

可重构编码超表面实现涡旋波模态切换 与出射角精准调控*

汪静丽^{1)†} 杨影¹⁾ 秦云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)

(2026年1月23日收到; 2026年2月27日收到修改稿)

提出一种四层结构的可重构编码超表面, 用于实现太赫兹频段涡旋波的动态调控. 该超表面由图案化石墨烯贴片、二氧化硅介质层、硅介质层及金属反射层构成. 依据所需的编码序列, 利用现场可编程门阵列在其输出引脚上提供可控的偏置电压从而改变石墨烯的费米能级, 进而改变编码超表面单元的响应特性, 实现拓扑荷数为 $l = -1, l = 1, l = 2, l = 3, l = -1$ 和 $l = 1, l = 1$ 和 $l = 2$ 间的灵活切换. 进一步地, 引入遗传算法对编码超表面的编码序列进行逆向优化, 可实现涡旋波出射角的精确调控. 仿真结果表明, 在 1.1 THz 频率处, 线极化波垂直入射条件下, 所设计的编码超表面能够实现拓扑荷数为 $l = -1, l = 1, l = 2, l = 3, l = -1$ 和 $l = 1, l = 1$ 和 $l = 2$ 间的灵活切换. 此外, 上述涡旋波的出射角均可以精准调控, 在大的出射范围内 ($0^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$, $0^\circ \leq \varphi \leq 360^\circ$), 以任意规定角度出射. 其为实现太赫兹频段的高维信息编码、波前可编程操控及多通道通信系统提供了新思路.

关键词: 编码超表面, 涡旋波, 遗传算法, 石墨烯

DOI: 10.7498/aps.75.20260127

CSTR: 32037.14.aps.75.20260127

1 引言

太赫兹 (terahertz, THz) 涡旋波作为一种携带轨道角动量 (orbital angular momentum, OAM) 的特殊电磁波^[1], 兼具太赫兹波高带宽^[2]、强穿透^[3,4]和高分辨率^[5]等优势. 其相位分布具有 $\exp(il\varphi)$ 形式的螺旋特征 (l 为拓扑荷数, φ 为方位角), 能够携带并提供独立的 OAM 模式自由度, 为信息复用^[6]、高速通信^[7]、无损检测^[8]和超分辨成像^[9]等前沿领域带来了新的发展契机.

近年来, 利用超表面对电磁波波前进行调控

已成为热点^[10-14], 而 THz 涡旋波的产生与调控是该领域的研究方向之一. 早期对 THz 涡旋波的研究主要聚焦于单模态涡旋波的产生与拓扑荷数调控^[15-17]; 之后可调材料 (如液晶、石墨烯等) 的引入实现了单一模态涡旋波间的切换与可重构调控^[18-20], 但是仍局限于单模态. 随着 THz 波在高容量通信与多通道信息复用中应用需求的增长, 研究重点逐步转向多模态涡旋波的产生、切换及出射角的联合控制. 其中, 已报道的 THz 多模态涡旋波生成^[21-23]多依赖静态参数设计, 难以实现多模态间的动态切换; 同时, 由于 THz 涡旋波出射角 (出射角由其俯仰角 (θ) 与方位角 (φ) 共同决定) 的固

* 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)、武汉光电国家研究中心开放基金 (批准号: 2022WNLOKF012) 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

定, 进一步限制了波前调控的灵活性. 为实现多模态涡旋波间的动态控制, 研究人员展开了更深入的探索. 2021 年, Li 和 Chen^[24] 设计的多功能 THz 编码超表面可在不同极化波入射时, 实现由 $l = \pm 1$ 的多模态涡旋波转变为 $l = \pm 2$ 的太赫兹多模态涡旋波. 2024 年, Zhang 等^[25] 基于二氧化钒设计透反转换的 THz 编码超表面, 在透射与反射的状态下, 均生成 $l = -1$ 和 $l = 2$ 的多模态涡旋波. 同年 Liang 和 Dai^[26] 基于光敏硅设计的可重构 THz 编码超表面, 实现从 $l = 2$ 和 $l = 3$ 的多模态涡旋波转变为 $l = -2$, $l = 3$, $l = 2$ 和 $l = 1$ 的多模态涡旋波. 然而, 上述研究仍缺乏对太赫兹涡旋波出射角的有效调控. 2023 年, Tang 等^[27] 基于光束偏振特性设计的 THz 编码超表面, 实现了 THz 涡旋波模态与角度的切换, 即 y 极化波入射时生成出射角为 12.1° , $l = 1$ 和 $l = -1$ 的多模态涡旋波, x 极化波入射时转化为出射角为 16.5° , $l = 1$ 和 $l = -2$ 的多模态涡旋波. 2025 年, 孙文俊等^[28] 提出了一种基于多种可调材料的 THz 相位梯度编码超表面, 通过改变材料状态, 实现了 16° , 20° 和 28° 三种固定出射角下的多模态涡旋波生成, 实现了角度可控, 但其调节角度有限且模态固定. 同年, Chen 等^[29] 基于液晶拓扑优化的宽带偏振无关 THz 可重构编码超表面, 在一定的出射角范围 ($0^\circ \leq \theta \leq 35^\circ$, $0^\circ \leq \varphi \leq 360^\circ$) 内, 实现对 $l = -1$ 与 $l = 2$ 两种模态涡旋波出射角的动态调控, 但其可调角度范围仍较小, 难以覆盖更宽的出射方向.

综上, 目前多模态涡旋波的调控存在模态切换灵活性不足、出射角调控范围较小、难以实现精准控制等问题. 基于此, 本文提出了一种基于石墨烯的反射型可重构编码超表面. 通过施加外部偏置电压调控石墨烯贴片的费米能级 E_F , 使得表面电导率连续可调, 从而实现六种涡旋波模态 (四种单模态涡旋波 $l = -1$, $l = 1$, $l = 2$, $l = 3$ 与两种多模态

涡旋波 $l = -1$ 和 $l = 1$, $l = 1$ 和 $l = 2$) 间的灵活切换. 并结合遗传算法对编码超表面的相位分布进行优化, 可在较大角度范围内 $0^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$, $0^\circ \leq \varphi \leq 360^\circ$, 实现对涡旋波出射角的精准调控.

