

DOI:10.3969/j.issn.1674-7135.2024.01.004

# 一种太赫兹可重构超表面设计方法

单长胜<sup>1</sup>, 陈昊<sup>2</sup>

(1. 北京空间信息传输中心, 北京 102300; 2. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094)

**摘要:**太赫兹是第六代无线通信系统的核心技术之一, 而可重构超表面技术作为太赫兹感通一体的难点问题, 对其进行研究具有重大的意义和价值。本文提出了一种基于肖特基二极管的1 bit 相位可重构超表面, 通过控制肖特基二极管的偏置电压可以控制超表面单元在‘0’和‘1’两种工作状态间切换, 可重构超表面单元在203 GHz ~ 230 GHz的频段内实现了在‘0’, ‘1’两种状态下反射幅度均大于-1 dB, 反射相位有 $180^\circ \pm 20^\circ$ 的变化, 基于对单元进行组阵仿真试验, 通过合理的设计阵面上单元的工作状态, 可以实现波束扫描功能。本文所提出的方法为太赫兹可重构超表面的研究提供了一种新思路, 在未来6G太赫兹通信等领域有重要的应用价值。

**关键词:**太赫兹; 可重构; 超表面; 肖特基二极管

中图分类号: TN929

文献标志码: A

文章编号: 1674-7135(2024)01-0021-07

## One method of reconfigurable metasurfaces design for terahertz

SHAN Changsheng<sup>1</sup>, CHEN Hao<sup>2</sup>

(1. Beijing Space Information Transmission Center, Beijing 100094, China;

2. Beijing Institute of Tracking and Communication Technology, Beijing 100094, China)

**Abstract:** The 6G wireless network envisages the realization of high-speed data rate, ultra-low delay, Wireless interconnection of everything and high spectrum and energy utilization efficiency. Terahertz is one of the key technologies of 6G communication. As the difficult problem of terahertz communication, the research on reconfigurable metasurfaces technology has great significance and value. In this paper, a 1-bit phase reconfigurable metasurface based on Schottky diode is proposed. By controlling the bias voltage of Schottky diode, the metasurface unit cell can be controlled to switch between ‘0’ and ‘1’ working states. Through simulation analysis, the designed reconfigurable metasurface unit cell can achieve a reflection amplitude greater than -1 dB in both ‘0’ and ‘1’ states in the frequency band of 203 GHz ~ 230 GHz, The reflection phase has a change of  $180^\circ \pm 20^\circ$ . The array simulation is carried out to evaluate the working performance of metasurface. By reasonably designing the working state of the unit cells on the array surface, the beam scanning can be realized. The proposed terahertz reconfigurable metasurface provides a new idea for the study of terahertz reconfigurable metasurface and has important application value in the future 6G terahertz communication and other fields.

**Key words:** terahertz; reconfigurable; metasurface; Schottky diode

## 0 引言

随着第五代无线通信系统(5th generation mo-

bile networks, 5G)的商业启动, 第六代无线通信系统(6th generation mobile networks, 6G)的研究也逐渐

收稿日期: 2023-09-15; 修回日期: 2023-12-11

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 91438206)

引用格式: 单长胜, 陈昊. 一种太赫兹可重构超表面设计方法[J]. 空间电子技术, 2024, 21(1): 21-27. SHAN C S, CHEN H. One method of reconfigurable metasurfaces design for terahertz[J]. Space Electronic Technology, 2024, 21(1): 21-27.

展开,6G 无线网络设想实现高速数据速率、超低延迟、万物无线互联和高的频谱及能源利用效率等,太赫兹通信凭借其突出的技术优势成为 6G 无线网络的潜在关键支撑技术之一。但由于其波长小,在复杂的传播环境中会产生较大的路径损耗,在构建新一代 6G 通信系统中需要中继对其传播路径进行修正,利用可重构超表面替代传统的中继设备,不仅具有可以对传播路径进行灵活的反射调整功能,还可以实现透射、吸收等功能,具有低成本、低能耗的优势<sup>[1-2]</sup>。另外在太赫兹频段下,传统的发射机链路需要的器件设计更加复杂困难、成本较高,而近些年提出的基于可重构超表面的无链发射机架构通过可重构超表面对入射的载波信号直接进行调制<sup>[3]</sup>,极大的减少了设计的复杂度和制造成本。所以太赫兹可重构超表面在未来具有极大的应用潜力,作为太赫兹感通一体的重难点问题,对其进行研究具有重大的意义和价值。

