
超透镜对焦点的多维度控制

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/31053.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！

超透镜对焦点的多维度控制。导读

近日，英国赫瑞瓦特大学陈献忠教授团队提出了一种可以实现焦点沿任意三维轨迹排列并可对焦点进行多维度控制的超透镜。该透镜设计采用了能同时控制单焦点相位轮廓、偏振和波长的多焦点超透镜模型，通过连续改变入射光束的波长，该透镜可以沿任意三维连续曲线产生具有预设偏振态的自定义焦点，为光学测量与成像带来全新的可能性。

相关成果以Multifaceted control of focal points along an arbitrary 3D curved trajectory为题发表在Light: Science Applications。

背景

光学透镜作为显微镜、望远镜等光学系统中不可或缺的关键元件，其设计通常依赖于传输相位的积累，这需要通过精准控制光学材料的表面几何形态来实现光线的精确折射。然而，这种传统的设计方法往往导致了透镜体积庞大，功能相对单一，难以与当前追求小型化和高度集成的技术趋势相适应。光学超表面技术已经在多功能超透镜的研发中大放异彩，实现了包括双极性、多焦点、偏振旋转焦点、自旋选择性、双模式与双波长超透镜、消色差超透镜和衍射极限聚焦等创新设计。这些先进的超透镜不仅功能丰富多样，更在光学性能和应用灵活性上展现了巨大的潜力，为现代光学系统的发展开辟了崭新道路。

此前，陈献忠教授团队便成功开发出一种超透镜，该透镜可在三维空间中重构以连续焦点组成的偏振拓扑结构；随后，该团队利用这种超透镜重构了多种不同构型的偏振拓扑结构，并可为不同的偏振拓扑结构编码不同的颜色（波长）信息。但是，这些偏振结构通常只能涉及一个或几个特定的波长。而在同一焦平面上，不同焦点可携带波长信息的数量限制则被打破，该团队使用一个超透镜对180个不同波长的焦点实现了精准操控，但是这些焦点需要在同一焦平面上进行观测且它们具有一致的偏振状态。

陈献忠教授团队在上述工作的基础上进一步提出了一个全新的概念：一个超透镜，它能够在任意三维曲线轨迹上实现对焦点的多维度控制。这意味着，每个焦点上的偏振态和波长可以根据需要进行定制，从而在三维空间中任意分布的焦点上实现偏振态和波长的精准控制。与以往的技术相比，这一设计不仅涵盖了更广泛的工作波长范围，还独立控制了这些焦点的偏振状态，大幅提升信息处理容量的同时，通过控制偏振和波长，还为实现小型化多功能设备铺平了道路。这种超透镜的独特性质预示它将在测量、检测、安全、显示和成像等领域有着广泛的应用前景。

介绍

该团队突破了以往焦点在同一观测平面且偏振状态相同的局限，成功设计了实现沿任意三维轨迹可多维度控制焦点排列的超透镜。该设计不仅结合了宽范围的工作波长，还可对每个焦点的偏振状态进行独立控制。通过连续改变入射光束的波长，超透镜可以沿任意三维连续曲线产生具有预先设计偏振态的自定义焦点。该超透镜示意图如图1所示，当线偏振入射光的波长连续变化时，超透镜生成的焦点位于定制的三维轨迹上（图1a），每个入射波长对应一个焦点，其偏振状态是通过设计相对于入射线偏振而存在的偏振旋转角来实现独立控制的。在501 ~ 700 nm范围内，以1 nm的步长连续改变入射波长，在透射侧生成预先设计好的具有定制偏振信息的三维连续曲线。该项研究选择了多种三维螺旋曲线进行了实验演示，包括：圆柱形螺线、锥形螺线和Pappus螺线（图1b）。该超透镜的设计涉及了多个控制变量，包括：螺线的纵向距离（ z ）、焦点间纵向间隔（ Δz ）、焦点数量（ N ）、各焦点的波长（ λ ）和偏振旋转角度（ Γ ）（图1c）。

