

太赫兹多波束调控反射编码超表面*

黄若彤 李九生†

(中国计量大学太赫兹技术与应用研究所, 杭州 310018)

(2022年10月14日收到; 2022年12月17日收到修改稿)

已报道的大多数编码超表面仅利用相位或幅度编码进行电磁波调控, 限制了太赫兹波调控灵活性. 本文提出了一种反射超表面单元, 通过相位编码构造超表面, 在圆极化波入射下获得反射波束分裂和偏转功能, 实现对圆极化波束的灵活调控; 同一超表面单元结构利用幅度编码构造超表面在线极化太赫兹波入射下, 实现空间成像功能. 通过相位编码和幅度编码结合构造超表面, 提高了对太赫兹波操控的灵活性, 该编码超表面构造思路可以为太赫兹器件设计提供一种全新思路.

关键词: 太赫兹, 太赫兹分束, 波束偏转, 太赫兹成像

PACS: 42.30.-d, 78.20.Ci, 78.67.Pt

DOI: 10.7498/aps.72.20221962

1 引言

超表面是由二维元素微结构周期性或非周期性排列的人工电磁材料, 能够操纵电磁波的振幅和相位, 实现偏振转换^[1-4]、完美吸收^[5]、振幅和相位调制^[6-8]等特殊功能. 2014年, Cui等^[9]提出了微波的数字编码超表面概念. 近年来, 编码超表面在太赫兹频率波段也受到了广泛关注, 研究人员通过使用编码超表面实现了太赫兹波束偏转^[10-15]、光谱成像^[16-18]、偏振操纵^[19-26]、聚焦^[27-29]等功能. 2020年, Chen等^[30]提出用于涡旋太赫兹波束操纵和聚焦的多功能反射编码超表面. 2021年, Saifullah等^[31]提出一种结构为“四叶草形”的编码超表面, 并实现了超宽带漫散射. 2022年, Li等^[32]设计了一种左右圆极化太赫兹多功能编码超表面. 上述报道的超表面都是在单一偏振态太赫兹波入射下通过相位、幅度等参数的差异编码构造超表面实现波束分裂、波束偏转和涡旋波束操纵等功能, 由于只利用电磁波单一偏振态, 所以对太赫兹波调控灵活性降低.

本文提出太赫兹多波束调控反射编码超表面, 它将几何相位和幅度变化相结合, 在不同偏振的太赫兹波入射下实现不同的太赫兹波调控功能. 模拟的近场和远场辐射模式, 结果与理论计算预测一致, 设计的超表面提供了一种太赫兹波偏振和相位操控自由度方法, 极大地提高了太赫兹波操纵的效率.

2 超表面单元结构设计和理论分析

本文提出的编码超表面结构如图1所示, 其中图1(a)为所设计的幅度编码超表面, 利用入射线偏振(LP)波产生反射波的幅度差值进行编码, 图1(b)为相位编码超表面, 通过旋转顶层金属图案利用入射圆偏振(CP)波产生PB相位(几何相位)进行编码. 超表面单元结构如图1(c)所示, 单元周期 $P = 65 \mu\text{m}$, 由3层介质组成, 分别为金属图案(外径 $r_1 = 30 \mu\text{m}$, 内径 $r_2 = 25 \mu\text{m}$, 厚度为 $d_1 = 0.125 \mu\text{m}$), 中间硅介质层($\epsilon_r = 11.9$, 厚度 $h = 25 \mu\text{m}$), 金属板薄膜层(厚度 $d_2 = 2 \mu\text{m}$). α 是单元结构金属图案沿逆时针方向旋转角度.

* 国家自然科学基金(批准号: 61871355, 61831012)、浙江省科技厅人才工程(批准号: 2018R52043)和浙江省重点研发项目(批准号: 2021C03153, 2022C03166)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: lijsh2008@126.com

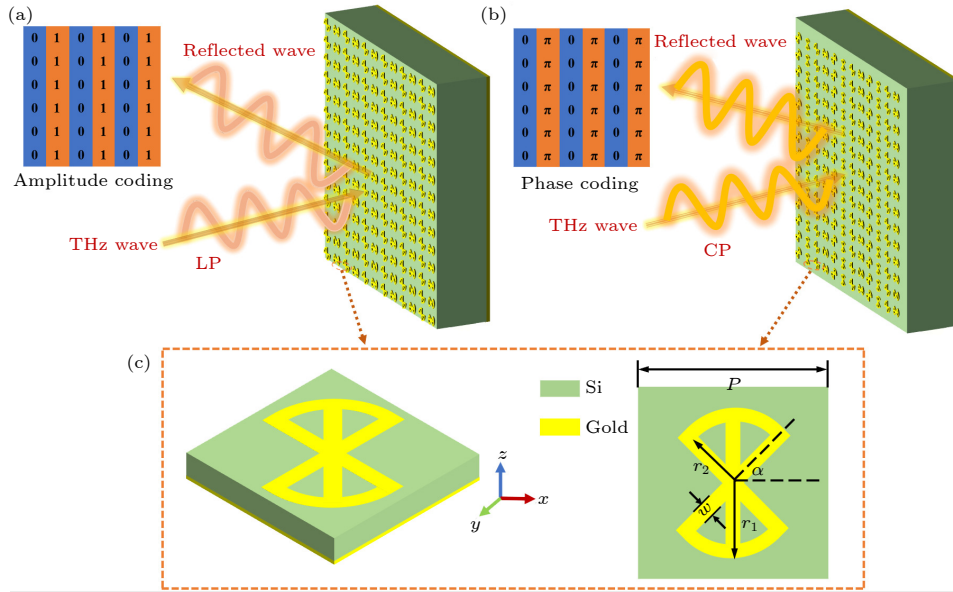


图 1 编码超表面结构示意图 (a) 幅度编码超表面; (b) 相位编码超表面; (c) 超表面单元

Fig. 1. Schematic diagram of the proposed coding metasurface: (a) Amplitude coding metasurface; (b) phase coding metasurface; (c) unit cell.

