
多维复用几何相位超表面全息术

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/36427.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！

多维复用几何相位超表面全息术。

ISSN 2831-4093(online)

ISSN 2689-9620(print)

Light | Advanced Manufacturing

2025 · Volume6 · Issue3

光：先进制造



light-am.com

Multidimensional multiplexing geometric phase
metaholography



LIGHT PUBLISHING GROUP

导读

近期，华中科技大学王健、曾进炜团队在Light: Advanced Manufacturing发表了题为Multidimensional multiplexing geometric phase metaholography的研究论文，该篇文章被选为封面文章。

该研究提出并实验验证了一种基于全维度调控超表面的多维复用超表面全息术方案，旨在突破传统全息技术在信息复用维度和光调控能力方面的瓶颈。该策略利用几何相位结合同步任务原理，能够在宽光谱范围内实现对空间光场振幅、相位和偏振态的同时、独立且任意的调控。基于该设计，研究团队成功构建了具备多维信息复用能力的超表面器件，可在不同的入射和出射条件下生成具有特定图案、偏振和传播方向的全息图像。与传统单维复用的全息器件相比，该工作不仅显著提升了信息集成的精度、容量和抗串扰能力，同时展现出优异的能量均匀性，有望为复杂多维光信息传输、防伪识别及信息加密等方向提供新型集成光电子解决方案。

计算全息（Computer-generated holography, CGH）为记录和重建光波场信息提供了高效便捷的手段。近年来，纳米光子学的兴起带来了新的实现方案，基于二维纳米结构阵列的光学超表面可以对光场进行精确调控，具备优异的灵活性、分辨率和器件紧凑性，广泛应用于虚拟现实、数据存储和人工智能等前沿领域。

随着现代光学器件对大容量、小型化、多功能和信息安全的持续追求，单通道全息成像的超表面已难以满足需求。相较而言，多路复用超表面全息技术可在同一器件中同时重建多个独立图像，显著提升信息集成度和保密性，成为研究热点。现有多维复用方案主要基于少数光学正交维度（如波长、线动量、轨道角动量、偏振等）进行信息载体设计，尽管取得一定进展，但其在通道容量、串扰抑制和能量均匀性等关键性能上仍受限。

此外，当前多维复用通常采用相位调控或相位-偏振联合调控的超表面，难以实现对空间光场复振幅的完整构建，导致通道间存在非线性交叠和明显串扰，同时受限于较窄的工作带宽和较低的加工容差。因此，亟需突破传统设计范式，发展具备全维度光场调控能力的多维复用超表面全息策略，以实现更高容量、更低串扰和更强鲁棒性的光信息处理平台。

该研究提出了一种全新的多维复用超表面全息方案，核心在于构建基于全维度调控几何相位超表面并结合同步任务原理的信息高容量复用架构。通过引入对空间光场振幅、相位与偏振态的同时独立调控，该设计大幅拓展了信息通道数与系统复用能力，为高密度光信息处理提供了新的解决路径。图1展示了该方案的基本工作原理：研究团队预先设计出具备全光场调控能力的几何相位超表面，能够在不同的入射/出射偏振态及传播方向等特定读取条件下，选择性地重建多个全息图像。实验中，该超表面成功生成了6个对应不同通道的字母图案（H, S, A, B, U, T），充分验证了并行信息解复用能力。

尽管图示采用了简化模型以增强可视性，该设计的底层原理具有极强的可扩展性。理论上，该系统可拓展至支持更丰富的输入/输出条件组合，并引入更多正交物理维度（如波长、轨道角动量、入射角度等）作为复用通道，从而构建出高度复杂的多维超全息信息处理平台。值得一提的是，所采用的纯几何相位全调控超表面具有色散无关特性，在理论与设计层面具备宽带光谱响应潜力。相关宽谱性能将在后续实验中进一步加以验证。这一策略为构建高通量、低串扰、可扩展的多维光学信息系统提供了坚实的技术基础。

