空气激光赋能单光束相干拉曼测温

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：https://www.iikx.com/news/progress/31994.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！

空气激光赋能单光束相干拉曼测温。 导读

空气激光是以空气的主要成分或其衍生物为增益介质，以高能量飞秒激光诱导的低温等离子体通道为载体，通过无腔放大产生的相干辐射，具有高亮度、窄线宽、沿特定方向传输等优点。因此，自从空气激光被发现以来，其在大气遥感、同位素分析、燃烧诊断等领域的应用就引起了国内外研究者的极大关注。最近，中国科学院上海光机所强场激光物理国家重点实验室研究团队和代尔夫特理工大学等单位合作，利用空气激光独特的时频特性，发展了单光束、高帧频相干拉曼测温技术，在1
kHz帧频实现了单发次、单光束相干转动拉曼光谱测温，测量精度达到<2.3%的水平。

该成果以Single-Shot Single-Beam Coherent Raman Scattering Thermometry Based on Optically Induced Air Lasing为题发表在《Light: Science Applications》，上海光机所博士生陆旭为该论文第一作者，上海光机所姚金平研究员为通讯作者。

研究背景

燃烧场温度、组分和反应动力学的测量对于化石能源的清洁高效利用以及航天发动机、内燃机等先进动力系统设计和优化都具有重要意义。相干拉曼散射光谱技术具有非接触测量、空间分辨率高、测温准确等优点，因此在燃烧诊断领域备受青睐。现有的相干拉曼测温技术，通常需要对多束激光进行波长调谐和精密的时空控制。然而，高温高压燃烧场中往往存在严重的折射率梯度和湍流，容易引起光束偏折和相位失配，导致拉曼信号剧烈抖动甚至消失。因此，发展单光束、高帧频相干拉曼测温技术对于复杂燃烧环境的诊断具有重要意义。

研究内容

中国科学院上海光机所强场激光物理国家重点实验室研究团队自2011年在国际上率先报道强场电离诱导的空气激光现象以来[Phys. Rev. A 84, 051802(R) (2011)]，一直致力于空气激光的强场分子物理与远程探测应用研究，带动了国际上该领域的蓬勃发展。近期，该团队和代尔夫特理工大学等单位合作，利用空气激光，发展了一种单发次、单光束相干转动拉曼光谱测温技术，并在不同温度下展示了其千赫兹测温能力，测量精度小于2.3%。该技术利用了空气激光频谱窄、与泵浦光空间重叠而时频分离的独特特性，克服了高温、高压、高湍流极端环境中传统相干拉曼测温技术难以进行多光束时空精密控制的问题，在瞬态反应流和等离子体的快速诊断方面具有巨大的应用潜力。

图1展示了基于空气激光的单光束相干转动拉曼测温技术的基本原理。一束高能量飞秒激光泵浦氮气产生高亮度、窄线宽、与泵浦光同向传输的空气激光。当空气激光与飞秒泵浦光一起聚焦到测温区，飞秒激光将激发氧分子形成相干转动波包；由于空气激光光谱非常细锐，将其作为探针，能够分辨不同转动拉曼跃迁，从而形成由一系列转动特征峰构成的相干拉曼光谱。各转动拉曼峰的相对强度与转动态的粒子数分布密切相关，而初始转动布居取决于系统温度，因此通过测量转动拉曼光谱便可以获得温度信息。

