

基于非对称聚焦的多焦点太赫兹超构表面透镜

唐峰

上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海

收稿日期: 2024年4月26日; 录用日期: 2024年5月23日; 发布日期: 2024年5月31日

摘要

为了提高非对称聚焦在多个焦点的非对称传输能力, 设计了一种基于几何相位和金属光栅相结合的超构表面功能器件。采用几何相位的波前调控方式, 结合时域有限差分方法(FDTD), 对设计的超构表面进行了数值仿真。仿真结果表明所设计的超构表面透镜可以同时控制波的相位、偏振和传播方向, 从而在太赫兹区域产生多个非对称聚焦。并且还可以在不同维度产生多个非对称聚焦。这种灵活而可靠的非对称聚焦设计方法为紧凑型设备在偏振检测、成像和信息加密等领域的潜在应用提供了新的可能性。

关键词

超构表面, 几何相位, 非对称聚焦, 多维复用, 太赫兹超透镜

Multifocal Terahertz Metalens Based on Asymmetric Focusing

Feng Tang

School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Apr. 26th, 2024; accepted: May 23rd, 2024; published: May 31st, 2024

Abstract

In order to improve the asymmetric transmission capability of multiple foci of asymmetric focusing, a functional device based on the combination of geometric phase and metal grating with a metasurface is designed. Numerical simulations of the designed metasurface were carried out using the wavefront modulation of the geometric phase in combination with the finite-difference-in-time-domain (FDTD) method. The simulation results show that the designed metalens can simultaneously control the phase, polarization, and propagation direction of the wave to generate

multiple asymmetric focuses in the terahertz region. And it can also generate multiple asymmetric focuses in different dimensions. This flexible and reliable asymmetric focusing design approach opens up new possibilities for potential applications of compact devices in areas such as polarization detection, imaging and information encryption.

Keywords

Metasurfaces, Geometric Phases, Asymmetric Focusing, Multidimensional Multiplexing, Terahertz Metalens

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,非对称聚焦作为光学领域的一个热门研究方向备受关注。传统上,光学系统的焦点被认为是对称地聚集在器件的两边,然而,随着对光学应用需求的增加以及材料科学和纳米技术的发展,非对称聚焦引起了广泛的兴趣。在非对称聚焦中,焦点的形成不再是对称的,而是呈现出一种非对称的分布形态。这种现象可能由多种因素引起,包括介质非均匀性、非线性效应、表面等离子共振等。与传统的对称聚焦相比,非对称聚焦具有许多独特的优势和应用潜力[1] [2] [3],例如在成像、偏振检测、光通信等领域都具有潜在的应用。

超表面由周期性排列在界面上的亚波长尺度散射体组成,由于其操纵电磁波的非凡能力而引起了广泛的研究兴趣。采用介电和等离子体材料设计了许多具有不同功能、在不同频率范围内工作的光学器件,例如异常折射/反射超表面[4] [5] [6]、超透镜[7] [8] [9]、全息图[10]、偏振器[11] [12] [13]等。超表面具有一个重要的优势,可以利用单一的平面结构来实现多功能,这大大降低了结构的复杂性,有利于小型化集成。因此,人们希望能够利用超表面来取代传统的光学器件来实现非对称聚焦[14]。然而先前研究的超表面可以实现单个聚焦的非对称传输,而多个聚焦的非对称传输还有待研究。

在这里,我们提出并实验证明了通过同时操纵太赫兹波的传播方向、相位和偏振来触发太赫兹(THz)区域的多个非对称聚焦。这种非对称聚焦器件由几何超表面(具有非谐振单元格)和金属光栅组成。不同于先前所展示的具有不同结构单元的共振超表面,几何超表面由相同的微棒组成,并且通过旋转微棒来实现相位、偏振和能量通量的操纵。我们设计的用于多个非对称聚焦的双层超表面可以在 0.7 太赫兹频点工作,并且可以在不同维度上生成多个非对称聚焦。我们设计超表面的方法可以为开发未来能够在多个自由度上操纵电磁波的高性能器件提供一个强大的平台。

