超薄纠缠光源：量子成像新方案

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：https://www.iikx.com/news/progress/31973.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！

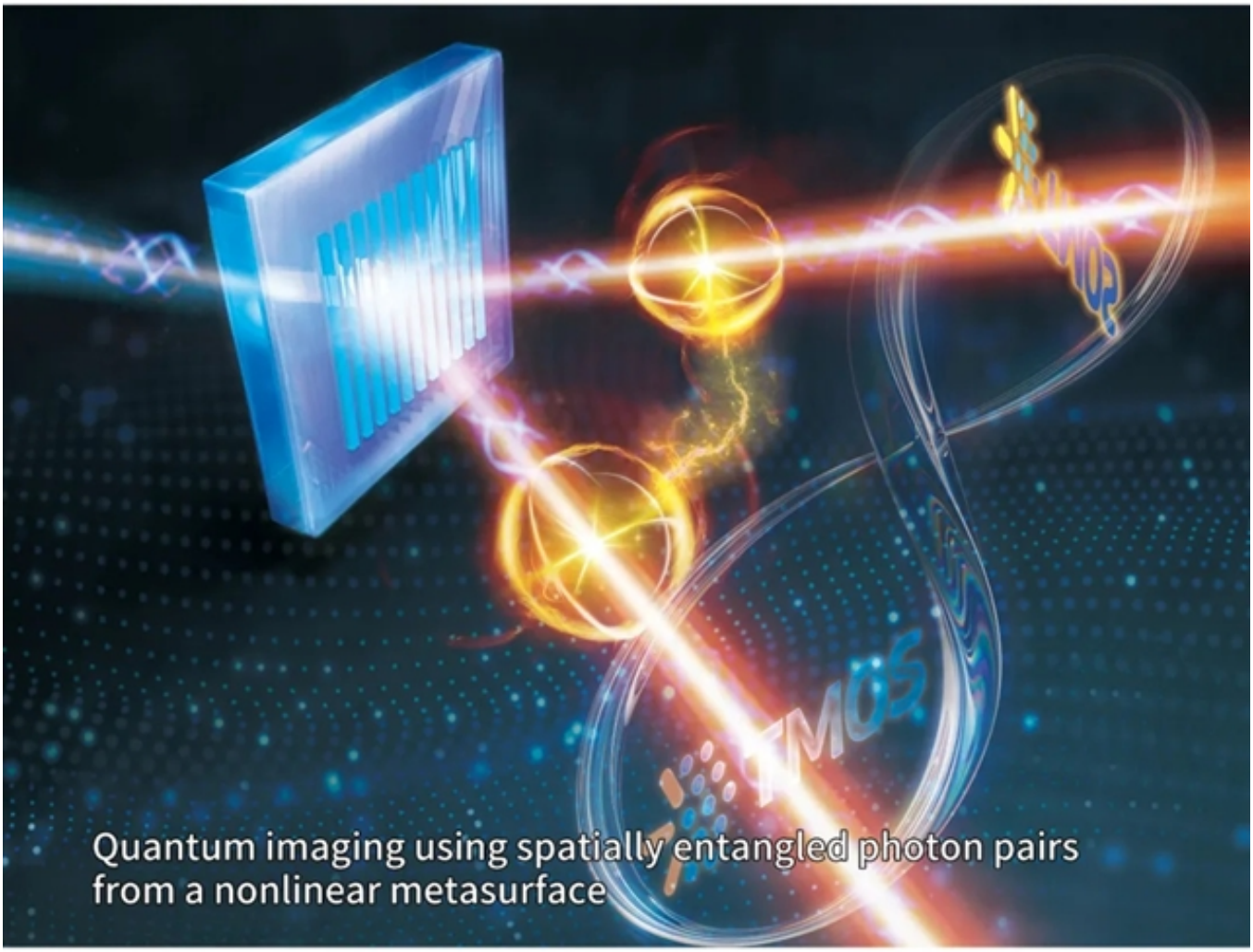
超薄纠缠光源：量子成像新方案。

爱科学
iikx.com

ISSN 2662-8643(online) CN 22-1427 / O4 ISSN 2097-1710(print)

