

复合相位调控的波束转向可控反射型超表面*

魏涛¹⁾²⁾ 张玉洁¹⁾ 葛宏义^{1)†} 蒋玉英³⁾ 吴旭阳¹⁾
孙振雨¹⁾ 季晓迪¹⁾ 补雨薇¹⁾ 贾柯柯¹⁾

1) (河南工业大学信息科学与工程学院, 郑州 450001)

2) (河南工程学院软件学院, 郑州 451191)

3) (河南工业大学人工智能与大数据学院, 郑州 450001)

(2024年5月29日收到; 2024年10月1日收到修改稿)

基于 Pancharatnam-Berry 相位原理和相变材料 VO₂ 的复合相位调控机制, 设计了一种波束转向可控的反射型超表面. 基于 Pancharatnam-Berry 相位原理对超表面单元顶层结构进行旋转编码, 获得所需的相位梯度, 而超表面 VO₂ 层绝缘态-金属态的转换, 可使预设超表面的相位梯度改变, 进而改变反射波束的转向. 仿真测试结果表明: 当 VO₂ 处于绝缘态时, 在 1.1—2.0 THz 工作频段内, 超表面可使垂直入射的圆极化波以特定的角度出射, 其反射效率大于 80%; 当 VO₂ 处于金属态时, 对于同一超表面的相同工作频段, 超表面将入射的太赫兹波镜面反射, 反射效率接近 100%. 这一设计对未来太赫兹反射波束调控领域具有潜在的应用价值.

关键词: 太赫兹, 编码超表面, 波束调控

PACS: 42.79.-e, 42.82.-m

DOI: 10.7498/aps.73.20240764

CSTR: 32037.14.aps.73.20240764

1 引言

超材料是由周期性或准周期性排列的亚波长大小的基本单位细胞组成的人工材料, 由于具有优异的电磁波操纵能力而引起了相关研究人员的极大兴趣^[1]. 超材料可以通过波前整形^[2]、极化转换^[3]、相位调控^[4]、幅度调控^[5]等方式对电磁波进行自由操纵, 并产生了生物传感器^[6]、雷达隐身^[7]等诸多应用. 超表面作为超材料的二维对应体, 由于其低损耗、易于制造以及多用途等优点, 成为现代电磁调控领域的研究热点^[8]. 2014年, “编码超表面”概念提出使超表面从模拟时代进入数字时

代, 实现了电磁波的高效调控^[9].

太赫兹波由于其独特的频谱特性已经在室内通信^[10]、光谱成像^[11]、医疗诊断^[12]等多个领域展现出优异的应用潜力. 如何灵活有效地控制太赫兹波的振幅、相位、传播方式等特性实现多种波束调控功能被广泛关注^[13-19]. Fan 和 Cheng^[20]通过调整单元结构的几何参数得到不同相位, 并对得到的结构进行编码排列模拟实现了太赫兹波段的多种波束形态控制. 与改变单元结构的几何参数来调相的传统方法相比, 几何相位 (PB) 超表面可以通过旋转超表面单元结构顶层图案构造无色散相位梯度. 该方法不仅具有宽带特性, 而且避免了传统方法中复杂和繁琐的几何参数调整过程, 可有效提高设计和制造效率. 然而一旦设计完成, PB 超表面

* 国家自然科学基金 (批准号: 62271191, 61975053)、河南省自然科学基金 (批准号: 222300420040)、河南工业大学创新基金 (批准号: 2021ZKCJ04)、河南省重点科技计划 (批准号: 222102110246, 222103810072) 和河南省高校科技创新人才支持计划 (批准号: 23HASTIT024, 22HASTIT017) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: gehongyi2004@163.com

的功能将固定无法动态调制, 这将限制 PB 超表面的可重用性, 造成资源浪费. 近年来, 基于相变材料的超表面被提出, 如 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ (GST)^[21]、二氧化钒 (VO_2)^[22,23]、液晶^[24] 和石墨烯^[25] 等. 相变材料对环境非常敏感, 在外界条件的刺激下会改变其晶格态, 具有快速相变切换和相保持能力特性, 在 PB 超表面单元设计中加入相变材料实现 PB 超表面的可调性, 增强超表面的功能性和灵活性, 能够适应多样化的应用场景和需求.

本文提出的波束转向可控反射型超表面, 结合几何相位和相变材料 VO_2 两种相位调控手段, 在 1.1—2.0 THz 较宽频段内, 超表面可异常偏转垂直入射的圆极化 (circularly polarized, CP) 波, 且反射效率始终高于 80%, 通过控制 VO_2 绝缘态-金属态的转变, 可重构超表面的相位梯度, 实现偏转功能的开-关. 所设计的复合相位调控超表面可为太赫兹波束调控提供新的思路和方法.

2 超表面单元设计与分析

2.1 理论分析

当超表面单元结构关于 X, Y 方向镜面对称时, 各向异性反射型超表面单元的反射系数可以通过以线极化为基底的琼斯矩阵表示^[26]

$$R = \begin{bmatrix} |r_{xx}| e^{j\phi_{xx}} & 0 \\ 0 & |r_{yy}| e^{j\phi_{yy}} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中 $|r_{xx}|$ ($|r_{yy}|$)/ ϕ_{xx} (ϕ_{yy}) 分别为 x 和 y 极化波入射下同极化反射系数的幅值和相位响应, 单元结构旋转角度 α , 反射矩阵可以表示为

$$R_\alpha^{XY} = \begin{bmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha \\ \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix}^{-1} R \begin{bmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha \\ \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix}. \quad (2)$$

当圆极化波入射到超表面单元时, 反射矩阵可以表示为

$$R_\alpha^{\text{LR}} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -j \\ 1 & j \end{bmatrix} R_\alpha^{XY} \begin{bmatrix} 1 & -j \\ 1 & j \end{bmatrix}^{-1} \quad (3)$$

此时, 获得圆极化波入射到超表面单元上的反射系数为

$$r_{\text{LL}} = \frac{1}{2} [(|r_{xx}| e^{j\phi_{xx}} - |r_{xx}| e^{j\phi_{yy}})] e^{-j2\alpha},$$

$$r_{\text{RR}} = \frac{1}{2} [(|r_{xx}| e^{j\phi_{xx}} + |r_{xx}| e^{j\phi_{yy}})] e^{j2\alpha},$$

$$r_{\text{RL}} = \frac{1}{2} [(|r_{xx}| e^{j\phi_{xx}} + |r_{yy}| e^{j\phi_{xx}})],$$

$$r_{\text{LR}} = \frac{1}{2} [(|r_{xx}| e^{j\phi_{xx}} - |r_{yy}| e^{j\phi_{xx}})], \quad (4)$$

