

# 基于传输相位的线性偏振涡旋光束强度调控太赫兹超构表面透镜

卢彬彬

上海理工大学, 光电信息与计算机工程学院, 上海

收稿日期: 2023年4月12日; 录用日期: 2023年5月24日; 发布日期: 2023年5月31日

## 摘要

为了提高涡旋光束强度分布的横向调控能力, 设计了一种基于传输相位全介质结构超构表面功能器件。采用传输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。研究表明, 通过对入射的线性偏振分量分别设计相位分布, 得到了两个横向强度分布可由入射偏振态自由调控的涡旋光束, 同时使得横向复用的两个涡旋光束具有相互正交的偏振态。相关研究有望应用于光通讯、微粒操控和信息加密等领域。

## 关键词

超构表面, 传输相位, 涡旋, 偏振依赖, 强度调控

# Terahertz Metasurface Lenses with Linear Polarization Vortex Beam Intensity Regulation Based on Dynamic Phase

Binbin Lu

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

Received: Apr. 12<sup>th</sup>, 2023; accepted: May 24<sup>th</sup>, 2023; published: May 31<sup>st</sup>, 2023

## Abstract

In order to improve the lateral control ability of vortex beam intensity distribution, a metasurface functional device based on the transmission phase all-dielectric structure is designed. The wave-

front regulation method of dynamic phase and the finite difference time-domain method (FDTD) were used to numerically simulate the designed metasurface. The results show that by designing the phase distribution of the incident linear polarization components, two vortex beams with lateral intensity distribution can be freely adjusted by the incident polarization state, and the two vortex beams laterally multiplexed have orthogonal polarization states with each other. Related research is expected to be applied to optical communication, particle manipulation and information encryption.

## Keywords

Metasurface, Dynamic Phase, Vortex, Polarization Dependent, Intensity Regulation

Copyright © 2023 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

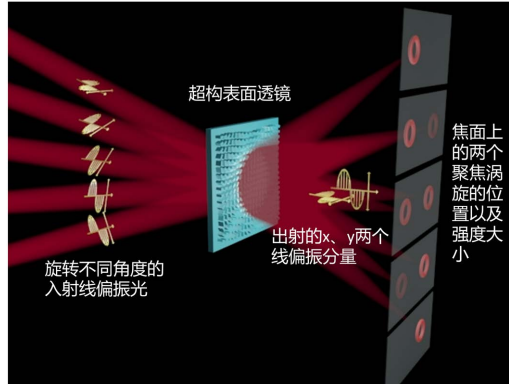
## 1. 引言

超构表面是一种基于亚波长结构的功能膜层器件，也称超表面或二维超构材料。与传统光学器件相比，超构表面可在平面化的亚波长结构内产生异常的相位突变，因其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[1] [2] [3] [4]，波片[5] [6]，分束器[7]，全息超表面[8]-[13]，涡旋光束研究[14] [15] [16] [17]，单向聚焦[18]，神经网络结合[19]。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。

19世纪30年代开始就有了早期的涡旋光束研究，天文学家 George Biddell Airy 发现在透镜的焦平面处有一个特殊的光环。二十世纪初 Ignatovskii 对这种奇异现象进行了研究，发现这个特殊的光环附近的能量可以在自由空间中传播，并且传播方向与初始方向相反。1967年 Boivin, Dow, Wolf 对能流的研究过程中发现了这个能流中存在涡旋，此涡旋绕焦平面附近的一条线旋转，这个发现预示着光场也存在涡旋。Vaughan 和 Willetts 在 1979 年发现 Laguerre-Gaussian (LG) 光束的相位分布存在着相位奇点，而且相位奇点位于强度为零的光轴上，这说明 LG 光束是涡旋光束的一种[20]。1992年 Allen 等人提出了光束的轨道角动量独立于自旋角动量，如果一束近轴传播光束如果携带  $\exp(il\phi)$  的相位，那么每个光子都携带  $lh^-$  的轨道角动量[21]。携带轨道角动量光束，亦称光学涡旋光束；由于轨道角动量光束的动力学性质和量子性质，具有螺旋形相位波前带来中心相位奇点从而产生中空光强分布的这种旋转光束，其在微粒操控、大容量高速率的大规模光通信、量子信息处理、超分辨显微成像等许多领域具有重要潜在价值与应用，吸引了人们越来越多的关注与研究兴趣。携带轨道角动量的光束，也就是涡旋光束，主要有两类，一类是直接由螺旋形的相位波前分布产生的具有中心相位奇点的空心光束；另一类称为矢量光束，其由随方位角变化的偏振分布在光束中心产生偏振奇点，按偏振的分布类型，可分为径向偏振、角向偏振以及螺旋偏振。本文提出了一种基于传输相位来设计超构表面透镜的方法，利用传输相位分别调控两个正交偏振涡旋，实现线偏振太赫兹波聚焦为涡旋的同时，还可以调控聚焦涡旋强度。同时两个涡旋的横向复用极大地提高了偏振选择成像的横向容忍性和增加了加密信息通道。