表 1 编码超表面单元

Table 1. Unit cell of the proposed coding metasurface.

| | | | | |
|-----------|---------|--------|-------|--------|
| 1-bit相位编码 | 0 | | 1 | |
| 2-bit相位编码 | 00 | 01 | 10 | 11 |
| 旋转角度/(°) | 0 | 45 | 90 | 135 |
| 相位/(°) | -137.21 | -49.09 | 43.99 | 131.99 |
| 俯视图 | | | | |

利用几何相位原理构造编码超表面, 编码单元所对应的俯视图和相位如表 1 所示. 对于 1-bit 数字编码超表面, 数字“0”和“1”代表反射波相对于入射波的相位差为 180° 的两种编码单元, 对应单元的反射相位为 -137.21° 和 43.99° ; 对于 2-bit 数字编码超表面, 它由 4 个编码单元组成, 分别对应 -137.21° , -49.09° , 43.99° 和 131.99° 的反射相位响应, 对应的数字“00”, “01”, “10”和“11”代表反射波相对于入射波的相位差为 90° 的 4 个编码超表面单元. 编码单元对应的反射幅度和反射相位如图 2(a), (b) 所示, 可以看出, 在 $0.48\text{--}0.68\text{ THz}$ 之间, 太赫兹波反射幅度均大于 0.8, 相邻编码单元反射波相对于入射波的相位差接近 90° , 满足 2-bit 编码超表面设计要求.

编码超表面一般包含有限种单元, 凭借离散化的数字编码序列来调控电磁波, 核心思想是将数字化的二进制编码融入超表面的结构、电磁参数、功能等设计的各个方面. 编码超表面由 $N \times N$ 个相同尺寸为 D 的方形栅格构成, 每个栅格填充由“0”和“1”单元构成的子阵列, 其散射相位设为 $\varphi = (m, n)$. 在平面波垂直入射的情形下, 超表面的远场函数可表示为

$$f(\theta, \varphi) = f_e(\theta, \varphi) \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N \exp\left\{-i\left\{\varphi(m, n) + KD \sin \theta [(m-1/2) \cos \varphi + (n-1/2) \sin \varphi]\right\}\right\}, \quad (1)$$

式中 θ 和 φ 为任意方向上的俯仰角和方位角,

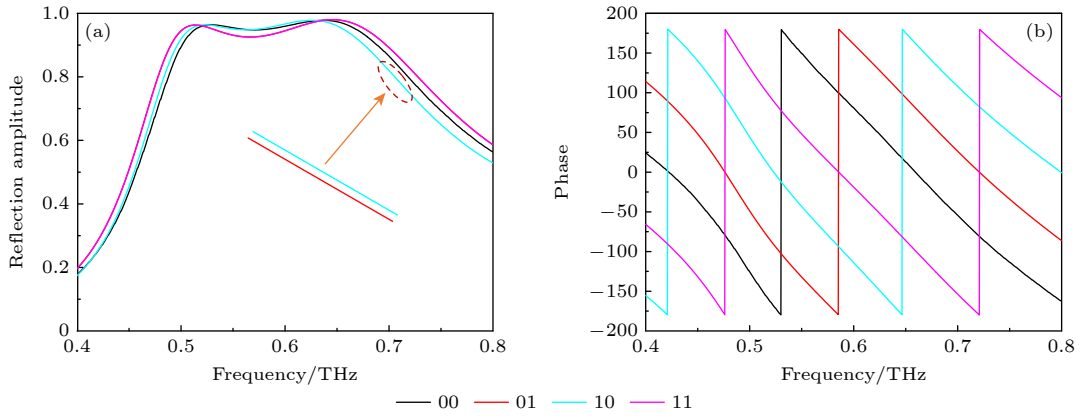


图 2 圆极化波入射时超表面单元的反射振幅和相位 (a) 反射振幅; (b) 反射相位

Fig. 2. Reflection amplitude and phase of the unit cell under the circularly polarized wave incidence: (a) Reflection amplitude; (b) reflection phase.

$f_e(\theta, \varphi)$ 为栅格方向函数, 其中 $\theta = \arcsin(\lambda/\Gamma)$, λ 是自由空间波长, Γ 表示编码序列周期长度. 根据广义斯涅耳定律和超表面散射的远场函数, 反射波束的方位角 (φ) 和单元“0”或“1”编码粒子的长度 (D_x) 和宽度 (D_y) 满足以下关系:

$$\begin{aligned} \varphi &= \pm \arctan(D_x/D_y), \\ \varphi &= \pi \pm \arctan(D_x/D_y). \end{aligned} \quad (2)$$

3 仿真结果与性能分析

3.1 太赫兹波分束

圆极化太赫兹波的垂直入射下, “0”和“1”交错的编码超表面将产生双波束反射, 而用“0”和“1”二维棋盘格编码时, 编码超表面会产生对称的四波束反射. 首先, 设计了如图 3(a) 所示的编码超表面, 每个“0”和“1”单元格都是由 6×6 个编码粒子组成, 编码序列“000000-111111...”沿 x 方向呈周期性排列, 沿 y 方向排布, 编码周期 $\Gamma = 780 \mu\text{m}$. 当圆极化太赫兹波垂直入射到超表面上时, 在 0.5 THz 处, 入射太赫兹波沿着 x 轴被分为两束对称的反射波, 其三维远场如图 3(b) 所示. 图 3(c) 描绘了在 0.5 THz 处反射模式下两分束的归一化幅度曲线, 两个反射波束的峰值分别在 -50° 和 50° 出现, 即偏转角为 50° . 利用公式计算 $\theta = \arcsin(\lambda/\Gamma) = 50.2^\circ$, 结合归一化反射幅度曲线和三维远场图可以得出模拟与理论计算结果符合.

此外, 本文还排布了一个棋盘编码超表面, 该结构周期性地使用数字序列“000000-111111/111111-000000...”沿 x 方向呈周期性排布, 沿 y 方向排

列, 编码周期 $\Gamma = 1103 \mu\text{m}$, 如图 4(a) 所示. 当圆极化太赫兹波垂直入射到编码超表面上时, 在 0.55 THz 处的三维远场和归一化反射振幅图如图 4(b), (c) 所示. 可以观察到, 入射太赫兹波被分为四束对称的反射波.