式中, r_{LL} 和 r_{RR} 分别表示 LCP 波和 RCP 波垂直入射到超表面单元上的同极化反射系数, r_{RL} 和 r_{LR} 分别表示 LCP 波和 RCP 波垂直入射到超表面单元上的交叉极化反射系数. 从 (4) 式可以看出, 要实现最理想的反射性能, 单元需满足 $|r_{xx}| \approx |r_{yy}| \approx 1$, (4) 式可化简为

$$r_{\text{LL}} = \sin\left(\frac{\phi_{xx} - \phi_{yy}}{2}\right) e^{j\frac{\phi_{xx} - \phi_{yy} - \pi}{2}} e^{-j2\alpha},$$

$$r_{\text{RR}} = \sin\left(\frac{\phi_{xx} - \phi_{yy}}{2}\right) e^{j\frac{\phi_{xx} - \phi_{yy} - \pi}{2}} e^{j2\alpha},$$

$$r_{\text{RL}} = \cos\left(\frac{\phi_{xx} - \phi_{yy}}{2}\right) e^{j\frac{\phi_{xx} + \phi_{yy}}{2}},$$

$$r_{\text{LR}} = \cos\left(\frac{\phi_{xx} - \phi_{yy}}{2}\right) e^{j\frac{\phi_{xx} + \phi_{yy}}{2}}. \quad (5)$$

由 (5) 式可以看出, 单元的同极化相位响应由 x, y 线极化波的相位响应和旋转角度 α 同时控制, 交叉极化的相位响应仅由 x, y 线极化波的相位响应控制. 基于以上理论分析为满足单元的同极化相位响应仅由旋转角度 α 单独控制, 单元设计需要满足 3 个条件: 1) 超表面单元结构关于 X, Y 方向镜面对称; 2) $|r_{xx}| \approx |r_{yy}| \approx 1$; 3) $\phi_{xx} - \phi_{yy} = \pi$.

2.2 单元结构设计

本文拟利用 PB 相位原理和 VO_2 相变材料的复合相位调控机制, 在宽频段范围内实现太赫兹波束转向的控制. 基于上文理论分析, 本文设计的镜面对称单元结构如图 1 所示. 超表面单元的顶层和底层金属由 Cu 组成, 介质层一和介质层二材料相同, 为聚四氟乙烯 (PTFE), 其相对介电常数为 $\epsilon_r = 2.1 + 0.0002i$, 介质层一和介质层二的中间夹层材料为 VO_2 , α 为逆时针旋转角度. 表 1 列出了设计的超表面单元的主要参数.

设计的超表面单元中加入 VO_2 , 在太赫兹频率范围内, VO_2 的介电常数可以使用 Drude 模型表示^[27]:

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_\infty - \frac{\sigma_{\text{VO}_2} \omega_p^2(\sigma_0)}{\sigma_0(\omega^2 + i\gamma\omega)}, \quad (6)$$

其中 $\gamma = 2.75 \times 10^{13}$ rad/s, $\sigma_0 = 3 \times 10^5$ S/m, $\epsilon_\infty = 12$, $\omega_p(\sigma_0) = 1.4 \times 10^{13}$ rad/s. 常温时, VO_2 处于绝

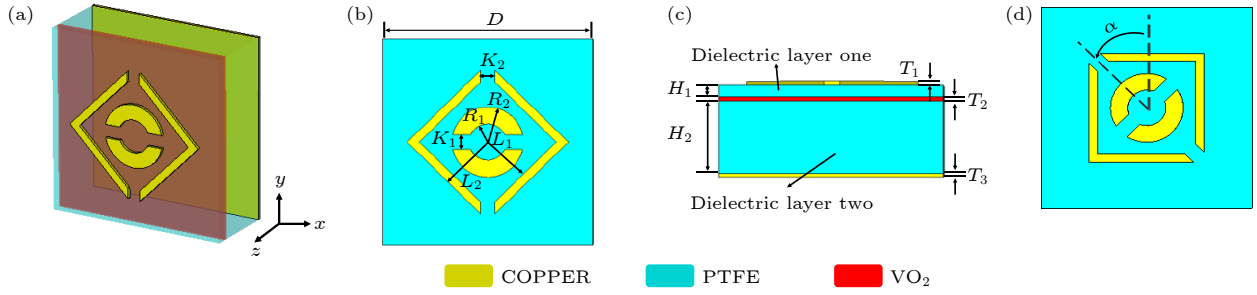


图 1 超表面单元 (a) 三维示意图; (b) 俯视图; (c) 正视图; (d) 旋转结构

Fig. 1. Metasurface units: (a) 3D schematic diagram; (b) top view; (c) front view; (d) rotating structure.

表 1 超表面单元的主要参数

Table 1. Main parameters of metasurface units.

Parameter	D	R_1	R_2	L_1	L_2	K_1	K_2	T_1	T_2	T_3	H_1	H_2
Value/ μm	110	10	19	60	51	8	8	0.2	0.3	0.2	3	26

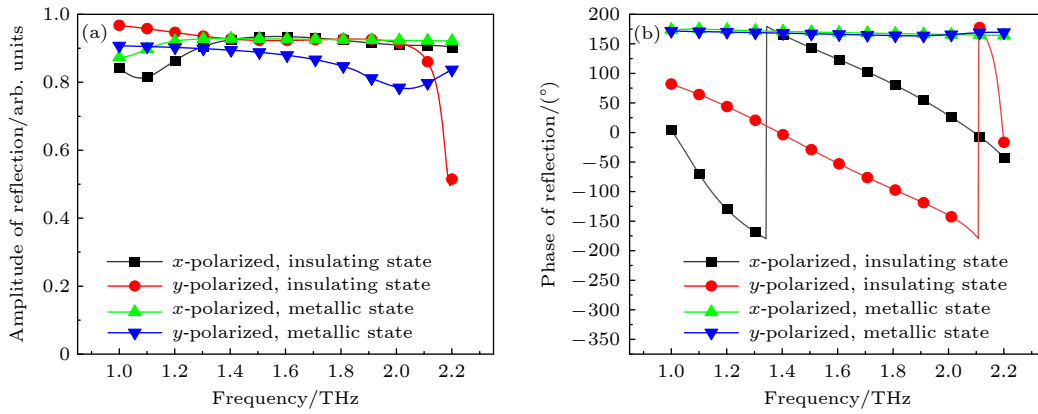

 图 2 x 极化波和 y 极化波垂直入射时, 超表面单元的同极化反射幅度 (a) 和相位 (b)

 Fig. 2. The co-polarized reflection amplitude (a) and phase (b) of the metasurface unit when x -polarized and y -polarized waves are vertically incident.