2 编码超表面单元设计

在编码超表面中, 单元结构需要具备灵活的调控能力, 以实现电磁波的精确控制. 石墨烯的引入使得构建可重构编码超表面单元成为可能. 本文设计的编码超表面单元采用四层结构, 如图 1 所示, 周期长度 $P = 80 \mu\text{m}$, 自下而上的第一层是厚度为 $t = 0.2 \mu\text{m}$ 的金反射层, 其电导率为 $\sigma_{\text{Au}} = 4.56 \times 10^7 \text{ S/m}$; 第二层是厚度为 $h_2 = 13 \mu\text{m}$ 的硅 (Si) 介质层, 其相对介电常数 $\epsilon_r = 11.9$; 第三层是厚度为 $h_1 = 13 \mu\text{m}$ 的二氧化硅 (SiO_2) 介质层, 其相对介电常数 $\epsilon_r = 3.75$, 损耗正切 $\tan \delta = 0.004$; 最顶层为图案化石墨烯贴片, 经过大量仿真和结构优化, 结果表明: 采用该图案的石墨烯结构可同时满足相位的调控需求与较高的反射幅度, 以及便于通过离子凝胶门控实现较均匀的偏置与稳定电接触. 其中外圆环的外半径和内半径分别为 $R_1 = 36 \mu\text{m}$ 和 $R_2 = 31.5 \mu\text{m}$, 内侧圆半径 $R_3 = 22.5 \mu\text{m}$, $d = S = 9 \mu\text{m}$, $g = 9.1 \mu\text{m}$. 为实现对石墨烯的有效调控, 在其表面覆盖一层厚度为 $1 \mu\text{m}$ 、相对介电常数 $\epsilon_r = 1.82$ 的离子凝胶层^[30], 使得在较低栅压下即可实现对石墨烯 E_F 的调控.

随着离子凝胶的引入, 施加偏置电压 V_g 可在石墨烯与离子凝胶界面形成电双层 (electric double layer, EDL), 从而在低电压条件下显著调制石墨烯的载流子浓度 n , 并进一步改变其 E_F ^[31,32]. E_F 和 n 之间的关系可表示为^[30]

$$E_F \approx \hbar v_F \sqrt{\pi |n|}, \quad (1)$$

其中 v_F 为石墨烯中的费米速度, 约为 $1.1 \times 10^6 \text{ m/s}$;

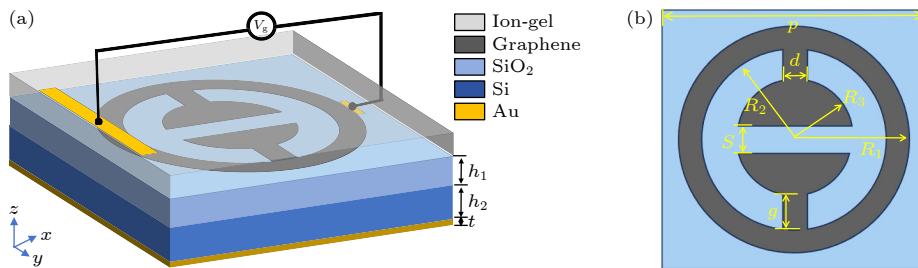


图 1 编码超表面单元结构图 (a) 立体图; (b) 俯视图

Fig. 1. Structure diagram of coding metasurface unit: (a) Stereoscopic view; (b) top view.

$\hbar$ 为约化普朗克常数. 而 n 与偏置电压 V_g 的关系为 $n = \sqrt{n_0^2 + \alpha^2 |V_g - V_D|^2}$, 其中 n_0 为残余载流子浓度, α 为控制电压门的电容率 (与电极的配置相关), V_D 为狄拉克点对应的补偿电压. 已有研究表明: 离子凝胶栅控可将石墨烯的 n 连续调制至 10^{14} cm^{-2} 量级^[33,34], 由 (1) 式可知, 本文所需 0—1 eV 的 E_F 连续可控调节是可实现的, 这为编码超表面单元电磁响应的可重构性提供了物理基础. 在太赫兹频段内, 石墨烯的表面电导率 $\sigma(\omega)$ 可采用类 Drude 模型描述^[35]:

$$\sigma(\omega) = \frac{2e^2 k_B T}{\pi \hbar^2} \ln \left[2 \cosh \left(\frac{E_F}{2k_B T} \right) \right] \frac{i}{\omega + i\tau^{-1}}, \quad (2)$$

其中 ω 为角频率; e 为元电荷; k_B 为玻尔兹曼常数; τ 为弛豫时间, 本文取环境温度 $T = 300 \text{ K}$ 且 $\tau = 4 \text{ ps}$ ^[36]. 由 (2) 式可知, $\sigma(\omega)$ 与 E_F 密切相关, 因此可通过调节 V_g 间接调控 $\sigma(\omega)$, 从而实现了对编码超表面单元反射幅度和反射相位的动态可重构调制. 值得一提的是, 本文基于 CST Microwave Studio 仿真软件内置材料库所提供的材料模型^[37], 可直接导入可调材料石墨烯, 便捷地设定其关键参数, 同时结合 Matlab 进行联合仿真, 实现不同模式涡旋波的切换.

基于上述理论, 利用 CST Microwave Studio 对图 1 所示的编码超表面单元的电磁特性进行仿真分析. 论文拟采用 3-bit 编码超表面, 与常见 1-bit 和 2-bit 编码超表面相比, 其相位量化更细,

更有利于获得目标涡旋波及其向目标角度进行精准出射. 仿真中在 x 与 y 方向设置周期性边界条件, 在 z 方向设置开放边界条件. 经参数优化后, 获得满足 3-bit 编码相位需求的八个编码超表面单元, 其对应石墨烯 E_F 分别为 0, 0.125, 0.2, 0.275, 0.35, 0.475, 0.675, 1 eV. 经相位归一化处理, 依次命名为 0—7, 如表 1 所列. 在 0.9—1.3 THz 频率范围内, 当线极化 (linearly polarized, LP) 波垂直入射时, 其仿真结果如图 2 所示. 在 1.1 THz 频率下, 其反射相位覆盖 0— 2π 范围, 相邻相位差约为 45° , 且反射幅度始终保持在 0.8 以上, 表明 3-bit 编码超表面单元具有良好的相位可调性和稳定的反射效率.

3 编码超表面实现涡旋波模态的调控

编码超表面由若干具有特定相位响应的编码超表面单元按照一定的编码序列排布所构成. 本文采用 32×32 个如图 1 所示的 3-bit 编码超表面单元构建组成编码超表面, 如图 3 所示. 为实现对各编码超表面单元相位的可编程调控, 采用现场可编程门阵列 (field programmable gate array, FPGA) 作为控制核心, 通过其输出端口提供可控偏置电压并对编码超表面单元进行寻址驱动^[35,38], 实现不同编码序列的切换, 从而实现太赫兹涡旋波模态以及出射角度的可重构调控.

表 1 在 0.9—1.3 THz 频率下, 3-bit 编码超表面单元的参数

Table 1. Parameters of a 3-bit coding metasurface unit cell in the 0.9–1.3 THz band.

