

# 基于矢量焦点超构透镜的偏振结构 及高安全性光学加密\*

赵帅富 钟发成<sup>†</sup> 于群星 杨天 邵立 于占军 李艳<sup>‡</sup>

(郑州航空工业管理学院材料学院, 郑州 450046)

(2025年4月20日收到; 2025年6月5日收到修改稿)

光学加密技术因其并行处理、大容量和低功耗等优势在信息安全领域发挥着巨大的应用潜力。其中, 偏振作为光的一个重要自由度, 基于偏振操控和复用的光学加密技术受到广泛研究。然而当前基于像素化或交错式超表面设计的偏振操控方法, 仍面临制备难度大及相邻单元结构间耦合引起串扰等问题, 复用通道数量受限。本文提出了一种基于矢量焦点超构透镜的纵向可变、级联偏振结构加密新方法。该方法采用几何相位调控原理, 通过相同结构尺寸但不同旋向的  $\text{TiO}_2$  纳米柱的定制和排列, 实现超构透镜所需的单相位轮廓, 在纵向多个焦平面上生成多个矢量焦点, 并重构级联的偏振结构。这里任意两个级联的偏振结构被编码相互正交的偏振旋转角, 随着入射线偏振光的偏振方向发生变化, 偏振结构上的偏振分布随之动态变化, 因此, 不同偏振方向的透射光强度分布也被动态调制, 可实现十通道信息加密。只有通过正确的密钥(入射波长、入射偏振态、出射光偏振态和观察位置)才能解码加密信息。该方法结合了超构透镜的多焦点偏振旋转、偏振结构设计及纵向、级联控制, 提升了信息容量和安全性, 在光学信息显示、加密和防伪等领域具有重要的应用潜力。

**关键词:** 超构透镜, 介质超表面, 偏振调控, 光学加密

**PACS:** 42.25.Ja, 42.30.-d, 42.70.-a

**DOI:** 10.7498/aps.74.20250508

**CSTR:** 32037.14.aps.74.20250508

## 1 引言

随着信息技术的飞速发展, 信息容量和安全性的需求不断上升, 众多加密技术应运而生。其中, 光学加密因其具有并行处理、大容量、低功耗等优点, 并且光具有频率、振幅、相位和偏振等丰富的自由度, 为信息保护提供了理想的平台<sup>[1-5]</sup>。其中偏振作为光的一个重要参量, 已被应用于记录、处理、储存信息<sup>[6-8]</sup>, 实现对偏振的精准操控, 将在光

学信息加密领域发挥重要的应用价值。而传统的光偏振调控, 往往需要各类光学元件, 如偏振片、波片等, 这些器件比较笨重, 且每次只能产生单一的偏振态。因此, 为满足高度集成的信息加密领域对器件小型化、集成化和高信息容量的要求, 开发轻质化的光学偏振操控平台十分必要<sup>[9]</sup>。

光学超表面<sup>[10-15]</sup>, 即由亚波长纳米结构(单元结构)组成的二维超薄界面, 由于其在操纵相位<sup>[9,10]</sup>、振幅<sup>[16,17]</sup>、波长<sup>[18-21]</sup>和偏振<sup>[22-25]</sup>等方面具有卓越的能力, 在超构透镜<sup>[26,27]</sup>、全息成像<sup>[28,29]</sup>、涡旋光

\* 河南省高等学校重点研究项目计划基础专项(批准号: 23ZX018)、河南省科技攻关项目(批准号: 252102211125, 242102230072, 242102520007, 252102230076, 242102240087)、大学生创新创业训练计划项目(批准号: 202410485056, 202410485041)、郑州航空工业管理学院科研团队支持计划专项(批准号: 24ZHTD01002)和河南省高等学校重点科研项目(批准号: 25B140011)资助的课题。

<sup>†</sup> 通信作者。E-mail: zfc@zua.edu.cn

<sup>‡</sup> 通信作者。E-mail: yanli@zua.edu.cn

束生成<sup>[30,31]</sup>等领域成果非凡,为偏振操控及其在光学信息加密中的应用提供了全新的平台.近十年来,人们基于不同的相位调节机制,相继提出各种波片、偏振转换器件等<sup>[32-35]</sup>.例如,Lin等<sup>[32]</sup>设计了硅纳米柱超表面,利用其在550 nm共振波长附近对横电和横磁偏振光产生突变相位的不同,实现了半波片的功能.Xu等<sup>[34]</sup>基于金属U形单元结构反射型立体超表面,实现高效的宽带太赫兹波片.除了这种单一偏振态调控,近年来,研究者们致力于基于超表面多通道矢量全息<sup>[36,37]</sup>、偏振依赖矢量光聚焦<sup>[26,38]</sup>以及偏振结构<sup>[39-41]</sup>等多偏振态操控方面的研究,并且在高安全性光学加密、防伪和多通道信息处理方面有重要的发展前景.其中,Zhao等<sup>[42]</sup>提出基于双折射超表面实现多偏振通道复用的矢量全息图.Song等<sup>[43]</sup>基于几何相位,提出一种由4组特定偏振响应的矩形柱单元组成的像素化超表面,实现4通道偏振复用全息.Guo等<sup>[44]</sup>提出一种由4个子阵列组成的像素化超表面,实现了全偏振自由度调控的彩色全息显示.Wen等<sup>[45]</sup>基于反射型等离激元超表面,实现了空间连续偏振分布的矢量全息.然而,该方法中偏振是位置坐标的函数,无法生成与全息图像相关联的任意偏振分布.另外,这种基于像素化或交错式超表面的多偏振态操控也面临制备难度大及相邻结构间耦合引起的串扰等问题.因此,亟须一种高效的方法来同时调控相位和偏振,以实现偏振的精确操控.

2019年,Zang等<sup>[26]</sup>利用单一单元结构的几何相位调控方法实现了具有偏振旋转功能的多焦点超构透镜.2021年,Wang等<sup>[39]</sup>基于此原理和相位复用技术,利用单一相位轮廓超构透镜实现了以矢量焦点重构的偏振结构.2023年,Li等<sup>[41]</sup>使用单相轮廓超构透镜在纵向不同区域生成了3个不同的3D偏振结构,实现了3D偏振结构在纵向空间的控制和3D图像隐写应用.相比偏振依赖的二维(2D)图像隐写<sup>[46,47]</sup>、以及超表面全息方法构建的2D矢量图像<sup>[48]</sup>,基于超构透镜矢量焦点重构的偏振结构在提升信息容量、偏振精准控制方面有独特的优势.如何基于矢量焦点超构透镜重构更多的偏振结构,并实现纵向、角向及级联控制,并应用于光学信息加密,能进一步提升信息容量和安全性.

本文提出基于单相轮廓矢量焦点超构透镜同时在纵向多个焦平面生成多个级联偏振结构,用

于高安全性信息加密.这里两个偏振结构(携带正交偏振态的两个预设强度轮廓)被级联在一起,当圆偏振光照射超构透镜时,级联在一起的两个强度轮廓同时显示在预设的纵向或角向位置.当线偏振光照射超表面时,级联在一起的强度轮廓携带定制的偏振态,并且偏振态随着入射线偏振光的改变发生动态旋转,因此在观察平面探测不同偏振方向的光强,出现的强度轮廓也发生变化(动态调制),可应用于高度集成的光学信息加密.只有选用特定的人射光波长、入射光偏振态、探测光偏振态、观察位置作为密钥,才能显示想要的信息,否则不会泄露任何原始的加密信息.该方法同时结合超构透镜多焦点的偏振旋转、偏振结构设计及纵向和级联控制,在三维环境中,提供多个自由度的联合操控,可为实现复杂光学偏振结构和信息安全领域的应用提供理论指导.

## 2 原理与方法

图1所示为通过由具有相同尺寸、但不同取向的TiO<sub>2</sub>纳米棒(如图1(b)所示)组成的几何相位超表面来生成纵向可变、单工作波长且级联的偏振结构(图案或字母).具有预先设计且正交偏振分布(黄色箭头)的两个图案或字母被级联在一起.当用特定波长530 nm的线偏振(LP)光照射超表面时,在不同的观察平面 $z_1, z_2, z_3, z_4$ 和 $z_5$ 上会生成10个带有偏振信息的图案或字母.此外,通过改变入射光线偏振(红色箭头)的方向,可以动态控制级联数字(字母)上的偏振分布,则探测到通过不同偏振方向(绿色箭头)的偏振分析器的强度轮廓也被动态调制,调制的强度图案可应用于信息加密(如图1(a)右上所示).只有利用正确的密钥:入射波长、入射LP状态、探测光的线偏振方向和观察距离才能获得解码后的图案或字母,极大地提高了信息安全性和容量.

