

文章编号: 2095-4980(2025)03-0225-06

基于可编程超表面的亚太赫兹波束操控

汪 域¹, 石 磊^{1,2}, 傅晓建^{*1}, 蒋卫祥^{*1}

(1.东南大学 毫米波全国重点实验室, 江苏 南京 211189; 2.上海航天电子技术研究所, 上海 201108)

摘 要: 随着 6G 技术的不断发展, 太赫兹雷达、通信感知一体化逐渐成为电子信息领域的重要研究方向。可编程超表面凭借其重量轻、易共形和动态可调等优势, 在太赫兹波束操控方面表现出很高的自由度, 因而在通信、成像、雷达等方面具有重要的应用潜力。本文从加载半导体元件的可编程超表面设计理论出发, 选取一款高频适用的 GaAs 变容二极管, 构建了一种 1 bit 数字编码超表面, 并对其亚太赫兹电磁响应和波束操控性能进行了表征。结果表明, 该超表面阵列在 W 波段具有宽角度的动态波束赋形和波束扫描能力, 实验结果与仿真结果吻合良好。

关键词: 亚太赫兹; 可编程超表面; 波束赋形; 波束扫描

中图分类号: TN92

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2024531

Sub-terahertz beam steering based on programmable metasurfaces

WANG YU¹, SHI Lei^{1,2}, FU Xiaojian^{*1}, JIANG Weixiang^{*1}

(1.State Key Laboratory of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing Jiangsu 211189, China;
2.Shanghai Aerospace Electronic Technology Institute, Shanghai 201108, China)

Abstract: With the continuous development of 6G technology, terahertz radar and integrated sensing and communication are gradually becoming important research directions in the field of electronics and information. Programmable metasurfaces, with their advantages of being lightweight, conformable, and dynamically tunable, exhibit a high degree of freedom in terahertz beam manipulation, and thus hold significant application potential in communication, imaging, and radar. Starting from the design theory of programmable metasurfaces loaded with semiconductor components, a GaAs varactor suitable for high-frequency applications is selected, a 1 bit digital coding metasurface is constructed, and its sub-terahertz electromagnetic response and beam manipulation performance are characterized. The results show that the metasurface array has wide-angle dynamic beamforming and beam scanning capabilities in the W-band, with experimental results matching well with simulations.

Keywords: sub-terahertz; programmable metasurface; beamforming; beam scanning

数字可编程超表面采用二进制数字编码对超表面单元进行数字化表征^[1-3], 可实现对电磁波幅度、相位、极化等特性的实时、高效操纵, 因而在新体制的通信、雷达和成像系统中具有重要的应用前景^[4-7]。其中, PIN 二极管和变容二极管等半导体元器件因其调控方式相对简单、响应时间短和易于集成等优点被广泛用于微波频段的编码超表面设计, 并已在全息成像^[8-9]、无线通信^[10-11]和无线网络信号传输^[12]等领域产生了令人瞩目的成果。随着 5G、6G 技术的进一步发展, 毫米波乃至太赫兹功能器件的开发需求日益增加, 适用于高频的半导体元器件逐步运用到可编程超表面的设计中, 并以此为基础构建了毫米波通信系统以及二维毫米波成像系统^[13]。然而在高频下, 由于半导体元器件的寄生效应和高损耗特点, 可编程超表面调控电磁波的响应速度和效率仍受限; 同时由于器件加工难度和工艺成本的限制, 相关的研究仍较少。因此, 本文开展亚太赫兹频率的可编程超表面研究, 探究其单元电磁响应和远场波束调控能力。

收稿日期: 2024-09-06; 修回日期: 2024-10-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U23A20279; 62288101); 高等学校学科创新引智计划资助项目(111-2-05); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(242023K5002)