编码单元	0	1	2	3	4	5	6	7
E_F/eV	0	0.125	0.2	0.275	0.35	0.475	0.675	1
归一化相位/ $^\circ$	0	45	90	135	180	225	270	315

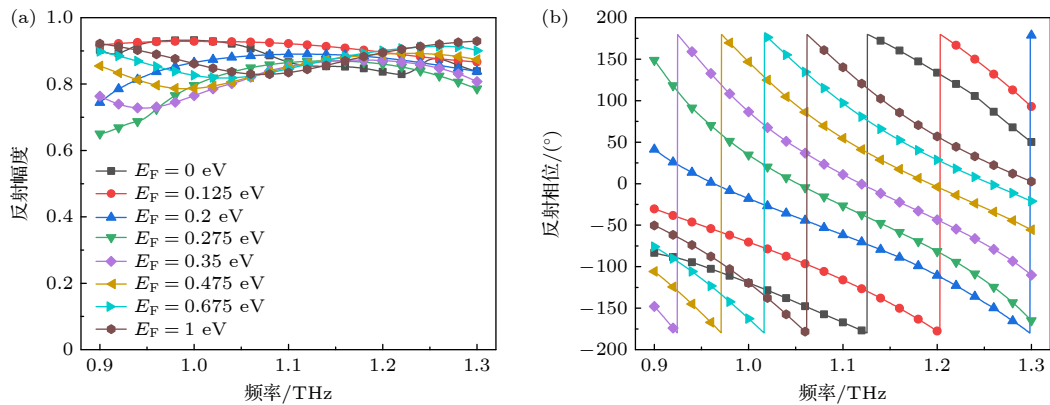


图 2 LP 波垂直入射下 3-bit 编码超表面单元的 (a) 反射幅度和 (b) 反射相位

Fig. 2. Under normal incidence of a linearly polarized wave, (a) reflection magnitude and (b) reflection phase of the 3-bit coding metasurface unit cell.

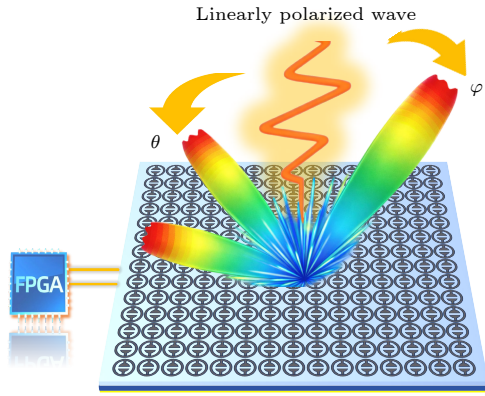


图 3 可重构的编码超表面示意图

Fig. 3. Schematic diagram of reconfigurable encoding metasurface.

不同拓扑荷数的涡旋波对应特定的空间相位分布. 通过合理设计编码序列, 结合 FPGA 对其进行动态切换, 可在同一编码超表面结构上实现多种相位分布, 进而生成不同模式的太赫兹涡旋波. 空间相位分布可表示为^[39]

$$\psi(m, n) = l \cdot \arctan(n/m), \quad (3)$$

其中 (m, n) 为编码超表面单元在平面内的坐标. 依据 (3) 式, 本文首先设计拓扑荷数为 $l = -1$, $l = 1$, $l = 2$ 和 $l = 3$ 的四种单模态涡旋波的编码序列, 如图 4(a)—(d) 所示. 其次, 引入傅里叶卷积运算与叠加原理, 通过对不同单模态涡旋波的编码序列进行卷积组合, 获得关于 x - z 平面对称的 $l = -1$ 和 $l = 1$ 以及 $l = 1$ 和 $l = 2$ 两种多模态涡旋波, 其

对应的编码序列如图 4(e) 和图 4(f) 所示. 按照前文所述, 每一种编码序列均可通过 FPGA 调控各编码超表面单元的偏置电压获得; 而随着外加电压按照图 4 所示的六种编码序列进行逐一配置时, 即可实现不同模态涡旋波间的灵活切换. 这六种不同模态的涡旋波所对应的远场散射图如图 5 所示 (插图为相位分布). 远场散射分布显示所得涡旋波均呈现中心场强接近零、外围环形能量分布为典型“甜甜圈”形态, 且相位分布保持连续螺旋特征, 与理论设计高度一致. 表明所设计的可重构编码超表面不仅能够生成不同模态涡旋波, 还可通过电调方式实现模态间的灵活切换. 此外, 也计算了六种不同模态的涡旋波所对应的模式纯度. 所实现的单模态涡旋波其模式纯度均高于 73%, 其中 $l = 1$ 的涡旋波其模式纯度达 78.1%; 同时多模态涡旋波其模式纯度也均高于 63%.

4 遗传算法对涡旋波出射角的调控与仿真

前文通过编码序列设计和 FPGA 辅助电压动态调控, 实现了不同单模态和多模态涡旋波的动态生成与切换. 然而, 上述所实现的涡旋波的出射角度都是固定的, 难以按照预期的目标角度出射. 为进一步提升可重构编码超表面对涡旋波出射角度的可控性, 本文在此基础上引入遗传算法对编码序列进行智能优化, 以实现涡旋波按照特定的出射

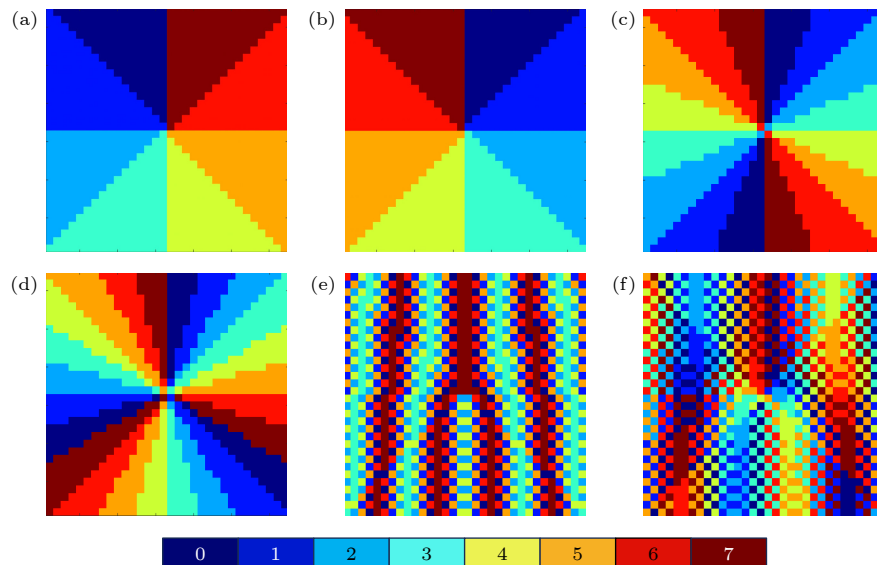


图 4 涡旋波的编码序列 (a) $l = -1$; (b) $l = 1$; (c) $l = 2$; (d) $l = 3$; (e) $l = -1$ 和 $l = 1$; (f) $l = 1$ 和 $l = 2$

Fig. 4. Encoding sequence of vortex waves: (a) $l = -1$; (b) $l = 1$; (c) $l = 2$; (d) $l = 3$; (e) $l = -1$ and $l = 1$; (f) $l = 1$ and $l = 2$.

