
基于相干波干涉的高效功能复用超构表面

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/32197.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！

基于相干波干涉的高效功能复用超构表面

。复旦大学物理学系周磊教授团队提出了一套基于相干波干涉的超构表面光学集成器件平台，拓展了单一光学器件的可调制功能数目，对未来可能的科学研究及相关应用均有重要启发意义，为集成光子学的发展提供了新的可能。近年来，光科学及相关应用飞速发展，对光学器件集成度和功能性的需求也日益增长，如何在超紧凑系统中高效集成多种功能成为了亟待解决的科学问题。然而，基于传统材料的光学器件往往存在体积大，效率低，调控自由度不足等问题，难以满足集成多种功能的要求。为打破传统光学器件的诸多限制，超构表面应运而生。超构表面是一种由亚波长微结构按特定宏观序排列而成的平面人工材料，其单元响应及宏观序均可任意设计，因此具有较高的光操纵能力，近年来备受关注。其中，基于超构表面局域各向异性及全局相位分布设计实现的矢量光场操纵至关重要，对局域偏振态及波前的同步调制为光操纵提供了更多自由度和可能性。而在双/多功能调控方面，结合多种不同机制的表面相位，例如同时利用偏振依赖的旋转几何相位和偏振无关的结构共振相位，科学家们已实现基于超构表面的双/多功能光场调控，在亚波长超薄器件上复用不同功能，大大推动了集成光学的发展。然而，现有的多功能光场调控器件大多需要同时改变入射光的多种不同特性，而只利用不同入射光偏振态的工作实现的光场调控功能数目受到独立偏振态数目（例如，沿两正交方向的线性偏振或具有相反手性的两个圆偏振）的限制，不能超过两个。为进一步增加超构表面器件功能调控的数目，需要发展新的设计策略以突破独立偏振态数目对独立功能数的限制。近期，复旦大学物理学系周磊教授团队提出了一套基于相干波干涉的超构表面光学集成器件平台，通过持续改变入射光偏振态来实现不同的光场调制功能，理论上可以突破独立偏振态数目带来的限制，用单个超构表面器件实现无穷多种不同功能，并在通信波长范围（1550 nm）进行了五种功能超构表面的实验验证。该工作以Functionality multiplexing in high-efficiency metasurfaces based on coherent wave interferences为题，发表在Opto-Electronic Advances2024年第11期，并被选为封面文章。

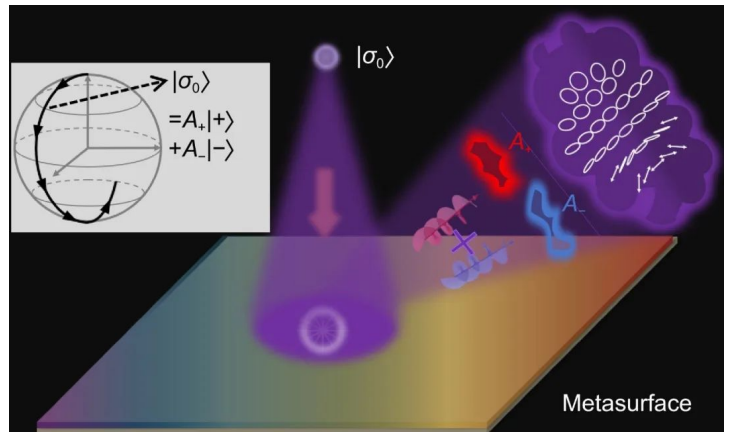


图1.基于相干光干涉的多功能超构器件示意图

研究团队提出，可

将任意入射光的偏振态投影至左旋和

右旋圆偏光分量上，即 $|\sigma_0\rangle = A_+|+\rangle + A_-|-\rangle$ ， $|\pm\rangle$

分别对应左右旋圆偏光分量，而经由超构表面散射的出射光束则视为右旋圆偏光分量散射后的波前叠加

$$A_+ \cdot F_+(\vec{r})|\hat{\sigma}_+(\vec{r})\rangle + A_- \cdot F_-(\vec{r})|\hat{\sigma}_-(\vec{r})\rangle, F_{\pm}(\vec{r})$$

分别表示位置处左右旋分量散射后的波前，分别表示其相应等相位面上的局域偏振态。单独设计两手性相反圆偏光分量散射后的不同波前， $|\hat{\sigma}_{\pm}(\vec{r})\rangle$ ：

就可利用连续调制的入射光偏振态，即调制入射光中左右旋圆偏分量的比例，调控干涉总场的波前及局域偏振态，理论上可复用无穷多种不同功能，干涉总场可以被表示为 $A_+ \cdot F_+(\vec{r})|\hat{\sigma}_+(\vec{r})\rangle + A_- \cdot F_-(\vec{r})|\hat{\sigma}_-(\vec{r})\rangle = F_f(\vec{r})|\hat{\sigma}_f(\vec{r})\rangle$