本工作中的超表面设计结合了多个偏振结构的设计、偏振旋转、纵向控制和级联设计.首先,设计沿任意二维轨迹的离散焦点透镜,通过增加焦点数量 $N$ ,将其扩展为连续的焦线.焦线的相位轮廓 $\Phi(x, y)$ 由下式控制:

$$\Phi(x, y) = \arg \left\{ \sum_{n=1}^N e^{i\varphi_n(x, y)} \right\}, \quad (1)$$

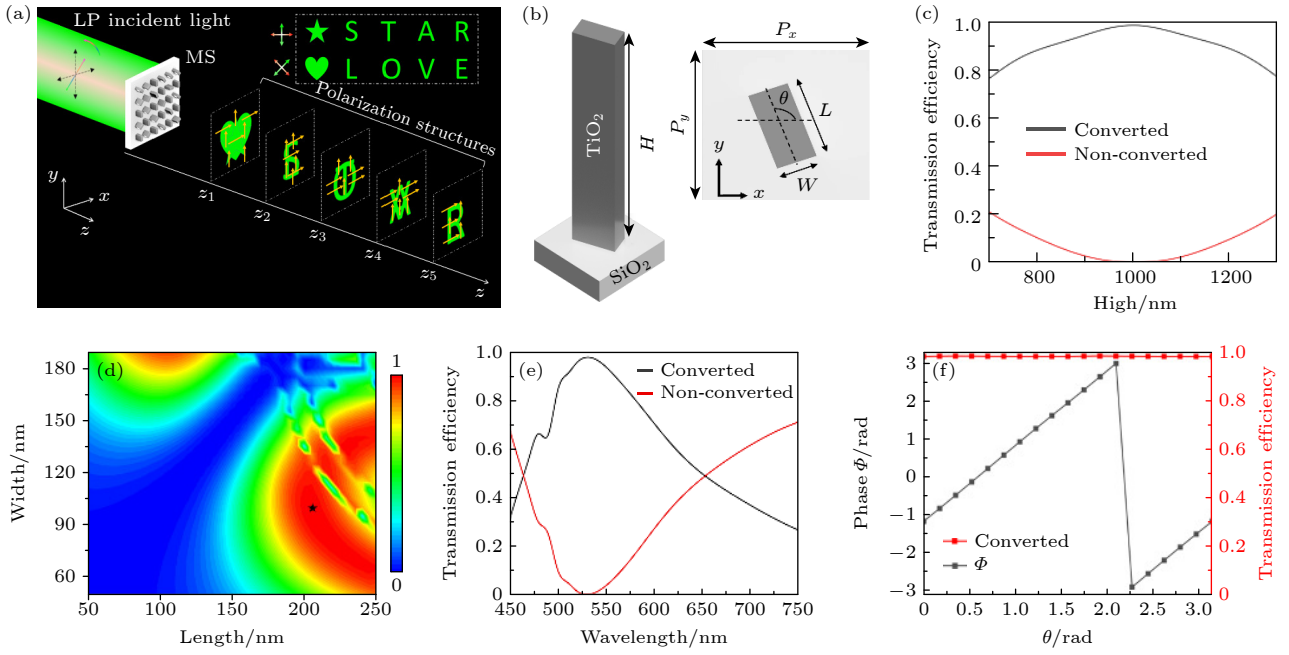


图 1 (a) 多焦点超构透镜生成纵向可变、单波长 ( $\lambda = 530 \text{ nm}$ ) 且级联的偏振结构 (图像或字母) 示意图; (b)  $\text{TiO}_2$  纳米柱单元结构示意图, 其中  $P$ ,  $L$ ,  $W$  和  $\theta$  分别代表纳米柱的长、宽、高和旋转角, 周期固定为  $P_x = P_y = 300 \text{ nm}$ ; (c) 固定纳米柱长  $L = 205 \text{ nm}$ 、宽  $W = 100 \text{ nm}$ , 不同高度  $H$  情况下的交叉极化 (转换部分) 和共极化 (非转换部分) 圆偏振光的仿真透射效率; (d) 固定高度  $H = 1000 \text{ nm}$ , 不同长  $L$  和宽  $W$  的纳米棒阵列情况下的转换效率; 星号标示了所选最大转换效率对应的纳米柱尺寸 ( $L = 205 \text{ nm}$ ,  $W = 100 \text{ nm}$ ); (e) 所选纳米柱阵列在圆交叉极化和同极化情况下的透射谱; (f) 所选纳米棒的旋转角度  $\theta$  与附加相位  $\Phi$  和偏振转换效率之间的关系

Fig. 1. (a) Schematic diagram of multifocal metalens generating longitudinally varying, single-wavelength, and cascaded polarization structures (images or letters); (b) schematic diagram of the  $\text{TiO}_2$  nanorod unit cell, the parameters  $P$ ,  $L$ ,  $W$  and  $\theta$  denote the period, length, width, and the rotation angle of the  $\text{TiO}_2$  nanorod, respectively, the period is fixed at  $P_x = P_y = 300 \text{ nm}$ ; (c) simulated cross-polarization (converted part) and co-polarization (non-converted part) transmission efficiency with different height  $H = 530 \text{ nm}$  at  $\lambda = 530 \text{ nm}$  with fixed length  $L = 205 \text{ nm}$  and width  $W = 100 \text{ nm}$ ; (d) simulated conversion efficiency with different lengths and widths at  $\lambda = 530 \text{ nm}$  with fixed height  $H = 1000 \text{ nm}$ , the  $\text{TiO}_2$  nanorods with length  $L = 205 \text{ nm}$  and width  $W = 100 \text{ nm}$  are chosen for the maximum conversion efficiency, as shown in the star-mark; (e) calculated converted and non-converted efficiency spectra of the chosen  $\text{TiO}_2$  nanorod array; (f) dependence of phase  $\Phi$  and polarization conversion efficiency on the rotation angle  $\theta$  of the chosen  $\text{TiO}_2$  nanorods.

其中,  $\varphi_n(x, y) = -\frac{2\pi}{\lambda} \left( \sqrt{f_n^2 + (x-x_n)^2 + (y-y_n)^2} - \sqrt{f_n^2 + x_n^2 + y_n^2} \right)$ ,  $\varphi_n(x, y)$  是焦曲线上第  $n$  个焦点的透镜相位轮廓. 其中  $\lambda$  表示工作波长,  $f_n$  是第  $n$  个焦点的焦距,  $(x_n, y_n, f_n)$  代表第  $n$  个焦点的空间坐标,  $\sqrt{f_n^2 + x_n^2 + y_n^2}$  表示第  $n$  个焦点与超构透镜中心的距离. 采用具有不同取向  $\theta$  的  $\text{TiO}_2$  纳米柱 (如图 1(b) 所示) 组成的几何相位超表面来实现该连续焦点超构透镜, 当  $\theta = +\Phi(x, y)/2$  时, 产生能聚焦左旋入射的圆偏振 (LCP) 光的几何相位 (pancharatnam-berry) 轮廓; 当  $\theta = -\Phi(x, y)/2$  时,

产生能聚焦右旋圆偏振 (RCP) 光的相位轮廓. 为了实现超构透镜对 LP 光的聚焦并同时将其偏振方向旋转一个角度  $\varphi_n$ , 由于 LP 光可由两个 LCP 和 RCP 光叠加而成, 所要求的相位分布如下 [26,49]:

$$\Phi(x, y) = \arg \left\{ \sum_{n=1}^N \left( e^{i[\varphi_n(x, y) + \varphi_n]} + e^{-i[\varphi_n(x, y) - \varphi_n]} \right) \right\}. \quad (2)$$

为实现在不同的纵向观测平面和角向位置的多个 2D 级联偏振结构, 结合 2D 偏振结构及纵向、角向和级联设计, 进一步得出超表面的相位轮廓:

$$\Phi(x, y) = \arg \left\{ \sum_{m=1}^M \sum_{l=1}^{L_m} \sum_{n=1}^{N_{m,l}} \left( e^{i[\varphi_{m,n}(x, y) + \varphi_m]} + e^{-i[\varphi_{m,n}(x, y) - \varphi_m]} \right) \right\}, \quad (3)$$

$$\varphi_{m,l,n}(x,y) = -\frac{2\pi}{\lambda} \left( \sqrt{f_{m,l,n}^2 + (x - x_{m,l,n})^2 + (y - y_{m,l,n})^2} - \sqrt{f_{m,l,n}^2 + x_{m,l,n}^2 + y_{m,l,n}^2} \right). \quad (4)$$

其中,  $M$ ,  $L_m$  和  $N_{m,l}$  分别表示偏振字母 (图案) 的总数、第  $m$  个偏振结构上的包含的焦线数量和第  $m$  个偏振结构上第  $l$  条焦线的点数.  $\phi_m$  表示第  $m$  个偏振结构上焦点的偏振旋转角度.  $(x_{m,l,n}, y_{m,l,n}, f_{m,l,n})$   $m$  是第  $m$  个偏振结构的第  $l$  条焦线上第  $n$  个焦点的三维坐标. 该超表面的设计基于焦点的偏振旋转和相位复用, 能够将偏振信息精确映射到位于偏振结构上的任一焦点.

