
基于LiNbO₃槽波导的紧凑型太赫兹吸收光谱技术

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/39180.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！

基于LiNbO₃槽波导的紧凑型太赫兹吸收光谱技术。 导读

在太赫兹光谱技术领域，传统自由空间光学系统面临体积庞大、对小样品检测灵敏度不足的挑战，而波导基太赫兹平台虽能实现紧凑型实验，但其作为光谱工具的潜力尚未充分挖掘。近日，美国麻省理工学院的Keith A. Nelson团队提出了一种基于铌酸锂（LiNbO₃）槽波导的太赫兹吸收光谱新方案，通过将太赫兹电场局域在低折射率槽区与样品相互作用，实现了对样品吸收光谱和体折射率的高灵敏度测量。该研究成果近日发表于国际顶级学术期刊《Light: Science Applications》上，题为Compact THz absorption spectroscopy using a LiNbO₃ slot waveguide，美国麻省理工学院的Eric R. Sung为第一作者，Keith A. Nelson为通讯作者。

研究背景

太赫兹光谱技术作为物质分子振动与转动模式的指纹探测手段，在化学识别、生物医学成像及材料表征等领域具有不可替代的优势。传统自由空间太赫兹系统依赖bulky光学元件，难以适应狭小空间或极端环境下的检测需求；而波导基太赫兹平台虽能实现系统微型化，却因太赫兹场与样品耦合效率低，其光谱分析能力长期未被有效开发。基于铌酸锂（LiNbO₃）的太赫兹极化激元平台，通过波导内直接产生与探测太赫兹场，为紧凑型光谱技术提供了新范式，其中槽波导结构因能将电场局域于低折射率区域，在提升样品相互作用灵敏度方面展现出独特潜力。

然而，当前波导增强型太赫兹光谱技术仍面临核心瓶颈：一方面，等离子体结构虽能增强场强，但受限于窄带共振特性，难以覆盖宽频谱分析需求；另一方面，传统混合波导对低折射率样品的耦合效率不足，且太赫兹时域光谱需精确测量样品厚度，制约了小体积或不规则样品的表征精度。此外，LiNbO₃材料本身的高折射率导致其波导模式与表面样品的相互作用较弱，如何在宽频段内实现太赫兹场的高效局域与样品响应的精准提取，仍是未解决的关键问题。

创新研究

研究团队创新性地设计了基于LiNbO₃的槽波导结构用于太赫兹吸收光谱测量（如图1结构示意）。通过利用电磁场边界条件中电位移矢量的连续性，使太赫兹电场在低折射率槽区产生增强效应，实现了太赫兹场与槽内样品的高效耦合。实验中该结构在0.3-0.6 THz频段的槽区能量填充率达50%，成功探测到-乳糖水合物在0.53 THz的特征吸收峰，突破了传统LiNbO₃波导与低折射率样品耦合效率低的局限，为宽频太赫兹光谱分析提供了高灵敏度平台。