## 2. 设计原理

### 2.1. 太赫兹超构表面透镜示意图

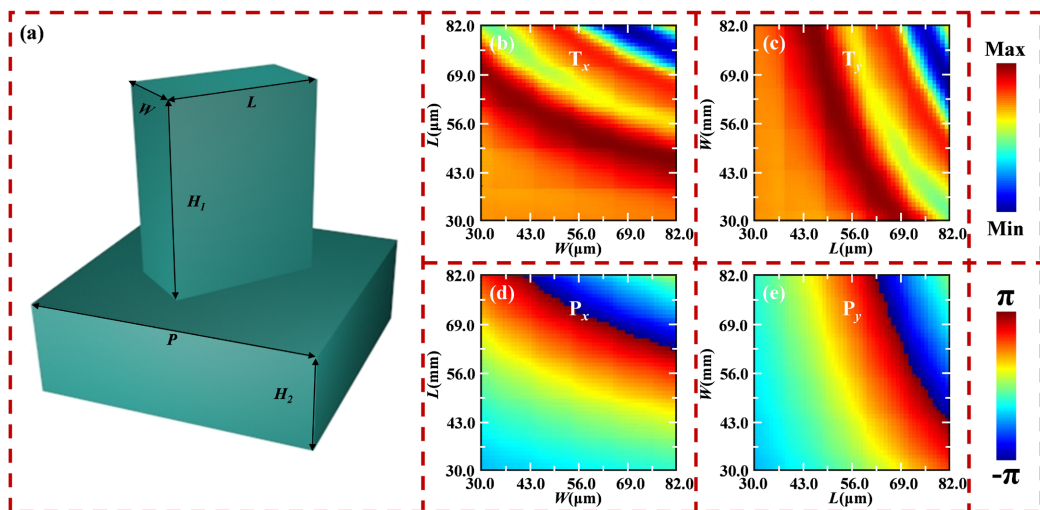


**Figure 1.** The incoming linearly polarized terahertz wave changes from  $0^\circ\sim 90^\circ$ , and the exit focused polarization vortex schematic. When the incoming linearly polarization rotates at a certain angle, the focusing vortex generated by the metalens is displayed on the other side of the metalens, with one vortex being the x-polarization component focusing vortex and the other vortex being the y-polarization component focusing vortex

**图 1.** 入射线性偏振太赫兹波从  $0^\circ\sim 90^\circ$  变化, 出射聚焦偏振涡旋示意图。当入射线性偏振旋转一定角度时, 透过超构表面透镜产生的聚焦涡旋显示在超构表面透镜另一侧, 一侧涡旋为  $x$  偏振分量聚焦涡旋, 另一侧涡旋为  $y$  偏振分量聚焦涡旋

设计的超构表面透镜如图 1 所示, 基于传输相位的线性偏振涡旋光束超构表面透镜能够将任意线偏振态的入射太赫兹波聚焦成两个沿  $x$  轴离轴的聚焦涡旋。其中  $x$  偏振光聚焦在原点左侧( $-2000, 0$ )处,  $y$  偏振光聚焦在原点右侧( $2000, 0$ )处。

