

文章编号: 2095-4980(2025)09-0928-07

基于电控镜像对称结构的 D 波段透射式编码超表面

袁 慧, 兰 峰*, 吴崇鑫, 杨家焱, 聂小磊, 李玥廷, 杨沐楠, 胥 麟*, 张雅鑫, 杨梓强

(电子科技大学 电子科学与工程学院, 四川 成都 611731)

摘 要: 针对太赫兹可重构智能表面(RIS)幅值一致性差、相移带宽窄等问题, 提出一种基于二极管调控镜像对称结构的透射式编码超表面, 实现高效率、大带宽和大扫描角度的 Sub-THz 波束调控。通过列控单元左右两侧二极管交替通断控制表面电流反转, 实现对入射电磁波的 1 bit 相位调制; 结合 CST 和 Matlab 仿真计算, 研究了单元幅响应和阵列辐射特性。结果表明, 该单元在工作频点 140 GHz 处具有良好的交叉极化透射幅值一致性, 交叉极化透射系数为 -2.6 dB, $180^\circ \pm 10^\circ$ 带宽达 32%。基于该单元设计的 8×1 超表面子阵列展现出良好的极化转换能力和阵列一致性; 8×8 编码阵列与矩形喇叭耦合在最佳焦距比 0.64 处, 超表面口径效率达到 70%, 波束扫描范围为 $\pm 60^\circ$ 。本文研究为太赫兹通信和成像系统中高性能波束重构提供了有效解决方案。

关键词: 太赫兹; 超表面; 透射; 镜像对称; 二极管

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

DOI: 10.11805/TKYDA2025168

D-band transmissive coded metasurfaces based on electronically controlled mirror symmetry structures

YUAN Hui, LAN Feng*, WU Chongxin, YANG Jiayao, NIE Xiaolei, LI Yueting,
YANG Munan, XU Lin*, ZHANG Yaxin, YANG Ziqiang

(School of Electronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu Sichuan 611731, China)

Abstract: To address the challenges of poor amplitude consistency and narrow phase-shift bandwidth in terahertz Reconfigurable Intelligent Surfaces(RIS), a transmission-type coding metasurface is proposed based on diode controlled mirror-symmetric structures, enabling high-efficiency, wideband, and wide-angle Sub-THz beam manipulation. By alternately turning on and off the diodes on the left and right sides of each column control unit, the surface current direction is reversed, thereby realizing 1-bit phase modulation of the incident electromagnetic wave. Through combined CST and Matlab simulations, the unit cell's amplitude and phase responses are investigated as well as the array radiation characteristics. Results indicate that, at the operating frequency of 140 GHz, the unit cell exhibits excellent cross-polarization transmission amplitude consistency, with a cross-polarization transmission coefficient of -2.6 dB and a $180^\circ \pm 10^\circ$ bandwidth reaching 32%. An 8×1 sub-array designed with this unit cell demonstrates strong polarization conversion capability and array uniformity. When an 8×8 coding array is coupled with a rectangular horn at an optimal focal-to-diameter ratio of 0.64, the metasurface achieves an aperture efficiency of 70% and a beam-scanning range of $\pm 60^\circ$. This study

收稿日期: 2025-05-15; 修回日期: 2025-08-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62131007; 62305051; 62331015; U20A20212; 61931006); 国家重点研发计划资助项目(2021YFA1401004); 中国科协青年人才托举工程资助项目(2022QNRC001); 空间微波技术重点实验室基金资助项目(2023-JCJQ-LB-007)

*通信作者: 兰 峰 email:lanfeng@uestc.edu.cn; 胥 麟 email:xulin@uestc.edu.cn

引用格式: 袁慧, 兰峰, 吴崇鑫, 等. 基于电控镜像对称结构的 D 波段透射式编码超表面[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2025, 23(9): 928-934. DOI: 10.11805/TKYDA2025168.

Citation format: YUAN Hui, LAN Feng, WU Chongxin, et al. D-band transmissive coded metasurfaces based on electronically controlled mirror symmetry structures[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2025, 23(9): 928-934. DOI: 10.11805/TKYDA2025168.

provides an effective solution for high performance beam reconfiguration in terahertz communication and imaging systems.

