

基于二氧化钒的太赫兹双频多功能编码超表面*

汪静丽^{1)†} 董先超¹⁾ 尹亮¹⁾ 杨志雄¹⁾ 万洪丹¹⁾ 陈鹤鸣²⁾ 钟凯³⁾

1) (南京邮电大学电子与光学工程学院、柔性电子(未来技术)学院, 南京 210023)

2) (南京邮电大学贝尔英才学院, 南京 210023)

3) (天津大学精密仪器与光电子工程学院, 教育部光电信息技术重点实验室, 天津 300072)

(2022年12月5日收到; 2023年2月20日收到修改稿)

提出了一种基于二氧化钒且工作频段可切换的太赫兹编码超表面. 该编码超表面由金属-二氧化钒复合层、聚酰亚胺介质层、金属反射层构成, 主要通过对顶层双裂环谐振器和十字结构的参数进行设计, 获得其所需的性能; 而二氧化钒材料的引入, 巧妙地使其可工作于双频点, 进而实现不同功能的切换. 仿真结果表明: 当二氧化钒处于绝缘态时, 在 $f_1 = 0.34$ THz 的圆极化波垂直入射下, 设计的编码超表面可以视为 3-bit Pancharatnam-Berry 相位编码超表面, 通过对单元中双裂环谐振器设计卷积编码序列, 使该编码超表面具有以特定角度出射拓扑荷数 $l = \pm 1$ 涡旋波束的功能; 当二氧化钒处于金属态时, 在 $f_2 = 0.74$ THz 的正交线极化波垂直入射下, 设计的编码超表面可以视为 2-bit 各向异性编码超表面, 通过对单元中十字结构分别设计随机编码序列和棋盘格编码序列, 使该编码超表面具有雷达散射截面缩减和波束分束的功能. 其可为太赫兹电磁超材料多功能器件的设计提供一定的参考.

关键词: 太赫兹, 编码超表面, 二氧化钒, 多功能**PACS:** 81.05.Xj, 87.50.U-**DOI:** 10.7498/aps.72.20222321

1 引言

随着太赫兹电磁超材料功能器件的发展, 已经在通信、成像、生物检测等诸多领域展现出广阔的应用前景^[1-6]. 而随着多场景应用需求的增加, 迫切希望此类器件具有多种功能且能工作于多个频段^[7-10].

超表面作为二维形式的电磁超材料, 具有低剖面、低损耗、高效率等优点. 2014年, 在超表面的基础上, “编码超表面”的概念^[11]提出, 通过数字化控制手段, 实现了对电磁波的高效调控, 大大降低了超表面功能器件的设计难度, 成为了研究的热点.

但是, 一般的编码超表面一旦设计完成, 其功

能也随之固定, 无法满足多场景应用的需求. 为了解决上述问题, 主要采用 3 种方式设计多功能编码超表面: 1) 使编码超表面可在多个工作频点, 进而设计不同功能^[12-14]. 这类编码超表面一般需要设计多层结构或将不同结构合理地嵌套组合, 使其在不同工作频点分别产生谐振响应. 2) 引入特定的结构(例如: 对正交线极化(linearly polarized, LP)波中的 x 和 y 极化波分别独立调控的各向异性十字结构^[15]; 对左旋圆极化(left-circularly polarized, LCP)波和右旋圆极化(right-circularly polarized, RCP)波分别独立调控的自旋解耦结构^[16]), 使编码超表面在不同极化态的波源入射时^[15-17], 表现出不同的功能. 3) 将可调材料^[18-21](石墨烯、液晶、相变材料等)引入编码超表面的设计中,

* 国家自然科学基金(批准号: 12174199, 61571237)、江苏省自然科学基金(批准号: BK20221330, BK20151509)和横向课题(多功能太赫兹天线的研究)(批准号: 2021 外 323)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: jlwang@njupt.edu.cn

实现不同功能的切换. 特别地, 二氧化钒 (VO_2) 作为一种相变材料, 具有相变方式灵活, 加工制备简单等优势, 被广泛应用于太赫兹可调功能器件的设计中^[22], 典型的结构如 Li 等^[20] 提出的将金属结构和 VO_2 结合, 通过改变 VO_2 的相变状态, 实现多功能.

目前, 研究者们一般仅采用上述提及的一种或两种方式实现对太赫兹波的调控, 设计的编码超表面功能相对单一. 基于此, 本文拟结合上文提及的多功能编码超表面设计方法, 通过巧妙引入相变材料 VO_2 , 在不同极化态波源的入射下, 获得了一种可工作在双频点的多功能编码超表面. 编码超表面中的双裂环谐振器和十字结构相对独立, 通过控制 VO_2 从绝缘态相变为金属态, 便可使其完成 3-bit Pancharatnam-Berry (PB) 相位编码到各向异性 2-bit 相位编码的转换. 通过设计合适的编码序列, 进而使编码超表面具备了可切换的 3 种功能, 包括涡旋波束生成、雷达散射截面 (radar cross section, RCS) 缩减、波束分束. 所设计的多功能编码超表面结构简单且易于集成, 在太赫兹高速通信和电磁隐身等领域具有一定的应用前景.

2 理论分析

编码超表面调控电磁波的机理类似相控阵天线理论^[11]: 以 $N \times N$ 个相同尺寸为 D 的单元构成的编码超表面为例, 在平面波垂直入射下, 编码超表面的远场方向函数可用 (1) 式表示:

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

其中 $f_e(\theta, \varphi)$ 是单个单元的远场函数, θ 和 φ 为任意方向的俯仰角和方向角, 自由空间波数 $k = 2\pi/\lambda$, $\varphi(m, n)$ 表示位置在 (m, n) 处单元的相位.

编码超表面的方向性系数可表示为

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

1-bit 编码超表面 $\varphi(m, n)$ 只有 $0^\circ/180^\circ$ 两种相位, 对应二进制数 0/1; 2-bit 编码超表面

$\varphi(m, n)$ 只有 $0^\circ/90^\circ/180^\circ/270^\circ$ 四种相位, 对应二进制数 00/01/10/11, 以此类推. 采用 (2) 式可计算出任意编码序列下超表面的散射方向图, 最终可通过设计不同的编码序列以实现预期的功能.

3 编码超表面单元设计与分析

3.1 编码超表面单元结构设计

双裂环谐振器是 PB 相位超表面中的常见结构^[23,24], 可实现对 CP 波的调控; 十字结构是各向异性超表面中的典型结构^[15,25], 可实现对 x 极化波和 y 极化波的独立调控. 通过将这两种结构简单组合后, 即可实现双频点工作. 本文希望在此基础上, 结合引入可调材料和不同极化态的波源入射这两种方法, 从而获得具有更多功能的超表面. 而这 3 种方法的巧妙结合, 是通过引入相变材料 VO_2 并将其嵌入双裂环谐振器的两个裂口处实现的. 即当 VO_2 处于绝缘态, 某一频率入射的 CP 波受到双裂环谐振器的影响; 当 VO_2 处于金属态, 嵌入的 VO_2 将双裂环变成了金属圆环, 消除了组合结构中双裂环谐振器的影响, 另一频率入射的正交 LP 波仅受到十字结构的影响. 因此, 提出的基于 VO_2 的太赫兹双频编码超表面具有 3 种功能, 且这 3 种功能可通过编码序列的设计而灵活更改, 对太赫兹波的调控更加自由.

