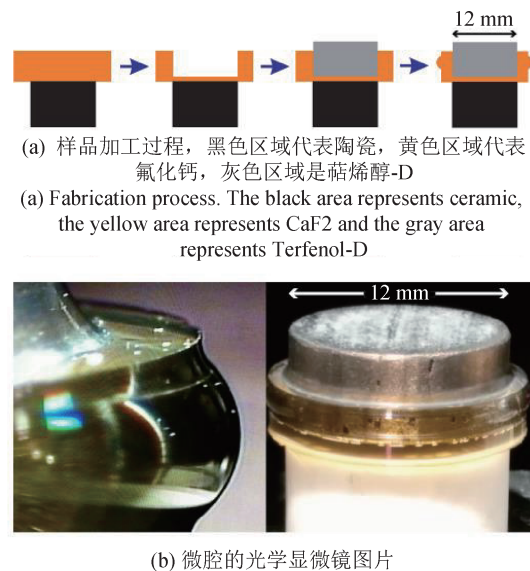
2016年,Liu等人用水溶液中DCM掺杂的油滴作为微腔进行温度传感,该油滴微腔用双光纤束缚住以防止形变,在25~35 $^{\circ}\text{C}$ 内取得了灵敏度为0.377 nm/ $^{\circ}\text{C}$ 的测量精度。Liu等人^[46]认为该液态回音壁模式光学微腔传感器适用于液体传感,易于集成入微流体体系。2021年,Liao等人^[47]指出回音壁模式光学微腔传统的传感模式是对单个光学模式进行追踪,这需要激光随时调整以追踪测量过程中所选中的模式。Liao等人提出可以把多个

模式的图像作为回音壁模式的“条形码”，并且将测量与多个模式的图像关联起来，而非只与某个单独模式关联起来。这种传感模式不仅发挥了回音壁模式光学微腔对温度传感的高灵敏度特性，还扩大了传感的范围。最后，他们获得的传感精度为 $4.5 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ ，温度探测极限可以低至 $0.002 \text{ }^\circ\text{C}$ 。2021年，Gualindolo 等人^[48]在镀金的铜腔放置了圆柱形的蓝宝石微波腔，两个同轴电缆像天线一样激发了圆柱形蓝宝石腔的回音壁驻波模式，并利用该模式实现了传感精度优于 $15 \text{ } \mu\text{K}$ 和 1.2 mK 的测量标准不确定度，其中测量标准不确定度是之前最好结果的3倍，并认为此工作可以替代铂电阻温度计。

5 磁传感

磁场传感在生产生活中有着重要作用，其应用领域包括电流测量、磁存储读取、矿物探测、磁异常探测、脑磁检测等。目前，最精准的磁探测技术是基于超导量子干涉的 SQUIDQ 器件，但该器件需要极低温条件，在实际操作中稍显复杂。以回音壁模式光学微腔为基础的磁力计具有体积小、重量轻、能耗低、易于片上集成、灵敏度高、探测范围宽等特点。

2012年，Forstner 等人^[49]将磁致伸缩材料与回音壁模式微腔相结合对磁场进行了高灵敏度传感。当磁场存在时，该材料会对微腔产生压力并激发其力学模式，最后通过光学信号读出。在室温条件下获得的最终测量精度为 $400 \text{ nT}/\text{Hz}^{1/2}$ 。2015年，Forstner 等人^[50]又在微芯圆环腔里实现了 100 pT 的测量精度，并且通过提升本征存在的非线性力学效应，在 2 Hz 的频段里实现了 100 nT 的测量精度。2016年，Yu 等人在一个厘米级别的回音壁模式光学微腔里实现了磁传感，由于该微腔尺寸较大，磁场积分达到了 0.45 cm^3 ，样品图如图5所示，当输入激光功率低于 $100 \text{ } \mu\text{W}$ 时，在赫兹到千赫兹频段内实现了最高精度为 $131 \text{ pT}/\text{Hz}^{1/2}$ 的磁场传感^[51]。2017年，Zhu 等人^[52]利用高分子聚合物封装的微芯圆环腔在赫兹到千赫兹频段对磁场进行了 $880 \text{ pT}/\text{Hz}^{1/2}$ 的传感，并且高分子聚合物封装可以增加该传感器对环境的鲁棒性。2020年，Li 等人^[53]在掺杂磁致伸缩材料 Terfenol-D 的