超表面是一种由亚波长单元结构周期排列组成的二维超材料,可以通过改变自身的参数对入射电磁波的幅度、相位、极化等特性进行调控,由于其设计复杂度低以及低损耗、易加工等特点,近些年来成为广大研究人员的关注热点。2014 年,东南大学崔铁军教授团队首次提出数字编码超表面的概念,将超表面单元的工作状态用离散的二进制表示,并实现了波束调控等功能,进一步地促进了超表面的发展<sup>[4]</sup>。由于传统的超表面一旦加工完成,所实现的功能就无法更改,所以为了能够对电磁波进行实时的调控,适应日益复杂的系统需求,可重构超表面应运而生。目前可重构超表面中常用的可重构技术主要有光电调谐(应用 PIN 二极管、变容二极管、互补金属氧化物半导体(CMOS)晶体管、高电子迁移率晶体管(HEMT)、肖特基二极管等)<sup>[5-8]</sup>、应用相变材料(二氧化钒(VO<sub>2</sub>)、液晶等)<sup>[9-11]</sup>、机械调谐(微机电系统 MEMS 等)<sup>[12-13]</sup>。通过可重构技术的加载,可重构超表面已经可以实现对电磁波特性的可编程实时调控,在信息调制、电磁隐身、全息成像等领域都展现了应用价值<sup>[14-16]</sup>。可重构超表面具有低成本、低能耗、可编程、易部署的优点,通过可重构超表面实现的太赫兹天线不仅可以实现波束二维快速扫描控制与成型,还可以实现太赫兹信号的矢量调制,降低了系统复杂度,避免了太赫兹频段移相技术缺乏对相控阵技术实现的严峻挑战<sup>[17]</sup>。

文章对太赫兹可重构超表面进行了设计和研究,提出了一种基于肖特基二极管的 1bit 相位可调的可重构超表面,利用金属贴片的有无替代二极管的通断,在 203 GHz ~ 230 GHz 的频段内实现了超表面单元在‘0’,‘1’两种状态下反射幅度均大于 -1 dB,反射相位有 180° ± 20° 的变化,为了更加贴合实际使用情况,将肖特基二极管的等效电路带入到单元模型中进行仿真,同样验证了所提出的超表面单元设计方案的可行性。最后通过对超表面单元的工作状态进行编码设计,实现了对波束指向灵活的调控功能。

## 1 可重构超表面基本概念

编码超材料为调控电磁波提供了一种全新的机制,为实现捷变波束提供了新的方法。通过编码控制实现的可重构超表面能够实现高质量的波束控制,特别是基于 Pancharanam-Berry (PB) 相位反射性超表面,通过不同的编码粒子单元结构,构建出周期编码的超表面,实现了对太赫兹反射波束的高效调控。

几何相位 (pancharanam-berry, PB) 通过改变具有相同几何形状的单元结构中微结构方向角可获得全相位波束指向。当微结构对入射波反射输出的相位的旋转角度从 0 到  $\pi$  变化时,反射波相位可以实现从 0 到  $2\pi$  的全相位覆盖,当旋转角度大小为  $\alpha$  时,单元结构在垂直入射下会获得一个相位增量,其大小为  $\pm 2\alpha$ ,其中,  $+2\alpha$  表示入射电磁波为右手圆偏振,  $-2\alpha$  表示入射电磁波为左手圆偏振。

当垂直入射时,入射波偏振方向沿表面结构的  $x, y$  轴方向传播,谐振器沿  $x$  轴旋转  $\alpha^\circ$ ,传输系数如式(1)所列。

$$\hat{t}(\alpha) = R(-\alpha) \begin{pmatrix} t_0 & 0 \\ 0 & t_e \end{pmatrix} R(\alpha) \quad (1)$$

式(1)中,  $t_0$  代表  $x$  轴复投射系数,  $t_e$  代表  $y$  轴复投射系数,  $R(\alpha)$  为软转矩阵。当入射波为圆极化时,可得到透射电场  $E'_{L/R}$ ,如式(2)所列。

$$E'_{L/R} = \hat{t}(\alpha) \cdot \hat{e}^{\pm L/R} = \frac{t_0 + t_e}{2} \hat{e}^{\pm L/R} + \frac{t_0 - t_e}{2} e^{\pm 2\alpha} \hat{e}^{\pm L/R} \quad (2)$$

