
腔增强光声双光梳光谱

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/28311.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！

近二十年来，光学频率梳（光频梳）光谱已经发展成为精密光谱和计量学、光谱激光雷达、环境监测以及高光谱全息成像等众多领域的强大工具。得益于一系列等间隔、高相干的频率谱线，光频梳可以提供极高分辨率的分子宽光谱信息，为高精光谱测量开启了新的大门。

双光梳光谱采用两个具有微小重复频率差的光频梳光源进行异步光学取样，通过多外差干涉反演目标分子的光谱信息，展现出高分辨率、宽带覆盖和快速测量等优点。国际上，以美国国家标准与技术研究院（NIST）和德国马克斯·普朗克量子光学研究所（MPQ）为代表的研究机构在该领域做出了许多开创性研究。然而，传统双光梳光谱从激光穿过待测样品的透射光中提取光谱信息，存在严重的光学背景干扰，而有限的气体吸收长度也限制了探测灵敏度。这种直接光梳探测手段往往依赖于高带宽的光电探测器、高速数据采集卡等硬件设备，以及复杂的光谱解析技术，严重限制了双光梳光谱的广泛应用。

近日，香港中文大学任伟教授和王震教授的研究团队联合中国科学院长春光机所王强研究员，提出并验证了腔增强光声双光梳光谱（Cavity-enhanced photoacoustic dual-comb spectroscopy）的概念，如图1所示。采用光学腔增强方法突破光频梳的梳齿能量瓶颈，实现近1000倍的光功率增强；设计了独特的竹笛式宽带声学腔，实现超过5 kHz的声学放大，相比于传统光声探测的石英音叉器件，响应带宽提高三个量级。基于该方法，实验测量了乙炔、氨气和一氧化碳三种气体在整个C波段的光谱信息，展示了ppb量级的探测灵敏度。

该成果以Cavity-enhanced photoacoustic dual-comb spectroscopy为题发表在Light: Science Applications。香港中文大学的王震和博士生聂沁雪为本文的共同第一作者，香港中文大学的任伟、王震和中国科学院长春光机所的王强为本文的共同通讯作者，意大利国家研究委员会光学研究所、佛罗伦萨欧洲非线性光谱实验室为本文的合作单位。