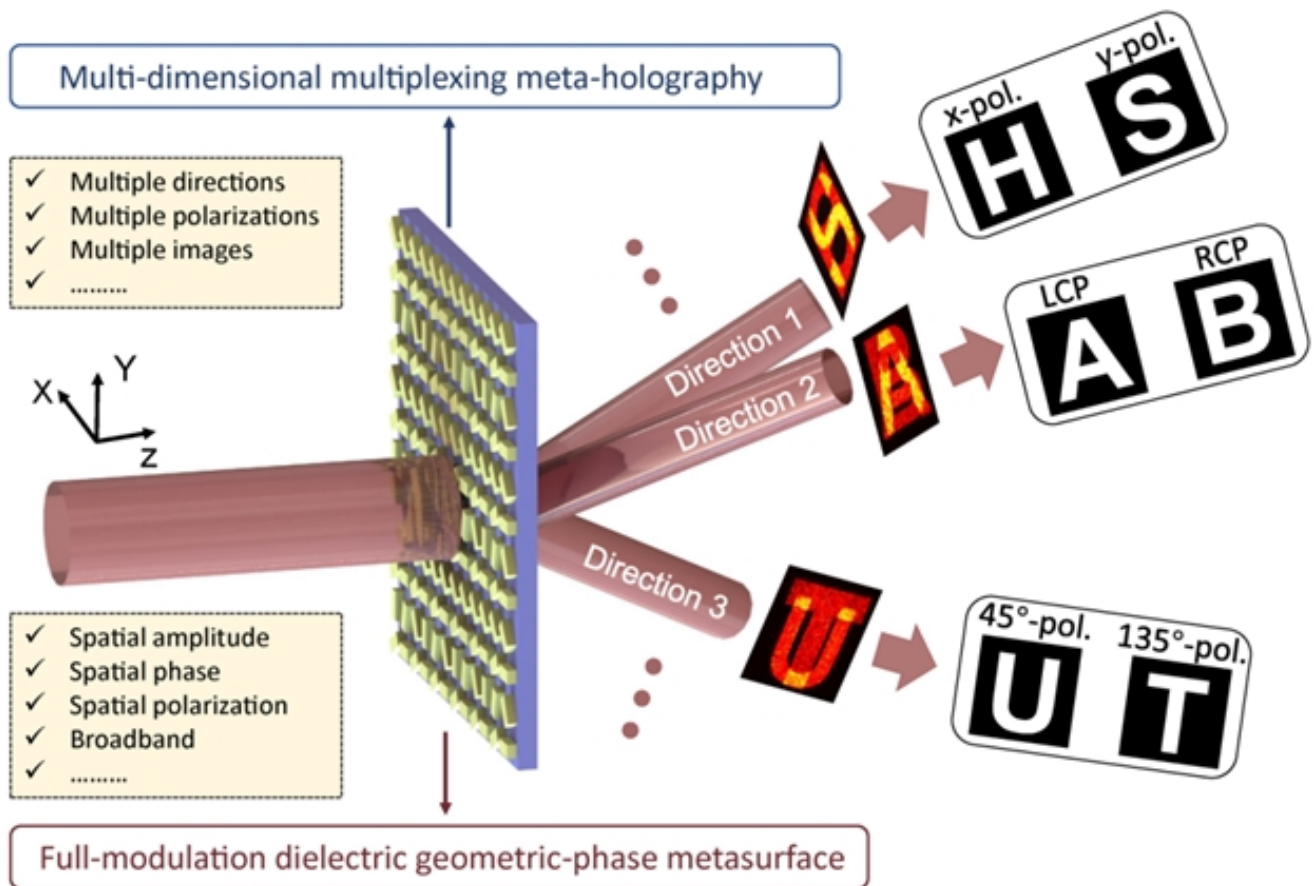