利用改变微结构的旋转角度  $\alpha$ ,即可获得 0 到  $2\pi$  的相位改变,进而实现对波束指向的控制。

## 2 可重构超表面单元设计

由于 PIN 二极管和变容管在设计 and 实际使用中

的操作简单性、方便性和低成本等优势,目前大多数可重构超表面都采用了加载 PIN 二极管和变容管的 可重构技术<sup>[1-3]</sup>,但多数的 PIN 二极管由于截止频率的限制,只能工作在 60 GHz 以下,再往更高频段使用, PIN 二极管的性能会产生急剧的恶化,如果在太赫兹频段(0.1 THz - 10 THz)使用将会造成较大的损耗,极大的恶化可重构超表面的工作性能。所以在太赫兹频段一般采用高电子迁移率晶体管 (HEMT)、肖特基二极管等)、应用相变材料(二氧化钒 (VO<sub>2</sub>)、液晶等)等,本文的单元设计方案拟采用一款在太赫兹频带内可以实现良好开关性能的电控二极管,而肖特基二极管由于其在正向电压作用下电阻很小,相当于一只接通的开关,在反向电压作用下,处于截止状态,电阻很大,相当于开关的断开状态,具有低正向导通压降、快速恢复时间、低功耗等优势,适合在太赫兹频段的设计电路中作为理想的电子开关。文章采取加载肖特基二极管的可重构技术,设计了一款 1 bit 反射相位可调节的可重构超表面,由于肖特基二极管理想的开关性能,为了简便的验证设计思路的可行性,首先利用金属贴片的有无代替肖特基二极管的通断,设计了一款加载金属贴片的超表面单元。

文章提出的加载金属贴片的超表面单元结构如图 1 所示。

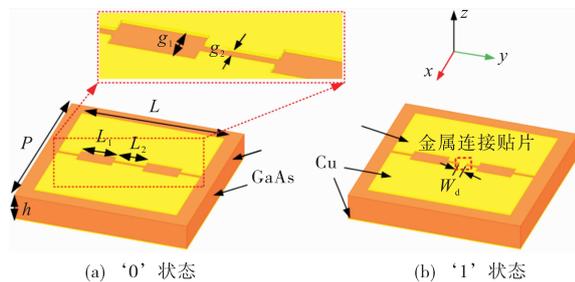


图 1 金属贴片代替肖特基二极管的超表面单元

Fig. 1 Illustrates a surface-mounted metasurface unit featuring a metal patch in lieu of a Schottky diode

如图 1(a)、(b) 分别给出了无金属贴片和有金属贴片两种工作状态单元的结构图,该单元由上层的两个对称的内陷矩形贴片辐射结构、金属连接贴片、地板和介质基板构成,介质基板采用 50  $\mu\text{m}$  厚的 GaAs,当单元上不存在金属连接贴片时,工作在‘0’状态,当金属连接贴片存在时,单元工作在‘1’状态,当  $x$  极化波(即沿着金属连接贴片方向的极化波)入射到单元时,如图 2 所示,给出了两种工作状

态下单元辐射结构上的电场分布,可以看出‘0’状态和‘1’状态下,超表面单元辐射结构会产生不同的电场分布,即出现不同的谐振点,通过合理的调节辐射结构的尺寸参数,单元在两种工作状态下可以实现 180°的反射相位改变,从而实现 1 bit 的反射相位可调控制。