所设计的超表面采用在介质  $\text{SiO}_2$  基底上排列不同旋向的  $\text{TiO}_2$  纳米柱组成. 每个  $\text{TiO}_2$  纳米柱旋转角度为该位置所需的相位  $\Phi(x, y)$  的  $1/2$ , 以产生所需要的 PB(pancharatnam-berry, 几何) 相位. 所设计的超构透镜结构示意图如图 1(a) 所示, 每个  $\text{TiO}_2$  纳米柱结构单元如图 1(b) 所示, 为了构建超表面所需的满足 (3) 式的相位轮廓, 需对  $\text{TiO}_2$  单元结构进行优化, 单元结构排列周期固定为  $P_x = P_y = 300$  nm, 使用基于有限元方法的 Comsol Multiphysics 5.6 商业化软件进行仿真计算. 在建模过程中,  $\text{SiO}_2$  的相对介电常数设置为 2.13,  $\text{TiO}_2$  的相对介电常数设置为 6.7. 首先固定  $\text{TiO}_2$  纳米柱的长  $L = 100$  nm, 宽  $W = 205$  nm, 旋转角度  $\theta = 3\pi/4$ , 改变高度  $H$ , 仿真计算在波长  $\lambda = 530$  nm 的 LCP 光入射情况下, 发生偏振转换 (converted) 和未发生转换 (non converted) 的交叉极化和同极化圆偏振光的透射效率, 如图 1(c) 所示. 发现当  $H = 1000$  nm 时, 发生偏振转换的效率高达 0.983, 而未发生偏振转换部分的透射效率仅  $7 \times 10^{-5}$ . 因此接下来固定纳米柱的旋转角  $\theta = 3\pi/4$  和高度  $H = 1000$  nm, 进一步对长  $L$  和宽  $W$  进行优化, 如图 1(d) 所示, 发现在  $L = 100$  nm 和  $W = 205$  nm 附近, 偏振转换效率较高, 因此本文选取长、宽、高分别为  $L = 205$  nm,  $W = 100$  nm 和  $H = 1000$  nm (图 1(d) 中星号标记了该位置) 的  $\text{TiO}_2$  纳米柱作为单元结构. 该单元结构对应的偏振转换和非转换部分的圆偏振光透射谱, 如图 1(e) 所示, 在  $\lambda = 530$  nm 偏振转换效率高达 0.983. 并且当选取的  $\text{TiO}_2$  纳米柱旋转角  $\theta$  发生变化时, 偏振转换效率几乎不变, 产生的延迟 (几何) 相位  $\Phi$  和  $\theta$  满足 2 倍角的关系, 并完全覆盖  $2\pi$  区间, 如图 1(f) 所示. 说明用选取的纳米柱单元结构来实现所需超表面

的相位轮廓是可行的.

### 3 结果与讨论

为了验证上述概念, 首先设计面积为  $30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$  的小型超构透镜 (离散化为周期  $P_x = P_y = 300$  nm 的  $100 \times 100$  个像素点), 用于生成沿半圆分布的 7 个矢量焦点, 如图 2(a) 所示. 这里超构透镜的焦平面设置为  $z = f = 20 \mu\text{m}$ , 7 个焦点分布在半径  $r = 10 \mu\text{m}$  的半圆上, 右边 3 个焦点组成第 1 个偏振结构 ( $m = 1, l = L_1 = 1, N_{1,1} = 3$ ), 偏振旋转角设置为  $\phi_1 = 0$ ; 左边 4 个焦点组成第 2 个偏振结构 ( $m = 2, l = L_2 = 1, N_{2,1} = 4$ ), 偏振旋转角设置为  $\phi_2 = \pi/2$ , 如图 2(a) 黄色箭头所示. 每个焦点坐标为  $x_{m,l,n} = r \cos[(3m + n - 4) \times \Delta\alpha]$ ,  $y_{m,l,n} = r \sin[(3m + n - 4) \Delta\alpha]$ ,  $\Delta\alpha = \pi/6$ ,  $n$  取  $1 - N_{m,1}$  的整数. 将焦点坐标  $(x_{m,l,n}, y_{m,l,n}, f)$  代入 (3) 式和 (4) 式, 可求出超构透镜所需的单相位轮廓  $\Phi(x, y)$ , 如图 2(b) 上图所示. 接下来依据计算得到的  $\Phi(x, y)$ , 在超表面离散化的  $100 \times 100$  个坐标点  $(x, y)$  排列优化好的单一尺寸 ( $L = 205$  nm,  $W = 100$  nm 和  $H = 1000$  nm) 但不同取向 (旋转角度  $\theta = \Phi(x, y)/2$ ) 的  $\text{TiO}_2$  纳米柱, 利用纳米柱产生的  $2\theta$  的 PB(几何) 相位可实现所需的相位轮廓, 部分纳米柱的排列情况如图 3(b) 下图所示. 然后采用 Lumerical FDTD 软件仿真得到该  $\text{TiO}_2$  超表面在工作波长  $\lambda = 530$  nm 的圆偏振光和线偏振光分别入射下, 焦平面上交叉偏振分量的强度分布, 如图 2(c) 第 1 行所示. 为了验证结果的准确性, 进一步采用菲涅耳-基尔霍夫衍射积分 (F-K integral) 方法<sup>[50]</sup>, 将  $\text{TiO}_2$  纳米柱看作携带调制相位  $\Phi(x, y)$  的点源, 并且考虑到不同旋向的  $\text{TiO}_2$  纳米柱阵列透射率均高达 0.98 (图 1(f)), 计算的过程中将点源的出射场振幅设置为 1. 模拟得到的超表面在圆偏振光和线偏振光分别入射下的强度分布, 如图 2(c) 第 2 行所示, 和 FDTD 软件计算结果对比发现二者吻合很好并均符合理论预期: 在 RCP 光照射下, 均可观察到 7 个清晰的焦点; 当使用水平偏振的线偏振光 ( $\beta = 0$ ,  $\beta$  为入射光偏振方向和  $x$  轴的夹角) 入射时, 由于焦点的偏振旋