### 2.2. 设计原理



**Figure 2.** Schematic diagram of unit structure design and scanning transmittance and phase. (a) Schematic diagram of the structure of the unit; (b) Incident x polarization sweep parameter yields transmittance; (c) Incident x polarization sweep parameter obtains the phase; (d) Incident y polarization sweep parameter yields transmittance; (e) Incident y polarization sweep parameter obtains the phase

**图 2.** 单元结构设计及扫参透参率及相位示意图。(a) 单元结构示意图; (b) 入射  $x$  偏振扫参得到透参率; (c) 入射  $x$  偏振扫参得到相位; (d) 入射  $y$  偏振扫参得到透参率; (e) 入射  $y$  偏振扫参得到相位

因为任意线偏振状态的太赫兹波都可以分解为两个正交的线性偏振分量(横向  $x$  偏振分量和纵向  $y$  偏振分量), 所以当线性偏振光从  $x$  偏振转到  $y$  偏振时,  $x$  偏振分量和  $y$  偏振分量的比例关系也在改变, 理论上两个偏振相关的聚焦涡旋的强度也从 1:0 变化到 0:1。为了使  $x$  偏振光和  $y$  偏振光都聚焦成涡旋, 那么需要 LP- $x$  和 LP- $y$  具有相同的相位, 在线偏振太赫兹波通过超表面后其相位可以写为:

$$\varphi_{LP-x} = -\left(\frac{2\pi}{\lambda}\left(\sqrt{(x-x_{LP-x})^2+(y-y_{LP-x})^2+f_{LP-x}^2}-f_{LP-x}\right)+l_{LP-x}\varphi\right) \quad (1)$$

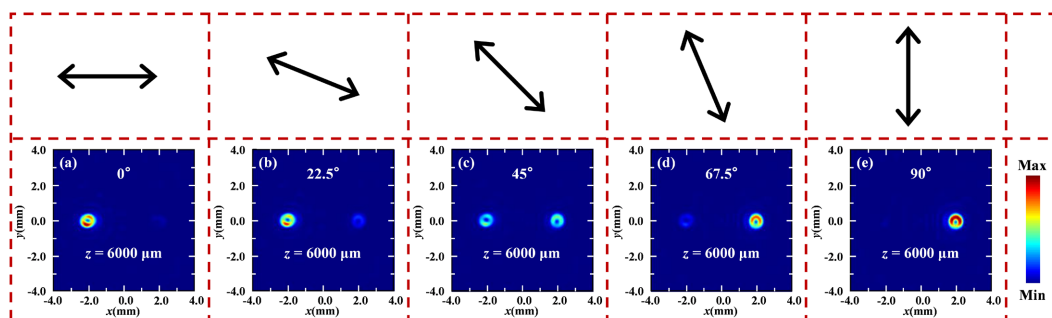
$$\varphi_{LP-y} = -\left(\frac{2\pi}{\lambda}\left(\sqrt{(x-x_{LP-y})^2+(y-y_{LP-y})^2+f_{LP-y}^2}-f_{LP-y}\right)+l_{LP-y}\varphi\right) \quad (2)$$

其中,  $\lambda$  为入射波长,  $l_{LP-x}$  与  $l_{LP-y}$  分别为两个涡旋的拓扑荷数,  $f_{LP-x}$  与  $f_{LP-y}$  为分别为两个聚焦涡旋的焦距, 它们分别可以将入射的  $x$  线性偏振分量或者  $y$  线性偏振分量的太赫兹波聚焦在原点左侧或者原点右侧形成涡旋。如果入射的是任意的线性偏振光, 则会在原点左右两侧出现两个强度变化的正交涡旋, 相应的相位表达式为:

$$\varphi_{total} = \varphi_{LP-x} + \varphi_{LP-y} \quad (3)$$

其中,  $\varphi_{total}$  是引入到超表面上的总相位。通过 FDTD 软件优化了一组微结构, 如图 2(a)所示, 单元结构扫参的长度范围为  $L = 30\sim 82 \mu\text{m}$ , 宽度范围为  $W = 30\sim 82 \mu\text{m}$ , 棍子高度  $H_1 = 500 \mu\text{m}$ , 基底高度  $H_2 = 500 \mu\text{m}$ , 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  $110 \mu\text{m}, 110 \mu\text{m}, -500 \mu\text{m}$  到  $500 \mu\text{m}$ ,  $x, y, z$  三个方向上的网格分别为  $15 \mu\text{m}, 15 \mu\text{m}, 15 \mu\text{m}$ ,  $x$  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。 $x$  偏振和  $y$  偏振在小棍子尺寸变化范围内的扫参结果的透过率分别如图 2(b)及图 2(c)所示, 相位图分别如图 2(d)及图 2(e)所示, 在  $0.7 \text{ THz}$  频点处透射率均大于  $65\%$ , 最高点透过率接近  $91\%$ , 相位相位覆盖  $-\pi\sim\pi$ 。

