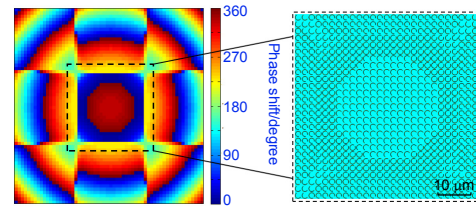




## 基于超表面全息的多焦点透镜

贾宇轩\*, 范琦, 王云飞

空军工程大学理学院, 西安 710051



**摘要:** 设计了一种在远红外波段基于超表面全息的宽频带多焦点透镜。通过设计 8 个 C 型谐振环单元, 当以线极化波垂直入射到该组单元上时, 其透射的交叉极化波产生 0 到  $2\pi$  范围的相位突变, 同时透过率保持不变。利用全波仿真验证了该组谐振单元对垂直入射线极化波的异常折射特性, 并采用计算全息的方法获得了多焦点透镜上的相位分布, 根据相位分布对所设计的天线单元进行排列, 得到了方形的超表面多焦点透镜。对该透镜进行仿真, 结果显示在中心频率 28 THz、焦距 108  $\mu\text{m}$  处有良好的多点聚焦效果。

**关键词:** 超表面; 全息图; 多焦点透镜; 相位突变

中图分类号: O437.4

文献标志码: A

## Multi-focus lens based on metasurface holography

Yuxuan Jia\*, Qi Fan and Yunfei Wang

College of Science, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China

**Abstract:** A broadband multi-focus lens based on metasurface holography in the far-infrared region is designed. By designing 8 C-shaped resonant rings, when linearly polarized light waves are incident normally to this set of resonators, cross-polarized component of transmitted light will form the phase shift from 0 to  $2\pi$ , meanwhile the amplitude transmittance remains constant. Full-wave simulation was utilized to verify anomalous refraction properties when linearly polarized light waves irradiated this set of resonators vertically. The phase distribution of multi-focus lens was obtained by adopting the computer-generated hologram (CGH) method. According to arranged resonant rings based on the calculated phase distribution, a squared multi-focus lens based on metasurface was obtained. Simulation for the designed lens was conducted. Results show a good multi-focusing performance at the central frequency 28 THz in the focal length of 108  $\mu\text{m}$ .

**Keywords:** metasurface; hologram; multi-focus lens; phase shift

DOI: 10.3969/j.issn.1003-501X.2017.07.002

Citation: *Opto-Elec Eng*, 2017, 44(7): 670–675

### 1 引言

近年来, 基于超表面的新型光学器件的设计吸引了人们的广泛关注。相比传统光学元件, 超表面对于光波的调制更加灵活, 因此被广泛应用于各种光电器件的设计中。超表面是一种在介质表面对亚波长尺寸

天线结构进行周期或非周期排列的人工表面, 它不同于传统光学元件, 并非由光在介质中传输时通过光程的累积来改变传输光波前的相位分布, 而是利用所设计亚波长单元结构对电磁波的异常响应特性, 对不同结构参数天线单元以一定规则排列, 从而实现了对电磁波振幅和相位的灵活调制。Luo<sup>[1]</sup>以及 Li<sup>[2]</sup>等先后对超表面的电磁调制机理做了详细阐述。2011年, Yu 等<sup>[3]</sup>首次通过推导得到了广义 Snell 定理, 依靠超表面单元间不连续的相位梯度实现对光传输方向的控制, 并利

收稿日期: 2017-05-09; 收到修改稿日期: 2017-06-23

\*E-mail: forcujia@foxmail.com

用 V 型天线单元组成超表面, 实现了一系列应用<sup>[3-5]</sup>; Blanchard 等<sup>[6]</sup>验证了 V 型超单元对光振幅和相位的调制作用, 并通过改变单元参数实现了对异常折射光相位和振幅分别调制。继 V 型单元结构之后, 学者们又设计了其它形状的单元结构, 不同形状的天线单元结构参数不同, 都能对光波进行灵活调制, 因此实现了许多有价值的应用, 如旋光平板<sup>[3,4]</sup>、四分之一波片<sup>[7,8]</sup>、表面等离子激元耦合器件<sup>[9,10]</sup>、高分辨率全息图成像<sup>[11-13]</sup>、彩色全息技术<sup>[14,15]</sup>、聚焦透镜<sup>[16-24]</sup>, 以及利用连续型位相进行超表面调控<sup>[25,26]</sup>等。在目前超表面的实际应用中, 可见光红外波段超表面受到了广泛关注, 且  $8\ \mu\text{m}\sim 12\ \mu\text{m}$  远红外波段的电磁波在生产生活中有着重要应用, 因此将超表面应用到这个波段有着重要的意义。