Keywords: terahertz; metasurface; transmission; mirror symmetry; diode

太赫兹波在无线通信、雷达和成像系统中有重要应用,但其路径损耗大,且准光传输特性对波束控制的灵活性和精确度提出了更高要求^[1-4]。太赫兹波虽能穿透非极性和非金属材料,但却面临大气中水氧吸收的影响。此外,短波长的特性使传播路径上的障碍物更容易散射太赫兹波,产生较高的路径损耗,进而限制太赫兹波的传播距离。因此,不仅非视距传输、目标跟瞄、超分辨成像等应用对波束重构具有重大需求,在高频毫米波至太赫兹频段上还需要高效的 可重构天线来优化无线网络拓扑,以通过定向传播和集中波束能量的方式补偿路径损耗的影响。

鉴于传统相控阵难以承受的成本和复杂性^[5],太赫兹重构智能表面(RIS)已成为解决太赫兹波传入 6G 波束跟踪问题的最有前途的关键技术^[6-8]。通过将有源元件整合到亚波长尺度的晶胞中,RIS 实现了适应性强的波束成形能力,在复杂的通信环境中与多维电磁调制(包括相位、振幅、偏振、谐波等)相协调^[9-11]。

近年来,太赫兹可编程超表面研究取得了一定的突破。国际上,代表性器件多采用互补金属氧化物半导体(Complementary Metal-Oxide-Semiconductor Transistor, CMOS)技术,制备工艺从 130 nm 发展至 22 nm^[12-14],取得了阵列规模、调制速度和波束扫描精确度等的突破。国内,东南大学、南京大学、清华大学和电子科技大学等单位,提出了基于液晶、二氧化钒、二极管和高电子迁移率晶体管(High Electron Mobility Transistor, HEMT)等技术的低复杂度、低成本和多功能的电控太赫兹可编程超表面^[15-19]。但现有太赫兹可编程超表面在幅度一致性、相移带宽和效率等方面仍亟待突破。针对上述挑战,本文提出了一种基于镜像对称结构的二极管透射式太赫兹编码超表面,通过二极管通断控制镜像对称结构电流反转,实现了宽带和低损耗的 1 bit 相移编码,结合口径效率分析实现了±60°的波束扫描优化,为太赫兹可编程超表面发展提供了新的思路和方法。

1 超表面研究

针对太赫兹波段中波束动态调控需求,本文构建了一种基于镜像对称相位调控机制的列控透射式超表面阵列结构。整体结构如图 1 所示,该阵列在结构设计上规整排列,偏置路径分布明确,基于镜像对称结构的透射式 RIS 设计为实现可重构波束合成提供了理论支持与仿真依据。提出的列控架构简化了大规模阵列的硬件复杂度,在电路设计上具备高可扩展性和控制简洁性,可实现阵列一维电压同步调控。

基于 CST 与 Matlab 联合仿真方法,系统分析阵元在宽频带条件下的振幅、相位特性及其子阵列响应,验证结构在 140 GHz 工作频点处的极化转换效率、幅值一致性及波束扫描能力。

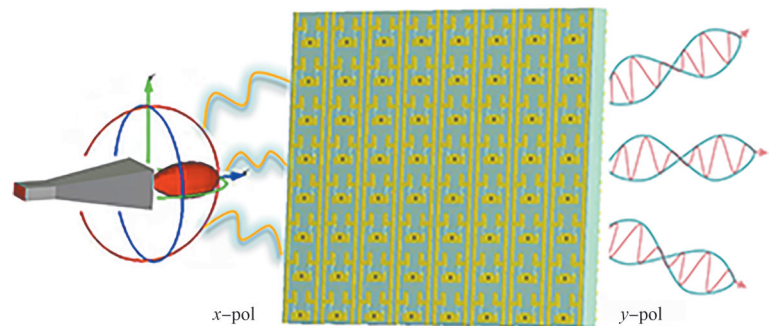


Fig.1 3D schematic of the designed transmissive RIS column-controlled array architecture
图 1 设计的透射式 RIS 列控阵列架构的 3D 示意图

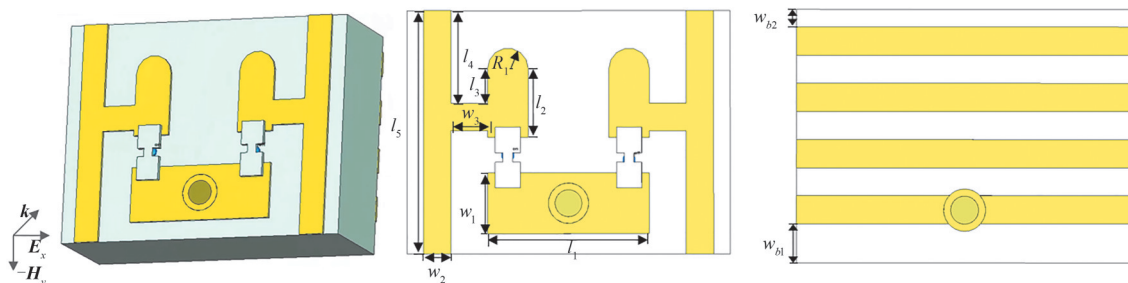


Fig.2 Transmissive column-controlled metasurface array element design
图 2 透射式列控超表面阵元设计