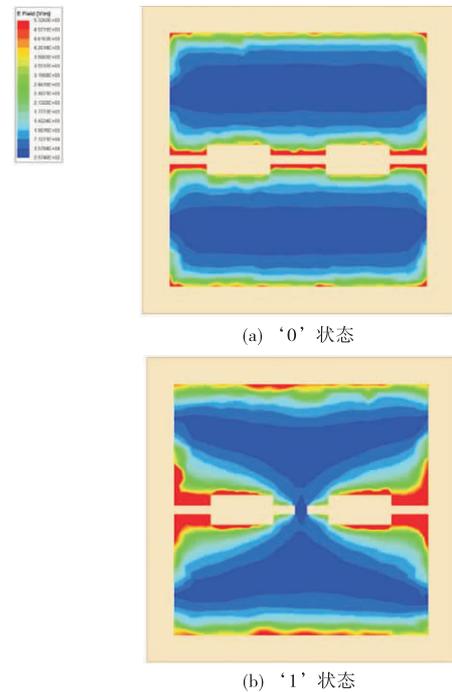


图 2 加载金属贴片的超表面单元电场分布图

Fig. 2 Electric field distribution of metasurface unit loaded with metal patch

为了验证所设计的超表面单元的工作性能,在高频结构仿真软件 HFSS 中建立了加载金属贴片的超表面单元的仿真模型,设置 Floquet 端口和周期边界条件。仿真得出如图 3 所示金属贴片代替肖特基二极管的超表面单元工作特性仿真结果图。由图 3(a)可知,对于两种工作状态下,反射单元的反射系数的幅值在 180 GHz ~ 260 GHz 的频段内的范围内都大于 -1 dB,说明反射单元对入射到其表面的  $x$  极化波接近于全反射。此外,由图 3(b)可知两种工作状态下单元的反射相位的改变量在 203 GHz ~ 230 GHz 的频率范围内都在  $180^\circ \pm 20^\circ$  的范围内,数据表明所设计可重构超表面不仅可以实现 1 bit 单元相控,而且在超过 10% 带宽内移相量误差具备一定的线性关系,验证了所设计的超表面单元良好的工作性能。

考虑到实际的肖特基二极管本身会带来一定的损耗,所以为了更加贴合实际的情况,将上述单

元中的金属连接贴片用肖特基二极管的等效电路模型进行替代,所采用的肖特基二极管经过测试得到的基本参数如表 1 所列。

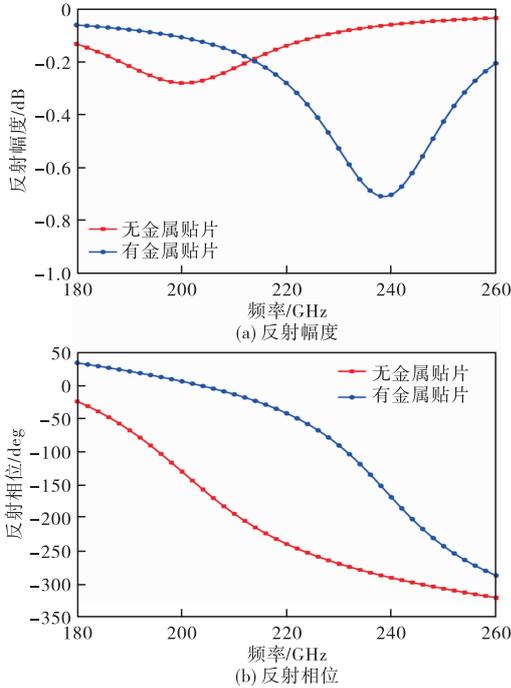


图 3 金属贴片代替肖特基二极管的超表面单元工作特性仿真结果

Fig. 3 Simulation results of metasurface unit operating characteristics of metal patch instead of Schottky diode

表 1 肖特基二极管基本参数测试结果

Tab. 1 Test results of Schottky diode basic parameters

参数	尺寸/ $\mu\text{m}$	$R_s/\Omega$	$n$	$V_{br}/\text{V}$	$I_s$	$C_{j0}/(\text{fF})$
值	$55 \times 175$	8.2	1.18	-4.8	$3\text{E}14$	2

表 1 中,  $R_s$  为导通串联电阻,  $n$  为伏安特性曲线的修正因子,  $V_{br}$  为反向击穿电压,  $I_s$  为最大浪涌电流,  $C_{j0}$  为势垒电容, 考虑到二极管导通、断开时电阻、电容等各个参数的变化, 经过简化可以得到其等效电路模型如图 4 所示, 该肖特基二极管在 220 GHz 附近的频率范围内有良好的开关工作性能。