(a) 样品加工过程，黑色区域代表陶瓷，黄色区域代表氟化钙，灰色区域是碲烯醇-D
(a) Fabrication process. The black area represents ceramic, the yellow area represents CaF_2 and the gray area represents Terfenol-D
(b) 微腔的光学显微镜图片
(b) Optical microscope images of the resonator
图5 厘米级别回音壁光学模式微腔的磁传感^[51]
Fig.5 Centimeter scale whispering gallery mode cavity for magnetic field sensing^[51]

微芯圆环腔中实现了精度高达 $26 \text{ pT}/\text{Hz}^{1/2}$ 的传感，可以与低温下的微磁力计媲美。此实验观测到了两种磁响应，分别对应 Terfenol-D 的单晶形态和多晶形态。2022年，Zhang 等人^[54]通过观察掺杂磁性流体的回音壁模式微腔的共振波长移动对磁场进行传感，获得了 $53 \text{ pm}/\text{mT}$ 的传感精度。

6 奇异点增强的传感

奇异点 (Exceptional Point, EP 点) 是非厄米物理系统中特有的一种现象^[55]。当非厄米系统参数处于 EP 点位置时，其本征值和本征矢量将会同时简并。一般来讲，EP 点对应于系统宇称-时间对称相的转换点。当给处于二阶奇异点的系统大小为 ε 的微扰时，其本征能量会产生正别于 $\varepsilon^{1/2}$ 的劈裂。与传统的体系中产生的大小为 ε 的劈裂相比这是一个明显的方法，因此可以将其考虑为增强传感的一种手段。

2017年，Chen 等人^[56]用微芯圆环腔演示了 EP 增强的纳米粒子探测实验，先用两个散射粒子使系统处于奇异点状态，然后引入的待探测粒子将会使微腔共振频率发生移动，且移动的大小与待测粒子引入的微扰强度呈 $1/2$ 次方关系。2017年，Hodaiei 等人^[57]也用主动、增益和中性的微环腔构造系统并使之处于 EP 点，在实验上观测到了增强的探测。

EP点增强的传感已经在多种体系中得到实验展现,但是这些实验往往需要对系统进行复杂且精细的准备。如在耗散、增益腔共同体系中,需要严格控制增益、耗散系数的大小,对实验技术的要求颇高。此外,系统随时受到的扰动可能让体系偏离其本来处在的EP点状态,使EP点增强的高灵敏度传感失效。ZHOU Q等人提出了一种用EP面代替EP点进行传感的理论方案^[58]。EP面指参数空间中EP点组成的面,在外界扰动的情况下系统始终处于EP面上的某个点,将时刻具有增强传感的性质。据此,2021年,Qin等人^[59]提出了用微球腔与双光纤耦合,并且结合隔离器构造奇异面的方案。

该体系的哈密顿量为

$$H_0 = \begin{pmatrix} \omega_0 - i\kappa & 0 \\ \lambda & \omega_0 - i\kappa \end{pmatrix} \quad (13)$$

式中: ω_0 为顺时针模式(CW模式)和逆时针模式(CCW模式)的谐振频率, $\kappa = \frac{\kappa_0 + \gamma_1 + \gamma_2}{2}$, κ_0 为内禀损耗, γ_1 和 γ_2 分别为两个耦合点处的模式损耗, λ 为CW到CCW的单项耦合强度, $\lambda = -i\sqrt{\gamma_1\gamma_2}t_w$ 。可以证明,该哈密顿量在 $\lambda \neq 0$ 的情况下,始终处于EP点状态,即始终处于奇异面状态。

当系统引入微扰

$$H_1 = \begin{pmatrix} 0 & \varepsilon \\ \varepsilon & 0 \end{pmatrix} \quad (14)$$

经过计算,其本征值将会发生正比于 $\varepsilon^{1/2}$ 的劈裂。而在 $\lambda = 0$ 时,该本征值的劈裂仅仅正比于 ε ,对应DP传感。该实验用单光纤耦合代表DP传感,用双光纤耦合代表EP面传感,在实验上验证了EP面上增强的传感放大^[59]。

7 角速度传感

以角速度传感为核心的陀螺仪,在航空、航天、导弹、航海等领域发挥着重要应用,促进了智能手机的导航、拍照防抖动、游戏传感器等功能的发展。除传统的机械陀螺仪外,光学陀螺仪是近期研究的热点,包括氦-氖环形激光陀螺仪、光纤陀螺仪。与前面两者相比,回音壁光学微腔陀螺仪具有可集成、能耗较低、抗冲击性比较好的优势。在转动的情况下,回音壁模式光学微腔的CW模式和CCW模式会进行干涉,最后导致两

