
混频外差解调实现单音叉双气体检测

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/41464.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！

混频外差解调实现单音叉双气体检测。 导读

近期，哈尔滨工业大学马欲飞教授团队在 Light: Advanced Manufacturing发表了题为 Dual-gas light-induced thermoelastic spectroscopy sensor based on mixed-frequency heterodyne demodulation 的研究论文。

该研究提出了一种基于混频外差解调的信号处理架构，用以实现单石英音叉多频率光热信号的同步解调。基于该架构，研究团队利用单个自主设计的低频石英音叉的基频与一次泛频振动模式，构建了双气体光致热弹光谱检测系统，并开展了全面的性能验证实验。该工作搭建了基于单音叉频分复用与混频外差解调的双气体光致热弹光谱 (Light-Induced Thermoelastic Spectroscopy, LITES) 传感器，实现了甲烷与乙炔的实时同步低串扰检测。这项工作对于集成化、低成本多气体激光光谱传感器的开发具有推动意义，有望在天然气泄漏监测、工业安全防护和大气环境检测等领域带来新的应用。

气体传感技术是工业安全、环境监测、医疗诊断等领域的核心支撑技术，与生产生活和公共安全息息相关。在天然气管道巡检中，它能够提前预警易燃易爆气体泄漏，防范爆炸事故；在化工生产过程中，它可以实时监测有毒有害气体浓度，保障作业人员安全；在大气环境治理中，它能够精准追踪温室气体和污染物排放，为减排政策提供数据支撑。随着工业自动化程度的提升 and 环境保护要求的日益严格，对能够同时检测多种气体组分的传感系统的需求愈发迫切。

光致热弹光谱是一种基于激光吸收光谱的痕量气体检测技术。激光经气体吸收后照射至石英音叉表面，音叉吸收激光能量产生周期性热弹形变，进而激发音叉机械振动，通过压电效应将振动转换为电信号用于浓度反演。该技术不仅继承了石英增强光谱技术的高灵敏度、强抗干扰能力等优点，更重要的是实现了非接触测量，可应用于强腐蚀性气体检测、火焰中的原位诊断等复杂环境，极大拓展了石英增强光谱技术的应用范围。在多气体检测场景中，现有技术主要采用时分复用和频分复用两种方案，但时分复用无法实现真正的实时同步检测，传统频分复用则需要为每个气体通道配备独立的解调单元，导致系统复杂度和成本显著上升，同时通道间串扰问题也制约了检测精度的进一步提升。

石英音叉是 LITES 传感器的核心光电换能器件，它凭借极高的品质因数、毫米级的尺寸和低廉的成本，能够将微弱的光热信号转化为清晰可测的电信号。石英音叉不仅拥有基频振动模式，还存在一系列高阶泛频振动模式，如同一只精密的石英节拍器，能够在不同频率下精准响应光热激发，为单器件实现多通道气体检测提供了硬件基础。