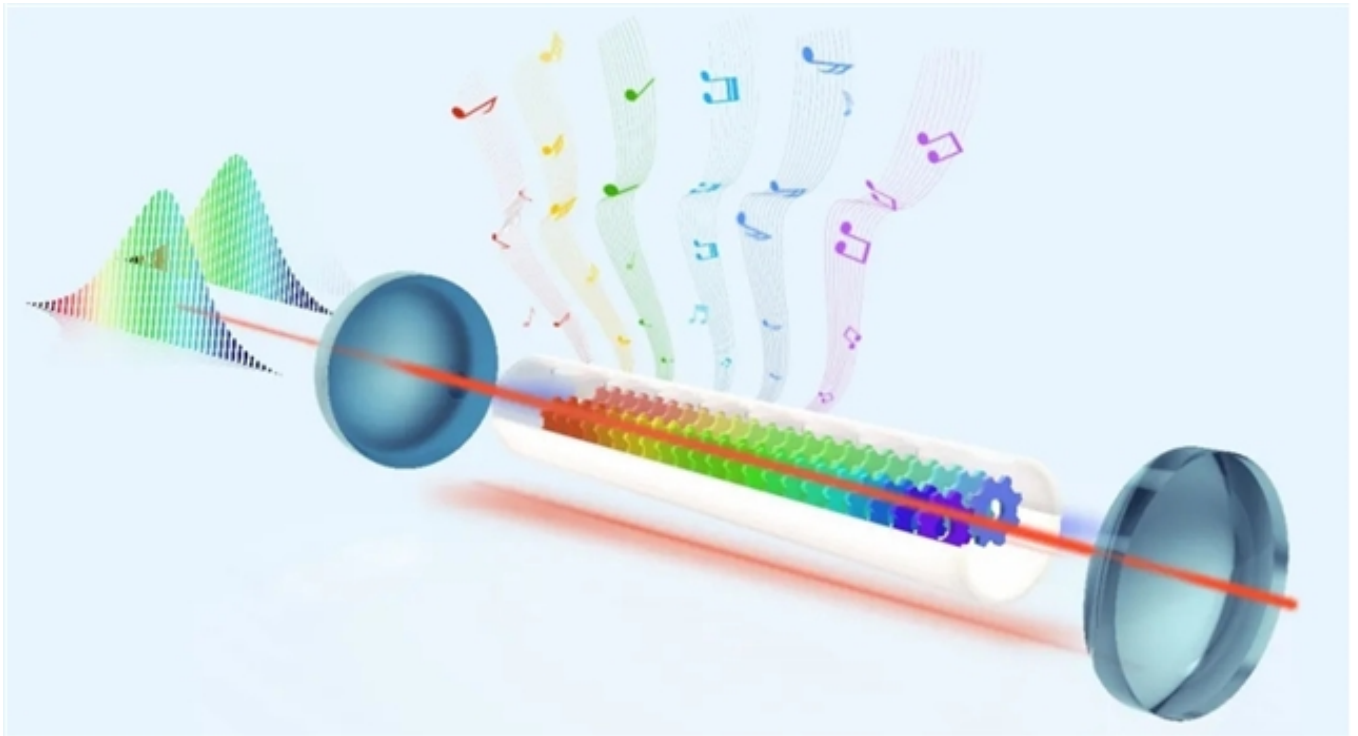


图1：腔增强光声双光梳光谱概念图

研究人员采用电光调制双光梳光源，借助双光梳每一对梳齿的外差拍频，对气体分子激光吸收实现特定频率的强度调制；产生不同频率的声波信号，通过傅里叶变换反演获得分子光谱信息。由于光声效应与光梳功率成正比，通过激光锁频技术成功将两组光梳同时耦合进光学腔（精细度 >4000 ），使得每个光腔纵模对应一对光学梳齿（图2插图），实现双光梳光功率的显著放大。为了保证光学腔的长期稳定性，选择乙炔分子在1531 nm处的分子吸收线为光学频率基准，实现光学腔和分子吸收线的锁定（图2）。

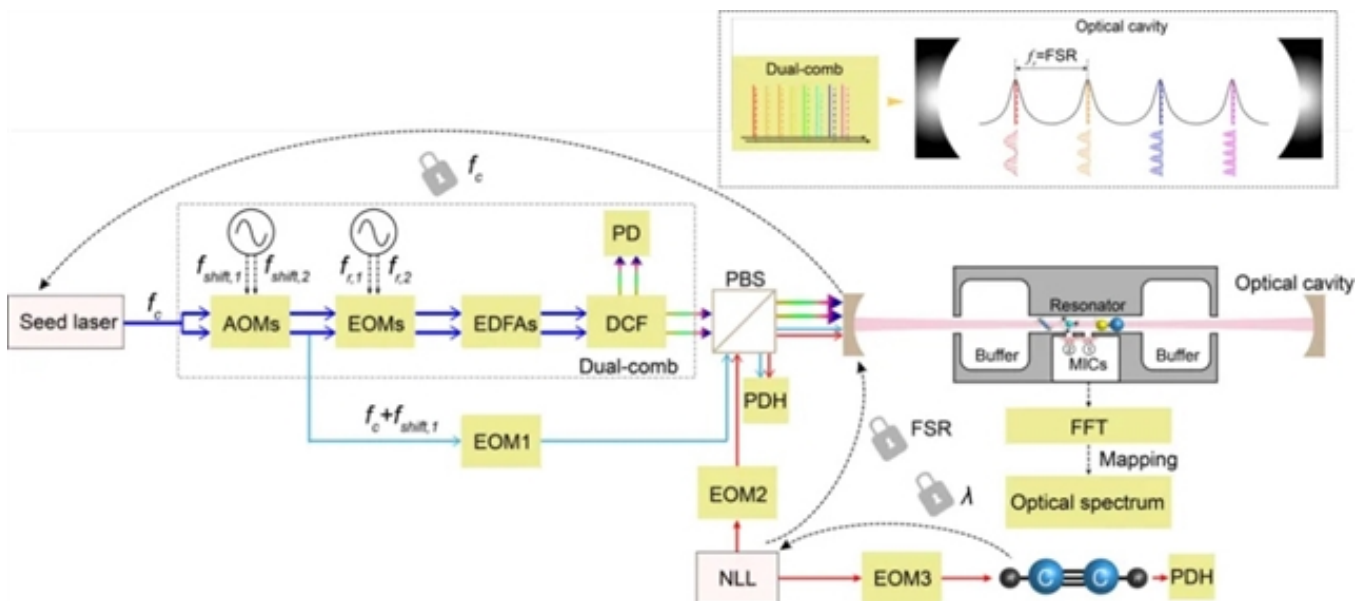


图2：实验装置示意图

宽带声学腔是实现光声双光梳光谱的核心元件，也是该领域的一个瓶颈问题。受中国传统乐器竹笛的启发，研究人员优化了传统声学共鸣管的声学边界设计，并增加了声波信号探测点，使得叠加输出的声波信号具有宽带和平坦的频率响应特性，满足光声双光梳探测的需求（图3）。最终，腔增强的每对光学梳齿与气体分子作用后，同时激发出超过200个不同频率的声波，并且等间隔地分布在声学腔的3-dB带宽放大范围内。