### 3. 仿真结果分析

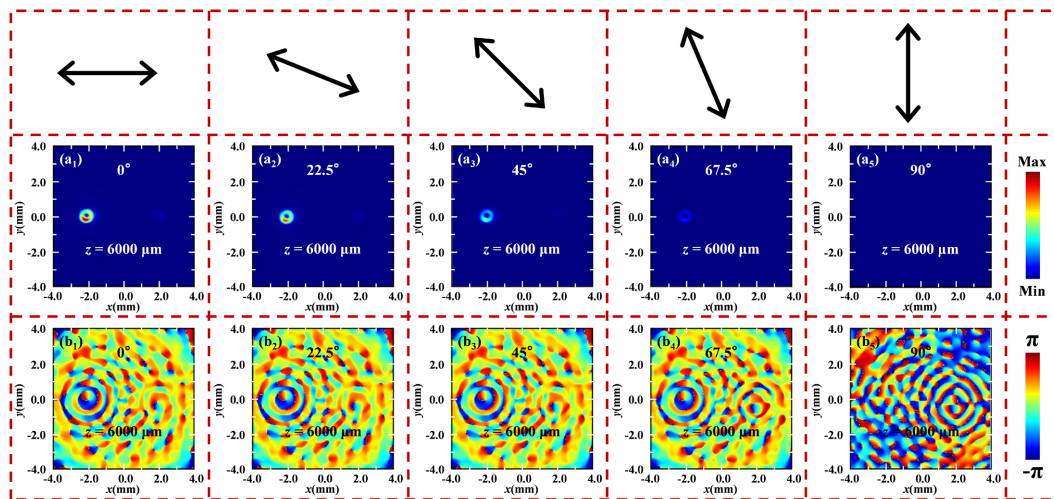


**Figure 3.** Simulation results of total electric field distributions of linear polarization vortex metalens with topological charge of +1. (a)~(e) Simulation results of electric field distributions obtained under the incidence of  $0^\circ\sim 90^\circ$  linearly polarized terahertz waves

**图 3.** 拓扑荷数为+1的线性偏振涡旋超构表面透镜总的电场分布仿真结果。(a)~(e)在  $0^\circ\sim 90^\circ$ 线性偏振太赫兹波入射下得到的电场分布仿真结果

基于上述设计原理, 本文对太赫兹频段下正交线偏振涡旋光束强度分布调控超构表面透镜进行了仿真计算。设置的结构参数为  $f = 6000 \mu\text{m}$ , 在线性偏振太赫兹波的入射下, 器件后面将会出现两个线性偏振态的聚焦涡旋, 偏振态相对于入射太赫兹波并未旋转, 只是分到了两个涡旋分量中。在实际数值仿真当中, 设置了  $100 \times 100$  个微结构, 总的尺寸为  $1.1 \text{ cm} \times 1.1 \text{ cm}$ , 设置的小棍子及基底的材料均为高阻硅。