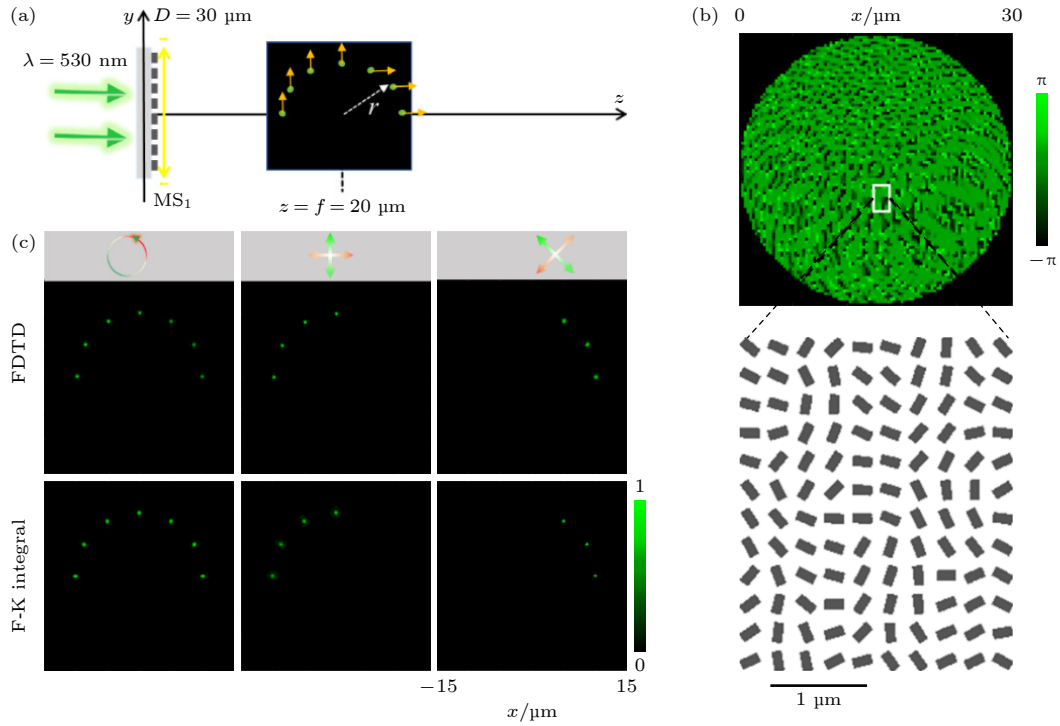


图 2 (a) 在焦平面  $z = f = 20 \mu\text{m}$  生成 7 个矢量焦点的超构透镜示意图, 每个焦点在水平 LP 光入射时的偏振方向如黄色箭头所示; (b) 超构透镜相位分布  $\Phi(x, y)$ (上) 和依照  $\theta = \Phi(x, y) / 2$  的旋向进行排列的纳米棒 (下); (c) 不同偏振光入射 (第 1 列为 RCP, 第 2, 3 列为 LP) 情况下, 分别利用 FDTD(上) 和 F-K integral(下) 方法在焦平面上计算得到的强度分布图

Fig. 2. (a) A metalens for generating seven vectorial foci along a semicircle at focal plane  $z = f = 20 \mu\text{m}$ , the polarization distribution for the foci upon the illumination of a horizontal LP light beam; (b) the phase profile (top) and the details of arrangement of each  $\text{TiO}_2$  nanorods ( $\theta = \Phi(x, y) / 2$ , bottom) of the metalens; (c) intensity distributions at focal plane under different incident polarization states (RCP for the 1<sup>st</sup> column and LP for other columns), simulated by FDTD (top) and F-K integral (bottom).

转角为  $\phi_m - \beta = \phi_m$  (黄色箭头), 当提取垂直偏振的光时, 根据马吕斯定律, 则只有偏振旋转角度为  $\phi_m = \pi/2$  编码的焦点 (左边四个焦点) 能够清晰可见, 而  $\phi_m = 0$  编码的右边三个焦点则消失; 当入射偏振光方向旋转到  $\beta = \pi/4$  时, 则只有偏振旋转角度为  $\phi_m = 0$  编码的焦点 (右边 3 个焦点) 能够清晰可见. 因此根据随入射光动态调制的光强分布, 可实现信息加密. 但是为了提升信息容量, 偏振结构焦点数目和个数及复杂性提升, 各偏振结构间的串扰将比较严重, 增加超表面的面积可有效减少串扰 (串扰分析见补充材料图 S1 (online)), 然而用 FDTD 软件对大面积超表面进行仿真需要高性能的计算机, 并耗费大量的时间, 因此本文接下来的模拟计算均采用菲涅耳-基尔霍夫衍射积分方法, 针对面积为  $360 \mu\text{m} \times 360 \mu\text{m}$  超表面 (通光孔径  $D = 360 \mu\text{m}$ , 离散化为  $1200 \times 1200$  个按周期  $P_x = P_y = 300 \text{ nm}$  排列的、振幅为 1 并携带调制相位  $\Phi(x, y)$  的点源) 进行模拟计算.

由于超构透镜产生的多个焦点被用作重构偏

振图像, 焦斑的大小和衍射情况将影响偏振图像的分辨率和质量. 为了确定不同焦平面上形成连续焦线的最佳焦点数目, 这与超构透镜的焦距  $f$  和通光孔径  $D$  有关. 这里  $D = 360 \mu\text{m}$  为常数, 因此最佳焦点数目主要由  $f$  决定. 因此以 7 段焦线 (长度均为  $15 \mu\text{m}$ ) 组成的偏振结构 (数字“8”, 偏振旋转角  $\phi_m$  均设置为 0) 为例, 设计了 24 个具有不同焦平面和每条焦线上的点数  $N$  不同的超构透镜, 并展示了在 RCP 光入射情况下, 超构透镜在各自焦平面上的强度分布图, 如图 3 所示. 这里超构透镜的设计包含以下几方面: 首先将超表面离散化为  $1200 \times 1200$  个周期为  $P_x = P_y = 300 \text{ nm}$  的像素点, 然后根据 (3) 式和 (4) 式计算出实现数字“8”所需的每个像素点的相位轮廓  $\Phi(x, y)$ , 然后将超表面上的每个像素点看作振幅为 1 并携带调制相位  $\Phi(x, y)$  的点源, 通过菲涅耳-基尔霍夫衍射积分获得焦平面上的强度分布 (后续 3 个超表面的设计和计算均按照此方法进行, 将不再赘述). 从图 3 计算结果可以看出, 当每条焦线上的点数  $N$  保持不变

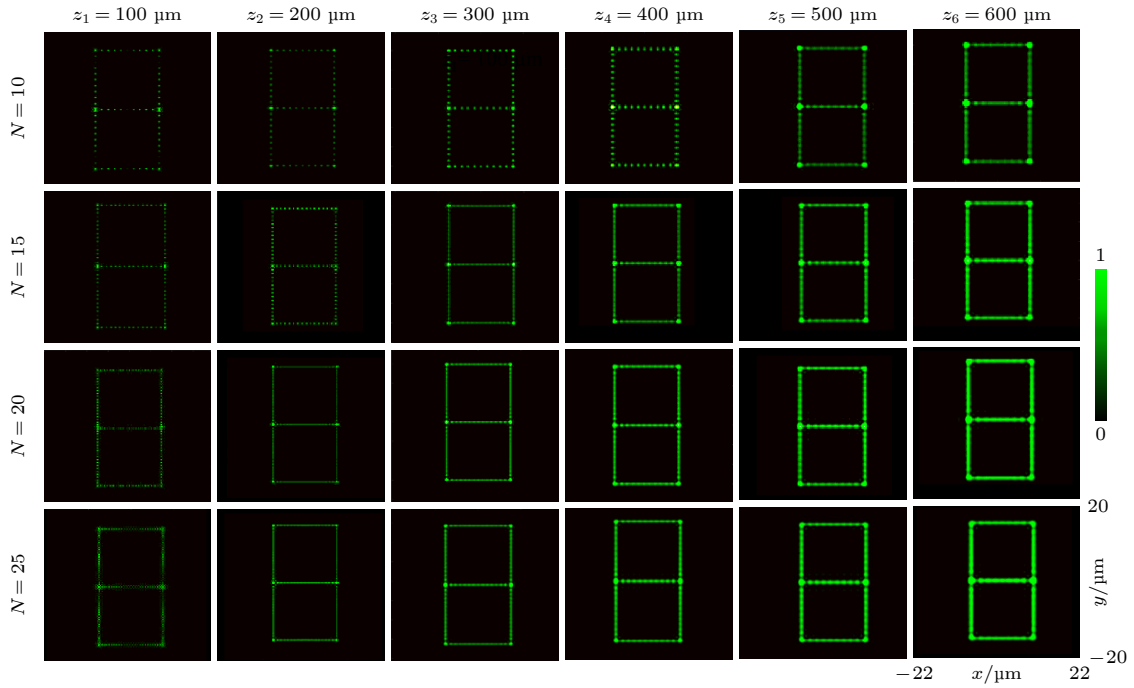


图 3 不同焦点数和不同焦距的 24 个超构透镜在其对应焦平面上的强度分布

Fig. 3. Intensity distributions of 24 metalenses with different numbers of foci and focal lengths at their respective focal planes.

时, 焦斑的大小会随着超构透镜焦距的增大而增大, 这种对焦距和通光孔径的依赖关系与透镜焦斑直径的经典公式  $d_0 = 2\lambda f/D$  相符. 当焦距一定, 焦点数增大到一定数值时, 焦点逐渐从不连续到形成连续焦线. 但随着焦点数目  $N$  增加, 将发生重叠, 也将对别的焦点产生串扰, 因此选择刚好形成连续焦线的焦点数目最合适. 多焦点设计可实现特定焦点大小分布, 通过合理的设计, 也可以使多焦点超构透镜中的每个焦点都具有特定的大小和强度分布, 最终分别找出了在 6 个不同的  $z$  平面上的偏振数字 8 的焦段所需的最佳点数, 在  $z_1 = 100 \mu\text{m}$  时最优点数为 25 个焦点; 在  $z_2 = 200 \mu\text{m}$  时最优点数为 20 个焦点; 在  $z_3 = 300 \mu\text{m}$  时最优点数为 15 个焦点;  $z_4 = 400 \mu\text{m}$  时最优点数为 15 个焦点;  $z_5 = 500 \mu\text{m}$  时最优点数为 15 个焦点;  $z_6 = 600 \mu\text{m}$  时最优点数为 15 个焦点.