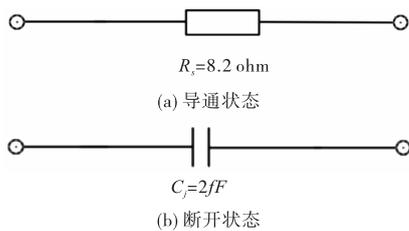


图 4 肖特基二极管等效电路模型

Fig. 4 Schottky diode equivalent circuit model

对改进后的单元重新在 HFSS 中进行仿真, 得

到如图 5 所示的加载肖特基二极管的超表面单元工作特性仿真结果图。

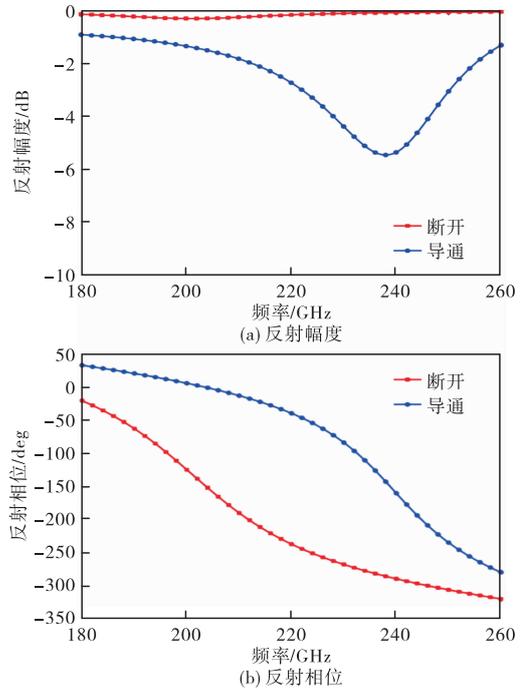


图 5 代入肖特基二极管等效电路模型的超表面单元仿真结果

Fig. 5 Simulation results of metasurface elements substituted with Schottky diode equivalent circuit model

从图 5(a) 中可以看出, 肖特基二极管导通状态下, 相比于加载金属贴片的超表面单元仿真结果损耗增大, 由于加载金属贴片的超表面单元直接用金属贴片来代替肖特基二极管, 没有考虑到肖特基二极管导通电阻以及寄生参量带来的损耗, 所以其反射损耗主要来源于介质基板带来的介质损耗, 损耗较小, 在工作频带内损耗小于  $-1 \text{ dB}$ 。相比之下, 加载肖特基二极管的单元则将真实的二极管等效电路模型带入仿真建模中进行仿真分析, 所以所产生的反射损耗不仅包括介质损耗, 还有肖特基二极管带来的损耗, 损耗变大, 但反射损耗均在  $-6 \text{ dB}$  以内, 从图 5(b) 中可以看出肖特基二极管导通和断开两种状态下反射相位的改变量在  $205 \text{ GHz} \sim 235 \text{ GHz}$  的频率范围内都在  $180^\circ \pm 20^\circ$  的范围内, 最终得到的可重构超表面单元的结构参数如表 2 所列。

表 2 可重构超表面单元结构参数

Tab. 2 Structural parameters of reconfigurable metasurface elements

参数	$P$	$L$	$L_1$	$L_2$	$g_1$	$g_2$	$H$	$W_d$
值/ $\mu\text{m}$	340	275	70	55	38	10	50	13

### 3 可重构超表面设计

为了对肖特基二极管进行控制,需要在单元中加入直流偏置电路,由于单元尺寸的限制,为了能够有足够的空间进行直流电路布线,在地板下面新增一层介质基板,最终加载直流偏置后的单元结构如图 6 所示。

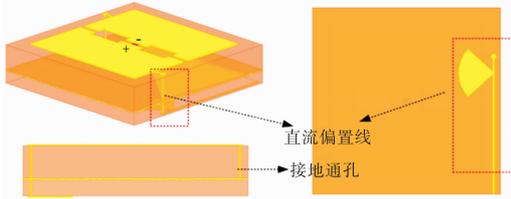


图 6 加载直流偏置电路的单元结构

Fig. 6 Unit structure of the loaded DC bias circuit

在上层肖特基阴极连接的金属贴片边缘引出高阻抗线通过通孔和地板相连,肖特基二极管阳极连接的金属贴片边缘依次引入四分之一波长高阻抗线、开路扇形枝节、直流布线,由于四分之一高阻抗线和扇形枝节将等效成开路效果,所以最底层直流布线的走线对上层加载二极管的金属谐振结构将不会产生影响。对加载直流偏置电路的单元仿真结果如图 7 所示,可以看出仿真结果与不加载直流偏置电路时结果十分接近,证明了所设计的直流偏置电路的可行性。

