
用于控制任意相位和偏振环形图案的方位可变完美矢量光束

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/35082.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！

用于控制任意相位和偏振环形图案的方位可变完美矢量光束。 导读

完美涡旋凭借其独特的环形轮廓，且轮廓与拓扑荷数无关，在光操控领域具有重大意义。然而，精确控制完美涡旋生成过程中的相位和偏振颇具挑战。

意大利帕多瓦大学的研究团队提出一种创新方法，利用双功能硅基超表面生成方位角可变的完美矢量光束，可实现对完美涡旋的相位和偏振模式进行全面控制。光学表征验证了该光束的特性，其在光镊、低折射率微粒操控、冷原子捕获及大容量通信等领域展现出良好应用前景。

该文章近日发表在国际顶尖学术期刊《Light: Science Applications》，题为Azimuthally-variant perfect vector beams for the control of arbitrary phase and polarization ring patterns。

研究背景

1989年Couillet等人提出光学涡旋概念后，结构光领域迅速发展。携带轨道角动量的光束成为研究热点，但标准轨道角动量光束的强度分布与相位结构相互关联，限制了其在捕获和空间复用等方面的应用。

Ostrovsky等人提出完美涡旋的概念，可在所需半径和宽度的固定强度环上实现任意方位角的相位编码，但使用传统光学器件通常需要复杂的多元件干涉结构。超表面的出现为矢量光束的紧凑生成提供了可能，此前研究虽尝试拓展轨道角动量光束应用范围，但均无法沿环逐点精确控制相位和偏振。

研究团队利用超表面首次实现了对完美涡旋光束相位和偏振的全面控制，生成了方位角可变的完美矢量光束。双功能超表面可在圆偏振分量上编码不同的相位图案，用单个光学元件产生自旋和轨道角动量的不可分离组合，同时为所需的涡旋光束赋予与偏振无关、遵循任意方位变化的相位图案。光学表征证实了该方案具备生成连续变化的任意相位轮廓和偏振模式的环形图案的能力。这一光学元件在光束整形和光控制方面颇具应用价值。

创新研究

方位角可变的完美矢量光束生成原理

研究团队设计了一种双功能超表面，使线偏振高斯光束照射时，该超表面在焦平面形成方位角可变的完美矢量光束，并展示了利用超表面设计和偏振控制产生特定相位和偏振特性光束的原理。图1展示了光束产生过程，超表面依靠圆偏振光自旋赋予不同相位图案，通过半波片调整入射光偏振角度，从而改变焦平面偏振图案（如蓝色和绿色图案变化）。并在超表面后引入旋转线性偏振器，因此能产生多点光斑形状，且光斑大小和旋转状态随偏振图案变化。

