

## 激光与光电子学进展

## 基于 U 型结构超构表面的光束偏转器和超透镜研究

任芝\*, 李文雯, 林俊哲, 常斯琦, 李松涛

华北电力大学数理系, 河北 保定 071003

**摘要** 利用超表面实现对光的操控是光学领域的研究热点之一。设计了一种 U 型单元结构, 通过将结构以斜对称的方式放置并改变结构的几何参数, 实现了透射光从 0 到  $2\pi$  的相移; 采用线偏振光、左旋偏振光和右旋偏振光作为入射光, 通过结构优化实现了具有偏振不依赖性的光束异常折射的光束偏转器, 其折射角为  $22.4^\circ$ , 并探讨了超透镜的功能, 为超表面的应用提供了参考。

**关键词** 表面光学; 超表面; 光束偏转器; 超透镜; 偏振不依赖性

中图分类号 O438

文献标志码

DOI: 10.3788/LOP202259.1924001

## Research on Beam Deflector and Super Lens Based on U-Shaped Hyperstructured Surface

Ren Zhi\*, Li Wenwen, Lin Junzhe, Chang Siqi, Li Songtao

Department of Mathematics and Physics, North China Electric Power University, Baoding 071003, Hebei, China

**Abstract** One of the research hotspots in the field of optics is light manipulation using super surface. Herein, a U-shaped element structure is designed. The phase shift of transmitted light from 0 to  $2\pi$  is realized by placing the structure in an oblique symmetrical manner and changing the geometric parameters of the structure. Using linearly polarized light, left-handed polarized light, and right-handed polarized light as incident lights, a beam deflector with polarization independent beam abnormal refraction is realized through structural optimization, and the refraction angle is  $22.4^\circ$ . The function of a super lens is also discussed, which provided a reference for the application of the super surface.

**Key words** surface optics; super surface; beam deflector; super lens; polarization independence

## 1 引言

自超表面诞生以来, 研究人员利用超构表面的二向色性实现了对透射光/反射光的相位调控, 超表面已经在集成光学、光通信等领域展现了重要的应用潜力<sup>[1-4]</sup>。超表面的组成单元可以通过电磁响应来实现对光的传播方向、相位和振幅的调控<sup>[5-7]</sup>。通过按照特定序来排列一系列结构尺寸<sup>[8]</sup>逐渐改变的单元结构, 可以实现相位上的不连续分布, 进而实现对入射光的调制<sup>[9]</sup>。超构表面拥有强大的光学性能和电磁调控能力, 为全息光学、光学成像以及电磁隐身等领域的深入研究提供了更多的可能。当超表面由一系列的金属亚波长单元组成时, 对于相同偏振透射光入射, 无论是调节单元结构的旋转角度还是调节单元结构的几何参数, 都只能实现  $0\sim\pi$  的相

移<sup>[10-13]</sup>, 而正交偏振透射光, 可以很好地实现  $0\sim 2\pi$  的相移<sup>[14]</sup>。当超表面由一系列介质材料单元结构组成时, 可以通过改变单元结构的几何参数来实现相位的全覆盖。

基于超构表面优异的光学性能, 前人设计了许多光学器件来满足人们的需要。2013 年伯明翰大学的 Chen 等<sup>[15]</sup>设计了可见光波段的三维的双极性的平面透镜, 2014 年天津大学的 Yang 等<sup>[16]</sup>实现了太赫兹波段的反射型超透镜。这些光学器件的设计极大地丰富了集成光学的发展,

本文首先设计了一个 U 型的单元结构, 通过适当改变 U 型单元结构的几何参数, 使其交叉偏振光可以实现相位在  $0\sim 2\pi$  的相移。该 U 型单元结构具有独特的对称性, 通过一系列的公式推导发现具有独特对称性的 U 型单元结构所构成的光学器件还具备偏振不

收稿日期: 2021-08-12; 修回日期: 2021-09-22; 录用日期: 2021-10-19

基金项目: 河北省自然科学基金(A2019502044)、教育部中央高校基本科研业务项目(2020 MS138)

通信作者: \*renzhi2002@126.com

依赖的特性;接着利用该结构设计了一个可以实现异常折射<sup>[3]</sup>的光束偏转器<sup>[17-19]</sup>;再基于该结构设计了一个实现聚焦的超透镜<sup>[20-22]</sup>,并模拟分析了具有不同焦距的超透镜的聚焦效果。通过模拟发现,本文所设计的光学器件都具有偏振不依赖的特性。

## 2 U型单元结构

### 2.1 单个U型单元的结构优化

本文设计了一种U型单元结构的超表面,使用COMSOL Multiphysics 5.4软件进行仿真模拟。构建的U型单元结构,如图1(a)~1(b)所示,通过对单元结构的晶格常数A、U型结构外边长S、高度h以及入射光的波长等结构参数进行了参数化扫描,扫描结果如图1(c)~1(e)所示,从参数化扫描结果可以得出,当A为250 nm、S为150 nm、h为900 nm时,U型结构的材料为Si、入射光的波长为762 nm、以厚度为200 nm的

