中国科学: 信息科学 2026 年 第 56 卷 第 3 期: 747–748
SCIENTIA SINICA Informationis
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

精选文章导读

基于 T 型差分亥姆霍兹麦克风阵列的 ppb 级多组分气体光声传感器研制

邓焯倍[1], 李亚飞[1*], 关炎雄[1], 黄晨[1], 江衍裕[2], 王一帆[2], 邓婉玲[1], 黄君凯[1], 郑传涛[3], 郭团[2*]

1. 暨南大学信息科学技术学院, 广州 510632
2. 暨南大学物理与光电工程学院, 广州 510632
3. 吉林大学电子科学与工程学院, 长春 130012
* 通信作者. E-mail: liyafei@jnu.edu.cn, tuanguo@jnu.edu.cn

甲烷 (CH_4) 和乙炔 (C_2H_2) 是两类常见的碳氢化合物气体, 具有重要的工业应用价值, 但也存在显著的安全隐患和环境风险. CH_4 是天然气的主要成分, 广泛用于能源生产和化工领域, 但其高可燃性可能导致爆炸事故; C_2H_2 常用于金属焊接和切割, 但其不稳定性和毒性可能对人体健康构成威胁. 因此, 开发能够同时检测 CH_4 和 C_2H_2 的高灵敏度、高选择性气体传感器对于工业安全监控、环境污染防控和职业健康保护具有重要意义 [1,2]. 光声池作为激发光与被测气体相互作用的核心区域, 其结构设计直接决定了光声信号的产生效率. 现有的光声池具有体积大、灵敏度低和易受噪声干扰等缺点, 急需开发小体积、高灵敏、低噪声的新型光声池 [3,4].

SCIENCE CHINA Information Sciences 2026 年第 2 期出版了暨南大学郭团等的研究论文 "T-type differential Helmholtz photoacoustic cell with microphone array for simultaneous multi-gas monitoring at ppb level", 本文结合了 T 型与亥姆霍兹型光声池的特点, 提出了一种 T 型差分亥姆霍兹光声池并使用麦克风阵列 (T-type differential Helmholtz microphone array, TDHMA) 来提高系统灵敏度, 传感系统示意图如图 1 所示. 在传统的亥姆霍兹光声池的基础上增加了 8 个谐振腔形成 8 个 T 型结构, 在每个谐振腔的末端装上 MEMS 麦克风检测光声信号. 通过加法电路分别对 TDHMA 光声池产生的 4 个同相信号和 4 个反相信号进行叠加, 然后将两组叠加后的光声信号做减法运算, 以此来增强光声信号. 此外, 本文对 TDHMA 光声池的结构进行优化, 通过优化连接管、缓冲腔和谐振腔的长度和半径来提高光声池的光声信号. 使用中心波长为 1653.73 和 1532.68 nm 的分布式反馈激光器进行 CH_4 和 C_2H_2 的检测. 将接收到的光声信号送入锁相放大器, 提取出来的 $2f$ 信号的幅值和气体浓度成正比的关系. 然后通过数据采集卡将与气体浓度相关的 $2f$ 信号传输到电脑 (PC) 端, 通过 LabVIEW 软件对气体浓度进行实时动态监测.

所研制的 TDHMA 光声池的频率响应会受到温度、压力和加工精度等因素的影响, 因此在使用前必须进行校准. 测量了 5000 ppm 的 CH_4 在 2000~2500 Hz 频率范围内不同调制频率下 $2f$ 信号的幅度, 用洛仑兹函数拟合了频率响应曲线. 实验结果表明, 在 2290 Hz 处 $2f$ 信号幅值最大, 即 TDHMA 光声池的谐振频率为 2290 Hz. 为了展现 TDHMA 光声池的最佳性能, 8 个超低噪声麦克风同时打开来测量 PA 信号. 使用气体混合系统制备不同浓度的 CH_4 和 C_2H_2 气体样品, 然后依次将其通入 TDHMA 光声池. 将麦克风采集到的信号送入锁相放大器, 以提取与气体浓度相关的 $2f$ 信号. 采集多个不同浓度下的 $2f$ 信号幅值并计算平均值, 然后进行线性拟合. 结果表明, TDHMA 光声池具有增大光声信号

英文原文: Deng Z B, Li Y F, Guan Y X, et al. T-type differential Helmholtz photoacoustic cell with microphone array for simultaneous multi-gas monitoring at ppb level. Sci China Inf Sci, 2026, 69: 122401, https://doi.org/10.1007/s11432-025-4629-0

