
超构表面赋能二维透明流场可视化

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/33452.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！

超构表面赋能二维透明流场可视化。导读

草木摇落而知风，水波不兴而测流。大自然的流动无处不在，却往往隐藏于无形之中。透明流场可视化技术在工程和科学应用中起着至关重要的作用，在非侵入条件下实现透明流场的高维可视化仍然是一项重大挑战。

近日，南京大学研究团队在这一领域取得了新进展。团队成员通过引入多功能超构表面，实现了实时全二维透明流场可视化成像。该成果发表在Light: Science Applications,题为Non-invasive and fully two-dimensional quantitative visualization of transparent flow fields enabled by photonic spin-decoupled metasurfaces。南京大学现代工程与应用科学学院徐挺教授、陆延青教授及电子科学与工程学院闫锋教授为该论文的通讯作者。

流场（包括液体和气体）通常是透明的，肉眼或传统相机无法看到。因此，透明流场可视化是许多科学和工程学科的关键技术，例如冲击波结构、燃烧室流动、风洞和边界层的研究。可视化流场不仅增强了人们对基本物理现象的理解，而且大大促进了效率工程系统的开发。

在流场信息的探测领域，研究者们已经开发出了各种技术来获取透明流场的信息。例如，探针法可为特定点的测量提供高时间分辨率；粒子图像测速（PIV）可有效跟踪流动模式并测量速度场；激光诱导荧光（LIF）能够对复杂的流动模式、湍流结构和化学反应进行可视化；传统的纹影技术可以通过光学方法获取一维流场信息；红外热成像可以非侵入性地探测温度，这对于研究流动表面的热效应非常有用。然而，尽管现有技术在透明流场的研究中各有独特优势，但它们也存在明显的局限性，例如具有侵入性、需要特定的示踪剂、依赖复杂的后处理算法或者仅呈现单一维度的信息等。

研究团队提出了一种非侵入式、实时的二维流场可视化方法。该方法通过引入多功能超构表面阵列，实现了仅需单次曝光即可获得透明流场的二维可视化图像，包含水平方向密度梯度和垂直方向密度梯度的流场信息（图1a）。在该设计中，超构表面需要承担两个关键功能：首先，超构表面充当空间滤波器的角色。对于左旋圆偏振（LCP）入射光，超构表面在水平方向上表现为阶跃函数，从而提取流场的水平维度信息；而对于右旋圆偏振（RCP）入射光，超构表面在垂直方向上进行空间滤波，以捕获流场的垂直维度信息。因此，该器件在两个正交维度上分别建立了偏振态与密度梯度矢量之间的映射关系。其次，该超构表面器件能够有效解耦流场在两个维度上的空间重叠信息。