SiO<sub>2</sub>作为基底时单元结构的透射率最高。Si材料以及SiO<sub>2</sub>基底的折射率是从COMSOL Multiphysics 5.4软件中的材料库中选取的。选取的Si材料的折射率为3.6,SiO<sub>2</sub>的折射率为1.45。

U型单元结构以斜对称的方式放置,旋转角度固定为45°和-45°两个角度,通过改变结构的几何参数来实现对相位的调控。入射的左旋圆偏振光的波长为762 nm,垂直入射到U型结构,采集透射光信息;通过对L和W两个参数进行参数化扫描(L为单元结构的臂宽,W为单元结构的臂长),便得到透射光分布在0到2π之间的相位改变,如图2所示。以往研究的U型单元结构主要是通过旋转单元结构的角度来实现对相位的调控,而本文中采用调整单元结构参数实现相位改变。通过对比45°和-45°两个角度放置的U型结构的透射光发现二者基本呈现对称分布,说明该结构对入射光的左旋或右旋不敏感。

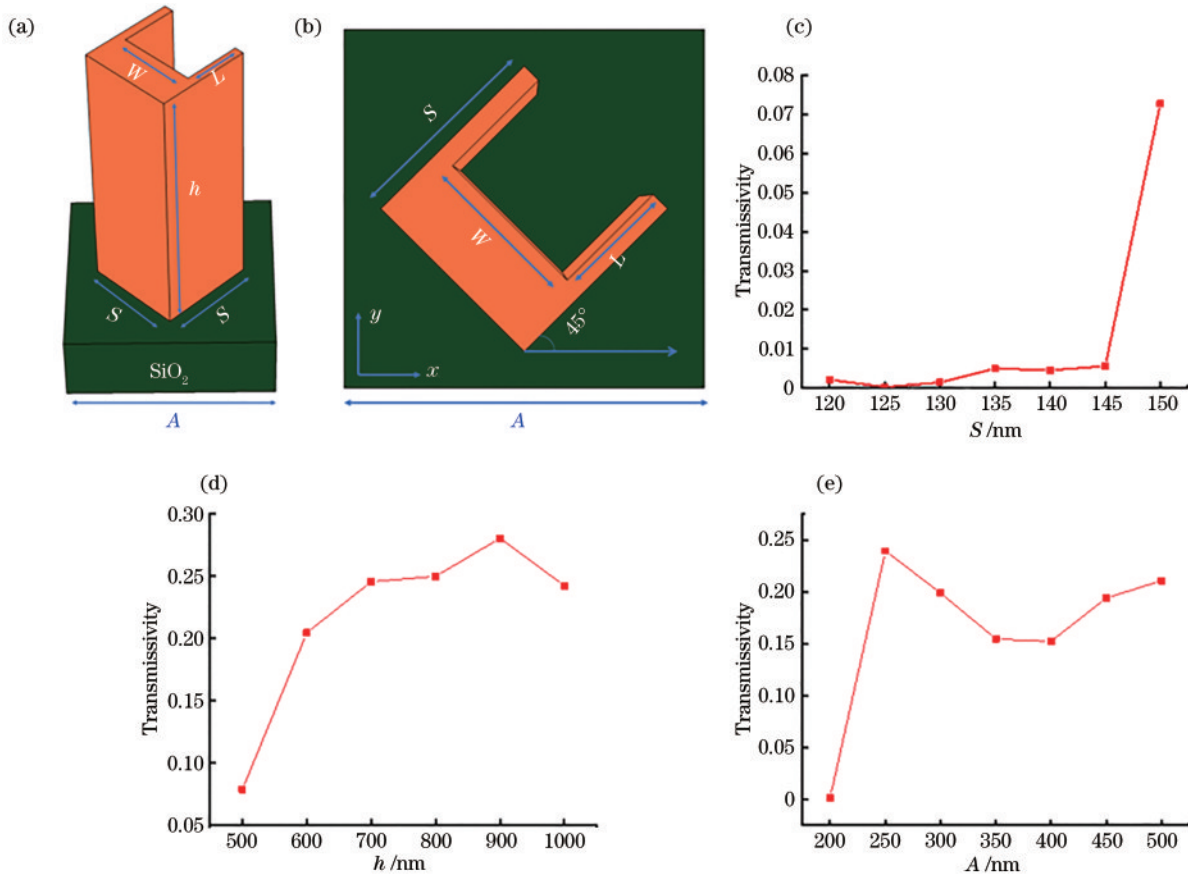


图1 U型单元结构示意图及结构参数。(a)单元结构的三维图;(b)单元结构xy平面的示意图;(c)外边长S的参数化扫描结果;(d)高度h的参数化扫描结果;(e)晶格常数A的参数化扫描结果

