

超表面透镜偏振可切换的多通道功能复用

刘小东¹, 朱亦鸣²

(1. 上海尼博电子科技有限公司, 上海 201615;
2. 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要:超表面概念的提出为研究平面化和超薄的光学元器件提供了一种全新的设计思路。传统的几何相位型的超表面透镜受制于偏振锁定的限制, 阻碍了其实现多功能的复用。文章提出了一种通过几何相位实现超表面透镜偏振解耦的方法。进一步, 利用该方法作者实现了超表面聚焦透镜在纵向以及纵向和横向实现多通道功能(如聚焦光斑和聚焦涡旋)的复用和偏振可切换特性。相关研究为实现多功能可集成的平面化器件提供了新的研究思路。

关键词:超表面; 超透镜; 聚焦; 涡旋

中图分类号: O436.1

文献标识码: A

Metalens for polarization-switchable multi-functions multiplexing in multiple channels

LIU Xiao-Dong¹, ZHU Yi-Ming²

(1. Shanghai Nibo Electronic Technology Co., Ltd, Shanghai 201615, China;
2. School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Metasurface provide a new platform for studying planar and ultrathin optical components. The traditional geometric-phase-based metalens are limited to the polarization locking, which inevitably hinders its function in multiplexing of multiple functions. Herein, an approach based on the geometric phase is proposed to realize polarization decoupling of metalens. This method can be applied to design metalens that enables functionalities of polarization switchable multi-functions (focusing and vortex beam etc. . .) multiplexing in the longitudinal direction or both the longitudinal and transverse directions. The results provide a new avenue for multifunctional integrated planar components.

Key words: Metasurface, metalens, focusing, vortex

引言

透镜作为光学系统中一类必不可少的器件, 使其在聚焦、成像和波前调控等方面具有重要的应用。传统的透镜的功能实现均基于光在其中传播形成的传播型相位实现, 导致传统透镜的尺寸和体积相对较大。基于传统透镜等光学元器件构建的光学系统, 难以进一步实现系统的小型化和集成化; 迫切需要突破瓶颈, 发展新的原理, 实现新型的光学器件, 进一步实现小型化和集成化的光学系统。

超表面, 顾名思义是一类二维的超材料结构, 其结构非常薄; 通过利用二维结构在界面处的突变

相位, 实现电磁波的振幅、相位和偏振调控; 为“平面化”的超薄器件的实现提供了一个新的设计平台^[1-8]。几何相位型超表面通常由周期性的各向异性金属/介质单元构成; 每个单元等效为一个亚波长的二分之一波片; 通过旋转每个单元的亚波长的二分之一波片, 人们可以有效地控制电磁波的波前^[9-13]。由于几何相位型超表面只需一次扫描设计其单元结构并通过旋转每个各向异性介质单元获得波前调控的几何位相, 使得其在结构设计、样品制备和功能实现等方面具有得天独厚的优势。近年来几何相位型超表面在设计超透镜研究方面得到了广泛的关注和研究; 2012 年英国伯明翰大学张

霜课题组首次提出了基于几何相位型超表面的金属基超透镜^[14],开启了超薄“平面化”的透镜研究。2016年美国哈佛大学 Capasso 小组利用二氧化钛各向异性介质超表面^[15],实现了近乎衍射极限的聚焦光斑,开启了高效、介质型的超表面透镜研究。随后,南京大学、哈佛大学等研究小组通过引入色散补偿方案,各自实现了消色差的超表面透镜^[16-17]。此外,基于相位、偏振联合调控的超表面透镜也已被提出^[18-19];同时,具有三维大景深成像功能的超表面透镜阵列也被提出并验证^[20]。近年来,超表面透镜阵列还被应用于量子纠缠光源的产生等方面^[21]。尽管超表面透镜(尤其几何相位型超表面)已经有了众多的发展和应用,几何相位型超表面透镜存在偏振锁定(即左旋和右旋锁定)和单通道功能实现等问题。尽管人们提出了几何相位联合传播相位的方法实现了偏振锁定的问题(如美国哈佛大学 Capasso 小组实现了正交自旋态全息的解耦功能^[22];西北工业大学赵建林小组实现了正交自旋态的涡旋扭结和涡旋线的解耦功能^[23];南京大学祝世宁院士课题组实现高效自旋解耦的全息^[24]等)。然而,此类方法大多集中于各个偏振态的单通道功能实现,而且需要通过大量的数值扫描过程实现结构的优选。

