

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2025.02.09

芯片级腔光力传感器谐振腔中的可控光机械耦合

李喆¹, 鲜承伟², 张怀英³, 匡鹏举², 陈凯¹, 黄勇军^{2*}

(1. 电子科技大学 自动化学院, 四川 成都 611731; 2. 电子科技大学 信息与通信工程学院, 四川 成都 611731;
3. 陕西宝成航空仪表有限责任公司, 陕西 宝鸡 721006)

摘要: 腔光力传感器作为科技交叉领域的研究热点, 其测量分辨力的提升对多种应用场景至关重要。本研究通过调节腔光力传感器中耦合光纤状态来改变腔内光场模态体积, 实现光机械耦合的可控性, 进而达到光机械耦合的强互锁状态。在二维光子晶体构成的芯片级腔光力传感器谐振腔系统中, 成功实现了可控光机械耦合诱导的机械品质因数(Q 值)提升和系统底噪的抑制。实验结果表明, 在光机械耦合实现强互锁状态下, 机械 Q 值相较于弱互锁阶段提升了约10倍, 系统底噪显著降低了约26 dB。此外, 基于该方案的腔光力加速度传感器在6 kHz的加速度驱动下, 实现了高达126.58 mV/g的灵敏度。这一成果不仅证实了可控光机械耦合在增强机械 Q 值和降低系统底噪方面的潜力, 而且为腔光力系统的设计和应用提供了新思路, 对光子学和微纳机械系统领域的发展具有重要的推动作用。

关键词: 腔光力系统; 光机械耦合; 二维光子晶体; 腔光力传感器; 机械品质因数

中图分类号: TB9; O59; V241.4

文献标志码: A

文章编号: 1674-5795 (2025) 02-0088-07

Controllable optomechanical coupling in chip-scale cavity optomechanical sensor resonator

LI Zhe¹, XIAN Chengwei², ZHANG Huaiying³, KUANG Pengju², CHEN Kai¹, HUANG Yongjun^{2*}

(1. School of Automation Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China;

2. School of Information and Communication Engineering, University of Electronic Science and Technology of China,

Chengdu 611731, China; 3. Shaanxi Baocheng Aviation Instrument Co., Ltd., Baoji 721006, China)

Abstract: Cavity optomechanical sensors, as a focal point at the intersection of technology and science, are pivotal for improving sensing resolution across diverse applications. This research modulates the intracavity optical field mode volume by adjusting the optical fiber coupling state to achieve controllable optomechanical coupling, leading to a strong coupling lock state. Within a chip-scale optomechanical sensor resonator system constructed from two-dimensional photonic crystals, the study successfully demonstrated the enhancement of mechanical quality factor (Q -factor) and the suppression of system noise through controllable optomechanical coupling. Experimental results indicate that in the strong optomechanical coupling lock state, the mechanical Q -factor is increased by approximately 10 times compared to the weak coupling state, and system noise is significantly reduced by about 26 dB. Moreover, the optomechanical accelerometer sensor, based on this scheme, achieves a sensitivity of 126.58 mV/g under a 6 kHz acceleration drive. This study not only validates the potential of controllable optomechanical coupling in enhancing mechanical Q -factor and reducing system

收稿日期: 2024-11-22; 修回日期: 2024-12-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(62371106, U22B2004)

引用格式: 李喆, 鲜承伟, 张怀英, 等. 芯片级腔光力传感器谐振腔中的可控光机械耦合[J]. 计测技术, 2025, 45(2): 88-94.

Citation: LI Z, XIAN C W, ZHANG H Y, et al. Controllable optomechanical coupling in chip-scale cavity optomechanical sensor resonator[J]. Metrology & Measurement Technology, 2025, 45(2): 88-94.



noise, but also offers new perspectives for the design and application of optomechanical systems, significantly advancing the development in photonic and micro-nano mechanical systems.