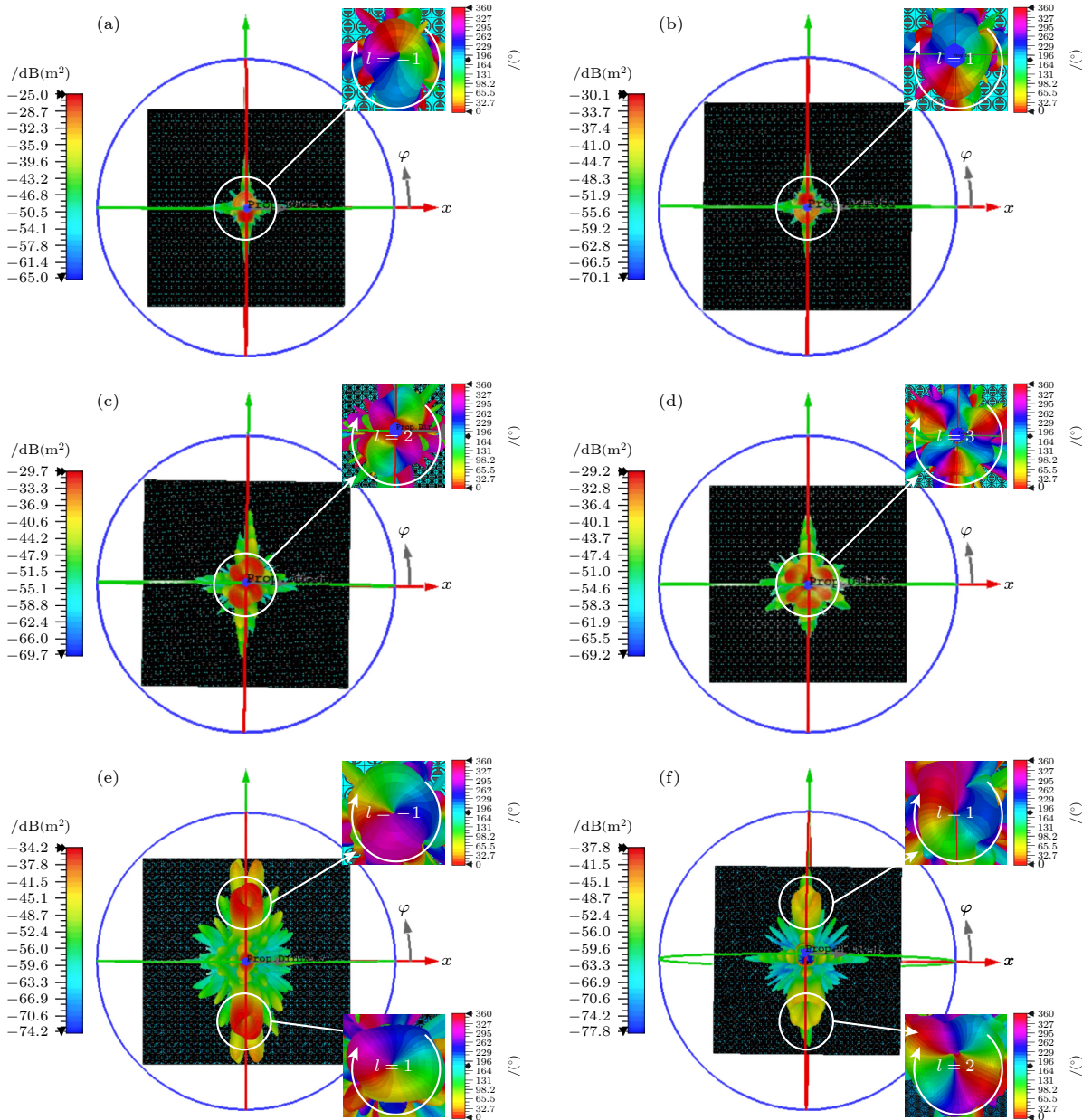


图 5 涡旋波的远场散射图 (插图为相位分布) (a) $l = -1$; (b) $l = 1$; (c) $l = 2$; (d) $l = 3$; (e) $l = -1$ 和 $l = 1$; (f) $l = 1$ 和 $l = 2$

Fig. 5. Far-field scattering patterns of vortex waves (illustrated as phase distribution): (a) $l = -1$; (b) $l = 1$; (c) $l = 2$; (d) $l = 3$; (e) $l = -1$ and $l = 1$; (f) $l = 1$ and $l = 2$.

角度精准出射. 该算法是一种基于生物进化机制的全局优化方法, 能够在离散解空间中高效搜索最优解. 优化流程如图 6(a) 所示: 首先, 根据设定的目标出射角参数 (θ 与 φ), 初始化种群信息, 设置种群规模, 并随机生成初始编码序列. 随后通过计算每个个体在目标出射角度上的远场辐射特性对其适应度进行评估, 并依据适应度值执行选择、交叉与变异等操作, 从而在迭代过程中不断生成更优的编码序列.

具体优化过程中, 以目标出射角度处远场模式

的幅度作为优化目标, 其远场模式 (即阵列因子) 可表示为^[40]

$$F(\theta, \varphi) = \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N \exp(-i\{\phi(m, n) + k_0 D \sin \theta \times [(m-1/2) \cos \varphi + (n-1/2) \sin \varphi]\}), \quad (4)$$

式中, k_0 为传播常数, D 为单元间距 (即上文中的单元周期 P), $\phi(m, n)$ 为第 (m, n) 个编码超表面单元的反相位. 本文采用离散相位编码的遗传算法对编码序列进行优化, 最大迭代次数设为 1000. 在

编码超表面可实现的出射角度范围内, 对于设定的 θ 与 φ , 随着迭代次数的增加, 适应度函数呈现逐渐收敛最终趋于稳定的趋势, 其收敛过程均与图 6(b) 类似, 此时遗传算法能够生成满足目标出射角度要求的最优编码序列, 从而实现涡旋波按预期目标角度方向精准出射. 将该编码序列导出并结合 Matlab 与 CST 进行联合仿真, 从而实现涡旋波在任意目标角度的精准出射.

