Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology

文章编号: 2095-4980(2024)11-1238-06

# 极化复用的多功能反射型太赫兹超表面

朱海亮1,谢胜琳\*1,王庚辰1,周怀仁1,于 淼2,刘 林2

(1. 西北工业大学 电子信息学院,陕西 西安 710129; 2. 北京航天计量测试技术研究所,北京 100076)

摘 要: 现有的无源超表面功能较为单一,为增加调控太赫兹波的灵活性,提出一种极化复用的反射型超表面。该超表面能够实现波束偏转、双焦点聚焦、聚焦涡旋和远场成像等多种功能。在1 THz 频率下,通过 x 极化和 y 极化波的分别入射,该超表面成功产生 2 个偏转波束,并在焦平面上实现了双焦点聚焦。此外,该超表面在 x 极化和 y 极化波入射条件下,还分别实现了拓扑荷为 /=+2 的聚焦涡旋光束和远场成像。所设计的超表面显示出在不同极化波入射下灵活操纵太赫兹波的能力,展示了在太赫兹通信领域的潜在应用前景。

关键词: 极化复用; 波束调控; 聚焦; 太赫兹; 超表面

中图分类号: TN82

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2023371

# Multifunctional reflective terahertz metasurface featuring polarization multiplexing

ZHU Hailiang<sup>1</sup>, XIE Shenglin<sup>\*1</sup>, WANG Gengchen<sup>1</sup>, ZHOU Huairen<sup>1</sup>, YU Miao<sup>2</sup>, LIU Lin<sup>2</sup> (1.School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an Shaanxi 710129, China; 2.Beijing Aerospace Institute for Metrology and Measurement Technology, Beijing 100076, China)

**Abstract:** The existing passive metasurfaces have relatively limited functions. To increase the flexibility of controlling terahertz waves, a polarization–multiplexed reflective metasurface is proposed. This metasurface is capable of various functions such as beam deflection, dual–focus focusing, focused vortex, and far–field imaging. At a frequency of 1 THz, by separately incident x–polarized and y–polarized waves, the metasurface successfully generated two deflected beams and achieved dual–focus focusing on the focal plane. In addition, the metasurface also realized focused vortex beams with a topological charge of l=+2 and far–field imaging under the conditions of x–polarized and y–polarized wave incidence, respectively. The designed metasurface demonstrates the ability to flexibly manipulate terahertz waves under different polarization wave incidences, showing potential application prospects in the field of terahertz communication.

Keywords: polarization multiplexing; beam control; focusing; terahertz; metasurface

太赫兹波(0.1~10 THz)位于红外与毫米波之间,其独特的频谱位置带来了一些特别的性质,如透视性、安全性、光谱分辨能力强和带宽大等。太赫兹技术可用于无损检测、医疗成像、无线通信、成像等领域。现阶段应用的太赫兹波调控器件体积大,成本高,为进一步促进太赫兹的发展,利用超表面这一种人工设计的周期性结构组成的新型功能材料,实现对太赫兹波相位、振幅和极化的高效灵活调控。通过设计超表面的单元结构,利用不同的相位排布能够实现多种功能,包括波束偏转[1-2]、聚焦[3-4]、涡旋波束[5-7]、全息图[8]等。2019年,ZENG等[9]设计并制作了基于非对称交叉单元的一维和二维各向异性矩阵超表面,在单个平面或2个正交平面上同时实现双极化异常反射。2021年,SHANG等[10]设计了一组双层交叉型单元的二位编码全息相位信息,该全息相位信息在不同人射极化波下可以产生2个独立的全息图像。2022年,LI等[11]提出了一种全硅太赫兹超表面,该超表面能够生成线极化球面波与涡旋波的叠加状态,并支持多通道传输。他们采用具有各向异性的交叉椭圆结构,证实了2种透射式超表面在线极化波干涉过程中的相互作用。

上述的极化复用超表面一定程度上丰富了器件功能的多样性,有利于减少太赫兹系统器件数量,降低系统

收稿日期: 2023-11-15; 修回日期: 2024-01-06

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(62371396); 陕西省自然科学基础研究计划资助项目(2022JQ-669); 一院高校联合创新基金资助项目 (CALT2022-24)