者产生一个正比于角速度的频率差,即为Sagnac效应,是回音壁模式光学微腔传感的基本原理。

2019年,Lai等人^[60]在直径18 mm微芯圆环腔中观测到了EP点增强的Sagnac效应,该工作是利用强泵浦光激发微腔中旋转方向相反的相邻级联布里渊光进行Sagnac传感的,最终实现了4倍增强的角速度传感。2020年,Lai等人^[61]在直径36 mm的微芯圆环腔中实现了对地球自转角速度的传感测量。2022年,Mao等人^[62]制备了直径为2.5 mm,品质因子为 6×10^6 的楔形腔,利用双向泵浦-探测的方案实现了角速度传感。由于Sagnac效应的存在,对于一个半径为 r ,折射率为 n 的楔形腔,其共振频率的移动为

$$\omega_a \rightarrow \omega_a \pm \Delta_{\text{Sagnac}} \quad (15)$$

其中,Sagnac频移大小 Δ_{Sagnac} 为

$$\Delta_{\text{Sagnac}} = \frac{nr\Omega\omega_a}{c} \left(1 - \frac{1}{n^2} - \frac{\lambda}{n} \frac{dn}{d\lambda}\right) \quad (16)$$

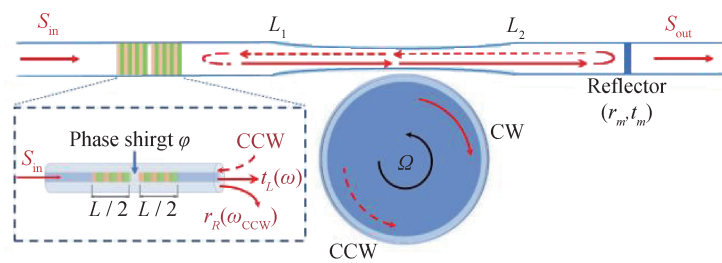
式中: ω_a 和 λ 分别为未旋转时的共振频率和共振波长,而色散项 $dn/d\lambda$ 在该实验所用材料中的影响可忽略。

该实验最终借助锁相放大器的窄线宽建立了楔形腔旋转角速度和拍频信号一一对应的关系,有效验证了Sagnac效应。此外,该实验还验证了楔形腔与光纤锥耦合的模式匹配条件。

将EP面与Sagnac效应结合也有可能实现增强的角速度传感。2021年,Li等人在理论上构建了处于旋转的回音壁模式光学微腔用于角速度传感的模型,如图6所示,与传统陀螺仪相比实现了4倍的角速度传感增强^[63]。

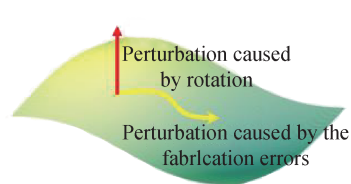
8 总结

回音壁模式光学微腔具有模式体积小、品质因子高、光与物质相互作用强的特点。与传统的传感器相比,光学传感具有噪声小的特点。回音壁模式光学微腔作为一种能够增强光与物质相互作用的体系,具有传感精度高,可集成度强的特点。本文简要回顾了近几年回音壁模式光学微腔在位移传感、力传感、加速度传感、质量传感、纳米粒子传感、温度传感、磁传感、奇异点(EP点)增强传感、角速度传感等领域的应用,对部分重要实验进展进行了较为详细的介绍,探讨了提



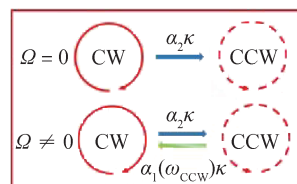
(a) 理论模型图

(a) Diagram of theoretical model



(b) EP面示意图

(b) Schematic diagram of an EP surface



(c) 没有旋转和有旋转的时候, 光学模式的耦合情形

(c) Optical mode-coupling situations in the absence or presence of the rotation

图6 EP面与Sagnac效应结合实现角速度传感增强^[63]Fig.6 Enhanced angular velocity sensing achieved by combining EP surface with Sagnac effect^[63]