所设计的编码超表面单元如图 1 所示. 单元由 3 层结构组成: 顶层由电导率为 $3.56 \times 10^7 \text{ S/m}$ 的金属铝^[23] 双裂环谐振器和十字结构组合而成, 其中金属铝双裂环谐振器的内、外半径分别为 $r_1 = 60 \mu\text{m}$ 和 $r_2 = 75 \mu\text{m}$, 并且有两个 $\beta = 5^\circ$ 的开口, 其中填充 VO_2 ^[20], 填充 VO_2 的双裂环谐振器能以一定角度 α 进行旋转; 金属铝十字结构由两个矩形垂直交叉形成, 矩形宽度 $w = 15 \mu\text{m}$, 水平臂长

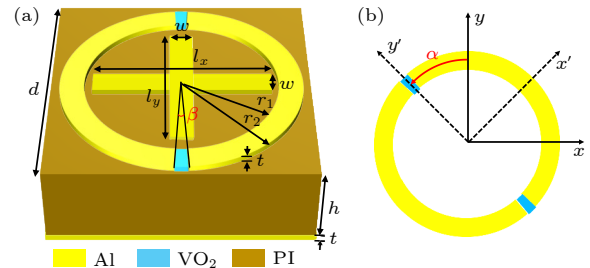


图 1 编码超表面单元示意图 (a) 单元结构; (b) 旋转结构
Fig. 1. Schematic diagram of the coding metasurface unit cell: (a) Unit cell structure; (b) rotation structure.

和垂直臂长分别为 l_x 和 l_y ; 金属铝和 VO_2 厚度 $t = 200 \text{ nm}$. 中介质层为厚度 $h = 70 \text{ }\mu\text{m}$ 的聚酰亚胺 (PI)^[20], 其介电常数 $\varepsilon_r = 3.5$, 损耗角正切 $\tan\delta = 0.0027$. 底层为厚度 $t = 200 \text{ nm}$ 的正方形金属铝, 其边长 $d = 164 \text{ }\mu\text{m}$.

在编码超表面单元设计中加入了 VO_2 材料, VO_2 作为一种过渡金属氧化物, 具有绝缘态-金属态相变的性质. 控制其相变的方式是灵活多变的, 包括温控、光控、电控等^[26–28]. 当 VO_2 处于绝缘态时, 其介电常数 $\varepsilon_i = 9$, 电导率 $\sigma = 200 \text{ S/m}$; 当 VO_2 处于金属态时, 其介电常数用 Drude 模型^[29] 来表征:

$$\varepsilon_m(\omega) = \varepsilon_\infty - \frac{\omega_p^2(\sigma)}{\omega^2 + i\gamma\omega}, \quad (3)$$

其中高频极限介电常数 $\varepsilon_\infty = 12$, 碰撞频率 $\gamma = 5.75 \times 10^{13} \text{ rad/s}$, $\omega_p(\sigma)$ 是与 VO_2 电导率相关的等离子体频率. 本文中金属态 VO_2 的电导率设置为 $2 \times 10^5 \text{ S/m}$ ^[20,30]. 此外, 在实际制备中, VO_2 较难实现完全的金属态, 其电导率也可能是 10^4 S/m 数量级, 会对编码超表面性能产生一定的影响. 仿真结果表明, 金属态 VO_2 取较低电导率时, 对本文所提出的编码超表面性能影响不大.

3.2 编码超表面单元性能分析

3.2.1 VO_2 处于绝缘态, $f_1 = 0.34 \text{ THz}$ 的电磁波垂直入射

当 VO_2 处于绝缘态时, 顶层即为双裂环谐振器和十字结构的组合. 如果顶层仅有双裂环谐振器结构, 那么基于 PB 相位理论, 对于反射型超表面^[31]: 当入射波为 CP 波时, 反射波的极化方式与入射波

的极化方式相同. 且超表面单元顶层双裂环谐振器旋转角度为 α , 相应的相移为 $\pm 2\alpha$, 其中+为 LCP 波, -为 RCP 波. 以 22.5° 为步长, 旋转双裂环谐振器角度 $\alpha = 0^\circ, 22.5^\circ, 45.0^\circ, 67.5^\circ, 90.0^\circ, 112.5^\circ, 135.0^\circ, 157.5^\circ$ 便可获得 8 个满足 3-bit PB 相位编码要求的单元, 分别编码为 000, 001, 010, 011, 100, 101, 110, 111. 但是, 本文所提出的单元结构中, 顶层除了双裂环谐振器结构外, 还存在十字结构. 经过建模仿真发现, 当 CP 波垂直入射时, 十字结构的尺寸变化对单元特性基本不起作用, 唯有双裂环谐振器结构会影响单元特性. 此处, 以任意 4 组十字结构参数 ($l_x = l_y = 56 \text{ }\mu\text{m}$, $l_x = l_y = 81 \text{ }\mu\text{m}$, $l_x = l_y = 89.5 \text{ }\mu\text{m}$, $l_x = l_y = 110 \text{ }\mu\text{m}$) 为例, 给出双裂环谐振器和十字结构的变化对单元特性的影响. 图 2 给出了 $f_1 = 0.34 \text{ THz}$ 的 CP 波垂直入射时, 编码超表面单元在不同十字结构参数下的同极化反射幅度和反射相位. 从图 2 可以看出: 在十字结构取不同参数时, 不论是 LCP 波还是 RCP 波垂直入射时, 编码超表面单元的同极化反射幅度均超过 0.95, 说明所设计的编码超表面单元具有较高的同极化反射效率; 当 LCP 波和 RCP 波分别垂直入射时, 编码超表面单元的同极化反射相位差依次分别约为 $+45^\circ$ 和 -45° , 与理论分析相符. 并且在十字结构取不同参数的情况下, 编码超表面单元的反射相位基本重合, 说明该结构对单元的特性几乎不起作用. 换言之, 当 VO_2 处于绝缘态, 在 $f_1 = 0.34 \text{ THz}$ 的 CP 波垂直入射的情况下, 顶层双裂环谐振器和十字结构的组合结构中, 仅前者对入射的太赫兹波起调控作用, 影响单元特性. 因此, 在该情况下如图 3 所示, 通过旋转双裂环谐振器角

