

文章编号: 1005-5630(2022)06-0023-06

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.2022.006.004

# 长焦深与偏振可控的太赫兹超构表面透镜

朱 阳, 臧小飞

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

**摘要:** 为了提高太赫兹超透镜成像的纵向容忍度, 设计了一种纯几何相位全介质长焦深超构表面透镜器件。采用纯几何相位自旋解耦的设计方法, 并结合时域有限差分(FDTD)方法, 对设计的超构表面透镜进行了数值仿真。研究表明, 所设计的太赫兹超构表面透镜具有偏振可控和长焦深的特性, 在沿着传播方向上焦深达到了 8 mm, 而普通超构表面透镜只有 4.5 mm 焦深。设计并数值仿真验证了两个太赫兹长焦深聚焦复用的超构表面透镜, 并使得横向复用的两个长焦深焦点具有相互正交的偏振态。相关研究有望应用于层析成像和信息加密等方面。

**关键词:** 超透镜; 几何相位; 偏振可控; 长焦深

**中图分类号:** O 436.1 **文献标志码:** A

## Terahertz metalens with extended focal depth and polarization controllable

ZHU Yang, ZANG Xiaofei

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** In this letter, a pure geometric phase based all-dielectric metalens is designed and aimed to enhance the tolerance of imaging in the longitudinal direction. Numerical simulation for the designed metasurface is carried out using the pure geometric phase spin decoupling design method combined with the finite difference time domain (FDTD) method. The calculated results show that designed metasurface enables the characteristics of controllable polarization and extended focal length, achieving a focal depth of 8 mm along the propagation direction, compared with 4.5 mm for a conventional metalens. Furthermore, we also design and numerically validate a terahertz metalens that can generate two focal points with extended focal length, and the polarization states of the two extended focal points are orthogonal to each other, demonstrating the multiplexing functionality of the designed metalens. The unique and effective approach may open a new avenue for tomography and information encryption.

收稿日期: 2022-03-08

基金项目: 上海市自然科学基金(18ZR1425600)

作者简介: 朱 阳(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为太赫兹超表面功能器件。E-mail: 15822996613@163.com

通信作者: 臧小飞(1981—), 男, 教授, 研究方向为太赫兹超表面功能器件, 太赫兹拓扑物理。

E-mail: thz3083@163.com

**Keywords:** metalens; geometric phase; polarization controllable; extended focal length

## 引 言

光学超构表面是超材料的二维体现，以能够轻易地操控电磁波前和易于制造的优势受到了广大研究者的研究。超构表面通过在亚波长范围内引入相位的突变来调控光波的振幅，相位和偏振态。近年来已经开发了越来越多的超构表面器件，例如平面超构透镜<sup>[1-4]</sup>，波片<sup>[5-6]</sup>，分束器<sup>[7]</sup>，全息超表面<sup>[8-12]</sup>，涡旋光束研究<sup>[13-16]</sup>。超构表面是一种新型且能代替传统大尺寸元件的二维材料，在光学系统集成化，小型化方面有着潜在的应用。

长焦深透镜具有高容忍成像的特点，主要实现方式有 forward logarithmic axicon, axilens<sup>[17]</sup>和 light sword optical element 3 种，包括径向和角向相位调制<sup>[18]</sup>。但是传统透镜往往采用光程来改变相位，聚焦的二次相位使得元件表面是一个凸面，对制造精度具有相当高的要求。超构表面通过亚波长尺度改变光波的电磁属性，相位调制是透镜最重要的属性，几何超构表面利用面内旋转角代表不同相位的优势克服了传统透镜制造精度不准的缺点，在平面内就可以实现聚焦功能，因此基于几何超构表面长焦深透镜的报道很多。2018 年，Zhang 等<sup>[19]</sup>利用几何超构表面实现角向相位调制的长焦深透镜，该长焦深透镜将两种圆偏振态聚焦到轴上两个位置，通过改变入射光的偏振态，实现焦距和焦深的动态可调。2019 年，Zang 等<sup>[20]</sup>用几何超构表面实现聚焦相位的径向调制，实现了偏振无关的长焦深透镜并实验上证实了纵向高容忍成像<sup>[20]</sup>，虽然上述方法相比传统方式更容易获得长焦深透镜，也具有对圆偏振态入射光的聚焦偏振转化，比如左旋圆偏振光进入，聚焦的焦点的偏振状态是右旋圆偏振，但是对线偏振态的偏振转化以及横向复用的多焦点长焦深透镜还没报道。本文提出了一种基于纯几何相位来设计超构表面透镜的方法，利用几何相位自选解耦的方式融合偏振转换相位，实现线偏振太赫兹波聚焦为长焦深焦点的同时，还可以调控聚焦点的线偏振状态。同时两个焦点的横向复用极大地提高了偏振选择成像的纵向容忍性和增加了加密信息通道。