\*通信作者: 谢胜琳 email:shenglinxie@mail.nwpu.edu.cn

复杂性。为拓展太赫兹成像和通信的应用场景,仍需进一步开展将多功能和不对称传输整合到一个单一超表面中的研究。本文提出一种极化复用的反射型超表面,所设计的超表面单元结构简单,由顶层的铝十字结构、中间石英介质层和底层的铝金属层组成,通过改变结构大小覆盖360°的相位范围,实现对正交线极化反射太赫兹波的独立调控。对3款超表面进行仿真,分别实现了波束偏折、聚焦,以及在不同线极化入射下实现远场全息成像和二阶涡旋波束的切换。所提出的极化复用超表面,未来可用于低成本、高性能、大容量全息显示和数据传输系统的平台中。

# 1 超表面单元设计

如图 1 所示,组成超表面的单元为三明治结构。该器件的最上层为金属铝材料的十字架结构,电导率为  $3.56\times10^7$  S/m,这 2 个长方形的长分别为  $l_x$ 和  $l_y$ ,宽分别为  $w_x$ 和  $w_y$ (固定为  $30~\mu$ m),厚度  $t_1$ 为 1  $\mu$ m;中间层为石英介质层,介电常数为 3.75,损耗角正切值为 0.000~4,厚度  $t_2$ 为  $100~\mu$ m;底层铝金属板的厚度仍为  $t_1$ ,单元周期 p 为  $100~\mu$ m。

对 $I_x$ 和 $I_y$ 进行优化扫参研究,以实现 1 THz 双极化任意 2 bit 反射相位的编码。计算出的相位分布离散为 0°、90°、180°和 270°,分别用 1、2、3 和 4 的编码表示,共有 16 个编码单元,如表 1 所示,表中斜杠前后的数字分别表示编码单元在 x 极化和 y 极化太赫兹波入射下的相位状态。 x 极化入射下相位偏移可通过改变  $I_x$ 实现,而 y 极化入射下的相位偏移可通过改变  $I_y$ 实现。  $\Phi_x$ 为 x 极化太赫兹波入射到超表面后出射的 x 极化太赫兹波的相位, $\Phi_y$  为 y 极化太赫兹波入射到超表面后出射的 y 极化太赫兹波的相位。超表面单元结构简单,可变参数少,大大简化了设计过程。

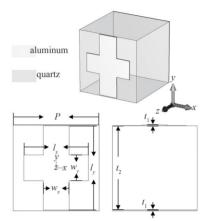


Fig. 1 Perspective, top and side views of the designed metasurface unit

图1 超表面单元透视图、顶视图和侧视图

表1 各向异性金属单元的尺寸参数及x极化波和y极化波的相位

Table 1 Size parameters of anisotropic metal units and phases of x and y polarized waves

parameter	1/1	1/2	1/3	1/4	2/1	2/2	2/3	2/4	3/1	3/2	3/3	3/4	4/1	4/2	4/3	4/4
$l_x/\mu m$	98	98	98	98	75	75	75	75	65	65	65	65	40	40	40	40
$l_{\rm v}/\mu{ m m}$	98	75	65	40	98	75	65	40	98	75	65	40	98	75	65	40
Φ <sub>x</sub> /(°)	-361	-361	-361	-365	-266	-268	-270	-286	-184	-184	-183	-193	-98	-94	-92	-88
Φ,/(°)	-361	-266	-184	-98	-361	-268	-183	-94	-361	-270	-183	-92	-365	-286	-193	-88

所设计的编码单元的反射相位和反射振幅如图 2 所示。当 y(x) 极化太赫兹波入射时,调整  $l_y(l_x)$ ,可实现 360°相位覆盖,传输幅值接近于 1,且不影响 x(y) 极化太赫兹波。