为了更加灵活地获得任意散射角调控功能, 本文将编码序列进行基本的卷积运算, 不同编码序列的加法卷积运算可以实现不同的编码周期, 从而获得对入射太赫兹光波不同的散射角度或任意角度. 对于“00”, “01”, “10”, “11”的编码粒子, 每一个编码单元由 6×6 个编码粒子组成, 四位卷积计算可以执行为“00 + 00 = 00”, “00 + 11 = 11”, “10 + 10 = 00”, “11 + 10 = 01”和“11 + 11 = 10”, 编码超表面的新卷积序列“S3 = S1 + S2”. 结合数字编码原理和卷积定理, 所设计的编码超表面序列 S1, S2 和 S3 如图 5(a)—(c) 所示. 编码超表面序列 S1 (“00-01-10-11...”) 沿 x 方向呈周期性排列, 沿 y 方向排布, 当左圆偏振太赫兹波入射到超表面 S1 时, 在 0.48 THz 处产生了反射波束的偏转, 相应的三维 (3D) 和二维 (2D) 散射图如图 5(d), (g) 所示, 入射太赫兹波以 $\theta = \arcsin(\lambda/\Gamma) = 24^\circ$ 的反射波束角度偏转. 编码超表面序列 S2 (“00-10...”) 是沿 y 方向呈周期性排列、沿 x 方向排布的编码超表面, 其 3D 和 2D 散射图如图 5(e), (h) 所示. 可以看出, 太赫兹波被分成两个对称的反射波束, 偏转角为 $\theta = \arcsin(\lambda/\Gamma) = 53.25^\circ$. 编码超表面序列 S3 (“00-01-10-11... \setminus 10-11-00-01...”) 由 S1 和 S2 叠加组成, 根据傅里叶变换的卷积定理, 卷积编码超表面 S3 的远场散射图由两个编码序列的远场散射图叠加组成, 编码超表面序列 S3 的 3D 和 2D 散

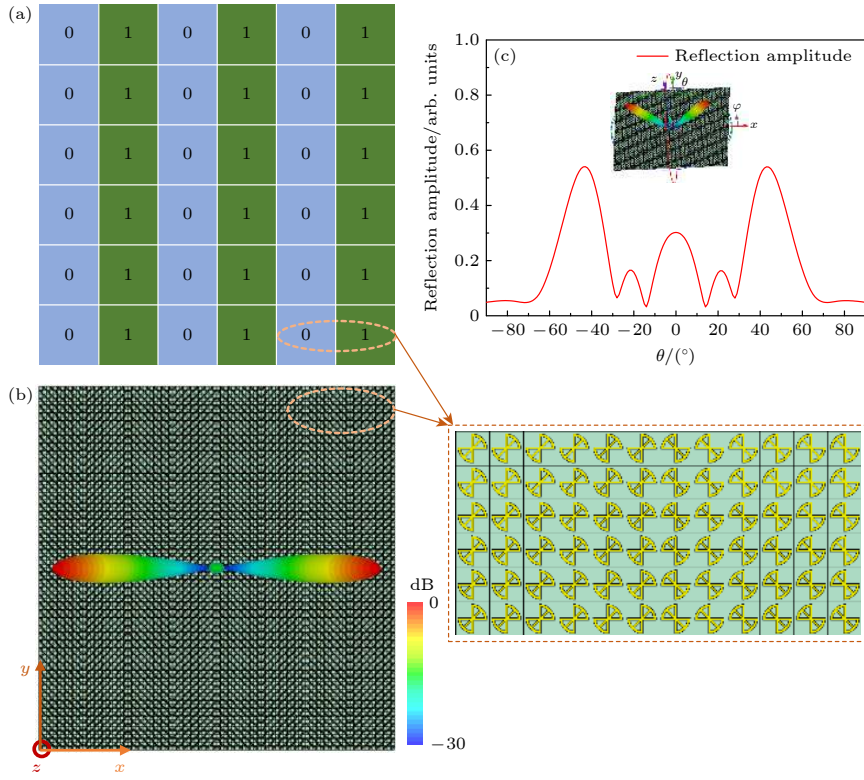


图 3 产生两分束太赫兹反射波的 1-bit 编码超表面 (a) 编码排布示意图; (b) 三维远场散射图; (c) 归一化反射振幅图
 Fig. 3. 1-bit coding metasurface for generating two-reflected beam: (a) Layout diagram of coding metasurface; (b) three-dimensional far field scattering diagram; (c) normalized reflection amplitude diagram.

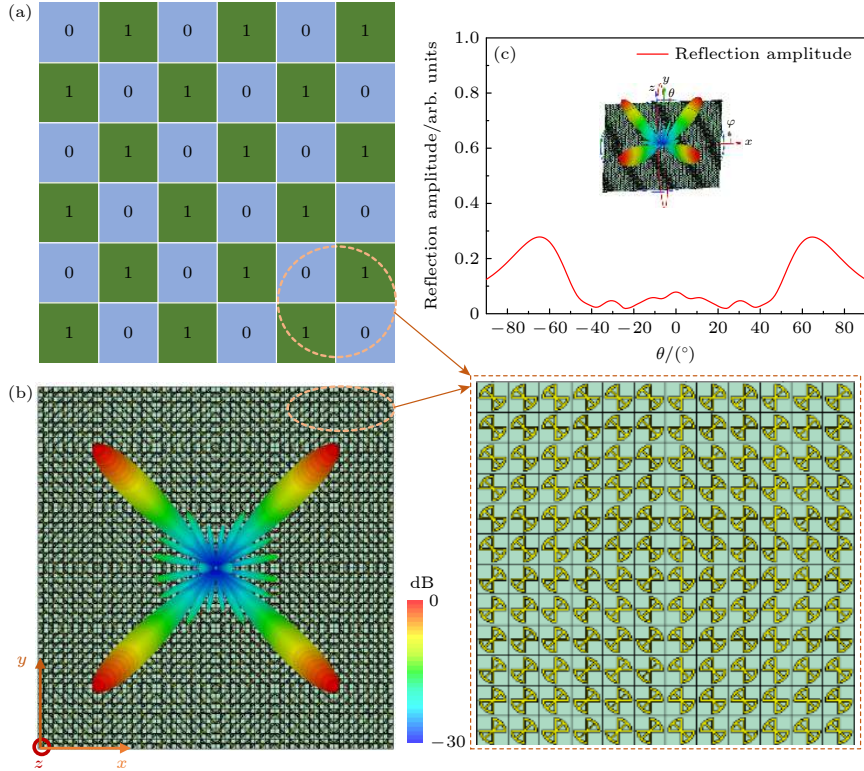


图 4 产生四分束的 1-bit 编码超表面 (a) 编码排布示意图; (b) 三维远场散射图; (c) 归一化反射振幅图
 Fig. 4. 1-bit coding metasurface for generating quadrant beam: (a) Layout diagram of coding metasurface; (b) three-dimensional far field scattering diagram; (c) normalized reflection amplitude diagram.