*通信作者: 傅晓建 email:fuxj@seu.edu.cn; 蒋卫祥 email:wjjiang81@seu.edu.cn

1 单元设计与仿真

1.1 1 bit 编码单元设计和原理分析

设计的超表面单元目标频率为 94 GHz, 单元周期为 1 500 μm , 通过加载变容二极管实现单元相位可调谐。1 bit 反射式单元结构示意图如图 1 所示, 共分为 4 部分: 透明石英玻璃为介质基底, 其厚度为 200 μm , 石英的相对介电常数为 3.82, 损耗角正切为 0.008; 石英基底背面为金属背板, 厚度为 300 nm; 石英层上方为一对中间开缝的对称阶梯型金属贴片, 变容二极管两端沿垂直于缝隙的方向分别倒装焊接在 2 个对称分布的阶梯型金属谐振器上。

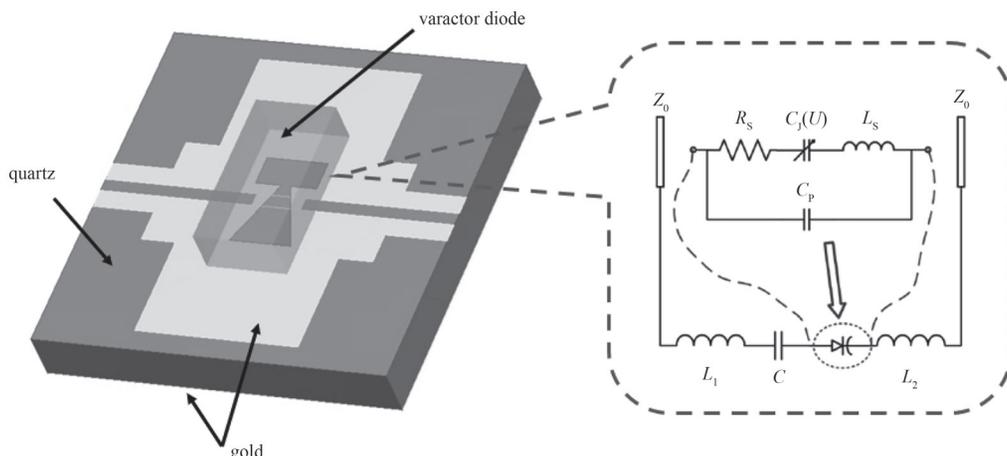


Fig.1 Schematic of the metasurface cell structure and the equivalent circuit diagram

图1 超表面单元结构示意图及等效电路图

根据超表面等效电路分析方法^[4], 上述 1 bit 编码超表面单元结构的等效电路如图 1 所示。变容二极管的等效电路模型采取寄生电容 C_p 与一个由电阻 R_s 、寄生电感 L_s 和可变电容 $C_j(U)$ 组成的串联电路并联的形式, $C_j(U)$ 由所加偏置电压决定。若在 2 种偏置电压条件下, 超表面单元的反射相位满足 180° 相位差, 即可获得编码“0”和编码“1”单元。

1.2 单元仿真结果

此结构选用 MACOM 公司型号为 MAVR-000146-12030W(MA46H146)的变容二极管, 此变容二极管是一款适用于毫米波频率的 GaAs 倒装芯片变容管, 最高可加载 25 V 的反向偏置电压。在电路仿真软件 ADS(Advanced Design System)中对二极管电路模型进行仿真并提取不同电压状态下的 S 参数。利用商用三维电磁仿真软件 CST(Computer Simulation Technology) Microwave Studio 对超表面单元进行建模和仿真优化。选取加载 0 V 和 24 V 反向偏置电压下的超表面作为编码“0”和编码“1”, 反射系数 S_{11} 的幅度和相位曲线如图 2 所示。

由图 2 可知, 在仿真频段的中心频点 94 GHz 处, 2 种编码的幅度响应大致相同, 而相位响应差值在 94 GHz 达到设计需求的 180° , 而在 93.7~94.3 GHz 的窄带范围内 2 种编码态的相位差介于 $160^\circ\sim 180^\circ$ 。