## 1 设计原理

设计的超构表面透镜如图 1 所示，线偏振太赫兹波入射到器件上，通过设计的器件后太赫兹波聚焦成一个焦深  $\Delta f$  的长焦深光斑，焦点范围从  $f$  到  $f + \Delta f$ ，同时焦点的偏振态相对于入射线偏振态有一个旋转角。设计的器件所组成的单元结构具有各向异性，其光学特性可以用琼斯矩阵表示为

$$J = \begin{bmatrix} p_x & 0 \\ 0 & p_y \end{bmatrix}, 0 \leq p_x, p_y \leq 1 \quad (1)$$

式中  $p_x$  和  $p_y$  为单元微结构分别沿着长轴和短轴的透过率，如果单元微结构旋转一个角度  $\theta$ ，那么琼斯矩阵可以写为

$$J = J(-\theta)J(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_x & 0 \\ 0 & p_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

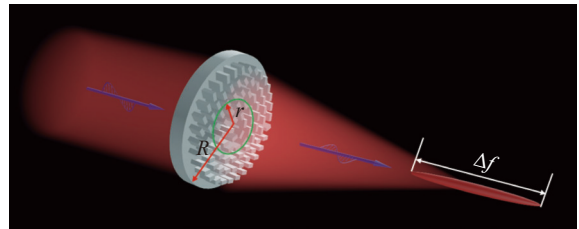


图 1 长焦深偏振转换超构表面透镜示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the polarization conversion metalens with extended focal depth

如果圆偏振波通过旋转了  $\theta$  角的单元结构，那么出射电场会发生改变，可以将其表达为

$$E_{RCP/LCP} = J \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ \pm i \end{bmatrix} = \frac{p_x + p_y}{2} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ \pm i \end{bmatrix} + \frac{p_x - p_y}{2} e^{\pm i2\theta} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ \mp i \end{bmatrix} \quad (3)$$

从式(3)可以看到，圆偏振波经过旋转了  $\theta$  角的微结构后部分转化为了与之正交的圆偏振波，同时携带一个附加的相位  $\pm 2\theta$ ，正号代表右旋圆偏振波，负号代表左旋圆偏振波；另外一部分是相同的圆偏振态，并且没有附加的相位。偏

振转化效率取决于单元微结构沿着长轴和短轴的透过率。当沿着长轴与短轴之间的相位差是  $\pi$  时, 微结构可以被认为是亚波长尺度的半波片, 此时有  $p_x = e^{i\frac{\pi}{2}} = i$ ,  $p_y = e^{-i\frac{\pi}{2}} = -i$ ,  $p_x + p_y = 0$ ,  $p_x - p_y = 2i$ , 所以圆偏振入射波全部被转化为与之正交的圆偏振态。由于这个附加的相位对于左旋圆偏振波和右旋圆偏振波是完全相反的, 因此几何相位具有自旋锁定的功能, 这使得左旋圆偏振波和右旋圆偏振波无法同时聚焦和独立调控。在此, 利用几何相位自旋解耦的方式使左旋圆偏振波和右旋圆偏振波具有相同的相位, 从而实现二者同时聚焦并利用二者之间的相位差调控焦点偏振态的功能。长焦深的相位与微结构的坐标位置关系为<sup>[18, 20]</sup>

$$\varphi(r) = \frac{k \cdot r^2}{2[f + (\Delta f \cdot r^2 / R^2)]} \quad (4)$$

式中: 半径坐标  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ ;  $k$  为自由空间波矢;  $\lambda$  为入射太赫兹波的波长;  $f$  和  $\Delta f$  代表超构表面透镜的焦点起始位置和焦深范围;  $R$  为设计的超构表面透镜的最大半径。