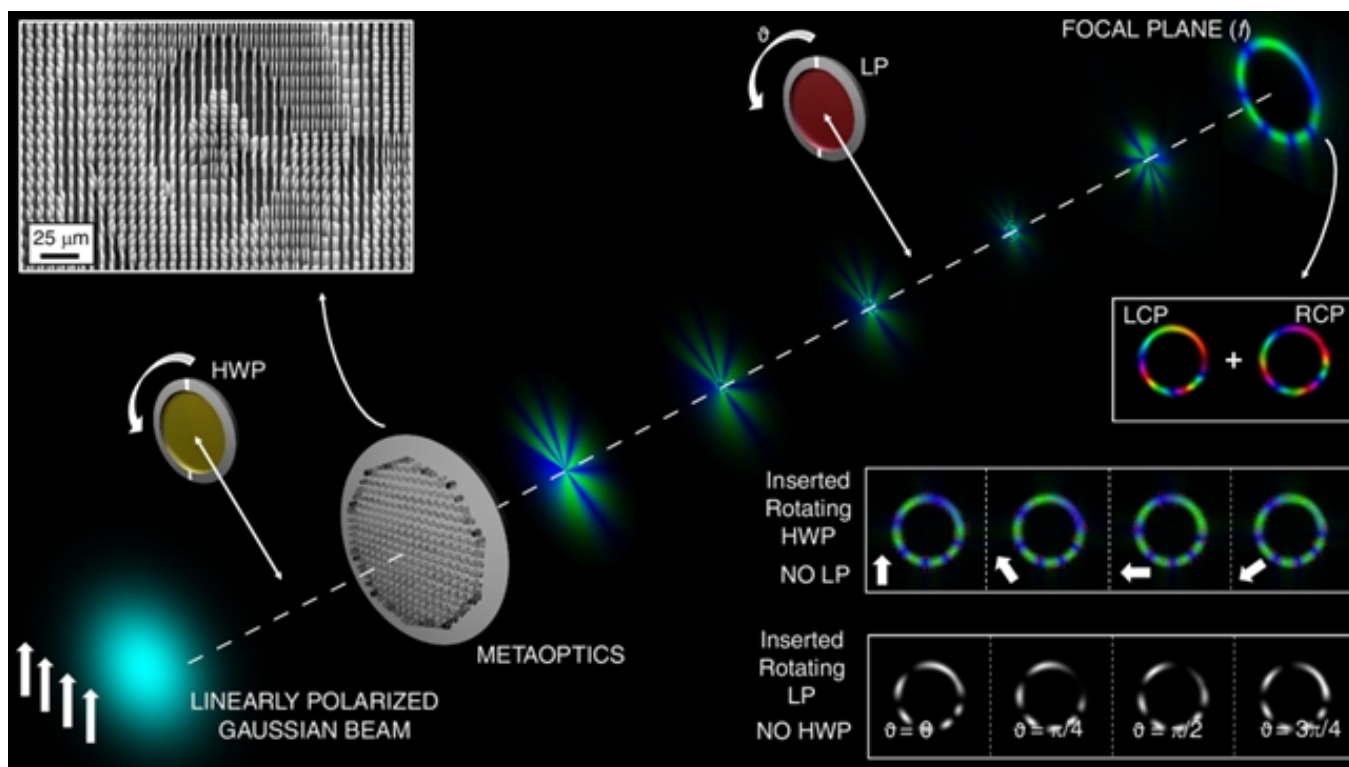


图1. 方位角可变的完美矢量光束生成示意图

光学超表面元件线性相位梯度编码

团队设计可产生两个具有相反涡旋态环的光学超表面元件，进行线性相位梯度编码，产生特定矢量光束。图2展示了相关信息，包括编码的动态和几何相位、不同圆偏振光照射下的光学响应模拟，以及滤波前后矢量光束的模拟和测量强度。该元件产生的圆偏振分量的拓扑荷数为 ± 7 。当旋转线性偏振器时，产生的方位分布光斑沿相反方向旋转，且光斑大小与相位梯度成比例变化。实验结果与理论模拟相符，验证了设计光学元件编码线性相位梯度产生特定矢量光束的可行性。