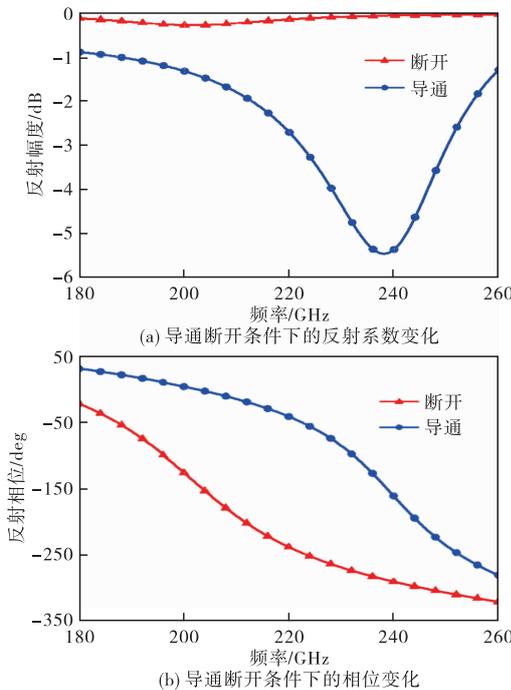


图 7 加载直流偏置电路的超表面单元仿真结果

Fig. 7 Simulation results of metasurface unit loaded with DC bias circuit

由于直流偏置电路需要在 GaAs 基板上制备通孔,考虑到通孔直径的制备精度受到加工设备和技术水平的限制,为了判断出加工误差对最终实物的影响,对不同通孔直径下的单元工作性能进行了仿真分析,结果如图 8 所示,可以看出通孔直径从 2  $\mu\text{m}$  变化到 8  $\mu\text{m}$ ,超表面单元在 205 GHz - 235 GHz 的工作频带内,反射幅度轻微改变,反射相位基本无变化,证明了单元在不同的通孔直径下都具有稳定的工作性能,受加工误差的影响很小。

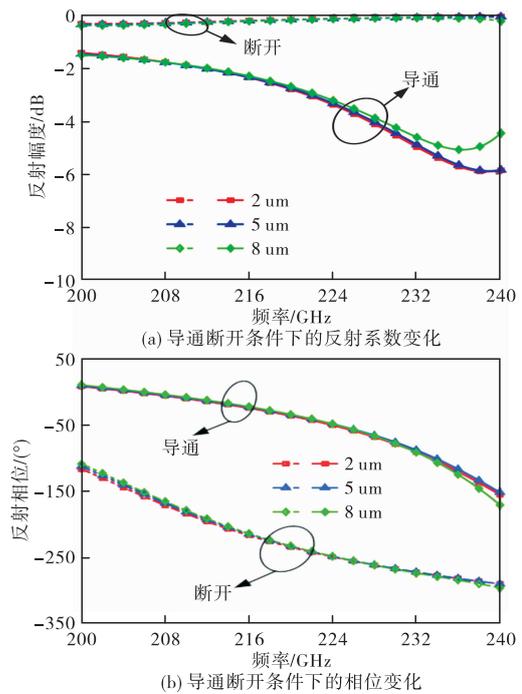


图 8 不同通孔直径下的单元工作性能

Fig. 8 Unit performance under different through-hole diameters

利用设计的加载肖特基二极管的可重构超表面单元设计了一款包含  $32 \times 32$  个单元的可重构超表面,如图 9 所示,通过控制不同位置处超表面单元的工作状态(肖特基二极管导通或断开),可以实现对反射波束的调控,首先对可重构超表面的波束扫描性能进行了仿真。

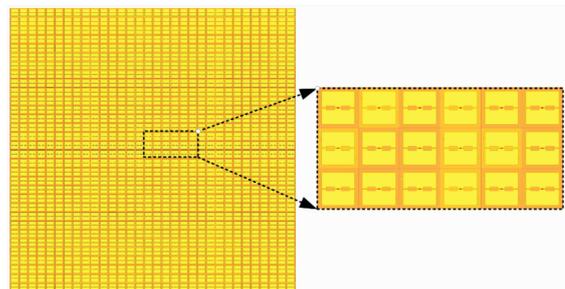


图 9 可重构超表面

Fig. 9 Reconfigurable metasurface

由于所设计的超表面单元仅可以提供两种补偿相位值,所以需要对计算出的单元所需要给予的补偿相位进行量化处理,当超表面单元应该提供的补偿相位的度数位于 $[-90, 90)$ 的区间内,对应的单元处于编码状态‘0’;当超表面单元应该提供的补偿相位的度数位于 $[90, 270)$ 的区间内,对应的单元处于编码状态‘1’,如图 10 所示,给出了可重构超表面反射波束指向法向时的阵面编码分布示意图。