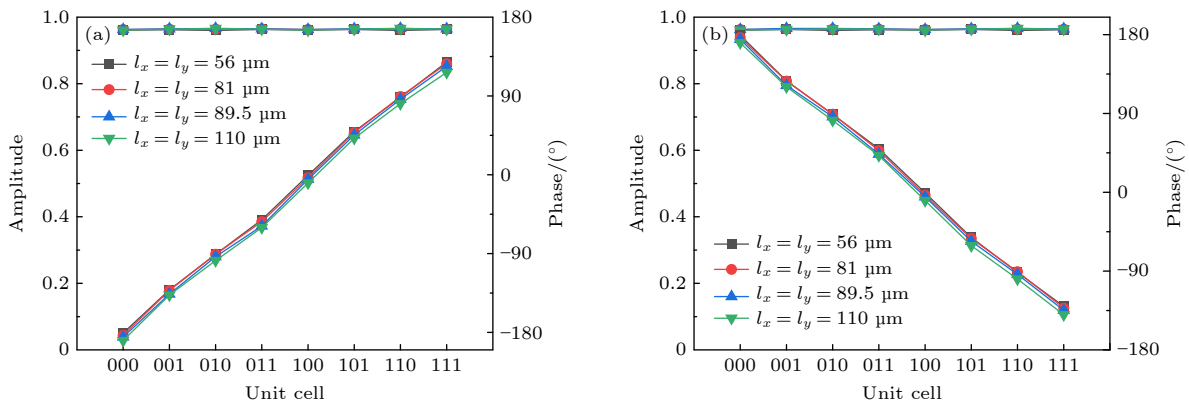


图 2 CP 波垂直入射下, 编码超表面单元的同极化反射幅度和反射相位 (a) LCP 波; (b) RCP 波

Fig. 2. Co-polarized reflection amplitude and reflection phase of eight unit cells under the vertical incidence of CP wave: (a) LCP wave; (b) RCP wave.

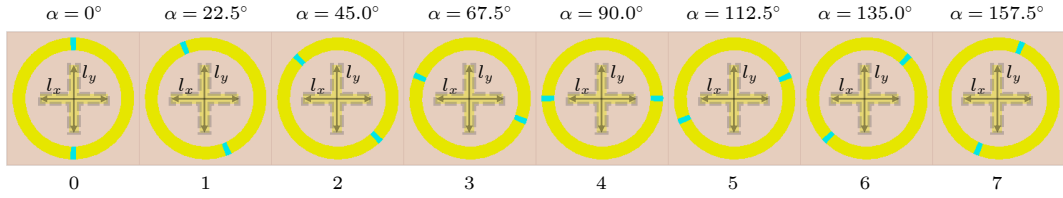


图 3 8 个 3-bit 编码超表面单元

Fig. 3. Eight 3-bit coding metasurface unit cells.

度 $\alpha = 0^\circ, 22.5^\circ, 45.0^\circ, 67.5^\circ, 90.0^\circ, 112.5^\circ, 135.0^\circ, 157.5^\circ$, 便获得了符合 3-bit 编码超表面要求的 8 个编码超表面单元. 而中间用虚线标注的十字结构, 其水平臂长 l_x 和垂直臂长 l_y 的变化几乎不能影响单元特性 (具体 l_x 和 l_y 的大小, 根据后续设计需要逐一确定). 为了便于区分每种单元, 将双裂环谐振器旋转得到的 000, 001, 010, 011, 100, 101, 110, 111 单元分别记为 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 单元.

3.2.2 VO₂ 处于金属态, $f_2 = 0.74$ THz 的电磁波垂直入射

当 VO₂ 处于金属态时, 双裂环谐振器可等效为一个具有准各向同性的金属圆环 [24], 此时顶层即为金属圆环和十字结构的组合. 经仿真发现, 在正交 LP 波垂直入射下, 对于本文中具有准各向同性的金属圆环, 其旋转角度 α 几乎不会影响单元特性, 所以在顶层双裂环谐振器和十字的组合结构中, 将由后者对入射的太赫兹波起调控作用.

根据文献 [15, 25] 报道, 通过分别调节十字结构的水平臂长和垂直臂长, 可以独立调控入射的 x 极化波和 y 极化波, 其具有各向异性特点. 对于 2-bit 编码超表面而言, 构成其的单元共有 4 个. 为了实现对入射的 x 极化波产生 2-bit 相位响应, 本文设计 4 种不同尺寸的 l_x , 即: $l_x = 56, 81, 89.5, 110 \mu\text{m}$. 同样地, 为了实现对入射的 y 极化波产生 2-bit 相位响应, 也分别设计 4 种不同尺寸的 l_y , 即: $l_y = 56, 81, 89.5, 110 \mu\text{m}$. 此时, 本文提出的十字结构存在 16 种不同的尺寸, 但是因为 x 极化波入射时, 其反射幅度与反射相位仅和十字结构中 l_x 有关; y 极化波入射时, 其反射幅度与反射相位仅和十字结构中 l_y 有关. 因此, 对于前者, 可等效于只存在 4 种不同 l_x 的单元, 如图 4(a) 所示, 将其命名为单元 $0(x), 1(x), 2(x), 3(x)$, 虚线标注的金属圆环和垂直臂长 l_y (l_y 为 56, 81, 89.5, 110 μm 中的某一个) 几乎不影响单元特性; 对于后者, 等效于只存

在 4 种不同 l_y 的单元, 如图 4(b) 所示, 将其命名为 $0(y), 1(y), 2(y), 3(y)$, 虚线标注的金属圆环和水平臂长 l_x (l_x 为 56, 81, 89.5, 110 μm 中的某一个) 几乎不影响单元特性.

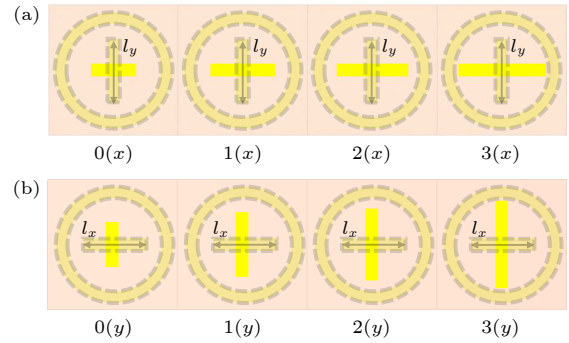

 图 4 2-bit 编码超表面单元 (a) x 极化波垂直入射, 4 种不同 l_x 的单元; (b) y 极化波垂直入射, 4 种不同 l_y 的单元

 Fig. 4. 2-bit coding metasurface unit cells: (a) Four different l_x unit cells under the vertical incidence of x -polarized wave; (b) four different l_y unit cells under the vertical incidence of y -polarized wave.

对不同参数的单元进行仿真分析, 图 5 展示了在 x 极化波和 y 极化波垂直入射下, 单元 $0(x), 1(x), 2(x), 3(x)$ 和 $0(y), 1(y), 2(y), 3(y)$ 在 0.5—0.9 THz 的反射幅度和反射相位. 可观察到在 $f_2 = 0.74$ THz 的 x 极化波垂直入射下, 单元 $0(x), 1(x), 2(x), 3(x)$ 的反射幅度均超过 0.85, 相位差依次约为 90° , 满足 2-bit 相位编码的要求; 同样地, 在 $f_2 = 0.74$ THz 的 y 极化波垂直入射下, 单元 $0(y), 1(y), 2(y), 3(y)$ 的反射幅度均超过 0.85, 相位差依次约为 90° , 满足 2-bit 相位编码的要求. 因此, 在 $f_2 = 0.74$ THz 的 x 极化波和 y 极化波垂直入射的情况, 可以针对单元 $0(x), 1(x), 2(x), 3(x)$ 和 $0(y), 1(y), 2(y), 3(y)$ 分别设计编码序列, 从而构成具有不同功能的编码超表面.