2 超表面编码方案及阵列仿真

受限于工艺, 该超表面设计方案在实际应用中仅能实现单元的逐列控制, 因此本文仅讨论超表面在单一维度(x轴)上进行周期排列的情况。对于周期排列的一维列控 1 bit 相位调控型编码超表面, 根据广义斯涅尔定律^[15], 超表面阵列的周期序列与远场波束偏转的角度满足:

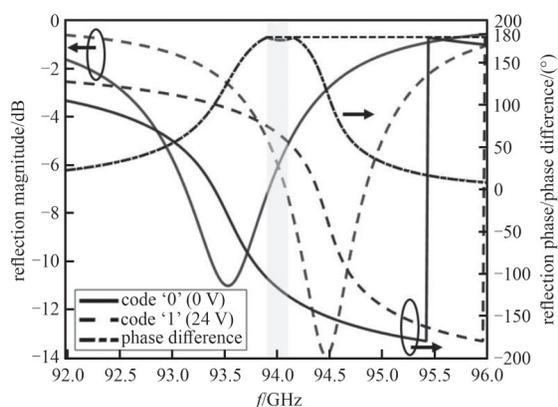


Fig.2 Amplitude-phase curves and phase difference for code 0 and code 1

图2 编码0和1反射系数的幅相曲线及相位差

$$\frac{\Gamma_x \sin \theta}{\lambda_0} \times 2\pi = 2n\pi \tag{1}$$

式中： Γ_x 为编码序列在x轴方向的周期长度； λ_0 为工作波长； n 为波束的阶数。根据式(1)可推导出更为普遍的反射角度与单元相位之间的关系：

$$\xi_m = k_0 m d \sin \theta_0 \tag{2}$$

式中： ξ_m 为第 m 个单元的相位； k_0 为真空中的波矢量； d 为单元周期长度； θ_0 为反射角角度。因此，通过将初始相位定义为 0° ，可推算出之后每一个单元的相位。在不考虑样品尺寸的情况下，根据式(2)可得到某特定角度所对应的一串具有无穷多个编码的编码序列。本文考虑以“010”3个编码单元和“0011”4个编码单元为周期进行阵列的排布，根据上述公式可算出远场波束指向角分别为 45.2° 和 32.1° 。