eLight

Feb 2025 · Volume 5 · Issue 5 elight.springeropen.com



ISSN 2097-1710

Light | Publishing Group

SPRINGER NATURE

导读

近日，澳大利亚国立大学（ANU）Andrey Sukhorukov教授团队在eLight（两期卓越计划入选期刊）发表题为Quantum Imaging Using Spatially Entangled Photon Pairs from a Nonlinear Metasurface的高水平论文。团队通过纳米尺寸厚度非线性超表面产生空间纠缠光子对，并结合全光扫描与量子鬼成像技术，成功实现了一种紧凑、高效的新型量子成像系统。这项研究进一步预测了超表面量子成像在分辨率、灵敏度及系统集成上的显著优势，有望为量子通信、动态目标追踪和高精度光学传感等领域提供了革命性的技术支持。

研究背景

量子成像技术作为量子光学和量子信息领域的前沿方向，因其在突破传统光学分辨率极限以及实现高精度测量中的独特优势，受到广泛关注。这项技术利用光子之间的量子纠缠或关联特性，能够在低光强条件下生成清晰图像，为安全通信、遥感探测和光学传感等领域提供了全新的解决方案。然而，尽管其理论和实验基础已逐步成熟，量子成像技术在实际应用中仍面临多重挑战。

传统量子成像系统多依赖体积庞大的非线性晶体来产生所需的纠缠光子对，需复杂的相位匹配条件来保证光子对产生效率。此类系统不仅笨重，且视场狭窄、分辨率有限。同时，该方法通常依赖机械扫描装置扩展成像范围，这增加了硬件复杂性，限制了动态成像和实时检测的稳定性、速度与灵活性。此外，许多实验方案成本高、效率低、操作复杂，限制了量子成像的大范围推广。因此，设计一种紧凑、轻便且兼具高效率和高分辨率的量子成像系统成为该领域亟待解决的重要课题。

基于这些背景，澳大利亚国立大学（ANU）和墨尔本大学（UoM）的研究团队开展了一项具有里程碑意义的研究工作。他们利用超薄非线性超表面，成功开发并实验证明出一种新型量子成像方案，突破了传统技术的诸多限制。这种方案不仅体积小巧、结构高度集成，而且通过结合鬼成像和全光扫描技术，在提升成像性能的同时显著简化了硬件设计。此外，他们理论证明了该方案能够在分辨率、视场范围和硬件需求等方面均大幅优于现有技术，为量子成像技术的实际应用开辟了全新道路。

