



基于超表面的多波束多模态太赫兹涡旋波产生

李国强 施宏宇 刘康 李博林 衣建甲 张安学 徐卓

Multi-beam multi-mode vortex beams generation based on metasurface in terahertz band

Li Guo-Qiang Shi Hong-Yu Liu Kang Li Bo-Lin Yi Jian-Jia Zhang An-Xue Xu Zhuo

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 188701 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210897

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210897>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于反射超表面产生太赫兹涡旋波束

Terahertz vortex beam generation based on reflective metasurface

物理学报. 2019, 68(23): 238101 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191055>

基于双开口谐振环超表面的宽带太赫兹涡旋光束产生

Broadband terahertz vortex beam generation based on metasurface of double-split resonant rings

物理学报. 2019, 68(10): 108701 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182147>

基于石墨烯的太赫兹波散射可调谐超表面

Graphene based tunable metasurface for terahertz scattering manipulation

物理学报. 2017, 66(20): 204101 <https://doi.org/10.7498/aps.66.204101>

相变材料与超表面复合结构太赫兹移相器

Terahertz phase shifter based on phase change material-metasurface composite structure

物理学报. 2021, 70(7): 074201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201495>

基于可调石墨烯超表面的宽角度动态波束控制

Dynamic beam-steering in wide angle range based on tunable graphene metasurface

物理学报. 2018, 67(18): 184101 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180592>

编码超构表面实现双波束独立可重构

Independent dual-beam control based on programmable coding metasurface

物理学报. 2021, 70(17): 178102 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210344>

基于超表面的多波束多模态太赫兹涡旋波产生

李国强¹⁾²⁾ 施宏宇^{1)2)†} 刘康³⁾ 李博林¹⁾²⁾
衣建甲²⁾ 张安学²⁾ 徐卓¹⁾⁴⁾

1) (西安交通大学, 多功能材料和结构教育部重点实验室, 西安 710049)

2) (西安交通大学电子与信息学部信息与通信工程学院, 西安 710049)

3) (国防科技大学电子科学学院, 长沙 410073)

4) (西安交通大学, 电子陶瓷与器件教育部重点实验室, 西安 710049)

(2021年5月12日收到; 2021年6月22日收到修改稿)

太赫兹涡旋波束可以被用于高速通信及高分辨率成像, 其产生方式近年来受到了越来越多的关注. 本文提出了一种反射型超表面, 它可以在太赫兹频段产生四种不同模态的涡旋波束. 超表面单元结构基于几何相位原理, 由三层结构组成, 上下两层为金属结构, 中间层为介质, 其上层金属结构由圆环及椭圆贴片构成. 利用几何相位对圆极化波的调控作用, 可以实现由线极化波到圆极化波的分解, 并实现对不同圆极化波的灵活调控. 为了同时调控反射波的偏转方向, 本文利用平面反射阵列原理来计算每个超表面单元所需的相位补偿. 通过相位叠加原理, 在不同传播方向的波束中叠加不同模态的轨道角动量, 较好地实现了太赫兹频段复杂波束的调控效果. 仿真及测试结果表明设计的超表面能够在太赫兹频段产生带有 ± 1 和 ± 2 模态的 4 个波束, 在无线通信及高分辨率成像等方面有潜在应用价值.

关键词: 太赫兹涡旋, 波束调控, 超表面

PACS: 87.50.U-, 81.05.Xj, 07.05.Tp, 07.57.-c

DOI: 10.7498/aps.70.20210897

1 引言

太赫兹 (terahertz, 简记为 THz) 电磁波一般是指频率在 0.3—10 THz 之间的电磁波. 与微波相比, 太赫兹频段的电磁波具有低光子能量、高分辨率、通信带宽大等优点; 在安防检测、无损探伤^[1]、高分辨率成像^[2,3]、高速通信^[4,5]等领域有着广阔应用的前景. 电磁波可以携带轨道角动量 (orbital angular momentum, OAM), 由于携带 OAM 的电磁波前具有漩涡状的相位分布, 所以又可以将其称为涡旋波束. 其螺旋状相位分布可以表示为 $\exp(-il\varphi)$, 其中, l 为整数, 代表涡旋波的拓扑荷数或模态阶数; φ 为方位角. 目前, 涡旋波束已经被

应用到大容量通信^[6]、超分辨率成像^[7]及旋转物体成像^[8]等领域. 因此, 如何有效地产生太赫兹涡旋电磁波束是相关领域的关键技术之一.