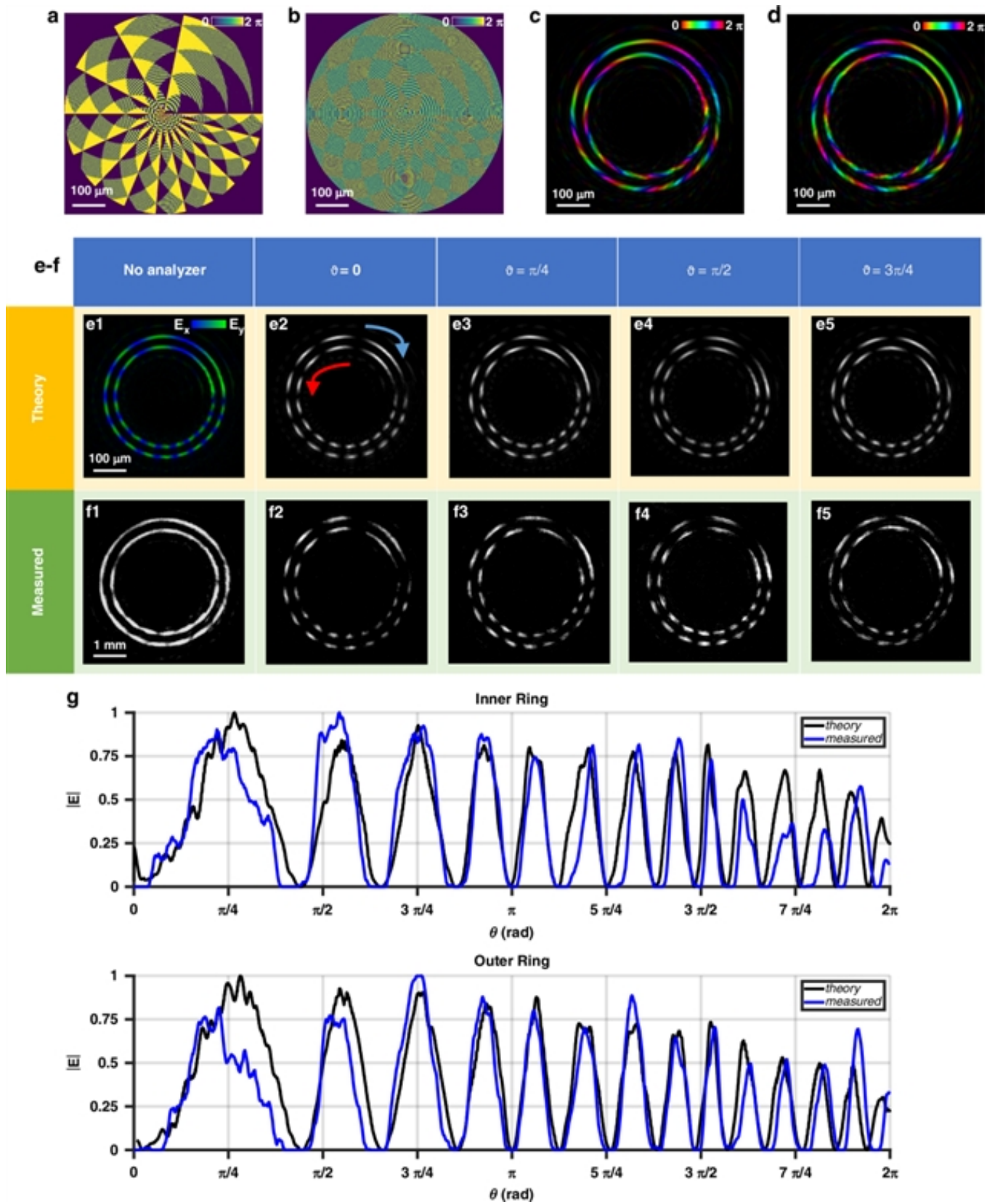


图2. 双功能超表面的线性相位梯度编码

光学超表面元件非线性相位梯度编码

研究团队通过设计采用指数和正弦相位梯度函数的超表面元件来编码非线性相位梯度。图3展示了模拟和实验结果，采用指数方位相位梯度的元件，产生的三阶矢量光束光斑随方位坐标指数变化；采用正弦梯度函数的元件，产生了振荡不对称矢量光束。这表明设计不同的非线性相位梯度函数，可实现更复杂的相位和偏振模式。