2. 设计原理

2.1. 太赫兹超构表面透镜示意图

设计的超构表面透镜如图 1 所示,基于金属光栅和几何相位的非对称聚焦的多焦点太赫兹超构表面透镜能够在不同的入射方向产生不同的聚焦现象。当 x 偏振太赫兹波正向入射时,产生三个焦距都为 4000 μm 的焦点,产生的三个 y 偏振聚焦的坐标分别为(-1500, 0, 4000)、(0, 0, 4000)和(1500, 0, 4000)。而当 x 偏振太赫兹波从后向入射到超构表面时,则不会产生聚焦现象。

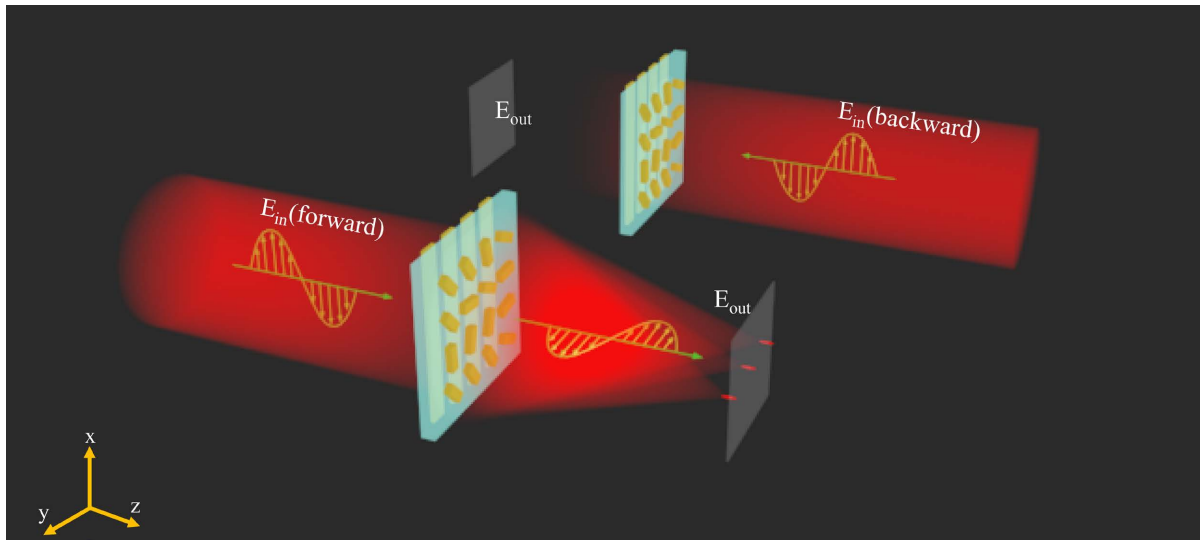


Figure 1. Schematic of multiple asymmetric focusing. Multiple y-polarized focuses are observed at forward x-polarized terahertz wave incidence, while no focusing occurs at reverse x-polarized incidence

图 1. 多个非对称聚焦示意图。在正向 x 偏振太赫兹波的入射下，可观察到多个 y 偏振聚焦，而在反向 x 偏振入射时则不会产生聚焦

2.2. 设计原理

该超表面由具有空间旋转的金属小棒和金属光栅组成，金属光栅作为一个线性偏振器，可以传输 x 偏振太赫兹波，反射 y 偏振太赫兹波。该几何超表面可同时控制相位(用于聚焦)和偏振(用于偏振旋转)，从而产生相对于入射太赫兹波具有正交偏振的聚焦。由于线极化太赫兹波束由具有相同振幅的左手圆偏振(LCP)和右手圆偏振(RCP)分量组成，因此需要两个相反的相位分布[公式(1)]来聚焦 LCP 和 RCP 分量：

$$\begin{cases} \varphi_{LCP}^m(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\sqrt{x^2 + y^2 + f_i^2} - f_i \right) \\ \varphi_{RCP}^n(x, y) = -\frac{2\pi}{\lambda} \left(\sqrt{x^2 + y^2 + f_j^2} - f_j \right) \end{cases} \quad (1)$$

m 和 n 分别为焦点数量，其中 $m = n$ 。 λ 为工作波长， f 为焦距。因此，具有相同振幅的聚焦 LCP 和 RCP 分量[由 Equation (1)中的相位调制引起]可以组合成一个线偏振聚焦。将每个微棒以 $\alpha/2$ 的角度旋转产生的另一个体相 α 引入几何超表面，使焦斑的偏振方向发生旋转。因此，所期望的几何超表面相位为：

$$\Phi(x, y) = \arg \left\{ \exp \left[i \left(\alpha + \varphi_{LCP}^m(x, y) \right) \right] + \exp \left[i \left(\alpha + \varphi_{RCP}^n(x, y) \right) \right] \right\} \quad (2)$$