本文提出了一种偏振解耦的几何相位型超表面透镜的方法。该方法直接利用几何相位(而非几何相位联合传播相位)构建左旋和右旋偏振光所需的不同功能的总相位,从而避免了大量的数值扫描过程;通过在几何相位型超表面透镜上加载该“总相位”实现偏振解耦的几何相位型超表面透镜。进一步,在解耦的几何相位型超表面透镜上加载单个偏振态实现多个通道的电磁波波前调控,实现多条通道的偏振解耦的几何相位超表面透镜。在此基础上,本文实现了几何相位超表面透镜偏振可切换功能的多通道电磁波波前操控和功能复用。相关研究将在多功能、多通道可集成的“平面”器件和系统集成等方面有着潜在的应用。

1 模拟方法

如图1所示为本文所设计的几何相位型超表面透镜:图1(a)为几何相位型超表面实现纵向偏振可切换的多通道波前调控及功能复用的示意图;图1(b)几何相位型超表面实现纵向和横向偏振可切换的多通道波前调控及功能复用的示意图。图1(a)

和1(b)均可以看出,其结构为形状相同的各向异性结构,不同之处在于每个结构的旋转方向不一致;所以,我们设计的超表面结构为几何相位型的超表面。其中,超表面上的每一个单元结构均可以认为是一个准二分之一波片。如图1(c)所示,为左旋圆偏振的电磁波和一个单元结构作用后的偏振转化效率:即红色曲线为右旋圆偏振的电磁波透射率。可以看出在 65.7 THz 频点的右旋圆偏振电磁波透射率为 99%;这意味着所设计的各向异性介质结构在 65.7 THz 频点转化率最高。对应的各向异性所引起的长轴和短轴之间的相位差如图1(d)所示;其在 65.7 THz 频点的相位差为 183°。由图1(c)和1(d)可以证明,本文所设计的各向异性介质结构在 65.7 THz 频点为一准二分之一波片。相应的结构(见图1(d)的插入图)参数为: $P=1.1 \mu\text{m}$, $L=0.85 \mu\text{m}$, $W=0.4 \mu\text{m}$, $H_1=H_2=5 \mu\text{m}$, 所用的材料为硅($\epsilon=11.5$)。对于一束左旋圆偏振的电磁波作用至所设计的几何相位型超聚焦透镜,其所需的波前调控相位为:

$$\varphi_L(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + f_i^2} - f_i, \quad (1)$$

其中, λ 为波长。 (x_i, y_i, f_i) 为所调制的左旋圆偏振的电磁波形成右旋圆偏振的电磁波聚焦光斑的位置。同理,对于一束右旋圆偏振的电磁波作用至所设计的几何相位型超聚焦透镜,其所需的波前调控相位为

$$\varphi_R(x, y) = -\left(\frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2 + f_j^2} - f_j \right), \quad (2)$$

其中, λ 为波长。 (x_j, y_j, f_j) 为所调制的右旋圆偏振的电磁波形成左旋圆偏振的电磁波聚焦光斑的位置。如果所设计的几何相位型超聚焦透镜能够对入射的左/右旋圆电磁波实现调控形成聚焦的右/左旋圆聚焦的涡旋波束(对应的拓扑荷分别为 l_L, l_R), 相应的波前调控相位分别为

$$\varphi_{LV}(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + f_i^2} - f_i + l_L \phi, \quad (3)$$

$$\varphi_{RV}(x, y) = -\left(\frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2 + f_j^2} - f_j \right) - l_R \phi, \quad (4)$$