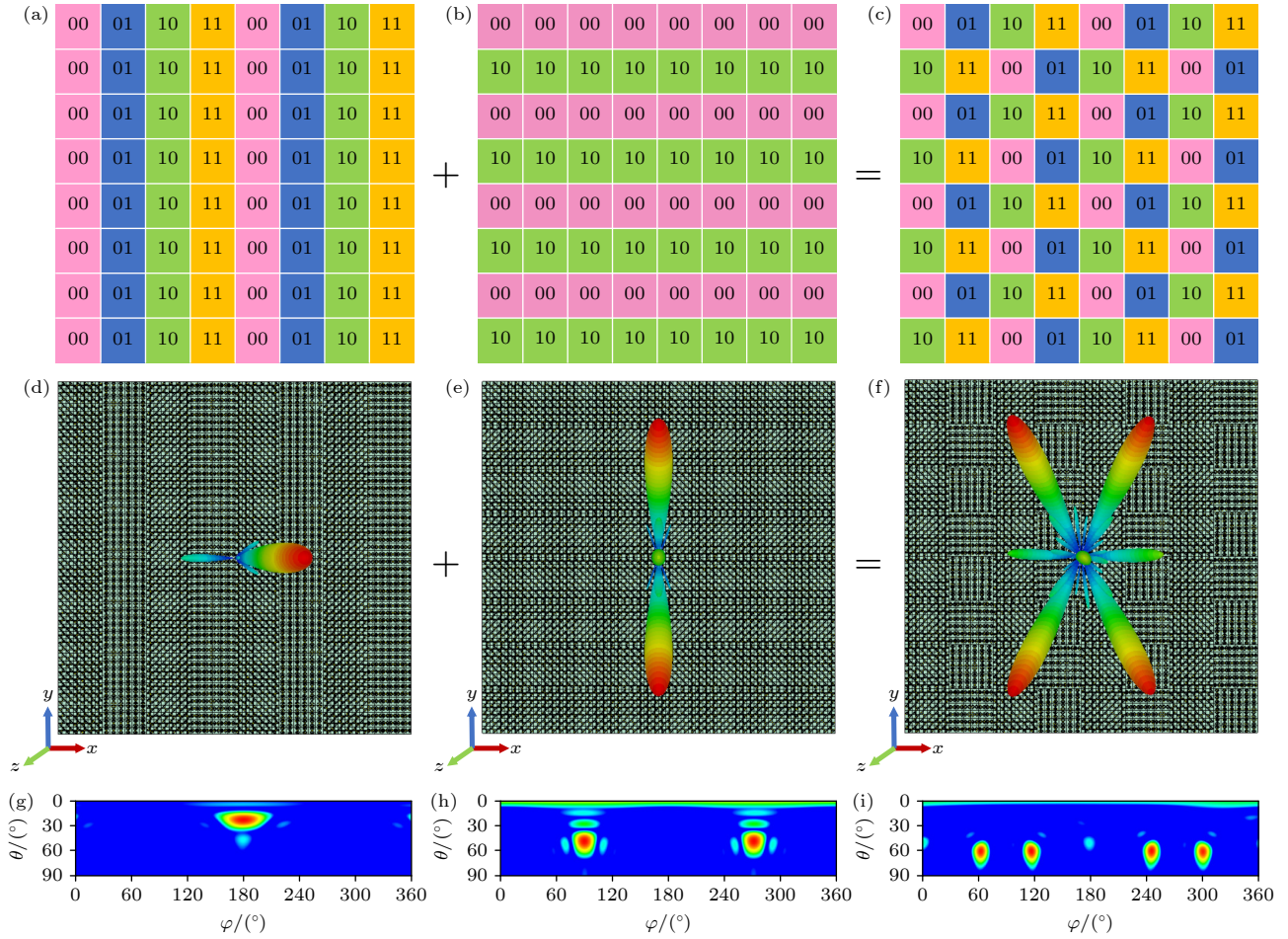


图5 编码超表面卷积过程示意图 (a)—(c) S1, S2 和 S3 的超表面单元排布示意图; (d)—(f) 0.48 THz 处左圆偏振入射时, S1, S2 和 S3 的 3D 远场散射图; (g)—(i) 0.48 THz 处左圆偏振入射时, S1, S2 和 S3 的 2D 散射图

Fig. 5. Convolution process schematic diagram of the coding metasurface: (a)–(c) Layout diagram of S1, S2 and S3 metasurfaces; (d)–(f) 3D far-field scattering diagram of S1, S2 and S3 under left circularly polarized incidence at 0.48 THz; (g)–(i) 2D scattering diagram of S1, S2 and S3 under left circularly polarized incident at 0.48 THz.

射图如图 5(f), (i) 所示, 可见当左圆极化太赫兹波照射到超表面 S3 上时, 其反射波束分离成了 4 个偏转光束, 卷积编码超表面可以实现对反射波束的偏转和分裂。

3.2 太赫兹波异常反射

2-bit 编码超表面设计是利用圆极化太赫兹波入射控制反射波束, 实现波束散射角的偏转. 预设的 2-bit 编码超表面“00-01-10-11...”沿 x 方向周期性排布, 沿 y 方向排列, 每个“00” “01” “10” “11” 单元格都是由 6×6 个编码粒子组成, 周期为 $\Gamma = 1560 \mu\text{m}$, 超表面单元排布如图 6(a), (b) 所示. 在 0.48 THz 处, 当左圆极化太赫兹波垂直入射到编码超表面上时, 太赫兹反射波束发生了偏转, 其三维远场图及对应的归一化幅度曲线分别如图 6(c), (d) 所示. 从图中可以看出, 相对于 z 轴的正方向,