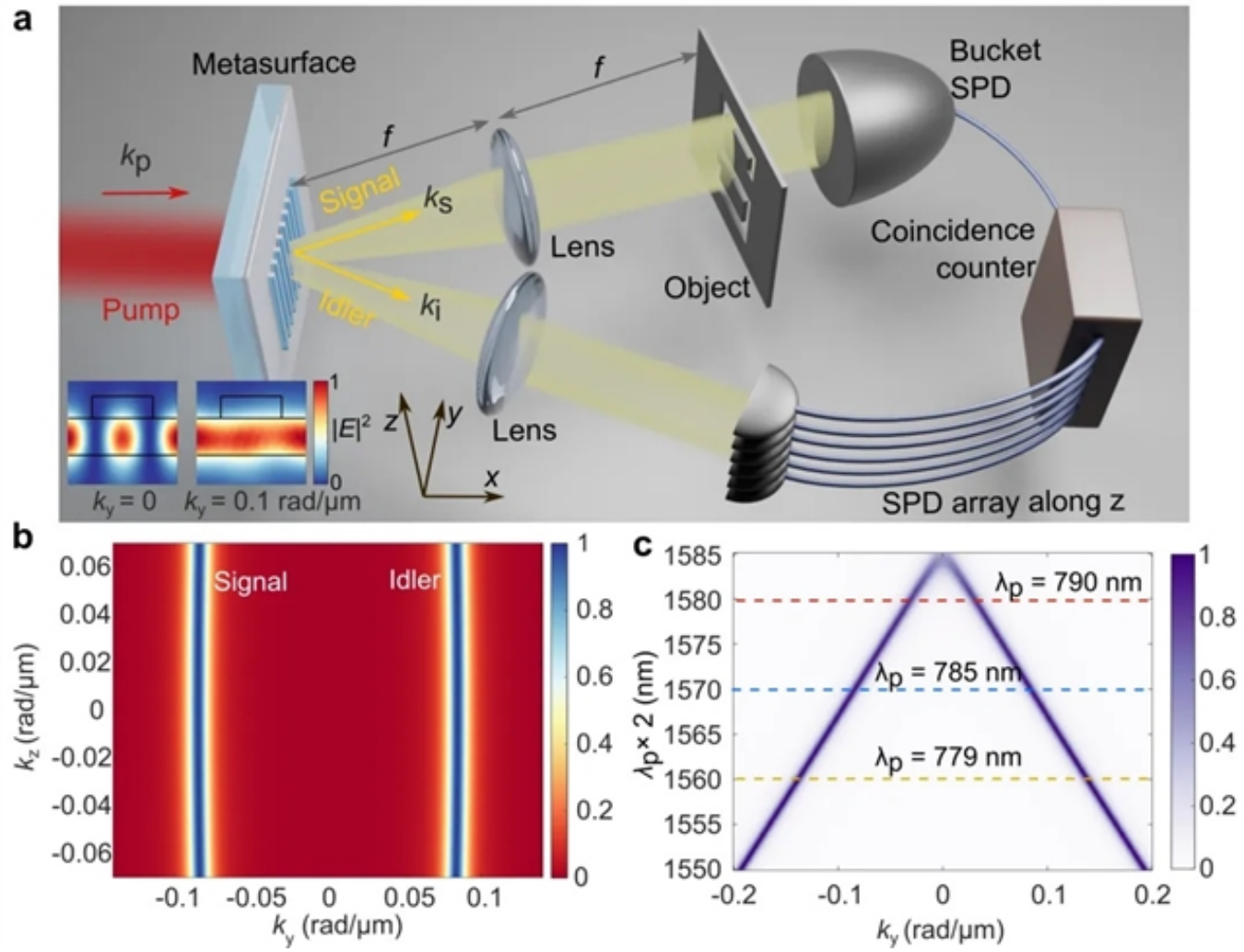


图1. a.结合全光调控和鬼成像的新型量子成像方案。b.超表面产生光子对在k-空间的分布。c.光子对出射方向可以通过调节泵浦光的波长进行调控，用于实现全光扫描成像。

高效的超表面设计

研究团队开发了一种基于亚波长尺度的新型非线性超表面，其核心由二氧化硅光栅和锂铌酸薄膜构成。这种超表面在薄膜内部产生了光学共振，不仅实现了高效的纠缠光子对生成，还兼具体积小巧和结构灵活的特点。相比传统非线性晶体需要满足严格的相位匹配条件，超表面的设计摆脱了这些限制，大幅度提升了光子对产生的空间模式和效率。

更为重要的是，超表面设计支持光子发射角的全光学调控。这是通过调节泵浦光的波长实现的，而无需使用机械装置。实验结果显示，所产生的光子对在水平方向上具备高精度光学扫描能力，垂直方向则能保持大角度范围内的反向空间关联特性。这种设计不仅提高了成像速度和精度，还有效减少了硬件复杂性，为动态成像应用提供了全新的解决方案。

