悬浮硫系波导实现ppb级片上光热气体传感

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：https://www.iikx.com/news/progress/41223.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！

悬浮硫系波导实现ppb级片上光热气体传感。 导读

从空气质量监测到生命健康分析，气体传感器正在从实验室大型仪器加速走向现场、实时、微型化设备。片上光学气体传感器凭借高选择性、小体积、低功耗、易于规模化制造等优势，被视为实现微小型气体传感器的重要技术路线。然而，在目前的光芯片尺度上，传统直接吸收式波导传感器受限于光-气相互作用弱、有效吸收路径短等难题，限制其灵敏度在ppm（百万分之一）量级。如何进一步提升至ppb（十亿分之一）水平，从而满足痕量气体检测需求，是决定此技术能否在医疗诊断、工业生产、环境及安全监测等高灵敏场景得以应用的关键瓶颈问题。

近日，香港理工大学、之江实验室、吉林大学与中科院长春光机所组成的联合研究团队，提出了一种悬浮硫系波导增强的片上光热光谱技术。该团队通过引入悬浮波导结构，同时增强了光-气体相互作用与局部热积累能力，将光热相位调制效率整体提升45倍。在仅1.2厘米长的芯片上，在近红外波段实现了330 ppb的乙炔检测下限、6个数量级的动态量程以及亚秒级响应时间，为下一代超高灵敏、片上集成光子气体传感器奠定了关键技术基础。相关成果以 Suspended waveguide-enhanced near-infrared photothermal spectroscopy for ppb-level molecular gas sensing on a chalcogenide chip为题发表于《Light: Science Applications》, 作者团队包括郑凯元博士后、廖翰宇博士、韩锋博博士，杜清扬研究员、郑传涛教授、靳伟教授、王立军院士等。

研究背景

片上气体传感器通常依赖波导倏逝场与气体分子的相互作用，利用气体吸收引起的光强度变化反演浓度。其核心优势在于能实现极高的集成度，但其灵敏度却受到两个根本限制：第一，气体分子在近红外波段的吸收普遍偏弱，而波导中可用于吸收的倏逝场比例又较为有限，导致光被吸收的功率偏低。第二，即便采用高灵敏的光热光谱方案（Laser Photon. Rev. 18, 2301071），在常规固体衬底波导结构中，片上气体吸收产生的热量也会迅速通过固体衬底耗散，难以积累热量形成有效温升，探测光感受到的光热相位调制幅度有限，最终导致片上光热光谱法的性能仍然停留在ppm水平。因此，如何在芯片尺度内同时增强产热能力与热积累效率，成为制约高灵敏片上光热气体传感的核心瓶颈。

针对上述挑战，该研究团队创新建立了悬浮硫系波导平台，通过对片上气体分子的非辐射弛豫产热与传热、热光相位调制机制的综合理论分析，建立了片上等效光热模型，将悬浮结构增强的光吸收产热、热积累、热光响应统一到光学增强因子与热学增强因子两个参量中，实现了热源功率和局部热积累的双重增强，光热效率较非悬浮波导提升45倍，最终实现近红外片上ppb量级气体检测灵敏度。

研究亮点

1. 悬浮波导结构：双重增强片上光热效应

研究团队设计并实现了一种悬浮硫系波导结构，去除了传统波导的固体下包层，转为以上下空气作为包层，在波导下方形成微米级空气热缓冲区（空气热导率比SiO2低53倍）。该设计一方面显著增强了波导倏逝场在气体中的分布比例，从而提升气体吸收引起的产热功率；另一方面，利用空气极低的热导率，有效抑制了热量向衬底的快速耗散，实现更强的局部热积累。这一悬浮设计在单一结构中同时解决了片上光热光谱长期面临的产热不足与热耗散过快两大瓶颈，为高效光热调制提供了关键物理基础。