目前, 产生涡旋波束的主要方法有: 反射及透射型螺旋相位板^[9,10]、阵列天线^[11]、超表面^[12]等. 其中, 螺旋相位板厚度较大, 不利于集成化及小型化. 阵列天线理论虽然已经非常成熟, 但其需要复杂的馈电网络. 超表面是一种由亚波长单元结构组成的二维人工结构, 具有厚度薄、重量轻、对电磁波具有灵活调控能力等优势. 超表面可以分为反射型与透射型, 相对于透射型超表面, 反射型超表面的结构更加简单, 损耗更低. 然而, 当前利用超表面产生涡旋波束的工作主要集中在微波频段^[12,13], 难以适用于太赫兹系统. 由于太赫兹频段频率

† 通信作者. E-mail: honyo.shi1987@gmail.com

较高, 并且传统的 PCB 加工及制造技术已经不能满足太赫兹频段器件的加工要求, 因此太赫兹复杂波束调控难以达到理想效果, 目前对多波束多模态太赫兹涡旋波束超表面的设计及其实验验证的研究报道较少. Zhang 等^[14]提出了一种上层为 C 型金属环排列成的反射型超表面, 可以在太赫兹频段对波束方向进行调控. Liu 等^[15]利用双层超表面结构, 在太赫兹频段不同的 2 个频点, 可以独立地实现对波束偏转方向进行调控. Li 等^[16]提出了一种上层为 2 个正交 I 形金属结构的超表面单元, 利用该单元组成的反射型超表面可以产生太赫兹涡旋波束, 但超表面只能产生 1 个涡旋波束, 产生的涡旋波束也会受到馈源的遮挡. Zhou 等^[17]利用双开口谐振环结构提出了一种透射型超表面, 但每个超表面同样只能产生一种模态的涡旋波束, 且超表面单元透过率较低. Zhao 等^[18]利用刻蚀在金属上的 C 型槽制备了一种透射型超表面, 在太赫兹频段实现了产生多个涡旋波束的效果, 但其为了实现多波束效果, 超表面相位分布复杂, 单元效率也比较低.

本工作设计、仿真、加工并测试了一种反射型超表面, 所设计的超表面在太赫兹频段的线极化波激励下, 可以在 4 个不同方向同时产生四种不同模态的涡旋波束. 仿真及测试结果均验证了所设计的超表面. 其在通信及超分辨率成像领域有较大的应用潜力.

2 设计原理

为了实现用同一超表面产生四种不同模态的涡旋波束, 在所设计的超表面中利用了极化分解的概念. 两束极化正交的圆极化波可以合成一束线极化波, 同理一束线极化波也可以分解为两束极化正交的圆极化波. 若能将线极化波中的左旋圆极化波与右旋圆极化波的传播方向分别调控至不同方向, 并在不同的波束中分别引入不同的轨道角动量, 便可以实现多波束多模态太赫兹涡旋波束.

本文中提出的太赫兹多波束多模态超表面, 利用几何相位、平面反射阵列原理及相位叠加原理对电磁波进行调控. 几何相位是一种可以用来调控圆极化电磁波相位的方法, 通过旋转超表面单元结构的方位角, 便可以得到 360° 的相位调控范围^[19], 并

且其为左旋圆极化入射波与右旋圆极化入射波引入的反射相位是相反的. 即当入射波为圆极化波时, 若超表面单元上层结构逆时针旋转角度为 α , 反射波的极化方式与入射波的极化方式相同; 并且当右旋圆极化波入射时, 反射波的相位变化量是 2α , 而当左旋圆极化波入射时, 反射波的相位变化量为 -2α ^[20]. 利用这一特性, 便可以实现对 2 个正交的圆极化波分别进行调控.

使用平面反射阵列原理^[21-23]及广义斯涅尔定理^[19,24,25]均可以达到对电磁波束传播方向进行调控的目的. 利用平面反射阵列原理可以在超表面上方实现近似任意反射角度的波束调控, 且调控方式高效准确^[21]. 所以, 本工作首先采用平面反射阵列原理来计算超表面单元的相位分布, 从而达到调控波束传播方向的目的.

当平面波入射到超表面上时, 若要将其反射波指向调控至 (θ_i, φ_i) , 其中 θ_i 为俯仰角, φ_i 为方位角, 则超表面口径上需要的相位分布为^[26]

$$\phi_{(\theta_i, \varphi_i)}(x_m, y_n) = -\frac{2\pi}{\lambda} \sin \theta_i (x_m \cos \varphi_i + y_n \sin \varphi_i), \quad (1)$$

式中, (x_m, y_n) 为不同超表面单元的坐标, 坐标原点设置为超表面的中心位置; m, n 为整数; λ 为电磁波在自由空间中的波长.

