

面向 6G 通信用于双模式涡旋波产生的可调编码超表面

冯宇杰¹ 曹茂永¹ 王彤灵^{1,2}
FENG Yujie CAO Maoyong WANG Tongling

摘要

近年来,编码超表面因其灵活控制电磁波的能力受到广泛的关注,其为第六代(6G)通信的关键技术——涡旋波的产生与灵活调控提供了创新的解决方案,然而单个超表面在实现多模式及多频段涡旋波方面仍面临较大的挑战。基于此,文章提出了一种基于可调材料二氧化钒(VO₂)与狄拉克半金属(DSM)的可调编码超表面,并将其用于产生双模式涡旋波束。得益于二氧化钒相变特性,可以实现透射与反射工作模式的切换,并可通过调节狄拉克半金属的费米能级实现对编码超表面工作频段的切换。实验证明,所提方案具有可调谐与工作模式可调的优点,在通信领域具有巨大的应用潜力。

关键词

可调编码超表面; 二氧化钒; 狄拉克半金属; 涡旋波束

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2026.06.019

0 引言

涡旋波束因具有独特的螺旋相位结构和轨道角动量(OAM)特性,可作为一种新的复用维度与传统的频率复用、极化复用、码分复用等技术结合,尤其为解决频谱资源紧张、通信容量不足等核心问题提供了全新思路,是 6G 通信技术突破的关键。1992 年,Allen 等^[1]首次证明具有螺旋相位的波束携带轨道角动量,并成功制备出不同模态的涡旋光束。此后,OAM 涡旋光束的制备及相关研究引发学界广泛关注,各类生成方法层出不穷,其中包含模式转换、螺旋相位板以及模式转换等方案,然而这些方法普遍存在带宽窄、集成度低且在太赫兹频段的适用存在空缺等问题。2014 年,Cui 等^[2]在超材料的基础上创造性地提出编码超表面概念,以数字“0”和“1”的编码区分不同相位的亚波长结构单元,通过排列单元调控太赫兹波实现 OAM 涡旋波束的生成。2016 年,Yu 等^[3]设计了一种由三个偶极子构成的编码单元并对其进行排列,首次使用反射型超表面产生了 OAM 涡旋波束。2021 年,孙胜等^[4]设计了一种方环结构的编码单元,按照潘查拉特南-贝里相位排布编码单元实现了整数和分数模式 OAM 涡旋波束的生成。然而以上编码超表面单次仅可生成单模式的 OAM 涡旋波束,具有模式单一的缺点,在充分实现频谱资

源复用方面仍有缺陷。

基于卷积运算和叠加原理,能够同步生成多种模式的 OAM 波的编码超表面被广泛研究。2021 年,He 等^[5]根据光学圆锥透镜和多涡度超表面的概念,实现了不同模态涡旋波束的同步生成与波束数量的调控。2023 年,Tang 等^[6]提出了一种线偏振复用单元,通过对其特定的排列实现多种光束方向和轨道角动量模式的双频带超表面型涡旋光束发生器的设计。然而,以上用于产生多涡旋波束的编码超表面仅能工作在透射或反射工作模式下,且存在工作频段单一的缺点,限制了实际应用中的信息承载能力与动态调控能力,“多模式+多频段”已成为当前编码超表面研究的重要方向。

文中结合二氧化钒与狄拉克半金属,设计了一种能够同步生成双模式涡旋波束的可调编码超表面。基于二氧化钒的相变特性,所设计的编码超表面通过调节二氧化钒的电导率可实现透射与反射工作模式的切换。通过调节狄拉克半金属的费米能级可实现透射工作模式下工作频段的切换,并实现较高反射效率的反射工作模式。仿真结果表明,所提出的可调编码超表面能够在反射与透射工作模式下实现双模式涡旋波束的生成,并可通过调节狄拉克半金属的费米能级实现工作频段的切换,为“多模式+多频段”可调编码超表面的发展提供了新的解决方案。

1 理论

因超表面的编码模式与其远场之间存在一一对应的关系,在垂直入射的情况下,编码超表面的远场散射模式函数可以表示为^[7]:

$$F(\theta, \varphi) = f_{m,n}(\theta, \varphi) \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} A_{m,n} \exp(u) \times \exp(v) \quad (1)$$

1. 齐鲁工业大学(山东科学院)信息与自动化学院
山东济南 250353

2. 齐鲁工业大学(山东科学院)自动化研究所
山东济南 250353

[基金项目] 2024 年度山东省青年科技人才托举工程
(SDAST2024QTB003)