Key words: optomechanical system; optomechanical coupling; two-dimensional photonic crystal; cavity optomechanical sensor; mechanical quality factor

0 引言

光机械传感器因其卓越的性能在现代精密测量领域备受关注。其应用涵盖力^[1-2]、质量^[3]、加速度^[4-6]和磁场^[7-8]等物理量的精密测量,并在量子传感领域展现出重要价值^[9]。这些传感器的性能在很大程度上依赖于其机械品质因数和系统噪声水平,这两者共同决定了传感器的灵敏度和分辨力。尽管已有研究在提升 Q 值^[10]和抑制噪声^[11]方面取得了一定进展,但在芯片级腔光力传感器中,如何有效地实现 Q 值提升和噪声抑制仍具有挑战性。

在腔光力传感器的研究领域,二维光子晶体技术因其较低的加工制造需求和实现高品质因子及高集成度的潜力而备受关注^[12-13]。国内外研究者通过创新结构设计^[14]和材料选择^[15],不断提升腔光力传感器的性能。然而,对于如何在芯片级尺度上实现光机械耦合的精确调控,以及如何通过这种调控进一步提升机械品质因数和抑制系统噪声,目前仍缺乏深入的理论和实验研究。

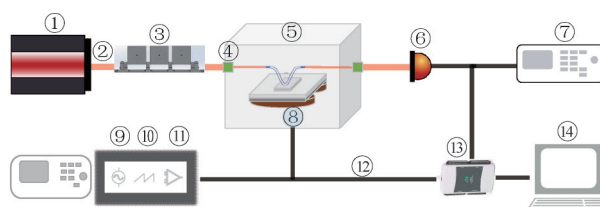
本研究以二维光子晶体构成的芯片级腔光力传感器谐振腔系统为研究对象,旨在通过调节耦合光纤状态来改变腔内光场模态体积,实现光机械耦合强度的精确控制^[16]。在实验中,通过调整光纤与光机械腔的耦合情况,改变光腔的模态体积,观察并记录相应的光学与机械谐振现象,验证方案的可行性。

1 实验系统和腔光力传感器谐振腔系统

1.1 实验系统

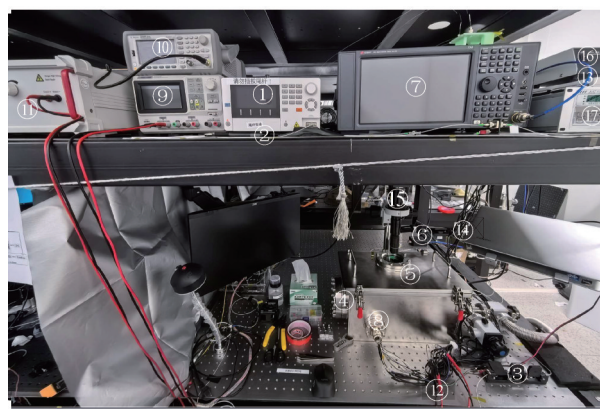
本研究采用绝缘体上硅(Silicon-On-Insulator, SOI)技术刻蚀制作的芯片级腔光力加速度计作为实验的光机械系统。该系统设计工作波段为1 510 nm左右,工作时受到特定波长的窄带宽激光驱动。如图1(a)所示,激光源输出的驱动激光首先通过一个光纤偏振控制器(Fiber Polarization Controller, FPC)进行极化,以确保激光的偏振态适合

后续的实验需求;极化的检测激光通过真空法兰转接被送入真空腔内,并通过V型光纤与二维光子晶体微腔发生光声耦合;光机械耦合后,V型光纤内的检测激光已被机械信号调制,再次通过真空法兰转接,将带有待测信息的检测光输送至光电探测器(Photodetector, PD)进行光电转换,生成电信号;光电探测器的输出电信号被送至电子频谱仪(Electronic Spectrum Analyzer, ESA)和数据采集器(Data Acquisition Card, DAQ),分别用于观测频域和时域数据。