实现模态为 l 的涡旋波束时, 超表面口径上需要的相位分布为^[18]

$$\phi_l(x_m, y_n) = l \arctan \left(\frac{y_n}{x_m} \right), \quad l = \pm 1, \pm 2, \dots \quad (2)$$

由相位叠加原理, 将以上两种相位叠加, 即可得到产生任意方向涡旋波束时超表面中每个单元提供的相位:

$$\phi_{(\theta_i, \varphi_i, l)}(x_m, y_n) = \phi_{(\theta_i, \varphi_i)}(x_m, y_n) + \phi_l(x_m, y_n). \quad (3)$$

根据上述讨论, 可以在不同传播方向上设计出两种不同模态的涡旋波束, 并让它们的指向分别为 (θ_1, φ_1) , (θ_2, φ_2) . 在线极化波的照射下, 除设计的 2 个圆极化波束外, 超表面镜像位置会出现极化方式与之正交的寄生波束, 且它们的模态互为相反数. 需要注意的是 φ_1 与 φ_2 关系为 $|\varphi_1 - \varphi_2| \neq \pi$.

综上所述, 令 $\theta = \frac{\pi}{4}$, $\varphi_1 = \frac{\pi}{4}$, $\varphi_2 = \frac{3\pi}{4}$, 由于超表面单元结构方位旋转角度与反射波的反射相位存在 2 倍关系, 则超表面单元的方位旋转角为

$$\phi(x_m, y_n) = \begin{cases} \frac{1}{2}\phi\left(\frac{\pi}{4}, \frac{3\pi}{4}, 1\right)(x_m, y_n) + \varphi_0, & m \text{ 与 } n \text{ 均为偶数或奇数,} \\ \frac{1}{2}\phi\left(\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{4}, 2\right)(x_m, y_n) + \varphi_0, & \text{其他,} \end{cases} \quad (4)$$

式中 φ_0 为一常数角度. 图 1(a) 展示了利用 (4) 式计算得到的超表面口径相位局部分布图, 图 1(b) 为超表面的局部仿真模型.

3 超表面单元设计及其仿真

所设计的超表面单元结构如图 2 所示, 其中黄色部分为金属结构, 材质为金, 厚度为 $2 \mu\text{m}$; 灰色部分为介质层, 其介电常数为 9.9, 损耗角正切值为 0.0001, 厚度为 $635 \mu\text{m}$. 上层结构的具体尺寸: 圆环外径为 $2r_1$, 内径为 $2r_2$; 椭圆的长轴为 $2r_x$, 短轴为 $2r_y$; 单元的周期 $p = 320 \mu\text{m}$. 其中: $r_1 = 115 \mu\text{m}$, $r_2 = 105 \mu\text{m}$, $r_x = 69 \mu\text{m}$, $r_y = 41 \mu\text{m}$.

为了验证所设计的超表面单元结构, 使用 CST Microwave Studio 仿真软件对单元进行了仿真验证. 图 3 给出了在 340 GHz 圆极化波入射条

件下, 超表面单元上层结构逆时针旋转 α 度时, 同极化反射波的反射幅值及相位的变化情况. 从仿真结果可以看出, 由于金属地的存在, 超表面的反射效率非常高, 其反射相位也表现出了几何相位特有的线性关系.

4 超表面仿真结果

为了验证所设计超表面产生多波束多模态涡旋波束的功能, 设计仿真了 1 个大小为 52×52 个单元的反射型超表面. 超表面的仿真由 CST Microwave Studio 完成, 局部仿真模型如图 1(b) 所示.

仿真时使用线极化平面波作为激励源, 超表面产生的 4 个涡旋波束的远场分布及其俯仰角、方位角信息如图 4 所示; 相应 4 个涡旋波束的二维幅值及其对应相位分布的仿真结果如图 5 所示. 由图 4、图 5 的仿真结果可以看出, 在设计方向产生了 4 个不同模态的涡旋波束, 它们的俯仰角 θ 均为 45° , 方位角分别为图 5(a) $\varphi_{l=-1} = 315^\circ$ 、图 5(c) $\varphi_{l=-2} = 225^\circ$ 、图 5(e) $\varphi_{l=1} = 135^\circ$ 、图 5(g) $\varphi_{l=2} = 45^\circ$.