在确定了偏振结构中焦线的空间分布和所需的焦点数目后, 进一步设计了入射光波长为  $\lambda = 530 \text{ nm}$ , 在 3 个焦平面  $z_1 = 100 \mu\text{m}$ ,  $z_2 = 300 \mu\text{m}$ ,  $z_3 = 500 \mu\text{m}$  分别产生 3 个偏振数字的超构透镜, 如图 4(a) 所示. 生成偏振数字的超构透镜的相位分布如图 4(b) 所示, 可以根据方程 (3) 获得. 这里, 数字 8 由 7 段焦线组成, 每条线的排列如图 4(e) 所示. 每条焦点线的长为  $15 \mu\text{m}$ , 其偏振数字上的

焦点数与图 2 所优化的最优结果一致. 通过对数字“8”上的每段焦线设计不同的偏振态, 在线偏振光入射情况下, 可产生不同的偏振数字. 以数字“2”为例, 有 5 条焦线组成, 如图 4(f) 我们只需将 1, 3, 4, 6, 7 焦段的偏振旋转角度设为  $\phi_m = 90^\circ$ , 2, 5 焦段的偏振旋转角度设为  $\phi_m = 0^\circ$ . 当用  $\lambda = 530 \text{ nm}$  的线偏振光照射超构透镜时, 在不同的观测平面  $z_1, z_2$  和  $z_3$  处会产生 3 个串扰较小的、具有定制偏振信息的数字“0”, “1”, “2”, 如图 4(b), 4(c) 所示, 仅第一焦平面的中心位置观察到较弱的串扰, 这里串扰的抑制一方面因为采用了优化的焦点数量, 另一方面是增大超表面面积能有效增加偏振结构上非串扰光的强度 (详细分析见补充材料 (online)). 如果采用入射波长  $\lambda = 530 \text{ nm}$  的 RCP 光照射整个超表面时, 所有的焦段都会显示出来, 在三个观察面都呈现数字“8”, 无法得到设计的数字信息. 当使用水平偏振 ( $\beta = 0$ ) 的 LP 光照射超表面时, 偏振数字上的偏振旋转角为  $\phi_m - \beta = \phi_m$  (黄色箭头), 当在三个观测平面上观察垂直偏振的光, 根据马吕斯定律, 则只有偏振旋转角度为  $\phi_m = \pi/2$  编码的偏振结构能够清晰可见, 而偏振旋转角度为  $\phi_m = 0$  编码的偏振结构则消失, 因此能够显示设计的数字, 展示了信息解密的过程. 这些具有预先设计偏振旋转角度的偏振数字的设计思想, 主要源

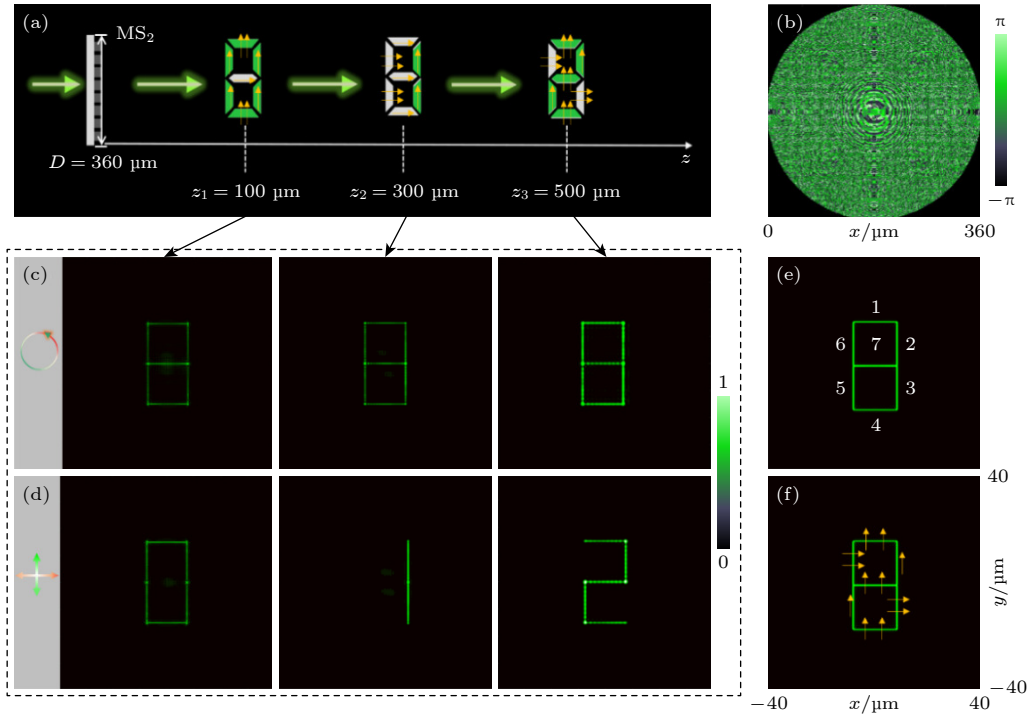


图 4 (a) 在纵向空间三个焦平面生成三个偏振数字的超构透镜; (b) 超构透镜的相位分布; (c) 圆偏振光入射, 在纵向三个焦平面生成的强度图; (d) 水平方向的线偏振光入射, 在纵向三个平面生成的偏振结构; (e) 设计的数字“8”由七条焦线组成; (f) 为生成偏振数字“2”而设计的每条焦线的偏振方向

Fig. 4. (a) A metasurface generating three different polarization-encoded numbers at three focal planes along the longitudinal direction; (b) phase profile of the metasurface. (c) Intensity distributions at three focal planes under circularly polarized light illumination; (d) polarization patterns generated at three focal planes under horizontally polarized light illumination; (e) designed number “8” composed of seven focal lines; (f) designed polarization distributions of each focal line for generating the number “2”.

于超构透镜的偏振旋转功能, 其焦距和偏振分布会随入射线性偏振方向而变化。

为了提升加密的信息容量, 进一步将两个具有正交偏振分布的偏振数字和字母级联在一起, 并定制在不同的角向和纵向位置, 如图 5(a) 所示. 当超构透镜被波长  $\lambda = 530 \text{ nm}$  的 LP 光照射时, 在不同的观察平面上会生成十个具有定制偏振信息的数字 (字母). 其中 8 个两两相互级联的偏振数字 (0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7) 位于  $z_1 = 100 \mu\text{m}$  的观察平面的不同方位, 两个级联的偏振字母 (A 和 B) 位于观察平面  $z_2 = 300 \mu\text{m}$ . 对于数字 (字母) 0, 1, 2, 3 和 A 初始偏振旋转角度为  $\phi_m = 0^\circ$ ; 对于数字 (字母) 4, 5, 6, 7 和 B 初始偏振旋转角度为  $\phi_m = \pi/2$ . 级联数字 (字母) 上的偏振角为  $\phi_m - \beta$  (黄色箭头), 可以通过改变入射线偏振光的方向 ( $\beta$ , 红色箭头) 进行动态控制, 并通过马吕斯定律, 在焦平面上探测不同的线偏振光方向 (与入射光线偏振方向垂直) 得到调制的光强度图案. 图 5(b), (d) 分别为超构透镜在右旋圆偏振光和线性偏振光照射时, 在两个不同观察平面上得到的数字 (字母) 的结果.

当右旋圆偏振光照射时, 可以在两个观察平面的不同位置获得两两级联的十个数字 (字母), 如图 5(b) 所示, 然而, 两个数字 (字母) 的叠加使得其难以清晰分辨, 这体现了一种加密效果.