## 2 超表面仿真分析

# 2.1 波束偏折

太赫兹波在2种不同介质之间传播时,其折射特性受广义斯涅尔定律[12]支配:

$$n_{\rm t}\sin\theta_{\rm t} - n_{\rm i}\sin\theta_{\rm i} = \frac{\lambda}{2\pi} \times \frac{{\rm d}\phi}{{\rm d}x} \tag{1}$$

式中:n为介质的折射率; $\theta$ 为角度,下标i和t分别为入射侧和透射侧; $\lambda$ 为入射太赫兹波的工作波长(300  $\mu$ m); $d\phi/dx$ 为相位梯度。

单元编码如图 3 所示,其数组大小为  $16\times16$ 。子阵列由一个  $4\times4$  的各向异性矩阵组成(灰色虚线框画出部分),其中每个十字形单元格具有不同的尺寸,即每个阵列单元对x 和y 极化分量都有自己不同的反射相位,使入射太赫兹波的x 和y 极化分量可在正交平面上有效偏转。在工作频率为 1 THz 时,在x 极化入射波下的周期  $\Gamma=400~\mu m$ ,计算出偏转角  $\theta=\arcsin(\lambda/\Gamma)\approx48.6°$ ;y 极化入射波下的周期仍为  $\Gamma$ ,偏转角相同,也为 48.6°。

在x极化平面波入射下可观察到YOZ平面上的偏折波束,偏折角度为 $46.8^{\circ}$ ,如图4所示;在y极化平面波入射下可观察到XOZ平面上的偏折波束,偏折角度为 $46.8^{\circ}$ ,如图5所示;而在 $45^{\circ}$ 线极化平面波入射下,则可以同时观察到2个正交平面上的偏折波束,因为 $45^{\circ}$ 线极化波可分解为x和y极化波,如图6所示。通过切换入射太赫兹波的极性可以控制波束的偏转方向。

仿真得到的偏折角度与计算得到的偏折角度略有偏差,可能是因为阵列规模不够大无法达到理想条件所致。

整体上仿真效果与理论一致,改变入射平面波的极化方向可以控制偏折波束的方向,2种极化同时存在能够实现正交平面的2个波束同时偏折。

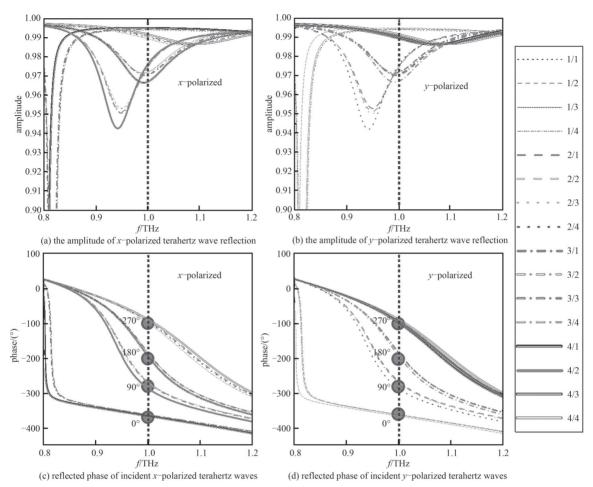


Fig.2 16 Metasurface units' reflection amplitudes and phases at varying terahertz wave incidence polarizations 图 2 16个超表面单元在不同极化太赫兹波入射下的反射振幅和相位

#### 2.2 聚焦

为使超表面设计具有在正交极化波的垂直照射下拥有不同的光学响应,即实现x极化球面波与y极化球面波,对每个单元格实现聚焦所需的补偿相位<sup>[13]</sup>为:

$$\Phi_{x}(x,y) = \frac{2\pi}{\lambda} \left( \sqrt{(x - \Delta x)^{2} + y^{2} + f^{2}} - f \right)$$
 (2)

$$\Phi_{y}(x,y) = \frac{2\pi}{\lambda} \left( \sqrt{(x + \Delta x)^{2} + y^{2} + f^{2}} - f \right)$$
 (3)