多点聚焦透镜是重要的光学元件, 应用广泛, 但传统方法制作的微小聚焦透镜工艺复杂, 且通过微小透镜阵列实现多点聚焦的制作工艺及组装要求高, 误差大, 对元件的性能会产生明显影响<sup>[27]</sup>; Fan 等曾分别用介质-金属超表面<sup>[16]</sup>及全介质超表面<sup>[17]</sup>实现了可见光波段高衍射效率、高精度的光束聚焦与成形, 由于具有较高的效率, 可以设计成多点聚焦透镜。在红外波段, 传统透射材料相对昂贵, 且透射率受材料限制较大。利用超表面全息实现微小多焦点的聚焦功能, 比传统微透镜阵列制作更易加工, 且聚焦效果好。在透射型多点聚焦器件设计上, Wang 等<sup>[18]</sup>利用透镜相位分布公式计算出单个点光源在超表面上的相位分布, 并将多个单焦点透镜进行排列, 用于实现多点聚焦功能, 但这种器件体积较大, 设计复杂; Chen 等<sup>[19]</sup>将纳米棒天线排列成超表面在近红外波段实现多点聚焦, 但衍射效率较低, 约为 2%; He 等<sup>[20]</sup>利用 Y-G 算法得到超表面上的相位分布, 取得了良好的多点聚焦效果。上述两种聚焦透镜<sup>[19,20]</sup>的设计都是基于相位恢复<sup>[28]</sup>的方式, 通过在超表面和聚焦面上进行多次迭代计算, 得到多个点光源在超表面上相位分布的最优解, 但计算量大, 有时易陷入局部最优。

本文设计了一种基于超表面全息原理的宽带多焦点透镜, 应用的中心频率在 28 THz(波长  $10.71\ \mu\text{m}$ ), 在超表面上得到多个点光源的干涉相位全息图, 并用 C 型天线单元对全息图进行编码, 在入射波激励下实现透射的多点聚焦。利用计算全息的方法进行多焦点聚焦的超表面相位分布设计, 计算量小, 且与多焦点分布较复杂的情况相比, 迭代的方法更有优势, 该器

件在 27.6 THz~28.5 THz 的宽带频率范围内表现出良好的聚焦特性。

## 2 基本原理

### 2.1 C 型天线单元设计

为实现超表面上天线单元对入射光的灵活调制, 需要设计一组合适的天线单元。目前超表面上所采用的亚波长尺寸的金属天线单元, 都是基于电磁波在金属天线中产生的谐振效应对光波进行调制, 不同形状的天线单元工作形式不同, 但基本原理都是一样的。对于线极化入射波来说, 利用天线单元的极化转换作用可以调制交叉极化波波前, 而对同极化波没有调制作用。根据需要对天线单元组合可得到由交叉极化波构成的想要的波前, V 型<sup>[3]</sup>、C 型<sup>[29]</sup>天线单元都可以对线极化波进行有效调制。由于 C 型单元形状参数更容易控制, 而天线单元参数的改变可以引起交叉极化波的波前变化<sup>[3,29]</sup>。以下设计以 8 个 C 型单元作为一组超单元, 在线极化波入射时可以使透射的交叉极化波产生最大为  $2\pi$  的相位跳变。如图 1 所示, C 型天线单元材料为金属铝(电导率  $3.56\times 10^7\ \text{S}\cdot\text{m}^{-1}$ ), 厚度  $0.1\ \mu\text{m}$ , 被镀在厚  $10\ \mu\text{m}$  的硅(介电常数 11.9)基板上,  $\alpha$  为圆环张角的一半, 圆环张角对称轴与 x 轴夹角  $\beta$  为  $45^\circ$ ,  $r$  为圆环内径,  $w$  为环带宽度,  $P$  是每个天线单元的周期。

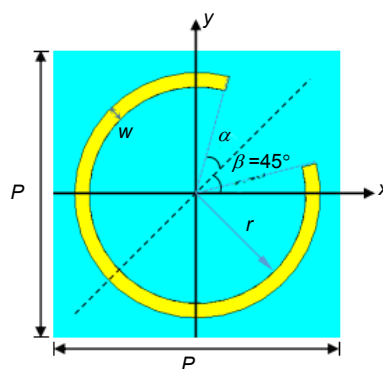


图 1 C 型单元示意图。

Fig. 1 Schematic of C-shaped resonant unit.