Fig. 1 Structure diagram and parameters of U-shaped element structure. (a) Three-dimensional diagram of U-shaped element structure; (b) schematic diagram of xy plane of U-shaped element structure; (c) parameterized scanning result of outer edge length S; (d) parameterized scanning result of height h; (e) parameterized scanning result of lattice constant A

### 2.2 U型单元结构实现偏振不依赖性的原理

U型单元结构是一种对称的单元结构,当入射光垂直入射到超表面时<sup>[14]</sup>,其电场可以表示为 $E_i(r, t) = (E_x, E_y)^T e^{i(kz - \omega t)}$ ,透射电场相应可以表示为 $E_t(r, t) =$

$(E'_x, E'_y)^T e^{i(kz - \omega t)}$ 。当线偏振光入射时,线偏振光的透射场复振幅和入射场复振幅通过传输矩阵联系后的关系式为

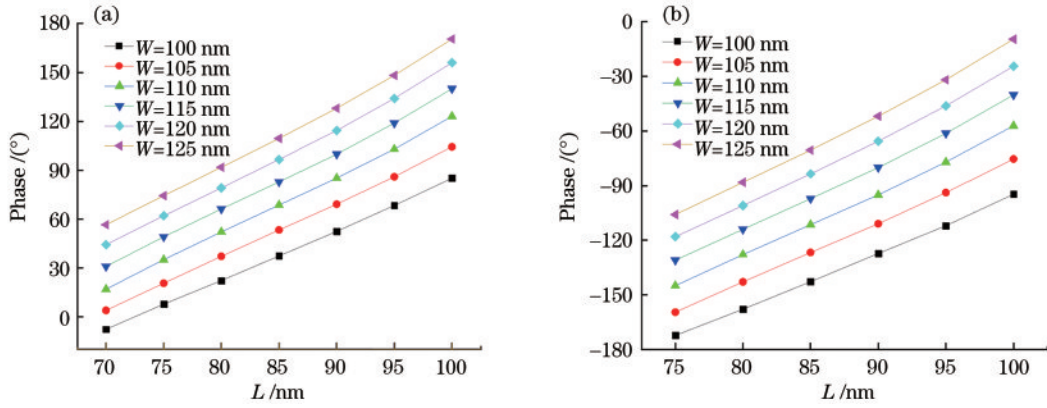


图 2 U型单元结构相位。(a)单元结构旋转 45°后的相位;(b)单元结构旋转 -45°后的相位

Fig. 2 Phases of U-shaped element structure. (a) Phases after 45° rotation; (b) phases after -45° rotation

$\begin{pmatrix} E'_x \\ E'_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_{xx} & T_{xy} \\ T_{yx} & T_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix}$ , 同理, 当圆偏振光入射时, 也可以得到圆偏振光的关系式为  $\begin{pmatrix} E'_L \\ E'_R \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_{LL} & T_{LR} \\ T_{RL} & T_{RR} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_L \\ E_R \end{pmatrix}$ 。当改变基矢时, 线偏振光的复透射系数可以转化为圆偏振光的复透射系数。若将圆偏振

光的矢量设置为  $E_L = \frac{1}{\sqrt{2}}(E_x + iE_y)$ ,  $E_R = \frac{1}{\sqrt{2}}(iE_x + E_y)$ , 那么相应的线偏振光的矢量表示为  $E_x = \frac{1}{\sqrt{2}}(E_L + \frac{1}{i}E_R)$ ,  $E_y = \frac{1}{\sqrt{2}}(\frac{1}{i}E_L + E_R)$ , 则圆偏振光的透射系数可以表示为

$$\begin{pmatrix} T_{LL} & T_{LR} \\ T_{RL} & T_{RR} \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} T_{xx} + T_{yy} + iT_{yx} - iT_{xy} & -iT_{xx} + iT_{yy} + T_{yx} + T_{xy} \\ iT_{xx} - iT_{yy} + T_{yx} + T_{xy} & T_{xx} + T_{yy} - iT_{yx} + iT_{xy} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

当  $T_{xx} = T_{yy}$ ,  $T_{xy} = T_{yx}$  时, 式(1)可以简化为

$$\begin{pmatrix} T_{LL} & T_{LR} \\ T_{RL} & T_{RR} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_{xx} & T_{xy} \\ T_{yx} & T_{yy} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