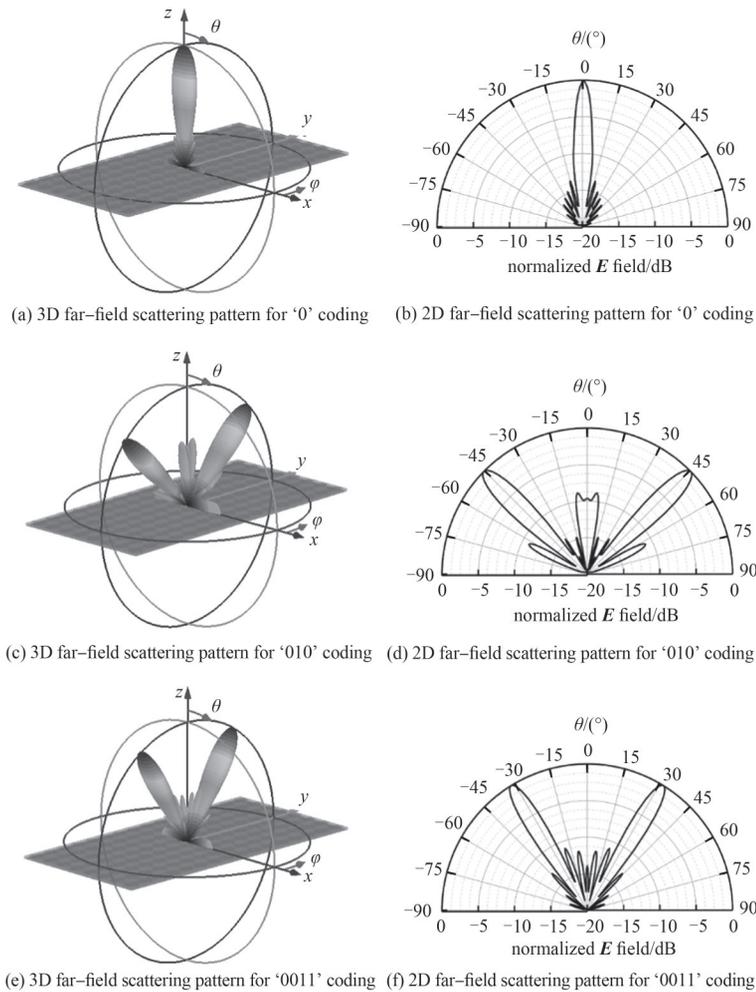


Fig.3 Normalized far-field scattering patterns from full-wave simulations at specific coding sequences
图3 特定编码全波仿真的归一化远场散射方向图

对2种周期编码序列阵列进行仿真，并以全“0”编码状态下的仿真结果作为对照，远场仿真结果如图3所示。图3(a)和图3(b)分别为全“0”编码排布的阵列三维远场散射方向图和二维归一化方向图，此时的远场散射图类似于金属板反射情形，反射主波束角度为 0° 。图3(c)和图3(e)分别为“010”和“0011”周期编码阵列的三维远场散射图，从图中可看出，在周期相位差的作用下， 0° 反射角的法向垂直反射逐渐减弱，并分裂为2个关于 xoz 面镜像对称的波束，且2种编码状态下波束角度有明显区别。由于阵列在x轴和y轴长度不一，且周期编码沿y轴排布，因此此对称双波束分布在 yoZ 面上，且波束在x轴方向偏宽，呈现扁平状。图3(d)为按“010”周期编码排布的超表面阵列归一化电场方向图，其对称反射主波束指向角度为 45.4° ，电场强度比第一副瓣高8.83 dB，-3 dB波束宽度为 6.4° 左右。其波束指向角与计算的 45.2° 吻合较好，但也可看出 0° 反射并没有完全消除。图3(f)为按“0011”周期编码排布的超表面阵列归一化电场方向图，其对称反射主波束指向角度为 32° ，电场强度比第

一副瓣高 11.27 dB, -3 dB 波束宽度为 6.4° 左右。其波束指向角与计算的 32.1° 吻合良好, 且由于编码单元比“010”编码分布更加均匀, 因此具有更优异的波束成形性能。

3 实验测试与结果分析

根据单元及阵列仿真结果制备超表面阵列样品, 如图 4 中左上角所示。超表面阵列样品由 16×8 的超表面单元组成, 采用光刻加工方法在石英衬底一侧制作超表面单元的金属谐振结构以及外接控制电路的电极, 在另一侧沉积金属背板, 采用导电银浆将变容二极管粘接在金属谐振器上。为实现对超表面上变容二极管的实时电调, 使用银浆和导电胶带将石英基片上的电极连接到印制电路板(Printed Circuit Board, PCB)上, 并采用数模转换器控制芯片对每列单元的偏置电压进行独立控制。远场波束测试装置示意图如图 4 所示, 发射端喇叭远端固定, 提供垂直入射的水平极化平面波, 而接收端喇叭固定在转台的延展臂上, 可围绕样品测试二维平面内的远场散射强度。由于发射端、样品及接收端均在同一平面, 接收端喇叭对小角度测试具有一定遮挡。