根据在设定的中心频率 28 THz 处结合开口环谐振公式, 大致确定 C 型单元等效半径在  $0.8\ \mu\text{m}$ , 设置  $w=0.1\ \mu\text{m}$ ,  $P=2\ \mu\text{m}$ , 将图 1 所示的单个 C 型单元利用 CST 进行参数扫描, 主要通过对圆环张角  $2\alpha$  和内径  $r$  的扫描, 寻找使线极化波入射到单元上之后在透射区域某一固定位置的交叉极化波出现以  $\pi/4$  为相位梯度

的四个C型单元结构,这样具有四个不同参数的单元结构在设计频率 28 THz 处即可使交叉极化波的波前相位产生 0 到  $\pi$  范围内的突变,这四个单元对交叉极化波透射振幅的影响使  $\beta$  为  $45^\circ$ ,保证交叉极化波的振幅透过率最大<sup>[30]</sup>,且所选单元振幅透过率最大偏差不得超过百分之一。最终确定 C 型单元结构参数为  $r = 0.77 \mu\text{m}, 0.70 \mu\text{m}, 0.70 \mu\text{m}, 0.78 \mu\text{m}, 2\alpha = 30^\circ, 58^\circ, 92^\circ, 158^\circ$ 。将四个单元分别以圆心顺时针旋转  $90^\circ$  即可在原来相位突变值基础上分别增加  $\pi$ ,即 8 个单元,以实现透射波相位在 0 到  $2\pi$  范围的调制,相邻单元间调制的相位梯度为  $\pi/4$ ,如图 2 所示。

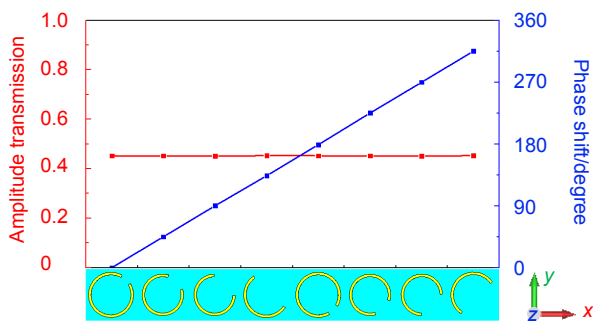


图 2 一组 C 型单元及其在设定频率 28 THz 处透射交叉极化波振幅和相位突变。

Fig. 2 A group of C-unit and its amplitudes and phase shift of cross-polarized at 28 THz.

利用 CST 进行单元仿真时,  $x$  和  $y$  方向上的边界条件均设为周期边界,  $z$  方向为 open 边界,入射波为电场在  $x$  方向极化的平面波,方向沿  $z$  轴正向垂直入射。

## 2.2 天线单元组的异常折射特性

如图 2 所示的 8 个单元,当用线极化波对其垂直入射时,由于透射的交叉极化波前可以产生最大  $2\pi$  的相位突变,理论上会出现异常折射现象。将图 2 中 8 个单元作为一个单元组,  $x$  和  $y$  方向分别以  $x_p = 16 \mu\text{m}$  和  $y_p = 2 \mu\text{m}$  为周期,利用 CST 的时域有限差分法 (FDTD) 进行仿真,参数设置和单个单元仿真设置相同,在出射区域监视  $y$  极化方向的电场分布,和三个频点 (27.6 THz, 28 THz, 28.5 THz) 处的异常折射现象。

如图 3 所示,在  $xoz$  平面上,电场方向  $x$  极化的平面波传输经过天线单元组后,三个频点处的  $y$  极化电场传输方向发生了异常偏折,且在不同频点处  $y$  极化波的异常折射角不同。广义 Snell 定理的异常折射计算式如下:

$$\sin(\theta_t)n_t - \sin(\theta_i)n_i = \frac{\lambda_0}{2\pi} \frac{d\phi}{dx}, \quad (1)$$