从式(2)可以看出, 当以线偏振光或者圆偏振光入射时, 可以得到相同的效果。这样提出的 U 型单元结构是可以实现偏振不依赖的。

### 2.3 基于 U 型结构的光束偏转器

鉴于 U 型结构对入射光的偏振不敏感性, 本文进一步研究多个 U 型结构组合后的光束偏转特性。首先将 U 型结构旋转 45°, 再对单元结构进行参数化扫描, 得出当  $A = 250 \text{ nm}$ ,  $h = 900 \text{ nm}$ ,  $\lambda = 762 \text{ nm}$  的时候, 单元结构的透射率最大; 进一步将单元结构的  $L$  和  $W$  进行参数化扫描, 扫描结果表示结构可以实现  $0 \sim 2\pi$  的相位调控; 从扫描结果中选择了 4 个相位依次相差  $\pi/4$  的 U 型结构, 4 个 U 型结构对应的几何参数  $L$  分别为 75、80、105、110 nm,  $W$  分别为 110、120、105、125 nm, 将选择的这 4 个单元结构旋转 90°, 得到相位增加为  $\pi$  的 4 个新的 U 型结构。这 8 个 U 型结构的相位依次相差  $\pi/4$ , 因此这 8 个单元结构整体覆盖了  $0 \sim 2\pi$  的相移。根据参数扫描得到的 U 型结构的优化参数, 进一步选取 8 个单元结构按顺序排列便得到光束偏转器, 光束偏转器的总长度为 2000 nm, 结构如图 3 所示。

当左旋偏振光入射光垂直照射到光束偏转器时, 透射光的相位信息如图 3 所示, 呈现线性的相移。这

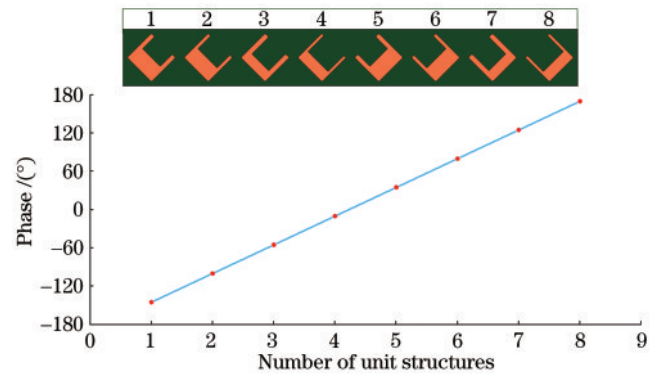


图 3 8 个单元结构构成的光束偏转器和 8 个单元结构对应的相位

Fig. 3 Beam deflector with eight unit structures and phases corresponding to eight unit structures

种通过超表面实现相位调制的现象与广义的斯涅耳定律有关。当一束光从玻璃层入射到设计的光束偏转器结构上, 透射的一侧是空气, 则光的偏转角度可以用下面的公式来表示:

$$\sin \theta_i = \frac{\lambda}{2\pi} \frac{d\phi}{dx} = \frac{\lambda}{2\pi} \frac{2\pi}{s}, \quad (3)$$

式中:  $\theta_i$  为偏转角度;  $\lambda$  为入射波长;  $s$  为光束偏转器长度。

如果以波长 762 nm 的  $x$  方向的线偏振光 (XLP)、 $y$  方向的线偏振光 (YLP)、左旋偏振光



(LCP)和右旋偏振光(RCP)入射时,均可以观察到异常折射的现象。且根据模拟结果,以上述不同偏振态的光入射时,都会观测到类似的折射角现象,这就说明了设计的光束偏转器具有偏振不依赖性,模拟得到的正交偏振光的电场分布和偏转角度如图 4 所示,可以看到光束会有一个异常的偏转,透射的正

交偏振光的偏转角度为 $-22.4^\circ$ ,模拟结果和式(3)所得到的计算结果是相同的,说明设计的光束偏转器可以很好地实现光束的偏转。值得注意的是,光束偏转器的透射率大约为 16%,透射率低的原因是由于超表面对光存在反射和吸收以及存在相同透射偏振光<sup>[14]</sup>。