对于几何相位来说, 在左旋圆偏振太赫兹波的入射下, 透射的电场可以描述为

$$E_{\text{RCP}} = \eta(\lambda) \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix} \exp(i\varphi(r)) \quad (5)$$

式中  $\eta(\lambda)$  代表器件的转化效率。为了打破几何相位固有的自旋锁定, 另外一个相位  $-\varphi(r)$  被引入结构设计, 这样左旋圆偏振太赫兹波和右旋圆偏振太赫兹波同时具有聚焦相位和散焦相位

$\phi(r) = \arg\{\exp(i\varphi(r)) + \exp(-i\varphi(r))\}$ <sup>[21]</sup>。这个相位所对应的结构既能对左旋圆偏振太赫兹波聚焦, 也能对右旋圆偏振太赫兹波聚焦, 如果是线偏振太赫兹波入射, 那么结构将会对入射的线偏振太赫兹波聚焦成一个同偏振态的超长焦深焦点, 但是这种方式会使得入射波一半聚焦, 一半散焦, 所以理论上聚焦效率不会超过 50%。如果要改变焦点的偏振态, 需要给左旋圆偏振太赫兹波和右旋圆偏振太赫兹波都加上偏振调制的相位  $\phi$ , 这样总的相位为  $\phi(r) = \arg\{\exp(i(\varphi(r) + \phi)) + \exp(-i(\varphi(r) + \phi))\}$ , 其中  $\phi$  为焦点的偏振态相较于入射线偏振态旋转的角度。如果是对两个焦点点进行聚焦和偏振调控, 那么需要的相位为

$$\phi(r) = \arg\{A \cdot \exp(i(\varphi_1(r) + \phi_1)) + A \cdot \exp(-i(\varphi_1(r) + \phi_1)) + B \cdot \exp(i(\varphi_2(r) + \phi_2)) + B \cdot \exp(-i(\varphi_2(r) + \phi_2))\} \quad (6)$$

其中:  $\varphi_1(r) = \frac{k \cdot ((x-x_1)^2 + (y-y_1)^2)}{2[f + (\Delta f \cdot ((x-x_1)^2 + (y-y_1)^2) / R^2)]}$  为聚焦到第一个焦点位置处的相位;

$\varphi_2(r) = \frac{k \cdot ((x-x_2)^2 + (y-y_2)^2)}{2[f + (\Delta f \cdot ((x-x_2)^2 + (y-y_2)^2) / R^2)]}$  为聚焦到第二个焦点位置处的相位;  $x_1, y_1, x_2, y_2$  为设置的聚焦位置参数;  $A$  和  $B$  为两个焦点的振幅, 均设置为 1;  $\phi_1$  和  $\phi_2$  为两个焦点偏振态相对于入射偏振态的旋转角。

为了使得单元结构的圆偏振转化效率更高, 通过 FDTD 软件优化了一组微结构, 如图 2(a) 所示, 单元结构的长度  $L = 80 \mu\text{m}$ , 宽  $W = 42 \mu\text{m}$ , 高度  $h_1 = 400 \mu\text{m}$ , 基底高度  $h_2 = 600 \mu\text{m}$ , 每个单元结构的周期  $P = 110 \mu\text{m}$ , 基底和结构都采用