式中:  $\theta_i$  和  $\theta_t$  分别为入射角和异常折射角,  $n_i$  和  $n_t$  为硅基板 ( $n_{\text{Si}}$ ) 和空气折射率 ( $n=1$ ),入射波为垂直入射。因此  $\theta_i$  为 0 时,图 2 可以看出单元组前一个单元交叉极化波的相位突变较后一个单元的突变量有  $\pi/4$  的延迟,因此单元组的相位梯度  $d\phi/x_p < 0$ ,将  $-2\pi/16 \mu\text{m}$  代入式(1)中,以设计频率 28 THz 为例,其波长约为  $10.71 \mu\text{m}$ ,可以计算得到  $y$  极化波的异常折射角  $\theta_t$  为  $42.04^\circ$ ,实际仿真值为  $42.53^\circ$ ,理论与仿真结果基本一致。同时对 27.6 THz 和 28.5 THz 两个频率点处异常折射角也进行了计算,理论值和仿真值分别为  $42.79^\circ$ 、 $41.14^\circ$  和  $42.92^\circ$ 、 $41.67^\circ$ 。可以看出随着入射波频率值的增大,波长减小,对于同一个单元组来说,交叉极化波的异常折射角  $\theta_t$  也在变小。同时我们注意到,入射的  $x$  极

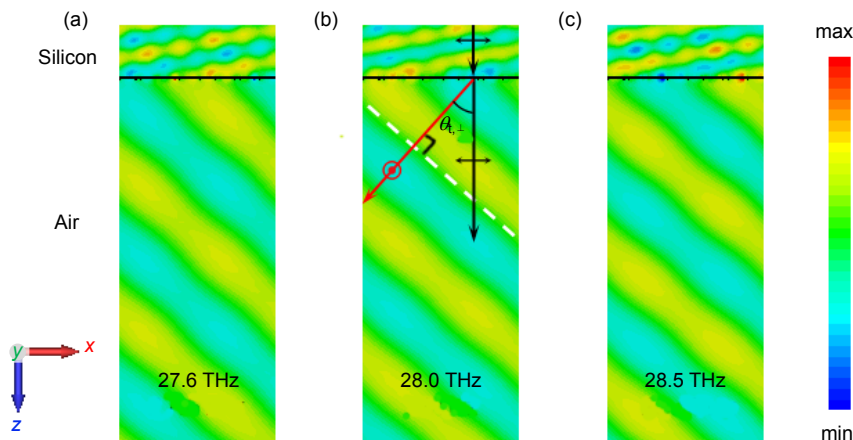


图 3 仿真得到的单元组在 27.6 THz, 28 THz, 28.5 THz 处的  $y$  极化电场分布。

Fig. 3 Simulated  $y$ -polarized electric field distributions of unit group at 27.6 THz, 28 THz, 28.5 THz, respectively.

化平面波从介质 Silicon 上垂直入射后, 在介质中传播方向发生了偏折, 这是由于在图 3 中我们观察到的是  $y$  极化的电场分布, 入射平面波传输经过介质后被 8 个 C 型单元调制, 交叉极化波分量发生了异常反射。

### 3 多焦点透镜设计

这里设计的多焦点透镜的功能实现是基于全息原理, 对预设聚焦面上的四个点光源在一定衍射距离的超表面平面上进行复振幅叠加, 提取相位分布形成相位全息图, 通过再现点光源实现聚焦。设超表面所在平面为  $x_i y_i$  面, 聚焦面为  $xy$  平面, 首先利用 Matlab 在预设聚焦面设置四个点源, 均匀分布在面上的四个象限, 入射平面波频率取设定的中心频率 28 THz(波长 10.71  $\mu\text{m}$ ), 令  $xy$  面上四个点光源坐标为  $P_1(x_{01}, y_{01})=(18, 18)$ ,  $P_2(x_{02}, y_{02})=(-18, 18)$ ,  $P_3(x_{03}, y_{03})=(-18, -18)$ ,  $P_4(x_{04}, y_{04})=(18, -18)$ , 单位为微米( $\mu\text{m}$ ),  $x_i y_i$  面和  $xy$  面间的衍射距离, 也就是焦距, 设为 120  $\mu\text{m}$ 。设定  $x_i y_i$  面大小为 120  $\mu\text{m} \times 120 \mu\text{m}$  并对平面离散化, 每个像素单元大小 2  $\mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$ , 是一个 C 型天线单元的尺寸, 以上  $xy$  面和  $x_i y_i$  面上参数的设置满足采样定理。 $xy$  平面上的四个点源按照惠更斯-菲涅尔原理在  $x_i y_i$  面上进行复振幅叠加, 其相位分布如图 4(a)所示, 像素采样点数取为 60 $\times$ 60 个。

