
量子关联光梳光谱突破经典噪声瓶颈

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/36366.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！

量子关联光梳光谱突破经典噪声瓶颈。 导读

光学频率梳，简称光梳，由数以万计的窄线宽光学谱线构成，能够对复杂密集的原子分子谱线进行精确且一次性同时测量。光梳光谱技术突破了传统光谱测量在谱宽、分辨率、精度及速度方面的技术壁垒，开辟了分子指纹图谱的新纪元。然而，经典的光梳光谱测量受到散粒噪声的限制，信噪比与灵敏度难以突破经典极限。

近日，华东师范大学曾和平教授和闫明研究员团队提出量子关联增强的双光梳光谱技术，利用关联光梳的强度差压缩，突破了光梳光谱测量的散粒噪声瓶颈，信噪比超越经典极限2 dB，提高成谱速度2.6倍，与频率上转换探测技术结合，首次实现中红外量子增强的光梳光谱，在精密光谱、痕量分析、红外遥感、燃烧诊断等前沿领域有广阔的应用前景。

该成果以Quantum correlation-enhanced dual-comb spectroscopy为题发表在国际顶尖光学期刊《Light：Science Applications》。

研究背景

双光梳光谱技术（DCS），利用两台梳齿间距微小差别的光梳，在单点探测器上进行光外差拍频探测，将光谱信息映射到射频域，在无需机械扫描或色散元件的情况下，可以实现宽带分子指纹谱的快速、高分辨测量。然而，经典的DCS受相干态光梳的量子噪声影响，在弱信号探测中，面临信噪比与灵敏度极限的困境。以压缩态和纠缠态等量子光源为基础的精密测量技术在突破经典噪声极限方面展现了巨大潜力，已被成功应用于引力波探测、生物成像等前沿领域。然而，量子光梳与DCS的融合仍面临挑战。如何在DCS测量中保持关联光梳的量子特性是亟待解决的问题。

研究亮点

本文提出一种量子关联增强的双光梳光谱（QC-DCS）测量新方法：通过一对孪生关联光梳间的相对强度差噪声压缩，抑制DCS测量中的散粒噪声（图1）。实验上，采用高非线性光纤中的四波混频过程产生两束波长不同的强度关联光梳。其中，一束与信号光合束后，在平衡探测器的一接收端产生双光梳拍频信号；另一束则直接被探测器另一端接收，产生具有关联特性的噪声。通过平衡探测器的减法功能，可以消除双光梳信号中的部分散粒噪声，得到低于经典噪声背景的双光梳频谱。图1中频谱数据表明，在1-4 MHz带宽内实现了对散粒噪声背景的抑制，平均噪声抑制比为2 dB，在2 MHz处可达2.7 dB。这意味着在相同信噪比的情况下，量子增强方案可以缩短测量时间，提升光谱测量速度（2.6倍）