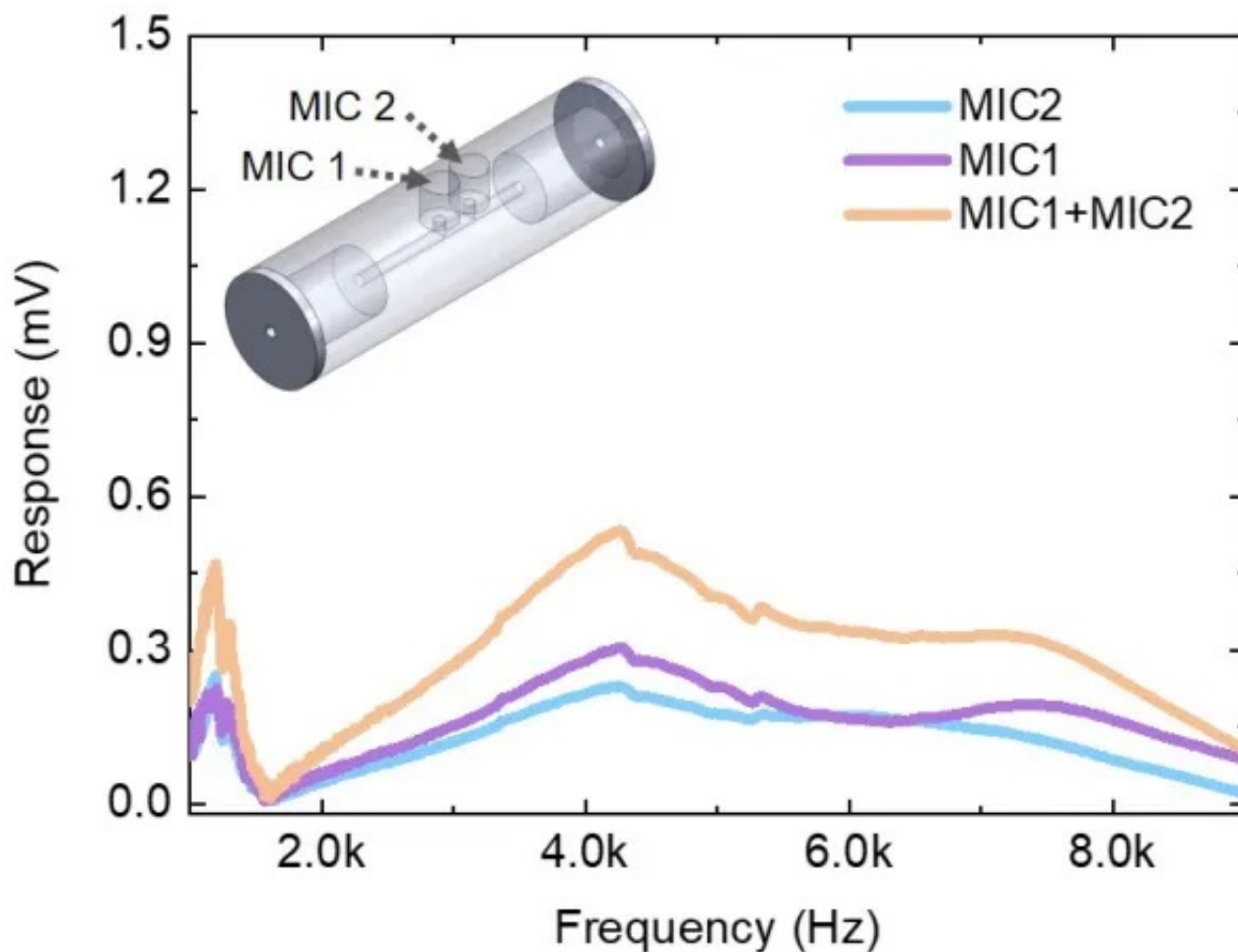


图3：宽带声学共鸣管结构和频率响应特性

基于该新型双光梳光谱系统，研究人员实验测量了乙炔（10 ppm）、氨气（50 ppm）和一氧化碳（1%）等气体超过5 THz（40 nm）的光谱信息，与HITRAN标准光谱数据库高度一致（图4）。以乙炔为例评估其探测灵敏度，该系统的最低探测下限为0.6 ppb，对应噪声等效吸收系数达到 $7 \times 10^{-10} \text{ cm}^{-1}$ 。因此，实验结果证明腔增强光声双光梳光谱技术兼具宽波段和超高灵敏的探测能力，为高精密光频梳光谱的广泛应用提供了重要技术支撑。

