
光学芯片“听见”听不见的声音

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/41851.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

光学芯片“听见”听不见的声音。导读

中国科学院物理研究所李贝贝团队与北京大学杨起帆团队合作，在《Light: Science Applications》发表研究Integrated optomechanical ultrasonic sensors with nano-Pascal-level sensitivity，报道了一种集成微腔光力学超声波传感器。通过将高品质因子光学微环腔嵌入悬空二氧化硅薄膜，同时利用光学与机械共振增强效应，将传感器灵敏度提升至纳帕级别（空气中218 nPa/Hz^{1/2}，水中9.6 nPa/Hz^{1/2}），刷新了该领域的纪录。此外，该传感器采用CMOS兼容的工艺制造，兼具高性能与实用性，并在光声气体传感与水下高分辨率成像中得到验证。该工作为下一代高性能、微型化超声传感系统的研发开辟了新路径，在生物医学成像、工业检测、环境监测等领域具有重要的应用前景。

研究背景

超声波，这种频率高于人耳听觉范围的声波，早已融入现代生活的方方面面。从医院里的B超检查，到工业领域的无损探伤，再到水下通信与探测，超声波传感器如同人类的第二双耳朵，帮助我们在视觉之外感知世界的形状、结构乃至化学成分。随着医疗设备向便携化、微型化发展，以及工业检测、环境监测对精度的要求不断提升，我们对这双耳朵的灵敏度也提出了前所未有的高要求。

然而，传统主流超声波传感器的核心——压电换能器，在追求极致灵敏与微型集成化的道路上正面临瓶颈。其灵敏度提升受限，难以探测极其微弱声信号，如生物组织深处的细微病变或遥远的水下目标。同时，这类传感器易受电磁干扰，且在微型化与大规模阵列集成方面也面临挑战，限制了其在颅内超声成像、可穿戴设备等前沿场景的应用。

近年来，基于光学微腔的超声传感方案凭借其高灵敏度、抗电磁干扰等优势，逐渐成为一种变革性技术。但其中许多方案，如光纤微腔传感器，难以实现芯片化与规模化生产；而现有的集成光子学超声传感器，其灵敏度仍停留在毫帕量级，不足以探测微帕乃至纳帕级别的极微弱声压，成为制约下一代高性能超声传感技术发展的关键瓶颈。

针对这一挑战，中国科学院物理研究所/北京凝聚态物理国家研究中心李贝贝研究员团队与北京大学杨起帆研究员团队合作，提出并实现了一种全新的集成化解决方案。他们巧妙地将高品质因子的氮化硅光学微环腔嵌入悬空的二氧化硅薄膜中（图1a），构建出一款可同时利用光学共振与机械共振的芯片级超灵敏耳朵。

创新研究

光-机械双共振增强，实现纳帕级灵敏度

传统光学微腔超声传感器主要依赖光学共振增强，本研究进一步引入了机械共振的增强效应。研究团队设计的悬空薄膜（图1a-b）在特定频率的超声波作用下会产生剧烈振动，嵌入其中的光学微环腔通过光力耦合，能够极其灵敏的将这种机械振动转化为光信号的变化。得益于光学共振与机械共振的协同增强，该器件在空气环境中289 kHz频率处的噪声等效声压（NEP）低至218 nPa/Hz^{1/2}，在水中52 kHz频率处NEP更是到了9.6 nPa/Hz^{1/2}（图1c），创造了光学微腔超声传感的灵敏度纪录（图1d）。

图1. (a) 集成微腔光力学超声传感器概念图。(b) 三种集成微环腔超声传感器结构的超声响应对比：(i) 非悬空结构，(ii) 非机械共振悬空结构，(iii) 机械共振悬空结构。(c) 传感器灵敏度谱（上图：空气中灵敏度；下图：水中灵敏度）。(d) 不同体系超声传感器灵敏度对比。

全集成片上系统，兼顾高性能与实用性

该传感器在硅基光芯片上实现了CMOS兼容制备，通过成熟的半导体工艺，可在4英寸晶圆上完成高性能器件的批量制备（图2a和b）。同时，通过集成光耦合模块，并封装为独立、坚固的传感单元（图2c和d），使其在具备优异灵敏度的同时，也满足了实际应用对可靠性、环境适应性及规模化生产的要求。

图2 (a) 制备过程中四英寸晶圆。(b) 3 cm × 3 cm 芯片。(c) 封装的传感器芯片。(d) 单个传感器光学图像。

应用验证：从痕量气体检测到水下成像

为展示该传感器的应用潜力，团队开展了两项验证实验。首先，将其应用于气体光声光谱检测（图3a），成功实现了浓度低至2.9 ppm的乙炔气体探测，测得的吸收光谱与分子吸收数据库模拟结果高度吻合（图3b），展现了其在痕量气体检测、环境监测等领域的应用潜力。其次，在水下超声成像实验中（图3c），该传感器实现了对水下目标的高分辨率扫描成像（图3d），成像分辨率达1.89 mm，其性能优于在强三个数量级的激励声信号下工作的商用超声水听器，充分体现了在极弱声信号探测方面的独特优势。

图3 (a) 气体光声光谱检测装置示意图。(b) 乙炔气体光声光谱。(c) 水下超声成像装置示意图。(d) 水下超声成像结果。

总结与展望

这项研究为超声传感技术树立了新的标杆。该传感器兼具超高灵敏度、芯片化集成与抗电磁干扰能力，有望在诸多领域开拓前所未有的应用场景，例如开发更便携、成像更清晰的可穿戴医学超声设备，用于高压电力设备局放监测等强电磁干扰环境，实现更灵敏的海洋环境监听与水下通信，乃至作为基础科研中探测极微弱声学过程的强大工具。未来，通过优化机械结构以抑制热噪声、引入反馈冷却等手段，其灵敏度还有望进一步提升。结合片上激光器、探测器等光子元件，有望实现完全片上一体化的微型超声传感系统。（来源：LightScienceApplications微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41377-026-02238-0>

特别声明：本文转载仅仅是出于传播信息的需要，并不意味着代表本网站观点或证实其内容的真实性；如其他媒体、网站或个人从本网站转载使用，须保留本网站注明的“来源”，并自负版权等法律责任；作者如果不希望被转载或者联系转载稿费事宜，请与我们联系。

作者：李贝贝等 来源：《光：科学与应用》

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](http://iikx.com)转发