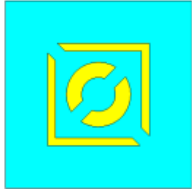

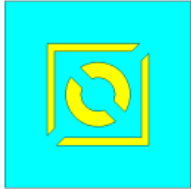

缘态, 电导率 $\sigma_{\text{VO}_2} = 200 \text{ S/m}$. 当温度超过 $68 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, VO_2 转化为金属态, 电导率 $\sigma_{\text{VO}_2} = 2 \times 10^5 \text{ S/m}$ ^[28].

当 VO_2 为绝缘态时, 结构单元的顶层贴片结构使 x 极化波和 y 极化波产生不同的相位响应, 可实现独立相位调控. 为了拓展超表面单元的工作带宽, 采用 CST 优化器和参数扫描工具进行优化. 首先, 设置优化目标为 $\varphi_{xx} - \varphi_{yy} = \pi$ 和 $|r_{xx}| \approx |r_{yy}| > 0.8$, 利用优化器获得一组结构参数. 随后在该组参数附近利用参数扫描功能, 选取了相位差约为 180° 的最宽范围, 确定了最终的参数设置, 如表 1 所示, 此时单元的同极化反射幅度和相位如图 2 所示, 单元的工作频带范围为 $1.1\text{--}2.0 \text{ THz}$. 当 VO_2 处于绝缘态时, 对于垂直入射的 x 极化波和 y 极化波, 设计的镜面对称单元结构在 $1.1\text{--}2.0 \text{ THz}$ 的频率范围内反射幅度大于 0.9 且相位差始终接近 180° , 满足 PB 相位原理. 因此超表面单

元的顶层结构旋转一定角度 α 时, 将产生相应的相移 $\pm 2\alpha$. 调整旋转角度得相邻相位差为 90° 超表面单元, 对应的旋转角度和俯视图见表 2.

对得到的超表面单元进行仿真分析, 左旋圆极化 (left-circularly polarized, LCP) 波垂直入射时, 不同旋转角下的编码超表面单元的反射幅度和相位如图 3 所示, 图 3(a) 说明在 $1.1\text{--}2.0 \text{ THz}$ 的频率范围内, 不同旋转角度的超表面单元反射幅度基本一致, 图 3(b) 说明当旋转角以 45° 为间隔从 0° 变化至 135° 时, 相邻的超表面单元之间的同极化反射相位差恒定 90° . 编码超表面单元对入射的 LCP 波和右旋圆极化 (right-circularly polarized, RCP) 波具有相似的特性, 本文仅分析 LCP 波入射的情况. 而当 VO_2 处于金属态时, 在 $1.1\text{--}2.0 \text{ THz}$ 的频率范围内, 相邻的单元结构的反射幅度大于 0.8 , 但相位基本一致无相位差, 不满足 PB 相位原理.

表 2 超表面单元
Table 2. Metasurface units.

α	45°	0°	135°	90°
俯视图				
2-bit	00	01	10	11

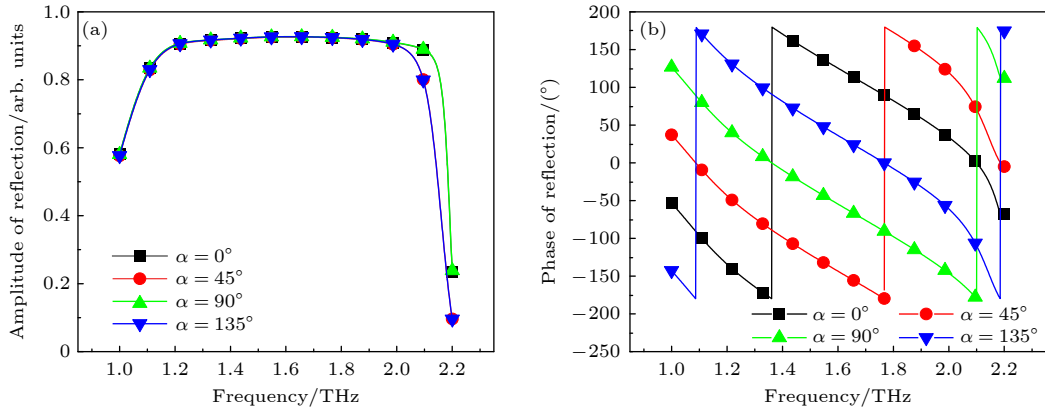

 图 3 VO_2 处于绝缘态, LCP 波垂直入射时, 不同旋转角 α 对应的超表面单元的同极化反射幅度 (a) 和相位 (b)

Fig. 3. VO_2 is in an insulating state, with different rotation angles when LCP waves are vertically incident α , the amplitude (a) and phase (b) of co-polarized reflection of corresponding metasurface units.

2.3 单元仿真及性能分析

若超表面单元顶层结构具有某个方向上的对称性, 就可以视为该方向上的偶极子^[29,30], 本文设计顶层镜面对称的超表面单元结构, 该结构沿着 x 轴和 y 轴均对称, 因此可以看作是这两个方向上的偶极子. 采用 CST 软件对设计的超表面单元结构进行仿真分析, 计算单元结构的电流分布等参数. 当 VO_2 为绝缘态时, 图 4(a)—(d) 绘制了 1.2 THz, 1.8 THz 正交极化波垂直入射下顶层金属图案和底板的电流分布, 当 VO_2 变为金属态时, 图 4(e)—(h) 显示了同样条件下的电流分布情况. 从图 4(a) 可以看出, 此时单元顶层金属图案和底板的电流方向存在反向平行关系, 产生磁偶极共振; 图 4(b) 中单元顶层外结构和单元底板的电流方向相同, 产生电偶极共振; 图 4(c), (d) 可以发现此时单元顶层结构和单元底板的电流方向均反向平行, 产生磁偶极共振. 单一的共振模式一般只在特定的频率范围内有效, 设计的结构在不同的频率处激发电偶极和磁偶极共振可以覆盖更宽的频率范围, 扩展整体的响应带宽^[31]. 因此, 当 VO_2 为绝缘态时, 设计的超

表面单元结构具有宽带宽特性. 图 4(e)—(h) 表明, 超表面单元顶层结构和底层的电流方向同样反向平行或相同, 形成偶极共振, 这说明 VO_2 的相变不影响单元结构的宽带宽特性.