反射波束的偏转角接近 24° , 偏转角可以利用公式计算出 $\theta = \arcsin(\lambda/\Gamma) = 23.62^\circ$, 仿真结果与计算结果一致. 类似地, 设计的其他 2-bit 编码超表面编码序列“0000-0101-1010-1111”沿 x 方向周期性排布, 沿 y 方向排列, 每个“00” “01” “10” “11” 单元格都是由 6×6 个编码粒子组成, 周期 $\Gamma = 3120 \mu\text{m}$, 其超表面单元排布如图 7(a), (b) 所示. 在 0.48 THz 处, 当左圆极化太赫兹波垂直入射到编码超表面, 太赫兹反射波束发生了偏转. 编码超表面在反射模式下太赫兹波散射主瓣的三维远场图和对应的归一化反射幅度曲线图如图 7(c), (d) 所示, 可以看出相对于 z 轴正方向出现了 12° 偏转, 理论计算的 $\theta = 11.56^\circ$, 这与图 7(c), (d) 所示的模拟结果非常一致. 结果表明, 可以通过改变编码周期来设计超表面使其反射波束偏转到指定的角度.

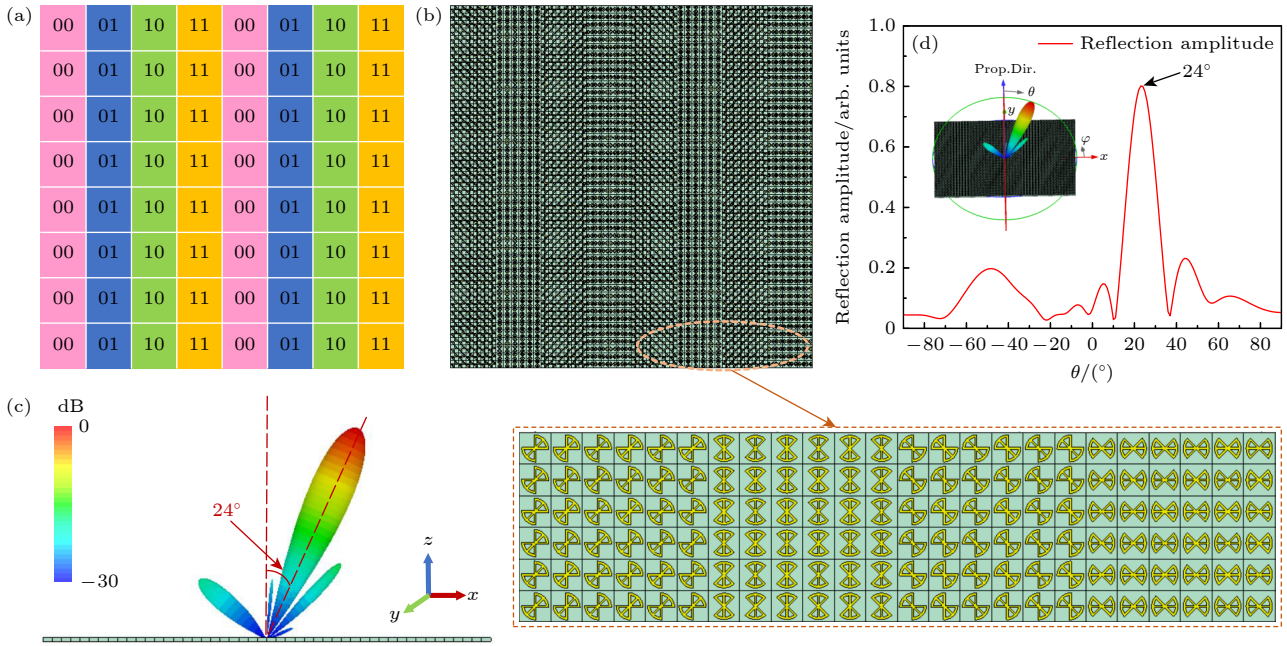


图 6 2-bit 反射编码超表面 (“00-01-10-11...”) (a) 超表面排布示意图; (b) 超表面结构; (c) 三维远场散射图; (d) 归一化反射振幅图
 Fig. 6. 2-bit reflected coding metasurface (“00-01-10-11...”): (a) Layout diagram of coding metasurface; (b) metasurface structure; (c) three-dimensional far field scattering diagram; (d) normalized reflection amplitude diagram.