高传感精度的重要因素, 以及其应用到生产生活中的可能性, 可以给之后的研究者提供些许参考和建议。

随着微纳加工水平的提高, 回音壁模式光学微腔的传感精度也将提高。微纳加工工艺的提升会提升回音壁模式光学微腔的片上集成度, 因此会改善其便携性、机械稳定性和可重复性。另外, 利用多个回音壁模式耦合进行传感可以形成类似于原子系统里电磁诱导透明的干涉效应, 进而增强传感精度。此外, 可以用非线性效应强的材料制备回音壁模式光学微腔使之形成光频梳, 以便其在精密测量中发挥重要作用。此外, 利用稀释制冷机预冷却和光力辐射压力冷却相结合的方式可以将回音壁模式光学微腔的机械模式制备到量子基态, 以实现接近量子极限的测量, 有望让人类对宏观物体实现量子态的观测与操控。

参考文献

- [1] PARK Y S, WANG H. Resolved-sideband and cryogenic cooling of an optomechanical resonator[J]. Nature Physics, 2009, 5: 489-493.
- [2] SCHLIESSER A, DEL'HAYE P, NOOSHI N, et al. Radiation pressure cooling of a micromechanical oscillator using dynamical backaction[J]. Physical Review Letters, 2006, 97(24): 243905.
- [3] KU J F, CHEN Q D, ZHANG R, et al. Whispering-gallery-mode microdisk lasers produced by femtosecond laser direct writing[J]. Optics Letters, 2011, 36(15): 2871-2873.
- [4] BOGAERTS W, HEYN P D, VAERENBERGH T V, et al. Silicon microring resonators[J]. Laser & Photonics Reviews, 2012, 6: 47-73.
- [5] GU F, XIE F, LIN X, et al. Single whispering-gallery mode lasing in polymer bottle microresonators via spatial pump engineering[J]. Light: Science & Applications, 2017, 6(10): e17061.
- [6] WANG Y, TA V D, LECK K S, et al. Robust whispering-gallery-mode microbubble lasers from colloidal quantum dots[J]. Nano Letters, 2017, 17(4): 2640-2646.
- [7] ASPELMEYER M, KIPPENBERG T J, MARQUARDT F. Cavity optomechanics[J]. Reviews of Modern Physics, 2014, 86: 1391-1452.
- [8] SCHLIESSER A, RIVIÈRE R, ANETSBERGER G, et al. Resolved-sideband cooling of a micromechanical oscillator[J]. Nature Physics, 2008, 4: 415-419.
- [9] BARZANJEH S, XUEREBA A, GRBLACHER S, et al. Optomechanics for quantum technologies[J]. Nature Physics, 2022, 18(1): 15-24.
- [10] FOREMAN M R, SWAIM J D, VOLLMER F. Whispering gallery mode sensors[J]. Advances in Optics & Photonics, 2015, 7(2): 168.
- [11] LIN G, COILLET A, CHEMBO Y K. Nonlinear photonics with high-Q whispering-gallery-mode resonators[J]. Advances in Optics & Photonics, 2017, 9: 828.
- [12] FUJII S, TANABE T. Dispersion engineering and measure-