综上所述可知, 所设计的编码超表面单元顶层结构由两部分 (双裂环谐振器和十字结构) 构成, 由于相变材料 VO₂ 的引入使得两部分结构在不同

频点的太赫兹波入射时, 相对独立. 即: 当 VO₂ 处于绝缘态, $f_1 = 0.34$ THz 的 CP 波垂直入射时, 十字结构基本不起作用, 因此通过旋转双裂环谐振器, 获得了 8 个对 CP 波响应的 3-bit 编码超表面单元结构. 而当 VO₂ 处于金属态, $f_2 = 0.74$ THz 的正交 LP 波垂直入射时, 金属圆环基本不起作用. 由于十字结构具有各向异性, 通过改变十字结构中水平臂长 l_x , 获得了 4 个对 x 极化波响应的 2-bit 编码超表面单元结构. 同样通过改变十字结构中垂直臂长 l_y , 获得了 4 个对 y 极化波响应的 2-bit 编码超表面单元结构.

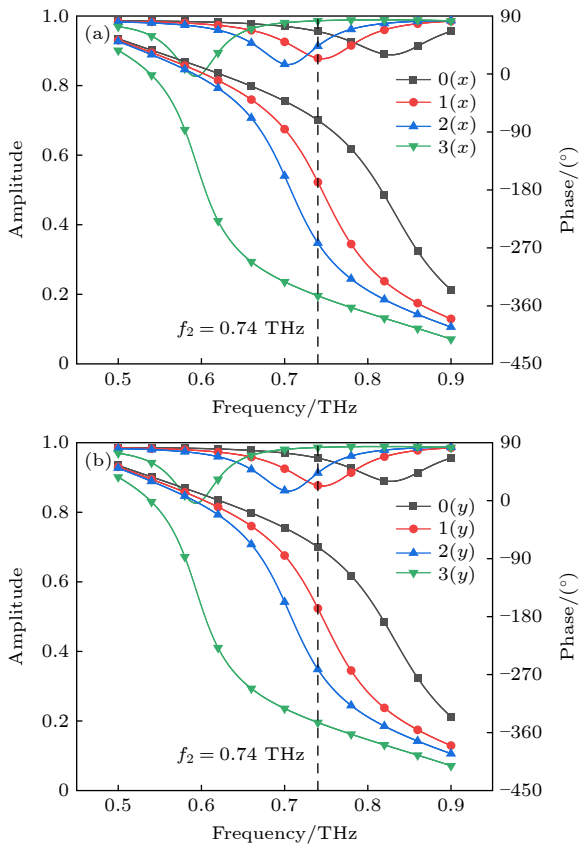


图 5 LP 波垂直入射下, 单元的反射幅度和反射相位 (a) x 极化波; (b) y 极化波

Fig. 5. Reflection amplitude and reflection phase of unit cells under the vertical incidence of LP wave: (a) x -polarized wave; (b) y -polarized wave.

4 编码超表面设计及仿真结果分析

将编码超表面单元按照一定的编码序列排列, 即可构成编码超表面. 编码序列不同, 所形成的编码超表面就不同, 其对太赫兹波的调控不同, 形成的波束也不同. 由上文可知, 当 VO₂ 处于绝缘态时, 在 $f_1 = 0.34$ THz 的 CP 波垂直入射下, 存在 8 个

对 CP 波响应的 3-bit 编码超表面单元; 当 VO₂ 处于金属态时, 在 $f_2 = 0.74$ THz 的正交 LP 波垂直入射下, 分别存在 4 个对 x 和 y 极化波响应的 2-bit 编码超表面单元. 因此, 通过对其分别设计合适的编码序列, 在特定波源入射和特定 VO₂ 状态下, 即可在同一编码超表面上可以获得 3 种波束, 实现 3 种功能.

本文所设计的由 32×32 单元组成的编码超表面如图 6 所示, 该编码超表面上集成了 3 种编码序列: 针对 CP 波垂直入射设计的 3-bit 编码序列 A、针对 x 极化波垂直入射设计的 2-bit 编码序列 B、针对 y 极化波垂直入射设计的 2-bit 编码序列 C. 从放大图可见: 在编码超表面中, 每个单元都有一个具有一定旋转角度 α 的双裂环谐振器结构和不同尺寸水平臂和垂直臂构成的十字结构. 在 VO₂ 处于绝缘态时, 按照上文分析, 仅需要关注组合结构中的双裂环谐振器, 如图 6(a) 所示, 将具有不同旋转角度 α 的 8 个单元 (如图 3 所示) 按照编码序列 A 排列, 就构成了 3-bit 编码超表面; 同样地, 当 VO₂ 处于金属态时, 仅需要关注组合结构中的十字结构, 如图 6(b) 所示: 在 x 极化波垂直入射时, 将具有不同 l_x 的 4 个单元 (如图 4(a) 所示) 按照编码序列 B 排列, 就构成了 2-bit 编码超表面; 如图 6(c) 所示, 在 y 极化波垂直入射时, 对将具有不同 l_y 的 4 个单元 (如图 4(b) 所示) 按照编码序列 C 排列, 就构成了另一种 2-bit 编码超表面. 接下来对该编码超表面的三种功能进行说明与分析.

4.1 涡旋波束

涡旋波束是一种中心场强为零, 相位波前呈螺旋分布的波束, 可用于高速通信及高分辨率成像等领域. 基于涡旋波束应用广泛, 本节拟在 VO₂ 处于绝缘态、 $f_1 = 0.34$ THz 的 CP 波垂直入射的情况下, 通过对图 3 所示的 8 个单元合理排列, 令所形成的编码超表面产生以特定角度出射的涡旋波束. 具体设计过程如下.

涡旋波束中, 拓扑荷数是一个重要的参数. 拓扑荷数 $l = 1$, 表示在一个波长传播距离上波前绕着中心旋转一周相位改变 360° . 为了构建拓扑荷数 $l = 1$ 的涡旋波束, 将图 3 所示的 8 个 3-bit 编码超表面单元按照图 7(a) 所示的编码序列排列, 相邻单元的相位差 45° , 空间平面旋转一周对应 360° . 该编码序列在 $f_1 = 0.34$ THz 的 CP 波 (以