(a) 光机械耦合测试系统原理图

(a) Schematic diagram of the optomechanical coupling test system



(b) 光机械耦合测试系统实物图

(b) Physical photograph of the optomechanical coupling test system

注: ①激光源; ②光纤跳线; ③三环偏振控制器; ④真空光纤法兰; ⑤真空腔; ⑥光电探测器; ⑦频谱仪; ⑧真空排针; ⑨电压源; ⑩波形发生器; ⑪高压放大器; ⑫射频跳线; ⑬数据采集器; ⑭计算机; ⑮显微镜; ⑯点光源; ⑰真空计。

图1 光机械耦合测试系统

Fig.1 Optomechanical coupling test system

待测的芯片级腔光力系统被安装在真空腔内的水平振动台上,以确保实验的稳定性。真空腔顶部设有圆形玻璃窗,配备高分辨力光学显微镜

系统,用于观测V型光纤与光机械系统的耦合情况,如图1(b)所示。通过这种实验设置,能够精确控制并详细测量腔光力系统中光与机械振动之间的相互作用,捕获光学非线性现象,并为腔光力传感器的性能优化提供实验基础。

1.2 腔光力传感器谐振腔系统

本研究采用的腔光力系统为硅基腔光力加速度计,图2展示了该芯片级系统在光学显微镜下的整体结构视图,尺寸约为 $200\text{ }\mu\text{m} \times 220\text{ }\mu\text{m}$ 。位于传感器中心区域的槽型光子晶体(Photonic Crystal, PhC)腔(如图2蓝色方框所示)是实现与V型光纤中检测激光进行光机械耦合的核心结构。图2中的电子显微镜视图详细展示了微腔的结构,尺寸约为 $16\text{ }\mu\text{m} \times 10\text{ }\mu\text{m}$,具有 100 nm 宽的空气槽(s)、 510 nm 的光子晶体晶格常数(a)以及 306 nm 的空穴孔直径(d)。

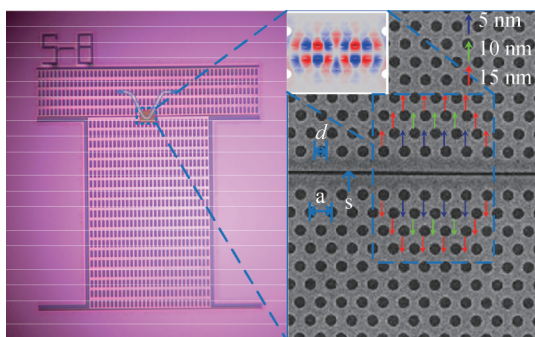


图2 光机械传感器谐振腔系统

Fig.2 Optomechanical sensor resonator system

相较于传统二维光子晶体结构,本研究采用微腔中心空穴位移调控策略,以提升光子晶体的性能。红色箭头表示空穴向箭头方向移动 5 nm ,绿色表示移动 10 nm ,蓝色表示移动 15 nm 。这种位移策略破坏了光子晶体中微扰部分对检测光的束缚作用,从而增加了微腔的光学品质因数,并将光场的模态体积压缩在核心微扰区域内,有利于进行可控的光机械耦合实验。

图2中的插图为利用COMSOL软件模拟得到的微腔电场分布图,展示了微腔的微扰部分在工作状态下的电场初始分布情况。腔内光子数 n_{cav} 的变化遵循公式(1)。

$$n_{\text{cav}} = \langle \hat{a}^\dagger \hat{a} \rangle = \frac{\kappa_e}{2} \frac{1}{\Delta^2 + \kappa^2/4} \frac{P_{\text{in}}}{\hbar\omega_l} \quad (1)$$