1.1 结构设计

透射式列控超表面结构设计如图 2 所示, 顶部和底部金属层由铜表面镀金制成, 整体厚度为 $10\ \mu\text{m}$ 。顶层结构由 1 个一字形通孔元件和 2 个纵向工字形元件组成。2 个低势垒肖特基二极管分别放置于 2 个工字形元件和一字形元件的交结处, 一字形元件通孔至底层的馈线金属板作为接地平面。施加外部电压至工字形元件的外侧馈线金属板上, 可控制单元谐振器左侧和右侧上的二极管的截止和导通状态。由于该单元的馈电金属板在左右两侧并纵跨整个单元, 在构成阵列时, 使位于同一列的单元在加压时都处于同一状态, 因此称该单元为列控单元。

单元底层为一层金属光栅, 中间层为印刷电路板(Printed Circuit Board, PCB)基板介质 TSM-DS3, 相对介电常数 $\epsilon_r=3$, 厚度 $320\ \mu\text{m}$ 。每个单元的尺寸经优化设计为 $933\ \mu\text{m}\times 700\ \mu\text{m}$ 。上层金属结构 $l_1=467\ \mu\text{m}$, $w_1=175\ \mu\text{m}$, $l_2=198\ \mu\text{m}$, $w_2=79\ \mu\text{m}$, $l_3=100\ \mu\text{m}$, $l_4=267\ \mu\text{m}$, $l_5=700\ \mu\text{m}$, 其余线宽均为 $79\ \mu\text{m}$ 。下层金属光栅结构的区域 $w_{b1}=108\ \mu\text{m}$, $w_{b2}=49\ \mu\text{m}$, 光栅线宽与光栅间距均为 $78\ \mu\text{m}$ 。通孔内径 $r_1=78\ \mu\text{m}$, 外径 $r_2=117\ \mu\text{m}$ 。

在列控单元中, 定义左侧二极管导通、右侧二极管截止的状态为 State 0; 反之, 则为 State 1。通过外部施加电压分别控制单元谐振结构两侧工字型结构上的二极管, 实现 State 0 与 State 1 的切换。图 3 展示了一字形元件两侧二极管在 State 0 与 State 1 状态切换下的电流分布及电场特性, 揭示了基于电流反转的相移机制。当 RIS 单元处于 State 0 时, 左侧二极管结呈现低阻抗, 右侧则表现为高阻抗, 结构谐振电流仅通过导通的左侧二极管, 使电子流被限制在左侧高亮显示的各向异性区域内。此时, x 方向入射的线极化波发生极化转换, 并在通过底部中空金属板时, 其极化方向被有效筛选, 最终主要以 y 方向极化波形式出射, 从而显著提升了 RIS 的极化转换效率。当 RIS 单元处于 State 1 状态时, 右侧二极管结呈低阻抗, 左侧为高阻抗, 谐振电流和各向异性区域相较于 State 0 关于介质中心轴呈镜像对称分布, 由此在两种状态下产生 180° 的相位差。基于镜像对称结构的相位调制原理, 结构可在交叉极化方向实现精确的 180° 相移; 同时, 底部极化筛选光栅的引入进一步提高了相移带宽和极化转换透射效率。

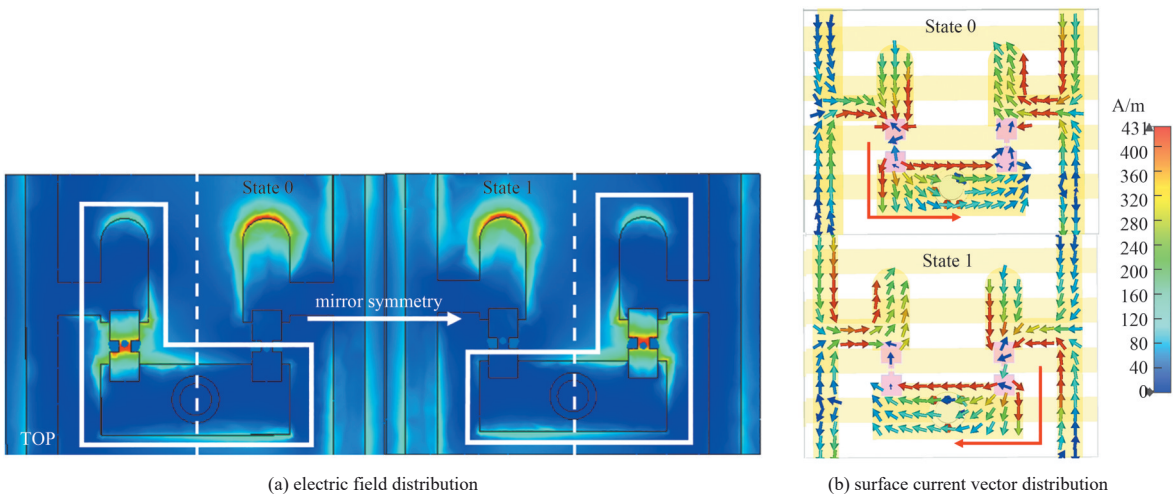


Fig.3 State0 and State1 electric field distributions and surface current vector distributions of the metasurface structure at 140 GHz