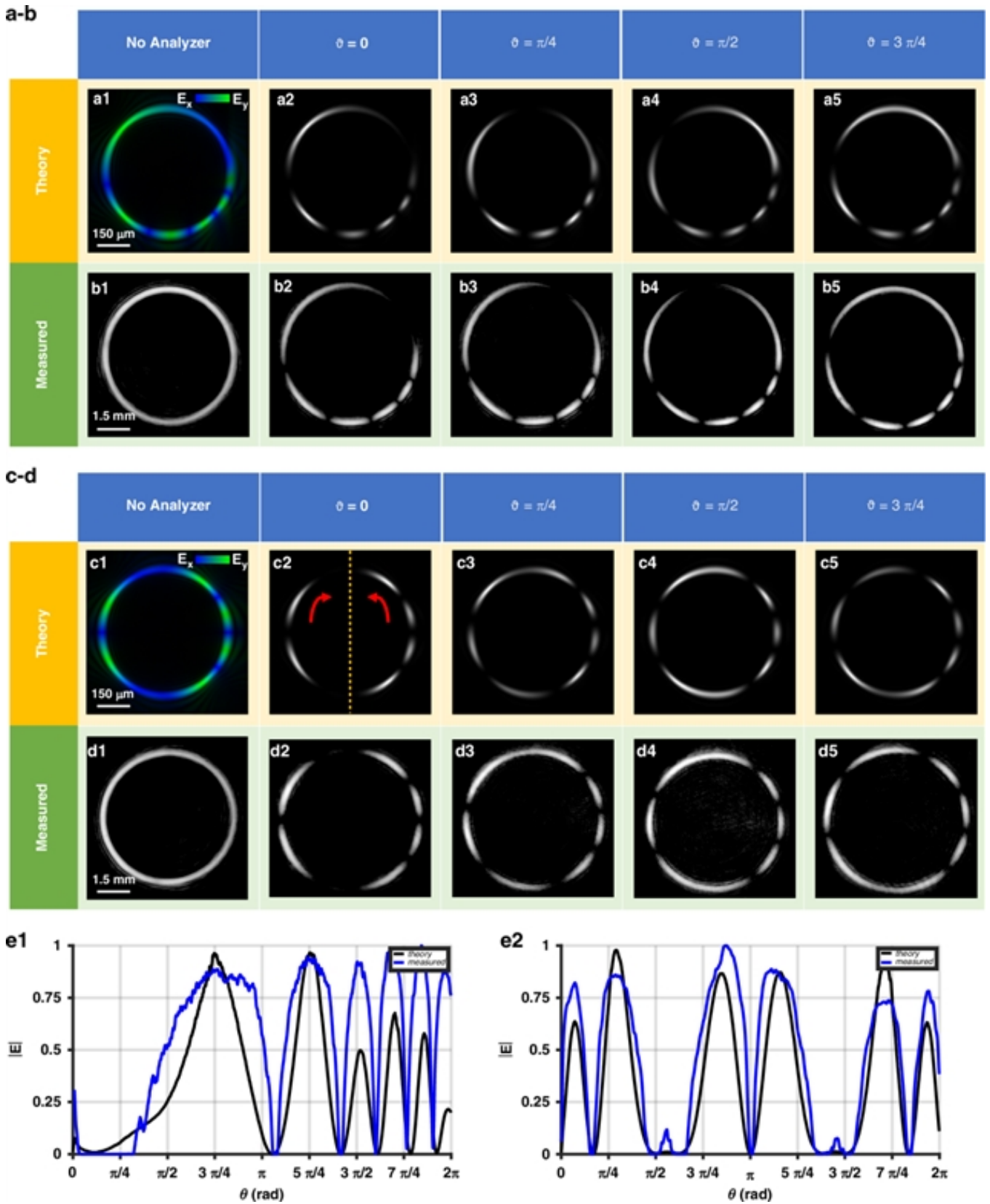


图3. 双功能超表面的非线性相位梯度编码

器件形貌表征。

研究团队利用电子束光刻等工艺制备该超表面光学元件，图4(a-c)展示了超表面的显微镜和SEM图像，图4(d)展示了用于测试其光学性能的实验装置，包括激光光源、多种光学元件及光束收集和分析设备，用于评估超光学元件的光学性能。