式中:  $\Phi_x(x,y)$ 为x极化太赫兹波的相位补偿,分布图如图 7(a)所示;  $\Phi_y(x,y)$ 为y极化太赫兹波的相位补偿,分布图如图 7(b)所示; f为焦距,为  $5\,000\,\mu m$ ;  $\Delta x$ 为x方向的偏移,为  $1\,000\,\mu m$ ; x 和y为单元所处的位置。超透镜整体排布如图 7(c)所示。

图  $8(a)\sim(c)$ 为 xoy 平面  $(z=5\ 000\ \mu m)$ 上相应的模拟电场强度分布。可以观察到,在 x 极化太赫兹波入射时,在 +x 的位置存在一个明亮的焦点,其焦距为  $f=5\ 000\ \mu m$ ,横向偏移量为  $\Delta x\approx 1\ 000\ \mu m$ ;在 y 极

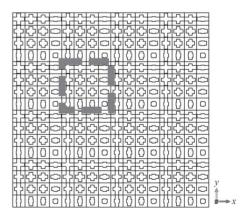


Fig.3 The arrangement of metasurface elements to achieve deflection
图 3 实现偏折功能的超表面单元排列

化太赫兹波入射时,所产生的亮点位于相反的位置,即横向偏移量 $\Delta x$ ≈-1 000  $\mu$ m。在45°线极化太赫兹波入射时,沿横向方向同时观察到2个具有相同焦距(f=5 000  $\mu$ m)但横向偏移量相反的独立焦点( $\Delta x$ ≈±1 000  $\mu$ m),即2个焦点同时存在,与理论值吻合较好。

由此得出结论:不同线极化入射时,可以得到单焦点聚焦;2种线极化都存在时,则可同时得到2个焦点,进而实现双焦点成像。

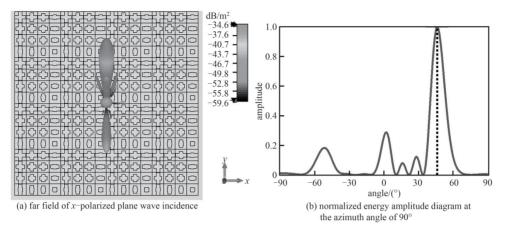


Fig.4 Far field of x-polarized plane wave incidence and normalized energy amplitude at the azimuth angle of 90° 图4 x极化平面波入射下的远场及90°方位角的归—化能量振幅图

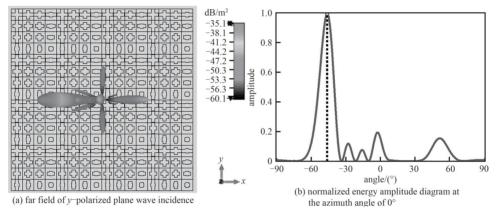


Fig.5 Far field of *y*-polarized plane wave incidence and normalized energy amplitude at the azimuth angle of 0° 图 5 y极化平面波入射下的远场及0°方位角的归一化能量振幅图

# 2.3 轨道角动量和远场成像

光子携带 2 种不同的角动量: 自旋角动量 (Spin Angular Momentum, SAM) 和轨道角动量 (Orbital Angular Momentum, OAM)。携带轨道角动量的涡流,广泛用于从粒子操纵到大容量数据传输。SAM 对 OAM 的灵活控制可以为多功能器件的设计提供更多的自由。本文设计产生+2 阶涡旋的超表面:

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

超表面排布如图 9(a)所示,在x极化太赫兹波垂直入射下,5 000  $\mu$ m 的焦平面处的涡旋幅度和相位如图 9(b)~(c)所示。从幅度和相位可以看到,旋转一圈后改变了 2个  $2\pi$ ,因为涡旋沿-z轴传播,为左旋涡旋光束,实现了+2 阶涡旋。

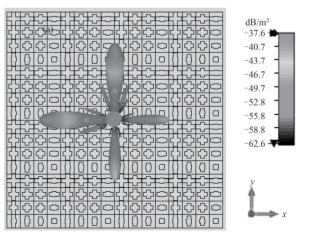


Fig.6 Far field of 45° linearly polarized plane wave incidence 图 6 45°线极化平面波入射下的远场