图3 超表面结构在 140 GHz 时 State 0 和 State 1 电场分布和表面电流矢量分布

1.2 仿真分析

在 CST 的频域求解器中建立单元仿真模型, 单元 z 方向设置 Floquet 端口, 在 x 、 y 方向设置周期性边界条件, 并采用四面体网格划分。为保证仿真精确度, 仿真过程中全局网格密度设置为 $\lambda/10$ (λ 为波长), 并在二极管结区及金属边缘采用自适应局部加密, 最小单元细化至约 $\lambda/20$ 。单元仿真模型如图 2 所示, 由于肖特基二极管在高频下存在明显的寄生电容、电感和电阻效应, 本文通过建立三维结构模型替代复杂的二极管等效电路, 以表征其寄生效应; 同时, 对于肖特基结本身的非线性特性, 则基于去嵌提取得到的等效电路参数加以表征。仿真结构中二极管采用 3D 结构与集总参数元件联合建模, 集总参数元件等效电路的参数通过波导等效测试去嵌得到。二极管 3D 模型与集总参数元件等效电路如图 4 所示。二极管模型参数为: $l_1=125\ \mu\text{m}$, $l_2=110.6\ \mu\text{m}$, $l_3=100\ \mu\text{m}$, $w_1=127\ \mu\text{m}$, $w_2=112.6\ \mu\text{m}$, $w_3=100\ \mu\text{m}$, $w_4=46\ \mu\text{m}$, $w_5=34.5\ \mu\text{m}$; 在导通状态下集总参数元件的参数为: $R_s=27\ \Omega$, $R_j=25\ \Omega$, $C_j=0.000\ 4\ \text{pF}$; 在断开状态下集总参数元件的参数为: $R_s=27\ \Omega$, $R_j=324\ \Omega$, $C_j=0.000\ 4\ \text{pF}$ 。用 x 方向极化波束进行激励, 图 5 为该单元在 State 0 和 State 1 时的共极化(x 方向)、交叉极化方向(y 方向)的辐值和相移特

性。其中, T_{xy} 为交叉极化透射系数幅值, T_{xx} 为共极化透射系数幅值, $\Delta\varphi$ 为 State 0 和 State 1 时交叉极化透射系数相位差。由于表面谐振电流的高对称分布特性, 在 140 GHz 处单元的 State 0 和 State 1 两种状态的幅值几乎一致, 交叉极化透射系数(T_{xy})达到 -2.6 dB, 共极化抑制(T_{xx})达到 -25 dB。交叉极化透射系数 -5 dB 内带宽为 14.5 GHz (132.5~147 GHz), 并且 -3 dB 带宽为 16 GHz(131~148 GHz), 相对带宽为 11%。由图 5(b)可知, 单元的两个状态的相位差在超宽的频率范围(115~160 GHz)内均达到了 $180^\circ \pm 10^\circ$ 的精确度范围。