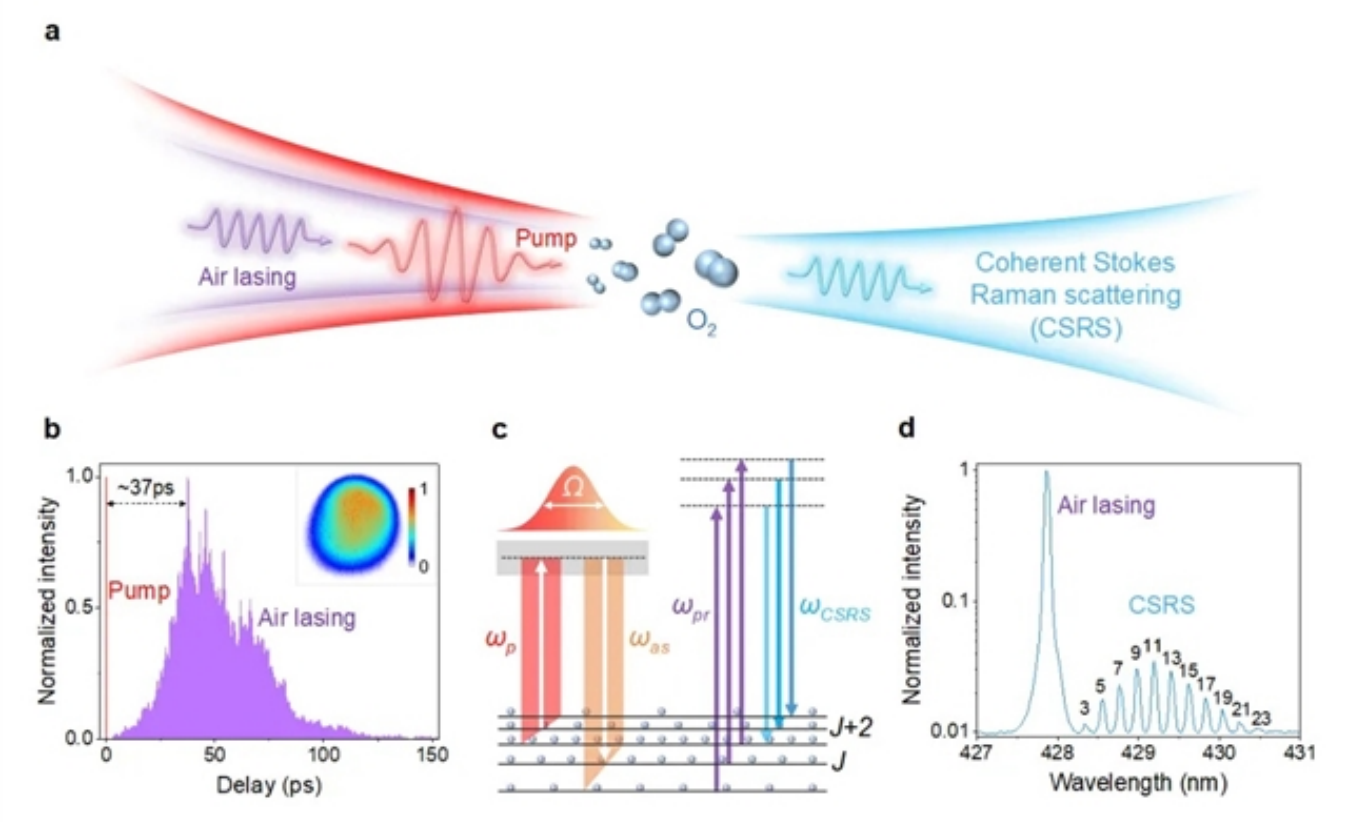


图1. 基于空气激光的单光束相干转动拉曼测温技术的基本原理

基于空气激光的单光束相干转动拉曼散射的跃迁过程和光谱分别如图1（c）和（d）所示。在这个过程中，空气激光是进行转动拉曼测温的重要探针。除了细锐的频谱，空气激光还具有独特的时空特性，如图1（b）所示。空间上，空气激光与泵浦光天然重叠，无需额外调节，抗抖动、抗湍流能力强。时间上，空气激光天然滞后于泵浦光，因此能够有效抑制非共振背景，获得高信噪比的相干拉曼信号。空气激光这些独特的时-频-
空特性，是实现单光束、千赫兹测温的重要基础。

研究者基于空气激光辅助的单光束相干拉曼测温技术，在不同温度的气体中进行了1 kHz帧频单发测量的实验演示。图2展示了不同温度下测量的相干转动拉曼光谱。根据相干转动拉曼散射理论模型对实验光谱进行拟合，便可以获得系统的温度参数。如图2所示，实验测量光谱与拟合光谱高度吻合，随着温度升高，转动拉曼信号覆盖的光谱区域逐渐增加，且最强拉曼峰向高转动拉曼跃迁移动。这是因为随着温度增加，粒子数分布在更多的转动能级，而且最大布居位于更高的转动态。