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  $11,110 \mu\text{m}$ ,  $11,110 \mu\text{m}$ ,  $-1000 \mu\text{m}$  到  $4500 \mu\text{m}$ ,  $x, y, z$  三个方向上的网格分别为  $15 \mu\text{m}$ ,  $15 \mu\text{m}$ ,  $15 \mu\text{m}$ , 工作频率设置为  $0.7 \text{ THz}$ , 边界条件设置为完美匹配层, 计算结果的总场强度如图 3 所示。图 3(a)显示了横向入射的线性偏振太赫兹波通过超构表面透镜之后在  $z = 6000 \mu\text{m}$  处  $x$ - $y$  面上线性偏振态的电场强度分布, 可以看到此时只有  $x$  偏振态的聚焦涡旋出现。这是因为入射的线性偏振只有  $x$  偏振分量,  $y$  偏振分量强度为 0。图 3(b)显示了旋转  $22.5^\circ$  入射的线性偏振太赫兹波通过超构表面透镜之后在  $z = 6000 \mu\text{m}$  处  $x$ - $y$  面上线性偏振态的电场强度分布, 从图中可以观察到原点左右两个聚焦涡旋均有强度分布但是  $x$  偏振涡旋强度远远强于  $y$  偏振涡旋强度。虽然入射线性偏振旋转  $22.5^\circ$  之后存在  $y$  偏振分量, 但是  $x$  偏振分量还是远大于  $y$  偏振分量。图 3(c)显示了旋转  $45^\circ$  入射的线性偏振太赫兹波通过超构表面透镜之后在  $z = 6000 \mu\text{m}$  处  $x$ - $y$  面上线性偏振态的电场强度分布, 从图中可以观察到原点左右两个聚焦涡旋均有强度分布且  $x$  偏振涡旋强度与  $y$  偏振涡旋强度几乎相等。这是因为入射线性偏振旋转  $45^\circ$  之后  $x$  偏振分量与  $y$  偏振分量在理论上是完全相等的。图 3(d)显示了旋转  $67.5^\circ$  入射的线性偏振太赫兹波通过超构表面透镜之后在  $z = 6000 \mu\text{m}$  处  $x$ - $y$  面上线性偏振态的电场强度分布, 从图中可以观察到原点左右两个聚焦涡旋均有强度分布且  $x$  偏振涡旋强度远远小于  $y$  偏振涡旋强度。这是因为入射线性偏振旋转  $67.5^\circ$  之后入射虽然存在  $x$  偏振分量, 但是  $x$  偏振分量理论上小于  $y$  偏振分量。图 3(e)显示了旋转  $90^\circ$  入射的线性偏振太赫兹波通过超构表面透镜之后在  $z = 6000 \mu\text{m}$  处  $x$ - $y$  面上线性偏振态的电场强度分布, 从图中可以观察到只有  $y$  偏振态的聚焦涡旋出现。此时入射的线性偏振只有  $y$  偏振分量, 而  $x$  偏振分量强度则为 0。也就是说, 对于此处设计的超构表面, 当入射线性偏振态从  $x$  偏振态旋转到  $y$  偏振态时, 聚焦涡旋的整体强度从只有左侧涡旋慢慢变化到只有右侧涡旋, 整体上就如图 3 从左到右变化所示。