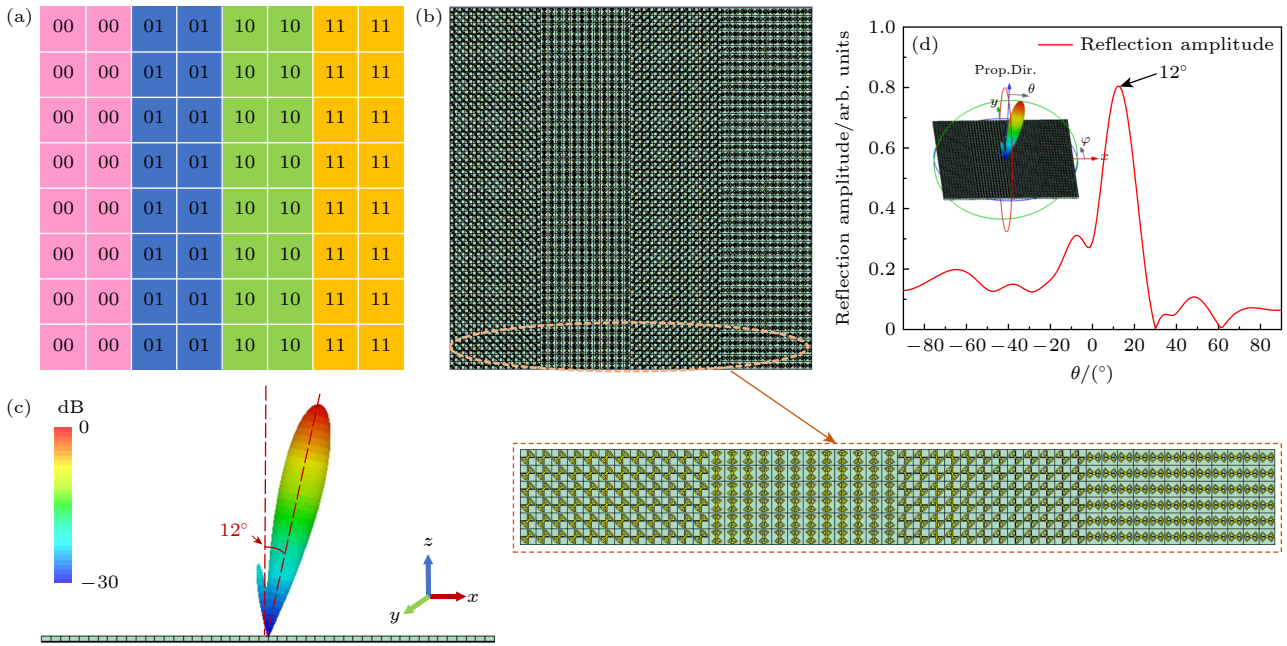


图 7 2-bit 反射编码超表面 (“0000-0101-1010-1111”) (a) 超表面排布示意图; (b) 超表面结构; (c) 三维远场散射图; (d) 归一化反射振幅图
 Fig. 7. 2-bit reflection encoding metasurface (“0000-0101-1010-1111”): (a) Layout diagram of coding metasurface; (b) metasurface structure; (c) three-dimensional far field scattering diagram; (d) normalized reflection amplitude diagram.

3.3 超表面成像

当线极化太赫兹波入射到超表面单元时, 反射幅度和反射相位的曲线如图 8(a), (b) 所示. 线极化波入射到超表面单元时, 两个不同超表面单元的反射幅度差异较大, 利用偏振反射幅度差异化特性

可以实现近场成像效应. 编码超表面设计为具有两个灰度级 (即亮和暗) 对应于“1”和“0”的编码单元, 利用振幅编码显示超表面. 幅度高的编码为“1”, 幅度低的编码为“0”, 其编码单元结构如图 8(a) 所示.

设计“CJLU”图案由两种不同类型的超表面单元结构分别排布在字母方框内外两块区域, 字母部分选择用幅度编码为“1”的单元排布, 字母以外的其余部分用幅度编码为“0”的单元排布, 编码超

表面由 32×32 个单元组成, 如图 9(a)—(d) 所示, 超表面设置的“CJLU”编码图案的轮廓在电场中明显显示出来. 红色部分对应高幅度的编码单元, 蓝色部分对应低幅度的编码单元. 在观测频率为

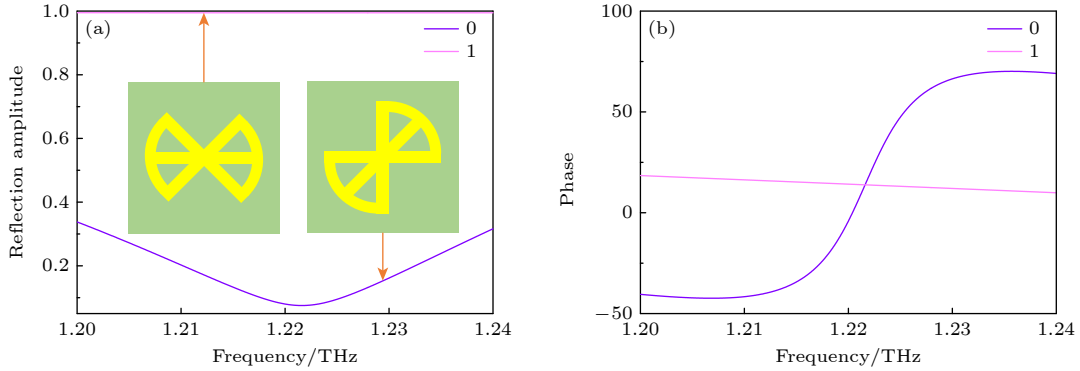


图 8 线极化波入射时超表面单元产生的反射幅度和反射相位 (a) 反射幅度; (b) 反射相位

Fig. 8. Reflected amplitude and phase of the unit cell under linearly polarized wave incidence: (a) Reflection amplitude; (b) reflection phase.

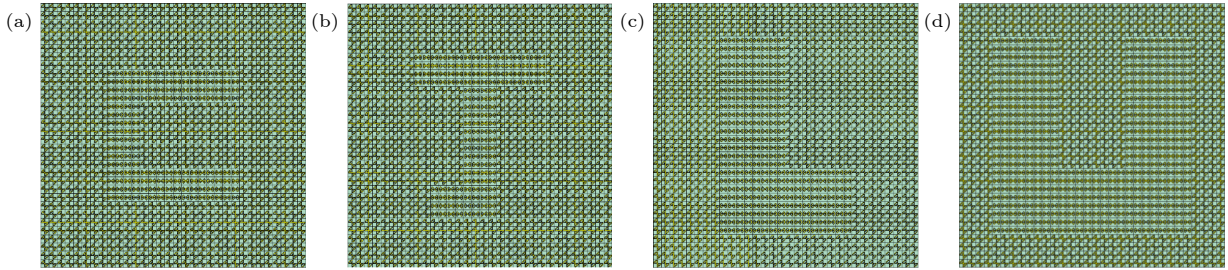


图 9 “CJLU”超表面排布示意图

Fig. 9. Layout diagram of "CJLU" metasurface.

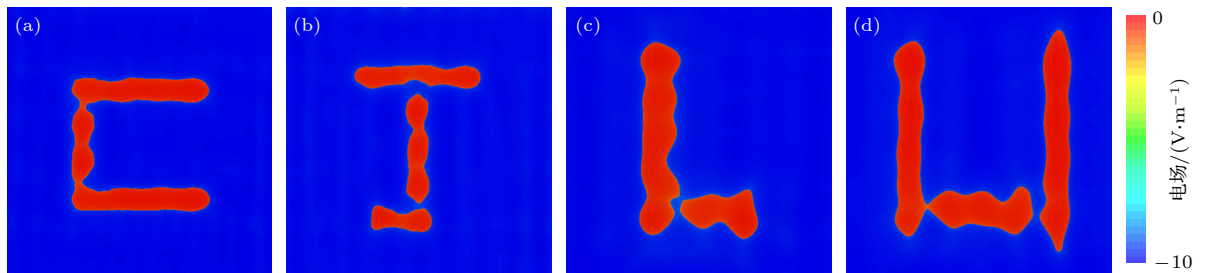


图 10 观测频率 1.22 THz 处, 观测平面距离为 $60 \mu\text{m}$ 的近场图像

Fig. 10. Near field image on an observation plane of $60 \mu\text{m}$ distance at 1.22 THz.