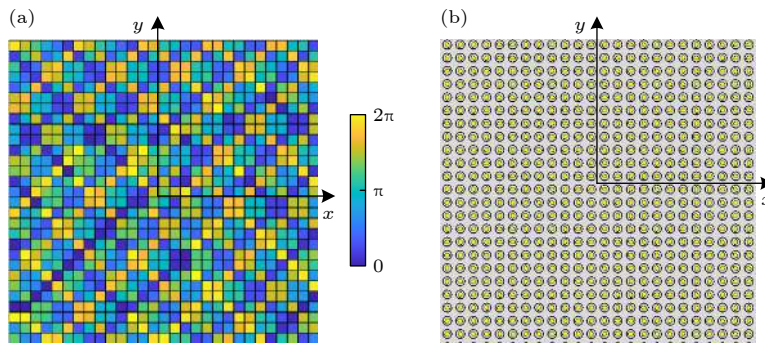


图 1 (a) 超表面局部相位分布; (b) 超表面局部仿真模型

Fig. 1. (a) Partial phase distribution of metasurface; (b) the partial simulation model of metasurface.

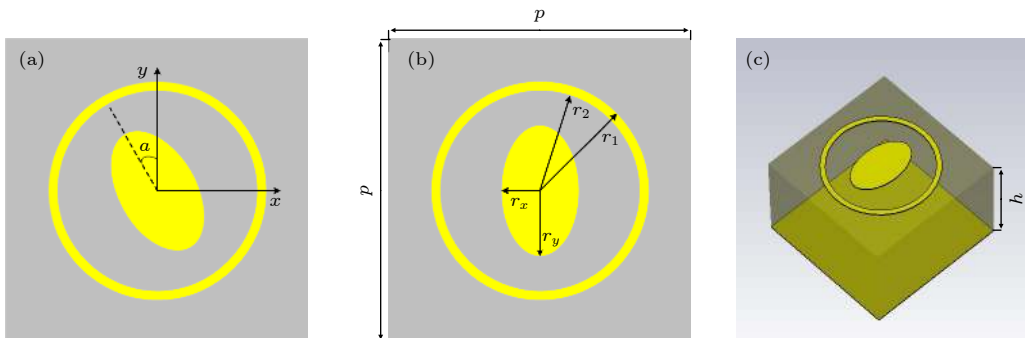


图 2 单元结构图 (a) 上层结构逆时针旋转 α ; (b) 上层结构尺寸; (c) 透视图

Fig. 2. Schematics of unit cell: (a) Top layer rotated α degrees counterclockwise; (b) dimensions of top layer; (c) overall view.

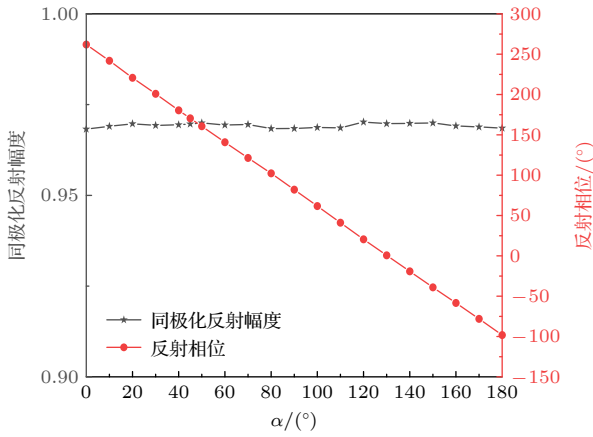


图3 旋转角度 α 变化时同极化反射波的反射幅度及相位
Fig. 3. Reflection amplitude and phase of co-polarized reflected wave versus α .

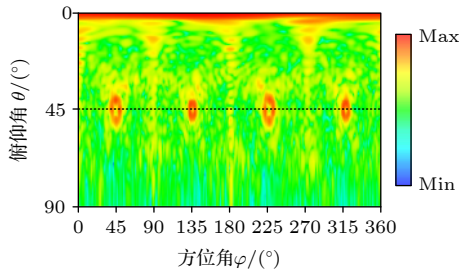


图4 超表面远场分布的仿真结果

Fig. 4. Distribution of simulated far-field vortex beams.

为了分析超表面生成的涡旋电磁波纯度,还对仿真得到的涡旋波束的 OAM 谱进行了分析.在上述仿真得到的二维涡旋波束电场中,分别以各个波束的相位奇点为圆心,沿主波束取 1 个环形电场数据进行傅里叶变换,即可得到对应涡旋波束的 OAM 谱分析结果,计算公式为

$$A_l = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} E(\varphi) e^{-il\varphi} d\varphi, \quad (5)$$

式中, $E(\varphi)$ 为选取的电场数据, A_l 为相应模式的幅度.

涡旋电磁波模式纯度可利用各个模式的分量占总能量的相对大小来表示^[27],由图6中超表面仿真结果的归一化 OAM 谱分析可得,本文提出的超表面所产生的涡旋电磁波,主模式占据最高能量.