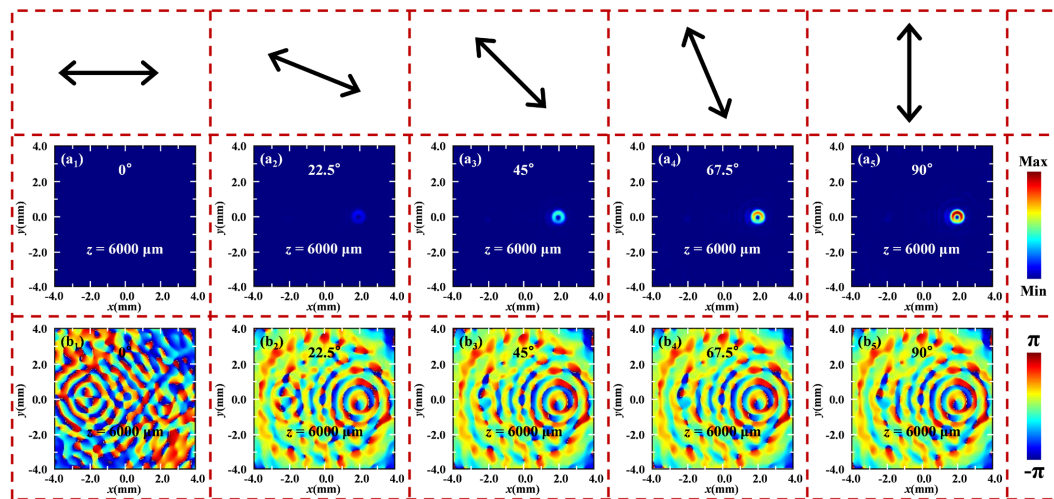


**Figure 4.** Simulation results of electric fields and phase distributions of  $x$ -polarization component of linearly polarization vortex metals with topological charge of  $+1$ . (a<sub>1</sub>)~(a<sub>5</sub>) Electric field distribution simulation results of  $x$ -polarization component obtained under the incidence of  $0^\circ\sim 90^\circ$  linearly polarization terahertz waves; (b<sub>1</sub>)~(b<sub>5</sub>) Phase distribution simulation results of  $x$ -polarization component obtained under the incidence of  $0^\circ\sim 90^\circ$  linearly polarization terahertz waves.

**图 4.** 拓扑荷数为  $+1$  的线性偏振涡旋超构表面透镜  $x$  偏振分量的电场及相位分布仿真结果。(a<sub>1</sub>)~(a<sub>5</sub>)在  $0^\circ\sim 90^\circ$  线性偏振太赫兹波入射下得到的  $x$  偏振分量的电场分布仿真结果; (b<sub>1</sub>)~(b<sub>5</sub>)在  $0^\circ\sim 90^\circ$  线性偏振太赫兹波入射下得到的  $x$  偏振分量的相位分布仿真结果

为了进一步说明以上设计超构表面的出射强度变化随入射偏振变化的依赖性, 我们分别将出射聚焦涡旋的  $x$  偏振分量及  $y$  偏振分量的强度及相位提取出来。图 4 显示的是提取出的  $x$  偏振分量的聚焦涡旋

强度分布及相位分布。图 4(a<sub>1</sub>)显示了横向入射的线性偏振太赫兹波通过超构表面透镜之后在  $z = 6000 \mu\text{m}$  处  $x$ - $y$  面上  $x$  偏振聚焦涡旋的电场强度分布，可以看到只在原点左侧出现了  $x$  偏振态的聚焦涡旋，且此时聚焦涡旋强度最大，这是因为入射偏振态全是  $x$  偏振。图 4(b<sub>1</sub>)显示了涡旋的相位分布，可以看到只有在图 4(a<sub>1</sub>)聚焦涡旋出现的相应位置有明显的涡旋相位。图 4(a<sub>2</sub>)显示了入射的线性偏振太赫兹波旋转  $22.5^\circ$  通过超构表面透镜之后在  $z = 6000 \mu\text{m}$  处  $x$ - $y$  面上  $x$  偏振聚焦涡旋的电场强度分布，可以看到只在原点左侧出现了  $x$  偏振态的聚焦涡旋，且此时聚焦涡旋强度比  $0^\circ$  线性偏振入射时出射的  $x$  偏振聚焦涡旋强度稍弱，这是因为入射偏振态存在少许的  $y$  偏振分量。图 4(b<sub>2</sub>)显示了涡旋的相位分布，可以看到只有在图 4(a<sub>2</sub>)聚焦涡旋出现的相应位置有明显的涡旋相位。图 4(a<sub>3</sub>)显示了入射的线性偏振太赫兹波旋转  $45^\circ$  通过超构表面透镜之后在  $z = 6000 \mu\text{m}$  处  $x$ - $y$  面上  $x$  偏振聚焦涡旋的电场强度分布，可以看到仍然只在原点左侧出现了  $x$  偏振态的聚焦涡旋，且此时聚焦涡旋强度比  $22.5^\circ$  线性偏振入射时出射的  $x$  偏振聚焦涡旋强度稍弱，这是因为入射偏振态中的  $y$  偏振分量与  $x$  偏振分量相等。图 4(b<sub>3</sub>)显示了涡旋的相位分布，可以看到只有在图 4(a<sub>3</sub>)聚焦涡旋出现的相应位置有明显的涡旋相位。图 4(a<sub>4</sub>)显示了入射的线性偏振太赫兹波旋转  $67.5^\circ$  通过超构表面透镜之后在  $z = 6000 \mu\text{m}$  处  $x$ - $y$  面上  $x$  偏振聚焦涡旋的电场强度分布，可以看到仍然只在原点左侧出现了  $x$  偏振态的聚焦涡旋，且此时聚焦涡旋强度比  $45^\circ$  线性偏振入射时出射的  $x$  偏振聚焦涡旋强度稍弱，这是因为入射偏振态中的  $y$  偏振分量已经超过  $x$  偏振分量， $x$  偏振分量已经很少。图 4(b<sub>4</sub>)显示了涡旋的相位分布，可以看到只有在图 4(a<sub>4</sub>)聚焦涡旋出现的相应位置有明显的涡旋相位。图 4(a<sub>5</sub>)显示了入射的线性偏振太赫兹波旋转  $90^\circ$  通过超构表面透镜之后在  $z = 6000 \mu\text{m}$  处  $x$ - $y$  面上  $x$  偏振聚焦涡旋的电场强度分布，可以看到此时原点左右两侧均没有聚焦涡旋产生，这是因为入射偏振态已经完全是  $y$  偏振分量，不存在  $x$  偏振分量。图 4(b<sub>5</sub>)显示了涡旋的相位分布，可以看到在图 4(a<sub>5</sub>)中任何相应的位置都没有涡旋相位，说明此时没有  $x$  偏振分量的聚焦涡旋。对于此处设计的超构表面，当入射线性偏振态从  $x$  偏振态旋转到  $y$  偏振态时，显示为  $x$  偏振分量的聚焦涡旋只出现在原点左侧  $(-2000, 0)$  处，且强度随着入射  $x$  偏振分量的减少而慢慢减少直至到 0。相位从有到无，且拓扑荷数为 +1。整体上就如图 4 从左到右变化所示。