式中： θ 和 φ 分别表示仰角和方位角， $f_{m,n}(\theta, \varphi)$ 表示晶格的模式函数， M 和 N 分别表示沿 x 和 y 方向的单元数量。

$$A_{m,n} = a_{m,n} \exp(i\varphi_{m,n}) \quad (2)$$

$$u = imk_0 P \sin \theta \cos \phi \quad (3)$$

$$v = ink_0 P \sin \theta \sin \phi \quad (4)$$

式中： P 是单元的周期， k_0 是自由空间波矢。

作为最理想的相变材料之一，二氧化钒 (VO_2) 因其能够在金属态和绝缘态之间转换而备受研究关注。在太赫兹波段，二氧化钒的相对介电常数可以通过德鲁德模型来表示^[8]。

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_1 - \frac{\omega_T^2(\sigma_{\text{VO}_2})}{\omega^2 + j\nu\omega} \quad (5)$$

式中：衰减频率 $\nu = 5.75 \times 10^{13} \text{ s}^{-1}$ ，介电常数 $\varepsilon_1 = 12$ 。假设当电导率从 10 S/m 提高到 10^5 S/m 时，二氧化钒会从绝缘态转变为金属态。

狄拉克半金属 (DSM) 也被称为三维石墨烯，具有可调节的电导率和费米能级、高费米速度、高载流子迁移率以及稳定的性能，且易于制备。值得注意的是，通过改变 DSM 的费米能级，可以实现电导率和介电常数的动态调控，可以通过施加栅极偏置电压或碱金属表面掺杂来实现。根据 Kubo–Greenwood 理论框架，狄拉克半金属的动态电导率可表示为^[9]：

$$\varepsilon = \varepsilon_b + i\sigma/\omega \quad (6)$$

作为傅里叶变换最引人注目的特性之一，卷积定理揭示了时域中两个信号的普通乘法运算与其对应的频域中频谱卷积运算之间的等价性，其数学表达式为^[10]：

$$f(t) \cdot g(t) \Leftrightarrow f(\omega) \cdot g(\omega) \quad (7)$$

2 结果与仿真分析

图 1 展示了基于狄拉克半金属与二氧化钒设计的太赫兹可调编码超表面，其充分利用二氧化钒的相变特性，实现了透射与反射模式下双模式涡旋波束的产生。此编码超表面可通过调节二氧化钒的状态进行透射模式与反射工作模式之间切换：当二氧化钒处于绝缘态时，常规入射的左旋圆偏振 (LCP) 光可转换为透射的右旋圆偏振 (RCP) 涡旋光束；当二氧化钒处于金属态时，常规入射的 LCP 光则会转化为反射的 RCP 涡旋光束。并可通过调节狄拉克半金属的费米能级实现工作频点的切换。从放大图中看到，其编码单元结构由五层组成，自上而下分别为：2 μm 的狄拉克半金属层、20 μm 的聚酰亚胺层（相对介电常数

$\varepsilon = 3.5$ ）、0.5 μm 的二氧化钒层、20 μm 的聚酰亚胺层、2 μm 的狄拉克半金属层。编码单元的周期 $P = 80 \mu\text{m}$ ，顶层狄拉克半金属图案外圆半径 $R_1 = 35 \mu\text{m}$ ，内圆半径 $R_2 = 23.3 \mu\text{m}$ ，圆环缺口的宽度 $D = 11.7 \mu\text{m}$ ，矩形的长度 $L_1 = 40 \mu\text{m}$ 。