其中， $m = n = 3$ ， $\alpha = 90^\circ$ 为焦点的偏振旋转角。

为了根据几何相位控制入射太赫兹波，每个微棒都应该设计成准完美的半波片。通过 FDTD 扫参得到高透过率且 x 和 y 方向的相位差为 π ，优化后的金微棒结构参数为：棒的宽度和长度分别为 $w_1 = 50 \text{ um}$ 和 $l = 160 \text{ um}$ (图 2(a₁))，周期为 170 um 。在圆极化太赫兹波的照射下，发射的太赫兹波将包含两部分：一部分是共极化太赫兹波，另一部分是交叉极化太赫兹波。当微棒逆时针/顺时针旋转一个角度 θ 时，交叉极化太赫兹波将以额外的相位延迟 $\approx 2\theta$ 如图 2(a₂)所示。图 2(b₁)显示了金属光栅的原理图，其中每个光栅的长边沿 y 轴。金属光栅的宽度和周期分别为 20 um 和 40 um 。如图 2(b₂)所示，入射 x 偏振太赫兹波的透射率(高于 80%)远远高于入射 y 偏振太赫兹波(低于 20%)的透射率，二者的透过率差异较大。通过在聚酰亚胺薄膜(介电常数为 $\epsilon = 3.5 + 0.035i$)的另一侧引入几何超表面(带有金微棒)和金属(金)光栅。实现

了非对称传输(见图 2(c₁)和图 2(c₂))。在正向 x 偏振入射下, 在 0.7 太赫兹频点处, 透射率大于 82%, 而在反向 x 偏振太赫兹波照射下, 透射率低于 20%, 显示出可以在 0.7 太赫兹下工作的不对称传输。

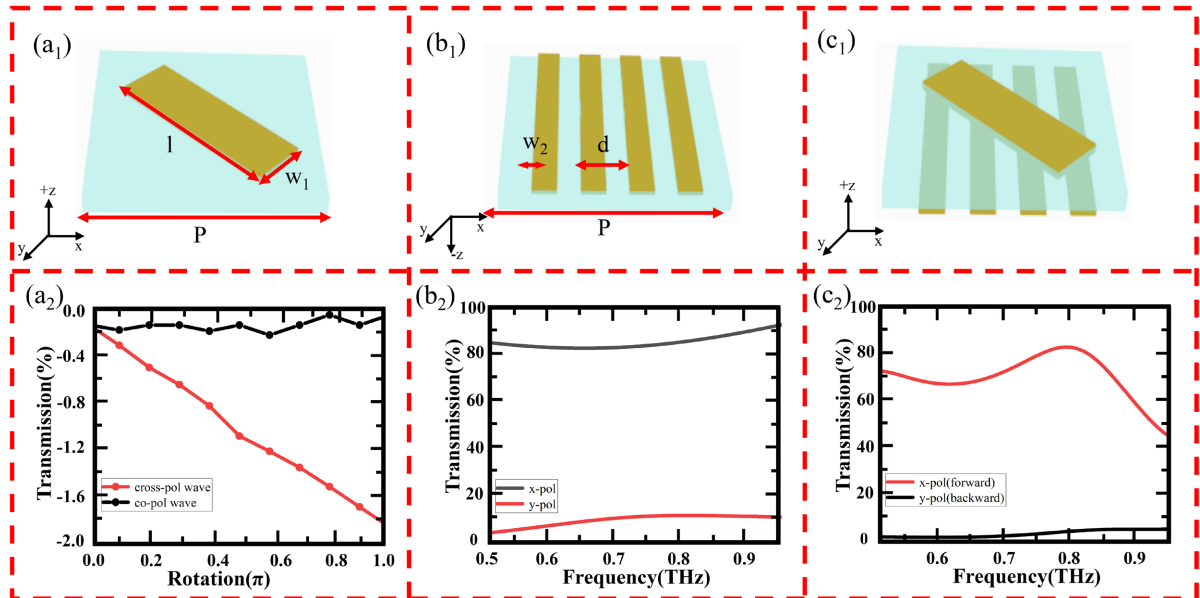


Figure 2. Schematic diagram of unit cell structure design and transmittance and phase diagrams. (a₁) and (a₂) The schematic diagrams and corresponding geometrical phases of the microrods; (b₁) and (b₂) The schematic diagrams and corresponding transmission spectra of the metal gratings; (c₁) and (c₂) The metasurfaces bonded to the metal gratings and the corresponding transmission spectra