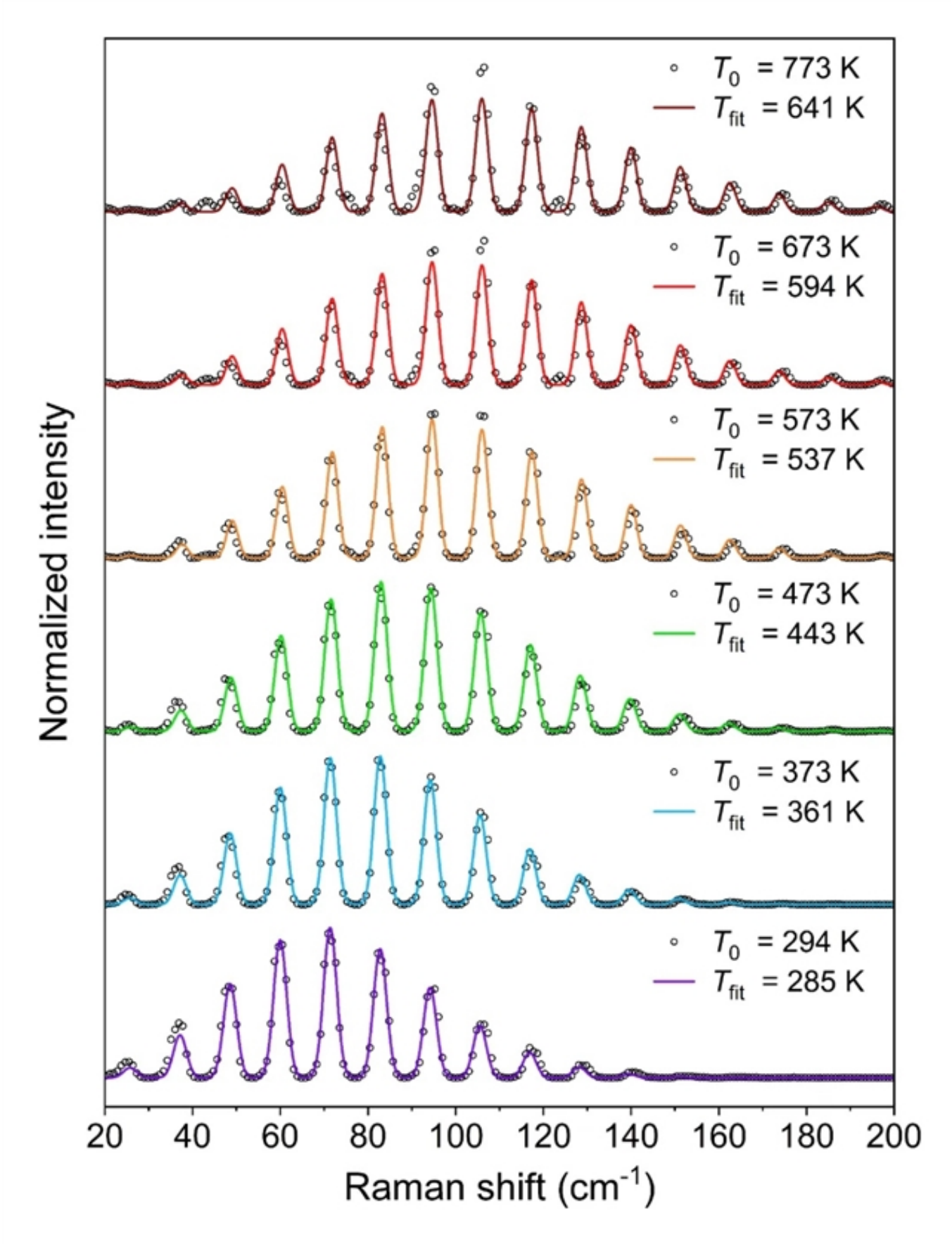


图2. 不同温度下测量的相干转动拉曼光谱（黑色圆圈）和最佳拟合光谱（实线）

在该工作中，研究者在1秒钟内连续采集了1000帧拉曼光谱，并对这些单次测量的光谱进行拟合，得到相应的最佳拟合温度。图3（a）和（b）展示了该单发次、单光束相干转动拉曼测温仪在室温（294 K）和高温（773 K）下的测量结果。从这些结果，不仅可以获得单次测量的精度和准确度，而且表明该技术具备以千赫兹帧频监控温度变化的能力。该测温仪在不同温度下的不准确度和精度如图3（c）所示。结果表明，在实验测量的气体温度范围内，其测量精度均小于2.3%，证实了单光束拉曼测温技术的高稳定性。然而，由于理论模型的简化等因素，测温的准确度有待进一步提高。