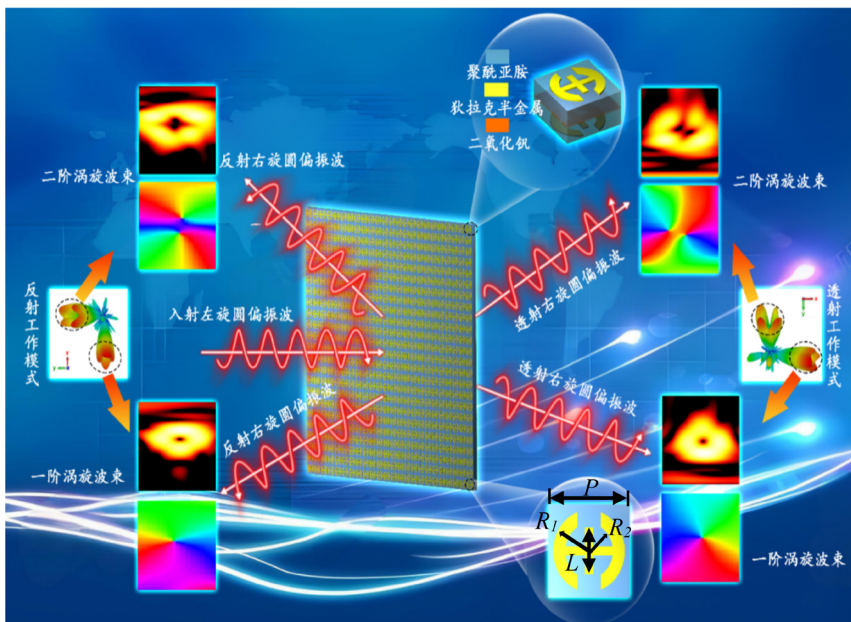


图 1 用于产生双模式涡旋波束的太赫兹可调编码超表面单元、阵列与功能示意图

本工作采用仿真软件 CST Microwave Studio 进行建模和仿真。采用有限元法来计算编码单元，其中开放边界条件沿 z 方向设定，边界条件沿 x 和 y 方向设定。对于超表面阵列，使用时域有限差分法进行计算，其中平面波激励端口设在 z 方向，开放边界条件沿 x 、 y 和 z 方向设定。

根据 Pancharatnam–Berry 相位原理，相位变化可以通过旋转顶层狄拉克半金属层获得，以实现编码单元的 3-bit 编码，其顶部狄拉克半金属图案、单元编号、二进制编号及旋转角度如图 2 所示。

单元	单元1	单元2	单元3	单元4
顶/底部				
单元编号	单元1	单元2	单元3	单元4
二进制编号	000	001	010	011
旋转角度/°	0	30	56	71.5

单元	单元5	单元6	单元7	单元8
顶/底部				
单元编号	单元5	单元6	单元7	单元8
二进制编号	100	101	110	111
旋转角度/°	91	120	145	160.5

图 2 编码单元的旋转角度、俯视图和二进制编号

以旋转角度 $\theta = 0^\circ$ 的编码单元为例，图 3 (a) 展示了所设计的编码单元在透射工作模式和反射工作模式下能够实现

0.85~1.05 THz 工作频段的覆盖, 可以看到工作频段内反射强度与透射强度均超过 0.7, 表明所设计的编码单元具有较高的交叉转换效率, 实现了对入射左旋圆极化波的高效利用。二氧化钒处于绝缘态时编码超表面处于透射工作模式, 当二氧化钒转变为金属态时编码超表面切换为反射工作模式。

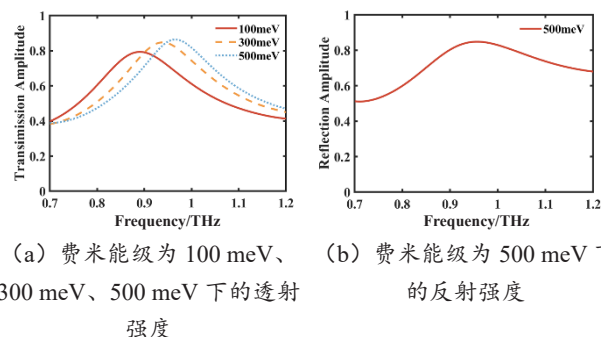


图 3 单元透射反射强度

所设计的具有不同旋转角度的编码单元在费米能级为 100 meV、300 meV、500 meV 下的透射相位分别如图 4(a)(b)(c) 所示, 费米能级为 500 meV 下的反射相位如图 4(d) 所示, 可以看到透射与反射工作模式下各旋转角度的编码单元之间的相位差约为 45° , 相位的覆盖范围约为 315° , 符合 3-bit 编码超表面编码单元的相位条件, 为后续可调编码超表面的设计提供了基础。

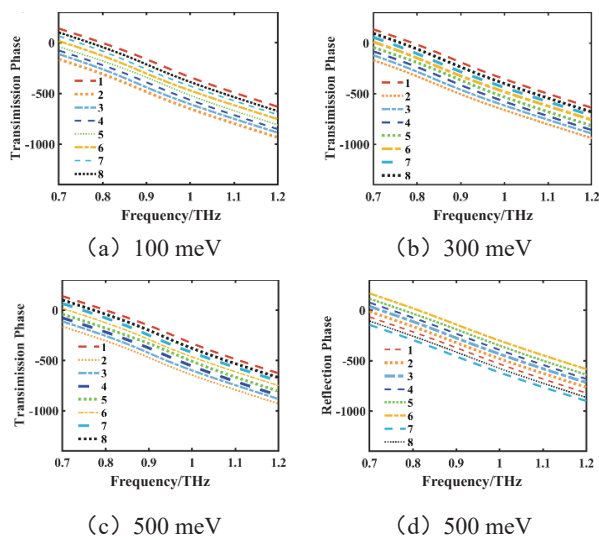


图 4 不同旋转角度的编码单元在不同费米能级下的透射与反射相位

为满足涡旋光束的相位, 各编码单元在 (x, y) 位置的相位分布为:

$$\varphi(x, y) = l \cdot \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right) \quad (8)$$