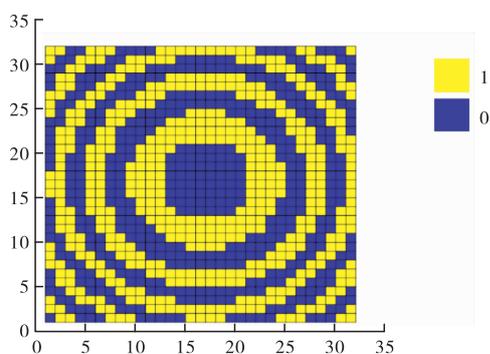


图 10 法向辐射时可重构超表面编码分布图

Fig. 10 Reconfigurable metasurface coding distribution under normal radiation

#### 4 可重构超表面性能评估与分析

为了评估所设计可重构超表面的性能,将构建的可重构超表面施加不同的激励条件,分别仿真了波束指向从 $-60^\circ \sim +60^\circ$ 每间隔 $10^\circ$ 的波束特性,并将各指向角度的方向图做了增益的归一化设计,如图 11 所示。

图 11(a)给出了可重构超表面的主极化,可以看出所设计的 1 bit 可重构超表面可以实现 $\pm 60^\circ$ 的波束扫描范围,波束指向比较准确,且旁瓣抑制均大于 10 dB;波束指向偏离 $0^\circ$ 超过 $30^\circ$ 后,增益呈现逐渐下降的趋势,至 $\pm 60^\circ$ 时,增益下降约 4.5 dB,符合一半相敏阵列的波束扫描规律。另外,随着扫描角度的增大,波束指向误差略有增加, $\pm 60^\circ$ 波束指向时,角度偏差约 $3^\circ$ ,这于离散的相位控制有关,随着阵列阵元的增加,通过构建其差异化相位表达矩阵,可以有效提升角度指向性能。

此外,通过阵列辐射模型对可重构超表面的交叉极化波束特性进行了评估,如图 11(b)所示。由结果分析可知, $\pm 60^\circ$ 内全角度可重构超表面的交叉极化分量远小于主极化分量。其中随着角度偏离 $0^\circ$ 的增大,交叉极化分量逐渐得到优化,波束指向仿真范围内任意角度的时候,在 $0^\circ$ 方向上得到最大交

叉极化分量表达,分析主要原因在于阵列布局的对称性和可重构超表面的无源传输的互异性。

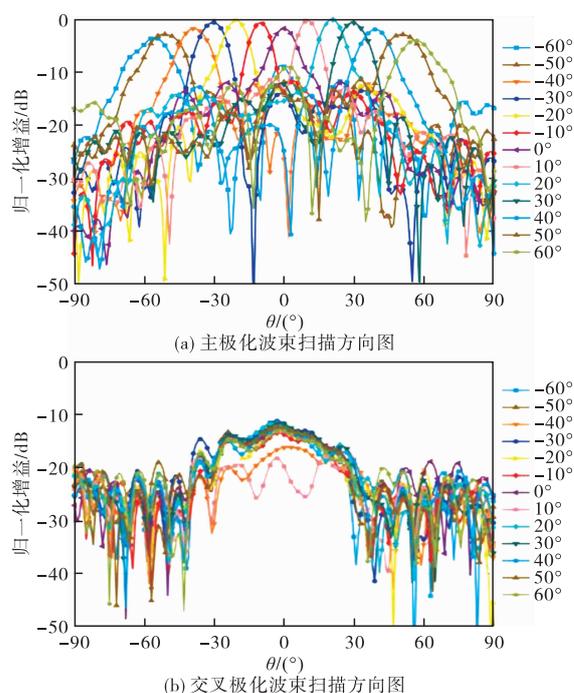


图 11 可重构超表面波束扫描方向图

Fig. 11 Reconfigurable metasurface beam scanning direction diagram

文章设计的可重构超表面为二值化相位激励阵元均匀布阵方案,旨在验证本文所提相位调整方法在可重构超表面的波束指向表征方法,考虑此方案的相位综合存在一定的近似性,对于主极化波束指向误差和交叉极化波束的抑制产生的影响,后续针对于主极化波束和交叉极化波束质量的改善可通过非周期布阵和更优的波束至阵元相位综合两个方面进一步改善。