为对超表面单元结构的反射和相位调控能力验证, 我们对该单元在 30° 内线极化波斜入射下的激励情况进行全波仿真. 仿真结果如图 5 所示, 图 5(a), (b) 说明, 当 VO_2 处于绝缘态时, 斜入射角度对单元结构的反射和相位调控能力有一定影响, 但当入射角 $\theta_i < 30^\circ$ 时, 该超表面单元在 1.2—1.6 THz 能够保持较为稳定的相位差且幅度基本一致. 当 VO_2 处于金属态时, 图 5(c), (d) 说明当入射角 $\theta_i < 30^\circ$ 时, 斜入射角度对单元结构的反射能力和相位调控能力基本无影响. 因此得出结论, 当入射角 $\theta_i < 30^\circ$, VO_2 处于绝缘态时, 设计的超表面单元满足 PB 相位原理, 超表面偏转功能可在 1.2—1.6 THz 范围内正常工作; 当 VO_2 处于金属态时, 超表面反射功能可在 1.1—2.0 THz 范围内正常工作. 仿真结果验证, 该超表面具有一定的角度稳定性.

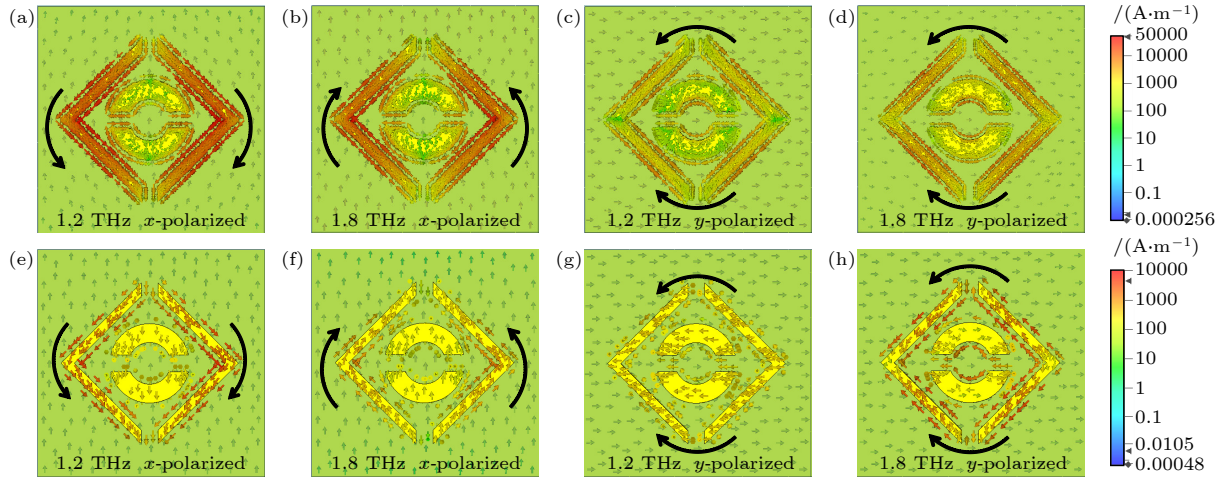

 图 4 表面电流分布 (a)–(d) VO₂ 处于绝缘态; (e)–(h) VO₂ 处于金属态

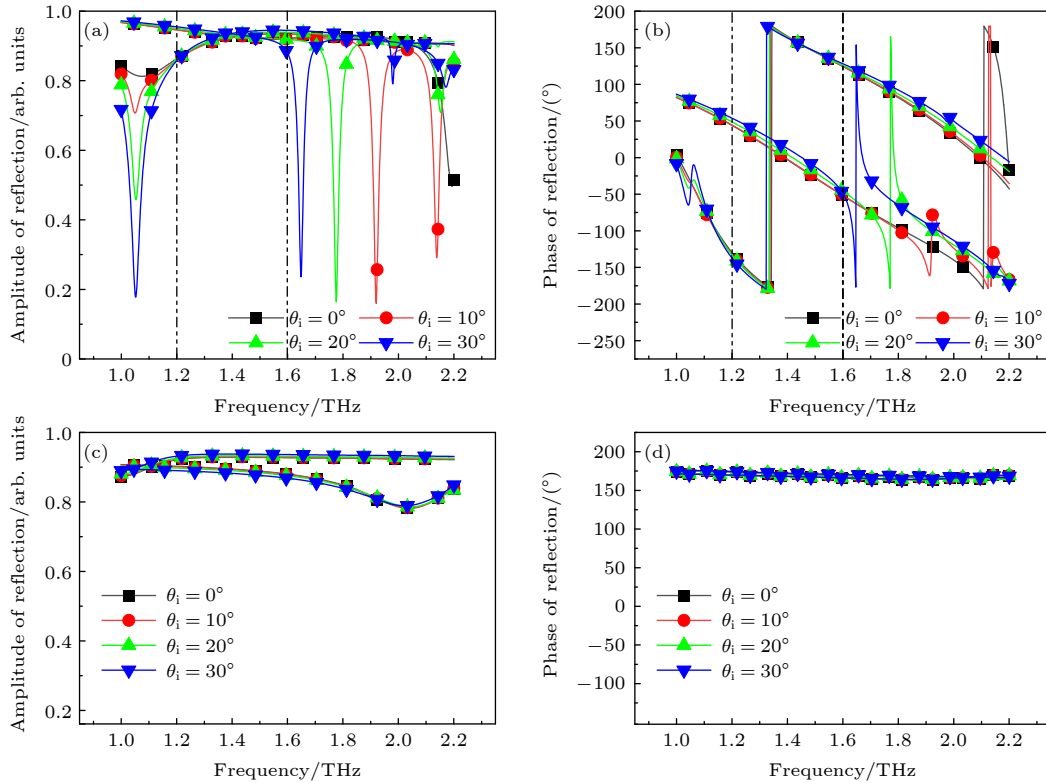
 Fig. 4. Surface current distribution: (a)–(d) VO₂ is in an insulating state; (e)–(h) VO₂ is in a metallic state.

 图 5 不同入射角度下, 线极化波激励下超表面单元的反射相位和幅度 (a), (b) VO₂ 处于绝缘态时, 不同入射角度下的幅度变化和相位变化; (c), (d) VO₂ 处于金属态时, 不同入射角度下的幅度变化和相位变化

 Fig. 5. Reflection phase and amplitude of metasurface elements under linearly polarized wave excitation at different incident angles: (a), (b) Amplitude variation and phase change of VO₂ at different incident angles when it is in an insulating state; (c), (d) amplitude variation and phase change of VO₂ at different incident angles when it is in a metallic state.

3 超表面设计及验证分析

3.1 波束调控理论

当平面波垂直入射编码超表面时, 其远场函数可用 (7) 式来表示^[9]:

$$f(\theta, \varphi) = f_e(\theta, \varphi) \sum_{m=1}^m \sum_{n=1}^n \exp\left\{-i\left[\varphi(\theta, \varphi) + KD \sin \theta \left[\left(m - \frac{1}{2}\right) \cos \varphi + \left(n - \frac{1}{2}\right) \sin \varphi\right]\right]\right\}, \quad (7)$$

式中 θ 和 φ 为俯仰角和方位角, K 为传播常数, D 为单元尺寸, $f_e(\theta, \varphi)$ 为单个单元的远场函数, $\varphi(m, n)$ 为第 (m, n) 个单元的相位.