- ment of whispering gallery mode microresonator for Kerr frequency comb generation[J]. *Nanophotonics*, 2020, 9(5).
- [13] XU C, DAI J, ZHU G, et al. Whispering-gallery mode lasing in ZnO microcavities[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2014, 8(4): 469–494.
- [14] PENG B, ZDEMIR A K, LEI F, et al. Parity-time-symmetric whispering-gallery microcavities[J]. *Nature Physics*, 2014, 10(5): 394–398.
- [15] CAO C, DUAN Y W, CHEN X, et al. Implementation of single-photon quantum routing and decoupling using a nitrogen-vacancy center and a whispering-gallery-mode resonator-waveguide system[J]. *Optics Express*, 2017, 25(15): 16931.
- [16] LI B B, OU L, LEI Y, et al. Cavity optomechanical sensing[J]. *Nanophotonics*, 2021, 10: 2799–2832.
- [17] XIE R, LI G, CHEN F, et al. Microresonators in lithium niobate thin films[J]. *Advanced Optical Materials*, 2021, 9: 2100539.
- [18] SCHLIESSER A, ANETSBERGER G, RIVIERE, et al. High-sensitivity monitoring of micromechanical vibration using optical whispering gallery mode resonators[J]. *New J. Phys.*, 2008, 10: 095015.
- [19] ANETSBERGER G, ARCIZET O, UNTERREITHMEIER, et al. Near-field cavity optomechanics with nanomechanical oscillators[J]. *Nature Physics*, 2009, 5: 909–914.
- [20] DING L, BAKER C, SENELLART P, et al. High frequency GaAs nano-optomechanical disk resonator[J]. *Physical Review Letters*, 2010, 105(26): 263903–263903.
- [21] GRUDININ I S, YU N. Finite-element modeling of coupled optical microdisk resonators for displacement sensing[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2012, 29: 3010.
- [22] TALLUR S, BHAVE S A. Rayleigh scattering boosted multi-GHz displacement sensitivity in whispering gallery opto-mechanical resonators[J]. *Optics Express*, 2013, 21: 27780.
- [23] WILSON D J, SUDHIR V, PIRO N, et al. Measurement-based control of a mechanical oscillator at its thermal decoherence rate[J]. *Nature*, 2015, 524: 325–329.
- [24] IOPPOLO T, KOZHEVNIKOV M, STEPANIUK V, et al. Micro-optical force sensor concept based on whispering gallery mode resonators[J]. *Applied Optics*, 2008, 47: 3009.
- [25] HIMMELHAUS M, FRANCOIS A. In-vitro sensing of biomechanical forces in live cells by a whispering gallery mode biosensor[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2009, 25: 418–427.
- [26] GAVARTIN E, VERLOT P, KIPPENBERG T J. A hybrid on-chip optomechanical transducer for ultrasensitive force measurements[J]. *Nature Nanotechnology*, 2012, 7: 509–514.
- [27] HARRIS G I, MCAUSLAN D L, STACE T M, et al. Minimum requirements for feedback enhanced force sensing[J]. *Physical Review Letter*, 2013, 111: 103603.
- [28] 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: 114208.
- [29] DONG B, CAI H, TSAI J M, et al. An on-chip optomechanical accelerometer[C]//IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems. IEEE, 2013.
- [30] LI Y, BARKER P. Field evaluation of a portable whispering gallery mode accelerometer[J]. *Sensors*, 2018, 18, 4184.
- [31] LI Y L, BARKER P F. Characterization and testing of a micro-g whispering gallery mode optomechanical accelerometer[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36: 3919–3926.
- [32] SAVCHENKOV A A, ELIYAHU D, HEIST B, et al. On acceleration sensitivity of 2 μm whispering gallery mode-based semiconductor self-injection locked laser[J]. *Applied Optics*, 2019, 58: 2138.
- [33] VOLLMER F, ARNOLD S, KENG D. Single virus detection from the reactive shift of a whispering-gallery mode[J]. *Proceedings of National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105, 20701–20704.
- [34] SHOPOVA S I, RAJMANGAL R, HOLLER S, et al. Plasmonic enhancement of a whispering-gallery-mode biosensor for single nanoparticle detection[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 98: 243104.
- [35] DANTHAM V R, HOLLER S, KOLCHENKO V, et al. Taking whispering gallery-mode single virus detection and sizing to the limit[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101: 043704.
- [36] FOREMAN M R, JIN W L. Optimizing detection limits in whispering gallery mode biosensing[J]. *Optics Express*, 2014, 22: 5491.
- [37] YU W, JIANG W C, LIN Q, et al. Cavity optomechanical spring sensing of single molecules[J]. *Nature Communication*, 2016, 7: 12311.
- [38] BAASKE M D, VOLLMER F. Optical observation of single atomic ions interacting with plasmonic nanorods in aqueous solution[J]. *Nature Photonics*, 2016, 10: 733–739.
- [39] SHEN B Q, YU X C, ZHI Y. Detection of single nanoparticles using the dissipative interaction in a high-Q microcavity[J]. *Physical Review Applied*, 2016, 5(2): 024011.
- [40] LIN Q, HE B, XIAO M. Mass sensing by detecting the quadrature of a coupled light field[J]. *Physical Review A*, 2017, 96: 043812.
- [41] GUO Z H, QIN Y C, CHEN P Z, et al. Hyperboloid-drum microdisk laser biosensors for ultrasensitive detection of