#### 5 结论

文章主要研究了一款基于肖特基二极管的太赫兹可重构超表面,所设计的超表面单元在 205 GHz ~ 235 GHz 的频率范围内,可以实现反射相位改变量在 $180^\circ \pm 20^\circ$ 的范围内,反射幅度大于 $-6$  dB,为了验证超表面的波束调控能力,对超表面单元进行了组阵分析,超表面实现了 $\pm 60^\circ$ 的波束扫描范围,同时具有较低的交叉极化电平和副瓣电平,所研究的可重构超表面在新一代的 6G 通信系统中较大的应用前景。

#### 参考文献:

- [1] IMOIZE A L, ADEDEJI O, TANDIYA N, et al. 6G ena-

- bled smart infrastructure for sustainable society: Opportunities, challenges, and research roadmap [J]. *Sensors*, 2021, 21(5):1709.
- [2] ELMOSSALLAMY M A, ZHANG H L, SONG L Y, et al. Reconfigurable intelligent surfaces for wireless communications: Principles, challenges, and opportunities [J]. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 2020, 6(3):990-1002.
- [3] TANG W K, CHEN M Z, DAI J Y, et al. Wireless communications with programmable metasurface: New paradigms, opportunities, and challenges on transceiver design [J]. *IEEE Wireless Communications*, 2020, 27(2):180-187.
- [4] CUI T J, QI M Q, WAN X, et al. Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials [J]. *Light: Science & Applications*, 2014, 3(10):e218.
- [5] WANG Z L, GE Y H, PU J X, et al. 1 bit electronically reconfigurable folded reflectarray antenna based on p-i-n diodes for wide-angle beam-scanning applications [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, 68(9):6806-6810.
- [6] TRAMPLER M E, LOVATO R E, GONG X. Dual-resonance continuously beam-scanning X-band reflectarray antenna [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, 68(8):6080-6087.
- [7] 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.
- [8] KARL N, REICHEL K, CHEN H T, et al. An electrically driven terahertz metamaterial diffractive modulator with more than 20 dB of dynamic range [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(9):091115.
- [9] JIANG M Z, HU F R, ZHANG L H, et al. Electrically triggered VO<sub>2</sub> reconfigurable metasurface for amplitude and phase modulation of terahertz wave [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(11):3488-3494.
- [10] YANG J, WANG P J, SUN S Y, et al. A novel electronically controlled two-dimensional terahertz beam-scanning reflectarray antenna based on liquid crystals [J]. *Frontiers in Physics*, 2020, 8:435.
- [11] LIU C X, YANG F, FU X J, et al. Programmable manipulations of terahertz beams by transmissive digital coding metasurfaces based on liquid crystals [J]. *Advanced Optical Materials*, 2021, 9(22):2100932.
- [12] DEBOGOVIC T, PERRUISSEAU-CARRIER J. Low loss MEMS-reconfigurable 1-bit reflectarray cell with dual-linear polarization [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2014, 62(10):5055-5060.
- [13] MANJAPPA M, PITCHAPPA P, SINGH N, et al. Reconfigurable MEMS Fano metasurfaces with multiple-input-output states for logic operations at terahertz frequencies [J]. *Nature Communications*, 2018, 9:4056.
- [14] DAI J Y, TANG W K, YANG L X, et al. Realization of multi-modulation schemes for wireless communication by time-domain digital coding metasurface [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, 68(3):1618-1627.
- [15] ZHANG X G, JIANG W X, JIANG H L, et al. An optically driven digital metasurface for programming electromagnetic functions [J]. *Nature Electronics*, 2020, 3:165-171.
- [16] LI L L, SHUANG Y, MA Q, et al. Intelligent metasurface imager and recognizer [J]. *Light: Science & Applications*, 2019, 8:97.
- [17] 马红兵, 张平, 杨帆, 等. 智能超表面技术展望与思考 [J]. *中兴通讯技术*, 2022, 28(3):70-77.

**作者简介:**单长胜(1969—), 山东菏泽人, 长春理工大学精密机械与自动化专业博士学位, 正高级工程师, 长期从事航天测控与通信技术。

**通讯作者:**陈昊(1982—), 安徽铜陵人, 副研究员, 博士, 主要研究方向为通信与信息系统。E-mail: ritianqq@zlc.cn