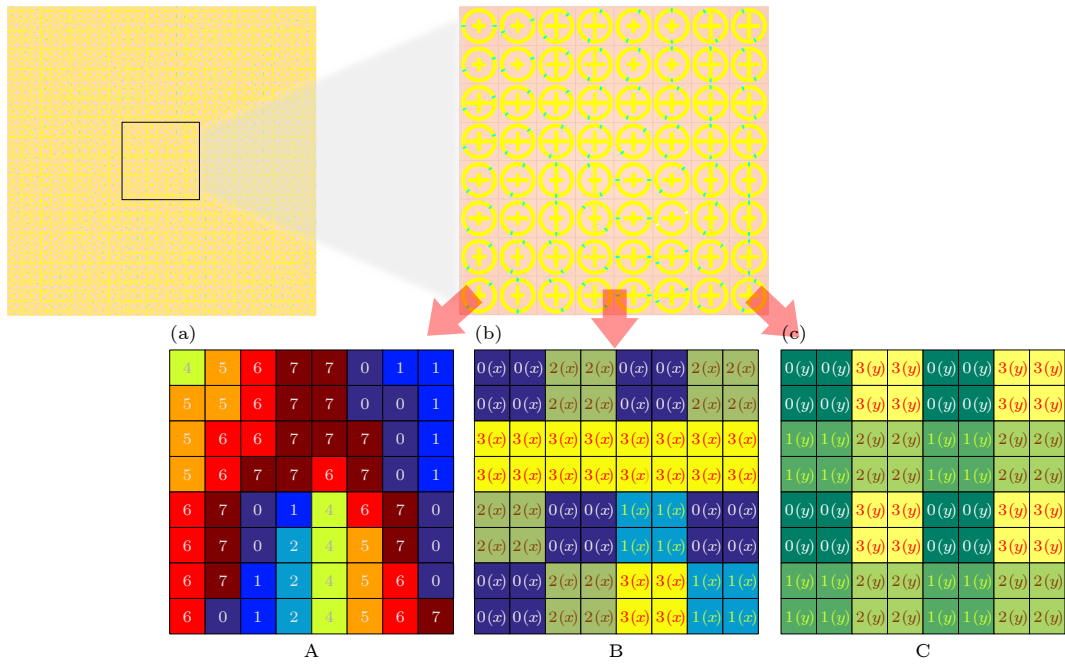


图 6 编码超表面及部分示意图 (a) 编码序列 A 示意图; (b) 编码序列 B 示意图; (c) 编码序列 C 示意图

Fig. 6. Schematic of the coding metasurface and section: (a) Coding sequence A diagram; (b) coding sequence B diagram; (c) coding sequence C diagram.

LCP 波为例) 垂直入射下的散射远场如图 7(b) 所示. 但是, 此方法只能产生垂直出射的涡旋波束, 不能满足按照预设角度出射的需求.

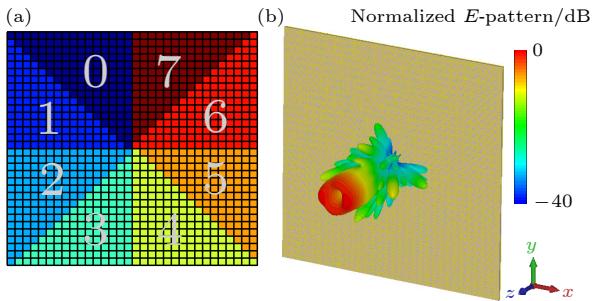


图 7 产生垂直涡旋波束的编码序列及 3D 远场方向图 (a) 编码序列; (b) 3D 远场方向图

Fig. 7. Coding sequence of vortex beam generation and 3D far-field pattern: (a) Coding sequence; (b) 3D far-field pattern.

为了灵活调控出射涡旋波束的角度, 引入编码超表面的卷积理论^[32], 可以将散射波束转向一个预先设计的方向, 实现散射波束方向的灵活调控. 以在 xoz 面出射角度 42° 的涡旋波束为例, 如果要使垂直的涡旋波束在 xoz 面实现一个 42° 的偏转, 需要一个产生涡旋波束的编码序列和一个能够在 xoz 面产生 42° 异常反射角的编码序列, 将两者进行加法卷积运算即可得到满足要求的编码序列. 首

先, 设计产生垂直涡旋波束的编码序列, 如图 7(a) 所示, 并且仿真模拟了其散射远场, 如图 7(b) 所示. 其次, 设计能够在 xoz 面产生 42° 异常反射角的编码序列, 如图 8 所示, 该编码序列沿 X 方向按照 0123456701234567... (沿 Y 方向是相同的单元) 排列. 按照广义斯涅尔定理^[33] 计算可得, 图 8 所示编码序列的理论出射角度为 42.26° , 满足设计要求. 最后, 基于编码超表面的卷积原理, 将图 7(a) 所示编码序列与图 8 所示编码序列进行加法卷积运算, 得到能够产生异常反射角度约为 42° 的涡旋波束编码序列 (即编码序列 A), 如图 9 所示.

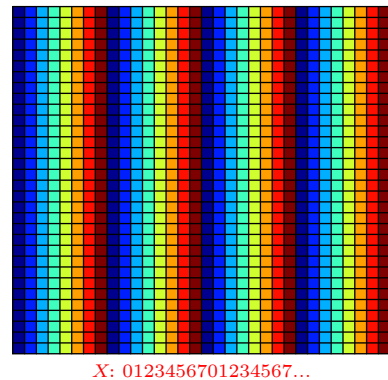


图 8 沿 X 方向 012346701234567... 排列的编码序列

Fig. 8. Coding sequence arranged in X direction according to 012346701234567...

当 VO₂ 处于绝缘态时, $f_1 = 0.34$ THz 的 LCP 波垂直入射至按图 9 所示编码序列排布的编码超表面上, 仿真模拟结果如图 10(a) 和图 10(c) 所示. 其展示了以异常反射角 42.2° 出射拓扑荷数 $l = -1$ 的涡旋波束, 与上文理论分析的出射角度 42° 相符. 当 VO₂ 处于绝缘态时, 在 $f_1 = 0.34$ THz 的 RCP 波垂直入射下, 仿真模拟结果如图 10(b) 和图 10(d) 所示, 其展示了以异常反射角 42.9° 出射拓扑荷数 $l = +1$ 的涡旋波束. 它与 LCP 波垂直入射时产生的涡旋波束关于 yoz 面呈现出高度的对称性, 这是

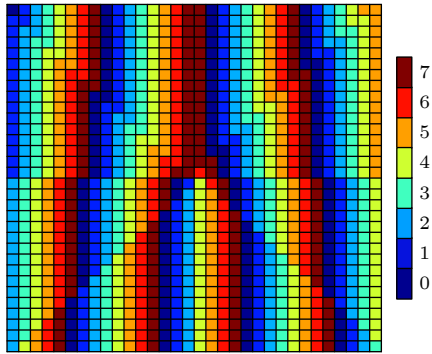


图 9 产生异常反射角度为 42.26° 的涡旋波束编码序列 A
Fig. 9. Coding sequence A for generating vortex beam with abnormal reflection angle of 42.26°.

因为编码超表面单元对 LCP 和 RCP 波垂直入射的情况, 会产生相反的相位梯度造成的. 而且由于 RCP 波与 LCP 波的自旋方向相反, 出射涡旋波束的拓扑荷数也相反. 通过傅里叶卷积运算和入射波源的极化状态的改变, 进一步提高了对涡旋波束操纵的灵活性.