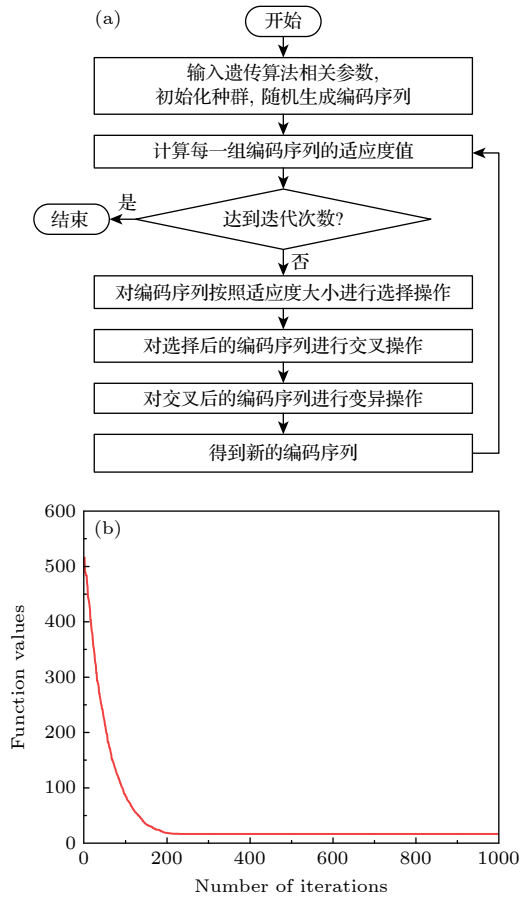


图 6 遗传算法优化 (a) 流程图; (b) 收敛特性
Fig. 6. Genetic algorithm optimization: (a) Flowchart; (b) convergence characteristics.

基于此, 对上文提及的六种涡旋波进行了大量仿真, 结果表明: 所设计的可重构编码超表面不仅能够实现 $l = -1, l = 1, l = 2, l = 3, l = -1$ 和 $l = 1, l = 1$ 和 $l = 2$ 六种模态涡旋波间的灵活切换, 且在任一模态下, 其出射角度均可在 $0^\circ \leq \theta \leq 60^\circ, 0^\circ \leq \varphi \leq 360^\circ$ 大角度范围内实现任意角度的精准出射. 而具有大角度调控能力的主要原因在于: 编码超表面单元在工作频点处的反射幅度均高于 0.8, 且幅值差异较小, 从而在不同出射角下保证了波前相位的连续性与能量一致性, 有效地抑制了传统结构在大角度偏转时常见的波束畸变与能量损失问题.

为具体展示出射角调控效果, 从上述六种模态中任意选取四个 (两种单一模态: $l = 1, l = 2$, 两种多模态: $l = 1$ 和 $l = -1, l = 1$ 和 $l = 2$), 随机设置不同的出射角度, 数据如表 2 所列, 并通过遗传算法对输入的目标角度进行优化, 获得对应的最优编码序列, 分别如图 7(a)–(d) 所示.

表 2 不同模态涡旋波的出射角度

Table 2. Emission angles of vortex waves with different modes.

涡旋波 模态(l)	单一模态		多模态			
	1	2	1和-1		1和2	
			1	-1	1	2
$\theta/(\circ)$	60	45	50	50	35	60
$\varphi/(\circ)$	50	150	50	330	10	90

仿真结果如图 8 所示, 给出了在 1.1 THz LP 波垂直入射时, 不同模态、不同出射角涡旋波的远场散射图 (插图相位分布) 及其对应的角度方向图. 从图 8 可以看出: 无论是单模态涡旋波 ($l = 1, l = 2$) 还是多模态涡旋波 ($l = 1$ 和 $l = -1, l = 1$ 和 $l = 2$), 其均能够按照一定的角度出射, 即主瓣偏转效果明显, 旁瓣抑制效果良好; 同时均保持了

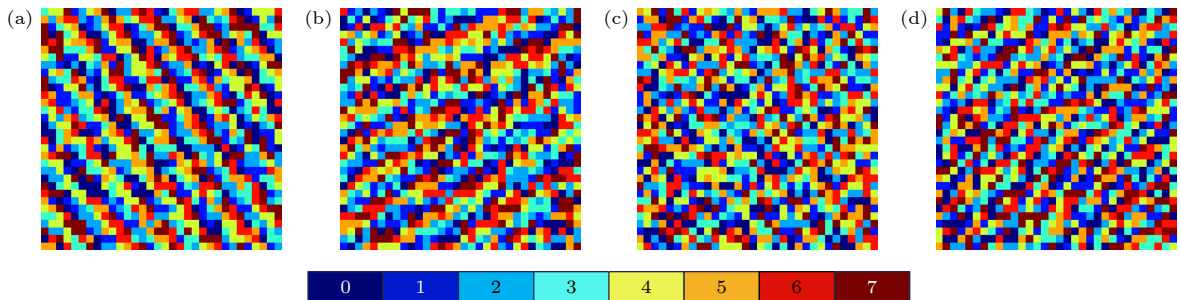


图 7 不同模态涡旋波以不同目标角度出射时的编码序列 (a) $l = 1$; (b) $l = 2$; (c) $l = -1$ 和 $l = 1$; (d) $l = 1$ 和 $l = 2$
Fig. 7. Coding sequences for vortex waves of different modes radiating at various target angles: (a) $l = 1$; (b) $l = 2$; (c) $l = -1$ and $l = 1$; (d) $l = 1$ and $l = 2$.