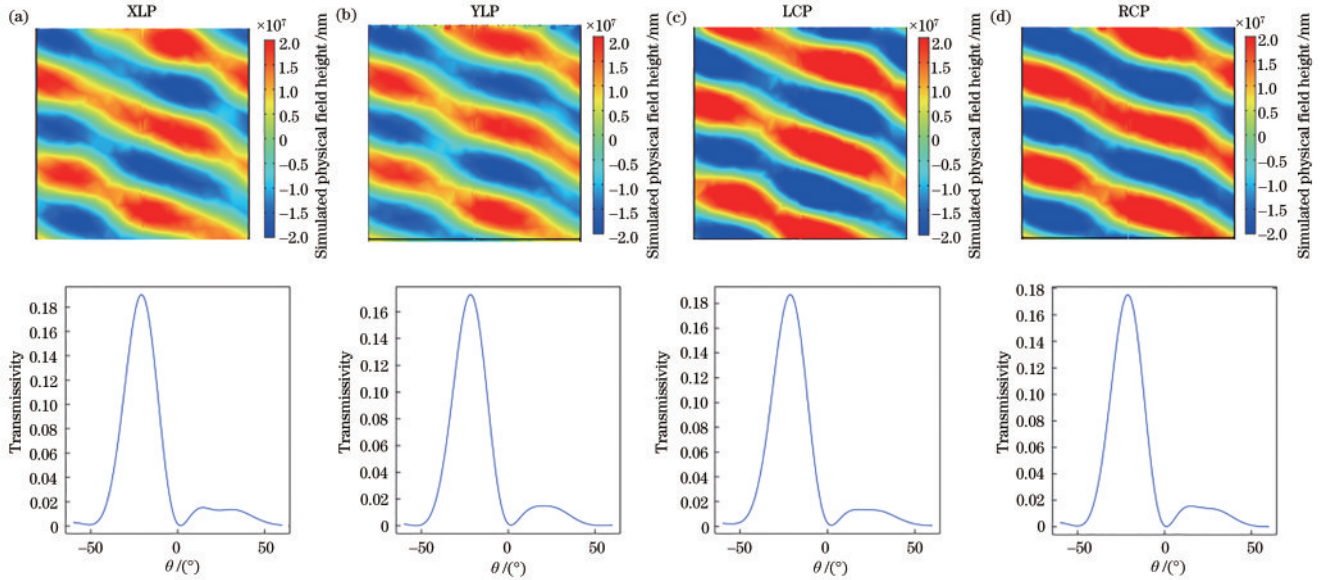


图 4 光束偏转器的电场和偏转角度。(a) XLP 入射得到的现象;(b) YLP 入射得到的现象;(c) LCP 入射得到的现象;(d) RCP 入射得到的现象

Fig. 4 Electric fields and deflection angles of beam deflector. (a) Phenomenon of XLP incidence; (b) phenomenon of YLP incidence; (c) phenomenon of LCP incidence; (d) phenomenon of RCP incidence

### 2.4 基于 U 型结构的超透镜

基于相位调控理论的光束偏转器,本文设计了超透镜,通过对 U 型单元结构的几何参数进行参数化扫描,首先设定 U 型的单元结构旋转 $45^\circ$ ,从中筛选出来相位依次相差 $\pi/4$ 的 4 个单元结构,这 4 个 U 型结构对应的几何参数  $L$  分别为 100、90、80、70 nm,  $W$  分别为 125、120、115、110 nm,然后将这 4 个单元结构旋转 $90^\circ$ ,得到另外 4 个新的单元结构,这 8 个单元结构完全覆盖了 0 到 $2\pi$ 的相位。根据对几何结构的参数化扫描,得到 8 个单元结构所对应的相位如图 5 所示。

本文设计一个了  $xz$  平面的超透镜,不同  $x$  轴位置需要满足的相位必须满足:

$$\varphi_x = \frac{2\pi}{\lambda} \left( f - \sqrt{f^2 + x^2} \right), \quad (4)$$

式中: $f$ 为超透镜的焦距; $\lambda$ 为入射光的波长; $x$ 为单元结构离  $x$  轴的位移。

在设计超透镜的过程中,将不同  $x$  轴位置的单元结构所需要的相位进行了计算,将计算得到的不同  $x$  轴位置满足的相位与上述 8 个单元结构对应的相位进行一一对应,从而选出了满足不同位置的 32 个单元结构,将选择的 32 个单元结构进行一系列的排列就形成了数值孔径 NA 为 0.371 的超透镜。其中数值孔径的

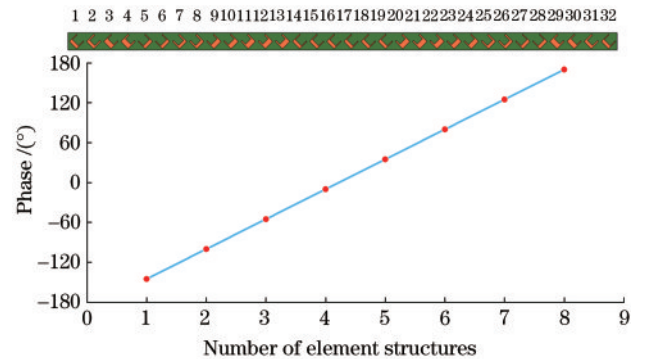


图 5 超透镜 32 个单元结构的排列方式以及超透镜所选 8 个单元结构所对应的相位

Fig. 5 Arrangement of 32 element structures of super lens and phases corresponding to eight element structures selected by super lens