式中: $\hat{a}^\dagger$ 和 $\hat{a}$ 分别为光子的产生和湮灭算符; κ_e 为锥腔耦合率,表示激光在光纤锥形波导与光腔之间的转移率; κ 为总空腔衰减率, $\kappa \equiv \kappa_e + \kappa_i$,其中, κ_i 为内部腔阻尼率,表示光腔中的光散射到附近环境的速率; P_{in} 为腔内衰减功率; Δ 为激光-腔失谐, $\Delta = \omega_l - \omega_c$,其中, ω_l 为激光频率, ω_c 为腔共振频率; $\hbar$ 为约化普朗克常数。

为了缩短HF(氢氟酸)对 SiO_2 (二氧化硅)刻蚀的时间,在PhC区域外的检测块(下侧)和固定块(上侧)上添加了周期性的矩形孔。图1(a)和图2展示了光机械耦合实验中,V型光纤锥下压耦合微腔的微扰区域,其中V型光纤锥的透射率超过90%。V型光纤由 $1\text{ }\mu\text{m}$ 单模光纤制备,原本光纤的内芯和外部包层为两种折射率相近的 SiO_2 ,这使得拉锥后的内芯仍可视作 SiO_2 ,外部为空气,此时,V型耦合部分要尽可能保持单模条件,也就是芯径通常要在 $1\text{ }\mu\text{m}$ 以内。在未进行拉锥处理的部分,光纤保持其标准参数:芯径为 $9\text{ }\mu\text{m}$,包层直径为 $125\text{ }\mu\text{m}$,涂层保护层厚度为 $250\text{ }\mu\text{m}$ 。由于V型光纤锥的过渡区和锥形态的精确控制存在一定的挑战,这些参数在实际操作中可能存在一定的变异性。

在V型光纤锥的制备过程中,采用了一种实用的方法来形成V型结构,即V型光纤在经过拉锥以满足单模条件后,通过使用未拉锥光纤下压并烘烤定型的方式形成V型结构。这一过程精细控制了光纤的几何形态,以确保在V型耦合部分保持单模传输,其中芯径控制在 $1\text{ }\mu\text{m}$ 以内。这种制备方法能够在保持光纤锥基本形态的同时,通过将V型光纤锥形波导直接锚定在光机械槽腔的下侧来适应不同的实验条件,既满足了实验的具体要求,也确保了实验的灵活性和可靠性。

2 可控光机械耦合诱导的系统性能提升

2.1 可控光机械耦合诱导的强互锁状态

图2展示了腔光力系统中初始的光场模态体积,其主要集中在微扰区域,这使得在保持输入激光功率不变的同时,通过细微调整光纤位置,可以有效地改变耦合功率。通过操纵V型光纤锥形波导固定台的X、Y、Z轴,光纤能够直接与二维光子晶体腔的下侧接触。利用显微镜图像和纳米

促动器精确控制光纤位置,不同位置的光纤可以改变可移动检测块的高度,进而影响二维光子晶体空气槽两侧的高度差和间距。这种变化导致腔光力谐振腔的光学共振发生偏移,并且伴随着腔内光子数的变化。在这些共同作用的影响下,二维光子晶体谐振腔内的光场模态体积相较于初始状态产生了变化。

通过精确控制光机械耦合,实现了光机械腔在低频(约千赫兹范围)的Drude自脉冲等离子体锁定,包括光机械共振和自脉冲振荡之间的腔内相互作用和锁定。这种强互锁状态显著提升了机械品质因数并抑制了底噪,从而优化了光机械谐振系统的整体性能。

为了在光机械系统中实现两种振荡的互锁,首先激发谐振腔的自脉冲振荡状态,确保自脉冲的阈值低于光机械自持续振荡的阈值。自脉冲振荡阈值的理论预测基于光场模态体积和光学品质因数,而光机械自持续振荡的阈值则涉及真空光机械耦合率和机械品质因数。