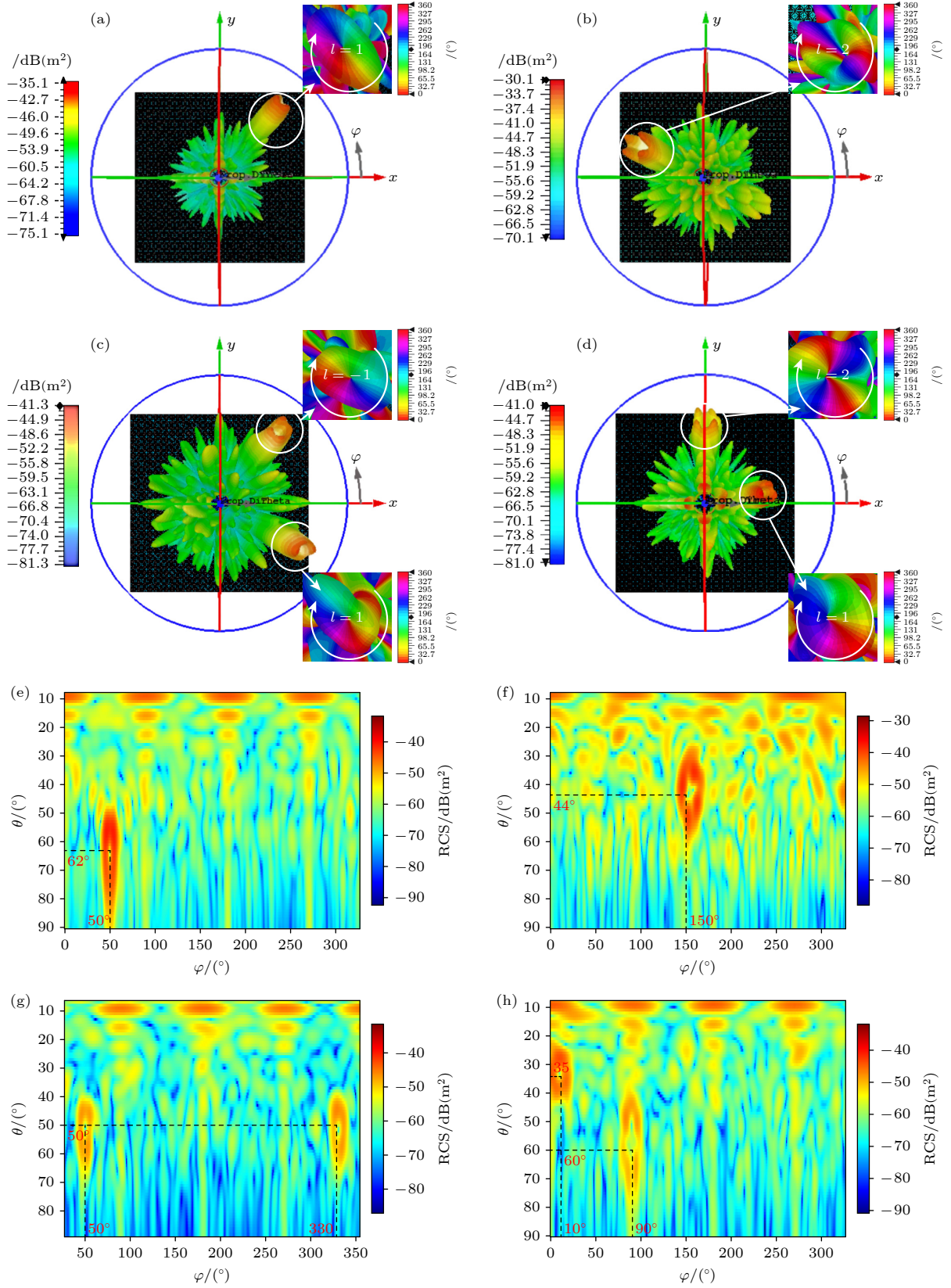


图 8 涡旋波的 (a)–(d) 远场散射图 (插图为相位分布) 与 (e)–(h) 角度方向图 (a), (e) $l = 1$; (b), (f) $l = 2$; (c), (g) $l = -1$ 和 $l = 1$; (d), (h) $l = 1$ 和 $l = 2$

Fig. 8. (a)–(d) Far field scattering diagram and (e)–(h) angle direction diagram of vortex waves (illustrated as phase distribution): (a), (e) $l = 1$; (b), (f) $l = 2$; (c), (g) $l = -1$ and $l = 1$; (d), (h) $l = 1$ and $l = 2$.

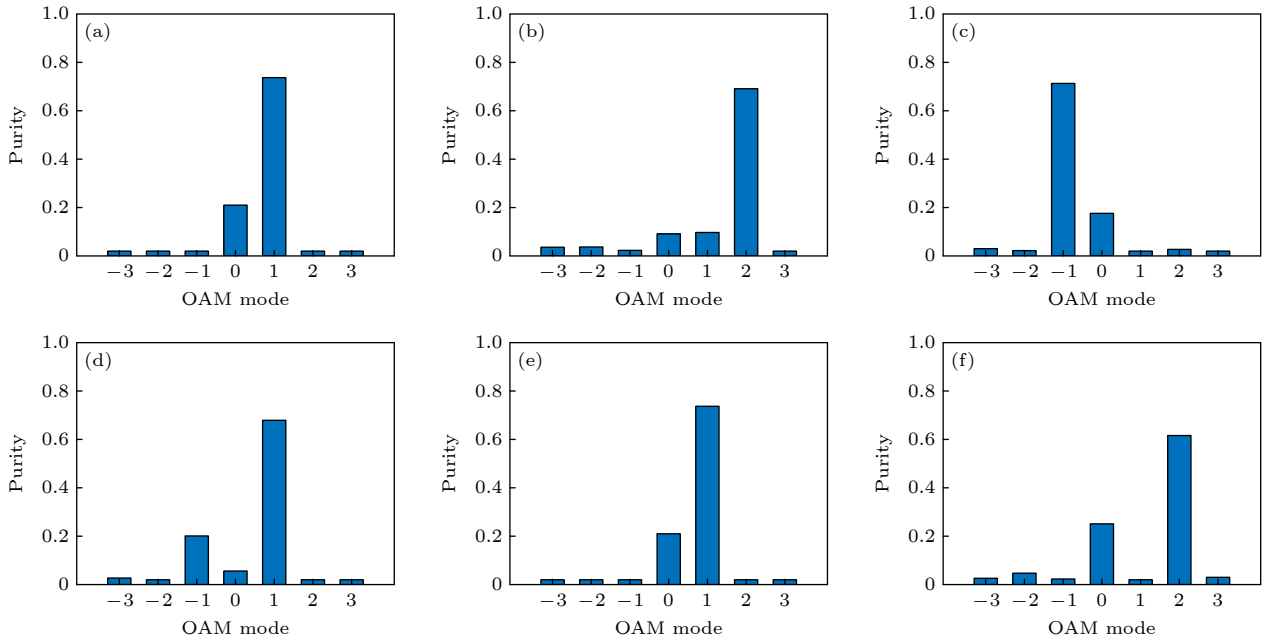


图9 涡旋波的模式纯度 (a) $l=1$; (b) $l=2$; (c) $l=-1$ 和 $l=1$ 中的 $l=-1$; (d) $l=-1$ 和 $l=1$ 中的 $l=1$; (e) $l=1$ 和 $l=2$ 中的 $l=1$; (f) $l=1$ 和 $l=2$ 的 $l=2$

Fig. 9. Mode purity of vortex waves: (a) $l=1$; (b) $l=2$; (c) $l=-1$ in the case of $l=-1$ and $l=1$; (d) $l=1$ in the case of $l=-1$ and $l=1$; (e) $l=1$ in the case of $l=1$ and $l=2$; (f) $l=2$ in the case of $l=1$ and $l=2$.

良好的环形能量分布, 由插图可见其相位分布均呈现连续螺旋分布, 这表明涡旋波的模式在偏转过程中保持良好. 同时计算了所生成的涡旋波的模式纯度, 如图9所示, $l=1$ 、 $l=2$, $l=1$ 和 $l=-1$, $l=1$ 和 $l=2$ 模式纯度均高于 61%, 其中 $l=1$ 的涡旋波的模式纯度达 73.7%. 相较于垂直出射的涡旋波, 偏转出射的涡旋波模式纯度均有所降低, 其主要原因在于实现较大出射角时需要叠加更强的线性相位梯度, 从而加剧了离散相位量化误差对目标模式的影响. 此外, 进一步将仿真计算而来的涡旋波出射角度与表2中所设置的目标出射角度进行对比, 发现两者吻合度高 (对于 $l=1$ 的涡旋波其目标角度为 $\theta=60^\circ$, $\varphi=50^\circ$, 仿真结果为 $\theta=62^\circ$, $\varphi=50^\circ$; 对于 $l=2$ 的涡旋波其目标角度为 $\theta=45^\circ$, $\varphi=150^\circ$, 仿真结果为 $\theta=44^\circ$, $\varphi=150^\circ$; 对于 $l=1$ 和 $l=-1$ 以及 $l=1$ 和 $l=2$ 这两种多模态涡旋波, 其目标角度与仿真结果完全一致). 综上所述, 无论是单模态还是多模态涡旋波均可在 $0^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$, $0^\circ \leq \varphi \leq 360^\circ$ 大角度范围内实现精准出射, 且效果均较为明显.