计算公式为  $NA = \sin\left(\arctan\frac{D}{2f}\right)$ , 式中  $D$  为超透镜的宽度,数值为  $8\mu\text{m}$ ,  $f$  为超透镜的焦距,数值为  $8\mu\text{m}$ 。图 6 显示的是 NA 值为 0.371 的超透镜在 LCP、RCP、XLP 和 YLP 入射下的透射电场的强度和相位分布。从模拟结果可得到,当以不同偏振态的光入射时,本文设计的透镜均是一个聚焦透镜。根据本文设计的超透

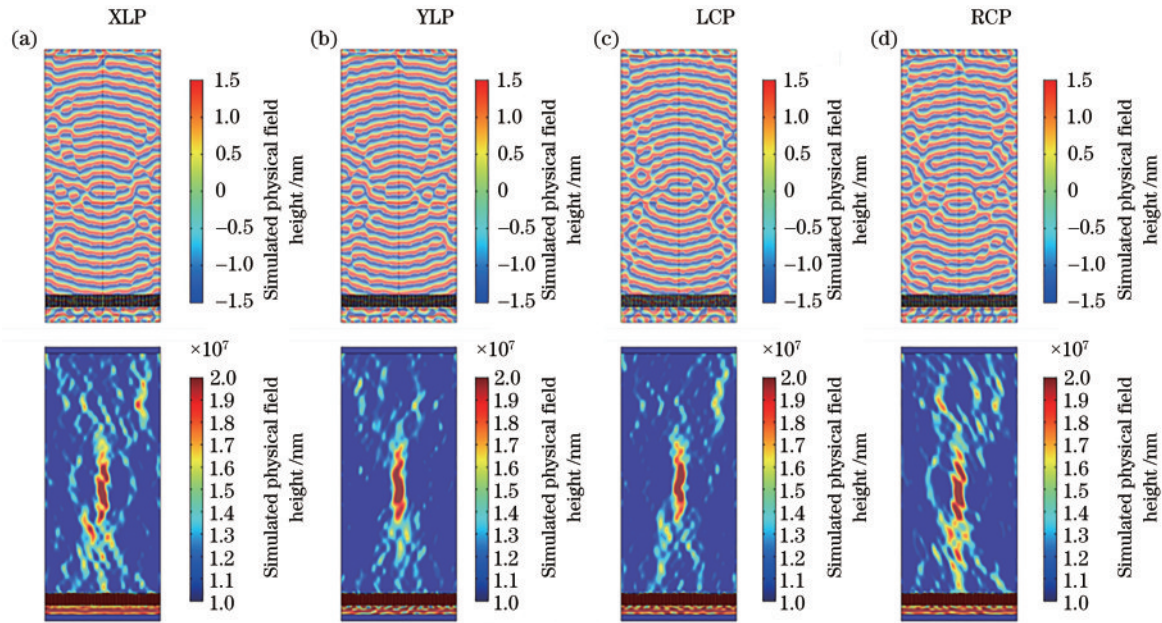


图 6 不同偏振态的光入射后的现象。(a)XLP 入射时得到的相位和强度图;(b) YLP 入射时得到的相位和强度图;(c) LCP 入射时得到的相位和强度图;(d) RCP 入射时得到的相位和强度图

Fig. 6 Phenomena after different polarization states of light incident. (a) Phase and intensity diagrams obtained when XLP is incident; (b) phase and intensity diagrams obtained when YLP is incident; (c) phase and intensity diagrams obtained when LCP is incident; (d) phase and intensity diagrams obtained when RCP is incident

镜,还得到了当以 LCP 入射的焦距为  $8 \mu\text{m}$  的超透镜的聚焦效率、焦深以及聚焦斑点的半径。焦深以及聚

焦斑半径的数值选择为最高值一半的位置的数据如图 7 所示。

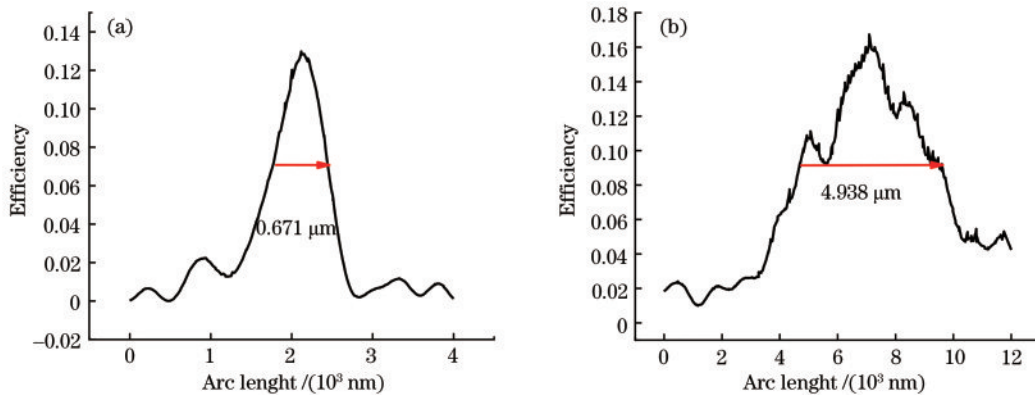


图 7 超透镜的焦深和聚焦半径。(a)焦深;(b)聚焦斑点半径

Fig. 7 Focal depth and focal spot radius of super lens. (a) Focal depth; (b) focal spot radius