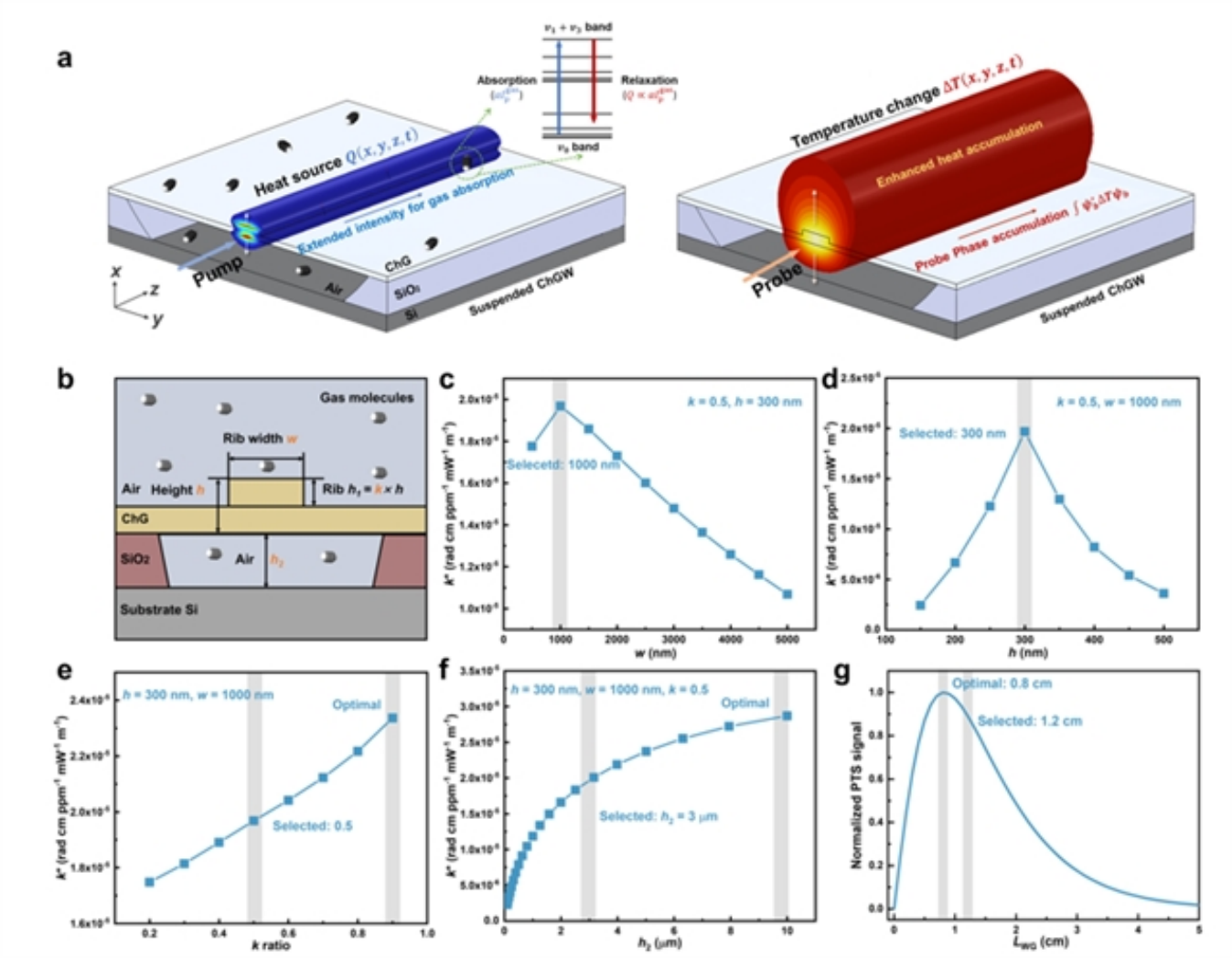


图1: (a)悬浮波导增强光热光谱原理及 (b) 悬浮结构示意图。(c-f)
基于等效光热模型对波导宽度、高度、脊比及空气层厚度的优化。(g) 最优波导长度评估

2. 等效光热模型：定量揭示光热协同增强机理

研究团队围绕片上光热光谱中吸收-产热-传热-相位调制的完整物理链条，从理论上建立了片上等效光热模型，将复杂的热传导过程归约为可量化的等效热源功率与等效热导率。通过悬浮结构优化，增大光-气重叠因子（提高产热）的同时，利用下包层空气的绝热特性，有效减少了热流

失（热量积累）。与传统的非悬浮波导相比，优化后的悬浮结构实现了4倍的吸收致热源功率提升（倏逝场由24%提升至95%）和10.6倍的等效热导率降低（由0.793降低至0.075 W/m/K），最终将片上光热调制效率提升45倍。