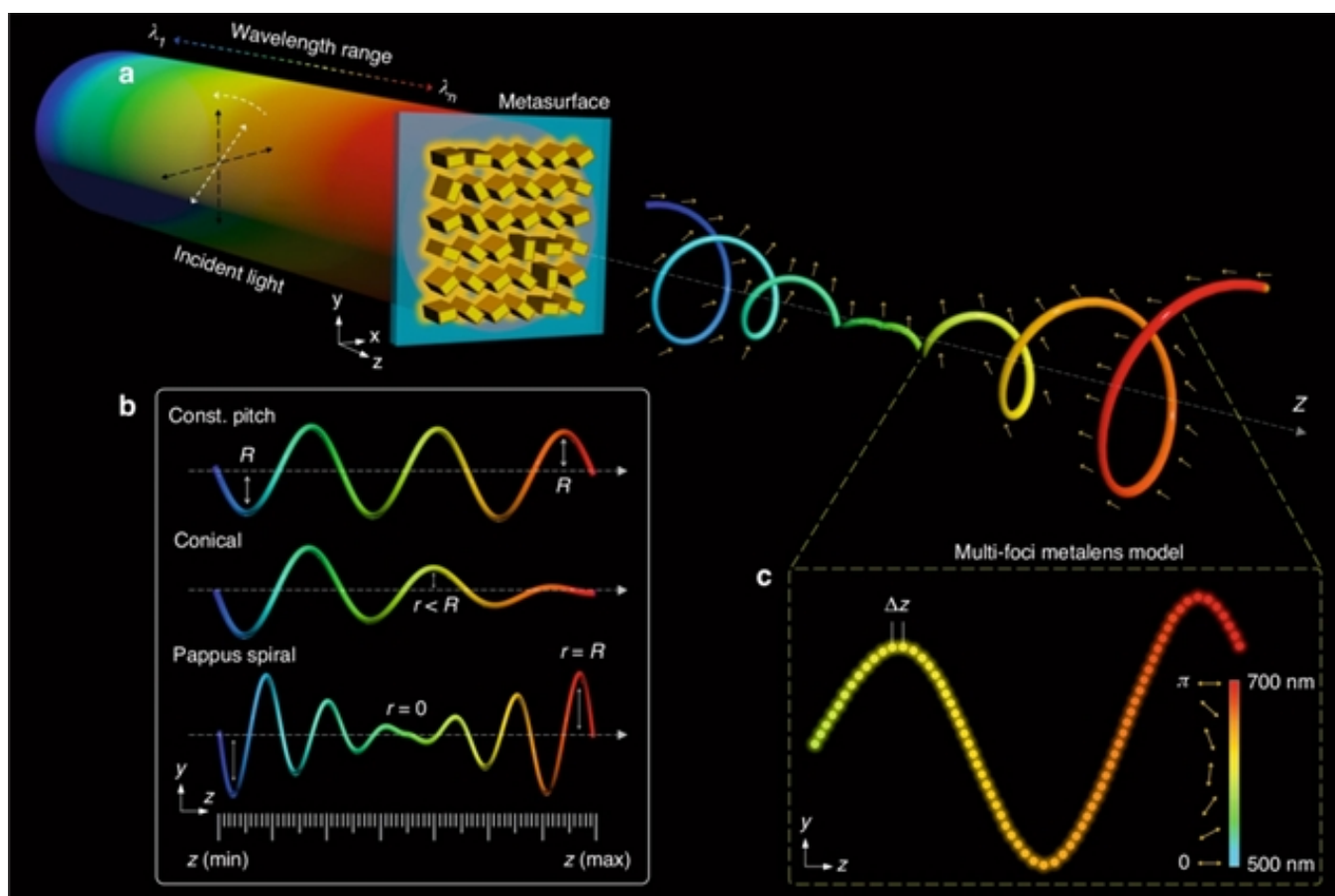


图1：沿任意三维曲线轨迹对焦多维度控制的超透镜示意图

图2展示了产生焦点排列在锥形螺旋路径上的超透镜示意图。超透镜的仿真和实验结果如图2c所示，通过控制入射波长和纵向观测平面，焦点可被精确映射到锥形螺旋的三维轨迹上，验证了所提出的超透镜能够轻松地将焦点映射到三维空间中复杂的连续轨迹上。在这项工作中，三维轨迹上焦点的聚焦效率、聚焦精度、焦点轮廓等焦点特性均被研究，焦点间距离、焦点个数、螺线的纵向距离以及超透镜孔径大小对焦点特性的影响和焦点之间的色散串扰也被详细讨论。