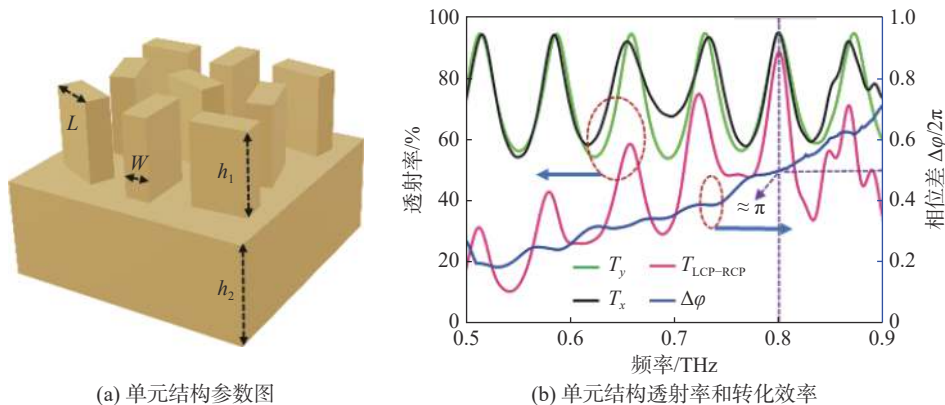


图 2 超表面的单元结构参数示意图以及单个结构透过率和转化效率

Fig. 2 Schematic diagram of the unit structure parameters of designed metasurface, as well as the transmittance and conversion efficiency of a single structure

高阻硅(阻值大于  $1 \times 10^4 \Omega$ )材料, 仿真时设置 FDTD 边界在  $x, y, z$  三个方向上的设置范围分别为  $110 \mu\text{m}, 110 \mu\text{m}, -700 \mu\text{m}$  到  $1000 \mu\text{m}$ ,  $x, y, z$  三个方向上的网格分别为  $5 \mu\text{m}, 5 \mu\text{m}, 10 \mu\text{m}$ ,  $x$  和  $y$  方向上的边界条件采用周期边界条件,  $z$  方向上为完美匹配层。仿真结果显示在图 2(b)中,  $x$  偏振和  $y$  偏振的透过率如图 2(b)黑线和绿线所示, 在  $0.8 \text{ THz}$  频点处透射率约为 94%, 相位差接近  $\pi$  (蓝线)说明这个结构的作用相当于半波片, 我们还仿真了单元结构对圆偏振光的转化效率, 如图 2(b)中粉红色线所示, 在  $0.8 \text{ THz}$  处转化效率接近 90%。

## 2 仿真结果分析

基于上述原理, 本文对太赫兹频段下单焦点偏振旋转长焦深超构表面透镜和双焦点长焦深超构表面透镜横向复用进行了仿真计算。首先仿真了单焦点偏振转换长焦深超构表面透镜。设置的结构参数为  $f=10 \text{ mm}$ ,  $\Delta f=8 \text{ mm}$ ,  $\phi=\pi/2$ , 这样在  $x$  偏振太赫兹波的入射下, 器件后面将会出现一个  $y$  偏振态的长焦深焦点, 偏振态相对于入射太赫兹波旋转了  $90^\circ$ 。数值仿真当中, 设置了  $100 \times 100$  个微结构, 总的尺寸为  $1.1 \text{ cm} \times 1.1 \text{ cm}$ , 材料设置为高阻硅。利用时域有限差

分(FDTD)法进行数值计算, FDTD 边界在  $x, y, z$  三个方向上的设置范围分别为  $11110 \mu\text{m}, 11110 \mu\text{m}, -1000 \mu\text{m}$  到  $30000 \mu\text{m}$ ,  $x, y, z$  三个方向上的网格分别为  $15 \mu\text{m}, 15 \mu\text{m}, 20 \mu\text{m}$ , 工作频率设置为  $0.8 \text{ THz}$ , 边界条件设置为完美匹配层, 计算的结果如图 3 所示。图 3(a)显示了正入射的  $x$  偏振太赫兹波通过超构表面透镜之后  $y=0$  处  $x-z$  面上  $x$  偏振态的电场强度分布, 图 3(b)是  $y=0$  处  $x-z$  面上  $y$  偏振态的电场强度分布, 从图中可以观察到一个明亮的焦点, 焦距范围从  $10 \text{ mm}$  到  $18 \text{ mm}$ , 焦深长度约为  $8 \text{ mm}$ , 中心焦距位于  $z=13.5 \text{ mm}$  处, 比较  $x$  偏振态和  $y$  偏振态的强度,  $x$  偏振态强度几乎为零, 说明结构不仅有超长的焦深, 还能够将入射太赫兹波的偏振态全部旋转  $\pi/2$ , 其中  $y$  偏振态的偏振转换效率为  $50.67\%$ 。图 3(c)是利用普通的聚焦相位公式  $\varphi(r)=-k(\sqrt{r^2+f^2}-f)$  结合偏振调控相位, 并设置焦距为  $13.5 \text{ mm}$  所仿真出来的  $y$  偏振态电场强度分布, 可以看到焦深范围主要的场分布从  $z=11. \text{ mm}$  到  $z=16 \text{ mm}$ , 只有  $4.5 \text{ mm}$  的焦深长度, 而本文中长焦深偏振旋转超构表面透镜却有  $8 \text{ mm}$  的焦深长度, 完全超过传统超构表面透镜的焦深, 同时还能够对焦点的偏振态进行调控。