. 基于这样的普适思路，研究团队首先进行了基准性实验，设计使左右旋分量携带不同的线性相位梯度，以异常反射至法线两边任意角度，即在空间上不重叠。如图2所示，改变入射光偏振态，出射场始终为在空间上分离的两束手性相反圆偏光，但两光束强度比随入射偏振态的变化而受到连续调制。实验结果与数值模拟和理论预期完美吻合，展示了通过改变入射态椭圆度调制出射左右旋分量强度比的设计思路，初步验证了设计思路的可行性。

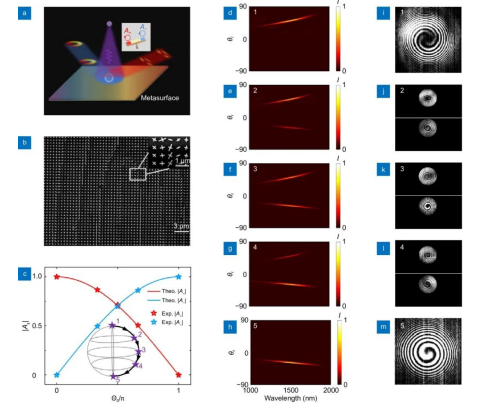


图2. 左右旋圆偏光分量空间分离的基准实验。(a) 左右旋圆偏光分量空间分离器件的工作原理示意图：该器件可产生两束在空间上分离的涡旋光，携带不同的拓扑电荷，其强度可通过改变入射光的左右旋圆偏光分量之比进行调制。(b) 实验样品的扫描电子显微镜图像和放大视图（插图）。(c) 理论计算（实线）和实验测量（星形）得到的两束光的异常反射振幅（红色和蓝色分别代表 A_+ 和 A_- ）与入射光偏振态 Θ_0 的关系。实验共用到五种不同的入射偏振态，在庞加莱球上标记为1、2、3、4和5。(d-h) 在不同偏振态的正入射光照射下，实验测得的超构表面反射光强度的角度分布，入射偏振态与(c)中所示的庞加莱球上的5个点相对应。(i-m) 如(c)所示，在波长为1550 nm的正入射光照射下，球面波与超构表面反射光之间的干涉图像，其偏振态与庞加莱球上的5个点对应。在(i)和(m)中只展示了一个干涉图像，因为在这两种情况下另一圆偏分量为0，只有一束反射光。第二个是真正意义上的相干光干涉多功能矢量光场器件，出射的左右旋圆偏光分量在空间上完全重叠，干涉后形成的波前和局域偏振态均受到入射光椭圆偏度（即左右旋分量强度比）及取向的调制。如图3所示，在不同椭圆偏度的光入射下，分别实验观测到了+4，+3，+2，+1和0阶涡旋波前，同时相应的局域偏振态分别为均匀左旋，矢量椭圆偏，矢量线偏，矢量椭圆偏和均匀右旋，即实现了五种各不相同的波前和局域偏振态。实验结果同样与理论预期完美吻合，进一步证明了基于超构表面实现无限制多功能复用光学器件的可行性。