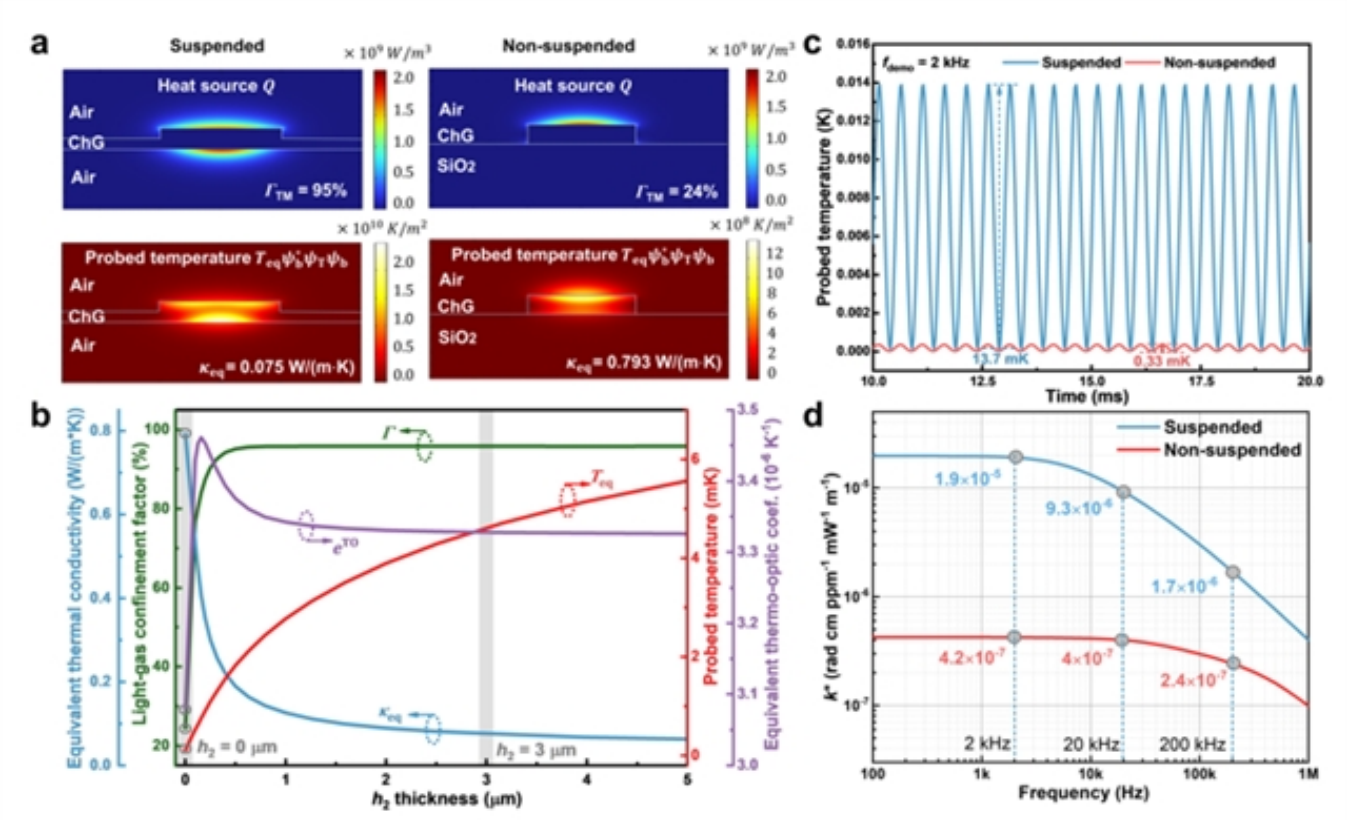


图2: 悬浮与非悬浮波导性能对比。(a) 光学场与热学场分布对比。(b) 关键参数随空气缓冲区厚度变化关系。(c) 时域温度响应对比。(d) 频域光热调制效率对比

3. 芯片级集成：实现ppb量级片上气体测量

采用湿法刻蚀和CMOS兼容工艺制备了长度为1.2 cm、传输损耗2.6 dB/cm 的悬浮硫系波导，并利用波导端面天然形成的片上Fabry – P é rot干涉腔实现光热相位信号解调，构建了高度集成的一体化片上传感器。在近红外波段对乙炔气体实现了330 ppb的检测下限，动态量程接近6个数量级，响应时间小于1秒，整体噪声等效吸收系数达到3.8×10-7 cm-1。该方法在近红外片上气体传感领域实现了性能上的实质性跨越，将检测灵敏度突破至ppb量级。