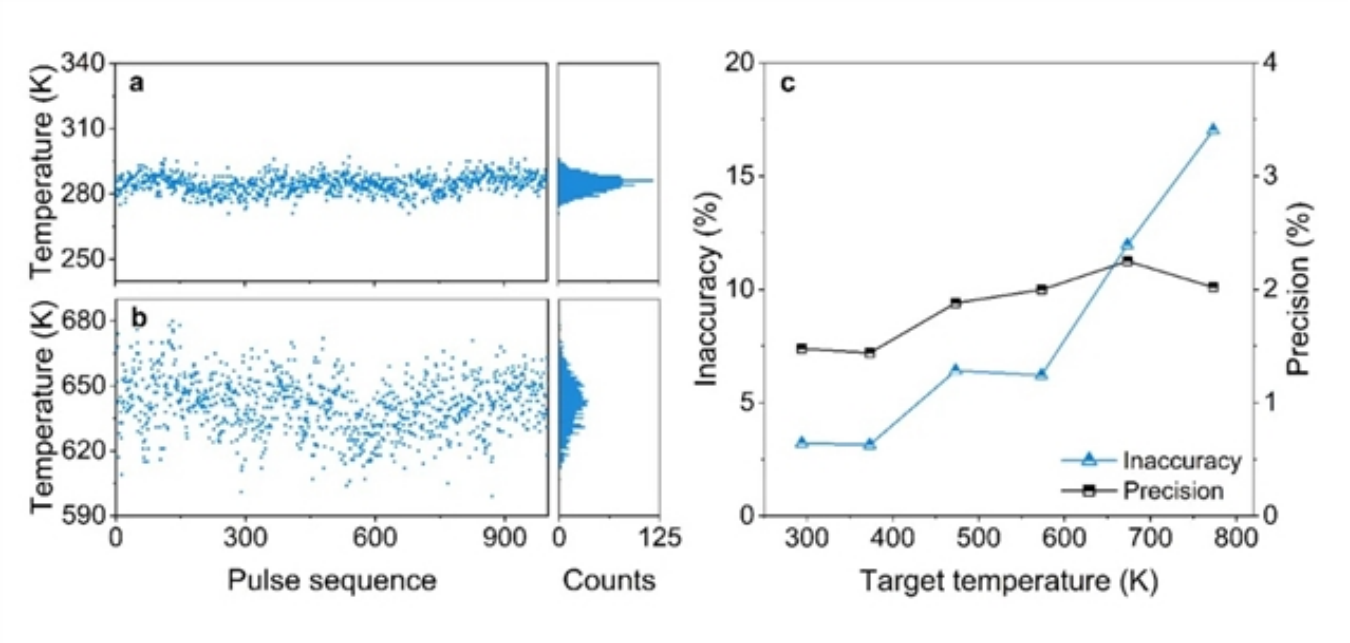


图3. 单发次、单光束相干转动拉曼测温仪在室温（294 K）和高温（773 K）条件下获得的1000帧单次测量结果及其在不同温度下测量的不准确度和精度

总结与展望

研究者利用超快强光场驱动的空气激光，发展了单光束、单发次相干拉曼测温技术，在不同温度气体中演示了其千赫兹测温能力，测量精度达到<2.3%的水平。该单光束、高帧频相干拉曼测温技术克服了传统相干拉曼测温技术中多光束时空精密控制的难题，为高温、高压、高湍流极端环境的燃烧诊断提供了一种简单有效的途径。（来源：LightScienceApplications微信公众号）

相关论文信息：https://doi.org/10.1038/s41377-024-01598-9

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等事宜，请与我们接洽。
作者：姚金平等 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转发