其中, ϕ 为对应的方位角。通过任意叠加上四类相位至所设计的超表面器件之中,我们便可以实现相应的偏振可切换和多通道复用的波前调控功能。

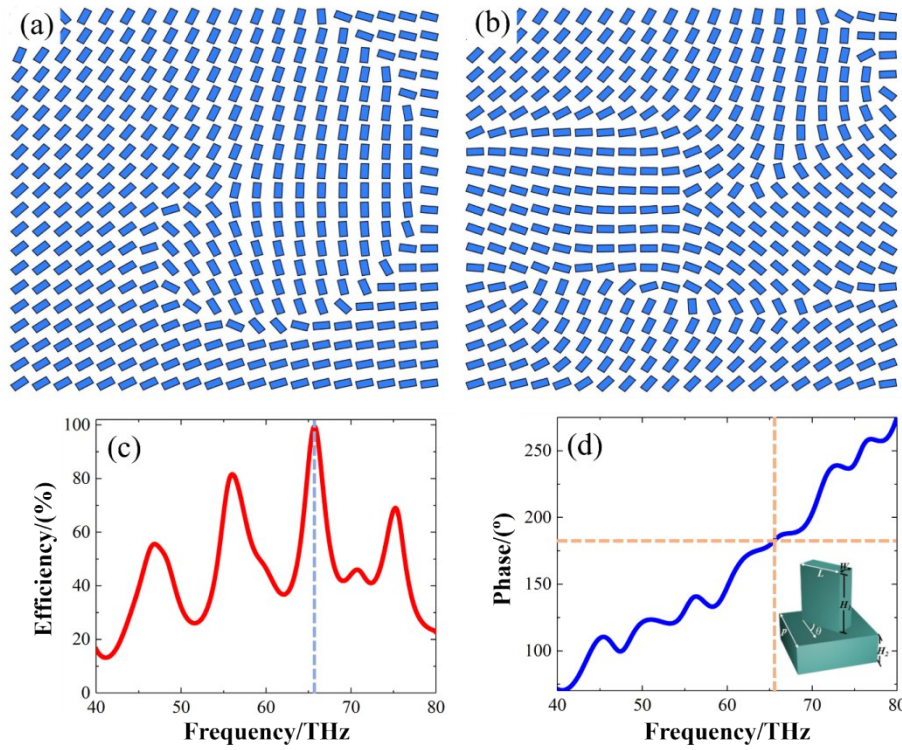


图1 本文所设计的几何相位型超表面透镜:(a)几何相位型超表面实现纵向偏振可切换的多通道波前调控及功能复用;(b)几何相位型超表面实现纵向和横向偏振可切换的多通道波前调控及功能复用;(c)单元结构各向异性介质的偏振转化效率;(d)单元结构各向异性介质的长轴和短轴之间的相位差;其中的插入图为单个结构的示意图

Fig. 1 Geometric-phase-based metalens in this paper: (a) Geometric-phase-based metasurface realizing polarization-switchable wavefront controlling and multi-functions multiplexing in the longitudinal direction; (b) Geometric-phase-based metasurface realizing polarization-switchable wavefront controlling and multi-functions multiplexing in both longitudinal and transverse directions; (c) Polarization conversion efficiency of anisotropic metasurface unit; (d) Phase difference between the long and short axes of anisotropic metasurface units, where the insertion chart is a schematic of single metasurface unit

2 偏振可切换的多通道功能复用

2.1 横向偏振可切换的多通道复用

首先,我们通过融合方程(1)~(4)中相关功能,验证超表面透镜的横向偏振可切换的多通道复用功

能。相应的超表面透镜所需的波前调控相位满足:

$$\varphi_{LV}(x, y) = \arg[A \exp(i\varphi_{L1}) + B \exp(i\varphi_{L2}) + C \exp(i\varphi_{RV1}) + D \exp(i\varphi_{RV2})] \quad (5)$$