为验证  $x_i y_i$  面所获得相位分布的正确性, 利用 Matlab 对计算得到的相位分布进行平面波入射的衍射仿真, 以期得到  $xy$  面上的四个聚焦点。为提高衍射聚焦精度, 采用基于角谱理论进行衍射计算, 得到的  $xy$  面大小及离散像素单元参数都与  $x_i y_i$  面的相同。衍射

得到的聚焦点分布见图 4(c), 各聚焦点中心位置和最初  $x_i y_i$  面上设置的点源中心基本吻合, 验证了  $x_i y_i$  面上相位分布的正确性。对图 4(a)所示相位分布选择合适的天线单元进行排列, 其中心区域的单元排列情况如图 4(b)。最终在 CST Microwave Studio 中排列的结构是由 60 $\times$ 60 个 C 型天线单元镶嵌在厚度为 10  $\mu\text{m}$  的硅基板上构成的, 总体尺寸为 120  $\mu\text{m} \times 120 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$ 。

利用 CST 对结构进行仿真,  $x$ ,  $y$ ,  $z$  方向上边界条件均为 open (and space), 入射波为电场沿  $x$  方向极化的平面波, 在透射波区域监视沿  $y$  方向极化的电场。对三个频点进行观察, 仿真结果如图 5。图 5(a)、5(b)、5(c)分别为在三个频点处焦平面上的多点聚焦情况, 5(d)、5(e)、5(f)显示的是  $y$  极化方向的电场振幅大小, 在设定的中心频率 28 THz(波长 10.71  $\mu\text{m}$ )处, 观察  $xoz$  平面, 电场振幅最大时焦距为 108  $\mu\text{m}$ , 在 27.6 THz 和 28.5 THz 处焦距分别为 105  $\mu\text{m}$  和 112  $\mu\text{m}$ , 黑线处为焦平面所在位置。同时注意到, 在图 5(a)、5(b)、5(c)中聚焦点之间仍存在电场能量较小的聚焦点, 在图 5(d)、5(e)、5(f)中可以看出这几个小的聚焦点是中间部分狭长的聚焦光束的截面。这条狭长的聚焦光束是由于超表面上叠加的复振幅在形成各个聚焦点时, 相邻两个聚焦点的光波前产生干涉导致的。在焦平面中心没有出现小的聚焦点是因为在焦平面中心这个位置形成了稳定的电场, 强度为零。

该结构在 27.6 THz 到 28.5 THz 范围内表现出良好的聚焦特性, 随着入射波频率增加, 焦距也在增加, 聚焦点的形状在变小, 聚焦效果也在提升, 这可应用到一定可调焦距范围的聚焦场合。

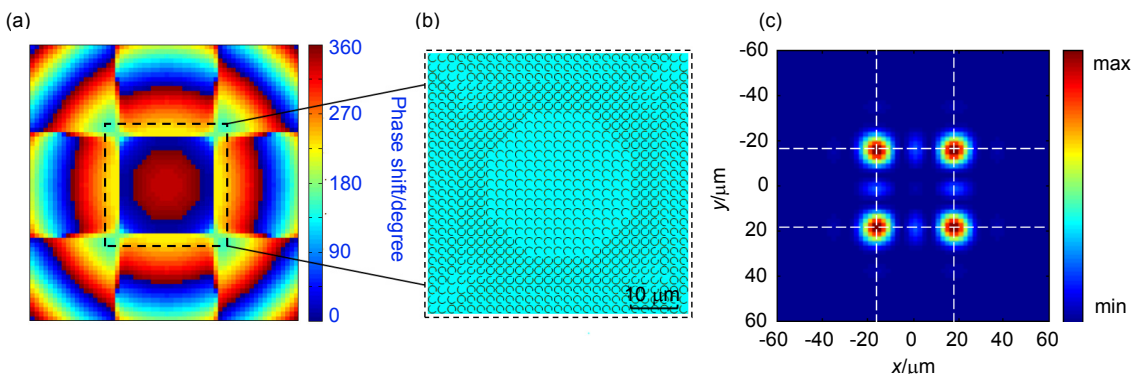


图 4 多焦点透镜的设计. (a) 在 28 THz 处用复振幅叠加方法得到的超表面上量化后的相位分布. (b) 图(a)中心区域单元结构排列情况. (c) 用 Matlab 对图(a)进行衍射计算得到的电场分布.