方向图函数可用 (8) 式表示^[9]:

$$\text{Dir}(\theta, \varphi) = \frac{4\pi |f(\theta, \varphi)|^2}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} |f(\theta, \varphi)|^2 \sin \theta d\theta d\varphi}. \quad (8)$$

依据 (7) 式和 (8) 式可以设计具有固定相位差

的超表面单元从而实现多样化的太赫兹远场波束形式, 且随着 bit 数增大, 编码超表面调控太赫兹波的形式更加灵活.

费马定理表明光是沿着光程为极值 (极大、极小或常量) 的路径传播的, 可表示为^[32]

$$\begin{aligned} & [k_0 n_i \sin(\theta_i) dx + \varphi + d\varphi] \\ & - [k_0 n_t \sin(\theta_r) dx + \varphi] = 0, \end{aligned} \quad (9)$$

式中 θ_i 为入射角, θ_r 为反射角, n_i 和 n_t 分别为入射

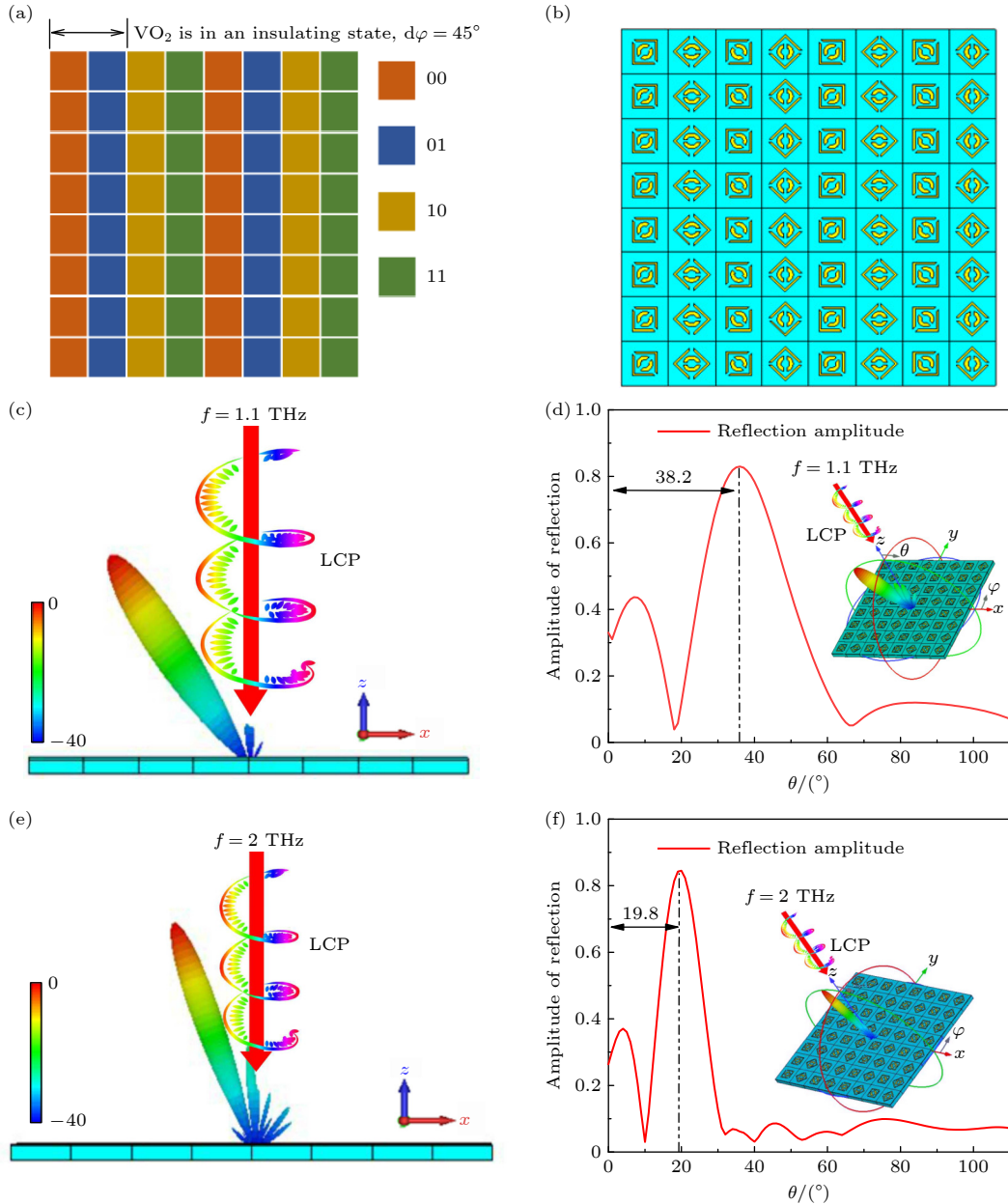


图 6 2-bit 反射编码超表面, LCP 波垂直入射 (a) 超表面排布示意图; (b) 超表面结构; (c) 1.1 THz 处的三维远场散射图; (d) 1.1 THz 处的归一化反射振幅图; (e) 2.0 THz 处的三维远场散射图; (f) 2.0 THz 处的归一化反射振幅图

Fig. 6. 2-bit reflection encoding metasurface, LCP wave vertically incident: (a) Schematic diagram of metasurface layout; (b) metasurface structure; (c) 3D far-field scattering map at 1.1 THz; (d) normalized reflection amplitude map at 1.1 THz; (e) 3D far-field scattering map at 2.0 THz; (f) normalized reflection amplitude map at 2.0 THz.