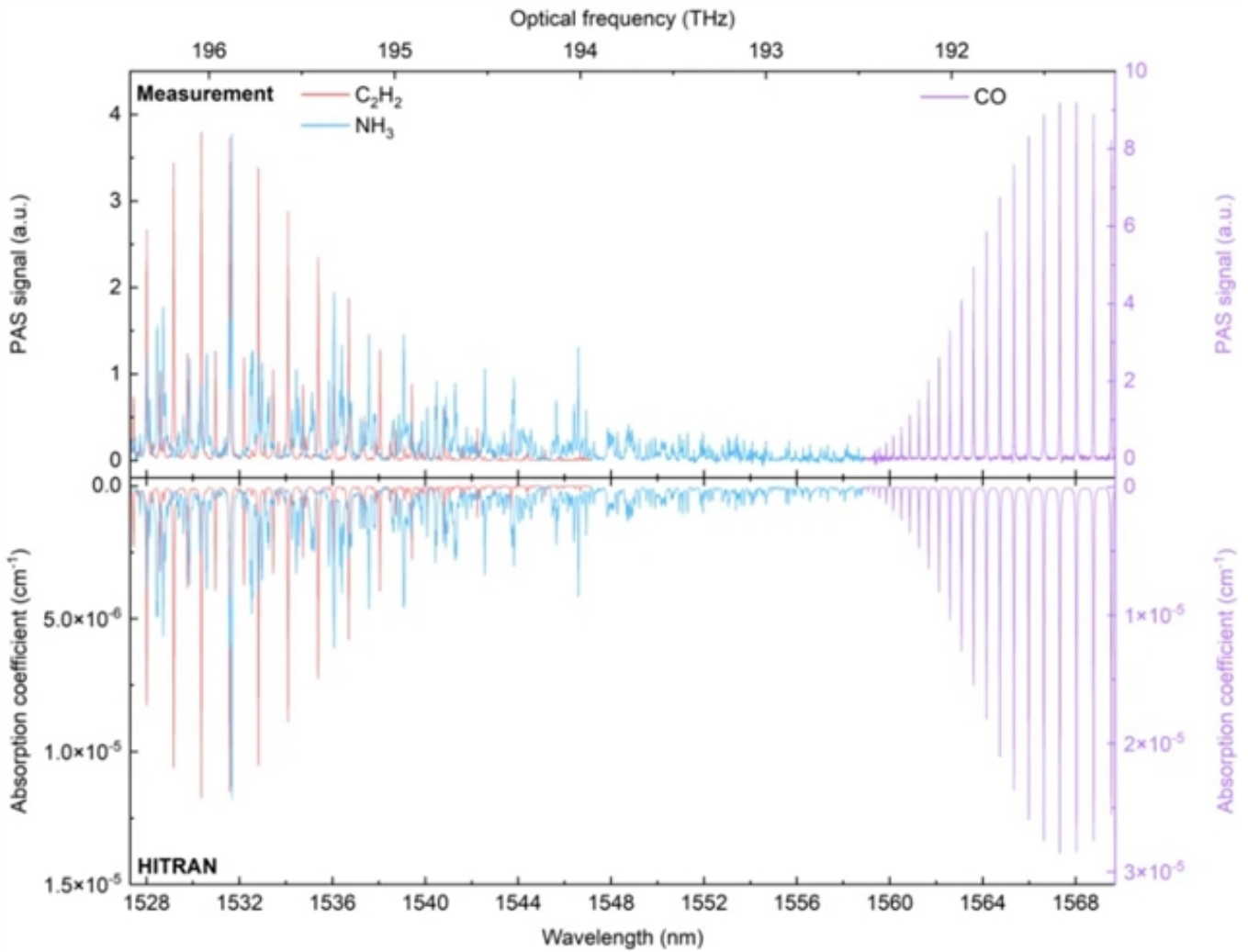


图4：乙炔（10 ppm）、氨气（50 ppm）和一氧化碳（1%）光谱测量结果

前景展望

腔增强光声双光梳光谱在当前光频梳光谱领域展现了领先的探测性能，可以实现宽波段范围内更灵敏的快速光谱分析，其无背景的光声探测方式有助于应对极端复杂的测量环境。结合光声多物理场耦合设计、MEMS技术和集成光学，基于该光谱方法的系统性能和环境适应性将不断提高。随着中红外光梳光源的发展，腔增强光声双光梳光谱有望进一步拓展到中红外指纹光谱区，实现无与伦比的灵敏度和更丰富的分子探测能力，为基于激光光谱技术的前沿科学探索和面向国家重大需求的大型工程应用提供可行性方案。（来源：LightScienceApplications微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41377-023-01353-6>

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：任伟等 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