
ppq量级激光光谱气体传感技术

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/35080.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！

ppq量级激光光谱气体传感技术。 导读

在半导体工业、能源产业以及星际探索等前沿科技领域，超高灵敏度气体传感技术有着不可替代的应用价值。例如在芯片生产中，电子气体的痕量杂质可显著影响良率与可靠性；氢能系统中，微量一氧化碳副产物会导致燃料电池中毒；火星大气中浓度极低的甲烷给检测带来了巨大挑战。这些场景均对气体检测的极限灵敏度提出了严苛要求。

2018年，哈尔滨工业大学马欲飞课题组提出了光致热弹光谱（Laser-induced thermoelastic spectroscopy，简称LITES）技术，激光穿透待测气体后，聚焦至石英音叉表面，利用石英音叉的光致热弹效应进行气体浓度的反演。凭借非侵入式、快速响应以及全波段光谱检测的优势，LITES技术迅速成为研究热点，然而其性能进一步提升面临双重挑战：吸收强度方面，传统多通池在增加光程时需要更大体积，制约了系统集成；石英音叉探测器方面，商用石英音叉的高共振频率导致能量积累不足、信号幅度受限，而新型低频音叉又存在结构单一、热膨胀系数低、热传导损耗大等问题，亟待创新突破。

图1. ppq量级光致热弹光谱传感技术。图源：哈尔滨工业大学

本文亮点

近日，哈尔滨工业大学的马欲飞课题组提出了一种基于双螺旋多通池和改性低频石英音叉的ppq量级(10^{-15} , 千万亿分之一)LITES传感技术，该成果以Parts-per-quadrillion level gas molecule detection: CO-LITES sensing为题发表在Light: Science Applications。为提高气体吸收程度，本研究首先通过人工鱼群算法与光线追迹算法对三片镜多通池光学模型进行迭代优化，如图2所示，新型多通池利用像散效应形成密集双螺旋光斑模式，激光束反射次数为259次，光程体积比达到 15.6 cm^{-2} ($25.8 \text{ m}/165.8 \text{ ml}$)，这有利于LITES传感技术灵敏度提升与小型化集成。为改善音叉探测性能，如图3所示，采用有限元分析方法设计出具有低共振频率及高品质因数的圆形头石英音叉，降低共振频率有助于延长能量积累时间，圆头结构可增强振动应力，在结构优化的石英音叉表面涂覆聚二甲基硅氧烷(PDMS)，利用PDMS的低热导率和高热膨胀系数有效减少热扩散并进一步增强振动应力，最终实现传感器检测灵敏度大幅度提升。实验装置图如图4所示，选用一氧化碳(CO)气体验证传感器性能，选用中红外分布反馈量子级联激光器覆盖CO在 4587.64 nm 的强吸收线，对不同音叉的传感性能进行对比，基于PDMS改性圆形头低频石英音叉的CO-LITES传感器信噪比相比商用音叉提升10.59倍。

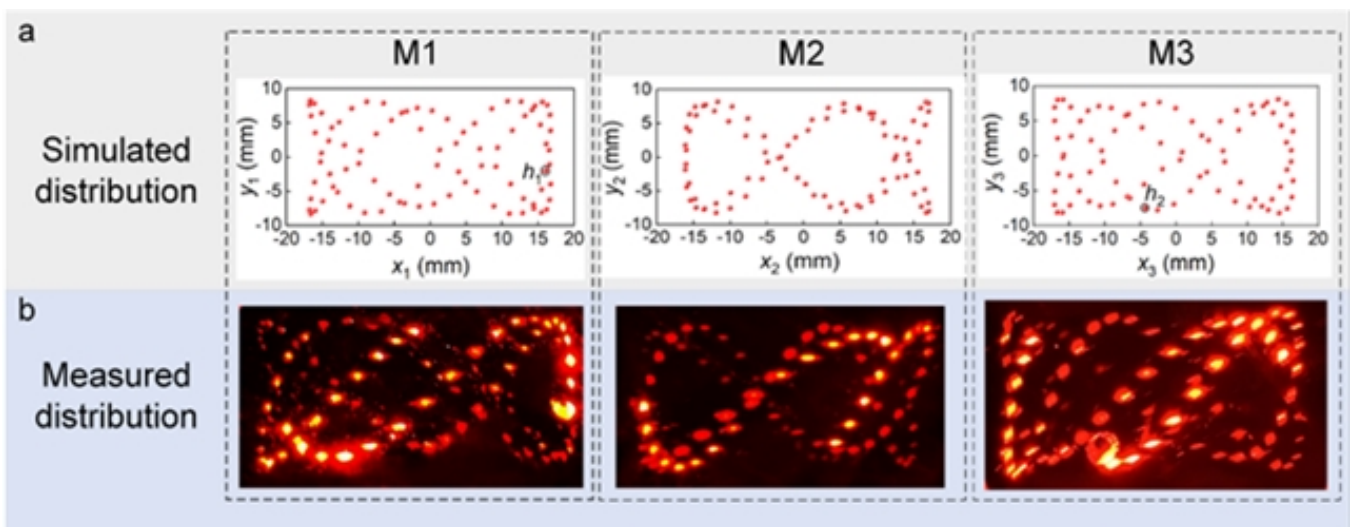


图2. 三片镜光斑图案: (a)仿真光斑分布；(b)实测光斑分布。图源: Light: Science Applications

图3. 聚合物改性的圆形头低频石英音叉:

(a)石英音叉优化示意图 ; (b)石英音叉频率响应 ; (b)石英音叉热像图。图源: Light: Science Applications

图4. LITES传感器结构示意图。图源: Light: Science Applications

该LITES传感器对超低浓度CO气体表现出了良好的线性响应，如图4所示，优化积分时间后，最小探测极限达到了创纪录的920.7 ppq。最终开展了该传感器在城市环境监测和人体健康评估中的初步应用探索，如图5所示，CO作为人体代谢的微量副产品，可作为评估人类肺部健康的重要指标。

图5. 基于优化多通池和石英音叉的CO-LITES传感性能测试:
(a)不同CO浓度下 $2f$ 信号曲线 ; (b)浓度线性响应 ; (c)Allan方差分析 ; (d)噪声连续检测。图源:
Light: Science Applications

图6. 校园和人体呼吸中CO气体检测。图源: Light: Science Applications

总结

该研究从气体吸收增强和石英音叉探测增强角度出发，推动了光致热弹光谱气体传感器的进一步发展，首次实现了ppq量级气体检测，对后续超高灵敏度气体传感技术的发展提供了重要的参考价值。（来源：LightScienceApplications微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41377-025-01864-4>

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：马欲飞等 来源：《光：科学与应用》

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

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