5 超表面测试

为了进一步验证所设计超表面的效果,对超表面进行了加工与测试.超表面的加工利用了光刻技术,由于加工及测试要求,将超表面按上述方案设

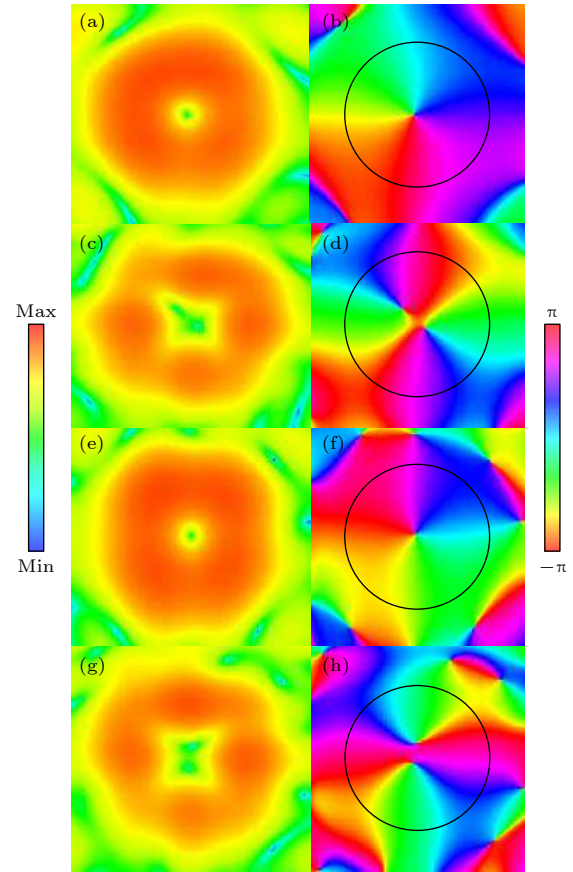


图5 涡旋波束远场幅度(左图)和相位(右图)的仿真结果
(a), (b) $l = -1$; (c), (d) $l = -2$; (e), (f) $l = 1$; (g), (h) $l = 2$
Fig. 5. Simulated amplitude (left panel) and phase (right panel) of far-field vortex beams: (a), (b) $l = -1$; (c), (d) $l = -2$; (e), (f) $l = 1$; (g), (h) $l = 2$.

计为直径为 50 mm 的圆形并进行加工,加工成品如图7(a)所示.图7(b)和图7(c)中的测试环境为西安交通大学毫米波暗室,其测试范围为 40—500 GHz.测试过程中,馈源喇叭到超表面的距离为 100 mm,满足远场测试条件.近场测量探头到超表面中心的距离为 135 mm,采样面的大小为 60 mm × 60 mm,采样点数为 41 × 41 个.由于加工及测试误差,测试结果较仿真出现了频偏(小于 5%).图8给出了由矢量网络分析仪测量得到的超表面反射波电场幅度分布与相位分布.由于测试系统功能的限制,这里给出的测试结果为与馈源同极化的测试结果.由测试结果可以看出,超表面在设计 的 4 个对应方向上产生了四种不同模式的涡旋波束.