Fig. 4 Design of multi-focus lens. (a) Quantized phase distribution in metasurface at 28 THz calculated by complex amplitude superposition. (b) Central part of the C-shaped units arrangement in (a). (c) The electric field intensity distribution simulated by Matlab diffraction calculation to (a).

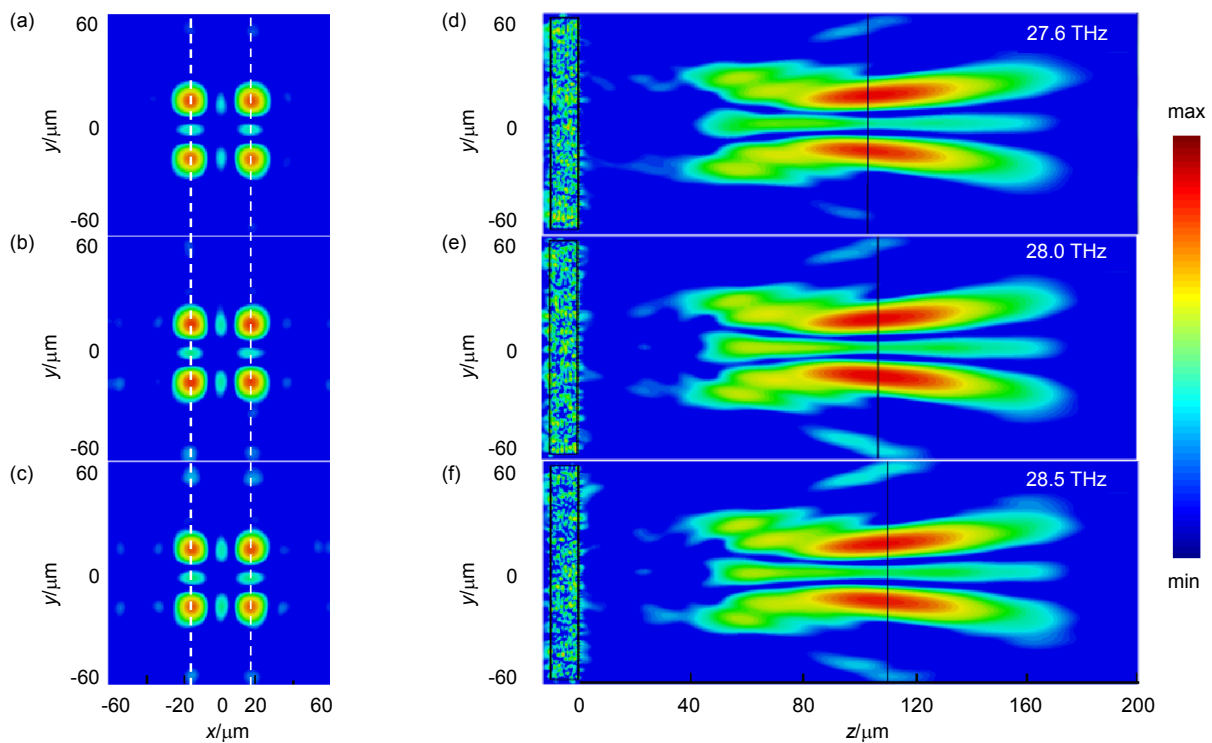


图5 仿真得到的不同频率处的电场强度分布。(a)~(c) 27.6 THz, 28 THz, 28.5 THz 各频点处焦平面上  $y$  极化电场强度分布。(d)~(f) 27.6 THz, 28 THz, 28.5 THz 各频点处  $yo$ z 截面上  $y$  极化电场强度分布, 入射波为  $x$  极化平面波。  
Fig. 5 Simulated results of the electric field Intensity distribution at different frequencies. (a)~(c) Electric field Intensity distributions of  $y$ -polarized in focal planes at 27.6 THz, 28 THz, 28.5 THz, respectively. (d)~(f) Electric field Intensity distributions of  $y$ -polarized in the  $yo$ z section at 27.6 THz, 28 THz, 28.5 THz, respectively, at  $x$ -polarized normal incidence.