图 2. 单元结构设计及透过率及相位示意图。(a₁)和(a₂)微棒的原理图和相应的几何相位; (b₁)和(b₂)金属光栅的原理图和相应的透射光谱; (c₁)和(c₂)与金属光栅结合的超表面及相应的透射光谱

3. 仿真结果分析

图 3 显示了非对称聚焦的数值模拟。这个由 100×100 微棒组成的超表面尺寸为 $1.7 \text{ cm} \times 1.7 \text{ cm}$ 。基于时域有限差分(FDTD)方法, FDTD 边界在 x, y, z 三个方向上的设置范围分别为 $11,110 \text{ um}, 11,110 \text{ um}, -1000 \text{ um}$ 到 $10,000 \text{ um}$, x, y, z 三个方向上的网格分别为 $15 \text{ um}, 15 \text{ um}, 2.5 \text{ um}$, 工作频率设置为 0.7 THz , 边界条件设置为完美匹配层, 计算了非对称聚焦的电场分布, 如图 3(a₁)~(b₂)所示。为了简单起见, 我们计算了 0.7 THz 的电场分布, (计算条件和模型见 2.2 小节)以显示定向器件的非对称传输特性。图 3(a₁)显示了 $f = 0.7 \text{ THz}$ 处 x 偏振太赫兹波正向传输的电场分布。在 $z = 4.0 \text{ mm}$ 处观察到的三个横向沿 y 轴方向偏振的聚焦, 与入射太赫兹波的偏振方向正交, 三个焦点的位置分别位于 $(-1500, 0, 4000)$ 、 $(0, 0, 4000)$ 和 $(1500, 0, 4000)$ 处, 聚焦的效果从仿真结果来看较好, 都分布在理想的设计位置。而反向入射时没有产生聚焦(见图 3(b₁)), 在 xz 平面和 xy 平面几乎没有光透射过去, 导致传输不对称。在这里, 不对称聚焦的机理可以理解为: 对于正向入射, x 偏振太赫兹波几乎完全通过金属光栅传输, 同时与不同取向的超表面(微棒)相互作用。因此, 透射的 x 偏振太赫兹波部分转化为 y 偏振太赫兹波, 同时形成预先设计的三个聚焦。相反, 对于反向入射, 部分波与超表面相互作用并转换为 y 极化太赫兹波。转换波与金属光栅相互作用后被完全反射。非转换(x 偏振)太赫兹波的另一部分可以通过金属光栅。然而, 未转换的太赫兹波没有被超表面调制, 因此不能形成有效的聚焦。图 3(a₂)和图 3(b₂)显示了在 $x-y$ 平面($z = 4.0 \text{ mm}$ 和 $z = -4.0 \text{ mm}$)上的电场分布。对于正向传输, 在真实焦平面($z = 4.0 \text{ mm}$)上观察到三个横向排布的焦点, 而在后向情况下不能产生(在 $z = -4.0 \text{ mm}$) (见图 3(a₂)和图 3(b₂))。