具体而言,自脉冲振荡阈值 P_{th_SP} 的理论比例预测如式(2)。

$$P_{th_SP} \propto V / Q_{opt}^2 \quad (2)$$

式中: V 为光场模态体积, Q_{opt} 为光学品质因数。腔内功率应超过自脉冲振荡的阈值,以激发自脉冲振荡状态。

当腔内功率持续增大至超过光机械共振的阈值时,可以观测到低频的Drude自脉冲等离子体锁定。光机械自持续振荡阈值 P_{th_OM} 的理论比例预测如式(3)。

$$P_{th_OM} \propto 1 / (g_0^2 Q_m Q_{opt}^3) \quad (3)$$

式中: g_0 为真空光机械耦合率, Q_m 为机械品质因数。在常温和大气环境下,由于机械损耗较大,实现自脉冲振荡阈值低于光机械自持续振荡是可行的。

图3展示了腔光力系统的光学特性,揭示了在相同功率下两种振荡共存的过渡状态。在1 510.40 ~ 1 511.06 nm的波长范围内,可以观察到自脉冲振荡,在1 511.06 ~ 1 511.86 nm的波长范围内,则存在光机械自持续振荡。在光机械自持续振荡阶段,由图4(a)所示的二维功率谱密度

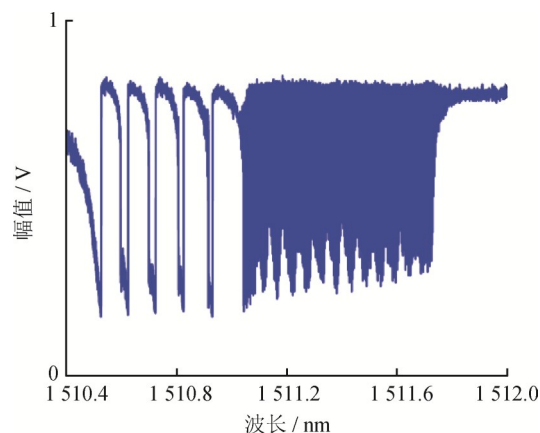
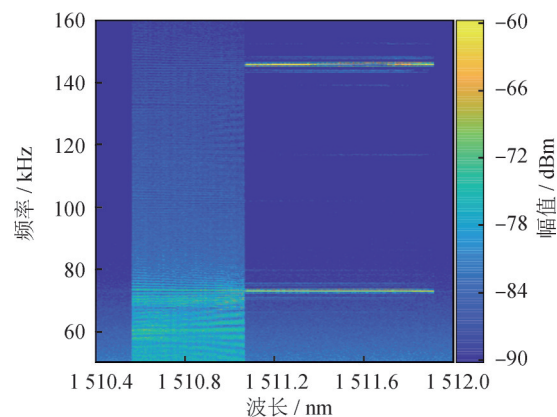
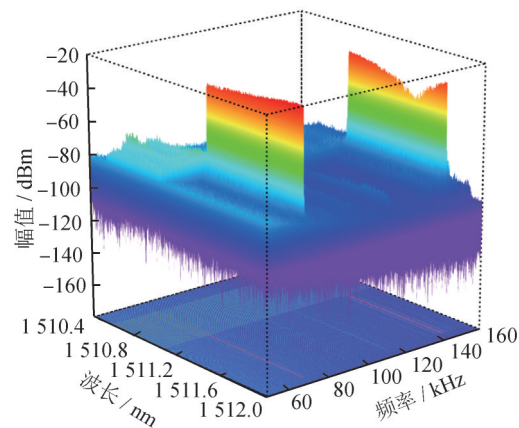


图3 自脉冲振荡和光机械共振共存的过渡状态光学特性

Fig.3 Optical characteristics of coexisting self-pulse oscillation and optomechanical resonance in the transitional state



(a) 自脉冲振荡和光机械共振的2D功率谱密度
(a) 2D power spectral density of self-pulse oscillation and optomechanical resonance



(b) 自脉冲振荡和光机械共振的3D功率谱密度
(b) 3D power spectral density of self-pulse oscillation and optomechanical resonance

图4 自脉冲振荡和光机械共振共存的过渡状态机械谐振特性

Fig.4 Mechanical resonance characteristics of the transitional state with coexisting self-pulse oscillation and optomechanical resonance