5 结 论

本文基于石墨烯的电可调特性, 提出了一种工

作于太赫兹频段的 3-bit 可重构编码超表面. 通过调节 E_F , 对编码超表面单元反射相位进行动态调控, 并结合 FPGA 系统实现编码超表面编码序列的实时转换, 从而实现不同模态涡旋波间的灵活切换. 当 1.1 THz 的 LP 波垂直入射时, 依据所设计的编码序列, 编码超表面能够实现 $l=-1$ 、 $l=1$ 、 $l=2$ 、 $l=3$, $l=-1$ 和 $l=1$, $l=1$ 和 $l=2$ 六种模态涡旋波之间的灵活转变. 同时, 无论是单模态还是多模态涡旋波, 结合遗传算法均可在 $0^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$, $0^\circ \leq \varphi \leq 360^\circ$ 宽角度范围内实现任意角度的精准出射. 所提出的方法不仅突破了传统结构在涡旋波模态切换和出射角固定上的限制, 同时兼具灵活性与高精度, 可为太赫兹波前可编程调控、轨道角动量复用及大容量通信提供新的设计思路与参考. 此外, 随着石墨烯编码超表面的制备工艺的发展, 本文所提出的器件可采用化学气相沉积 [41,42] 等方法实现加工制备, 具有一定的实用性.

参考文献

- [1] Allen B, Tennant A, Bai Q, Chatziantoniou E 2014 *Electron. Lett.* **50** 232
- [2] Kleine-Ostmann T, Nagatsuma T 2011 *J. Infrared Millimeter Terahertz Waves* **32** 143
- [3] Chen Z, Ma X Y, Zhang B, Zhang Y X, Niu Z Q, Kuang N Y, Chen W J, Li L X, Li S Q 2019 *Chin. Commun.* **16** 1

- [4] Yang Q, Qin Y L, Zhang K, Deng B, Wang X Y, Wang H Q 2017 *Microwave Opt. Technol. Lett.* **59** 2048
- [5] Kemp M C 2011 *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* **1** 282
- [6] Chen R, Zhou H, Moretti M, Wang X D, Li J D 2020 *IEEE Commun. Surv. Tutorials* **22** 840
- [7] Ma Y, Zheng Z Y, Li R P, Guo X Y, Zhang Z, Guo J Q 2024 *Chin. J. Lasers* **51** 1801018 (in Chinese) [马勇, 郑佐月, 黎人博, 郭晓越, 张振, 郭俊启 2024 *中国激光* **51** 1801018]
- [8] Yang X, Wu T, Zhang L, Yang D, Wang N N, Song B, Gao X B 2019 *Signal Process.* **160** 202
- [9] Cao B H, Zhang Y M, Fan M B, Sun F S, Liu L 2022 *Chin. Opt.* **15** 405 (in Chinese) [曹丙花, 张宇盟, 范孟豹, 孙凤山, 刘林 2022 *中国光学* **15** 405]
- [10] Cui T J, Qi M Q, Wan X, Zhao J, Cheng Q 2014 *Light Sci. Appl.* **3** e218
- [11] Cui T J, Liu S, Li L L 2016 *Light Sci. Appl.* **5** e16172
- [12] Wu M Z, He X J, Lu G J, Zhang Y, Geng Z X, Liu H, Zhang K 2026 *Laser Photonics Rev.* **20** e01634
- [13] Yao B S, Zang X F, Zhu Y, Yu D H, Xie J Y, Chen L, Han S, Zhu Y M, Zhuang S L 2021 *Photon. Res.* **9** 1019
- [14] He X J, Wu M Z, Lu G J, Zhang Y, Geng Z X 2025 *Photonics Res.* **13** 976
- [15] Minasyan A, Trovato C, Degert J, Freysz E, Brasselet E, Abraham E 2017 *Opt. Lett.* **42** 41
- [16] Liu K T, Liu X, Ge Y H, Pu J X 2019 *Acta Opt. Sin.* **39** 0126016 (in Chinese) [刘凯婷, 刘鑫, 葛悦禾, 蒲继雄 2019 *光学学报* **39** 0126016]
- [17] 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]
- [18] Jiang C Y, Li Z K, Lv X Y, Tian M, Liu M, Zhang H Y, Zhang Y P 2023 *Opt. Commun.* **540** 129506
- [19] Zhang Y G, Huai F, Liang L J, et al. 2024 *Appl. Opt.* **63** 7079
- [20] Zhou Z K, Song Z Y 2022 *Opt. Laser Technol.* **153** 108278
- [21] Chen C, Gao P, Dai Y W, Wang X Y, Liu H 2024 *Opt. Laser Technol.* **172** 110480
- [22] Liu W Y, Yang Q L, Xu Q, Jiang X H, Wu T, Gu J Q, Han J G, Zhang W L 2022 *Nanophotonics* **11** 3631
- [23] Zhao H, Quan B G, Wang X K, Gu C Z, Li J J, Zhang Y 2018 *ACS Photonics* **5** 1726
- [24] Li J S, Chen J Z 2021 *Opt. Express* **29** 27332
- [25] Zhang H Y, Sang X T, Li Z K, Wang K, Lv X Y, Jiang C Y, Sun X Z, Meng L H, Zhang Y P 2024 *Opt. Commun.* **558** 130371
- [26] Liang J J, Dai M 2024 *AIP Adv.* **14** 075022
- [27] Tang P C, Zheng X Q, Ma T Y, Cheng G, Wu G H, Bao X E, Sun H J, Ding J, Si L M 2023 *Electronics* **12** 1868
- [28] Sun W J, Wang J L, Yang Y, Wan H D, Chen H M, Zhong K 2025 *Acta Opt. Sin.* **45** 1523002 (in Chinese) [孙文俊, 汪静丽, 杨影, 万洪丹, 陈鹤鸣, 钟凯 2025 *光学学报* **45** 1523002]
- [29] Chen Y, Cao W H, Li J Q, Zhang M Z, Du X Y, Gao D S, Li P L 2025 *Chin. Phys. B* **34** 044205
- [30] Li H, Zheng C L, Xu H, Li J, Song C Y, Yang F, Yao J, Li J T, Shi W, Zhang Y T, Yao J Q 2023 *Opt. Laser Technol.* **159** 108986
- [31] Lee S H, Choi M, Kim T T, et al. 2012 *Nat. Mater.* **11** 936
- [32] Yao Y, Kats M A, Genevet P, Yu N F, Song Y, Kong J, Capasso F 2013 *Nano Lett.* **13** 1257
- [33] Efetov D K, Kim P 2010 *Phys. Rev. Lett.* **105** 256805
- [34] Chen C F, Park C H, Boudouris B W, et al. 2011 *Nature* **471** 617
- [35] Li X B, Lu W B, Liu Z G, Chen H 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 184101 (in Chinese) [李小兵, 陆卫兵, 刘震国, 陈昊 2018 *物理学报* **67** 184101]
- [36] Zainud-Deen A S, Malhat H A, Sebak A R, Badawy M M 2024 *Opt. Quantum Electron.* **56** 1117
- [37] Xiao S Y, Wang T, Liu T T, Yan X C, Li Z, Xu C 2018 *Carbon* **126** 271
- [38] Ge P P, Zhang Y, Xiao L H, Xiao B G 2022 *Appl. Opt.* **61** 5152
- [39] Tang X Y, Ke Y H, Jing X F, Bie X, Li C X, Hong Z 2021 *Acta Photonica Sinica* **50** 0116002 (in Chinese) [唐小燕, 柯友煌, 井绪峰, 别寻, 李晨霞, 洪治 2021 *光子学报* **50** 0116002]
- [40] Sun W J, Wang J L, Yin L, Wan H D, Chen H M, Zhong K 2024 *Acta Opt. Sin.* **44** 1624001 (in Chinese) [孙文俊, 汪静丽, 尹亮, 万洪丹, 陈鹤鸣, 钟凯 2024 *光学学报* **44** 1624001]
- [41] Zhang J, Wei X Z, Premaratne M, Zhu W R 2019 *Photonics Res.* **7** 868
- [42] Asgari S, Fabritius T 2023 *IEEE Access* **11** 36052