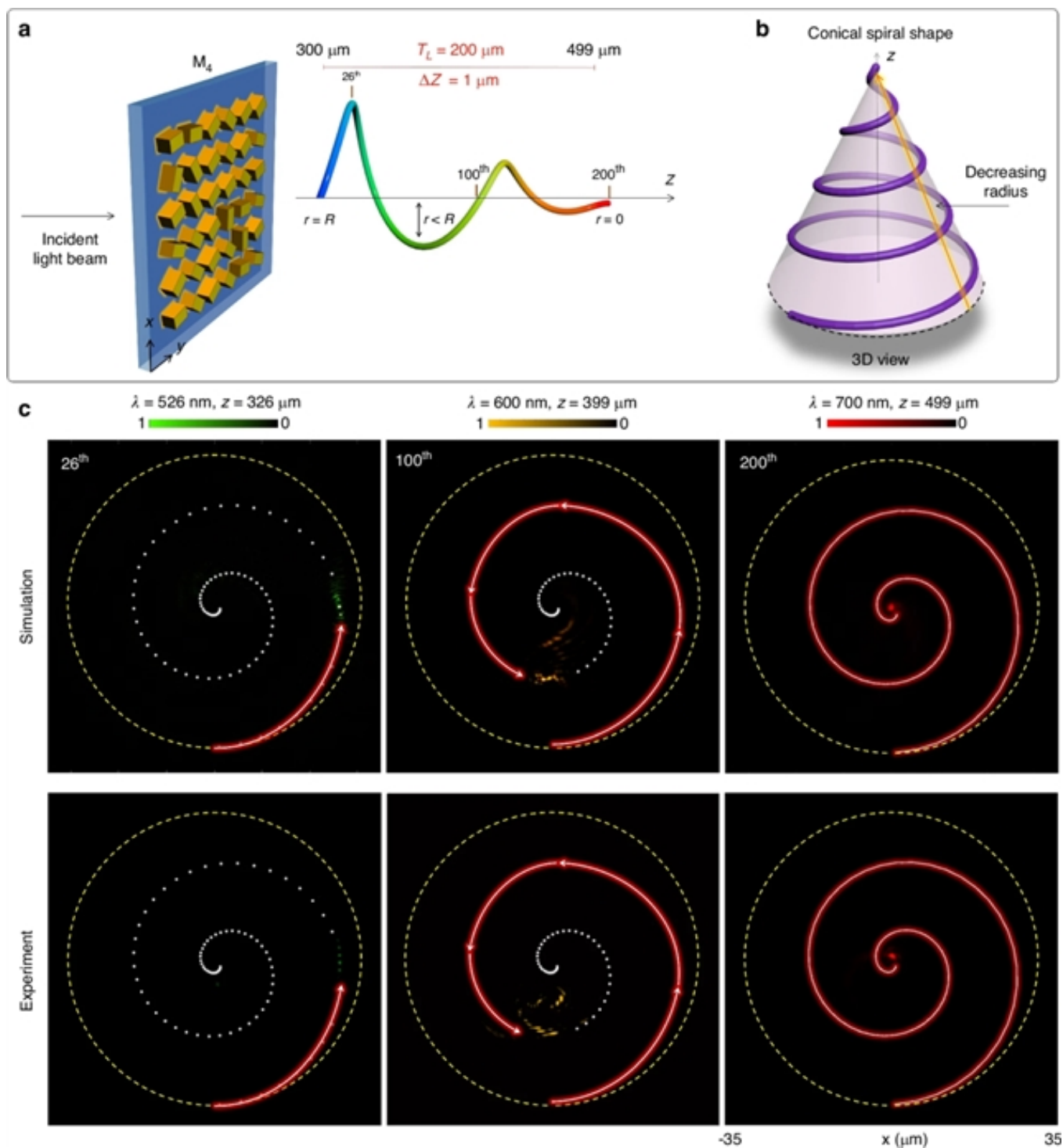


图2：连续三维锥形螺旋轨迹上产生多焦点的超透镜示意图与仿真和实验结果

此项工作利用超透镜实现对三维空间中多焦点的精准控制，并通过相位复用独立调控每个焦点的偏振和波长，并在实验中在不同的三维轨迹上演示了具有不同偏振轮廓不同波长焦点的生成，验证了所提出方法的有效性。该项技术在光学距离测量与波长检测领域应用潜力巨大，具备超越传统光学透镜的性能，能够实现精确的三维焦点定位以及波长和偏振信息的识别处理。例如，在Pappus螺线上，通过测量最大光强所在空间的任意坐标分量，其空间定位便可确定，对应的波长信息和偏振信息也可获得，可用于光谱识别或偏振信息的检测，相关结果如图3所示。同样，焦点