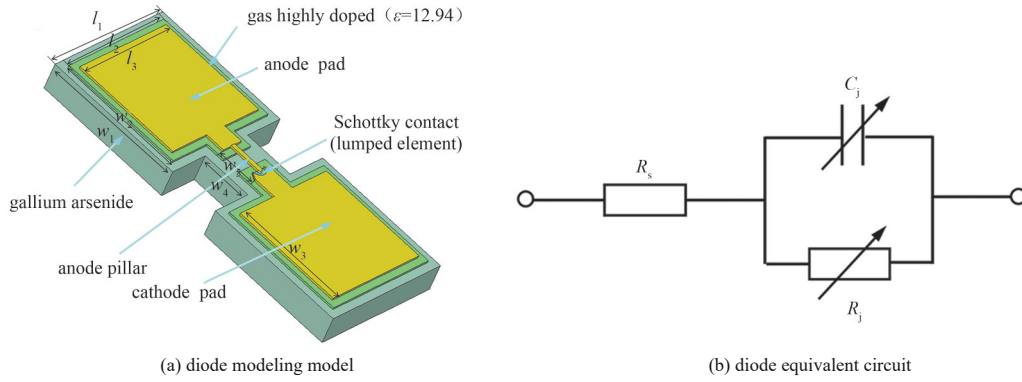


Fig.4 Diode structure
图4 二极管结构

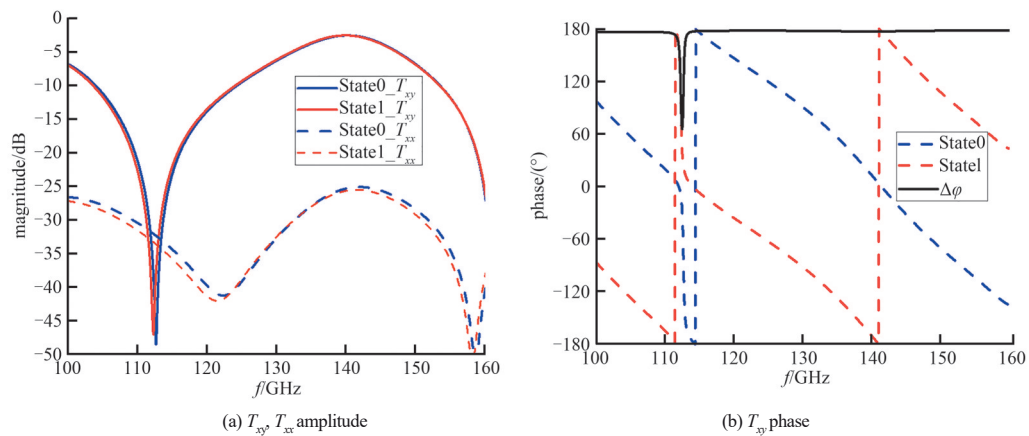


Fig.5 Changes in amplitude, phase and phase shift of the cell when the column-controlled cell is in State0 and State1
图5 列控单元为 State 0 和 State 1 的状态下,单元的振幅、相位和相移的变化

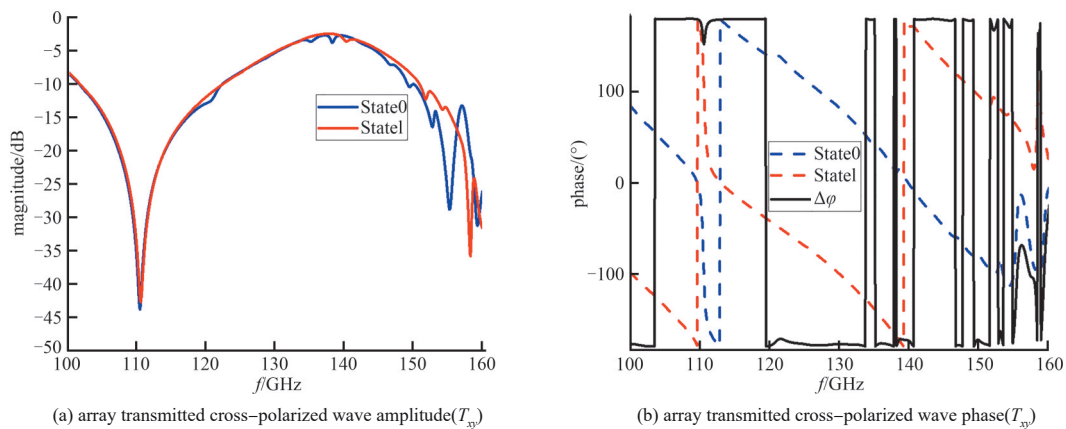


Fig.6 Simulated amplitude-phase response plots of 8×1 column-controlled array in State 0 and State 1 states

图6 8×1 列控阵列 State 0 和 State 1 状态下仿真幅相响应图

2 阵列分析

2.1 子阵列仿真分析

以该单元作为阵元设计一款 8×8 的透射 RIS 阵列, 如图 1 所示, 每一列的单元都通过单元两侧的馈线以及中

间的馈线连接在一起，其馈电保持一致。中间馈电接地，两侧 bias 馈线分别供电控制所对应的二极管通断状态，因此该 8×8 阵列中的每一列子阵状态效果都保持一致。由于 CST 进行阵列仿真时存在仿真时间长、仿真精确度误差问题，因此选择 CST 联合 Matlab 进行仿真。边界条件设置为开放空间，保留了阵列边缘效应。在 CST 中对 8×1 个单元构成的一个单列子阵列进行仿真，观察其幅相效果。

CST 对 8×1 阵列仿真幅相响应效果如图 6 所示。由图可知，该列控子阵单元之间互耦很弱，其阵列仿真效果与单元仿真效果基本一致。State 0 与 State 1 在中心工作频点 140 GHz 处，交叉极化透射系数分别达到 -2.8 dB、-3.3 dB，两种状态交叉极化透射系数的 -5 dB 内的频率范围为 130.7~144.5 GHz，带宽 13.8 GHz，-3 dB 工作频率范围为 129.5~145.5 GHz，相对工作带宽为 11%，180°±10°相移带宽达 28%，与单元仿真效果大致吻合。