。目前，量子增强效果主要受限于探测器的量子效率（84%）。采用量子效率98%的探测器，将有望实现6.5 dB的噪声抑制。

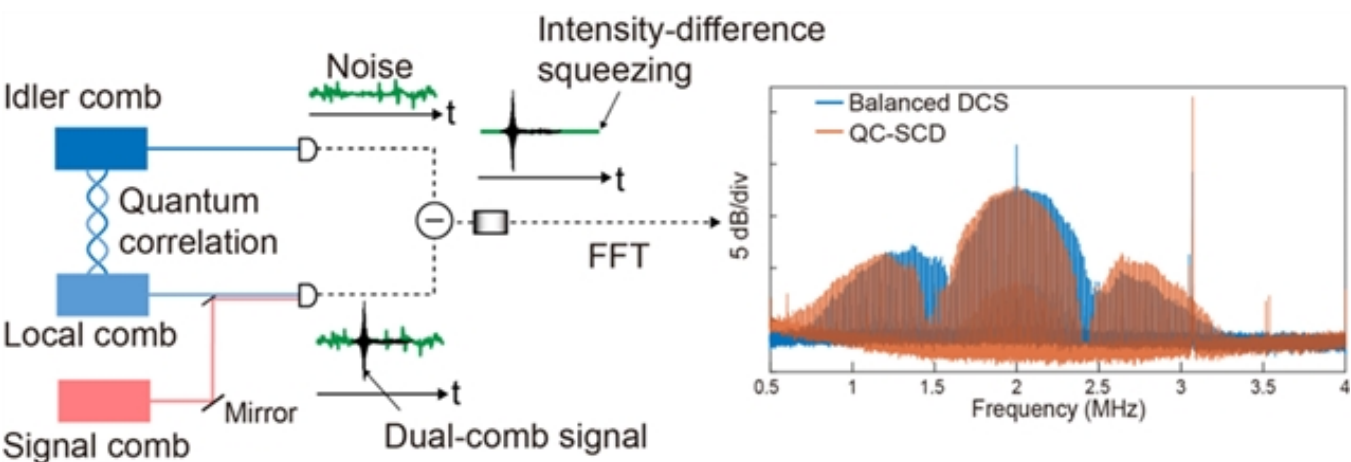


图1. 量子关联增强双光梳光谱技术原理图

该技术的创新点在于利用非线性周期极化铌酸锂晶体（PPLN）作为频率上转换器件和合束器，同时解决了两个技术问题：

- （1）中红外探测器件灵敏度与带宽有限的问题；
- （2）普通合束器的合束比或损耗对量子特性的影响。

实验装置如图2 所示。信号光为中心波长3.3 μm 的中红外光梳；本振光梳及与之关联的闲频光梳则在1.5 μm 处的近红外波段。信号光与本振光通过二向色镜后空间重合（各自损耗不到1%），随后共线经过PPLN晶体，其中信号光被频率上转换至1.5 μm 波段，并与本振光在探测器上拍频产生双光梳信号。该方案既体现了DCS的宽带高分辨光谱测量优势，又在最大程度上保持了关联光梳的量子特性，并且可以与空心光纤、多通池、增强腔等高损耗气室结合，进一步提升测量灵敏度。

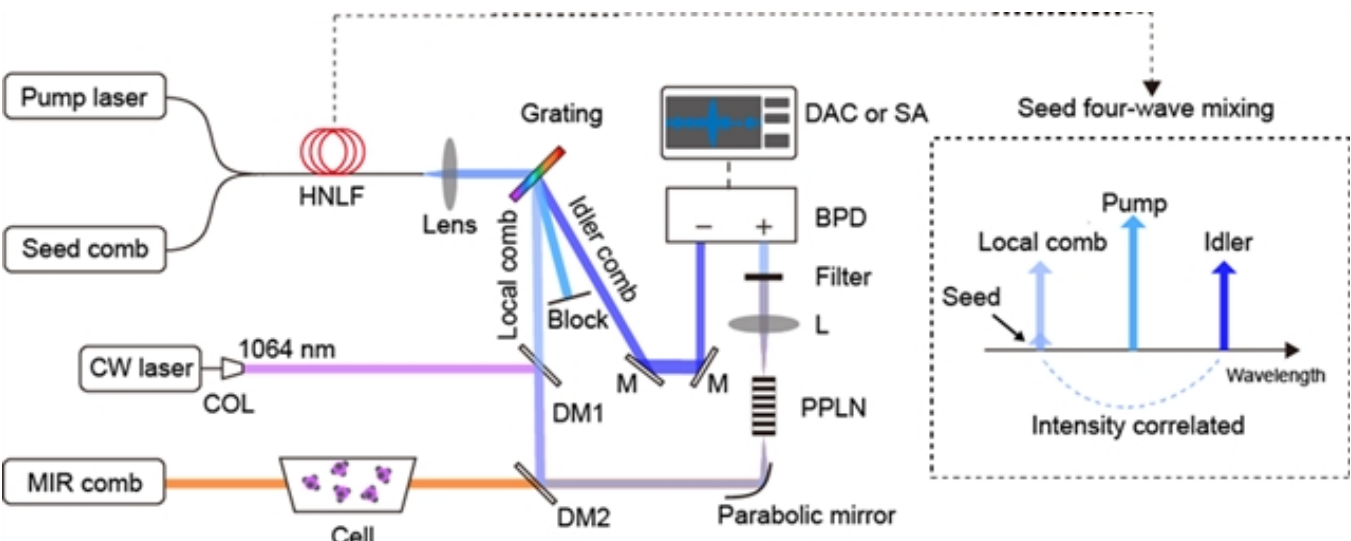


图2. 实验装置示意图

与基于量子光源的调谐光谱技术相比，本文技术具有如下优势：

(1) 中红外宽带光谱测量：结合频率上转换探测技术，实现了中红外2870-2965 cm^{-1} (86.04-88.89THz) 的宽带光谱测量，谱宽接近100 cm^{-1} 或3 THz，覆盖了甲烷、乙炔等多种碳氢化合物的基带振动指纹谱线（图3）。