同时,依据光路可逆原理,利用全息理论实现了远场成像,并假设目标图像在全息板上的场分布包含了振幅和相位信息。反射型超表面的电场分布为目标电场的叠加,将目标电场划分为多个离散点源。假设在 $H_m$ 位置存在m个点源,通过计算得出超表面的叠加电场E为:

$$E(x_{i}, y_{i}) = \sum_{m=1}^{M} A_{m}(x_{i}, y_{i}) \exp(jk_{0}R_{m})$$
(5)

$$A_m(x_i, y_i) = \frac{A_m}{R_m} \tag{6}$$

$$R_{m} = \left| F_{m} - r_{i} \right| \tag{7}$$

式中:  $x_i$ 、 $y_i$ 为单元的中心坐标;  $A_m$ 为第m个点源的幅值;  $R_m$ 为第m个点源到单元i的距离;  $k_0$ 为波数;  $F_m$ 为单元i到原点的距离; M为点源的总数量;  $r_i$ 为入射波的反射系数。

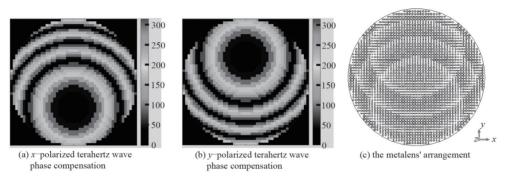


Fig.7 x-polarized terahertz wave phase compensation,y-polarized terahertz wave phase compensation and the metalens' arrangement 图 7 x 极化太赫兹波的相位补偿、y 极化太赫兹波的相位补偿及超透镜整体排布

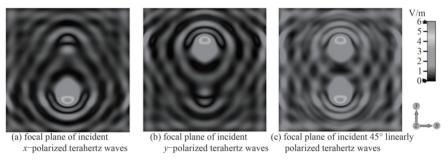


Fig.8 Focal plane of incident *x*–polarized terahertz waves, focal plane of incident *y*–polarized terahertz waves and focal plane of incident 45° linearly polarized terahertz waves

图8 x极化太赫兹波入射时的焦平面、y极化太赫兹波入射时的焦平面及45°线极化太赫兹波入射时的焦平面

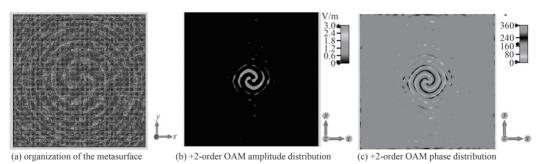


Fig.9 Organization of the metasurface,+2-order OAM amplitude distribution and +2-order OAM phase distribution 图 9 超表面排布、+2 阶 OAM 幅值分布及+2 阶 OAM 相位分布

如果入射的太赫兹波为平面波,即到达超表面的相位和振幅恒定不变,假设此时相位为 $\varphi_r$ ,则全息超表面的相位补偿公式为:

$$\varphi(x_i, y_i) = \varphi_r - \text{angle} E(x_i, y_i)$$
(8)

按照全息原理计算出超表面全息板各个单元位置的相位分布,将设计好的单元,根据相位排布在对应的位置。目标物如图 10(a)所示,在y极化太赫兹波垂直入射下成像效果如图 10(b)所示。超表面产生的方向图分布与目标物一致,很好地实现了远场全息成像。

# 3 结论

本文提出了一种反射型的各向异性超表面,采用2 bit 编码方式,实现了相位覆盖0°~360°。该超表面可在不改变排列结构的情况下,对x极化和y极化太赫兹波入射产生不同的响应。所设计的3种类型的超表面,实现了包括光束偏转、太赫兹波聚焦、OAM 涡旋波束和远场成像等太赫兹波前灵活操作。这些多通道传输和叠加态超表面,可用于太赫兹信息加密和高频通信领域。