© 2026《中国科学》杂志社

https://www.sciengine.com/doi/10.1360/SSI-2025-0515

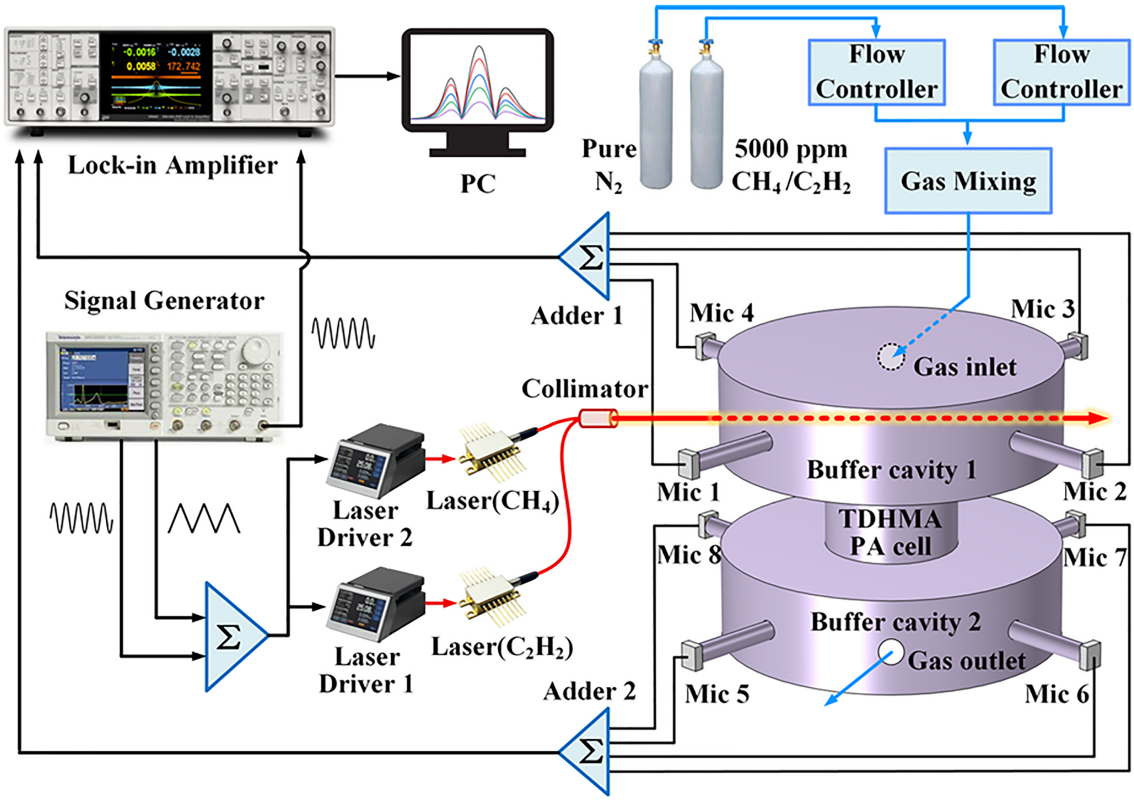

图 1　(网络版彩图) 传感系统示意图.

Figure 1　(Color online) Schematic diagram of the sensor system.

和减小噪声的优势, 检测的两种气体均有较高的拟合优度, 较低的归一化噪声系数 (normalized noise equivalent absorption, NNEA).

相比于传统的亥姆霍兹光声池, 本文设计的 TDHMA 光声池具有独特的 T 型结构, 大幅提高光声信号幅值. 利用差分对称结构, 在提高光声信号的同时降低了噪声干扰. 最终实现了高灵敏的多组分气体检测, CH_4 和 C_2H_2 的检测下限分别为 402 和 256 ppb, 所对应的 NNEA 分别为 4.18×10^{-9} $cm^{-1}\cdot W\cdot Hz^{-1/2}$ 和 1.52×10^{-9} $cm^{-1}\cdot W\cdot Hz^{-1/2}$. 所研制的 TDHMA 光声池在 CH_4 和 C_2H_2 检测中的卓越性能, 验证了其在复杂环境下的适用性, 为高灵敏气体检测系统的设计提供了新思路. 未来可进一步推动光声光谱气体检测技术在能源、环保等领域的应用.

参考文献

1　Xu L, Zhou S, Liu N, et al. Multigas sensing technique based on quartz crystal tuning fork-enhanced laser spectroscopy. Anal Chem, 2020, 92: 14153–14163

2　Huang Q, Wei Y, Li J. Simultaneous detection of multiple gases using multi-resonance photoacoustic spectroscopy. Sens Actuat B-Chem, 2022, 369: 132234

3　Zha S, Chen H, Liu C, et al. Multivariate-coupled-enhanced photoacoustic spectroscopy with Chebyshev rational fractional-order filtering algorithm for trace CH_4 detection. Photoacoustics, 2025, 42: 100692

4　Zhao X, Wang H, Qi H, et al. Fiber optic photoacoustic gas sensor enhanced by multi-pass cell with overlapping phantom spots. Sens Actuat B-Chem, 2024, 412: 135816

https://www.sciengine.com/doi/10.1360/SSI-2025-0515