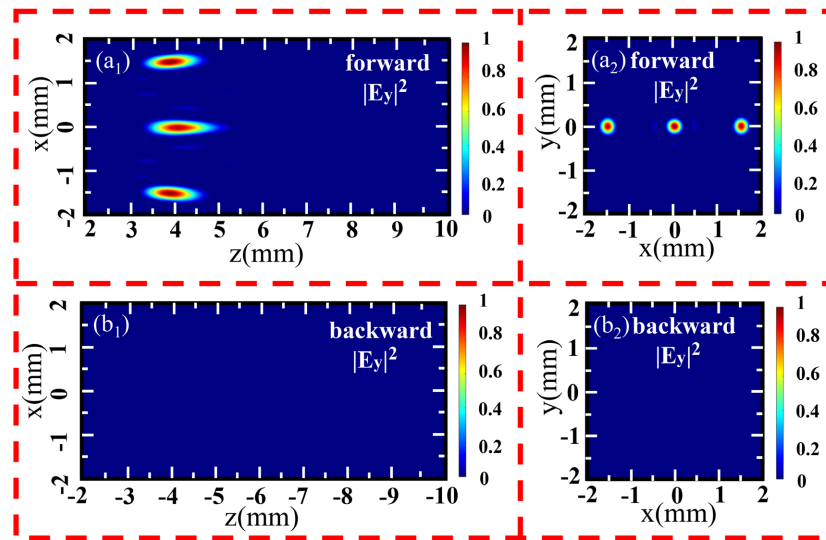


Figure 3. Simulation results of the electric field strength distribution of a transverse multifocal terahertz metalens based on asymmetric focusing. (a₁) Ey field strength distributions in the x-z planes at three foci generated by x-polarized terahertz waves incident forward into the metalens. (a₂) Ey field strength distributions in the x-y planes at the three focal points of an x-polarized terahertz wave incident forward into a metalens. (b₁) Ey field strength distributions in the x-z planes at the three foci produced by an x-polarized terahertz wave incident in the reverse direction onto a metalens. (b₂) Ey field strength distributions in the x-y planes at the three foci produced by an x-polarized terahertz wave back-incident to a metalens

图 3. 基于非对称聚焦的横向多焦点太赫兹超构表面透镜的电场强度分布仿真结果。(a₁) x 偏振太赫兹波正向入射到超构表面透镜时产生的三个焦点的 x-z 平面的 Ey 场强分布。(a₂) x 偏振太赫兹波正向入射到超构表面透镜时产生的三个焦点的 x-y 平面的 Ey 场强分布。(b₁) x 偏振太赫兹波反向入射到超构表面透镜时产生的三个焦点的 x-z 平面的 Ey 场强分布。(b₂) x 偏振太赫兹波反向入射到超构表面透镜时产生的三个焦点的 x-y 平面的 Ey 场强分布

我们上述设计的非对称聚焦的三个焦点是横向分布的，不仅如此，我们还可以设计成纵向分布的三个焦点。我们在设计时设置三个不同的焦距，分别为 $f_1 = 3500 \text{ um}$ 、 $f_2 = 5500 \text{ um}$ 和 $f_3 = 7500 \text{ um}$ ，而 x 和 y 方向不变，都设为 0。这样我们就可以得到三个在纵向上分布的焦点。如图 4(a₁)所示，

当 x 偏振太赫兹波正向入射到超表面上时，在 xz 平面的 $z = 3500 \text{ um}$ 、 $z = 5500 \text{ um}$ 和 $z = 7500 \text{ um}$ 处显示出三个明显的 y 偏振的聚焦分布。同样我们观察在 $z = 3500 \text{ um}$ 、 $z = 5500 \text{ um}$ 和 $z = 7500 \text{ um}$ 处的 xy 平面，正如预期的一样，三个焦平面都分别显示出 y 偏振的焦点。而当 x 偏振太赫兹波反向入射到超构表面上时，理论上是没有焦点出现的。而我们的仿真结果正如理论相同，如图 4(b₁)所示，在 xz 平面，没有明显的聚焦显示。进一步的，我们观察在 xz 平面的 $z = -3500 \text{ um}$ 、 $z = -5500 \text{ um}$ 和 $z = -7500 \text{ um}$ 处没有显示出三个的 y 偏振的聚焦分布。由此证明了我们设计的非对称多焦点超构透镜的正确性。