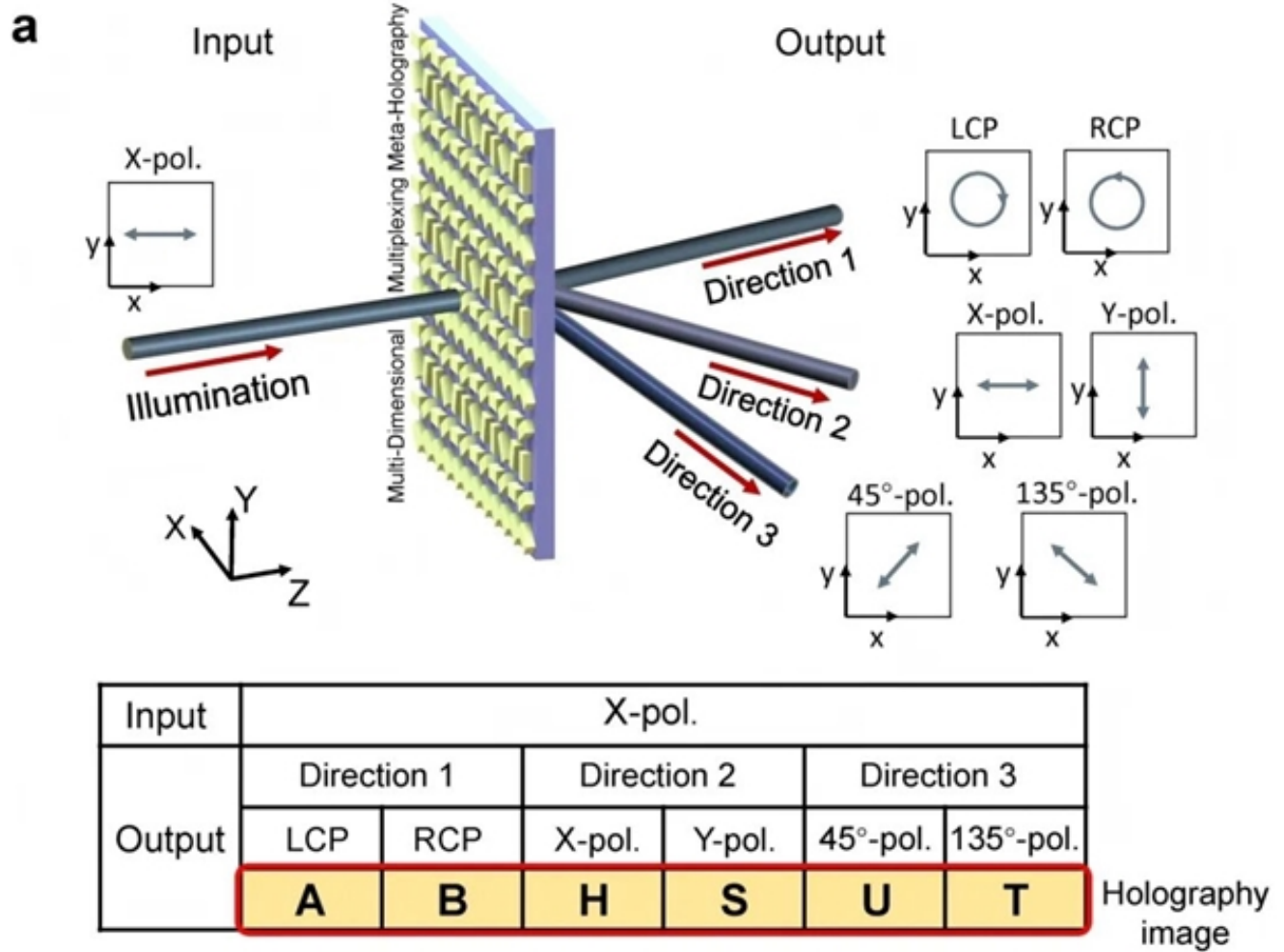