图可见,传感器谐振频率为72.2 kHz,这对应机械谐振或光机械自持续振荡模式的基频。该机械信号调制了光机械谐振腔内1511.06~1511.86 nm部分的光学信号,表现为图3中光机械自持续振荡阶段的细密周期性信号。考虑扫频速度为50 nm/s,光机械自持续振荡阶段的总时长为8 ms,在该阶段的光学传输谱中,观察到的细密谐振峰个数为578个,与预期的调制现象一致。

图4(b)所示的三维功率谱密度图清晰地展示了共存状态下的特性,即自脉冲振荡阶段的谐振信号基模的幅值较低、频率不稳定且机械 Q 值不高;而光机械自持续振荡阶段的谐振信号基模的幅值较高、频率稳定且机械 Q 值显著上升。

与未诱导的弱互锁状态下的谐振信号相比,在强互锁状态下,谐振信号基模的机械 Q 值提升了约10倍,系统底噪降低了约26 dB,如图5所示。

2.2 强互锁模式驱动的光机械传感器性能

光机械系统通过可控的光机械耦合能够诱导产生低频率的Drude自脉冲等离子体锁定,进而在这种强互锁模式下进行传感器性能测试。

测试原理为:在确保光机械系统处于强互锁模式的前提下,对待测的光机械加速度计芯片施加一个固定频率的交流加速度;该激励加速度通过光机械耦合,在传感器的机械功率谱上产生相应频率的加速度信号;通过监测这些信号的变化,评估光机械加速度计芯片的性能,包括其灵敏度和频率响应。具体来说,当施加一个6 kHz的交流激励加速度后,观察并记录传感器在强互锁模式下的响应,从而得出传感器的性能参数。

图6显示了强互锁模式下的光机械传感响应,其中,黑线(Test 1)表示静止状态下光机械传感器的功率谱密度,而6 kHz处的蓝线(Test 2)和红线(Test 3)则表示在施加不同幅值的6 kHz交流加速度后的机械谱。这些信号的变化表明:压电陶瓷剪切芯片在加载正弦波型电压信号时,能够提供较为标准的正弦交流加速度。因此,机械谱上没有谐波,但加速度信号对主峰进行了调制。更具体的说,靠近机械谐振基模的蓝线和红线是由基模和激励加速度混频调制产生的额外频率分量。

通过上述变化关系,可以得出所测加速度计

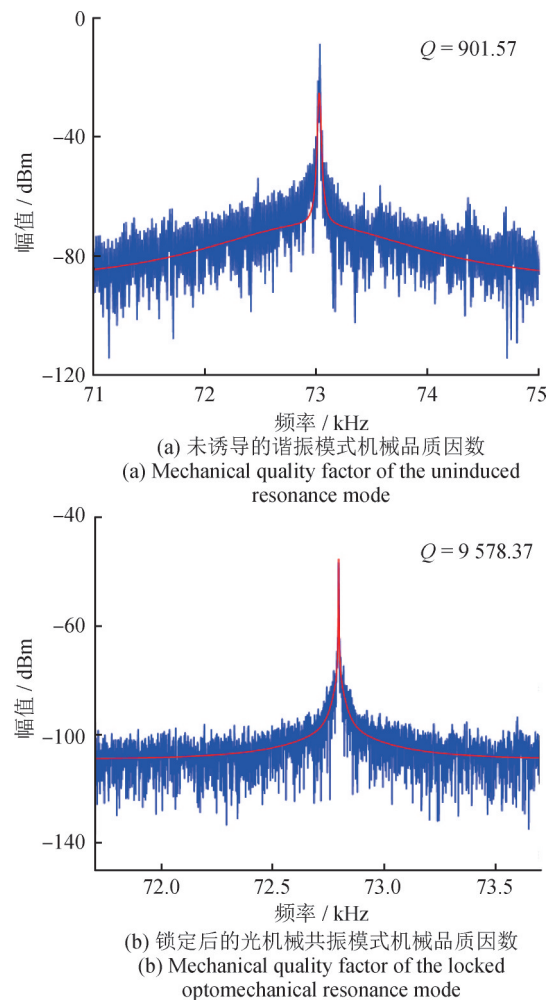


图5 谐振模式和锁定后光机械共振模式的机械信号比较
Fig.5 Comparison of mechanical signals between resonance mode and locked optomechanical resonance mode