其中, A, B, C, D 为振幅, 相应的相位为

$$\begin{cases} \varphi_{L1}(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + f_1^2} - f_1 \\ \varphi_{L2}(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + f_2^2} - f_2 \\ \varphi_{RV1}(x, y) = -\left(\frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{(x - x_{11})^2 + (y - y_{11})^2 + f_{11}^2} - f_{11}\right) - l_{RV1}\phi \\ \varphi_{RV2}(x, y) = -\left(\frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{(x - x_{22})^2 + (y - y_{22})^2 + f_{22}^2} - f_{22}\right) - l_{RV2}\phi \end{cases} \quad (6)$$

相应的相位参数为: $x_1 = x_2 = y_1 = y_2 = 0, x_{11} = x_{22} = y_{11} = y_{22} = 0, f_1 = f_{11} = 30 \mu\text{m}, f_2 = f_{22} = 70 \mu\text{m}, l_{RV1} = l_{RV2} = 1, A=C=1, B=D=1.1$ 。

图2给出了方程(5)、(6)相位对入射电磁波调控后的场和相位分布。如图2(a)所示,为所设计的超

表面透镜在左旋圆偏振态电磁波(频率为65.7 THz)的照射下形成于 x - z 平面上的电场强度分布;相应的纵向聚焦光斑的聚焦效率为30.25%。可以看出,在所设计的透镜后方,呈现出两个聚焦光斑:其中一个聚焦光斑的位置为 $(0, 0, 28.5 \mu\text{m})$, 而另一