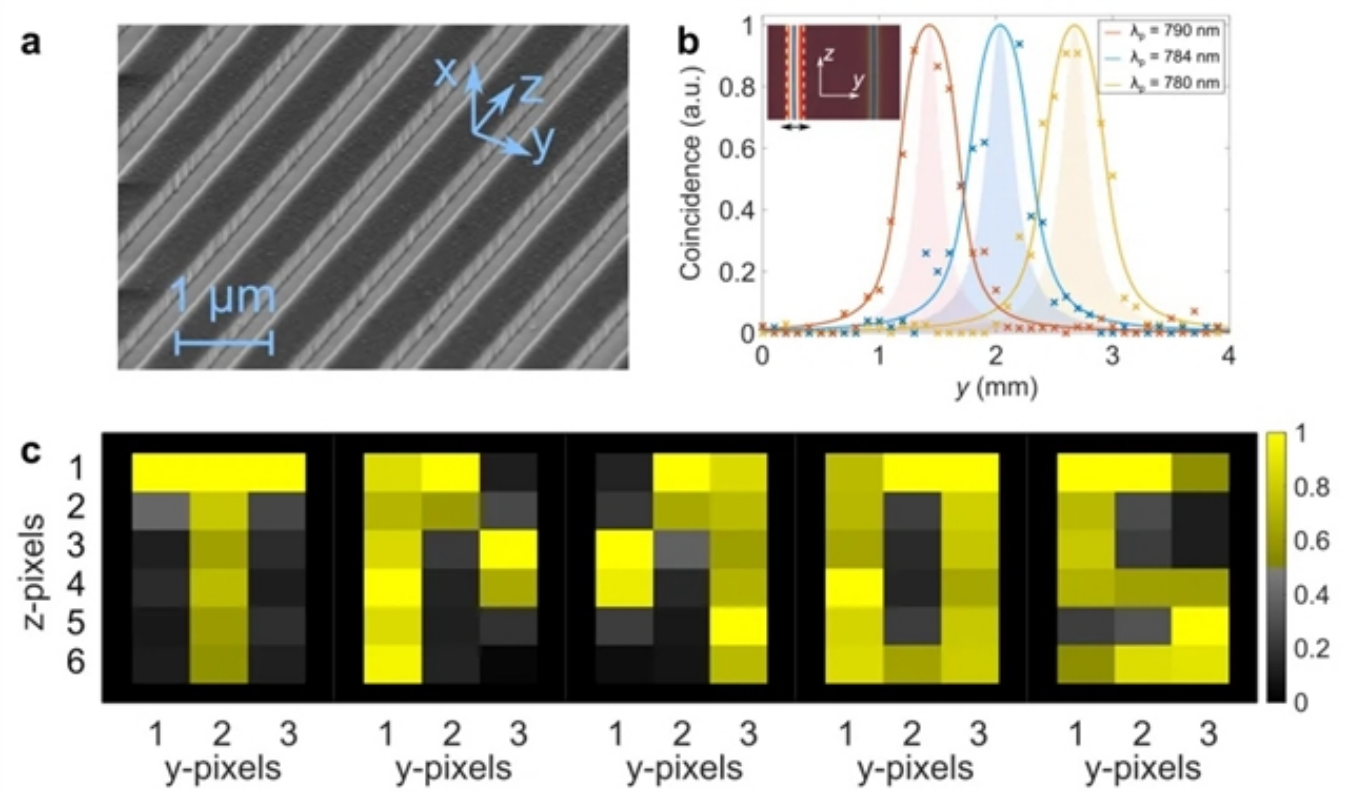


图2. a.超表面扫描电子显微镜图像。b.不同泵浦光波长下双光子的出射方向。c.新型量子成像的实验证明。在y方向进行全光扫描成像，而z方向则进行量子鬼成像。

鬼成像与全光学调控结合

基于超表面的光学调控特性，研究团队结合鬼成像技术，构建了一个简化而高效的成像系统。鬼成像是一种利用关联光子对来重建图像的方法，其中记录目标物体的光学信息的信号光子由单个像素点的桶探测器收集，而闲频光子则被相机（即探测器阵列）直接探测。单个光子无法获取图像信息，但通过光子对之间的空间关联可以重构完整的图像。这种方法的优势在于可以在目标物体路径中使用简单的桶探测器，从而显著降低硬件需求。

在实验中，团队仅通过一维探测器阵列和一个桶探测器成功复原了二维物体的图像。这种设计消除了传统二维探测器阵列的需求，使系统更加轻便且经济高效。团队进一步在理论上证明，基于超表面的成像系统同时实现了更广的视场范围和更高的成像分辨率，从而在分辨率单元数量上比传统的鬼成像系统高出四个数量级。这得益于超表面摆脱了传统晶体中光场相位匹配的限制，这极大的扩大了光子对的出射方向。而且，大孔径的超表面可以用于显著提高光子对的空间分别率。