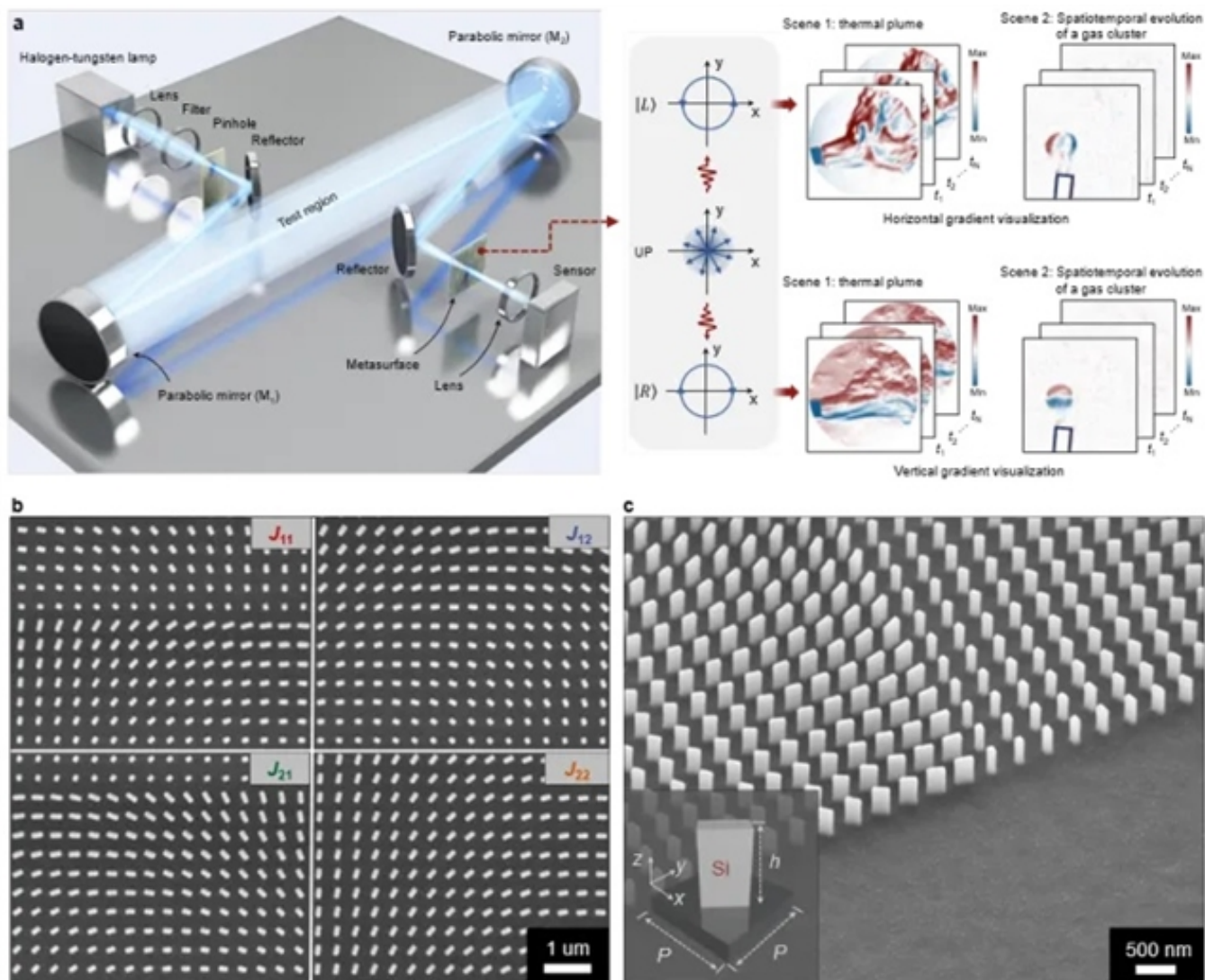


图1：基于超构表面的透明流场可视化示意图

根据超构表面需要完成的功能，研究团队充分利用纳米结构的设计自由度和灵活性，开发了一种由多个超构表面子阵列组成的光子器件(图1b)，每个子阵列均可用不同的琼斯矩阵描述。通过求解矩阵的本征值和本征矢量，可以获得纳米结构的具体设计。每个超构表面子阵列的功能均不同，它们的协同作用实现了传统光学技术难以企及的功能，即非侵入式、实时的全二维透明流场可视化。该技术不仅为流体物理研究提供了卓越的平台，还在工业设计和机器视觉领域展现出广泛的应用潜力。

作为概念验证，团队研究人员通过实验证明了所提出的可视化技术在不同场景中的应用潜力，包括温度场可视化（图2）、气体泄漏检测、多种流体物理现象的可视化（图3）以及透明固体的3D形态重建。在轴对称流场中，还可以使用Abel逆变换结合标准光度法，实现流场相关信息的定量计算，如温度、密度。另外，由于该系统可以实时地呈现二维流场图像，可以使用高速相机捕获流场的瞬态变化。图3e展示了以每秒500帧（FPS）速率记录的丁烷气团时空演化过程。