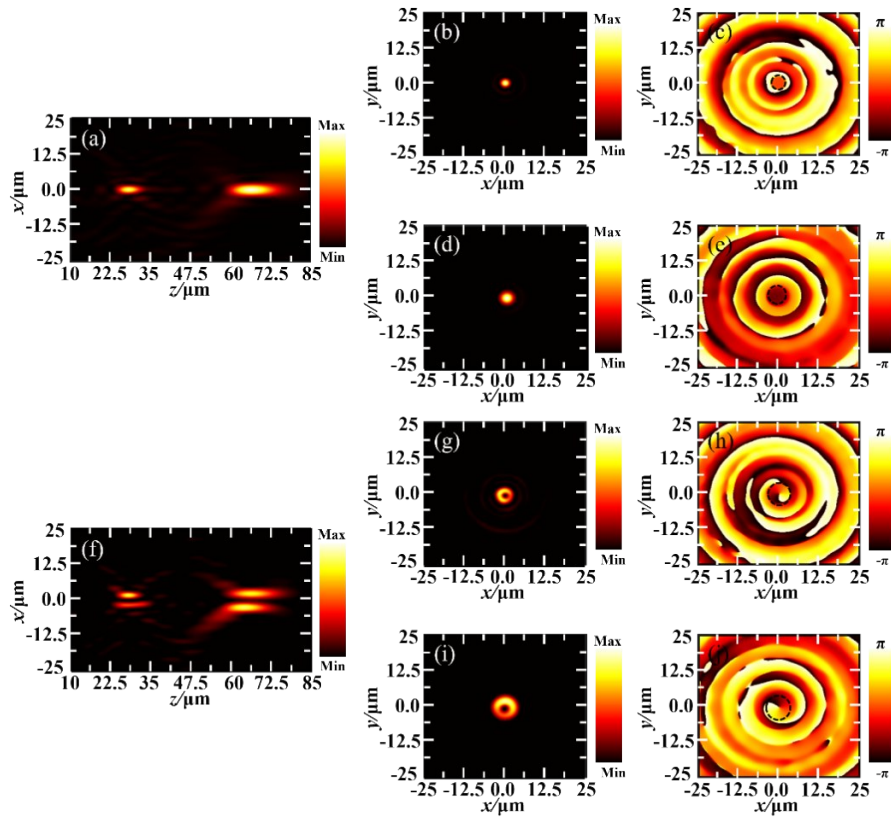


图2 (a)-(e)左旋圆偏振入射情况下在透镜后方的电场强度和相位分布;(f)-(j)右旋圆偏振入射情况下在透镜后方的电场强度和相位分布;(a)在透镜后方 x - z 平面上的电场强度分布;(b), (d)对应焦平面($z=28.5 \mu\text{m}$ (b) 和 $z=65 \mu\text{m}$ (d))上的电场强度分布;(c), (e)对应焦平面($z=28.5 \mu\text{m}$ (b) 和 $z=65 \mu\text{m}$ (d))上的相位分布。(f)在透镜后方 x - z 平面上的电场强度分布;(g), (i)对应焦平面($z=28.5 \mu\text{m}$ (g) 和 $z=65 \mu\text{m}$ (i))上的电场强度分布;(h), (j)对应焦平面($z=28.5 \mu\text{m}$ (h) 和 $z=65 \mu\text{m}$ (j))上的相位分布

Fig2 (a)-(e) Distribution of electric field intensity and phase of the metalens under left-handed circularly-polarized (LCP) incidence; (f)-(j) Distribution of electric field intensity and phase of the metalens under right-handed circularly-polarized (RCP) incidence; (a) Distribution of electric field intensity in the x - z plane under left-handed circularly-polarized (LCP) incidence; (b), (d) Distribution of electric field intensity in the x - z plane at $z=28.5 \mu\text{m}$ (b) and $z=65 \mu\text{m}$ (d); (c), (e) Distribution of electric field phase in the x - z plane at $z=28.5 \mu\text{m}$ (c) and $z=65 \mu\text{m}$ (e); (f) Distribution of electric field intensity in the x - z plane under right-handed circularly-polarized (RCP) incidence; (g), (i) Distribution of electric field intensity in the x - z plane at $z=28.5 \mu\text{m}$ (g) and $z=65 \mu\text{m}$ (i); (h), (j) Distribution of electric field phase in the x - z plane at $z=28.5 \mu\text{m}$ (h) and $z=65 \mu\text{m}$ (j)

个聚焦光斑的位置为 $(0, 0, 65 \mu\text{m})$ 。相应的理论设计的焦距分别为 $30 \mu\text{m}$ 和 $70 \mu\text{m}$;理论和数值仿真的焦距略有微小失配。其原因如下:参与数值仿真的结构数量(受制于仿真平台的限制,本文采用了 200×200 个各向异性结构单元进行数值仿真)不足够多所导致;也就是说,如果有足够多的各向异性结构单元或者当结构数量趋于无穷多时,将越接近理论设置的焦距。图2(b), 2(d)给出了数值计算的在 x - y 平面($z=28.5 \mu\text{m}$ 和 $z=65 \mu\text{m}$)的电场强度分布。可以清晰地看到两个圆形的聚焦光斑分别出现在其相应的聚焦平面上;相应的相位分布,如图2(c), 2(e)所示。当入射电磁波的偏振态

为右旋圆偏振态时,透镜的后方将出现两个分离的聚焦涡旋(如图2(f)所示);相应的纵向聚焦涡旋的聚焦效率为 30.23% ;其中一个聚焦涡旋的位置为 $(0, 0, 28.5 \mu\text{m})$, 而另一个聚焦涡旋的位置为 $(0, 0, 65 \mu\text{m})$ 。图2(g), 2(i)分别为两个焦平面($z=28.5 \mu\text{m}$ 和 $z=65 \mu\text{m}$)处的电场强度分布,可以清晰地看到两个聚焦涡旋;其相应的拓扑荷分别为 $+1$, $+1$ (如图2(h), 2(j)所示)。以上展示的功能表明,所设计的超表面透镜能够实现偏振可切换的功能;同时,相应的入射左旋或者右旋偏振态的电磁波均实现多个通道的功能(如两通道聚焦和两通道涡旋)。