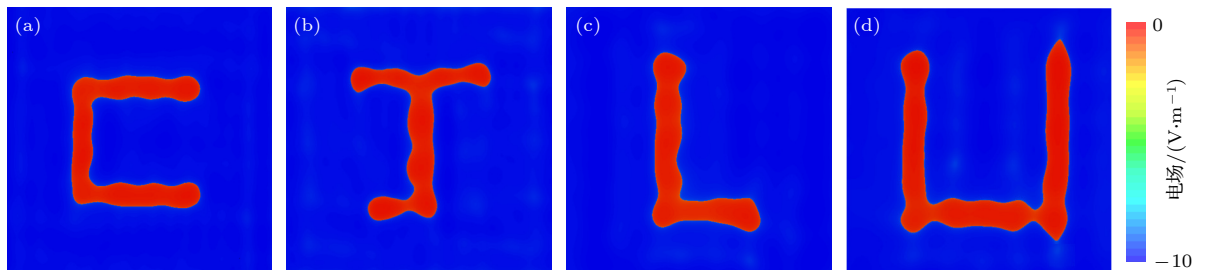
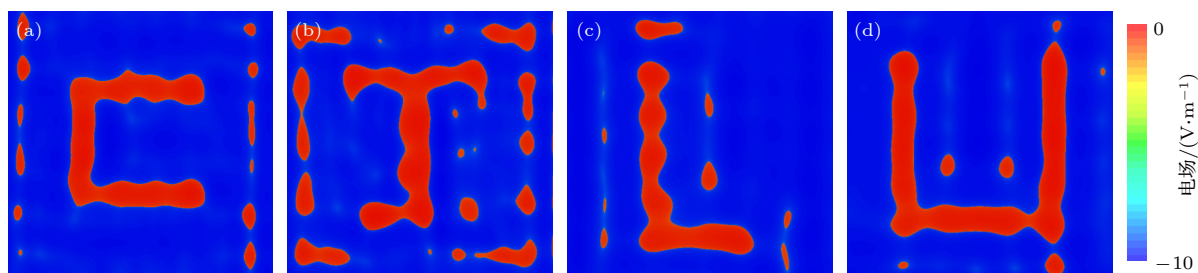


图 11 观测频率 1.22 THz 处, 观测平面距离为 $80 \mu\text{m}$ 的近场图像

Fig. 11. Near field image on an observation plane of $80 \mu\text{m}$ distance at 1.22 THz.

图 12 观测频率 1.22 THz 处, 观测平面距离为 100 μm 的近场图像Fig. 12. Near field image on an observation plane of 100 μm distance at 1.22 THz.

1.22 THz 时, 观测平面距离编码超表面 60, 80 和 100 μm 的近场图像显示分别如图 10—图 12 所示. 编码图案的近场图像显示随着编码图案单元的增加而增大, “CJLU” 编码图案轮廓边缘存在些许的不规则, 是由于两个编码单元幅度差异分布不均匀引起的电场能量分布不均匀, 观测距离为 80 μm 时可得到最佳的近场图像. 总体而言, 仿真得到的成像效果与预设图像大小、位置、轮廓方面的模拟结果较符合, 验证了利用偏振反射幅度差异化特性可以实现近场成像效应.

4 结 论

本文结合几何相位和幅度两种参量的变化, 提出了一种太赫兹多波束调控反射编码超表面, 在圆偏振入射太赫兹光波作用下, 所设计的超表面结构在 0.48—0.68 THz 频段内可以实现太赫兹波束分裂和反射模式下波束偏转, 利用卷积运算可以对圆偏振入射太赫兹光波产生反射多波束调控. 在线偏振态太赫兹光波入射下, 所设计的幅度编码超表面可以在 1.22 THz 处实现成像功能. 研究表明, 所设计的超表面对太赫兹波偏振和相位操控自由度提供了一种新思路, 为实现太赫兹波前的动态操作开辟了一条新途径, 在太赫兹系统具有广阔的应用潜力.

参考文献

- [1] Zhang C, Deng L, Wang L, Chen X, Li S 2021 *Appl. Sci.* **11** 7128
- [2] Huang J, Yin X, Xu M, Liu M, Zhang Y, Zhang H 2022 *Res. Phys.* **33** 105204
- [3] Sun X, Xu M, Wang G, Song Q, Li Y, Gao X 2022 *Appl. Opt.* **61** 34
- [4] Xu Z, Sheng H, Wang Q, Zhou L, Shen Y 2021 *SN Appl. Sci.* **3** 1
- [5] Dash S, Liaskos C, Akyildiz IF, Pitsillides A 2020 *Mater. Sci.*