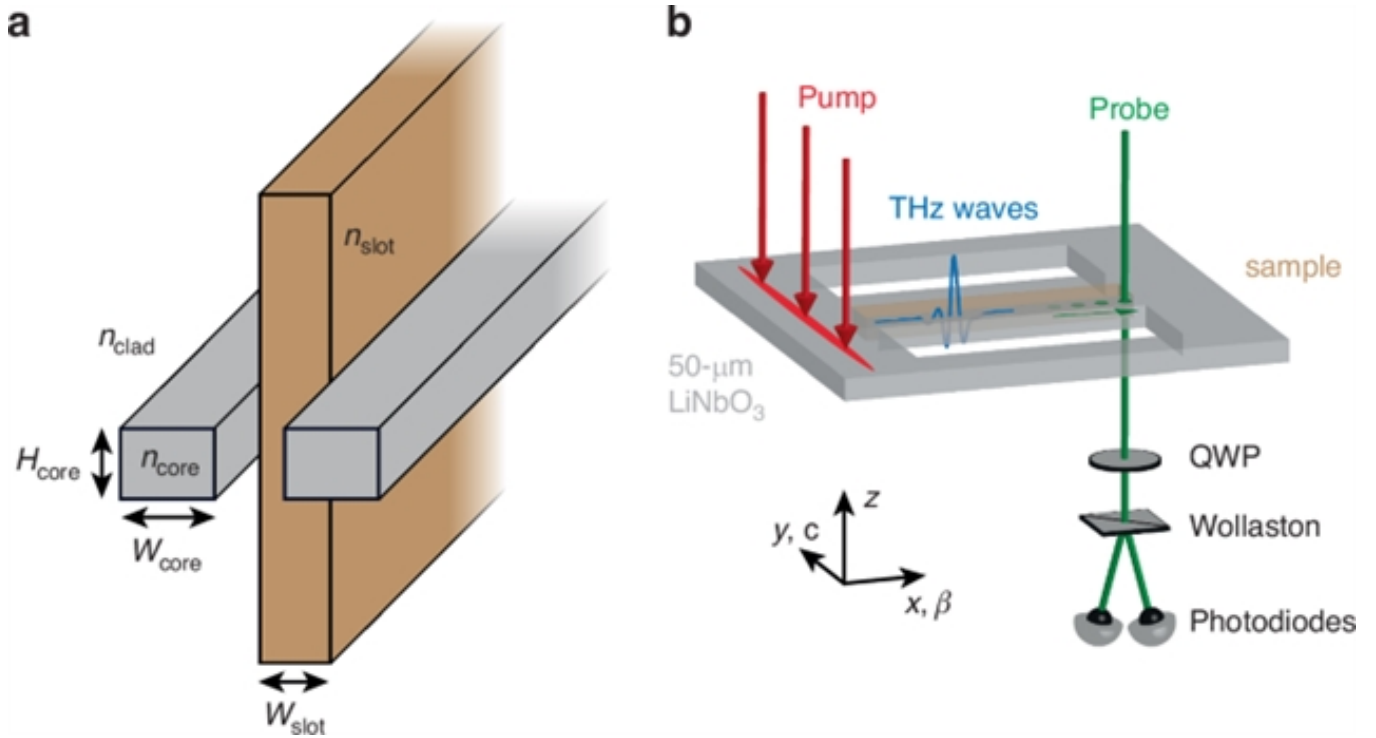


图1：槽波导结构示意图和实验装置示意图。

研究团队还实现了太赫兹产生、传播与探测的波导内一体化集成（如图2实验系统示意）。通过光学整流在LiNbO₃波导内直接生成太赫兹波，利用电光采样技术在波导中完成场强探测，整个过程无需外部太赫兹光学元件。该设计使系统体积大幅缩减，且能在极端环境中工作，同时通过平移台扫描实现太赫兹场的空间分辨测量，为原位、动态的太赫兹光谱分析提供了全新范式，拓展了太赫兹技术在特殊环境下的应用边界。