4.2 RCS 缩减

RCS 是衡量目标雷达回波能力强弱的一个重要物理量, RCS 缩减的目的是通过各种有效的技术手段降低目标的雷达散射截面积, 因此其在电磁隐身方面发挥着巨大作用. 实现 RCS 缩减的主要方法: 一是将电磁波吸收 [34,35]; 二是将反射的电磁波打散到各个方向, 形成漫反射 [36]. 基于 RCS 缩减的应用前景, 当 VO₂ 处于金属态、 $f_2 = 0.74$ THz 的 x 极化波垂直入射, 拟将图 4(a) 所示的 4 个 2-bit 编码超表面单元按照特定的编码序列排列, 希望所形成的编码超表面能够产生漫反射的效果, 进而实现 RCS 缩减的功能.

考虑到随机编码序列可有效地将入射的电磁波打散到各个方向, 形成漫反射, 达到 RCS 缩减的目的. 因此, 设计出 2-bit 随机编码序列 B, 如图 11

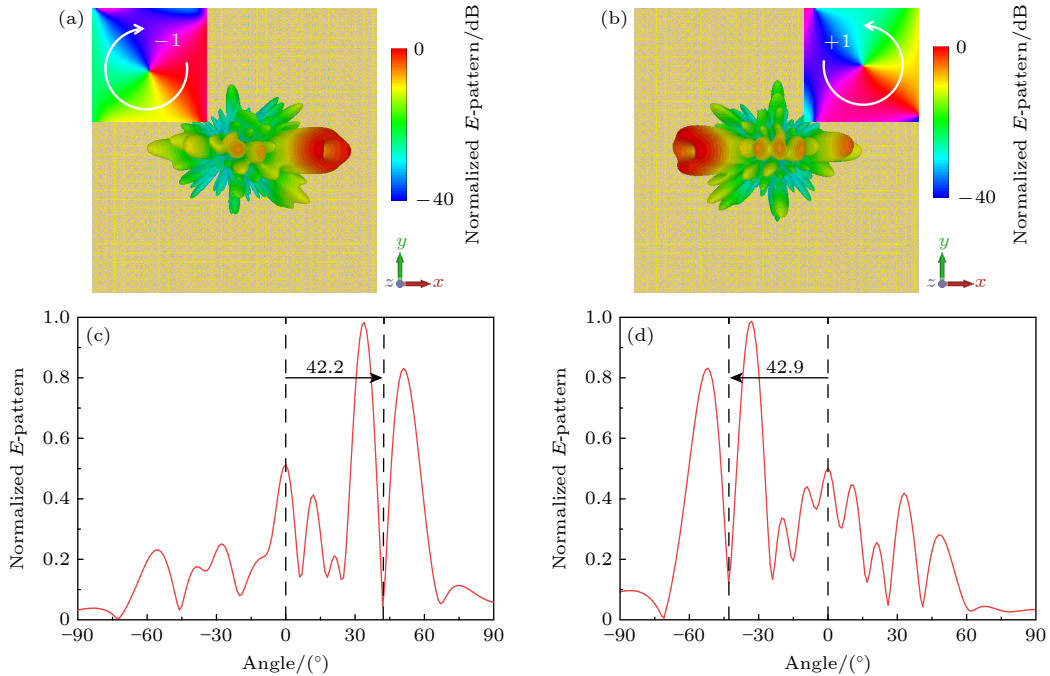


图 10 CP 波垂直入射下编码超表面的 3D 远场方向图和 2D 远场方向图 (a) LCP 波垂直入射下的 3D 远场方向图; (b) RCP 波垂直入射下的 3D 远场方向图; (c) LCP 波垂直入射下的 2D 远场方向图; (d) RCP 波垂直入射下的 2D 远场方向图

Fig. 10. 3D far-field pattern and 2D far-field pattern of coding metasurface under the vertical incidence of CP wave: (a) 3D far-field pattern under the vertical incidence of LCP wave; (b) 3D far-field pattern under the vertical incidence of RCP wave; (c) 2D far-field pattern under the vertical incidence of LCP wave; (d) 2D far-field pattern under the vertical incidence of RCP wave.

所示. 将图 4(a) 所示的单元 $0(x)$, $1(x)$, $2(x)$, $3(x)$ 按照其排列, 就构成了 2-bit 编码超表面. 当 $f_2 = 0.74$ THz 的 x 极化波垂直入射至其上时, 仿真结果如图 12 所示. 可以观察到许多散乱无序的波束, 呈现出漫反射的特征, 产生了所预期的 RCS 缩减效果, RCS 值为 -28.2 dB. 将该编码超表面与同等尺寸的金板对照, 仿真模拟了其在 $0.5\text{--}1$ THz 频段内的 RCS 缩减效果, 如图 13 所示, 在 $0.7\text{--}0.76$ THz 的频段内, RCS 缩减量均达到 10 dB 以上, 均可以达到预期的 RCS 缩减效果.

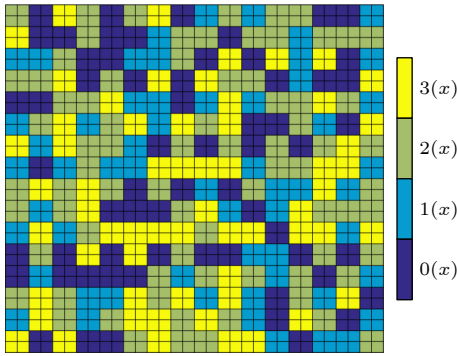


图 11 2-bit 随机编码序列 B

Fig. 11. 2-bit random coding sequence.

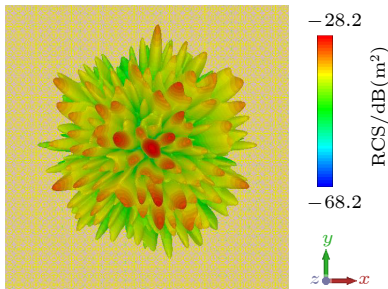


图 12 0.74 THz 处编码超表面的 3D 远场方向图

Fig. 12. 3D far-field pattern of coding metasurface at 0.74 THz.

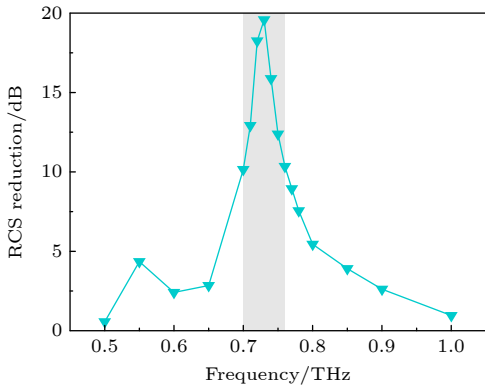


图 13 编码超表面的 RCS 缩减量

Fig. 13. RCS reduction of coding metasurface.

4.3 波束分束

将单元按照某些编码序列排列, 所构成的编码超表面可有效将垂直入射的电磁波分成若干束均匀的波束, 可应用在多信道通信等领域. 基于太赫兹波束分束的潜在应用价值, 当 VO_2 处于金属态、 $f_2 = 0.74$ THz 的 y 极化波垂直入射时, 拟将图 4(b) 所示的 4 个 2-bit 编码超表面单元按照特定的编码序列排列, 希望所形成的编码超表面具有波束分束的功能.