空间和出射空间介质的折射率, $d\varphi$ 和 dx 分别表示光路在分界面上相邻点的相位差和距离, 当分界面 x 轴方向上的相位变化率 $d\varphi/dx$ 固定时, 可推导出广义斯涅尔反射定律^[33]:

$$\sin(\theta_r) - \sin(\theta_i) = \frac{\lambda}{2\pi n_i} \frac{d\varphi}{dx}. \quad (10)$$

由 (10) 式可知, 通过不同的相位差 $d\varphi$ 或不同的编码序列周期 dx 获得不同的相位梯度, 可以任意控制反射波束的传播路径. 因此, 通过建立相位梯度超表面, 可利用广义斯涅耳反射定律获得反射波束偏转角为

$$\theta_r = \sin^{-1} \left[\frac{\lambda}{2\pi n_i} \frac{d\varphi}{dx} + \sin(\theta_i) \right]. \quad (11)$$

3.2 超表面仿真分析及验证

通过编码超表面控制太赫兹圆极化波的反射波束方向和角度可以应用于定向无线通信和雷达探测等领域. 对 2.2 节中获得超表面单元进行二维排布基于广义斯涅耳反射定律设计所需要的相位梯度 $d\varphi/dx$ 以控制反射波束的传播路径. 当 VO_2 处于绝缘态, 圆极化波垂直入射时, 设计超表面排布序列周期为“00-01-10-11.../00-01-10-11...”, 如图 6(a), (b) 所示, 此时相位差 $d\varphi = 45^\circ$, 编码序列周期 $dx = 440 \mu\text{m}$. 对于垂直入射的 LCP 波, 反射波束发生偏转, 在 1.1 THz 处其 3D 远场图如图 6(c) 所示. 图 6(d) 给出了 1.1 THz 处反射模式下的归一化幅度曲线, 可以看出偏转角 θ 约为 38° , 与理论计算值 $\theta_r = 38.3^\circ$ 一致. 在 2.0 THz 处其 3D 远场图如图 6(e) 所示, 图 6(f) 给出了 2.0 THz 处反射模式下的归一化幅度曲线, 偏转角约为 20° , 仿真与理论一致.

对于垂直入射的 RCP 波, 超表面反射波束的偏转角相同, 偏转方向相反, 图 7 给出了 xz 平面的归一化远场辐射图, 表明当 VO_2 处于绝缘态时, 随着入射太赫兹圆极化波频率从 1.1 THz 增至 2 THz, 超表面可将入射的太赫兹 CP 波从 $\pm 20^\circ$ 转向 $\pm 38.2^\circ$. 仿真结果验证, 当 VO_2 处于绝缘态, 太赫兹 CP 波垂直入射时, 设计的编码超表面在 1.1—2.0 THz 频率范围内可使太赫兹圆极化反射波束发生偏转, 偏转角可由 (11) 式计算得出.

为进一步分析所设计的超表面对非垂直入射电磁波的反射情况, 设置 LCP 波入射角 θ_i 分别为 $0^\circ, 5^\circ, -10^\circ, 15^\circ, -20^\circ, 25^\circ$ 和 -30° , 图 8 给出了

1.6 THz 处的归一化远场辐射图, 可以得到 1.6 THz 处其异常反射角分别为 $25^\circ, 30^\circ, 15^\circ, 42^\circ, 5^\circ, 54^\circ, -4^\circ$ 与理论计算结果 ($25.22^\circ, 30.88^\circ, 14.62^\circ, 43.23^\circ, 4.82^\circ, 58.07^\circ, -4.23^\circ$) 基本吻合, 这说明在 0° — 30° 的范围内, 设计的超表面的偏转功能可正常使用, 超表面有一定的角度稳定性, 与上文理论分析一致.

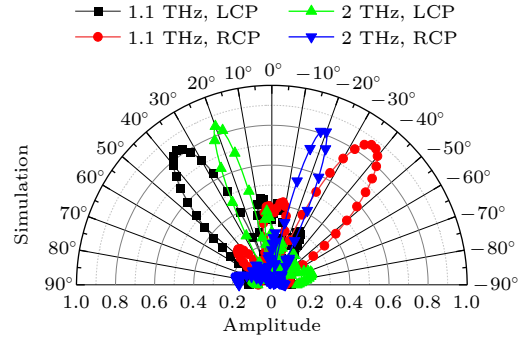


图 7 归一化远场辐射图

Fig. 7. Normalized far-field radiation pattern.

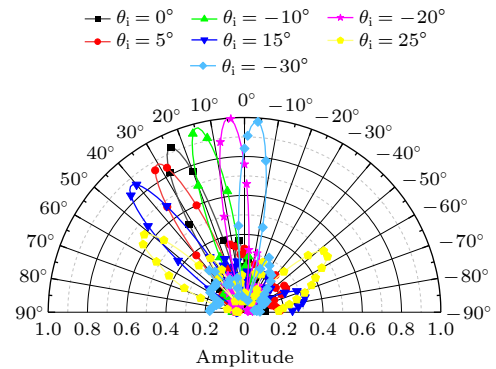


图 8 归一化远场辐射图, 1.6 THz 处不同入射角对应的反射角

Fig. 8. Normalized far-field radiation pattern, reflection angles corresponding to different incident angles at 1.6 THz.

当 VO_2 处于金属态时, 各单元的相位差 $d\varphi$ 变为 0° , 如图 9(a) 所示, 设计的超表面相位梯度发生改变, 4 个单元结构可视为无相位差的单元 0, 1, 2 和 3, 超表面功能模式由偏转切换为镜面反射. 图 9(b) 展示了超表面的反射功能, 当 CP 波垂直入射时其反射波束方向为 0° . 仿真结果验证, 太赫兹 CP 波垂直入射时, VO_2 绝缘-金属态的切换可使编码超表面在 1.1—2.0 THz 的频率范围由偏转功能 (偏转角 20° — 38.2°) 转为镜面反射功能 (偏转角 0°), 实现太赫兹圆极化反射波束方向的调控.

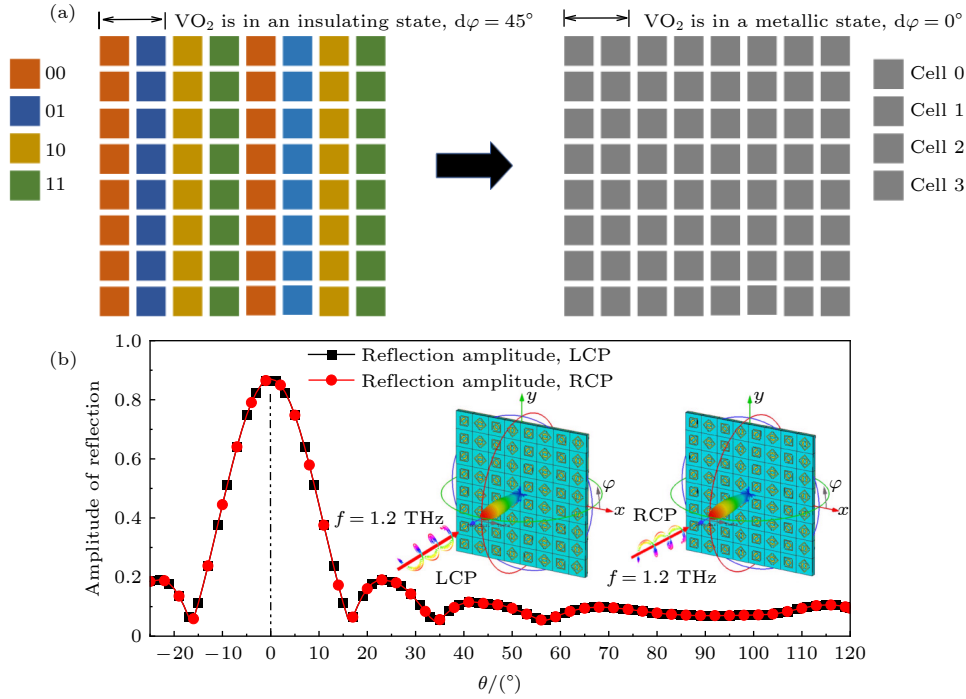


图9 反射超表面 (a) 超表面相位梯度改变示意图; (b) 三维远场散射图

Fig. 9. Reflective metasurface: (a) Schematic diagram of phase gradient change on metasurface; (b) 3D far-field scattering map.