上所携带的不同波长和偏振态信息的组合也为表征、测量和检测提供了更多可行方案。这种超透镜紧凑的设计与独特功能使其在计量、成像、检测和安全等领域具有广泛的应用前景。（来源：中国光学微信公众号）

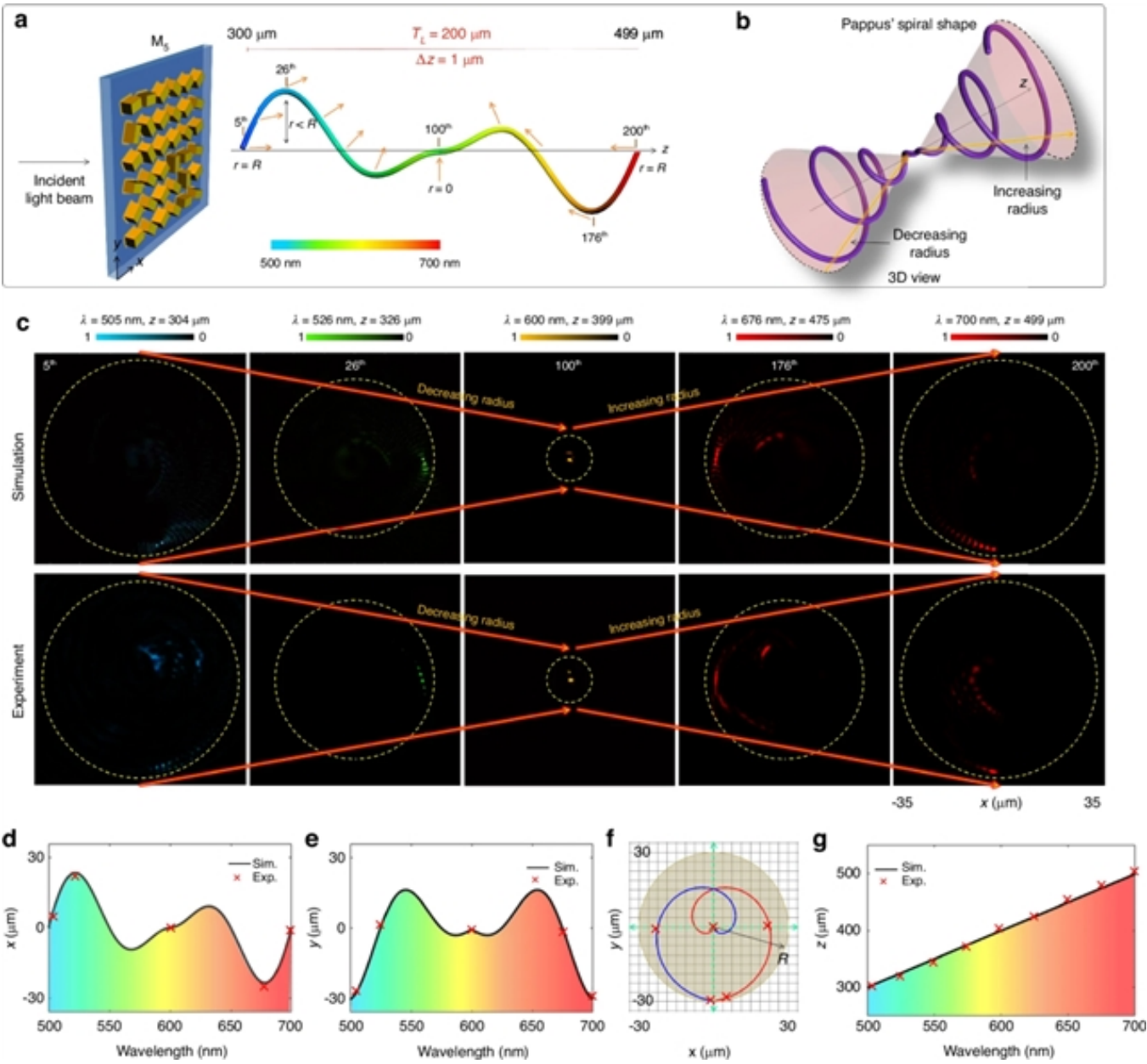


图3. 三维Pappus螺线上产生多焦点的超透镜示意图、仿真和实验结果、以及焦点波长与三维坐标关系可应用在光学距离测量与波长检测

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41377-024-01565-4>

作者：陈献忠等 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