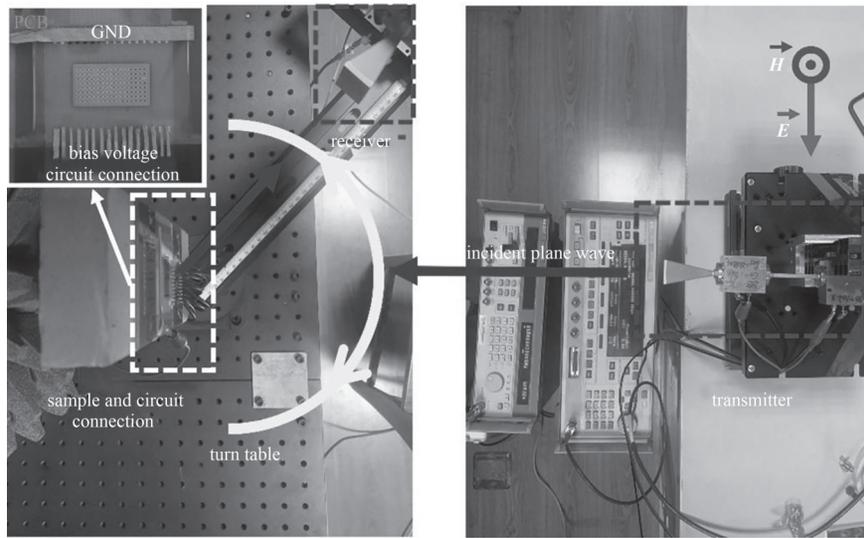


Fig.4 Images for experimental sample and far-field beam measurement equipment

图 4 实验样品及远场波束测试装置示意图

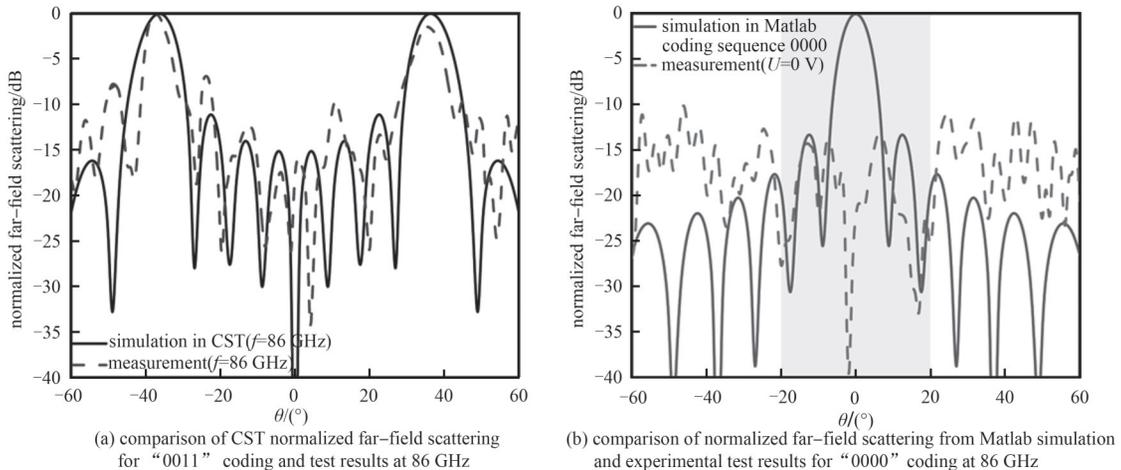


Fig.5 Simulation and test results corresponding to different codes

图 5 不同编码对应的仿真与测试结果

首先对以周期编码“0011”状态排布的超表面阵列进行远场测试, 测试结果如图 5(a)中虚线曲线所示, 当频率为 86 GHz 时, 左右两侧波束成形效果最好, 由此可见, 实验测试与仿真存在一定的频偏。其主要原因是金属谐振器表面贴装的过程中产生的寄生电容和光刻加工误差对单元响应的影响; 另外, 由于仿真最佳工作频率为 94 GHz, 而实测频率红移至 86 GHz, 因此在同一编码序列下, 两者对应的波束也有一定的角度偏差。根据式 (1), 86 GHz 下, 编码“0011”对应波束角度为 $\pm 35^\circ$ 的双波束, 图 5(a)中实测双波束的偏折角分别为 -36° 和