4 结论

本文结合几何相位原理和相变材料 VO_2 两种相位调控手段, 提出了一种反射波束方向可控的反射型超表面, 有效实现太赫兹反射波束方向的调控. 基于几何相位原理旋转单元顶层结构并进行编码排序, 在工作频段内, 随着垂直入射的太赫兹 CP 波的频率的改变, 可实现 20° — 38° 的异常偏转. 通过控制 VO_2 绝缘态-金属态的转变, 该超表面可在 CP 波入射时实现异常偏转和镜面反射两种功能之间的切换. 仿真结果表明, 设计的超表面可实现波束转向控制, 为太赫兹反射波束调控领域提供了新的可能性, 将在太赫兹无线通信和雷达系统具有潜在的应用价值^[34,35].

参考文献

- [1] Zhang Q, Cherkasov A V, Arora N, Hu G, Rudykh S 2023 *Extreme Mech. Lett.* **59** 101957
- [2] Zeng J W, Luk T S, Gao J, Yang X D 2017 *J. Opt.* **19** 125103
- [3] Liu S, Cui T J, Xu Q, Bao D, Du L L, Wan X, Tang W X, Ouyang C M, Zhou X Y, Yuan H, Ma H F, Jiang W X, Han J G, Zhang W L, Cheng Q 2016 *Light-Sci. Appl.* **5** e16076
- [4] Zeng Y J, Feng C H, Li Q, Su X, Yu H B 2019 *IEEE Photonics J.* **11** 4601212
- [5] Wang B X, Qin X F, Duan G Y, Yang G F, Huang W Q, Huang Z M 2024 *Adv. Funct. Mater.* **34** 2402068
- [6] Zhou J, Zhao X, Huang G R, Yang X, Zhang Y, Zhan X Y, Tian H Y, Xiong Y, Wang Y X, Fu W L 2021 *ACS Sens.* **6** 1884
- [7] Shi M Y, Xu C, Yang Z H, Liang J, Wang L, Tan S J, Xu G Y 2018 *J. Alloy. Compd.* **764** 314
- [8] Wang H, Ling F, Zhang B 2020 *Opt. Express* **28** 36316
- [9] Cui T J, Qi M Q, Wan X, Zhao J, Cheng Q 2014 *Light-Sci. Appl.* **3** e218
- [10] Zhang Y G, Yin K H, Liang L J, Yao H Y, Yan X, Hu X F, Huang C C, Qiu F, Zhang R, Li Y P, Wang Y R, Li Z H, Wang Z Q 2024 *Curr. Appl. Phys.* **58** 21
- [11] Orlov S, Ivaskeviciute-Povilauskienė R, Mundrys K, Kizevicius P, Nacius E, Jokubauskis D, Ikamas K, Lisauskas A, Minkevicius L, Valusis G 2024 *Laser Photon. Rev.* **18** 2301197
- [12] Bai S S, Yang H Y 2022 *Chin. J. Integr. Med.* **28** 366
- [13] Imai R, Kanda N, Higuchi T, Zheng Z, Konishi K, Kuwata-Gonokami M 2012 *Opt. Express* **20** 21896
- [14] Fedotov V 2021 *Nat. Photonics* **15** 715
- [15] Liang H, Zeng H, Zhao H, Wang L, Liang S, Feng Z, Yang Z, Zhang Y 2024 *J. Phys. D-Appl. Phys.* **57** 085104
- [16] Zhao F, Xu J, Song Z 2022 *IEEE Photonics J.* **14** 1
- [17] Sun S, Ma H F, Gou Y, Zhang T Y, Wu L W, Cui T J 2023 *Adv. Opt. Mater.* **11** 2202275
- [18] Wang J L, Dong X C, Yin L, Yang Z X, Wan H D, Chen H M, Zhong K 2023 *Acta Phys. Sin.* **72** 098101 (in Chinese) [汪静丽, 董先超, 尹亮, 杨志雄, 万洪丹, 陈鹤鸣, 钟凯 2023 *物理学报* **72** 098101]
- [19] Wu L W, Ma H F, Gou Y, Wu R Y, Wang Z X, Xiao Q, Cui T J 2022 *Nanophotonics* **11** 2977
- [20] Fan J, Cheng Y 2019 *J. Phys. D-Appl. Phys.* **53** 025109
- [21] Ding Z P, Su W, Ye L P, Zhou Y H, Li W L, Zou J F, Tang B, Yao H B 2024 *Phys. Chem. Chem. Phys.* **26** 8460

- [22] Jiang H, Wang J Y, Zhao S L, Ye L H, Zhang H, Zhao W R 2023 *Opt. Commun.* **536** 129380
- [23] Zhao S L, Jiang H, Wang J Y, Zhu W C, Zhao W R 2023 *Photonics* **10** 893
- [24] Sharma M, Hendler N, Ellenbogen T 2020 *Adv. Opt. Mater.* **8** 1901182
- [25] Sorathiya V, Patel S K, Katrodiya D 2019 *Opt. Mater.* **91** 155
- [26] Menzel C, Rockstuhl C, Lederer F 2010 *Phys. Rev. A* **82** 053811
- [27] Zhao Y, Huang Q P, Cai H L, Lin X X, Lu Y L 2018 *Opt. Commun.* **426** 443
- [28] Driscoll T, Kim H T, Chae B G, Kim B J, Lee Y W, Jokerst N M, Palit S, Smith D R, Di Ventra M, Basov D N 2009 *Science* **325** 1518
- [29] Zheng Q, Zhang J, Li Y, Zheng L, Sui S, Qu S 2017 *International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium (ACES)* pp1-2
- [30] Yang S, Wang J Y, Zhang T, Yu X Y 2022 *Acta Opt. Sin.* **42** 233 (in Chinese) [杨森, 王佳云, 张婷, 于新颖 2022 *光学学报* **42** 233]
- [31] Li J S, Yao J Q 2018 *IEEE Photonics J.* **10** 1
- [32] Born M, Wolf E 2013 *Phys. Today* **53** 77
- [33] Yu N, Genevet P, Kats M A, Aieta F, Tettienne J P, Capasso F, Gaburro Z 2011 *Science* **334** 333
- [34] Ai H, Kang Q, Wang W, Guo K, Guo Z 2021 *Sensors* **21** 4784
- [35] Monnai Y, Lu X, Sengupta K 2023 *J. Infrared Millim. Terahertz Waves* **44** 169