图1：基于全维度调控几何相位超表面的多维全息复用的设计概念图

研究团队首先展示了固定输入、可变输出（Fixed Input Varied Output, FIVO）模式的工作原理，如图2a所示。在这一模式下，入射光束设定为固定参数——即x线偏振并垂直照射于超表面，而输出端则根据不同的传播方向与偏振条件，实现多个独立通道的全息图像重建。这种策略模拟了光学并行广播场景，具有在同一入射条件下向多个用户同时传递不同信息的潜力，展示出在多通道通信等应用中的重要价值。

图2b进一步实验验证了该模式的可行性。在方向1，通过左/右圆偏振（LCP/RCP）分别重建出字母A和B；在方向2，采用x线偏振与y线偏振则可生成H和S；而在方向3，以45°与135°线偏振分别呈现出字母U和T。这些符号图像在不同方向和偏振状态下清晰成像，表明信息通道之间具备良好的分离性。更为重要的是，该FIVO模式在488 nm、532 nm和633 nm三种典型波长下均表现出一致的全息成像效果，验证了几何相位超表面的宽光谱响应特性，充分印证了其在实际多维光学系统中稳定、高效运行的能力。



b

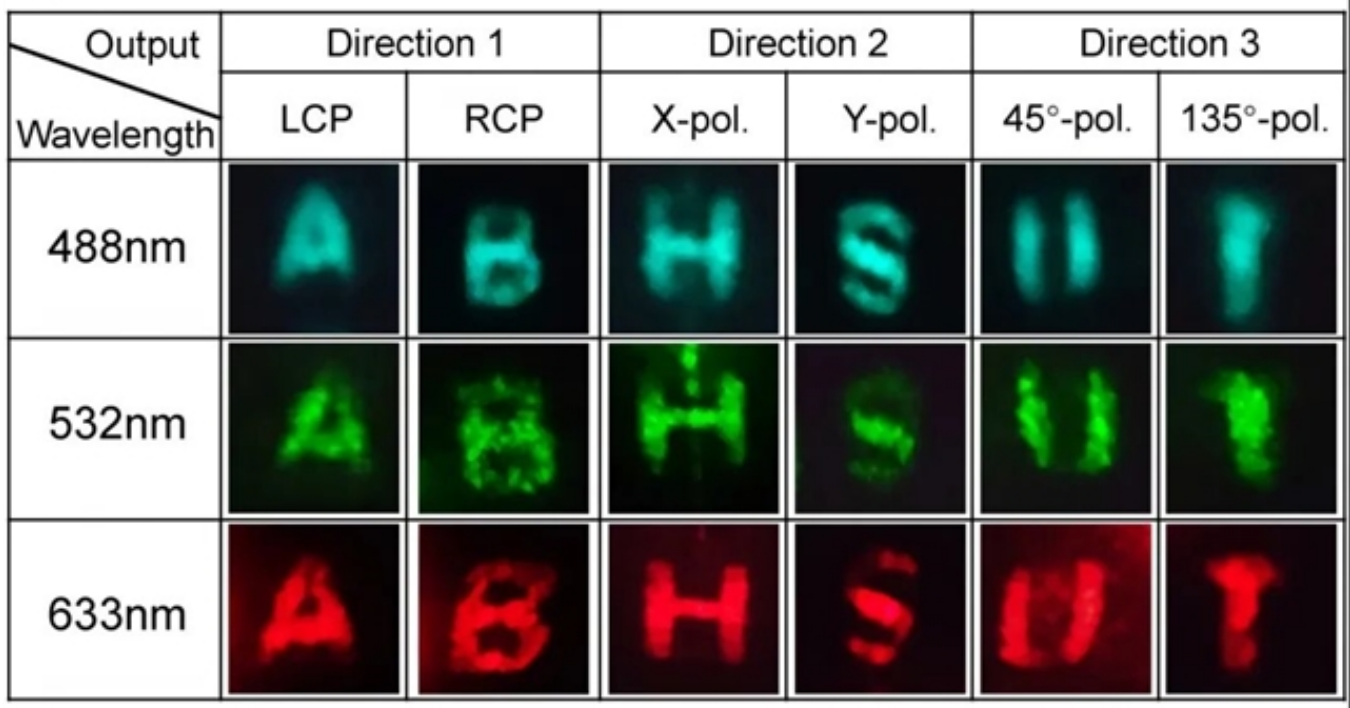
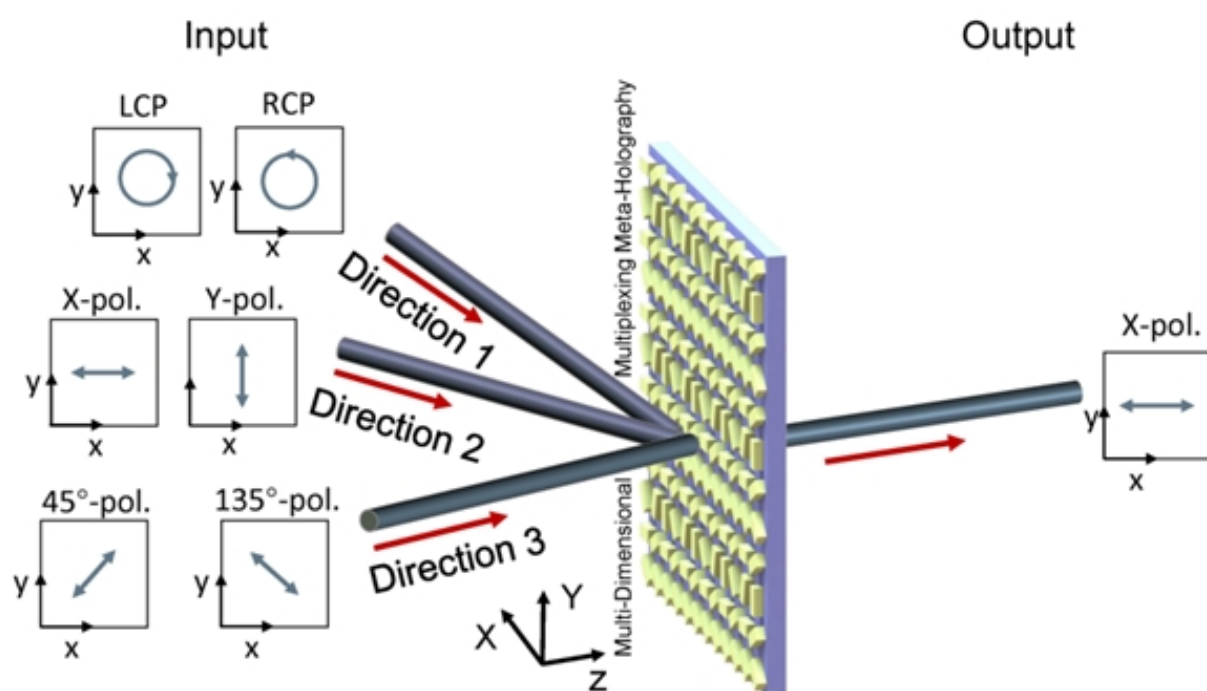