考虑到棋盘格编码序列可有效地将垂直入射的电磁波分成四束均匀的波束, 设计如图 14 所示的 2-bit 棋盘格编码序列 C, 将单元 $0(y)$, $1(y)$, $2(y)$, $3(y)$ 按照其排列, 就构成了 2-bit 编码超表面. 对于该 2-bit 编码超表面, 理论计算得到的 4 束波束的方位角 φ 分别为 $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$. 仿真模拟其在 $f_2 = 0.74$ THz 的 y 极化波垂直入射下的散射远场, 如图 15 所示, 展现出以四主波束均匀出射的效果. 另外, 仿真模拟了其在 $0.7\text{--}0.78$ THz 频段内的 2D 散射远场, 如图 16 所示, 各频点下 2D 散射远场的方位角 φ 均匀分布在 $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$, 与理论计算值一致, 均可以达到预期的四波束均匀分束的效果.

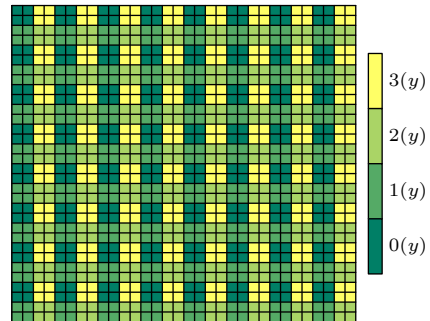


图 14 2-bit 棋盘格编码序列 C

Fig. 14. Coding metasurface C of 2-bit chessboard.

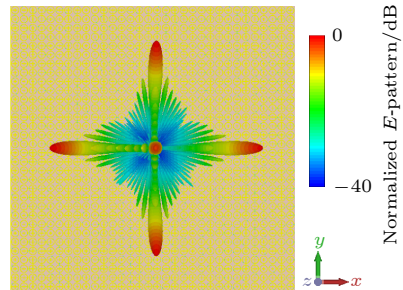


图 15 在 $f_2 = 0.74$ THz 的 y 极化波垂直入射下编码超表面的 3D 远场方向图

Fig. 15. 3D far-field pattern of coding metasurface under the vertical incidence of y -polarized wave at 0.74 THz.

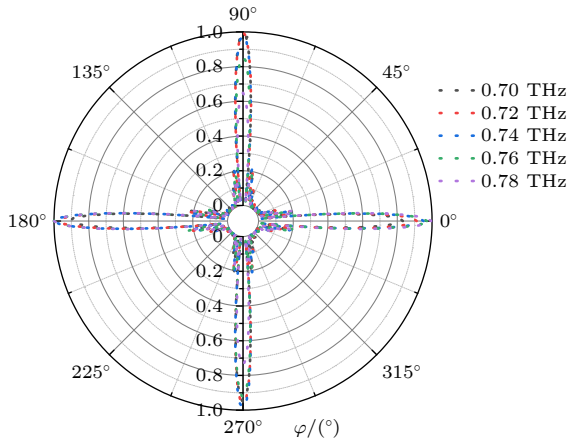


图 16 y 极化波垂直入射下编码超表面在极坐标中的 2D 远场方向图

Fig. 16. 2D far-field patterns of coding metasurface in polar coordinates under the vertical incidence of y -polarized wave.

5 结 论

一般的太赫兹电磁超材料功能器件, 其功能单一, 大大限制了应用场景. 本文通过控制可绝缘-金属态相变的 VO_2 , 对编码超表面中双裂环谐振器、十字结构中水平臂和垂直臂部分进行独立的编码序列设计, 使得该编码超表面在双频点、CP 波和正交 LP 波分别入射时, 实现涡旋波束发生器、RCS 缩减和波束分束 3 种功能之间的切换. 将本文与其他多功能编码超表面进行比较: 文献 [15, 24] 分别采用各向异性的十字结构和相变材料 VO_2 , 均实现了两种功能, 可见单独采用某一种方法所能实现的功能数有限. 而文献 [37] 中编码超表面的设计采用八层结构, 可工作于 6 个频点, 实现了 6 种功能. 由于其设计思路主要借助结构层数的增多获得多的功能, 结构复杂, 制作难度大. 综上, 本文所提编码超表面不仅结构相对简单, 可实现 3 种功能, 且通过灵活设计编码序列, 可自由选择所需功能. 此外, 调研表明, 本文所提出的编码超表面结构具有加工可行性, 采用分子束外延法结合金属化工工艺等就能实现 [26, 38]. 另外, 考虑到器件在实际加工中会存在一定的误差, 依次对编码超表面组合结构中的 β 、环宽 a , w , l_x 和 l_y 进行误差分析. 结果表明: 当 β 具有 $\pm 1^\circ$ 的误差, a , w , l_x 和 l_y 分别具有 $\pm 1 \mu\text{m}$ 的误差时, 编码超表面单元在 VO_2 相变前后以及 CP 波和正交 LP 波分别入射时, 其反射幅度以及反射相位均处于误差允许的范围, 对编码超表面性能影响不大, 器件具有一定容差性.