如何解密呢? 当选择入射波长为  $\lambda = 530 \text{ nm}$  的水平方向偏振的线偏振光 ( $\beta = 0$  (红色箭头)) 时, 观察垂直方向偏振 (绿色箭头) 出射的线偏振光强度分布, 可分别在观察平面  $z_1 = 100 \mu\text{m}$  和  $z_2 = 300 \mu\text{m}$  上显示出预设偏振角度为  $\phi_m = \pi/2$  的数字 “4, 5, 6, 7” 和字母 “B”, 而预设偏振角度为  $\phi_m = 0$  的数字 “0, 1, 2, 3” 和字母 “A” 上的偏振态因与探测的偏振方向垂直而消光, 如图 5(c) 所示. 当入射和出射线偏振光的偏振方向角顺时针旋转  $\pi/4$ , 则偏振数字和字母上的偏振方向随之顺时针旋转  $\pi/4$ , 变为  $\phi_m - \pi/4$ , 此时初始偏振旋转角设置为  $\phi_m = 0$  的数字 “0, 1, 2, 3” 和字母 “A”, 因其偏振方向和出射线偏振光的相同, 分别显示在观察平面  $z_1 = 100 \mu\text{m}$  和  $z_2 = 300 \mu\text{m}$  处, 如图 5(d) 所示. 这些结果验证了超表面沿光传播方向创建级联偏振结构的能力, 实现了高安全性的信息加密.

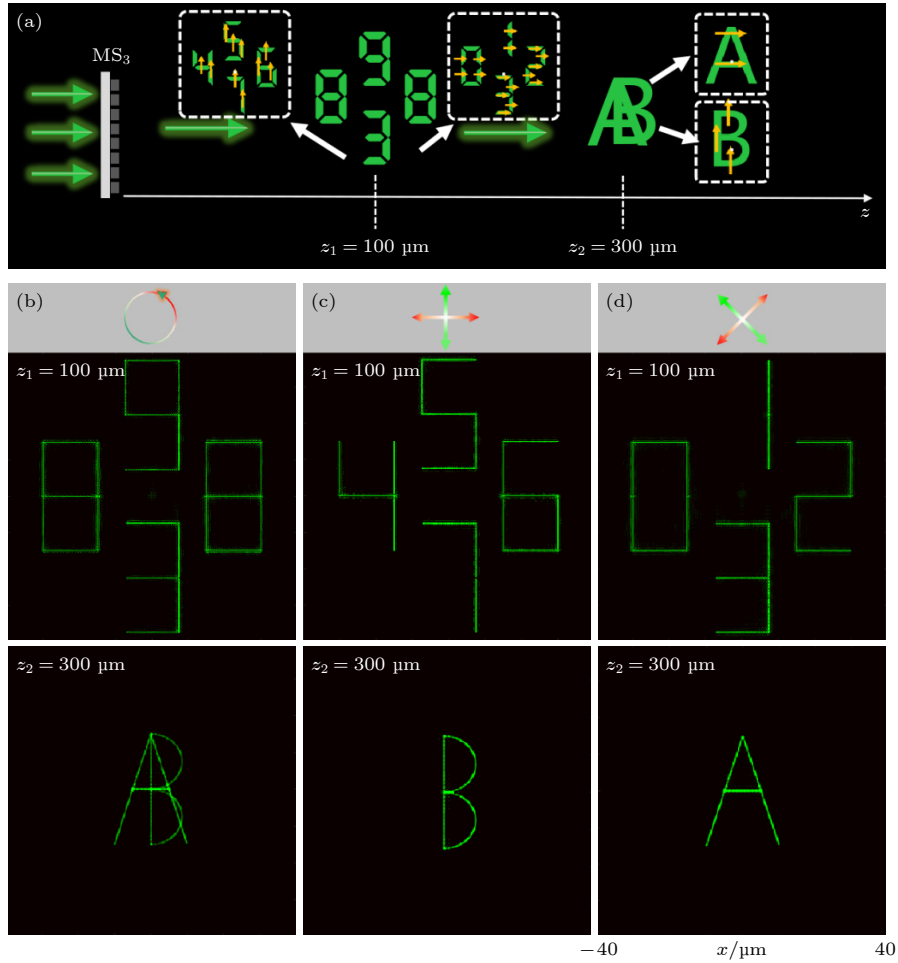


图 5 (a) 在纵向 2 个观察平面上创建 5 对级联偏振结构的超构透镜; (b) 圆偏振光入射时, 在纵向 2 个焦平面生成的强度图; (c) 线偏振光偏振方向角为  $\beta = 0$  时, 在纵向 2 个平面生成的偏振结构; (d) 线偏振光偏振方向角为  $\beta = \pi/4$  时, 在纵向 2 个平面生成的偏振结构

Fig. 5. (a) Metalens for creating five pairs of cascaded polarization structures at two focal planes; (b) intensity distributions at two focal planes under circularly polarized light illumination; (c) polarization distributions at two focal planes when illuminated by horizontally polarized light with  $\beta = 0$ ; (d) polarization distributions at two focal planes when illuminated by diagonally polarized light with  $\beta = \pi/4$ .

通过上述两个设计, 说明编码有定制偏振和波长信息的数字(字母), 只有利用正确的密钥——工作波长、入射线偏振方向、出射线偏振方向和观察距离才能解码, 这极大地提高了信息安全性和容量. 通过对超构透镜焦点数量和焦距的优化, 可以在一个超构透镜的更多观察平面上设计更多的偏振结构, 最大程度地提升信息容量. 图 6(a) 展示了通过超表面生成十个两两级联的偏振结构, 并将它们排列在纵向 5 个观察平面上. 图 6(a) 示意性地展示了每个图像的编码的初始偏振旋转角度  $\phi_m$  (黄色箭头). 对于“love”图像及相应字母上的焦点, 初始偏振旋转角度设置为  $\phi_m = 0^\circ$ ; 对于“star”图像及相应字母上的焦点, 初始偏振旋转角度设置为  $\phi_m = \pi/2$ . 图 6(b)—(d) 分别展示了在不同偏振态

的光照射下, 十个偏振结构在五个观察平面 ( $z_1 = 100 \mu\text{m}$ ,  $z_2 = 150 \mu\text{m}$ ,  $z_3 = 200 \mu\text{m}$ ,  $z_4 = 250 \mu\text{m}$  和  $z_5 = 300 \mu\text{m}$ ) 上的模拟强度分布. 当超表面被右旋圆偏振光照射时 (如图 6(b) 所示), 级联的“star”和“love”图像和字母会同时在 5 个观察平面上显示. 然而, 由于两个图像的叠加, 我们无法确切知道这些图像和字母具体是什么. 当入射偏振方向设置为  $0^\circ$  (如图 6(c) 所示) 时, 观察垂直方向偏振的线偏振光出射的光强度时, 则初始偏振旋转角度为  $\phi_m = 0^\circ$  的图像 (“love”) 会消失; 当入射偏振方向变为  $\pi/4$  (图 6(d)) 时, 此时偏振结构上的偏振方向变为  $\phi_m - \pi/4$ , 因此, 观察  $3\pi/4$  角度方向偏振的线偏振光出射的光强度时, 初始偏振旋转角度  $\phi_m = \pi/2$  的图像 (“star”) 会消失. 在多个观察平