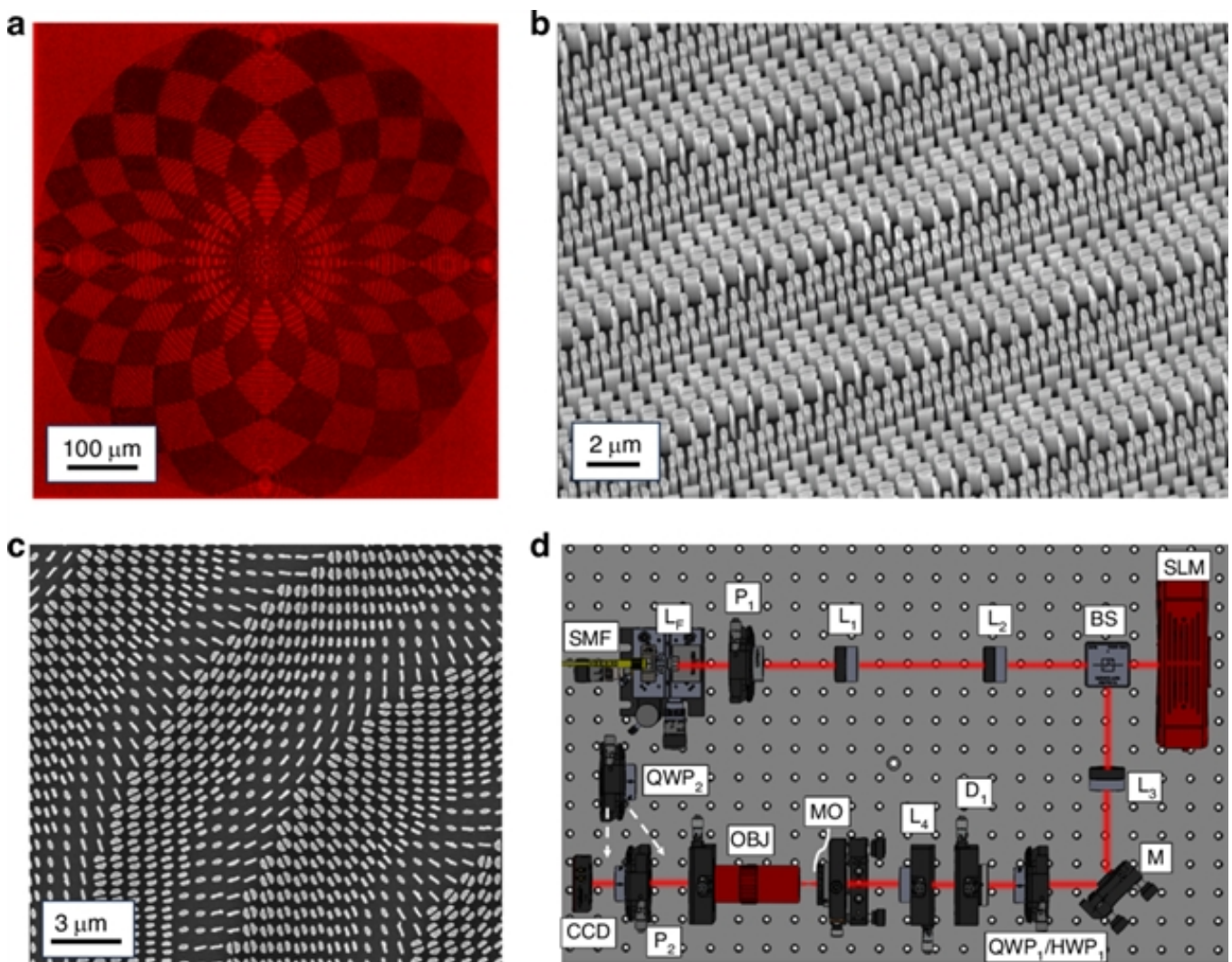


图4. 超表面光学元件的制造表征和光学性能测试

总结与展望

本文围绕结构化光场精确调控的主题，提出并实现了方位角可变完美矢量光束的产生及特性研究。研究人员创新地改进了传统完美涡旋的相位图公式，引入新相位项实现相位和偏振全面控制。研究团队在实验上设计并制备多种不同相位梯度编码的光学元件，经光学表征验证了理论设计，成功生成具有预期相位和偏振图案的环形光束。

在通信领域，方位角可变的完美矢量光束凭借独特相位和偏振特性，可高效编码传输信息，有效提升了通信系统容量和抗干扰能力；在量子信息领域，其精确的光场调控能力有助于实现高维度量子编码，构建更稳定高效的量子通信网络和计算架构。未来通过优化超表面设计和制备工艺，有望实现更精细复杂的光场调控。（来源：LightScienceApplications微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41377-025-01859-1>

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事宜，请与我们联系。

作者：Gianluca Ruffato 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