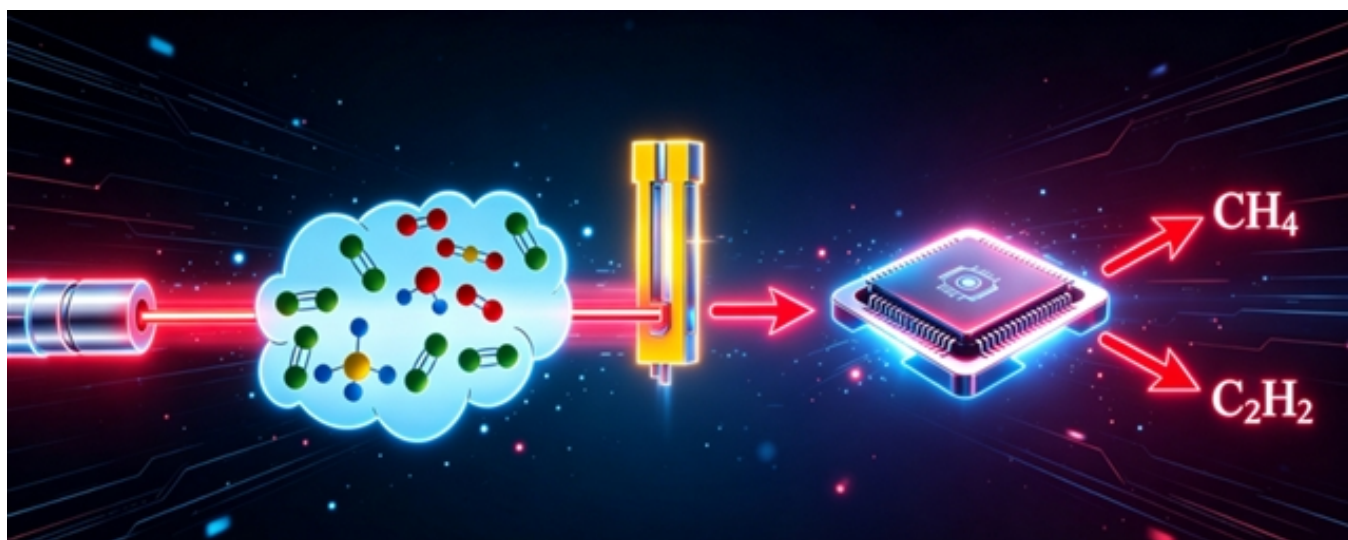


图1：基于混频外差解调的光致热弹光谱双组分检测原理图

图源：哈尔滨工业大学

该研究团队提出了一种基于混合频率外差解调的信号处理架构，用以实现单石英音叉多频率光热信号的同步解调。该架构将不同频率的光热信号统一变频至同一个中频载波，将双通道解调对多个高频参考源的依赖转化为对单个中频参考的依赖，大幅简化了多气体检测系统的信号处理流程，降低了系统同步复杂度与硬件成本。混频外差解调方法如图 2 所示。

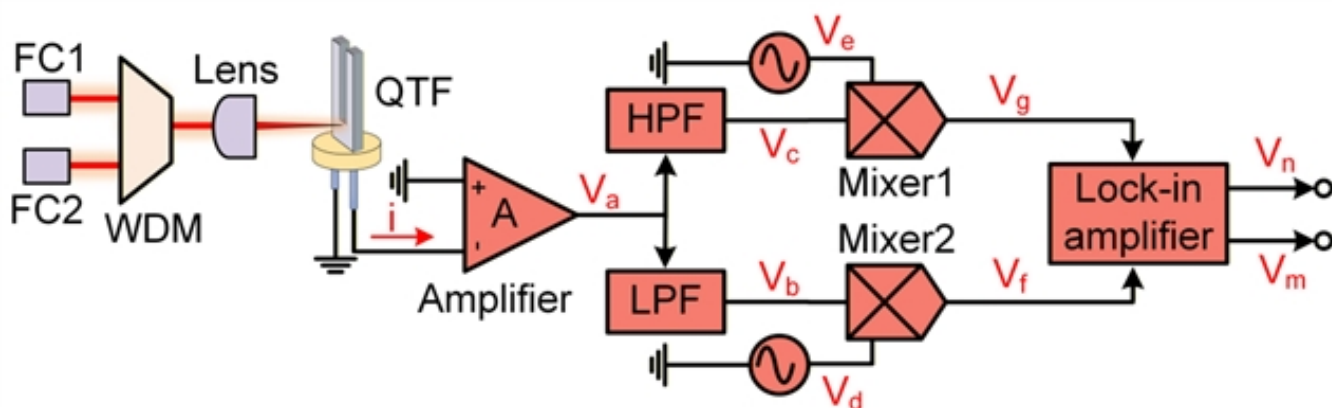


图2：混频外差解调方法

传感器系统如图3所示。需要指出的是，该系统采用四阶巴特沃斯低通与高通滤波器实现基频与泛频信号的初步分离，结合混频电路的频谱搬移和锁相放大器的窄带解调，构建了三级频率域隔离机制。实验结果表明，传感器通道间串扰被抑制至0.057%以下；甲烷与乙炔两个通道的浓度响应线性相关系数 R^2 均大于0.999，最大非线性误差分别为1.39%和1.48%满量程，平均相对系统误差仅为0.95%和0.93%；在300 s的积分时间下，甲烷与乙炔的最低检测限分别达到0.13 ppm和2.93 ppm。