式中: l 为拓扑电荷, 拓扑电荷 $l=1$ 和 $l=2$ 对应的超表面相位分布如图 5(a)(b) 所示, (c)(d) 为可使波束分别在沿 x 和 y 坐标中方向发生偏转的超表面相位分布, 经过卷积与叠加运算后可得到能够产生双模式涡旋波束的编码超表

面, 其相位分布如图 5(e) 所示。

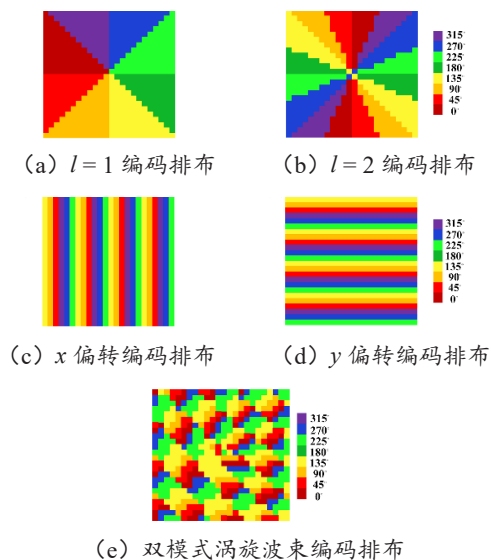


图 5 超表面相位分布

当二氧化钒处于绝缘态时, 编码超表面处于透射工作模式。如图 6(a) 所示, 狄拉克半金属的费米能级为 100 meV 时, 编码超表面能够在 0.85 THz 的 LCP 波的入射下产生拓扑电荷 $l=1$ 和 $l=2$ 的双涡旋波束, 可以看到涡旋波束在 2D 电场图中呈现环状中空甜甜圈形状, 环波束中央一周呈现 2π 和 4π 的相位分布。当狄拉克半金属的费米能级提高到 300 meV 时, 编码超表面的工作频段发生频移, 其能够在 0.95 THz 处产生拓扑电荷 $l=1$ 和 $l=2$ 的双涡旋波束, 如图 6(b) 所示; 当狄拉克半金属的费米能级达到 500 meV 时, 编码超表面的工作频段平移到 1.05 THz, 如图 6(c) 所示。

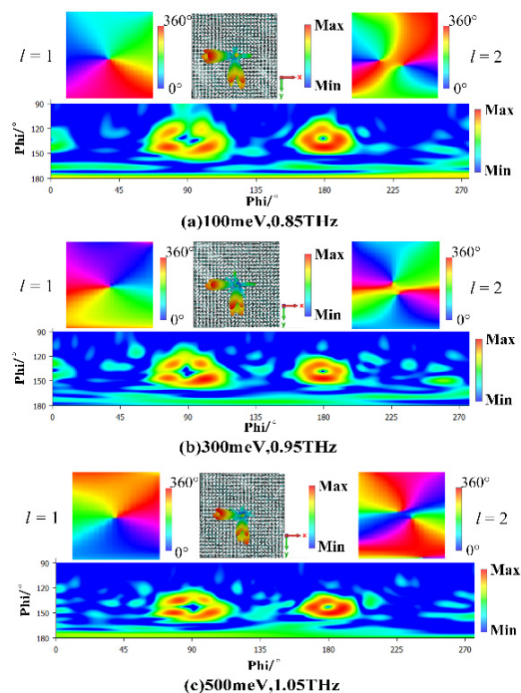


图 6 编码超表面在不同费米能级下的透射远场图、相位图和 2D 电场图

当二氧化钒处于金属态时，编码超表面处于反射工作模式，涡旋波束由反射波产生。如图 7 (a) (b) (c) 所示，当狄拉克半金属的费米能级为 500 meV 时，编码超表面可以在 0.85 THz、0.95 THz、1.05 THz 的 LCP 波的入射下分别产生拓扑电荷 $l=1$ 和 $l=2$ 的双涡旋波束。因此，所设计的编码超表面能够通过调节狄拉克半金属的费米能级和二氧化钒的电导率实现工作频段和透射-反射工作模式的切换，实现“多模式+多频段”的设计。