- Forum* **1009** 63
- [6] Wang L, Lan F, Zeng H, et al. 2021 *IEEE*. **1** 93
- [7] Gong Y, Quan B, Hu F, Wang H, Zhang L, Jiang M 2022 *E Low dimens. Syst. Nanostruct.* **143** 115334
- [8] Niu J, Li C, Mo W, Yao Q, Zhu A 2022 *J. Phys. D-Appl. Phys.* **55** 395105
- [9] Cui T J, Qi M Q, Wan X, Zhao J, Cheng Q 2014 *Light Sci. Appl.* **3** 218
- [10] Li Z, Wang W, Deng S, Qu J, Li Y, Lü B 2022 *Opt. Lett.* **47** 441
- [11] Yang D, Wang W, Lü E, Wang H, Liu B, Hou Y 2022 *Isience* **25** 104824
- [12] He C, Song Z 2022 *Opt. Express* **30** 25498
- [13] Liu C X, Yang F, Fu X J, Wu J W, Zhang L, Yang J 2021 *Adv. Opt. Mater.* **9** 2100932
- [14] Pan W M, Li J S 2021 *Opt. Express* **29** 12918
- [15] Zhao D, Tan Z, Zhao H, Fan F, Chang S 2022 *Opt. Lett.* **47** 818
- [16] Zheng S, Li C, Fang G 2021 *Opt. Express* **29** 43403
- [17] Wang T, Chen B, Wu J, Yang S, Shen Z, Cai J 2021 *Appl. Phys. Lett.* **118** 081101
- [18] Li W, Hu X, Wu J, Fan K, Chen B, Zhang C 2022 *Light Sci. Appl.* **11** 1
- [19] Lin Q W, Wong H, Huitema L, Crumteanu A 2022 *Adv. Opt. Mater.* **10** 2101699
- [20] Ren B, Feng Y, Tang S, Wu J L, Liu B, Song J 2022 *Opt. Express* **30** 16229
- [21] Ren B, Feng Y, Tang S, Wang L, Jiang H, Jiang Y 2021 *Opt. Express* **29** 17258
- [22] Li J, Cheng Y, Fan J, Chen F, Luo H, Li X 2022 *Phys. Lett.* **428** 127932
- [23] Wei J, Qi Y, Zhang B, Ding J, Liu W, Wang X 2022 *Opt. Commun.* **502** 127425
- [24] Zang X, Yao B, Chen L, Xie J, Guo X 2021 *Light: Adv. Manuf.* **2** 148
- [25] Liu S, Ouyang C, Yao Z, Zhao J, Li Y, Feng L 2022 *Opt. Express* **30** 28158
- [26] Qi Y, Zhang B, Ding J, Zhang T, Wang X, Yi Z 2021 *Chin. Phys. B.* **30** 024211
- [27] He J, Chen R, Li Y, Chen S, Liu Z, Zhang Q 2021 *Appl. Opt.* **60** 5752
- [28] Zhong M, Li J S 2022 *Opt. Commun.* **511** 127997
- [29] Kou W, Shi W, Zhang Y, Yang Z, Chen T, Gu J 2021 *IEEE*. **12** 13
- [30] Chen D C, Zhu X F, Wei Q, Yao J, Wu D J 2020 *J. Phys. D Appl. Phys.* **53** 255501
- [31] Saifullah Y, Yang G, Feng X U 2021 *J. Radars* **10** 382
- [32] Li S, Li Z, Han B, Huang G, Liu X, Yang H 2022 *Front Mater* **9** 854062

Terahertz multibeam modulation reflection-coded metasurface*

Huang Ruo-Tong Li Jiu-Sheng[†]*(Center for THz Research, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)**(Received 14 October 2022; revised manuscript received 17 December 2022)*

Abstract

Most of reported coding metasurfaces only use phase encoding or amplitude encoding to regulate electromagnetic waves, which limits the flexibility of terahertz wave regulation. In this work, a metasurface element structure is proposed. The metasurface element is composed of three layers, i.e. metal pattern structure layer, intermediate medium layer, and metal base layer. According to the geometric phase principle, the phase coverage in the 2π range can be achieved by rotating the metal pattern structure layer under the incidence of the circular-polarized terahertz wave. The metasurface element structure is arranged reasonably by using the phase coding, and the 1-bit and 2-bit phase coding metasurface are designed. First of all, the coding metasurface with interlacing “0” and “1” is designed to generate a double beam reflection under the vertical incidence of circular polarized terahertz waves, while the two-dimensional checkerboard coding metasurface with “0” and “1” generates a symmetrical four-beam reflection. In addition, the metasurface is designed to deflect the reflected beam, and the coding period is changed to design the metasurface to deflect the reflected beam to the specified angle, showing good flexibility. Finally, the convolutional operation is introduced to flexibly regulate the circular polarized beam, and the functions of beam splitting and reflection beam deflection are obtained. The amplitude coded metasurface is designed under the incidence of the online polarized terahertz wave, and the near-field imaging effect can be realized by the amplitude differentiation of polarization reflection. The designed amplitude coded metasurface realizes the function of imaging in space, presenting the designed “CJLU” pattern, which has different imaging effects at different observation locations. When the observation plane distance is $80\ \mu\text{m}$ at the observation frequency of 1.22 THz, the near-field imaging effect is best. In conclusion, we propose a terahertz multibeam modulation reflection-coded metasurface, which combines geometric phase and amplitude variation to achieve different terahertz wave modulation functions under different polarization incident terahertz waves. The results from the simulated near-field radiation model and the far-field radiation model are both in agreement with the theoretical calculation predictions. The designed metasurface provides a degree of freedom method for terahertz wave polarization and phase manipulation, which greatly improves the efficiency of terahertz wave manipulation and has potential applications in terahertz systems.

Keywords: terahertz, terahertz beam splitting, beam deflection, terahertz imaging

PACS: 42.30.-d, 78.20.Ci, 78.67.Pt

DOI: [10.7498/aps.72.20221962](https://doi.org/10.7498/aps.72.20221962)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61871355, 61831012), the Talent Project of Zhejiang Provincial Department of Science and Technology, China (Grant No. 2018R52043), and the Zhejiang Key R & D Project of China (Grant Nos. 2021C03153, 2022C03166).

[†] Corresponding author. E-mail: lijsh2008@126.com



太赫兹多波束调控反射编码超表面

黄若彤 李九生

Terahertz multibeam modulation reflection-coded metasurface

Huang Ruo-Tong Li Jiu-Sheng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 054203 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20221962

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221962>

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>

基于石墨烯编码超构材料的太赫兹波束多功能动态调控

Dynamic multifunctional control of terahertz beam based on graphene coding metamaterial

物理学报. 2018, 67(11): 118102 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180125>

基于VO₂的波束可调太赫兹天线

Beam steerable terahertz antenna based on VO₂

物理学报. 2022, 71(18): 188703 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220817>

基于Rydberg原子天线的太赫兹测量

Terahertz measurement based on Rydberg atomic antenna

物理学报. 2021, 70(6): 060702 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201870>

应用太赫兹焦平面成像方法研究氧化镁晶体在太赫兹波段的双折射特性

Birefringence characteristics of magnesium oxide crystal in terahertz frequency region by using terahertz focal plane imaging

物理学报. 2020, 69(20): 208702 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200766>

基于二氧化钒的太赫兹编码超表面

Terahertz coding metasurface based vanadium dioxide

物理学报. 2020, 69(22): 228101 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200891>