2.2 阵列效率分析

超表面阵列的波束调控性能受馈源照射效率、溢出效率等影响^[20]，本文设计的 8×8 阵列(尺寸为 7.46 mm×5.60 mm)，需配备适配的馈源喇叭以提升远场性能并有效抑制杂散辐射。鉴于矩形喇叭在波束整形与辐射效率优化方面的优良特性，本文选用工作频段覆盖 110~170 GHz 的矩形喇叭作为阵列的外部激励。所选用喇叭的远场方向图如图 7 所示。

联立 CST 与 Matlab 对喇叭-阵列面进行仿真分析，仿真结果如图 8 所示，当喇叭高度与口径宽度之比(H/D)设置为 0.64 时，可获得最优的口径效率约 70%，显著提升了阵列整体的辐射性能。该优化设计有效增强了主瓣增益，抑制了旁瓣电平，且保证了良好的波束指向性与稳定性，为后续实验环境下的性能验证提供了参考依据。

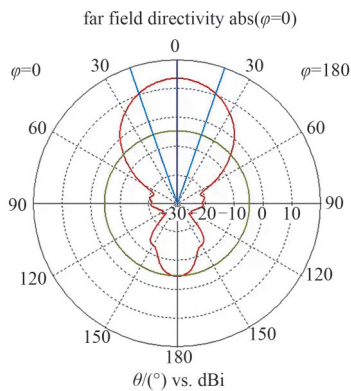


Fig.7 Far field directivity of rectangular horn
图7 矩形喇叭远场方向图

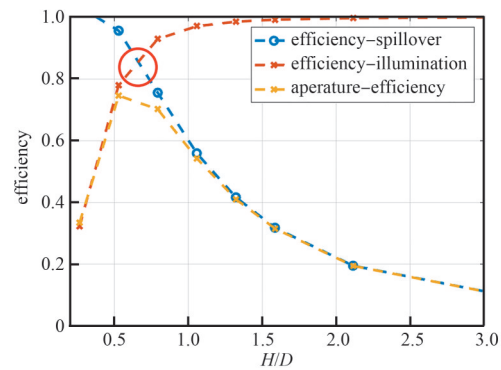


Fig.8 Aperture efficiency of rectangular horn
图8 矩形喇叭口径效率

2.3 波束扫描分析

进一步分析矩形喇叭在最优几何参数条件下对阵列辐射特性的调控作用，将在最佳 H/D 下照射的数据导入 Matlab 中对阵列各单元的辐射相位分布进行计算与可视化。以 8×8 阵列尺寸为例，其在耦合矩形喇叭辐射后的典型相位分布特征如图 9 所示。

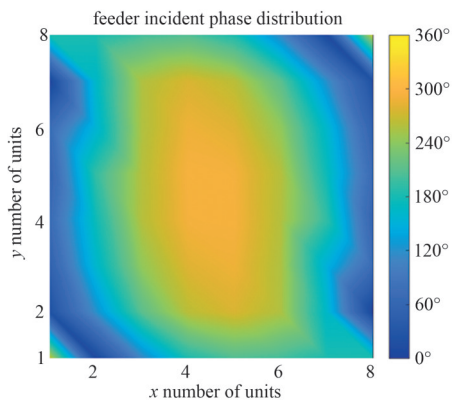


Fig.9 Array phase distribution
图9 阵列相位分布

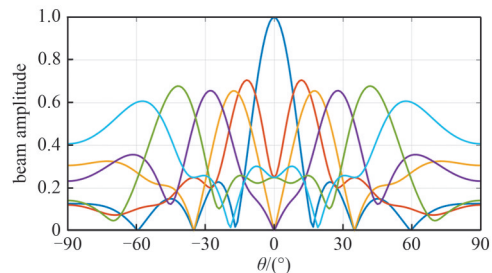


Fig.10 Simulation diagram of 8×8 array angle scanning
图10 8×8阵列角度扫描仿真图

依据所得相位分布, 可进一步设计相应的相位补偿策略, 从而实现阵列在特定角度下的定向辐射。在 Matlab 中通过构造相应的相位编码矩阵, 在工作频率 140 GHz 下, 使阵列在不同角度上扫描合成期望的波束方向, 归一化仿真结果如图 10 所示, 波束扫描范围为 $\pm 60^\circ$ 。

表 1 波束调控相关的 RIS 的比较

Table 1 Comparison of RIS related to beam modulation

references	frequency/GHz	RIS type	element loss/dB	methods of regulation	scanning range
[21]	23.5	reflection	3.8(experiment)	PIN diode	$\pm 40^\circ$ (experiment)
[22]	73.0	reflection	6.2(experiment)	PIN diode	$\pm 70^\circ$ (experiment)
[23]	97.0	transmission	11.0(simulation)	PIN diode	30°(experiment)
[13]	300.0	transmission	3.5(simulation)	CMOS	$\pm 30^\circ$ (experiment)
this work	140.0	transmission	2.6(simulation)	Schottky diode	$\pm 60^\circ$ (simulation)