上述所设计的非对称多焦点超构透镜显示了在纵向上分布的特性，在这里我们还可以设计在纵向上不同焦距并且在 x 方向不同的多个非对称聚焦分布。同样的，我们在设计时将焦距位置分别设置为(0, 0, 3500)、(-1500, 0, 5000)和(1500, 0, 6500)。仿真结果如图 5 所示。在图 5(a₁)中我们可以观察到在 xz 平面上，三个错开排列的聚焦，他们分别位于(0, 0, 3500)、(-1500, 0, 5000)和(1500, 0, 6500)处。在(1500, 0, 6500)处的焦距明显更大，这是由于传播距离最远导致的。同样的如图 5(a₂)、图 5(a₃)和图 5(a₄)我们可以观察到在 x 偏振太赫兹波正向入射到超构表面上在 $z = 3500 \text{ um}$ 、 $z = 5000 \text{ um}$ 和 $z = 6500 \text{ um}$ 处的 xy 平面的 y 偏振焦点。他们分别位于 xy 平面的中间、右边和左边，和预期设置的结果一致。而当 x 偏振太赫兹波反向入射到超构表面上时，如图 5(b₁)所示，在 xz 平面没有明显的 y 偏振聚焦。同样的如图 5(b₂)、图 5(b₃)和图 5(b₄)我们可以观察到在 x 偏振太赫兹波反向入射到超构表面上在 $z = -3500 \text{ um}$ 、 $z = -5000 \text{ um}$ 和 $z = -6500 \text{ um}$ 处的 xy 平面的 y 偏振场强分布，结果和理论的一致，并没有出现聚焦现象。

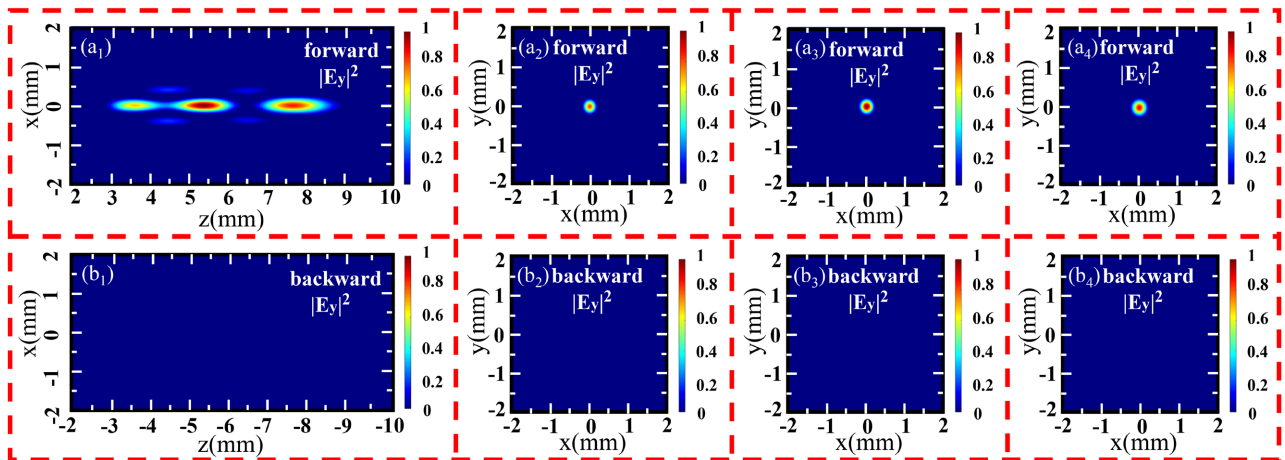


Figure 4. Simulation results of electric field strength distribution of longitudinal multifocal terahertz metasurfaces based on asymmetric focusing. (a₁) E_y field strength distributions in the x-z plane at the three foci generated by an x-polarized terahertz wave at forward incidence into metasurfaces. (a₂), (a₃), and (a₄) E_y field strength distributions in the x-y planes of the focal points at focal lengths 3500 μm, 5500 μm, and 7500 μm generated by an x-polarized terahertz wave positively incident on metasurfaces. (b₁) E_y field strength distributions in the x-z planes of the three focal points generated when an x-polarized terahertz wave is incident in the reverse direction to the metasurfaces. (b₂), (b₃) and (b₄) E_y field intensity distributions in the x-y planes at focal lengths -3500 μm, -5500 μm and -7500 μm for x-polarized terahertz waves back-incident to metasurfaces.