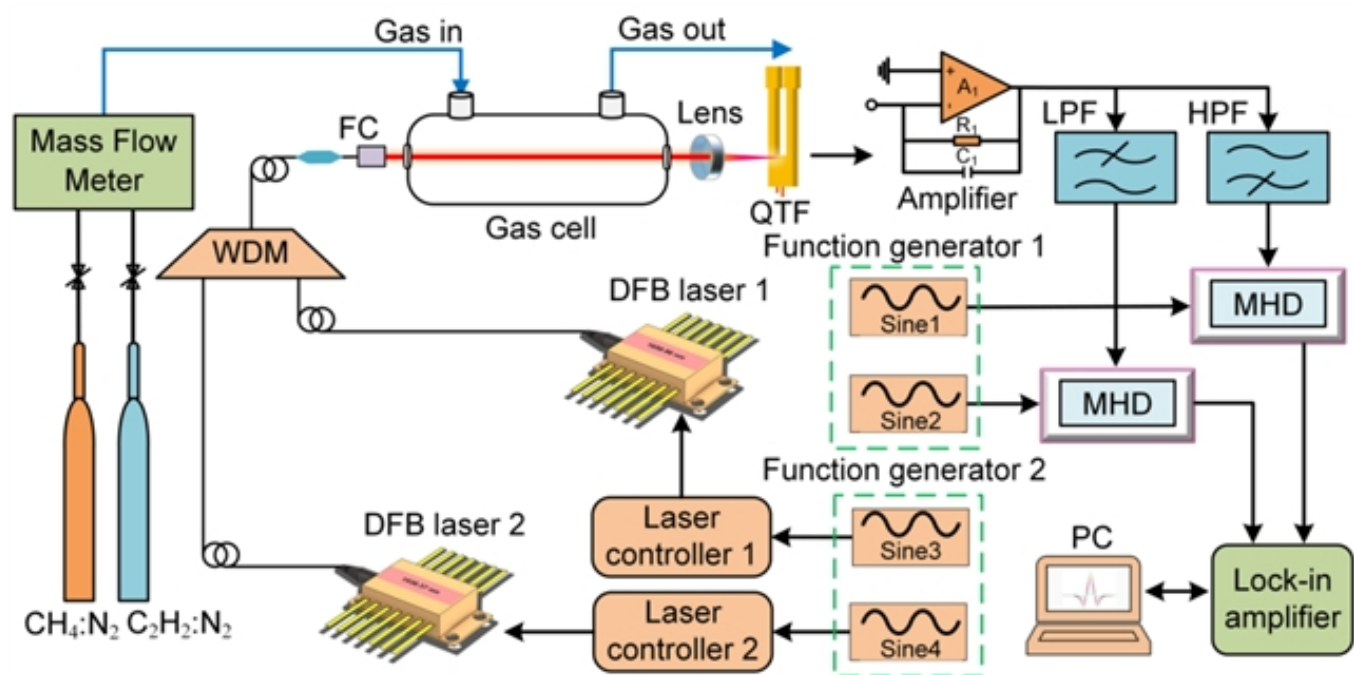


图3：基于混频外差解调的光致热弹光谱传感器装置图

总结与展望

本研究针对现有多气体光致热弹光谱技术系统复杂度高、通道串扰大的痛点，提出混合频率外差解调架构，构建了基于单石英音叉的双气体传感系统，实现了甲烷与乙炔的实时同步高灵敏检测，在保持优异性能的同时大幅简化了硬件结构，为集成化、低成本多气体传感器的开发提供了新的技术路径。（来源：先进制造微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.37188/lam.2026.054>

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：先进制造》

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](https://www.iikx.com)转发