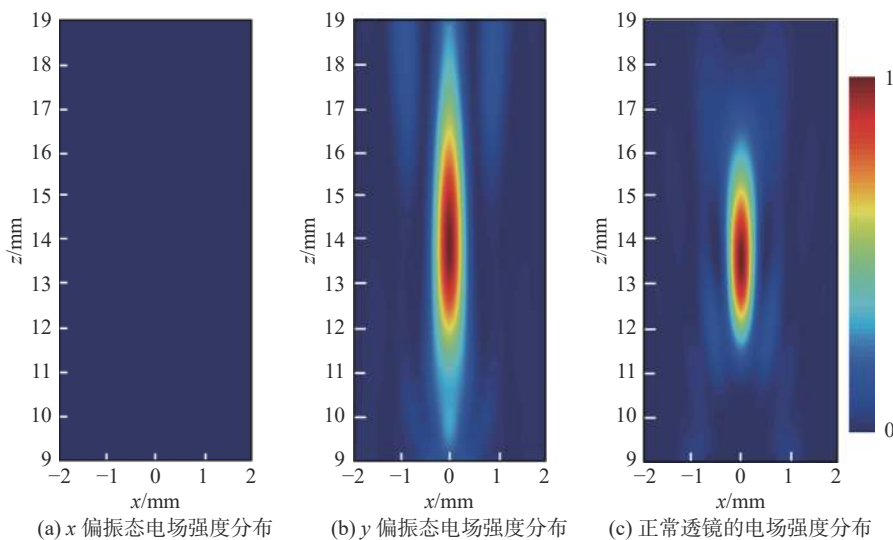


图 3 长焦深偏振转换超构表面透镜与正常焦深偏振转换超构表面透镜的  $x-z$  面电场强度分布

Fig. 3 The electric field intensity distribution on the  $x-z$  plane of the metalens with extended focal length and polarization conversion and the metalens with normal focal length and polarization conversion

为了进一步验证本文设计方法的简便和优势, 设计了长焦深偏振转换超构表面透镜两个焦点横向复用, 这两个焦点, 一个是  $x$  偏振入射太赫兹波聚焦为  $x$  偏振态的焦点, 另外一个为  $x$  偏振态转化为  $y$  偏振态后再聚焦为  $y$  偏振态的焦点。设置参数为  $\phi_1=0$ ,  $\phi_2=\pi/2$ ,  $x_1=-x_2=-1$  mm,

$y_1=y_2=0$ ,  $f=10$  mm,  $\Delta f=8$  mm, 如果是  $x$  偏振太赫兹波入射, 那么将会在一左一右出现两个长焦深焦点, 左边焦点的偏振态是  $x$  偏振, 右边焦点的偏振态是  $y$  偏振, 并且焦深范围都从  $z=10$  mm 到  $z=18$  mm。双焦点仿真设置的条件和单焦点设置一样, 仿真的结果如图 4 所示。