2.2 横向和纵向偏振可切换的多通道复用

所设计的超表面透镜不仅能够实现横向偏振可切换的多通道复用功能,还能够实现横向和纵向的偏振可切换的多通道复用功能。相应的相位满足方程(5)和(6);结构参数设置为: $x_1 = x_2 = y_1 = y_2 = 0$, $x_{11} = x_{22} = y_{11} = y_{22} = 0$, $f_1 = f_2 = 50 \mu\text{m}$, $f_{11} = 30 \mu\text{m}$, $f_{22} = 70 \mu\text{m}$, $l_{\text{RV1}} = 2$, $l_{\text{RV2}} = 1$, $A = B = C = 1$, $D = 1.15$ 。如图3所示为相应的电场和相位分布。图3(a)为左旋圆偏振态电磁波与所设计的透镜相互作用后的电场强度分布,可以看到产生了两个横向对称分布的聚焦光斑(其空间位置为 $(15 \mu\text{m}, 0, 47.5 \mu\text{m})$ 和 $(-15 \mu\text{m}, 0, 47.5 \mu\text{m})$);相应的聚焦效率为30.24%。相应的焦平面电场强度和相位分布如图3(b)和3(c)所示。当入射电磁波的偏振态改为右旋圆偏振态时,超表面透镜在纵向方向上产生了两个纵向分布的聚焦涡旋(如图3(d)所示);相应的聚焦效率为30.25%。两个纵向

分布的涡旋聚焦位置分别为 $(0, 0, 27.5 \mu\text{m})$ 和 $(0, 0, 65 \mu\text{m})$ 。相应的焦平面电场强度和相位分布如图3(e), 3(g)和3(f), 3(h)所示:可见处于 $(0, 0, 27.5 \mu\text{m})$ 的聚焦涡旋的拓扑荷为+2;而处于 $(0, 0, 65 \mu\text{m})$ 的聚焦涡旋的拓扑荷为+1。以上数值计算的场分布表明:我们所设计的超表面透镜既能实现横向两通道聚焦,也能实现纵向两通道的涡旋;同时,通过改变入射电磁波的偏振态,即可以实现纵向和横向多通道功能的切换。

3 结论

本文提出了一类超表面透镜偏振解耦的方法—即通过同时加载入射左旋圆和右旋圆偏振态电磁波的波前调控相位,实现超表面透镜的偏振解耦功能。所设计的超表面透镜在数值仿真上实现了横向多通道功能的可切换操作以及横向和纵向功能的可切换操作。相关研究将会在多功能、多通道、超薄“平面化”的器件设计和系统集成等方面带