参考文献

- [1] Zi J C, Xu Q, Wang Q, Tian C X, Li Y F, Zhang X X, Han J G, Zhang W L 2018 *Appl. Phys. Lett.* **113** 101104
- [2] Asl A B, Rostami A, Amiri I S 2020 *Opt. Quant. Electron.* **52** 155
- [3] Gauffillet F, Marcellin S, Akmansoy É 2016 *IEEE J. Sel. Top. Quant.* **23** 4700605
- [4] Zhu J F, Ma Z F, Sun W J, Ding F, He Q, Zhou L, Ma Y G 2014 *Appl. Phys. Lett.* **105** 021102
- [5] Xu W D, Xie L J, Zhu J F, Xu X, Ye Z Z, Wang C, Ma Y G, Ying Y B 2016 *ACS Photonics* **3** 2308
- [6] Luo J, Liang J G, Yu Y, Ma H, Yang R S, Fan Y C, Wang G M, Cai T 2020 *Adv. Opt. Mater.* **8** 2000449
- [7] Peng L, Jiang X, Li S M 2018 *Nanoscale Res. Lett.* **13** 385
- [8] Cheng Z Z, Cheng Y Z 2019 *Opt. Commun.* **435** 178
- [9] Zhou C, Peng X Q, Li J S 2020 *Optik* **216** 164937
- [10] Wang L, Gao F, Teng S H, Tan Z G, Zhang X, Lou J, Deng L 2023 *Acta Opt. Sin.* **43** 0324001 (in Chinese) [王玲, 高峰, 滕书华, 谭志国, 张星, 娄军, 邓力 2023 光学学报 **43** 0324001]
- [11] Cui T J, Qi M Q, Wan X, et al. 2014 *Light-sci. Appl.* **3** e218
- [12] Liu S, Zhang L, Yang Q L, et al. 2016 *Adv. Opt. Mater.* **4** 1965
- [13] Cheng J, Li J S 2022 *Opt. Commun.* **524** 128758
- [14] Bai G D, Ma Q, Iqbal S, et al. 2018 *Adv. Opt. Mater.* **6** 1800657
- [15] Zhang P, Li L, Zhang X M, Liu H X, Shi Y 2019 *IEEE Access* **7** 110387
- [16] Guo W L, Wang G M, Luo X Y, Hou H S, Chen K, Feng Y J 2020 *Ann. Phys-berlin.* **532** 1900472
- [17] Liu S, Cui T J, Xu Q, et al. 2016 *Light-sci. Appl.* **5** e16076
- [18] Li J, Li J T, Yang Y, et al. 2020 *Carbon* **163** 34
- [19] Shabanpour J, Sedaghat M, Nayyeri V, Oraizi H, Ramahi O M 2021 *Opt. Express* **29** 14525
- [20] Li J, Yang Y, Li J N, Zhang Y T, Zhang Z, Zhao H L, Li F Y, Tang T T, Dai H T, Yao J Q 2020 *Adv. Theory. Simul.* **3** 1900183
- [21] Lin Q W, Wong H, Huitema L, Crumteanu A 2022 *Adv. Opt. Mater.* **10** 2101699
- [22] Lu C, Lu Q J, Gao M, Lin Y 2021 *Nanomaterials* **11** 114
- [23] Li J, Zhang Y T, Li J N, Yan X, Liang L J, Zhang Z, Huang J, Li J H, Yang Y, Yao J Q 2019 *Nanoscale* **11** 5746
- [24] Wang H, Ling F, Zhang B 2020 *Opt. Express* **28** 36316
- [25] Yu S X, Li L, Shi G M 2016 *Appl. Phys. Express* **9** 082202
- [26] Liu X B, Wang Q, Zhang X Q, et al. 2019 *Adv. Opt. Mater.* **7** 1900175
- [27] Zhao Y C, Zhang Y X, Shi Q W, Liang S X, Huang W X, Kou W, Yang Z Q 2018 *ACS Photonics* **5** 3040
- [28] Shabanpour J 2020 *J. Mater. Chem. C* **8** 7189
- [29] Song Z Y, Wei M L, Wang Z S, Cai G X, Liu Y N, Zhou Y G 2019 *IEEE Photonics J.* **11** 4600607
- [30] Zhang C H, Zhou G C, Wu J B, et al. 2019 *Phys. Rev. Appl.* **11** 054016
- [31] Ran Y Z, Liang J G, Cai T, Li H P 2018 *Opt. Commun.* **427** 101
- [32] Liu S, Cui T J, Zhang L, et al. 2016 *Adv. Sci.* **3** 1600156
- [33] Yu N F, Genevet P, Kats M A, Aieta F, Tettienne J P, Capasso F, Gaburro Z 2011 *Science* **334** 333
- [34] Yu P, Besteiro L V, Huang Y J, et al. 2019 *Adv. Opt. Mater.* **7** 1800995
- [35] Zhang M, Cao M S, Shu J C, Cao W Q, Li L, Yuan J 2021 *Mat. Sci. Eng. R Rep.* **145** 100627
- [36] Liu X, Gao J, Xu L M, Cao X Y, Zhao Y, Li S J 2016 *IEEE*

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

Wang Jing-Li^{1)†} Dong Xian-Chao¹⁾ Yin Liang¹⁾ Yang Zhi-Xiong¹⁾
Wan Hong-Dan¹⁾ Chen He-Ming²⁾ Zhong Kai³⁾

1) (*College of Electronic and Optical Engineering & College of Flexible Electronics (Future Technology), Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China*)

2) (*Bell Honors School, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China*)

3) (*Key Laboratory of the Ministry of Education on Optoelectronic Information Technology, School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

(Received 5 December 2022; revised manuscript received 20 February 2023)

Abstract

Terahertz (THz) wave has the advantages of low photon energy, high resolution, large communication bandwidth, etc. It has broad application prospects in security detection, high-resolution imaging, high-speed communication, and other fields. In recent years, as a new way to control THz wave, THz metasurface functional devices have attracted extensive attention of researchers. In this work, vanadium dioxide (VO₂), a phase change material, is introduced into the coding metasurface. By regulating a circularly polarized wave and the orthogonal linearly polarized waves independently, a multi-function coding metasurface that can work at dual frequency points is obtained. It is composed of three layers. The top layer is a metal-VO₂ composite structure. The middle is a polyimide dielectric layer. The bottom is a metal ground. Under certain conditions, the double split ring resonator (DSRR) and the cross structure in the top layer are relatively independent. Designing the coding sequences for them enable the coding metasurface to have multiple functions. The electromagnetic simulation software CST is used to establish model and conduct simulation, and the obtained results are as follows. When the VO₂ is in an insulating state and a circularly polarized wave at 0.34 THz is incident vertically, the characteristics of coding metasurface elements are mainly affected by the DSRR. The DSRR is rotated to meet the requirements of 3-bit Pancharatnam-Berry phase coding. The coding sequence is designed to generate vortex beams with the topological charge $l = \pm 1$ at a specific angle. The VO₂ state is changed into a metallic state, and the DSRR can be equivalent to a metal ring. When the orthogonal linearly polarized wave at 0.74 THz is incident vertically, the characteristics of coding metasurface elements are mainly affected by the cross structure. Because of its anisotropy, four different 2-bit coding metasurface elements can be obtained respectively by changing the length of the horizontal arm and the vertical arm. The design of appropriate coding sequences can reduce the radar cross section of the x -polarized wave and the beam splitting of the y -polarized wave, and the results have broadband characteristics. Multiple coding sequences can be designed by special characteristics of the coding metasurface, then various expected functions can be realized on the same metasurface. It solves the problem of single function of ordinary metasurface devices to a certain extent, and paves a novel way to the development of THz multi-function systems.

Keywords: terahertz, coding metasurface, vanadium dioxide, multi-function

PACS: 81.05.Xj, 87.50.U–

DOI: 10.7498/aps.72.20222321

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 12174199, 61571237), the Natural Science Foundation of Jiangsu Province, China (Grant Nos. BK20221330, BK20151509), and the Horizontal Program (Study of Multi-Function Terahertz Antennas) (Grant No. 2021external 323).

† Corresponding author. E-mail: jlwang@njupt.edu.cn



基于二氧化钒的太赫兹双频多功能编码超表面

汪静丽 董先超 尹亮 杨志雄 万洪丹 陈鹤鸣 钟凯

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

Wang Jing-Li Dong Xian-Chao Yin Liang Yang Zhi-Xiong Wan Hong-Dan Chen He-Ming Zhong Kai

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 098101 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20222321

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222321>

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>

二氧化钒相变对太赫兹反谐振光纤谐振特性的影响及其应用

Effect of phase transition of vanadium dioxide on resonance characteristics of terahertz anti-resonant fiber and its applications

物理学报. 2021, 70(16): 168701 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210084>

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>

利用连续激光抽运-太赫兹探测技术研究单晶和多晶二氧化钒纳米薄膜的相变

Study of phase transition of single crystal and polycrystalline vanadium dioxide nanofilms by using continuous laser pump-terahertz probe technique

物理学报. 2020, 69(20): 204205 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20201188>

太赫兹频率编码器

Terahertz frequency coding metasurface

物理学报. 2019, 68(10): 104203 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190032>