Reconfigurable coding metasurface for vortex wave mode switching and precise emission angle control*

WANG Jingli ^{1)†} YANG Ying ¹⁾ QIN Yun ¹⁾ WAN Hongdan ¹⁾
CHEN Heming ²⁾ ZHONG Kai ³⁾

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 Optoelectronics Information Technology (Ministry of Education), School of Precision Instruments and
Opto-electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

(Received 23 January 2026; revised manuscript received 27 February 2026)

Abstract

Terahertz vortex waves, as important carriers of orbital angular momentum (OAM), exhibit great potential in multichannel communications, high-dimensional information encoding, and super-resolution imaging. However, conventional coding metasurfaces based on metallic structures still suffer from limitations in dynamic

switching of vortex wave modes, precise wide-angle beam steering, and reconfigurability. To overcome these drawbacks, this work proposes a graphene-based reconfigurable coding metasurface. By utilizing the excellent electrical tunability of graphene, flexible control over the phase response of individual coding metasurface elements is achieved. In addition, a genetic algorithm is introduced to intelligently optimize the coding sequences, thereby enabling precise radiation control of terahertz vortex waves over a wide angular range.

Specifically, a reconfigurable coding metasurface element with a four-layer configuration is designed. By applying an external bias voltage to adjust the Fermi level of graphene, we achieve the dynamic modulation of the reflection phase via the continuously tunable surface conductivity of graphene. Full-wave simulations are performed in CST to obtain the reflection amplitude and phase responses of the coding metasurface elements under different Fermi levels. Furthermore, an FPGA is employed to independently apply bias voltages to individual elements across the metasurface, enabling real-time programmable switching of coding sequences. According to the phase distribution characteristics of vortex waves, single-mode coding sequences with topological charges of $l = -1, 1, 2$, and 3 are designed. Moreover, based on the principle of field superposition, multimode coding sequences corresponding to $l = -1$ and 1 , as well as $l = 1$ and 2 , are constructed. Finally, a genetic algorithm is introduced to iteratively optimize the coding sequences with the target radiation angle (θ, φ) as the optimization objective. Combined MATLAB-CST co-simulations are conducted to analyze the vortex wave modes and radiation angle characteristics. The simulation results demonstrate that the proposed coding metasurface elements achieve full $0-2\pi$ phase coverage at 1.1 THz, with a phase interval of approximately 45° between adjacent coding metasurface elements, while the reflection amplitude remains above 0.8 over the entire operating band. The coding metasurface based on these coding elements can flexibly generate and dynamically switch among six vortex wave modes, including four single-mode states and two multimode states. With the assistance of the genetic algorithm, the coding metasurface enables precise control of the radiation angle over a wide angular range of $0^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$ and $0^\circ \leq \varphi \leq 360^\circ$.

In summary, the proposed graphene-based reconfigurable coding metasurface achieves dynamic generation and flexible switching of multimode vortex waves by tuning the Fermi level of graphene via bias voltage control, combined with FPGA-based programmable operation. Meanwhile, precise beam steering over a wide angular range is realized with the aid of a genetic algorithm. This work provides an effective approach and valuable design reference for programmable wavefront manipulation, OAM multiplexing, and high-capacity multichannel communication systems in the terahertz regime.

Keywords: coding metasurface, vortex waves, genetic algorithm, graphene

DOI: [10.7498/aps.75.20260127](https://doi.org/10.7498/aps.75.20260127)

CSTR: [32037.14.aps.75.20260127](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20260127)

* 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), the Open Fund of Wuhan National Laboratory for Optoelectronics (Grant No. 2022WNLOKF012), and the Horizontal Research Project (Research on Multifunctional Terahertz Antennas) (Grant No. 2021external323).

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



可重构编码超表面实现涡旋波模态切换与出射角精准调控

汪静丽 杨影 秦云 万洪丹 陈鹤鸣 钟凯

Reconfigurable coding metasurface for vortex wave mode switching and precise emission angle control

WANG Jingli YANG Ying QIN Yun WAN Hongdan CHEN Heming ZHONG Kai

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 120402 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20260127

CSTR: 32037.14.aps.75.20260127

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20260127>

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

基于遗传算法的太赫兹多功能可重构狄拉克半金属编码超表面

Genetic algorithm based terahertz multifunctional reconfigurable Dirac semi-metallic coded metasurface

物理学报. 2024, 73(14): 144204 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240225>

基于电子调控的可重构声学编码超表面

Electronically reconfigurable piezoelectric acoustic coding metasurface

物理学报. 2026, 75(7): 144204 <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251705>

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>

基于双极化编码超表面生成的双模式轨道角动量

Dual-mode orbital angular momentum generated based on dual-polarization coding metasurface

物理学报. 2023, 72(14): 148101 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230457>

基于遗传算法的宽带渐变电阻膜超材料吸波器设计

Design of broadband gradient resistive film metamaterial absorber based on genetic algorithm

物理学报. 2024, 73(7): 074101 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231781>