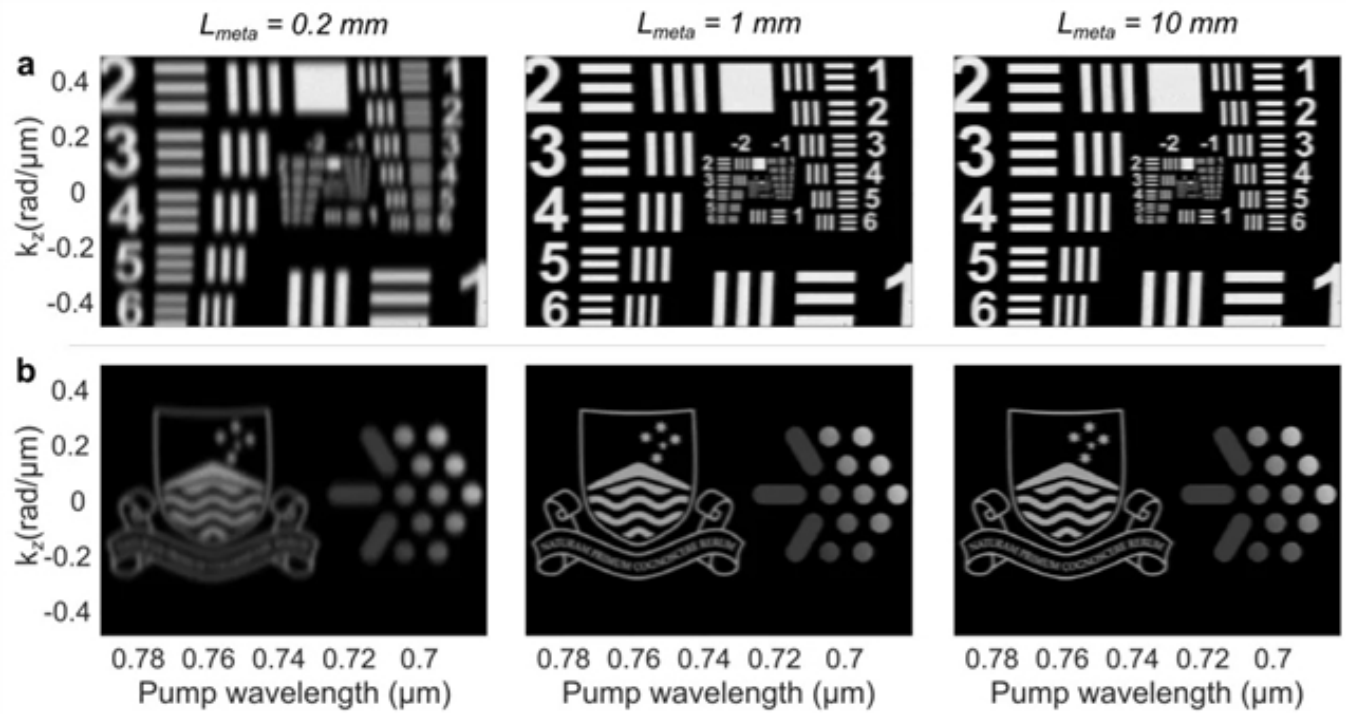


图3：不同超表面大小的新型量子成像。预测了更广的视场范围和更高的成像分辨率，在分辨率单元数量上比传统的量子鬼成像系统高出四个数量级。

应用与展望

基于超薄非线性超表面的量子成像技术展现出了广泛的应用潜力。其紧凑设计和高可调性非常适合自由空间量子通信、动态目标追踪和量子LiDAR等场景。例如，在量子LiDAR技术中，超表面的高分辨率与超快成像能力能够显著提升动态物体的探测效率。此外，这项技术还为下一代量子传感器和集成光子学器件的开发提供了新的思路。（来源：中国光学微信公众号）

相关论文信息：https://doi.org/10.1186/s43593-024-00080-8

作者：Andrey Sukhorukov 来源：eLight

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