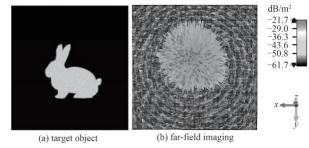


Fig.10 Target object and far-field imaging 图 10 目标物及远场成像

# 参考文献:

- [1] CUI Tiejun, QI Meiqing, WAN Xiang, et al. Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials [J]. Light: Science & Applications, 2014,3(10):e218. doi:10.1038/lsa.2014.99.
- [2] ZHUANG Xiaolin, ZHANG Wei, WANG Kemeng, et al. Active terahertz beam steering based on mechanical deformation of liquid crystal elastomer metasurface [J]. Light: Science & Applications, 2023, 12(1):1-10. doi:10.1038/s41377-022-01046-6.
- [3] SATO K, SUZUKI T. Polarization-independent isotropic metasurface with high refractive index, low reflectance, and high transmittance in the 0.3 THz band[J]. Nanophotonics, 2023,12(13):2537–2544. doi:10.1515/nanoph-2022-0788.
- [4] LI Jitao, YUE Zhen, LI Jie, et al. Wavefront-controllable all-silicon terahertz meta-polarizer [J]. Science China Materials, 2023, 66(1):300-308. doi:10.1007/s40843-022-2126-0.
- [5] ZHAO Huan, QUAN Baogang, WANG Xinke, et al. Demonstration of orbital angular momentum multiplexing and demultiplexing based on a metasurface in the terahertz band[J]. ACS Photonics, 2018,5(5):1726-1732.
- [6] LI Jitao, YUE Zhen, LI Jie, et al. Diverse terahertz wavefront manipulations empowered by the spatially interleaved metasurfaces [J]. Science China: Information Sciences, 2023,66(3):132301-1-9. doi:10.1007/s11432-022-3499-4.
- [7] ZHENG Chenglong, WANG Guocui, LI Jie, et al. All-dielectric metasurface for manipulating the superpositions of orbital angular momentum via spin-decoupling [J]. Advanced Optical Materials, 2021, 9(10):2002007. doi:10.1002/adom.202002007.
- [8] ZHAO Huan, WANG Xinke, LIU Shutian, et al. Highly efficient vectorial field manipulation using a transmitted tri-layer metasurface in the terahertz band[J]. Opto-Electronic Advances, 2023,6(2):220012. doi:10.29026/oea.2023.220012.
- [9] ZENG Hongxin,ZHANG Yaxin,LAN Feng,et al. Terahertz dual-polarization beam splitter via an anisotropic matrix metasurface[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2019,9(5):491-497. doi:10.1109/TTHZ.2019.2927890.
- [10] SHANG Guanyu, LI Haoyu, WANG Zhuochao, et al. Coding metasurface holography with polarization—multiplexed functionality [J]. Journal of Applied Physics, 2021,129(3):35304. doi:10.1063/5.0036027.
- [11] LI Fuyu,LI Yuanxun,TANG Tingting,et al.All-dielectric terahertz metasurface for linearly-polarized multichannel transmission and superposition states of spherical and vortex waves[J]. Photonics Research, 2023,11(3):485-493. doi:10.1364/PRJ.477381.
- [12] 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. doi:10.1126/science.1210713.
- [13] 谭智勇,万文坚,曹俊诚. 二氧化钒材料相变的太赫兹光谱与阵列成像[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2022,20(12):1225—1230. (TAN Zhiyong, WAN Wenjian, CAO Juncheng. Terahertz spectroscopy and array imaging of phase transitions in vanadium dioxide materials[J]. Journal of Terahertz Science and Electronics Information Technology, 2022, 20(12): 1225–1230.) doi:10.11805/TKYDA2022098.

# 作者简介:

朱海亮(1987-), 男, 博士, 特聘研究员, 博士生导师, 主要研究方向为天线和太赫兹调控器件.email: zhuhl@nwpu.edu.cn.

谢胜琳(1999-),女,硕士,主要研究方向为太赫兹调控器件.

**王庚辰**(2000-),男,在读硕士研究生,主要研究方向为太赫兹调控器件.

**周怀仁**(2001-),男,在读硕士研究生,主要研究方向为太赫兹调控器件.

于 森(1995-),男,在读博士研究生,工程师,主要研究方向为太赫兹技术开发及应用.

**刘** 林(1990-),男,博士,高级工程师,主要研究 方向为光学精密测量、太赫兹检测仪器及计量.