从图中可以看出超透镜的聚焦效率最高为 16%，焦深为  $0.671 \mu\text{m}$ ，聚焦斑点的半径为  $4.938 \mu\text{m}$ 。

为了探究不同焦距对超透镜聚焦效果的影响,本文还仿真了相同宽度但是焦距不同的超透镜,分别设计了焦距为  $6, 8, 10 \mu\text{m}$  的超透镜。理论上当焦距变小时,超透镜的数值孔径越大,聚焦效果越强。图 8 表示了 3 种不同焦距的超透镜所对应的聚焦效果。

通过仿真模拟,发现当超透镜的焦距越小时,数值孔径越大,超透镜的聚焦效果越好,与理论推测是一致的。

### 3 结 论

基于 U 型的单元结构,设计了光束偏转器和超透镜。以不同偏振态的光入射到光束偏转器时,透射交叉偏振光的偏转现象和偏转角度是相同的,偏转现象和偏转角度均可以满足广义的斯涅耳原理,实现了透射光  $0$  到  $2\pi$  的相移;所设计的超透镜,当以不同偏振态的光入射时,超透镜均可以达到一种聚焦的作用,并探讨了不同焦距的超透镜的功能,为超表面的实际应用提供了参考。



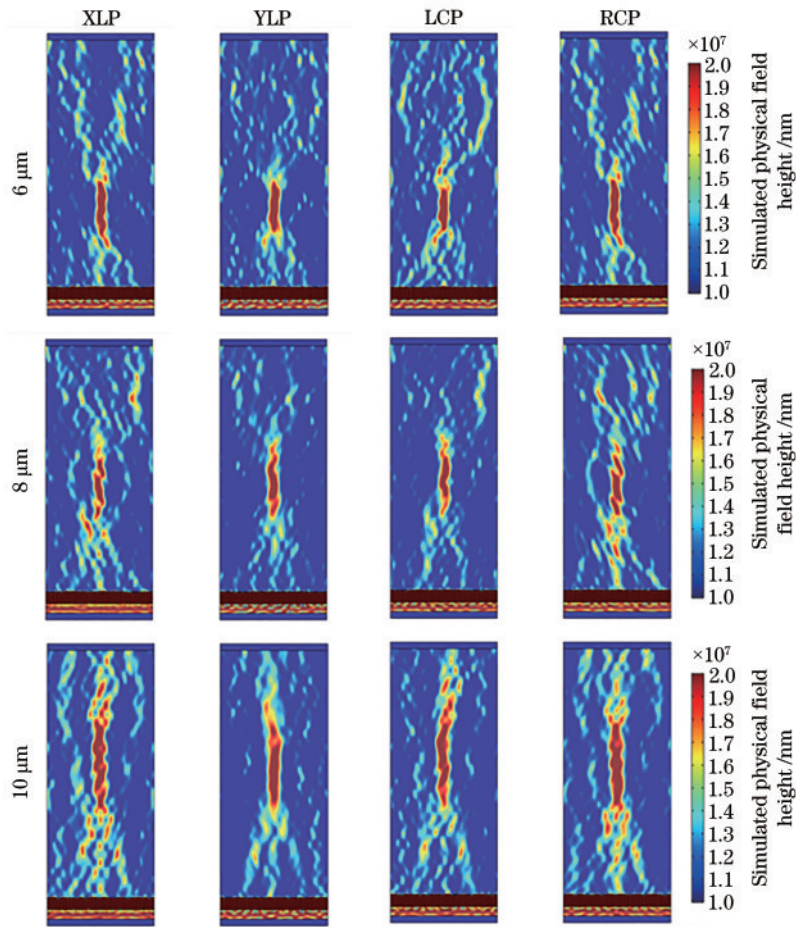


图 8 焦距为 6、8、10  $\mu\text{m}$  的超透镜在 XLP、YLP、LCP 和 RCP 入射时的强度分布

Fig. 8 Intensity distributions of super lens with focal lengths of 6  $\mu\text{m}$ , 8  $\mu\text{m}$ , and 10  $\mu\text{m}$ , respectively when XLP, YLP, LCP, and RCP are incident