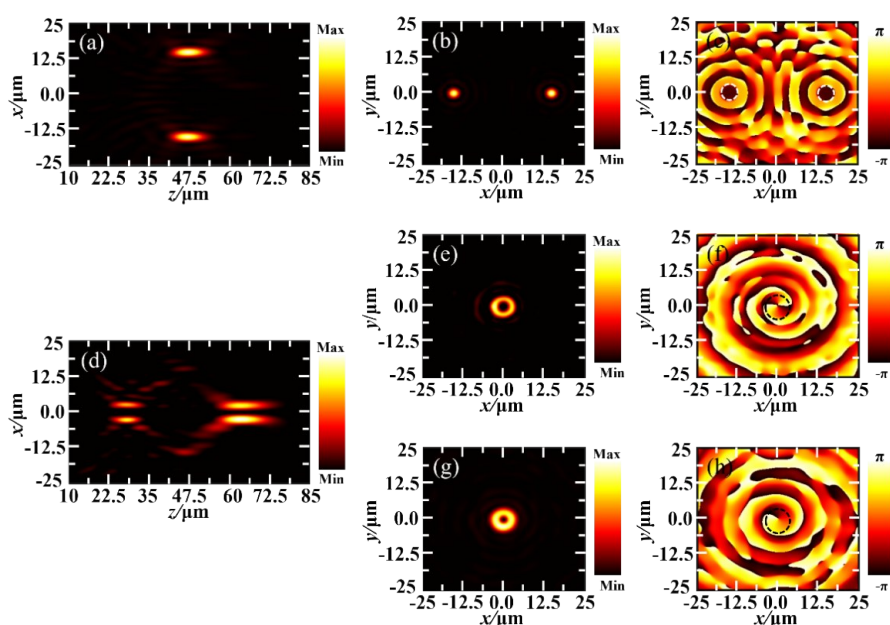


图3 (a)-(c)左旋圆偏振入射情况下在透镜后方的电场强度和相位分布;(d)-(h)右旋圆偏振入射情况下在透镜后方的电场强度和相位分布。(a)在透镜后方 x - z 平面上的电场强度分布;(b)对应焦平面($z=47.5 \mu\text{m}$)上的电场强度分布;(c)对应焦平面($z=47.5 \mu\text{m}$)上的相位分布。(d)在透镜后方 x - z 平面上的电场强度分布;(e), (g)对应焦平面($z=28.5 \mu\text{m}$ (b) 和 $z=65 \mu\text{m}$ (d))上的电场强度分布;(f), (h)对应焦平面($z=28.5 \mu\text{m}$ (b) 和 $z=65 \mu\text{m}$ (d))上的相位分布

Fig3 (a)-(c) Distribution of electric field intensity and phase of the metalens under left-handed circularly-polarization(LCP) incidence; (d)-(h) Distribution of electric field intensity and phase of the metalens under right-handed circularly-polarization(RCP) incidence; (a) Distribution of electric field intensity in the x - z plane under left-handed circularly-polarization(LCP) incidence; (b) Distribution of electric field intensity in the x - z plane at $z=47.5 \mu\text{m}$; (c) Distribution of electric field phase in the x - z plane at $z=47.5 \mu\text{m}$; (d) Distribution of electric field intensity in the x - z plane under right-handed circularly-polarization(RCP) incidence; (e), (g) Distribution of electric field intensity in the x - z plane at $z=28.5 \mu\text{m}$ (e) 和 $z=65 \mu\text{m}$ (g); (f), (h) Distribution of electric field phase in the x - z plane at $z=28.5 \mu\text{m}$ (f) 和 $z=65 \mu\text{m}$ (h)