本文设计的 RIS 与其他波束调控相关的 RIS 比较见表 1, 现有基于 PIN 二极管或 CMOS 的 RIS 方案往往存在单元损耗较大(如文献[23]达 11 dB)、扫描角度有限(如文献[23]、[13]仅为 $\pm 30^\circ$)或结构复杂、集成困难等问题。而本文提出的 RIS 在结构简单的同时, 实现了低损耗(-2.6 dB)、宽带相移(32%的带宽覆盖)以及大角度扫描范围($\pm 60^\circ$), 在透射型 RIS 中表现出明显优势。

3 结论

本文提出并设计了一种基于镜像对称结构的二极管透射式太赫兹可编程超表面, 通过在单元结构中引入左右对称布置的低势垒肖特基二极管, 控制其导通和截止不同的状态切换, 成功实现了电流反转驱动下的镜像对称相位调控机制, 实现了对电磁波在透射交叉极化方向上高精度度的 180° 相位调控。仿真结果表明, 该结构在 140 GHz 处的交叉极化透射系数达到-2.6 dB, -3 dB 带宽达 16 GHz, $180^\circ \pm 10^\circ$ 带宽达 32%, 表现出优异的相移频宽覆盖能力与幅值一致性。

基于该单元构建 8×8 列控透射阵列, 在 CST 与 Matlab 联合仿真平台下进行分析。结果显示, 其子 8×1 阵列在保持良好极化转换性能的同时, 展现出较小的互耦干扰及良好的阵列一致性。进一步通过矩形喇叭激励对阵列进行辐射效率分析, 可得在焦距比 $H/D=0.64$ 最优条件下, 理论上可实现约 70% 的口径效率, 并能够在 $\pm 60^\circ$ 范围内完成稳定的波束扫描, 验证了其在高指向性波束重构方面的潜力。本研究所提出的列控超表面架构在不依赖传统复杂相控网络的前提下, 实现了宽带、高效、可编程的波束控制, 在未来太赫兹通信、成像与传感系统中具有重要的应用前景。尽管仿真结果验证了所提结构的优异性能, 但其制造可行性仍面临一定挑战。太赫兹透射式 RIS 在偏置电路干扰、大规模阵列拓展和系统集成等方面还存在较大挑战, 仍需深入研究。

参考文献:

- [1] GUO Y J, ANSARI M, ZIOLKOWSKI R W, et al. Quasi-optical multi-beam antenna technologies for B5G and 6G mmWave and THz networks: a review[J]. IEEE Open Journal of Antennas and Propagation, 2021(2): 807-830. DOI: 10.1109/OJAP.2021.3093622.
- [2] WANG Chengxiang, WANG Jun, HU Sanming, et al. Key technologies in 6G terahertz wireless communication systems: a survey[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2021, 16(4): 27-37. DOI: 10.1109/MVT.2021.3116420.
- [3] STANTCHEV R I, YU X, BLU T, et al. Real-time terahertz imaging with a single-pixel detector[J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 2535. DOI: 10.1038/s41467-020-16370-x.
- [4] WANG Ying, QI Feng, WANG Jinkuan. Terahertz image super-resolution based on a complex convolutional neural network[J]. Optics Letters, 2016, 46(13): 3123-3126. DOI: 10.1364/ol.422684.
- [5] MONNAI Y, LU X Y, SENGUPTA K. Terahertz beam steering: from fundamentals to applications[J]. Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, 2023, 44(3): 169-211. DOI: 10.1007/s10762-022-00902-1.
- [6] FU Xiaojian, YANG Fei, LIU Chenxi, et al. Terahertz beam steering technologies: from phased arrays to field-programmable metasurfaces[J]. Advanced Optical Materials, 2020, 8(3): 1900628. DOI: 10.1002/adom.201900628.
- [7] BASHARAT S, KHAN M, IQBAL M, et al. Exploring reconfigurable intelligent surfaces for 6G: state-of-the-art and the road ahead[J]. IET Communications, 2022, 16(13): 1458-1474. DOI: 10.1049/emu2.12364.
- [8] BASAR E. Reconfigurable intelligent surface-based index modulation: a new beyond MIMO paradigm for 6G[J]. IEEE Transactions on Communications, 2020, 68(5): 3187-3196. DOI: 10.1109/TCOMM.2020.2971486.
- [9] WANG Peilan, FANG Jun, ZHANG Weizheng, et al. Beam training and alignment for RIS-assisted millimeter-wave systems: state of the art and beyond[J]. IEEE Wireless Communications, 2022, 29(6): 64-71. DOI: 10.1109/MWC.006.2100517.