### 参 考 文 献

- [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] 王寒. 基于超表面涡旋的产生、调制和传输特性研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2019.  
Wang H. Study about the generation, modulation and propagation characteristics of vortex based on metasurface[D]. Jinan: Shandong Normal University, 2019.
- [3] Holloway C L, Dienstfrey A, Kuester E F, et al. A discussion on the interpretation and characterization of metamaterials/metasurfaces: the two-dimensional equivalent of metamaterials[J]. *Metamaterials*, 2009, 3(2): 100-112.
- [4] 邓子岚, 李枫竣, 史坦, 等. 超构光栅调控衍射光场的物理及应用[J]. *光学学报*, 2021, 41(8): 0823011.  
Deng Z L, Li F J, Shi T, et al. Metagratings for controlling diffractive optical fields: physics and applications[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(8): 0823011.
- [5] Ou K, Li G H, Li T X, et al. High efficiency focusing vortex generation and detection with polarization-insensitive dielectric metasurfaces[J]. *Nanoscale*, 2018, 10(40): 19154-19161.
- [6] 赵增月. 人工微结构超材料的电磁波调控及其应用[D]. 北京: 中国科学院大学.  
Zhao Z Y. Electromagnetic wave regulation and application of artificial microstructure metamaterials[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences.
- [7] 倪一博, 闻顺, 沈子程, 等. 基于超构表面的多维光场感知[J]. *中国激光*, 2021, 48(19): 1918003.  
Ni Y B, Wen S, Shen Z C, et al. Multidimensional light field sensing based on metasurfaces[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(19): 1918003.
- [8] 肖顺元, 颜家豪, 胡铁, 等. 基于超表面透镜的偏振探测重构矩阵校准研究[J]. *光学学报*, 2021, 41(20): 2012006.  
Xiao S Y, Yan J H, Hu T, et al. Research on calibration of polarization detection reconstruction matrix based on metalens[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(20): 2012006.
- [9] Milonni P W. 'negative refraction' (2004) by J.B. Pendry[J]. *Contemporary Physics*, 2009, 50(1): 361.
- [10] Pancharatnam S. Generalized theory of interference, and its applications[J]. *Resonance*, 2013, 18(4): 387-389.
- [11] Berry M V. Quantal phase factors accompanying adiabatic changes[J]. *Proceedings of the Royal Society of London A Mathematical and Physical Sciences*, 1984, 392(1802): 45-57.
- [12] Huang L L, Chen X Z, Mühlenbernd H, et al.

- Dispersionless phase discontinuities for controlling light propagation[J]. *Nano Letters*, 2012, 12(11): 5750-5755.
- [13] Kang M, Feng T H, Wang H T, et al. Wave front engineering from an array of thin aperture antennas[J]. *Optics Express*, 2012, 20(14): 15882-15890.
- [14] 王维. 基于金属结构超表面的新型光学器件的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.  
Wang W. Research of new optical devices based on metal structure metasurface[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [15] Chen X, Huang L, Mühlenbernd H, et al. Reversible three dimensional focusing of visible light with ultrathin plasmonic flat lens[J]. *Advanced Optical Materials*, 2013, 1(7):517-521.
- [16] Yang Q L, Gu J Q, Wang D Y, et. al, Efficient flat metasurface lens for terahertz imaging[J]. *Optical Express*, 2014, 22(21): 25931-25939.
- [17] Wang Y, Pu M, Zhang Z, et al. Quasi-continuous metasurface for ultra-broadband and polarization-controlled electromagnetic beam deflection[J]. *Scientific Report*, 2016, 5: 17733.
- [18] Li X, Pu M B, Wang Y Q, et al. Dynamic control of the extraordinary optical scattering in semicontinuous 2D metamaterials[J]. *Advanced Optical Materials*, 2016, 4 (5): 659-663.
- [19] 陈磊, 严金华, 郭焕祥, 等. 基于硅基超表面的高效率大角度光束偏转[J]. *光学学报*, 2021, 41(3): 0305001.  
Chen L, Yan J H, Guo H X, et al. Highly efficient large-angle beam deflection based on silicon-based metasurface [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(3): 0305001.
- [20] 齐美清. 超材料透镜和超表面对电磁波的调控及应用 [D]. 南京: 东南大学, 2016.  
Qi M Q. Manipulations of electromagnetic waves by metamaterial lens and metasurface and their applications [D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [21] 赵峰, 陈向宁, 王得成. 正交圆偏振光同时聚焦的超透镜设计与仿真[J]. *光学学报*, 2020, 40(10): 1024001.  
Zhao F, Chen X N, Wang D C. Metalens design and simulation for simultaneous focusing of orthogonal circularly polarized light[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40 (10): 1024001.
- [22] 夏习成, 姚赞. 基于 PB 相位的等离子体超透镜设计[J]. *新技术新工艺*, 2020(8): 46-48.  
Xia X C, Yao Z. Design of plasma metalens based on PB phase[J]. *New Technology & New Process*, 2020(8): 46-48.