(2) 多梳齿频率的一次性同时测量：与调谐光谱技术单波长测量方式不同，本文技术采用电光光梳合成与双光梳拍频探测技术，可以对超200根梳齿同时测量。

(3) 高光谱分辨率与高频率精度：利用密集的光梳梳齿，可实现谱分辨率达7.5 pm的高分辨中红外分子光谱测量。梳齿中心频率的不确定度可溯源至超窄线宽连续激光器及氢钟。

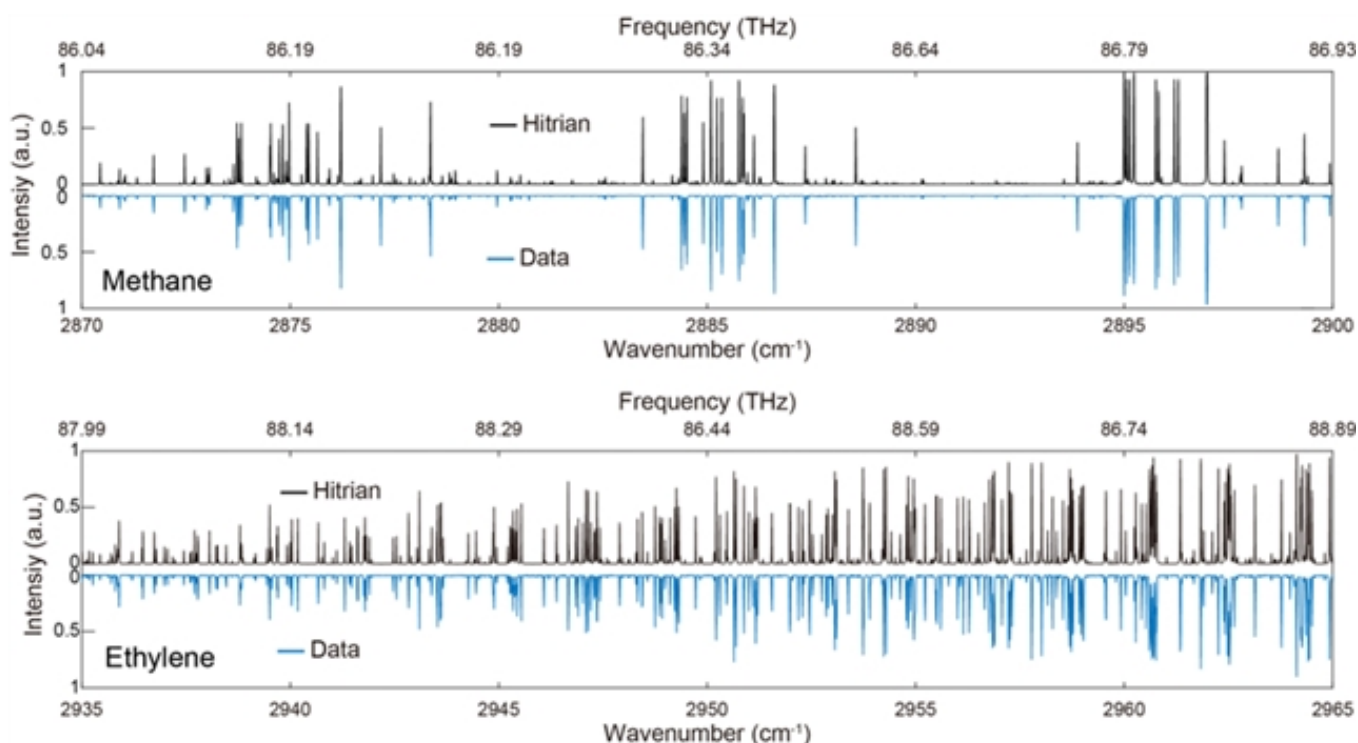


图3. 宽带分子指纹测量结果

总结与展望

本研究提出量子关联双光梳光谱技术，突破了传统双光梳光谱技术的散粒噪声极限，信噪比提升2 dB。研究结合频率上转换技术，在3 μm 分子指纹区域，实现了分辨率为7.5 pm的高分辨率分子光谱测量。该成果在量子精密测量、分子指纹谱、燃烧场动力学分析、环境监测、医学诊断等领域具有巨大的应用前景。（来源：LightScienceApplications微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41377-025-01891-1>

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：曾和平等 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](https://www.iikx.com)转发