+34.5°, 且左侧主波束比右侧高 1.4 dB 左右。为分析测试过程中的小角度遮挡问题, 使用“0000”编码的仿真结果与实验结果进行对比, 如图 5(b)所示。结果表明, 在大约 $\pm 20^\circ$ 范围内, 接收端装置对于入射波束的遮挡较为明显。在其他角度范围内, 实验测量的散射波束强度较理想情况下略高, 这可能是由于测试环境的背景散射对实验具有一定影响。

为评估超表面阵列的电磁波束调控能力, 计算了频率为 86 GHz 时 30° 、 35° 、 40° 、 45° 四个特定角度对应的 4 种不同的编码序列, 如图 6(a)所示, 对应的归一化远场测试结果如图 6(b)所示, 其中 $\pm 20^\circ$ 范围内的测试结果未在图中显示。从图中可以看出, 各个编码序列对应角度的双波束效果均较为明显, 且角度对应效果良好, 分别为 -45° 、 -41° 、 -36° 、 -30° 、 $+29^\circ$ 、 $+34.5^\circ$ 、 $+39^\circ$ 、 $+44^\circ$ 。整体角度呈现同一方向的误差, 说明测试时接收端与样品的角度存在细微的误差, 且主波束强度整体呈现出左侧偏高的趋势, 这可能是样品的非均一性或测试系统因素导致的。上述结果表明该超表面阵列具备宽角度的波束动态调控能力。

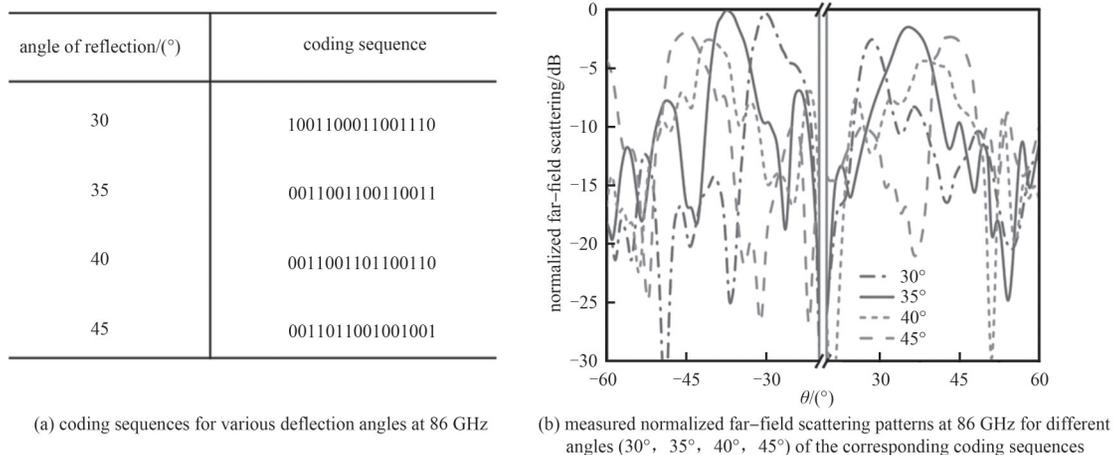


Fig.6 Coding sequences for various deflection angles and their corresponding experimental test results

图 6 不同波束偏折角度对应的编码序列及其对应的实验测试结果

4 结论

本文采用具有优异高频响应特性的变容二极管, 设计了一种工作在 W 波段的 1 bit 列控可编程超表面。仿真结果表明, 超表面单元在目标频率具有不小于 180° 的相位调控范围和宽角度的波束调控能力。在全波仿真基础上制备了阵列规模为 16×8 的超表面阵列, 并对超表面样品在不同编码序列下的远场散射特性进行了实验测试。测试结果表明, 该可编程超表面对 W 波段的反射电磁波具有宽角度的动态调控能力和波束扫描功能。本工作将有效推进 W 频段内的反射式可编程超表面设计与开发工作, 并在亚太赫兹通信与雷达系统中具有潜在的应用价值。