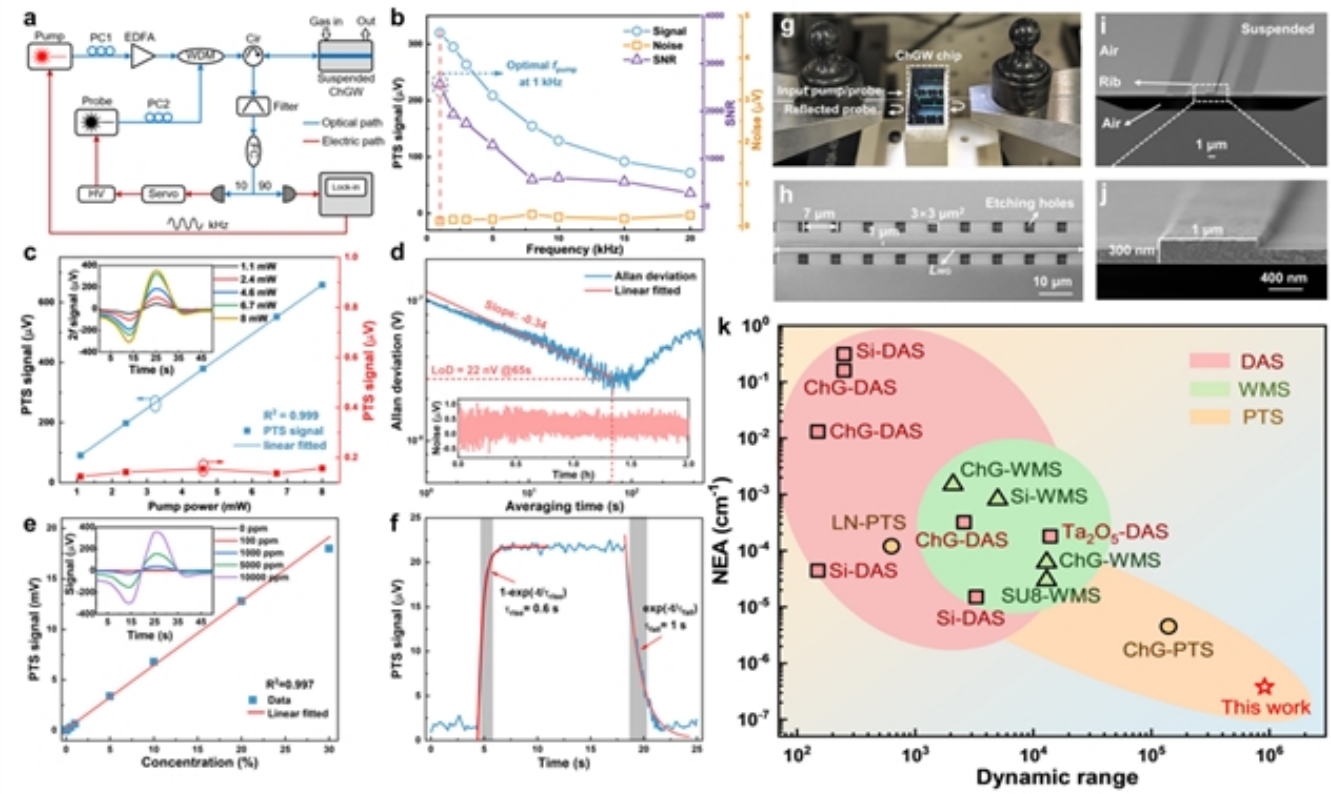


图3: 悬浮波导增强片上气体传感性能评估。(a) 实验系统图。(b-f) 调制频率、泵浦光强、检测下限、动态量程以及响应时间的综合性能评估。(g-j) 制备的悬浮波导的实物图和SEM图。(k) 与现有报道的片上气体传感器的性能对比

总结与展望

该工作通过理论创新、结构优化与工艺实现，在近红外波段、厘米级芯片上实现了ppb级灵敏度的气体检测，系统性验证了悬浮波导在增强片上光热光谱性能方面的独特优势。得益于硫系材料超宽传输窗口（1－16 μm）与CMOS兼容工艺，该技术路线有望自然拓展至中红外波段，实现更强吸收下的多组分气体检测。这一通用平台为开发下一代超灵敏度、多功能集成的传感器芯片奠定了关键基础，在环境监测、工业过程控制、健康筛查及可穿戴设备等领域具有广阔的应用前景。（来源：LightScienceApplications微信公众号）

相关论文信息：https://doi.org/10.1038/s41377-026-02196-7

作者：杜清扬等 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转发