Composite phase modulated beam steering controllable reflective metasurface*

Wei Tao¹⁾²⁾ Zhang Yu-Jie¹⁾ Ge Hong-Yi^{1)†} Jiang Yu-Ying³⁾
 Wu Xu-Yang¹⁾ Sun Zhen-Yu¹⁾ Ji Xiao-Di¹⁾ Bu Yu-Wei¹⁾ Jia Ke-Ke¹⁾

1) (College of Information Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

2) (School of Software, Henan University of Engineering, Zhengzhou 451191, China)

3) (School of Artificial Intelligence and Big Data, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

(Received 29 May 2024; revised manuscript received 1 October 2024)

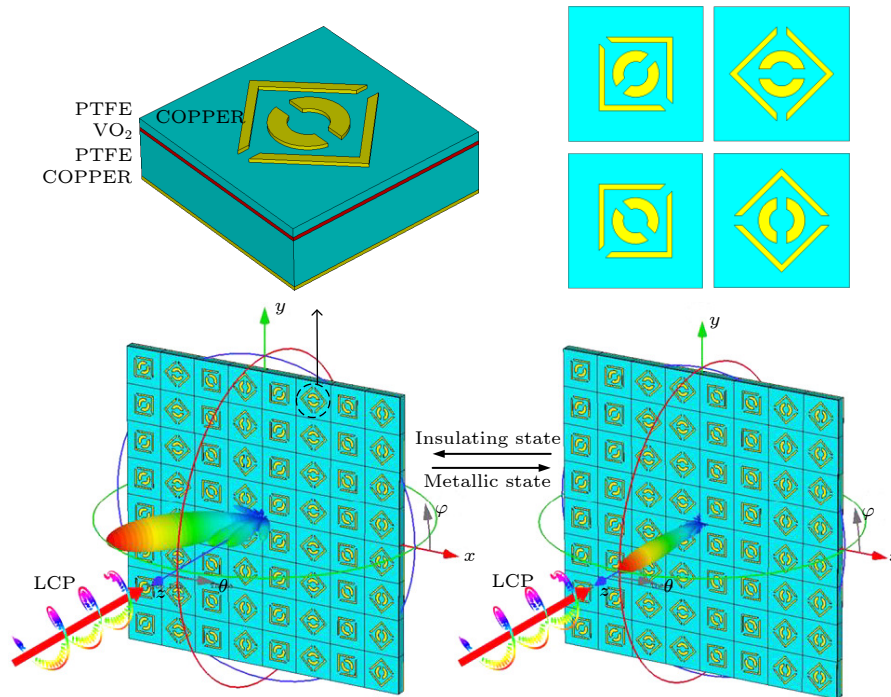
Abstract

Terahertz metasurface functional devices as an effective method to control terahertz waves have attracted extensive attention from researchers. In order to enhance the functionality and flexibility of the metasurface and adapt to diverse application scenarios and demands, a beam-steering controllable reflective metasurface is designed by combining the Pancharatnam-Berry phase principle and the phase change material vanadium dioxide in this work. The metasurface unit consists of five layers, they being the top layer that is a metal patterned layer, the third layer that is made of vanadium dioxide and located between the dielectric layers with different thickness, the dielectric layer that is made of polytetrafluoroethylene (PTFE), and the bottom layer that serves as a metal reflective layer. The metasurface units are rotated based on the Pancharatnam-Berry phase principle to obtain four metasurface units with fixed phase differences in between, after which the metasurface units are arranged in two dimensions based on the generalized Snell reflection law to obtain the desired phase-gradient deflected reflection beam. The insulating state-metallic state transition of the vanadium dioxide layer on the metasurface can change the phase gradient of the preset metasurface, thereby realizing the on/off function of deflection. The simulation results show that when the vanadium dioxide is in the insulating state, the phase gradient of the designed metasurface appears, and the metasurface can deflect the vertically incident circularly polarized wave with specific angle anomalies in a operating band of 1.1–2.0 THz; when the

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 62271191, 61975053), the Natural Science Foundation of Henan Province, China (Grant No. 222300420040), the Innovative Funds Plan of Henan University of Technology (Grant No. 2021ZKCJ04), the Key Science and Technology Program of Henan Province, China (Grant Nos. 222102110246, 222103810072), and the Program for Science & Technology Innovation Talents in Universities of Henan Province, China (Grant Nos. 23HASTIT024, 22HASTIT017).

† Corresponding author. E-mail: gehongyi2004@163.com

vanadium dioxide is in the metallic state, for the same operating band of the same metasurface, the phase gradient of the metasurface disappears, and the metasurface mirror reflects the vertically incident circularly polarized waves, thereby realizing the function switching. This design provides new possibilities for modulating the terahertz reflected beam, which will have potential applications in terahertz wireless communication and radar systems.



Keywords: terahertz, encoding metasurfaces, beam control

PACS: 42.79.-e, 42.82.-m

DOI: [10.7498/aps.73.20240764](https://doi.org/10.7498/aps.73.20240764)

CSTR: [32037.14.aps.73.20240764](https://cstr.net.cn/detail/32037.14.aps.73.20240764)

复合相位调控的波束转向可控反射型超表面

魏涛 张玉洁 葛宏义 蒋玉英 吴旭阳 孙振雨 季晓迪 补雨薇 贾柯柯

Composite phase modulated beam steering controllable reflective metasurface

Wei Tao Zhang Yu-Jie Ge Hong-Yi Jiang Yu-Ying Wu Xu-Yang Sun Zhen-Yu Ji Xiao-Di Bu Yu-Wei Jia Ke-Ke

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 224201 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20240764

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240764>

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

太赫兹多波束调控反射编码超表面

Terahertz multibeam modulation reflection-coded metasurface

物理学报. 2023, 72(5): 054203 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221962>

基于VO₂的太赫兹各向异性编码超表面

VO₂ based terahertz anisotropic coding metasurface

物理学报. 2023, 72(12): 124204 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222171>

基于二氧化钒的太赫兹双频多功能编码超表面

Vanadium dioxide based terahertz dual-frequency multi-function coding metasurface

物理学报. 2023, 72(9): 098101 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222321>

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>

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>

基于超表面的多波束多模态太赫兹涡旋波产生

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

物理学报. 2021, 70(18): 188701 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210897>