- [10] HE Qiong, SUN Shulin, ZHOU Lei. Tunable/reconfigurable metasurfaces: physics and applications[J]. Research, 2019(1):806–821. DOI:10.34133/2019/1849272.
- [11] TSILIPAKOS O, TASOLAMPROU A C, PITILAKIS A, et al. Toward intelligent metasurfaces: the progress from globally tunable metasurfaces to software-defined metasurfaces with an embedded network of controllers[J]. Advanced Optical Materials, 2020,8(17):2000783. DOI:10.1002/adom.202000783.
- [12] LYNCH J J, HERRAULT F G, KONA K, et al. Coded aperture subreflector array for high resolution radar imaging[C]// Passive and Active Millimeter-Wave Imaging XXII. 2017:124–133. DOI:10.1117/12.2525061.
- [13] VENKATESH S, LU X Y, SAEIDI H, et al. A high-speed programmable and scalable terahertz holographic metasurface based on tiled CMOS chips[J]. Nature Electronics, 2020,3(12):785–793. DOI:10.1038/s41928-020-00497-2.
- [14] MONROE N M, DOGIAMIS G C, STINGEL R, et al. Electronic THz pencil beam forming and 2D steering for high angular-resolution operation: a 98×98 unit 265 GHz CMOS reflectarray with in-unit digital beam shaping and squint correction[C]// 2022 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC). San Francisco, CA, USA: IEEE, 2022: 1–3. DOI: 10.1109/ISSCC42614.2022.9731671.
- [15] WU Jingbo, SHEN Ze, GE Shijun, et al. Liquid crystal programmable metasurface for terahertz beam steering[J]. Applied Physics Letters, 2020,116(13):131104. DOI:10.1063/1.5144858.
- [16] LIU Chenxi, YANG Fei, FU Xiaojian, et al. Programmable manipulations of terahertz beams by transmissive digital coding metasurfaces based on liquid crystals[J]. Advanced Optical Materials, 2021,9(22):1–9. DOI:10.1002/adom.202100932.
- [17] 吴优, 息荣艳, 潘笑天, 等. 基于相控电磁表面的 W 波段雷达系统研究[J]. 雷达学报, 2021,10(2):281–287. (WU You, XI Rongyan, PAN Xiaotian, et al. Research on a phased electromagnetic surface-based W-band radar system[J]. Journal of Radars, 2021,10(2):281–287.) DOI:10.12000/JR21041.
- [18] LAN Feng, WANG Luyang, ZENG Hongxin, et al. Real-time programmable metasurface for terahertz multifunctional wave front engineering[J]. Light, Science & Applications, 2023,12(1):191. DOI:10.1038/s41377-023-01228-w.
- [19] SHEN Dongfang, LAN Feng, WANG Luyang, et al. Sub-terahertz transmissive reconfigurable intelligent surface for integrated beam steering and self-OOK-modulation[J]. Light, Science & Applications, 2025,14(1):13. DOI:10.1038/s41377-024-01690-0.
- [20] YU A, YANG F, ELSHERBENI A Z, et al. Aperture efficiency analysis of reflectarray antennas[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2010,52(2):364–372. DOI:10.1002/mop.24949.
- [21] WU Gengbo, DAI Junyan, SHUM K M, et al. A universal metasurface antenna to manipulate all fundamental characteristics of electromagnetic waves[J]. Nature Communications, 2023,14(1):5155. DOI:10.1038/s41467-023-40717-9.
- [22] LIU Changhao, YANG Fan, XU Shenheng, et al. An E-band reconfigurable reflectarray antenna using pin diodes for millimeter-wave communications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2023,71(8):6924–6929. DOI: 10.1109/TAP.2023.3291087.
- [23] PAN Xiaotian, YANG Fan, XU Shenheng, et al. W-band electronic focus-scanning by a reconfigurable transmitarray for millimeter-wave imaging applications[J]. Applied Computational Electromagnetics Society Journal, 2020,35(5):580–586. DOI: 10.0410/cata/0753a6ddc61f9d296a7810c7b47f4ffe.

作者简介:

袁 慧(2002–), 女, 在读硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹可重构智能超表面. email599904979@qq.com.

李玥廷(1998–), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为太赫兹源、毫米波传输发射器件等.

兰 峰(1977–), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为太赫兹传输器件、数字超材料等.

杨沐楠(2000–), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为太赫兹智能超表面架构及系统应用等.

吴崇鑫(2002–), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹可重构智能超表面.

胥 麟(1978–), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为太赫兹源、毫米波传输发射器件和太赫兹应用系统.

杨家垚(2001–), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹可重构超表面、太赫兹通信、太赫兹雷达探测.

张雅鑫(1981–), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为新型太赫兹信号源、太赫兹功能器件等.

聂小磊(2002–), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹可重构超表面、太赫兹通信等.

杨梓强(1965–), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为太赫兹功能器件等.