图 4. 基于非对称聚焦的纵向多焦点太赫兹超构表面透镜的电场强度分布仿真结果。(a₁) x 偏振太赫兹波正向入射到超构表面透镜时产生的三个焦点的 x-z 平面的 E_y 场强分布。(a₂)、(a₃)和(a₄) x 偏振太赫兹波正向入射到超构表面透镜时在焦距 3500 μm、5500 μm 和 7500 μm 处产生的焦点的 x-y 平面的 E_y 场强分布。(b₁) x 偏振太赫兹波反向入射到超构表面透镜时产生的三个焦点的 x-z 平面的 E_y 场强分布。(b₂)、(b₃)和(b₄) x 偏振太赫兹波反向入射到超构表面透镜时在焦距 -3500 μm、-5500 μm 和 -7500 μm 处 x-y 平面的 E_y 场强分布

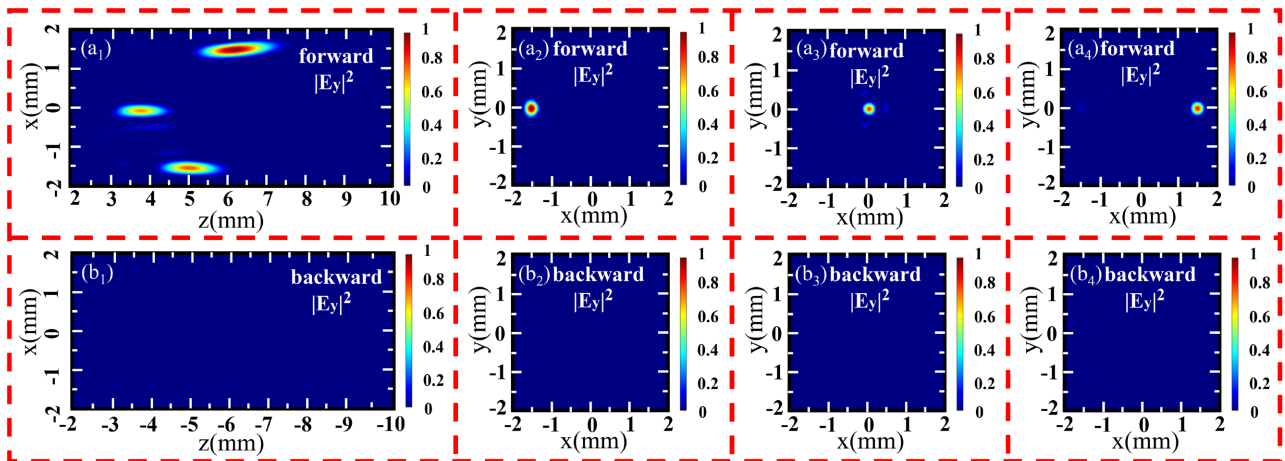


Figure 5. Simulation results of electric field strength distribution of a multidimensional multifocal terahertz metasurface based on asymmetric focusing. (a₁) E_y field strength distributions in the x-z plane at the three focus points generated by an x-polarized terahertz wave at forward incidence into metasurfaces. (a₂), (a₃), and (a₄) E_y field strength distributions in the x-y planes of the focal points at focal lengths 3500 μm, 5000 μm, and 6500 μm generated by an x-polarized terahertz wave positively incident on metasurfaces. (b₁) E_y field strength distributions in the x-z planes of the three focal points generated when an x-polarized terahertz wave is incident in the reverse direction to the metasurfaces. (b₂), (b₃) and (b₄) E_y field intensity distributions in the x-y planes at focal lengths -3500 μm, -5000 μm and -6500 μm for x-polarized terahertz waves back-incident to metasurfaces.

图 5. 基于非对称聚焦的多维多焦点太赫兹超构表面透镜的电场强度分布仿真结果。(a₁) x 偏振太赫兹波正向入射到超构表面透镜时产生的三个焦点的 x-z 平面的 E_y 场强分布。(a₂)、(a₃)和(a₄) x 偏振太赫兹波正向入射到超构表面透镜时在焦距 3500 μm、5000 μm 和 6500 μm 处产生的焦点的 x-y 平面的 E_y 场强分布。(b₁) x 偏振太赫兹波反向入射到超构表面透镜时产生的三个焦点的 x-z 平面的 E_y 场强分布。(b₂)、(b₃)和(b₄) x 偏振太赫兹波反向入射到超构表面透镜时在焦距 -3500 μm、-5000 μm 和 -6500 μm 处 x-y 平面的 E_y 场强分布