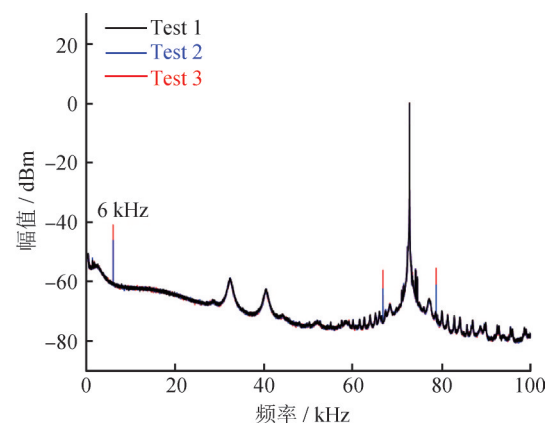


图6 6 kHz加速度激励下强互锁模式的光机械传感响应
Fig.6 Optomechanical sensing response under strong coupling lock mode of 6 kHz acceleration excitation

在固定频率6 kHz下的灵敏度。对待测芯片施加不同频率的激励加速度,并重复上述过程,可以得

到特定频点的灵敏度参数。在对 6 kHz 频点处的灵敏度测试中, 图 7 中的 2 处 6 kHz 信号的幅值经过单位换算后, 分别为 1.1 mV 和 2.0 mV。通过改变输入加速度的幅值, 得到机械谱上对应加速度信号幅值的变化, 如图 7 所示。对其进行线性拟合后, 可得出 6 kHz 处加速度计的灵敏度为 126.58 mV/g。

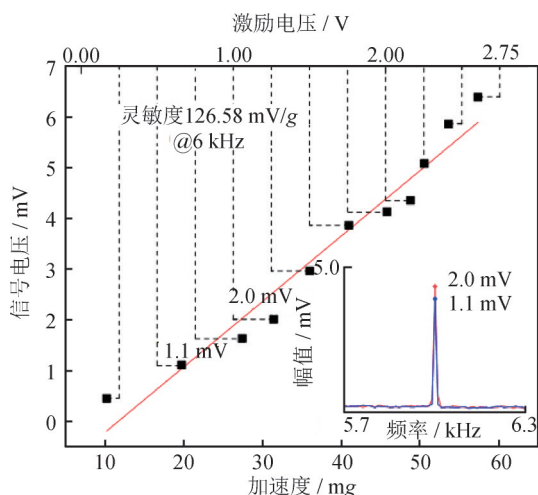


图 7 6 kHz 加速度下强互锁态加速度计传感器的灵敏度
Fig.7 Accelerometer sensor sensitivity under a strong coupling lock state of 6 kHz acceleration

3 结论

通过调节耦合光纤状态来改变腔内光场模式体积, 实现了光机械耦合强度的精确控制, 为腔光力系统的设计和优化提供了新思路。通过精确控制光机械耦合, 成功诱导产生了低频率的 Drude 自脉冲等离子体锁定, 实现了腔光力系统中的强互锁模式, 使得谐振信号基模的机械 Q 值提升了约 10 倍, 系统底噪降低了约 26 dB。测量了在 6 kHz 加速度激励下, 强互锁模式时光机械加速度计传感器的灵敏度达到了 126.58 mV/g。这些数据表明: 锁定后的强互锁模式在提高传感器性能方面有很大的潜力。