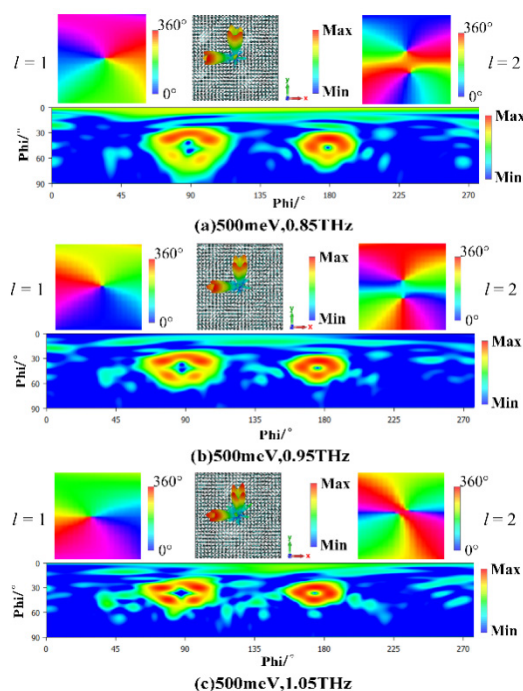


图 7 编码超表面在费米能级为 500 meV 下的反射远场图、相位图和 2D 电场图

3 结论

结合卷积定理和叠加原理排布具有不同旋转角度的编码单元，设计了一种能够产生双模式涡旋波束的编码超表面，其可以分别通过改变狄拉克半金属的费米能级以及二氧化钒的电导率切换工作频率与透射-反射工作模式。从模拟结果可以看到，所提出的可调编码超表面在 LCP 波的入射下可以在透射与反射模式下实现 0.85 THz、0.95 THz、1.05 THz 的双模式涡旋波束。所提出的可调编码超表面实现了多频段与全空间下的双模式 OAM 涡旋波的产生，在促进 6G 通信新技术发展展现出特别的优势与应用潜力。

参考文献:

[1] Allen L, Beijersbergen M W, Spreeuw R J C, et al. Orbital angular momentum of light and the transformation of laguerre-gaussian laser modes[J]. Physical Review A. 1992, 45(11): 8185-8189.

[2] Cui Tiejun, Qi Meiqing, Wan Xiang, et al. Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials[J]. Light: Science & Applications, 2014, 3(10): e218.

[3] Yu Shixing, Li Long, Shi Guangming, et al. Design, fabrication, and measurement of reflective metasurface for orbital angular momentum vortex wave in radio frequency domain[J]. Applied Physics Letters, 2016, 108(12): 1-5.

[4] 孙胜, 阳根均, 沙威. 基于反射超表面的偏馈式涡旋波产生装置[J]. 物理学报, 2021, 70(19): 263-269.

[5] He Xiaoyuan, Yang Yang, Deng Li, et al. 3D printed sub-terahertz all-dielectric lens for arbitrary manipulation of quasi-nondiffractive orbital angular momentum waves[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(17): 20770-20778.

[6] Tang Pengcheng, Zheng Xueqi, Ma Tianyu, et al. Terahertz dual-band dual-polarization 3-Bit coding metasurface for multiple vortex beams generation[J]. Electronics, 2023, 12(8), 1868.

[7] 董妮娅, 闵深澳, 黄琼, 等. 一种宽带几何相位梯度超表面 RCS 缩减研究[J]. 压电与声光, 2025, 47(3): 490-495.

[8] Cao Maoyong, Feng Yujie, Ji Xiang, et al. Vanadium dioxide-based spin-decoupled coding metasurface for holographic imaging and vortex beams in the full-space[J]. Optics Communications, 2025, 592: 132294.

[9] Zhang Huiyun, Huang Jingjing, Tian Meng, et al. 3-bit switchable terahertz coding metasurface based on Dirac semimetals[J]. Optics Communications. 2023, 527: 128958.

[10] Yan Xin, Fei Huai, Zhang Yonggang, et al. Continuous and precise modulation of vortex beams based on terahertz full-space coding metasurface[J]. Optics Express, 2025, 33(7): 11245-11258.

【作者简介】

冯宇杰 (2001—)，男，山东潍坊人，硕士研究生，研究方向：可调编码超表面。

曹茂永 (1964—)，男，山东潍坊人，博士，教授，研究方向：声光电检测及图像处理。

王彤灵 (1992—)，女，山东济南人，博士，副教授，研究方向：太赫兹科学技术，email: wangtl@qlu.edu.cn。

(收稿日期: 2025-10-16 修回日期: 2026-06-11)