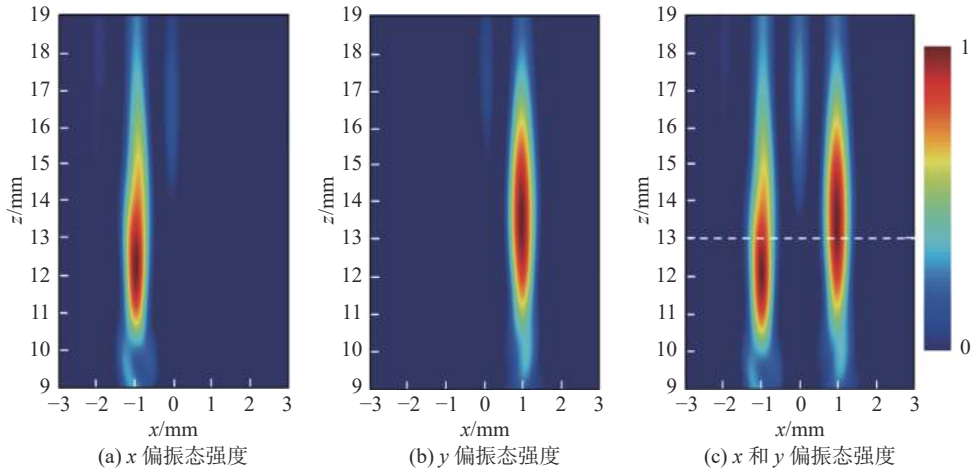


图 4 长焦深偏振转换透镜双焦点复用

Fig. 4 Dual focus multiplexing metalens of extended focal length and polarization conversion

单独看  $x$  偏振态的  $y=0$  处  $x-z$  面电场强度分布, 如图 4(a) 所示, 在  $(-1, 0, 13)$  处出现了一个焦点, 焦深范围从  $z=10$  mm 到  $z=18$  mm, 聚焦效率为 14.7%。图 4(b) 为  $y$  偏振态的  $y=0$  处  $x-z$  面电场强度分布, 我们也观察到另一个焦点, 焦点中心位于  $(1, 0, 13)$ , 焦深范围也是在  $z=10$  mm 到  $z=18$  mm, 焦点长度为 8 mm 左右, 聚焦效率为 14.2%, 两种偏振态的聚焦效

率主要和焦点的振幅相关, 如果  $y$  偏振态的振幅高, 那么  $y$  偏振态的聚焦效率就会高于  $x$  偏振态的聚焦效率。如果在  $y=0$  处  $x-z$  面上同时观察  $x$  偏振态和  $y$  偏振态的电场强度分布, 如图 4(c) 所示, 两个焦点位于一左一右, 关于  $x=0$  这个面对称, 同时焦深范围也是  $z=10$  mm 到  $z=18$  mm, 数值仿真结果与理论设计完全符合, 证明了我们的方法具有简便性和有效性。图 5(a)

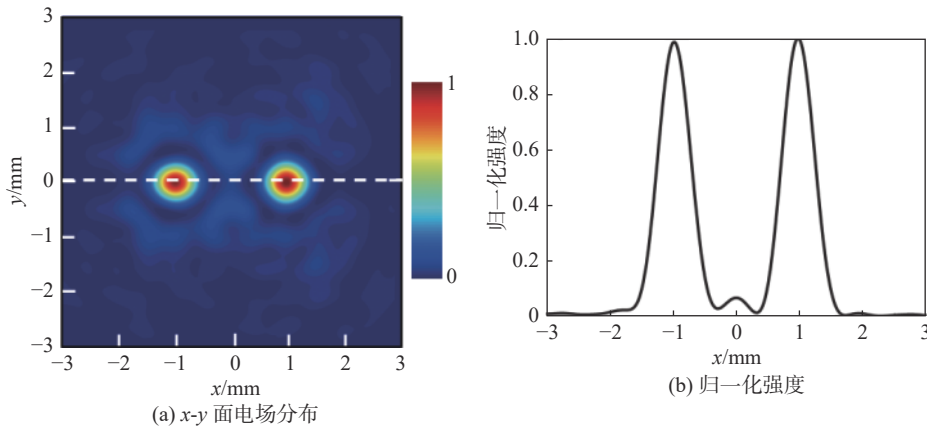


图 5 长焦深偏振可控透镜在焦平面上的电场强度分布

Fig. 5 The electric field intensity distribution on the focal plane of the metalens with extended focal length and controllable polarization