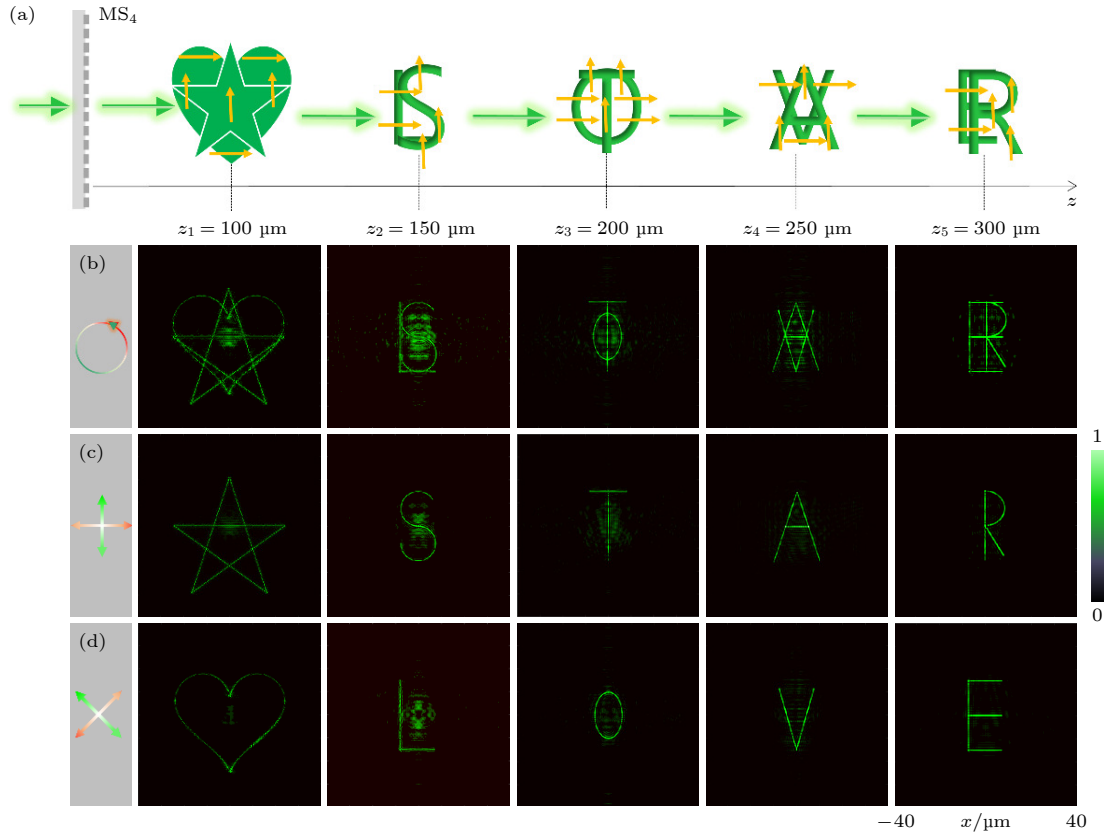


图 6 (a) 在沿纵向 5 个观察平面上创建五对级联偏振结构的超构透镜; (b) 圆偏振光入射情况下, 在 5 个观察平面生成的强度图; (c) 线偏振光偏振方向角为  $0^\circ$  时在纵向 5 个平面生成的偏振结果; (d) 线偏振光偏振方向角为  $\pi/4$  时在纵向 5 个平面生成的偏振结果

Fig. 6. (a) Metasurface creating five pairs of cascaded polarization structures at five focal planes along longitudinal direction; (b) intensity distributions at five focal planes under circularly polarized light illumination; (c) polarization distributions at five focal planes when illuminated by horizontally polarized light with  $\beta = 0$ ; (d) polarization distributions at five focal planes when illuminated by diagonally polarized light with  $\beta = \pi/4$ .

表 1 几种超表面信息加密技术在信息容量、安全性方面的对比

Table 1. Comparison of metasurface-based information encryption techniques in terms of information capacity and security.

文献	相关技术	信息容量	密钥	超表面
[51]	超表面波带片远场偏振全息加密	2通道	偏振+二维码	$D = 3000 \mu\text{m}$ , 单元结构不详
[37]	纳米印刷超表面近场反射的显示加密	4通道	振幅+偏振+波长	尺寸不详, 两种尺寸的单元结构
[24]	基于超构透镜偏振、色散操控的偏振数字加密	10通道	偏振+波长	$D = 360 \mu\text{m}$ , 单一尺寸的单元结构
This work	基于超构透镜的纵向可变、级联偏振结构加密	10通道	偏振+波长+位置	$D = 360 \mu\text{m}$ , 单一尺寸的单元结构

面上灵活可控地生成多个级联偏振结构, 在光学加密、图像隐写和彩色显示等应用中具有巨大潜力. 表 1 列出了本技术和近期报道的其他 3 项超表面显示加密技术 [24,37,51] 在信息容量、密钥复杂性及构建的超表面尺寸和所需单元结构数量方面的比较, 对比发现本技术在信息容量、安全性和超表面制备方面均存在一定的优势, 如果进一步结合超表面波长、振幅等多维度操控, 信息容量和安全性有望进一步提升.

## 4 结论

本文提出了一种基于单相位轮廓矢量焦点超构透镜的纵向、角向可变的级联偏振结构生成方法, 并应用于高安全性信息加密. 通过设计由单一结构尺寸但不同旋向的  $\text{TiO}_2$  纳米柱组成的几何相位超表面, 并优化偏振结构上的焦点数量, 展示了在不同纵向观察平面上生成多个级联偏振结构的能力. 模拟结果表明, 只有当使用特定的入射波

长、入射线偏振态、透射光线偏振态和观察位置作为密钥时,才能正确解码加密信息.该方法结合了超构透镜的多焦点偏振旋转、偏振结构设计及纵向级联控制,提升了信息容量和安全性.本文的研究为光学加密、图像隐写和多通道信息处理等领域提供了新的思路,展示了超构透镜在光学信息加密中的巨大潜力.

## 参考文献

- [1] Matoba O, Nomura T, Perez C E, Millan M S, Javidi B 2009 *Proc. IEEE* **97** 1128
- [2] Chen W, Javidi B, Chen X D 2014 *Adv. Opt. Photonics* **6** 120
- [3] Liu S, Guo C L, Sheridan J T 2014 *Opt. Laser Technol.* **57** 327
- [4] Jiao S M, Zhou C Y, Shi Y S, Zou W B, Li X 2019 *Opt. Laser Technol.* **109** 370
- [5] Liu S Y, Liu X H, Yuan J Y, Bao J 2021 *Res. (Wash D C)* **2021** 7897849
- [6] Yue F Y, Zhang C M, Zang X F, Wen D D, Gerardot B, Zhang S, Chen X Z 2018 *Light Sci. Appl.* **7** 17129
- [7] Zhang C M, Dong F L, Intaravanne Y, Zang X F, Xu L H, Song Z W, Zheng G X, Wang W, Chu W G, Chen X Z 2019 *Phys. Rev. Appl.* **12** 034028
- [8] Intaravanne Y, Chen X Z 2020 *Nanophotonics* **9** 1003
- [9] Zhao R Z, Li X, Geng G Z, Li X W, Li J J, Wang Y T, Huang L L 2023 *Nanophotonics* **12** 155
- [10] Yu N F, Patrice G, Mikhail A K, Aieta F, Tetienne J P, Capasso F, Gaburro Z 2011 *Science* **334** 333
- [11] Yu N F, Capasso F 2014 *Nat. Rev. Mater.* **13** 139
- [12] Chen W T, Alexander Y Zhu, Capasso F 2020 *Nat. Rev. Mater.* **5** 604-620
- [13] Yang R, Yu Q Q, Pan Y, Chen S, Li Z Y 2022 *Opto-Electronic Eng.* **49** 220177
- [14] Zheludev N I, Kivshar Y S 2012 *Nat. Mater.* **11** 917
- [15] Minovich A E, Miroschnichenko A E, Bykov A Y, Murzina T V, Neshev D N, Kivshar Y S 2015 *Laser Photonics Rev.* **9** 195
- [16] Fan Q B, Liu M Z, Zhang C, Zhu W Q, Wang Y L, Lin P C, Yan F, Chen L, Lezec H J, Lu Y Q, Agrawal A, Xu T 2020 *Phys. Rev. Lett.* **125** 267402
- [17] Li Z, Liu W, Cheng H, Choi D Y, Chen S, Tian J 2019 *Adv. Opt. Mater.* **7** 1900260
- [18] Bao Y J, Yu Y, Xu H F, Guo C, Li J T, Sun S, Zhou Z K, Qiu C W, Wang X H 2019 *Light. Sci. Appl.* **8** 95
- [19] Li Z F, Premaratne M, Zhu W R 2020 *Nanophotonics* **9** 3687
- [20] Overvig A, Alù A 2021 *Adv. Photonics* **3** 026002
- [21] Schlickriede C, Waterman N, Reineke B, Georgi P, Li G, Zhang S, Zentgraf 2018 *Adv. Mater.* **30** 1703843
- [22] Mueller J B, Rubin N A, Devlin R C, Devlin, Groever B, Capasso Federico 2017 *Phys. Rev. Lett.* **118** 113901
- [23] Ding F, Chang B D, Wei Q S, Huang L L, Guan X W, Sergey B I 2020 *Laser Photon. Rev.* **14** 2000116
- [24] Intaravanne Y, Ansari M A, Ahmed H, Chen X Z 2023 *Adv. Opt. Mater.* **12** 2203097
- [25] Song Q, Khadir S, Vézian S, Vézian X, Damilano B, Mierry P D, Chenot S, Brandli V, Genevet P 2021 *Sci. Adv.* **7** 11112
- [26] Zang X, Ding H, Intaravanne Y, Chen L, Peng Y, Xie J, Ke Q H, Balakin A V, Shkurinov A P, Chen X, Zhu Y, Zhuang S 2019 *Laser Photon. Rev.* **13** 1900182
- [27] Ansari M A, Ahmed H, Li Y, Wang G, Callaghan J E, Wang R, Downing J, Chen X 2024 *Light. Sci. Appl.* **13** 224
- [28] Sun P Z, Liu B H, Liu X, Zhang S Y, Shen D, Zhang Z G 2023 *Opt. Lett.* **48** 3083
- [29] Kim I, Jang J, Kim G, Lee J, Badloe T, Mun J, Rho J 2021 *Nat. Commun.* **12** 3614
- [30] Wang G C, Ahmed H, Ansari M A, Li Y, Zhang C M, Tian H, Li L, Chen X Z 2024 *Laser Photonics Rev.* **18** 2400323
- [31] Ahmed H, Ansari M A, Li Y, Zentgraf T, Mehmood M Q, Chen X 2023 *Nat. Commun.* **14** 3915
- [32] Lin D M, Fan P Y, Hasman E, Brongersma M L, Bron G 2014 *Science* **345** 298
- [33] Li H, Xu W H, Xu H, Song C Y, Tan Q, Yao J Q 2024 *J. Opt.* **26** 035102
- [34] Xu Y, Xu Q, Zhang X, Feng X, Lu Y, Zhang X, Kang M, Han J, Zhang W 2022 *Adv. Funct. Mater.* **32** 2207269
- [35] Yan L B, Zhu W M, Karim M F, Cai H, Gu A Y, Shen Z X, Chong P H J, Tsai D P, Kwong D L, Qiu C W, Liu A Q 2018 *Adv. Opt. Mater.* **6** 1800728
- [36] Ren R Y, Li Z L, Deng L G, Shan X, Dai Q, Guan Z Q, Zheng G X, Yu S H 2021 *Nanophotonics* **10** 2903
- [37] Cao Y, Tang L L, Li J Q, Lee C K, Dong Z G 2022 *Nanophotonics* **11** 3365
- [38] Wang R X, Han J, Liu J L, Tian H, Sun W M, Li L, Chen X Z 2020 *Opt. Lett.* **45** 3506
- [39] Wang R X, Intaravanne Y, Li S T, Han J, Chen S M, Liu J L, Zhang S, Li L, Chen X Z 2021 *Nano Lett.* **21** 2081
- [40] Intaravanne Y, Wang R, Ahmed H, Ming Y, Zheng Y, Zhou Z K, Li Z, Chen S, Zhang S, Chen X 2022 *Light Sci. Appl.* **11** 302
- [41] Li Y, Muhammad A A, Hammad A, Wang R, Wang G C, Chen X Z 2023 *Sci. Adv.* **9** eadj6675
- [42] Zhao R Z, Sain B, Wei Q S, Tang C C, Li X W, Thomas W, Huang L L, Wang Y T, Zentgraf T 2018 *Light Sci. Appl.* **7** 95
- [43] Song Q H, Baroni A, Sawant R, Peinan N, Brandli V, Chenot S, Vézian S, Damilano B, Mierry P, Khadi S, Ferrand P 2020 *Nat. Commun.* **11** 2651
- [44] Guo X, Zhong J, Li B, Qi S, Li Y, Li P, Wen D, Liu S, Wei B, Zhao J 2020 *Adv. Mater.* **34** 2103192
- [45] Wen D D, Cadusch J J, Meng J, Crozier K B 2021 *Nano Lett.* **21** 1735
- [46] Ning M H, Zhong H Z, Gu Z, Zhang L E, Qu N, Jun D, Li T, Li L 2025 *Nanophotonics* **14** 495
- [47] Cao Y, Tang L L, Li Q, Lee C K, Dong Z G 2023 *Small* **19** 2206319
- [48] Kim H, Jung J, Shin J 2024 *Adv. Mater.* **36** 2406717
- [49] Wang R X, Han J, Liu J L, Tian H, Sun W M, Li L, Chen X Z 2020 *Opt. Express* **45** 3506
- [50] Zhang Y, Liu W, Gao J, Yang X 2018 *Adv. Opt. Mater.* **6** 1701228
- [51] Xia T, Xie Z W, Yuan X C J 2023 *Chin. J. Lasers* **50** 212 (in Chinese) [夏天, 谢振威, 袁小聪 2023 中国激光 **50** 212]