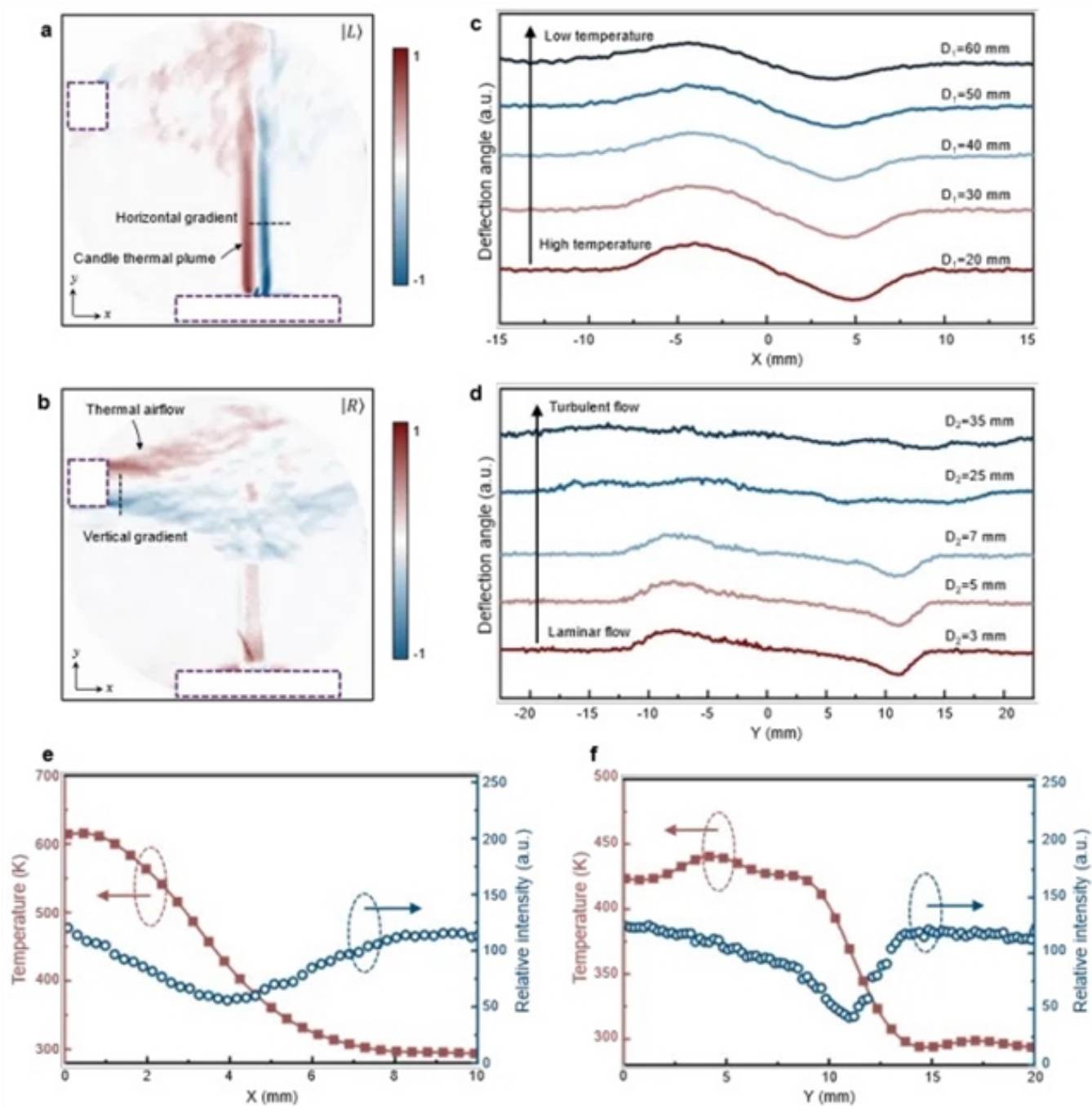


图2：温度场的可视化与定量分析

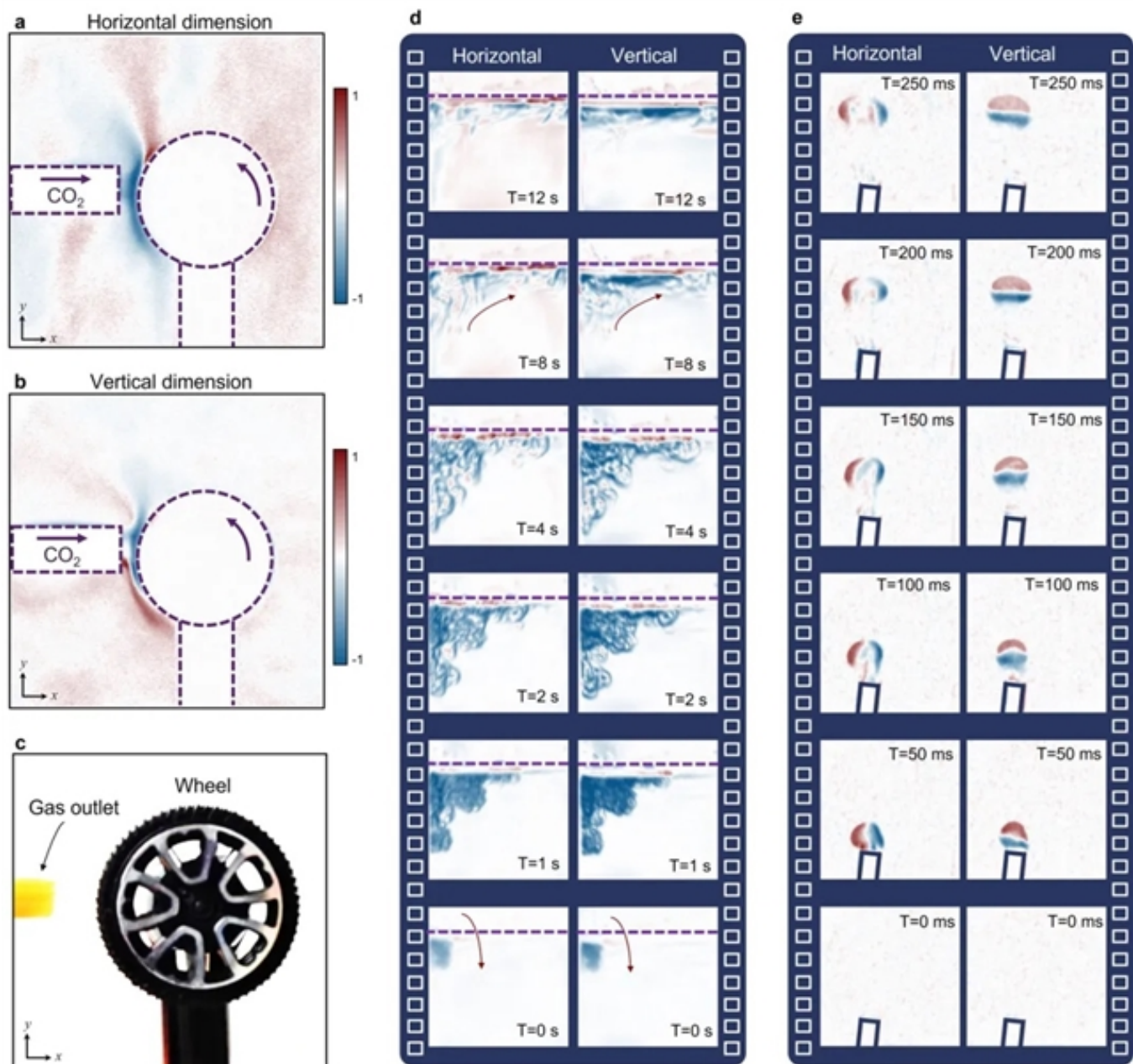


图3：多种流体物理现象的可视化,包括马格努斯效应、液体中的热对流现象以及丁烷气团的时空演化

在本研究中，研究人员利用多功能超构表面开发了一种非侵入式、实时的全二维透明流场可视化系统。该项技术可以在小规模实验环境中直接观察透明流体中的湍流、层流和涡流，从而加深对这些物理现象的理解。此外，该方法在工业设计和视觉检测领域也有望展现出广泛的应用潜力。（来源：中国光学微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41377-025-01793-2>

作者：徐挺等 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