是取焦点中心  $z=13\text{ mm}$  处的  $x$ - $y$  面电场强度分布, 可以看到两个焦点位于一左一右关于  $x=0$  对称分布, 分别位于  $(-1, 0, 13)$  和  $(1, 0, 13)$  处。取  $y=0$  这条线(白色虚线)的电场强度分布, 如图 5(b) 所示, 两个焦点的能量强度接近 1:1, 证明了我们设计的结构具有多个焦点横向复用的功能, 同时在  $z$  方向上还有着超长的焦深, 更加利于超构表面透镜成像的纵向容忍度。

### 3 结 论

本文提出了一种基于几何相位自旋解耦的新方法, 设计了一种基于全介质的长焦深与偏振可控的太赫兹超构表面透镜, 这种超构表面透镜相比于传统的超构表面透镜具有更长的焦深, 同时还能对聚焦的太赫兹波焦点的线偏振态进行任意的调控。利用数值仿真软件(FDTD)验证了单个偏振旋转的长焦深超构表面透镜和两个长焦深焦点在横向方向上的复用, 仿真结果显示单个焦点和双焦点都具有  $8\text{ mm}$  的焦深长度和偏振可控的功能, 相比于动力学相位设计方法, 我们的方法可以在设计功能器件上面的单元结构更加方便, 并且所有的单元结构具有相同的振幅和依靠旋转角的相位。本文所设计的长焦深与偏振可控的超构表面透镜有望应用到层析成像和多通道信息加密等方面。

#### 参 考 文 献:

- [1] LIN D M, FAN P Y, HASMAN E, et al. Dielectric gradient metasurface optical elements[J]. *Science*, 2014, 345(6194): 298 – 302.
- [2] EISENBACH O, AVAYU O, DITCOVSKI R, et al. Metasurfaces based dual wavelength diffractive lenses[J]. *Optics Express*, 2015, 23(4): 3928 – 3936.
- [3] WEST P R, STEWART J L, KILDISHEV A V, et al. All-dielectric subwavelength metasurface focusing lens[J]. *Optics Express*, 2014, 22(21): 26212 – 26221.
- [4] WEN D D, YUE F Y, ARDRON M, et al. Multifunctional metasurface lens for imaging and Fourier transform[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 27628.
- [5] ZHAO Y, ALÙ A. Manipulating light polarization with ultrathin plasmonic metasurfaces[J]. *Physical Review B*, 2011, 84(20): 205428.
- [6] YU N F, AIETA F, GENEVET P, et al. A broadband, background-free quarter-wave plate based on plasmonic metasurfaces[J]. *Nano Letters*, 2012, 12(12): 6328 – 6333.
- [7] ZHENG J, YE Z C, SUN N L, et al. Highly anisotropic metasurface: a polarized beam splitter and hologram[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4(1): 6491.
- [8] WAN W W, GAO J, YANG X D. Full-color plasmonic metasurface holograms[J]. *ACS Nano*, 2016, 10(12): 10671 – 10680.
- [9] LI Z Y, PALACIOS E, BUTUN S, et al. Visible-frequency metasurfaces for broadband anomalous reflection and high-efficiency spectrum splitting[J]. *Nano Letters*, 2015, 15(3): 1615 – 1621.
- [10] GENEVET P, CAPASSO F. Holographic optical metasurfaces: a review of current progress[J]. *Reports on Progress in Physics*, 2015, 78(2): 024401.
- [11] LIN J, GENEVET P, KATS M A, et al. Nanostructured holograms for broadband manipulation of vector beams[J]. *Nano Letters*, 2013, 13(9): 4269 – 4274.
- [12] MONTELONGO Y, TENORIO-PEARL J O, WILLIAMS C, et al. Plasmonic nanoparticle scattering for color holograms[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(35): 12679 – 12683.
- [13] WANG J, YANG J Y, FAZAL I M, et al. Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(7): 488 – 496.
- [14] YAN Y, XIE G D, LAVERY M P J, et al. High-capacity millimetre-wave communications with orbital angular momentum multiplexing[J]. *Nature Communications*, 2014, 5(1): 4876.
- [15] SUEDA K, MIYAJI G, MIYANAGA N, et al. Laguerre-Gaussian beam generated with a multilevel spiral phase plate for high intensity laser pulses[J]. *Optics Express*, 2004, 12(15): 3548 – 3553.

(下转第 35 页)