## 4 分析与讨论

在设计该多焦点透镜时, 考虑了超表面大小以及采样定理等因素后, 确定焦距为  $120 \mu\text{m}$ , 并按照该距离计算得到了四个点光源在超表面透镜所在平面上的相位分布, 由于所设计超表面透镜大小有限, 只对超表面平面上全息图中心区域为  $60 \times 60$  个离散化像素值进行了单元排列, 丢失了边缘部分的相位信息, 因此对该结构进行仿真时得到的是聚焦光斑。与此同时, 在设定频率 28 THz 处的焦距设为  $120 \mu\text{m}$ , 在图 5 的仿真结果中得到 28 THz 处的焦点位置在  $108 \mu\text{m}$ , 这是用 C 型单元进行全息图量化排列时产生的量化误差引起的。同时, 在对设计的透镜进行整体仿真时, 其边界条件的设置和在对单个 C 型单元进行仿真时边界条件设置不同会引入误差, 导致提前聚焦, 在文献[18]中也出现了这种情况。根据二元光学, 进行非连续的相位调制时, 可调节的相位梯度越小, 器件工作效果越好。因此可以看出, 制作的超表面透镜面积越大, 超表面离散化网格划分越细, 相邻 C 型单元间可调节

的相位梯度越小, 聚焦效果越好。

## 5 结论

本文依据广义 Snell 定理, 在中心频率 28 THz(波长  $10.71 \mu\text{m}$ )处设计了一组 C 型开口环, 可以对入射线极化波进行极化转换, 使振幅透过率为常数并对其交叉极化波相位在  $2\pi$  范围进行调制。

1) 设计了由 C 型开口环构成并基于超表面全息原理的多焦点透镜, CST 仿真结果表明该透镜在所设定中心频率 28 THz(波长  $10.71 \mu\text{m}$ )、焦距为  $108 \mu\text{m}$  处取得良好的多点聚焦效果, 并有 45% 的振幅透过率, 同时其在 27.6 THz 到 28.5 THz 频率范围内还表现出宽带特性, 随着入射波频率增大, 焦距也在增加, 聚焦点形状变小, 聚焦效果得到提升。

2) 利用 CST 对设计的结构进行仿真得到的聚焦结果与用 Matlab 对  $x, y$  面上的相息图进行角谱衍射得到的多焦点参数基本吻合, 验证了该结构设计的合理性。

3) 该超表面聚焦透镜在设计上不同于其它方法,

不是采用相位恢复的方法获得超表面上的相位分布<sup>[20]</sup>,而是直接利用多个点光源在超表面上干涉得到全息图并提取相位。这种方法计算量小,对于聚焦面上需要复杂聚焦光强分布的情况优势比较明显;在多点聚焦实现方式上,区别于利用多个超表面单点聚焦透镜进行空间排布实现多点聚焦<sup>[18]</sup>,而是在一个超表面上记录多个点光源干涉的相位信息,利用全息图再现方法实现多点聚焦。

4) 在 C 型天线单元的选择上选用了 8 个,若选择用 16 个单元或更多则可以对光波前有更精确的调制;超表面透镜的 C 型单元为 60×60 个,若单元能够更多,则超表面上包含的相位信息越丰富,则得到的聚焦点直径会更小,聚焦效果会更好。