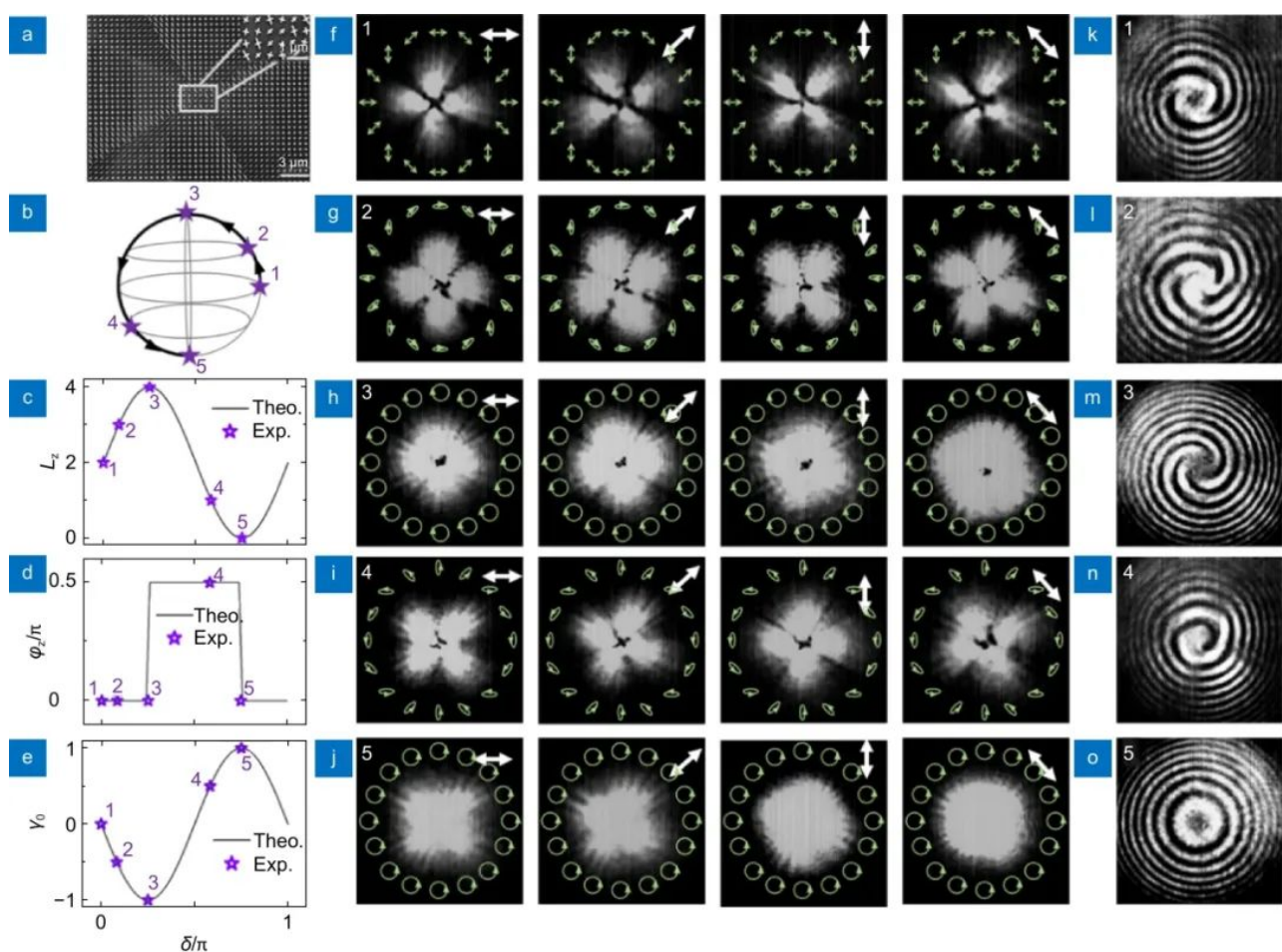


图3. 基于相干光干涉的五种功能超构表面矢量光场调控器件。(a) 实验样品的扫描电子显微镜图像和放大视图(插图)。(b) 庞加莱球上入射偏振态的变化路径,其中1、2、3、4和5表示实验使用的五种入射偏振态。(c) L_z , (d) ϕ_0 和(e) γ_0 的理论计算值(实线)和实验测量值(星形)与参数 δ 的关系,参数 δ 是线性偏振片和四分之一波片之间的相对角度,实验中调制该角度来产生所需的入射偏振态。在波长为1550 nm的光照射下,将放置于CCD前作为检偏器的偏振片转至不同角度(白色箭头表示,从左至右分别为 0° , 45° , 90° , 135°)时,超构表面反射的光强图形测量结果,入射偏振态分别对应图(b)所示的庞加莱球上的(f) 1、(g) 2、(h) 3、(i) 4和(j) 5。绿色符号(箭头/圆圈/椭圆)表示不同情况下理论预测的偏振分布。(k-o) 测量得到的球面波与超构表面反射光之间的干涉图像,波长为1550 nm的正入射光照射超构表面,其入射偏振态与图(b)所示的庞加莱球上的5个点相对应。综上所述,该工作极大地拓展了单一光学器件的可调制功能数目,对未来可能的科学研究及相关应用均有重要启发意义,为集成光子学的发展提供了新的可能。

研究团队简介 本文共同第一作者为周月娇和刘通博士。周月娇为复旦大学物理学系博士生,研究方向为超构表面对光场的调控。刘通博士目前在香港科技大学物理系从事博士后研究,在2016年和2022年于复旦大学获理学学士和博士学位,2022年获上海市优秀毕业生称号。研究方向为电磁超构材料、电磁超构表面、等离激元学。本文通讯作者为王冬逸博士和周磊教授。王冬逸博士为香港大学博士后,在2017年和2022年于复旦大学物理系获得学士和博士学位。研究方向为电磁超构表面和声学拓扑,以第一作者/共同一作/通讯作者身份在PRL, AOP, LSA, LPR等杂志上发表多篇论文。目前担任Nanophotonics新媒体编辑。周磊教授为复旦大学副校长,上海市超构表面光场调控重点实验室主任,复旦大学物理学系谢希德特聘教授,2007年获得国家杰出青年基金,2010年入选教育部长江学者特聘教授,2011年获国务院特殊津贴,2017年入选国家高层次人才特殊支持计划领军人才,2019年入选美国光学学会Fellow, 2019-2023连续5年入选Web of

Science评选的ESI全球高被引学者。目前担任Photonics Insights创刊共主编和Nanophotonics执行主编等。在2016年获得上海市自然科学一等奖，2019年国家自然科学二等奖（2019）等荣誉。

研究团队，从左至右为：周月娇，刘通博士，戴昌红，王冬逸博士，周磊教授 Article Zhou YJ, Liu T, Dai CH et al. Functionality multiplexing in high-efficiency metasurfaces based on coherent wave interferences. Opto-Electron Adv 7, 240086 (2024). DOI:10.29026/oea.2024.240086
作者：王冬逸、周磊等 来源：OEA

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