**Figure 5.** Simulation results of electric fields and phase distributions of  $y$ -polarization component of linearly polarization vortex metalens with topological charge of +1. (a<sub>1</sub>)~(a<sub>5</sub>) Electric field distribution simulation results of  $y$ -polarization component obtained under the incidence of  $0^\circ \sim 90^\circ$  linearly polarization terahertz waves; (b<sub>1</sub>)~(b<sub>5</sub>) Phase distribution simulation results of  $y$ -polarization component obtained under the incidence of  $0^\circ \sim 90^\circ$  linearly polarization terahertz waves

**图 5.** 拓扑荷数为 +1 的线性偏振涡旋超构表面透镜  $y$  偏振分量的电场及相位分布仿真结果。(a<sub>1</sub>)~(a<sub>5</sub>)在  $0^\circ \sim 90^\circ$  线性偏振太赫兹波入射下得到的  $y$  偏振分量的电场分布仿真结果；(b<sub>1</sub>)~(b<sub>5</sub>)在  $0^\circ \sim 90^\circ$  线性偏振太赫兹波入射下得到的  $y$  偏振分量的相位分布仿真结果

图 5 显示了提取出的  $y$  偏振分量的聚焦涡旋强度分布及相位分布，与图 4 中显示的  $x$  偏振分量的强度及相位变化正好相反。图 5(a<sub>1</sub>)显示了横向入射的线性偏振太赫兹波通过超构表面透镜之后在  $z = 6000 \mu\text{m}$  处  $x$ - $y$  面上  $y$  偏振聚焦涡旋的电场强度分布，此时因为入射的全是  $x$  偏振分量，所以此面上的  $y$  出射聚焦涡旋强度与图 4(a<sub>1</sub>)中的情况正好相反，大小为 0。图 5(b<sub>1</sub>)显示了涡旋的相位分布，可以看到在图 5(a<sub>1</sub>)所有相应位置都没有明显的涡旋相位，因为此时  $y$  偏振分量强度为 0，也就是没有涡旋存在。图 5(a<sub>2</sub>)~(a<sub>5</sub>)显示了入射偏振从  $22.5^\circ \sim 90^\circ$  旋转变化的过程，此过程中入射偏振中都存在  $y$  偏振分量，而且  $y$  偏振分量的占比随着角度的增大而增大，出射涡旋中的  $y$  偏振分量强度也就越来越大。也就是说，对于此处设计的超构表面，当入射线性偏振态从  $x$  偏振态旋转到  $y$  偏振态时， $y$  偏振分量的聚焦涡旋只存在原点的右侧 (2000, 0) 处。聚焦涡旋强度随着入射  $y$  偏振分量的增加而慢慢增大，当一点  $y$  偏振分量都不存在时，相位也不存在，当  $y$  偏振分量从无到有时，相位也由无变化到有，且拓扑荷数为 +1，整体上如图 5 从左到右变化所示。