- human IgG[J]. *Small*, 2020, 16: 2000239.
- [42] DUAN R, HAO X, LI Y. Detection of acetylcholinesterase and its inhibitors by liquid crystal biosensor based on whispering gallery mode [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2020, 308: 127672.
- [43] YU X C, TANG S J, LIV W J, et al. Single-molecule optofluidic microsensor with interface whispering gallery modes [J]. *Proceedings of National Academy of Sciences of the United States of America*, 2022, 119: e2108678119.
- [44] GUO Z, MA Q. Whispering-gallery mode silica microsensors for cryogenic to room temperature measurement [J]. *Measurement Science and Technology*, 2010, (23) 21: 025310.
- [45] WENG W, ANSTIE J D, STACE T M, et al. Nano-Kelvin thermometry and temperature control: beyond the thermal noise limit [J]. *Physical Review Letters*, 2014, 112(16): 160801.
- [46] LIU Z, LIU L, ZHU Z, et al. Whispering gallery mode temperature sensor of liquid microresonator [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(20):4649.
- [47] LIAO J, YANG L. Optical whispering-gallery mode barcodes for high-precision and wide-range temperature measurements [J]. *Light Science & Applications*, 2021, 10: 32.
- [48] GUGLIANDOLO G, TABANDEH S, ROSSO V. Whispering gallery mode resonators for precision temperature metrology applications [J]. *Sensors*, 2021, 21: 2844.
- [49] SHERIDAN E, FORSTNER S, KNITTEL J, et al. Cavity optomechanical magnetometer [J]. *Physical Review Letters*, 2012, 108: 120801.
- [50] LI B, SHERIDAN E, FORSTNER S, et al. Ultrasensitive optomechanical magnetometry [J]. *Advanced Materials*, 2014, 26: 6348-6353.
- [51] YU C, JANOUSEK J, SHERIDAN E, et al. Optomechanical magnetometry with a macroscopic resonator [J]. *Physical Review Applied*, 2016, 5(4): 044007.
- [52] ZHU J G, ZHAO G M, SAVUKOV I, et al. Polymer encapsulated microcavity optomechanical magnetometer [J]. *Scientific Report*, 2017, 7: 8896.
- [53] LI B, BRAWLEY G, GREENALL H, et al. Ultra-broadband and sensitive cavity optomechanical magnetometry [J]. *Photonics Research*, 2020, 8: 1064.
- [54] ZHANG C, PU S, HAO Z, et al. Magnetic field sensing based on whispering gallery mode with nanostructured magnetic fluid-infiltrated photonic crystal fiber [J]. *Nanomaterials*, 2022, 12(5): 862.
- [55] DEMBOWSKI C, DIETZ B, GRÄF H D, et al. Encircling an exceptional point [J]. *Physical Review E*, 2004, 69: 056216.
- [56] CHEN W, KAYA ÖZDEMİR Ş, ZHAO, et al. Exceptional points enhance sensing in an optical microcavity [J]. *Nature*, 2017, 548: 192-196.
- [57] HODAEI H, HASSAN U A, WITTEK S, et al. Enhanced sensitivity at higher-order exceptional points [J]. *Nature*, 2017, 548: 187-191.
- [58] ZHONG Q, REN J, KHAJAVIKHAN M, et al. Sensing with exceptional surfaces in order to combine sensitivity with robustness [J]. *Physical Review Letters*, 2019, 122: 153902.
- [59] QIN G Q, XIE R R, ZHANG H, et al. Experimental realization of sensitivity enhancement and suppression with exceptional surfaces [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2021, 15: 2000569.
- [60] LAI Y H, LU Y K, SUH M G, et al. Observation of the exceptional-point-enhanced Sagnac effect [J]. *Nature*, 2019, 576: 65-69.
- [61] LAI Y H, SUH M G, LU Y K, et al. Earth rotation measured by a chip-scale ring laser gyroscope [J]. *Nature Photonics*, 2020, 14(6): 345-349.
- [62] MAO X, YANG H, LONG D, et al. Experimental demonstration of mode-matching and Sagnac effect in a millimeter-scale wedged resonator gyroscope [J]. *Photonics Research*, 2022, 10: 2115.
- [63] LI W, ZHOU Y, PENG H, et al. Exceptional-surface-enhanced rotation sensing with robustness in a whispering-gallery-mode microresonator [J]. *Physical Review A*, 2021, 104: 033505.

(本文编辑: 朱俊真)



第一作者: 温棚宇(1997—), 博士研究生, 研究方向为腔光学。



通讯作者: 王敏(1991—), 副研究员, 博士, 主要研究方向为微纳光学和量子信息。