图2：固定输入-可变输出（FIVO）模式的原理示意图与实验结果

随后，研究团队展示了可变输入-固定输出（Varied Input Fixed Output, VIFO）模式的工作机制，如图3a所示。在该场景中，采用了多组具有不同偏振态和入射方向的光束作为输入，而输出通道则固定为沿法线方向透射的光束。根据不同的入射条件，透射光束将重建出唯一对应的全息图像。该模式可类比于一张在不同光照条件下显示不同图案的标签，为实现光学多图层信息存储与选择性读取提供了可能。特别是在激光防伪识别等场景中，该机制可用于构建具备高安全性和可控响应的光学标签，展现出良好的应用前景。同样地，如图3b所示，研究团队在488 nm、532 nm 和 633 nm三种典型波长下对VIFO模式进行了实验验证。结果显示，在不同波长下所对应的全息图像均能稳定重建，进一步印证了该几何相位超表面具备优异的宽带工作能力，为其在多波段光学防伪与信息显示等领域的应用提供了坚实支撑。

a



Input	Direction 1		Direction 2		Direction 3	
	LCP	RCP	X-pol.	Y-pol.	45°-pol.	135°-pol.
Output	X-pol.					
	A	B	H	S	U	T

Holography image

b

Input Wavelength	Direction 1		Direction 2		Direction 3	
	LCP	RCP	X-pol.	Y-pol.	45°-pol.	135°-pol.
488nm						
532nm						
633nm						

图3：可变输入-固定输出（VIFO）模式的原理示意图与实验结果

总结与展望

该研究提出并实现了一种基于全维度调控几何相位超表面的多维复用超表面全息方法。该超表面由氮化硅纳米柱构成，作为各向异性单元，能够以理想效率同时独立调控光场的振幅、相位与偏振，实现对空间光场的精确操控。研究系统分析了全息面与成像面的电场映射关系，设计出可完整记录复杂多维全息信息的结构方案，并在不同输入输出条件下演示了多种可控图像重建场景。所实现的超表面全息器件在图像构建精度与复用维度方面显著提升，为未来构建高密度、低串扰的光信息存储、定向广播与保密加密系统提供了基础。该成果有望在大容量通信、信息防伪、以及多维隐写等领域展现广阔应用前景。（来源：先进制造微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.37188/lam.2025.064>

作者：王健等 来源：《光：先进制造》

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