## 参考文献

- Luo Xiangang. Principles of electromagnetic waves in metasurfaces[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2015, **58**(9): 594201.
- Li Xiong, Ma Xiaoliang, Luo Xiangang. Principles and applications of metasurfaces with phase modulation[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, **44**(3): 255–275.  
李雄, 马晓亮, 罗先刚. 超表面相位调控原理及应用[J]. *光电工程*, 2017, **44**(3): 255–275.
- Yu Nanfang, 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.
- Genevet P, Yu Nanfang, Aieta F, et al. Ultra-thin plasmonic optical vortex plate based on phase discontinuities[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, **100**(1): 013101.
- Aieta F, Genevet P, Kats M A, et al. Aberration-free ultrathin flat lenses and axicons at telecom wavelengths based on plasmonic metasurfaces[J]. *Nano letters*, 2012, **12**(9): 4932–4936.
- Blanchard R, Aoust G, Genevet P, et al. Modeling nanoscale V-shaped antennas for the design of optical phased arrays[J]. *Physical Review B*, 2012, **85**(15): 155457.
- Cong Longqing, Xu Ningning, Gu Jianqiang, et al. Highly flexible broadband terahertz metamaterial quarter - wave plate[J]. *Laser & Photonics Review*, 2014, **8**(4): 626–632.
- Yu Nanfang, 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.
- Lin Jiao, Mueller J P B, Wang Qian, et al. Polarization-controlled tunable directional coupling of surface plasmon polaritons[J]. *Science*, 2013, **340**(6130): 331–334.
- Huang Lingling, Chen Xianzhong, Bai Benfeng, et al. Helicity dependent directional surface plasmon polariton excitation using a metasurface with interfacial phase discontinuity[J]. *Light Science & Applications*, 2013, **2**(3): e70.
- Ni Xingjie, Kildishev A V, Shalaev V M, et al. Metasurface holograms for visible light[J]. *Nature Communications*, 2013, **4**: 2807.
- Huang Lingling, Chen Xianzhong, Mühlenbernd H, et al. Three-dimensional optical holography using a plasmonic metasurface[J]. *Nature Communications*, 2013, **4**: 2808.
- Wang Qiu, Zhang Xueqian, Xu Yuehong, et al. Broadband metasurface holograms: toward complete phase and amplitude engineering[J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 32867.
- 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.
- Li Xiong, Chen Lianwei, Li Yang, et al. Multicolor 3D meta-holography by broadband plasmonic modulation[J]. *Science Advances*, 2016, **2**(11): e1601102.
- Fan Qingbin, Huo Pengcheng, Wang Daopeng, et al. Visible light focusing flat lenses based on hybrid dielectric-metal metasurface reflector-arrays[J]. *Scientific Reports*, 2017, **7**: 45044.
- Fan Qingbin, Wang Daopeng, Huo Pengcheng, et al. Autofocusing airy beams generated by all-dielectric metasurface for visible light[J]. *Optics Express*, 2017, **25**(8): 9285–9294.
- Wang Qiu, Zhang Xueqian, Xu Yuehong, et al. A broadband metasurface - based terahertz flat - lens array[J]. *Advanced Optical Materials*, 2015, **3**(6): 779–785.
- Chen Xianzhong, Zhang Yan, Huang Lingling, et al. Ultrathin metasurface laser beam shaper[J]. *Advanced Optical Materials*, 2014, **2**(10): 978–982.
- He Jingwen, Ye Jiasheng, Wang Xinke, et al. A broadband terahertz ultrathin multi-focus lens[J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 28800.
- Li Xin, Xiao Shiyi, Cai Bengeng, et al. Flat metasurfaces to focus electromagnetic waves in reflection geometry[J]. *Optics Letters*, 2012, **37**(23): 4940–4942.
- Hu Dan, Wang Xinke, Feng Shengfei, et al. Ultrathin terahertz planar elements[J]. *Advanced Optical Materials*, 2013, **1**(2): 186–191.
- Jiang Xiaoyan, Ye Jiasheng, He Jingwen, et al. An ultrathin terahertz lens with axial long focal depth based on metasurfaces[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(24): 30030–30038.
- Aieta F, Genevet P, Kats M A, et al. Aberration-free ultrathin flat lenses and axicons at telecom wavelengths based on plasmonic metasurfaces[J]. *Nano Letters*, 2012, **12**(9): 4932–4936.
- Pu Mingbo, Li Xiong, Ma Xiaoliang, et al. Catenary optics for achromatic generation of perfect optical angular momentum[J]. *Science Advances*, 2015, **1**(9): e1500396.
- Li Xiong, Pu Mingbo, Zhao Zeyu, et al. Catenary nanostructures as compact Bessel beam generators[J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 20524.
- Liu Desen. Micro optics and lens array[M]. Beijing: Science Press, 2013: 5–6.  
刘德森. 微小光学与微透镜阵列[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 5–6.
- Gu Benyuan, Yang Guozhen, Dong Bizhen, et al. General theory for performing an optical transform[J]. *Applied Optics*, 1986, **25**(18): 3197–3206.
- Zhang Xueqian, Tian Zhen, Yue Weisheng, et al. Broadband terahertz wave deflection based on C - shape complex metamaterials with phase discontinuities[J]. *Advanced Materials*, 2013, **25**(33): 4567–4572.
- Liu Lixiang, Zhang Xueqian, Kenney M, et al. Broadband metasurfaces with simultaneous control of phase and amplitude[J]. *Advanced Materials*, 2014, **26**(29): 5031–5036.