分别对测试结果中四种模式的涡旋电磁波纯度进行了分析,分别以测试得到的涡旋波束相位奇点为圆心,沿环形主波束选取 1 个环形电场数据并

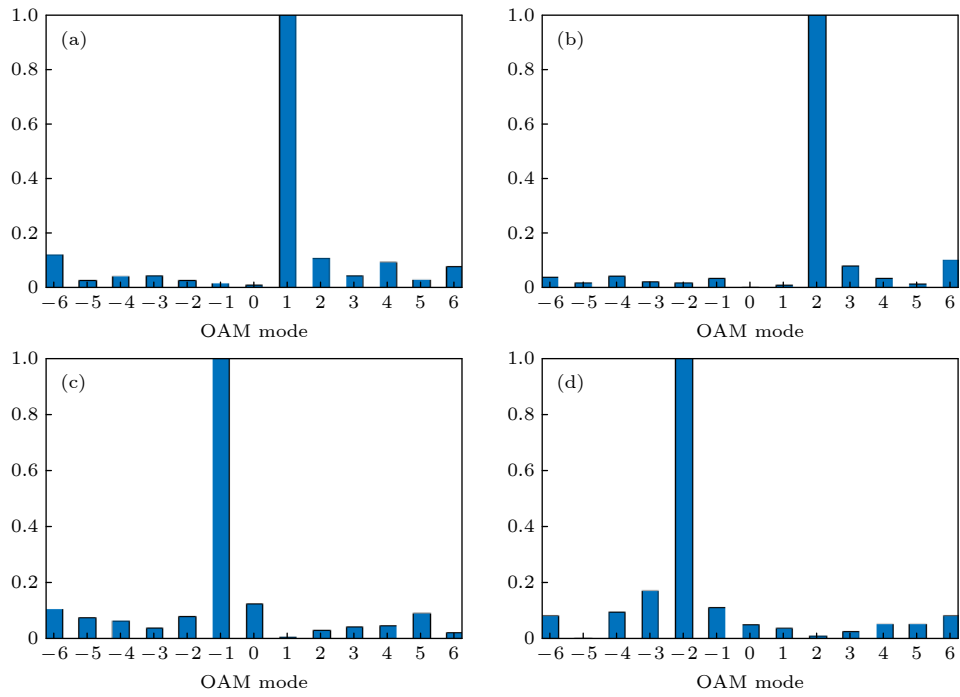


图 6 仿真结果的 OAM 谱分析 (a) $l = 1$; (b) $l = 2$; (c) $l = -1$; (d) $l = -2$

Fig. 6. OAM spectrum weight for the simulated results: (a) $l = 1$; (b) $l = 2$; (c) $l = -1$; (d) $l = -2$.



图 7 (a) 加工的超表面; (b) 测试环境; (c) 测试中的超表面

Fig. 7. (a) Photograph of the fabricated metasurface; (b) photograph of the measurement environment; (c) metasurface under test.

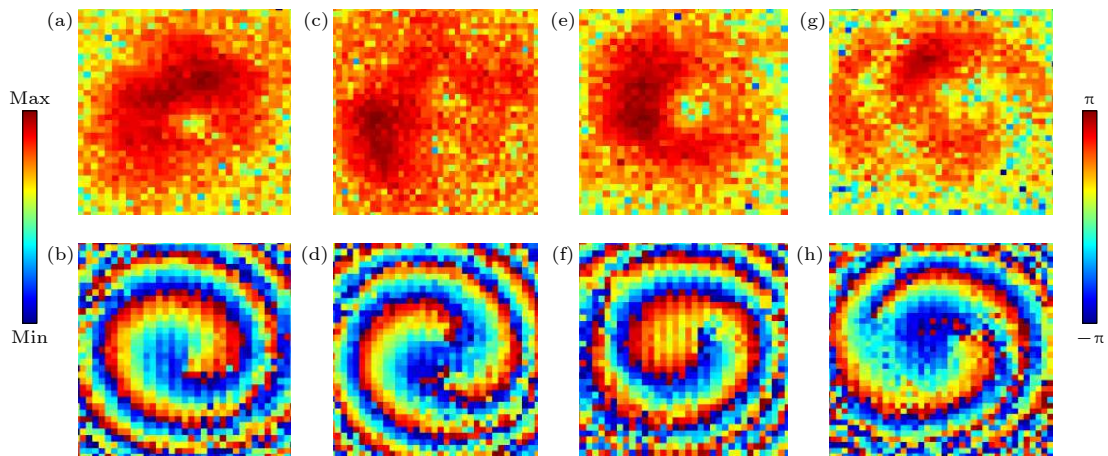


图 8 涡旋波束近场幅度 (上图) 和相位 (下图) 的测试结果 (a), (b) $l = -1$; (c), (d) $l = -2$; (e), (f) $l = 1$; (g), (h) $l = 2$

Fig. 8. Measured amplitude (up panel) and phase (down panel) of near-field vortex beams: (a), (b) $l = -1$; (c), (d) $l = -2$; (e), (f) $l = 1$; (g), (h) $l = 2$.