# Polarization structures generated through metalenses with vectorial foci for high-security optical encryption\*

ZHAO Shuaifu    ZHONG Facheng<sup>†</sup>    YU Qunxing    YANG Tian  
SHAO Li    YU Zhanjun    LI Yan<sup>‡</sup>

(School of Materials, Zhengzhou University of Aeronautics, Zhengzhou 450046, China)

(Received 20 April 2025; revised manuscript received 5 June 2025)

## Abstract

Optical encryption technologies show significant potential applications in information security due to their advantages of parallel processing, large capacity, and low power consumption. Polarization, as an important degree of freedom of light, has attracted extensive research interest in optical encryption through polarization manipulation and multiplexing. However, current polarization control methods based on pixelated or interleaved metasurfaces still face significant challenges, including fabrication complexity and inevitable crosstalk caused by coupling between the neighboring structures, which limits the number of achievable multiplexing channels. A novel encryption method featuring longitudinal variability and cascaded polarization structures realized by metalenses with vectorial foci is proposed in this work. The intensity distributions on different observation planes are simulated using the Fresnel–Kirchhoff diffraction integral. Based on the geometric phase principle, the designed metalens consisting of TiO<sub>2</sub> nanopillars with identical dimensions but spatially variant orientation angles, can generate multiple vectorial foci in different observation planes, reconstructing cascaded polarization structures. Here, any two cascaded polarization structures are encoded with mutually orthogonal polarization rotation angles. As the polarization direction of incident linearly polarized light changes, the polarization distribution encoded on the polarization structures can be dynamically modulated, consequently enabling ten-channel information encryption through polarization-dependent intensity redistribution. The encrypted information can only be decoded using the correct keys (incident wavelength, incident polarization state, output light polarization state, and observation position). This method integrates polarization rotation, polarization structure design, and longitudinal/cascaded control, significantly enhancing information capacity and security. It offers promising applications across various fields, such as optical display, encryption, and anti-counterfeiting.

**Keywords:** metalens, dielectric metasurface, polarization manipulation, optical encryption

**PACS:** 42.25.Ja, 42.30.-d, 42.70.-a

**DOI:** [10.7498/aps.74.20250508](https://doi.org/10.7498/aps.74.20250508)

**CSTR:** [32037.14.aps.74.20250508](https://cstr.cn/32037.14.aps.74.20250508)

---

\* Project supported by the Key Research Projects of Colleges and Universities of Henan Province, China (Grant No. 23ZX018), the Key Scientific and Technological Projects of Henan Province, China (Grant Nos. 252102211125, 242102230072, 242102520007, 252102230076, 242102240087), the Innovation and Entrepreneurship Training Plan for University Students, China (Grant Nos. 202410485056, 202410485041), the Scientific Research Team Plan of Zhengzhou University of Aeronautics, China (Grant No. 24ZHTD01002), and the Key Research Project of Colleges and Universities in Henan Province, China (Grant No. 25B140011).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [zfc@zua.edu.cn](mailto:zfc@zua.edu.cn)

<sup>‡</sup> Corresponding author. E-mail: [yanli@zua.edu.cn](mailto:yanli@zua.edu.cn)

## 基于矢量焦点超构透镜的偏振结构及高安全性光学加密

赵帅富 钟发成 于群星 杨天 邵立 于占军 李艳

### Polarization structures generated through metalenses with vectorial foci for high-security optical encryption

ZHAO Shuaifu ZHONG Facheng YU Qunxing YANG Tian SHAO Li YU Zhanjun LI Yan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 174201 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20250508

CSTR: 32037.14.aps.74.20250508

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250508>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 超透镜聚焦光环的产生及其在冷分子光学囚禁中的应用

Generation of focusing ring of metalens and its application in optical trapping of cold molecules

物理学报. 2021, 70(16): 167802 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210443>

#### 简单光学成像技术及其研究进展

Research advances in simple and compact optical imaging techniques

物理学报. 2023, 72(8): 084205 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230092>

#### 基于深度学习的相位截断傅里叶变换非对称加密系统攻击方法

Attacking asymmetric cryptosystem based on phase truncated Fourier transform by deep learning

物理学报. 2021, 70(14): 144202 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20202075>

#### 基于低损光学相变和超透镜的可控多阱光镊

Controllable multi-trap optical tweezers based on low loss optical phase change and metalens

物理学报. 2023, 72(2): 027801 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221794>

#### 基于超构表面多通道大容量完美矢量涡旋光束的产生及调控研究

Generation and independent-manipulation of multi-channel high-capacity perfect vector vortex beams based on geometric metasurfaces

物理学报. 2025, 74(6): 064201 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241725>

#### 长红外双波长共聚焦超透镜设计研究

Design and research of long-infrared dual-wavelength confocal metalens

物理学报. 2023, 72(1): 014208 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221752>