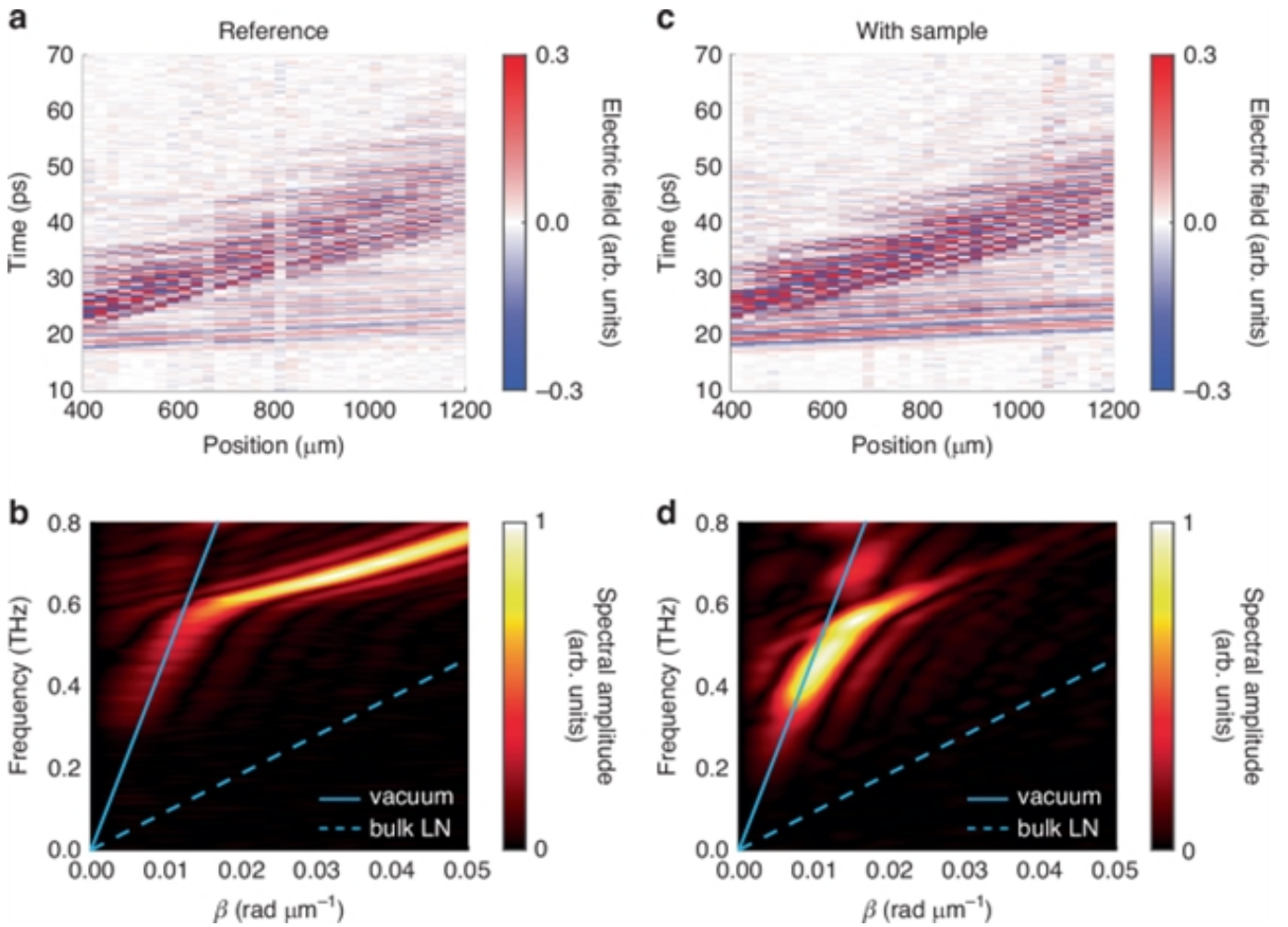


图2：太赫兹场通过槽波导的传播。

在理论分析与数据处理方面，研究人员建立了基于微扰理论的吸收系数提取方法（如图3）。通过将样品吸收视为介电常数的虚部扰动，推导出场强衰减与样品体吸收系数的定量关系，无需精确测量样品厚度即可实现光谱反演。实验中计算得到的乳糖体吸收系数与文献值高度吻合，验证了该方法在复杂波导环境下的准确性，解决了传统太赫兹时域光谱对样品形态的严苛依赖问题。

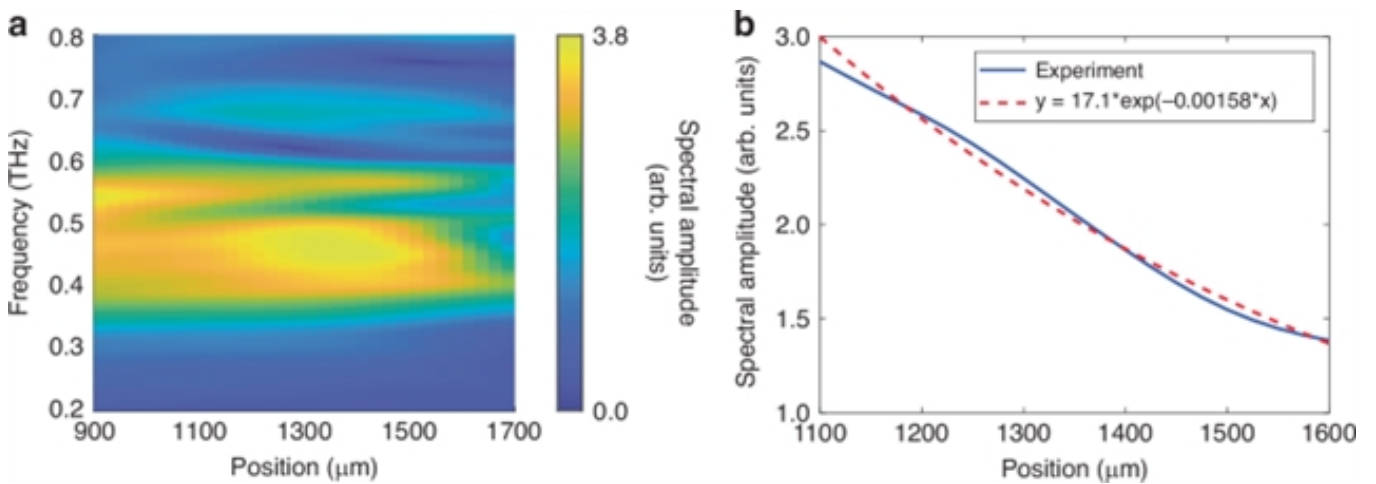


图3：插入乳糖到槽波导的光谱演变。

总结与展望

本研究开创性地将LiNbO₃槽波导结构应用于太赫兹吸收光谱技术，通过电场局域增强效应实现了太赫兹场与低折射率样品的高效耦合，结合微扰理论建立了波导内样品吸收系数的定量提取方法。通过波导内太赫兹的产生、传播与探测一体化集成，显著突破了传统太赫兹系统对bulky光学元件的依赖，以及对样品厚度的严苛要求，为紧凑型、高灵敏度太赫兹光谱分析提供了全新解决方案。

展望未来，可通过优化LiNbO₃薄片厚度或减小条带宽度拓展有效光谱带宽，结合高阶槽波导模式分析进一步提升高频段响应；引入光子晶体慢光结构可增强场-物质相互作用，提升检测灵敏度至痕量分析水平。该技术在极端环境原位检测、微型化化学传感器及生物分子动态监测等领域的应用潜力巨大，后续研究可聚焦于非线性光谱拓展与多参数同步表征，推动其从基础研究向实用化器件转化。（来源：LightScienceApplications微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41377-025-02105-4>

作者：Keith A. Nelson 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