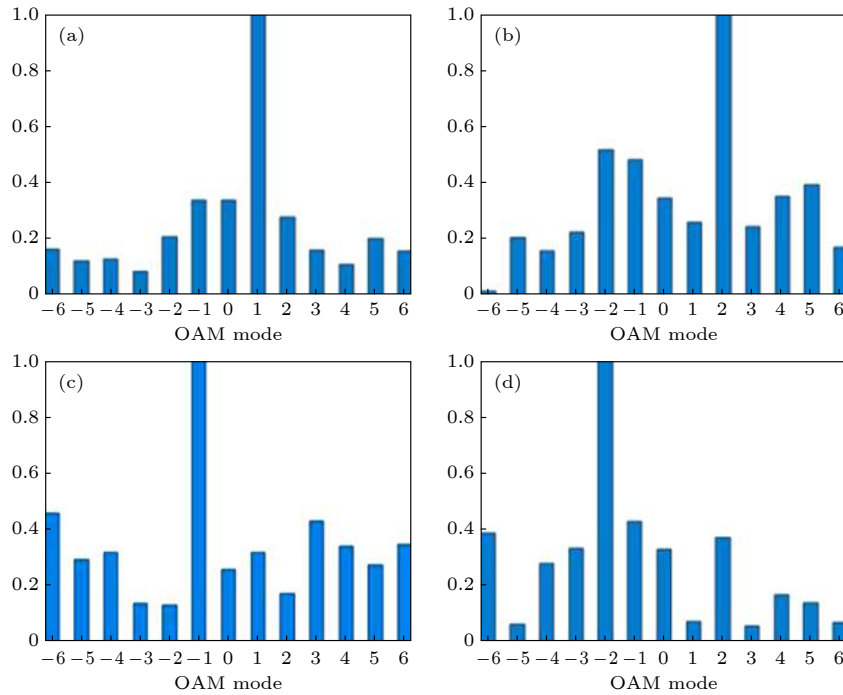


图9 近场测试结果的频谱分析 (a) $l = 1$; (b) $l = 2$; (c) $l = -1$; (d) $l = -2$

Fig. 9. OAM spectrum weight for the measured near-field results: (a) $l = 1$; (b) $l = 2$; (c) $l = -1$; (d) $l = -2$.

进行傅里叶变换, 得到各个波束测试结果的 OAM 谱. 由于加工误差及测试条件限制, 测试结果与仿真结果的 OAM 谱存在一些差异. 但由图 9 中的 OAM 谱分析结果可得, 超表面产生的涡旋波束主模态能量最高.

6 结 论

本文设计、仿真、加工并测试了一种可产生多波束多模态太赫兹涡旋波束的反射型超表面, 该设计利用了极化分解及几何相对电磁波的调控作用, 在太赫兹频段实现了在不同方向产生四种携带不同轨道角动量模态的涡旋波束. 仿真和测试结果表明, 利用平面反射阵列及相位叠加原理, 可以较好地实现太赫兹频段复杂波束的调控. 所设计的超表面在太赫兹成像及通信系统中具有潜在应用价值.

参考文献

[1] Karpowicz N, Zhong H, Zhang C L, Lin K L, Hwang J S, Xu J Z, Zhang X C 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 054105
 [2] Gompf B, Gebert N, Heer H, Dressel M 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 082104
 [3] Dobroui A, Yamashita M, Ohshima Y N 2004 *Appl. Opt.* **43** 5637

[4] Chen Z F, Chen X Q, Tao L, et al. 2018 *Nat. Commun.* **9** 4909
 [5] Fujishima M, Amakawa S, Takano K, Katayama K, Yoshida T 2015 *IEICE Trans. Electron.* **E98-C** 1091
 [6] Yan Y, Xie G D, Lavery M P J, et al. 2014 *Nat. Commun.* **5** 4876
 [7] Liu K, Cheng Y Q, Gao Y, Li X, Qin Y L, Wang H Q 2017 *Appl. Phys. Lett.* **110** 164102
 [8] Liu K, Li X, Gao Y, Wang H Q, Cheng Y Q 2017 *J. Appl. Phys.* **122** 124903
 [9] Zhang Z F, Zheng S L, Chen Y L, Jin X F, Chi H, Zhang X M 2016 *Sci. Rep.* **6** 25418
 [10] Tamburini F, Mari E, Thide B, Barbieri C, Romanato F 2011 *Appl. Phys. Lett.* **99** 204102
 [11] Bai X D, Liang X L, Li J P, Wang K, Geng J P, Jin R H 2016 *Sci. Rep.* **6** 27815
 [12] Shi H Y, Wang L Y, Chen X M, Zhang A X, Xu Z 2019 *J. Appl. Phys.* **126** 063108
 [13] Yu S, Li L, Shi G, Zhu C, Zhou X, Shi Y 2016 *Appl. Phys. Lett.* **108** 121903
 [14] Zhang X Q, Tian Z, Yue W S, Gu J Q, Zhang S, Han J G, Zhang W L 2013 *Adv. Mater.* **25** 4567
 [15] Liu S, Zhang L, Yang Q L, et al. 2016 *Adv. Opt. Mater.* **4** 1965
 [16] Li X N, Zhou L, Zhao G Z 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 238101 (in Chinese) [李晓楠, 周璐, 赵国忠 2019 物理学报 **68** 238101]
 [17] Zhou L, Zhao G Z, Li X N 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 108701 (in Chinese) [周璐, 赵国忠, 李晓楠 2019 物理学报 **68** 108701]
 [18] Zhao H, Quan B G, Wang X K, Gu C Z, Li J J, Zhang Y 2018 *ACS Phot.* **5** 1726
 [19] Jiang Z H, Lei K, Wei H, Werner, D. H 2018 *Phys. Rev. Appl.* **9** 064009
 [20] Shi H Y, Li J X, Zhang A X, Jiang Y S, Wang J F, Xu Zhuo, Xia Song 2015 *IEEE Ant. Wir. Prop. Lett.* **14** 104
 [21] Li J H, Zhang Y T, Li J N, et al. 2020 *Acta Phys. Sin.* **69**