来潜在的应用。

References

- [1] Yu N F, Genevet P, Kats M A, *et al.* Light propagation with phase discontinuities: Generalized laws of reflection and refraction[J]. *Science*, 2011, **334** (6054): 333–337.
- [2] Ni X J, Emani N K, Kildishev A V, *et al.* Broadband light bending with plasmonic nanoantennas [J]. *Science*, 2012, **335**(6067) 427.
- [3] Grady N K, Heyes J E, Chowdhury D R, *et al.* Terahertz metamaterials for linear polarization conversion and anomalous refraction[J]. *Science*, 2013, **340**(6183): 1304–1307.
- [4] Zhang X Q, Tian Z, Yue W S, *et al.* Broadband terahertz wave deflection based on C-shape complex metamaterials with phase discontinuities [J]. *Advanced Materials*, 2013, **25**(33): 4567–4572.
- [5] Wang Q, Zhang X Q, Xu Y H, *et al.* A broadband metasurface-based terahertz flat-lens array [J]. *Advanced Optical Materials*, 2015, **3**(6): 779–785.
- [6] Lyu J M, Shen S Y, Chen L, *et al.* Frequency selective fingerprint sensor: the Terahertz unity platform for broadband chiral enantiomers multiplexed signals and narrowband molecular AIT enhancement[J]. *Photonix*, 2023, **4**, 28.
- [7] Li J S, Chen J Z. Simultaneous and independent regulation of circularly polarized terahertz wave based on metasurface [J]. *Optics Express*, 2022, **30** (12): 20298–20310.
- [8] Li J S, Li X J, Switchable tri-function terahertz metasurface based on polarization vanadium dioxide and photosensitive silicon[J]. *Optics Express*, 2022, **30** (8): 12823–12834.
- [9] Huang L L, Chen X Z, Mühlenbernd H, *et al.* Dispersionless phase discontinuities for controlling light propagation [J]. *Nano Lett.* 2012, **12**(11): 5750–5755.
- [10] Ling X H, Zhou X X, Yi X N, *et al.* Giant photonic spin Hall effect in momentum space in a structured metamaterial with spatially varying birefringence [J]. *Light: Science & Applications*, 2015, **4**(1): e290.
- [11] Zheng G X, Mühlenbernd H, Kenney M, *et al.* Metasurface holograms reaching 80% efficiency [J]. *Nature Nanotechnology*, 2015, **10**(4), 30812 (2015).
- [12] Jin L, Dong Z, Mei S, *et al.* Noninterleaved metasurface for (26–1) spin- and wavelength-encoded holograms [J]. *Nano Letters*, 2018, **18**(12): 8016–8024.
- [13] Wang H, Qin Z, Huang L L, *et al.* Metasurface with dynamic chiral meta-atoms for spin multiplexing hologram and low observable reflection [J]. *Photonix*, 2022, **3**: 10.
- [14] Chen X Z, Huang L L, Mühlenbernd H, *et al.* Dual-polarity plasmonic metalens for visible light [J]. *Nature Communications*, 2012, **3**(1): 1–6.
- [15] Khorasaninejad M, Chen W T, Devlin R C, *et al.* Metalenses at visible wavelengths: Diffraction-limited focusing and subwavelength resolution imaging [J]. *Science*, 2016, **352**(6290): 1190–1194.
- [16] Wang S M, Wu P C, Su V C, *et al.* Broadband achromatic optical metasurface devices [J]. *Nature Communication*, 2017, **8**: 187.
- [17] Chen W T, Zhu A Y, Sanjeev V, *et al.* A broadband achromatic metalens for focusing and imaging in the visible [J]. *Nat. Nanotechnology*, 2019, **13**(3): 220–226.
- [18] Zang X F, Ding H Z, Intaravanne Y, *et al.* A multi-foci metalens with polarization-rotated focal points [J]. *Laser & Photonics Reviews* 2019, **13**(12): 1900182.
- [19] Wang R X, Intaravanna Y, Li S T, *et al.* Metalens for generating a customized vectorial focal curve [J]. *Nano Letters*, 2021, **21**(5): 2081–2087.
- [20] Lin R J, Su V C, Wang S M, *et al.* Achromatic metalens array for full-colour light-field imaging [J]. *Nature Nanotechnology*, 2018, **14**(3): 227–31.
- [21] Li L, Liu Z, Ren X, *et al.* Metalens-array-based high-dimensional and multiphoton quantum source [J]. *Science*, 2020, **368**(6498): 1487–1490.
- [22] Mueller J P, Rubin N A, Devlin R C, *et al.* Metasurface polarization optics: independent phase control of arbitrary orthogonal states of polarization [J]. *Physics Review Letters*, 2017, **118**(11): 113901.
- [23] Guo X Y, Li P, Zhong J Z, *et al.* Tying polarization-switchable optical vortex knots and links via holographic all-dielectric metasurfaces [J]. *Laser & Photonics Reviews* 2020, **14**(3): 1900366.
- [24] Cheng C, Gao S L, Song W, *et al.* Metasurfaces with planar chiral meta-atoms for spin light manipulation [J]. *Nano Letters*, 2021, **21**(4): 1815–1821.