参考文献

- [1] DE LÉPINAY L M, PIGEAU B, BESGA B, et al. A universal and ultrasensitive vectorial nanomechanical sensor for imaging 2D force fields [J]. Nature Nanotechnology, 2017, 12: 156–162.
- [2] FOGLIANO F, BESGA B, REIGUE A, et al. Ultrasensitive nano-optomechanical force sensor operated at dilution temperatures [J]. Nature Communications, 2021, 12(1). DOI: 10.1038/s41467-021-24318-y.
- [3] LIU J, ZHU K D. Room temperature optical mass sensor with an artificial molecular structure based on surface plasmon optomechanics [J]. Photonics Research, 2018, 6(9): 867–874.
- [4] FLORES J G F, YEREBAKAN T, WANG W T, et al. Parametrically driven inertial sensing in chip-scale optomechanical cavities at the thermodynamical limits with extended dynamic range [J]. Laser & Photonics Reviews, 2023, 17(7). DOI: 10.1002/lpor.202200827.
- [5] LI W, LIU W Y, LIU C X, et al. Broadband optomechanical accelerometer reaching the thermomechanical limit based on suspended Si_3N_4 membrane resonator [J]. IEEE Sensors Journal, 2024, 24(11): 17528–17536.
- [6] LI Z, LI X W, CHEN D W, et al. A chip-scale silicon cavity optomechanical accelerometer with extended frequency range [J]. IEEE Sensors Journal, 2024, 24(20): 31849–31859.
- [7] WU M, WU N L, FIRDOUS T, et al. Nanocavity optomechanical torque magnetometry and radiofrequency susceptibility [J]. Nature Nanotechnology, 2017, 12(2): 127–131.
- [8] LI B B, BRAWLEY G, GREENALL H, et al. Ultra-broadband and sensitive cavity optomechanical magnetometry [J]. Photonics Research, 2020, 8(7): 1064–1071.
- [9] LI B B, BÍLEK J, HOFF U B, et al. Quantum enhanced optomechanical magnetometry [J]. Optica, 2018, 5(7): 850–856.
- [10] LI Y, ZHENG J J, GAO J, et al. Design of dispersive optomechanical coupling and cooling in ultrahigh-Q/V slot-type photonic crystal cavities [J]. Optics Express, 2010, 18(23): 23844–23856.
- [11] KRAUSE A G, WINGER M, BLASIUS T D, et al. A high-resolution microchip optomechanical accelerometer [J]. Nature Photonics, 2012, 6: 768–772.
- [12] BIROWOSUTO M D, YOKOO A, ZHANG G Q, et al. Movable high-Q nanoresonators realized by semiconductor nanowires on a Si photonic crystal platform [J]. Nature Materials, 2014, 13(3): 279–285.
- [13] YAMAMOTO T, NOTOMI M, TANIYAMA H, et al. Design of a high-Q air-slot cavity based on a width-modulated line-defect in a photonic crystal slab [J]. Optics Express, 2010, 18(23): 23844–23856.

2008, 16(18): 13809–13817.

- [14] SUN X K, ZHENG J J, POOT M, et al. Femtogram doubly clamped nanomechanical resonators embedded in a high-Q two-dimensional photonic crystal nanocavity [J]. Nano Letters, 2012, 12(5): 2299–2305.
- [15] CHEN D W, MUHAMMAD S, HUANG W Y, et al. Parameter investigations on lithium-niobate-based photonic crystal optomechanical cavity [J]. Results in Physics, 2023, 48. DOI: 10.1016/j.rinp.2023.106458.
- [16] HUANG Y J, FLORES J G F, CAI Z Q, et al. Controllable optomechanical coupling and drude self-pulsation plasma locking in chip-scale optomechanical cavities [J]. Optics Express, 2017, 25(6): 6851–6859.

(本文编辑: 李成成)



第一作者: 李喆(1997—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为微弱信号检测和芯片级光子晶体腔光机械传感器。



通信作者: 黄勇军(1985—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要研究方向为芯片级光子晶体腔光学、低相位噪声射频源和高分辨率力/场传感器。