- 228101 (in Chinese) [李佳辉, 张雅婷, 李吉宁, 等 2020 物理学报 69 228101]
- [22] Deng R Y, Xu S H, Yang F, Li M K 2017 *IEEE Ant. Wir. Prop. Lett.* **16** 884
- [23] Liu H X, Xue H, Liu Y J, Li L 2020 *Appl. Sci.* **10** 7219
- [24] Sun S L, He Q, Xiao S Y, Xu Q, Li X, Zhou L 2012 *Nat. Mater.* **11** 426
- [25] Yu N F, Genevet P, Kats M A, Aieta F, Tetienne J P, Capasso F, Gaburro Z 2011 *Sci.* **334** 333
- [26] Nayeri P, Yang F, Elsherbeni A Z 2018 *Reflectarray Antennas: Theory, Designs, and Applications* (Hoboken: John Wiley & Sons) pp9–13
- [27] Shi H Y, Wang L Y, Peng G T, Chen X M, Li J X, Zhu S T, Zhang A X, Xu Z 2019 *IEEE Ant. Wir. Prop. Lett.* **18** 59

Multi-beam multi-mode vortex beams generation based on metasurface in terahertz band

Li Guo-Qiang¹⁾²⁾ Shi Hong-Yu^{1)2)†} Liu Kang³⁾ Li Bo-Lin¹⁾²⁾

Yi Jian-Jia²⁾ Zhang An-Xue²⁾ Xu Zhuo¹⁾⁴⁾

1) (*MOE Key Laboratory for Multifunctional Materials and Structures, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China*)

2) (*School of Information and Communications Engineering, Faculty of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China*)

3) (*College of Electronic Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China*)

4) (*Electronic Materials Research Laboratory, Key Laboratory of the Ministry of Education, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China*)

(Received 12 May 2021; revised manuscript received 22 June 2021)

Abstract

The generating of vortex beams in the terahertz (THz) band attracts significant attention due to their applications in high-speed communication and high-resolution imaging. In this article, a novel reflective metasurface working in the THz band is designed to generate four vortex beams with different topological charges in different directions. The unit cell is designed based on the geometric phase, and it consists of two metallic (gold) layers and one dielectric layer in between. The top layer of the unit cell includes an elliptic patch and a circular ring, and the bottom layer of the unit cell is a metallic ground. The reflection efficiency of the unit cell is very high due to the presence of metallic ground. To break through the limitations of traditional methods, the metasurface is a good choice to generate beams that carry orbital angular momentum (OAM). Using the concept of geometric phase, the reflection phase of reflective circular polarization (CP) electromagnetic waves can be controlled in an ingenious way. Owing to the property of the geometric phase, inverse phase shift can be achieved for left-handed circular polarization and right-handed circular polarization waves. By utilizing this trait of geometric phase, one can decompose a linear polarization wave into two orthogonal circular polarization waves and control their properties respectively. By rotating the top layer of the unit cell, 360-degree phase shift and the phase distribution satisfying the requirement for generating the multi-beam multi-mode vortex beam can be achieved. In order to control the direction and the topological charge of each beam, based on the geometric phase, the theory of reflectarray and the phase composition principle, the phase distribution of the reflective metasurface is calculated to provide the phase compensation to make the vortex beams point to certain directions. It is worthwhile to point out that the method presented in this paper provides a way to generate complex multi-mode vortex beams in the THz band. The simulations and measurements show that the metasurface can generate four vortex beams with topological charges $l = \pm 1$ and ± 2 in different directions in the THz band. These results also indicate that our design has great potential applications in wireless communication and high-resolution imaging.

Keywords: terahertz vortex beams, beam control, metasurface

PACS: 87.50.U-, 81.05.Xj, 07.05.Tp, 07.57.-c

DOI: 10.7498/aps.70.20210897

† Corresponding author. E-mail: honyo.shi1987@gmail.com