#### 4. 结论

本文基于传输相位原理，设计了一种全硅偏振涡旋光束强度分布调控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对涡旋光束强度分布的横向调控能力更强。目前只有基于几何相位对圆偏的聚焦焦点强度调控，还没有基于传输相位对聚焦涡旋的偏振依赖的强度调控。本文利用数值仿真软件(FDTD)验证了旋转入射线性偏振的角度时，位于原点两侧的偏振依赖聚焦涡旋的强度也会随着角度旋转而变化。这种设计方法为超构表面调控电磁波的位置、强度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。本文所设计的基于传输相位的正交线偏振涡旋光束强度分布调控太赫兹超构表面透镜有望应用到光通讯、微粒操控和多通道信息加密等方面，传输相位超构表面为设计复杂的太赫兹通信设备和系统提供了一个灵活的平台。

#### 参考文献

- [1] Eisenbach, O., Avayu, O., Ditcovski, R., *et al.* (2015) Metasurfaces Based Dual Wavelength Diffractive Lenses. *Optics Express*, **23**, 3928-3936. <https://doi.org/10.1364/OE.23.003928>
- [2] Wen, D.D., Yue, F.Y., Ardron, M., *et al.* (2016) Multifunctional Metasurface Lens for Imaging and Fourier Transform. *Scientific Reports*, **6**, Article No. 27628. <https://doi.org/10.1038/srep27628>
- [3] Lin, D.M., Fan, P.Y., Hasman, E., *et al.* (2014) Dielectric Gradient Metasurface Optical Elements. *Science*, **345**, 298-302. <https://doi.org/10.1126/science.1253213>
- [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**, Article ID: 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 ID: 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] Karimi, E., Piccirillo, B., Nagali, E., *et al.* (2009) Efficient Generation and Sorting of Orbital Angular Momentum Eigenmodes of Light by Thermally Tuned Qplates. *Applied Physics Letters*, **94**, Article ID: 231124. <https://doi.org/10.1063/1.3154549>
- [13] Wang, H., Qin, Z., Huang, L.L., *et al.* (2022) Metasurface with Dynamic Chiral Meta-Atoms for Spin Multiplexing Hologram and Low Observable Reflection. *PhotonIX*, **3**, 10. <https://doi.org/10.1186/s43074-022-00057-1>
- [14] Yan, Y., Xie, G.D., Lavery, M.P.J., *et al.* (2014) High Capacity Millimetre-Wave Communications with Orbital Angular Momentum Multiplexing. *Nature Communications*, **5**, Article No. 4876. <https://doi.org/10.1038/ncomms5876>
- [15] Montelongo, Y., Tenorio-pearl, J.O., Williams, C., *et al.* (2014) Plasmonic Nanoparticle Scattering for Color Holograms. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **111**, 12679-12683. <https://doi.org/10.1073/pnas.1405262111>
- [16] Wang, J., Yang, J.Y., Fazal, I.M., *et al.* (2012) Terabit Freespace Data Transmission Employing Orbital Angular Momentum Multiplexing. *Nature Photonics*, **6**, 488-496. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2012.138>
- [17] Sueda, K., Miyaji, G., Miyanaga, N., *et al.* (2004) Laguerre-Gaussian Beam Generated with a Multilevel Spiral Phase Plate for High Intensity Laser Pulses. *Optics Express*, **12**, 3548-3553. <https://doi.org/10.1364/OPEX.12.003548>
- [18] 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>
- [19] Ma, W., Xu, Y.H., Xiong, B., *et al.* (2022) Pushing the Limits of Functionality-Multiplexing Capability in Metasurface Design Based on Statistical Machine Learning. *Advanced Materials*, **34**, Article ID: 2110022. <https://doi.org/10.1002/adma.202110022>
- [20] 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>
- [21] 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>