4. 结论

总之, 我们提出并通过仿真证明了在太赫兹区域实现多个非对称聚焦的方法, 基于几何相位超构表面和金属光栅相结合并工作在 0.7 THz 频率下的三层超构表面。在 x 偏振太赫兹波的正向入射下观察到三个 y 偏振焦点, 而向后入射时, 并不会产生任何聚焦现象。所提出的非对称超表面是一种强大的工具, 不仅可以灵活地控制电磁波前, 而且可以为操纵电磁波的传播方向打开一个新的窗口。这种设计方法为超构表面调控电磁波的位置和方向方面提供了新的思路, 对开发更多新奇功能的太赫兹功能器件开辟了新的道路。

参考文献

- [1] Cakmakyapan, S., Caglayan, H., Serebryannikov, A.E. and Ozbay, E. (2011) Experimental Validation of Strong Directional Selectivity in Nonsymmetric Metallic Gratings with a Subwavelength Slit. *Applied Physics Letters*, **98**, Article 051103. <https://doi.org/10.1063/1.3552675>
- [2] Tang, D.F., Wang, C., Pan, W.K., Li, M.H. and Dong, J.F. (2017) Broad Dual-Band Asymmetric Transmission of Circular Polarization in Near-Infrared Communication Band. *Optics Express*, **25**, 11329-11339. <https://doi.org/10.1364/OE.25.011329>
- [3] Huang, C., Feng, Y., Zhao, J., Wang, Z. and Jiang, T. (2012) Asymmetric Electromagnetic Wave Transmission of Linear Polarization via Polarization Conversion through Chiral Metamaterial Structures. *Physical Review B*, **85**, Article 195131. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.85.195131>
- [4] West, P.R., Stewart, J.L., Kildishev, A.V., et al. (2014) All-Dielectric Subwavelength Metasurface Focusing Lens. *Optics Express*, **22**, 26212-26221. <https://doi.org/10.1364/OE.22.026212>
- [5] Wan, W.W., Gao, J. and Yang, X.D. (2016) Full-Color Plasmonic Metasurface Holograms. *ACS Nano*, **10**, 10671-10680. <https://doi.org/10.1021/acsnano.6b05453>
- [6] Zhao, Y. and Alù, A. (2011) Manipulating Light Polarization with Ultrathin Plasmonic Metasurfaces. *Physical Review B*, **84**, 205428. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.84.205428>
- [7] Zheng, J., Ye, Z.C., Sun, N.L., et al. (2014) Highly Anisotropic Metasurface: A Polarized Beam Splitter and Hologram. *Scientific Reports*, **4**, Article No. 6491. <https://doi.org/10.1038/srep06491>
- [8] Yu, N.F., Aieta, F., Genevet, P., et al. (2012) A Broadband, Background-Free Quarter-Wave Plate Based on Plasmonic Metasurfaces. *Nano Letters*, **12**, 6328-6333. <https://doi.org/10.1021/nl303445u>
- [9] Li, Z.Y., Palacios, E., Butun, S., et al. (2015) Visible-Frequency Metasurfaces for Broadband Anomalous Reflection and High-Efficiency Spectrum Splitting. *Nano Letters*, **15**, 1615-1621. <https://doi.org/10.1021/nl5041572>
- [10] Genevet, P. and Capasso, F. (2015) Holographic Optical Metasurfaces: A Review of Current Progress. *Reports on Progress in Physics*, **78**, Article 024401. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/78/2/024401>
- [11] Lin, J., Genevet, P., Kats, M.A., et al. (2013) Nanostructured Holograms for Broadband Manipulation of Vector Beams. *Nano Letters*, **13**, 4269-4274. <https://doi.org/10.1021/nl402039y>
- [12] Koenig, S., Lopez-Diaz, D., Antes, J., et al. (2013) Wireless Sub-THz Communication System with High Data Rate. *Nature Photonics*, **7**, 977-981. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2013.275>
- [13] Allen, L., Beijersbergen, M.W., Spreeuw, R.J., et al. (1992) Orbital Angular Momentum of Light and the Transformation of Laguerre-Gaussian Laser Modes. *Physical Review A*, **45**, 8185-8189. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.45.8185>
- [14] Yao, B.S., Zang, X.F., Li, Z., et al. (2020) Dual-Layered Metasurfaces for Asymmetric Focusing. *Photonics Research*, **8**, 830-843. <https://doi.org/10.1364/PRJ.387672>