参考文献:

- [1] CUI Tiejun, QI Meiqing, WAN Xiang, et al. Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials[J]. Light, Science & Applications, 2014, 3(10): e218–e218. doi:10.1038/lssa.2014.99.
- [2] DELLA-GIOVAMPAOLA C, ENGHETA N. Digital metamaterials[J]. Nature Materials, 2014, 13(12): 1115–1121. doi:10.1038/nmat4082.
- [3] CUI Tiejun, LIU Shuo, ZHANG Lei. Information metamaterials and metasurfaces[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2017, 5(15): 3644–3668. doi:10.1039/C7TC00548B.
- [4] 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.
- [5] YANG Huanhuan, CAO Xiangyu, YANG Fan, et al. A programmable metasurface with dynamic polarization, scattering and focusing control[J]. Scientific Reports, 2016, 6(1): 35692. doi:10.1038/srep35692.
- [6] LIU Yujie, WANG Yu, FU Xiaojian, et al. Toward sub-terahertz: space-time coding metasurface transmitter for wideband wireless communications[J]. Advanced Science, 2023, 10(29): 2304278. doi:10.1002/advs.202304278.
- [7] 沈仕远, 王元圣, 池瑶佳, 等. 基于编码超表面的双向太赫兹多波束调控器件[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2021, 19(1): 1–6. (SHEN Shiyuan, WANG Yuansheng, CHI Yaojia, et al. Phase transition material based coding metasurface for two-way

- terahertz beam steering[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2021,19(1):1–6. doi:10.11805/TKYDA2020090.
- [8] LI Lianlin,CUI Tiejun,JI Wei,et al. Electromagnetic reprogrammable coding–metasurface holograms[J]. Nature Communications, 2017,8(1):197. doi:10.1038/s41467–017–00164–9.
- [9] HU Yueqiang,LI Ling,WANG Yujie,et al. Trichromatic and tripolarization–channel holography with noninterleaved dielectric metasurface[J]. Nano Letters, 2020,20(2):994–1002. doi:10.1021/acs.nanolett.9b04107.
- [10] BASAR E,DI–RENZO M,DE–ROSNY J,et al. Wireless communications through reconfigurable intelligent surfaces[J]. IEEE Access, 2019(7):116753–116773. doi:10.1109/ACCESS.2019.2935192.
- [11] TANG Wankai,CHEN Mingzheng,CHEN Xiangyu,et al. Wireless communications with reconfigurable intelligent surface:path loss modeling and experimental measurement[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021,20(1):421–439. doi:10.1109/TWC.2020.3024887.
- [12] KISHK M A,ALOUINI M S. Exploiting randomly located blockages for large–scale deployment of intelligent surfaces[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2021,39(4):1043–1056. doi:10.1109/JSAC.2020.3018808.
- [13] KAMODA H,IWASAKI T,TSUMOCHI J,et al. 60 GHz electronically reconfigurable large reflectarray using single–bit phase shifters[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2011,59(7):2524–2531. doi:10.1109/TAP.2011.2152338.
- [14] HUANG Cheng,SUN Bo,PAN Wenbo,et al. Dynamical beam manipulation based on 2 bit digitally–controlled coding metasurface[J]. Scientific Reports, 2017(7):42302. doi:10.1038/srep42302.
- [15] YU N F,GENEVET P,KATS M A,et al. Light propagation with phase discontinuities:generalized laws of reflection and refraction[J]. Science, 2011,334(6054):333–337. doi:10.1126/science.1210713.

作者简介:

汪 域(2000–), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为电磁超材料 .email:220220680@seu.edu.cn.

石 磊(1995–), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电磁超材料.

傅晓建(1986–), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电磁超材料.

蒋卫祥(1981–), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电磁超材料.