液晶与显示
Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays

文章编号:1007-2780(XXXX)XX-0001-12

液晶可调太赫兹编码超表面的光束偏转与近场成像设计

杨　悦[1],李晴晴[1],武　斌[1*],丛　佳[1],赵　洁[1],戴海涛[2*]
(1.天津城建大学 计算机与信息工程学院,天津 300384;
2.天津大学 理学院,天津 300355)

摘要:可重构多功能集成是太赫兹器件的重要研究方向,然而现有器件功能往往固化,难以在同一结构中实现不同功能的灵活调控。在此,本文设计了一种液晶可调太赫兹1 bit编码超表面,实现波束调控与近场图案成像的可重构应用。该超表面采用金属—液晶—金属型反射单元结构,利用液晶介电常数随偏压变化的特性实现反射相位与幅值的调控;在阵列编码层面,采用交叉电极行列编码方式,通过上、下层电极编码矩阵的模二加运算确定阵列单元的编码状态,实现阵列编码分布的动态重构。仿真结果表明:在0.680 THz处,通过改变编码序列周期,可实现高达46.5°的波束偏转;当仅对其中一层金属电极设置编码序列、另一层设置为固定编码状态时,可实现x方向双光束至y方向双光束的切换;当上、下金属电极层同时设置编码序列时,可实现双光束至四光束的可重构调控。此外,利用单元结构在0.524 THz处不同偏压状态下的反射幅值差异,实现了$z=855\ \mu m$处"T""H""Z"字母图案的近场重构。所设计的液晶可调太赫兹编码超表面能够在同一结构中实现波束调控与图案成像一体化,为太赫兹无线通信、近场成像及多功能可重构器件设计提供了一种可实施方案。

关　键　词:太赫兹;液晶;编码超表面;波束调控;近场成像
中图分类号:O436　　**文献标识码**:A　　**doi**:10.3724/CJLCD.2026-0189　　**CSTR**:32172.14.CJLCD.2026-0189

Design of a liquid-crystal-tunable terahertz coding metasurface for beam steering and near-field imaging

YANG Yue[1], LI Qingqing[1], WU Bin[1*], CONG Jia[1], ZHAO Jie[1], DAI Haitao[2*]

(1. *School of Computer and Information Engineering*, *Tianjin Chengjian University*, *Tianjin* 300384, *China*;
2. *School of Sciences*, *Tianjin University*, *Tianjin* 300355, *China*)

Abstract: Reconfigurable multifunctional integration is an important research direction of terahertz devices. However, the functions of existing devices are often solidified, and it is difficult to achieve flexible regulation of different functions in the same structure. We design a liquid-crystal-tunable THz 1 bit coding metasurface capable of reconfigurable applications for beam steering and near-field pattern imaging. The metasurface adopts a metal-liquid crystal-metal reflection unit structure, the reflection phase and amplitude are controlled by the characteristics of the liquid crystal dielectric constant changing with the bias

收稿日期:2026-09-11;**修订日期**:2026-10-22.
基金项目:国家自然科学基金(No.62375200)
Supported by National Natural Science Foundation of China (No.62375200)
*通信联系人,E-mail:wubin@tcu.edu.cn;htdai@tju.edu.cn

voltage. At the array coding level, the cross-electrode row-column coding method is adopted. The coding state of the array unit is determined by the modular two-plus operation of the upper and lower electrode coding matrices, and the dynamic reconstruction of the array coding distribution is realized. The simulation results show that a beam deflection of up to 46.5° can be achieved by changing the period of the coding sequence at 0.680 THz. When only one layer of the metal electrode is set to the coding sequence and the other layer is set to the fixed coding state, the switching from the x-direction dual beam to the y-direction dual beam can be realized. When the coding sequence is set at the upper and lower metal electrode layers at the same time, the reconfigurable control from two beams to four beams can be realized. In addition, the near-field reconstruction of "T," "H," and "Z" letter patterns at z=855 μm is realized by using the difference of reflection amplitude of the unit structure under different bias conditions at 0.524 THz. The designed liquid crystal tunable terahertz coding metasurface can realize the integration of beam control and pattern imaging in the same structure, which provides an implementation scheme for terahertz wireless communication, near-field imaging and multi-functional reconfigurable device design.

Key words: terahertz; liquid crystal; coding metasurface; beam steering; near-field imaging

1 引　　言

太赫兹波(Terahertz waves, THz)通常是指频率为0.1～10 THz、介于微波与红外波之间的电磁波,是连接电子学与光子学的重要频段,在无线通信[1-2]、雷达探测[3-4]、生物医学成像[5-6]和无损检测[7-9]等领域具有重要应用潜力。随着太赫兹技术的发展,如何实现对太赫兹波的灵活调控,已成为相关领域的核心研究问题之一。超表面作为由亚波长人工结构单元构成的二维电磁结构,是实现电磁波灵活调控的有效途径,其具有易集成、损耗低及设计自由度高等显著优势[10],能够在亚波长厚度范围内对电磁波进行高效调制,因而被广泛应用于波束偏转[11-13]、聚焦[14-16]、偏振转换[17-18]和成像[19-21]等方面。

近年来,国内外研究者围绕超表面波前调控开展了大量研究。2011年,Capasso教授团队[22]基于广义斯涅尔定律提出突变相位超表面,为异常反射、异常折射和波束偏转等功能提供了理论基础。2014年,Cui等[23]提出了数字编码超表面,以数字编码表征相位响应,实现了电磁波的可编程调控。随着可重构电磁器件的发展,液晶、石墨烯、二氧化钒等可调谐材料被引入编码超表面设计中。其中,液晶兼具外场可调、工艺成熟和易于大面积集成等优势,可通过偏压改变分子取向以调节单元的介电常数和电磁响应,实现对太赫兹波的主动调控[24-25]。2019年,Wang等[26]提出了基于向列相液晶的数字编码超表面,实现了反射相位动态调节,并在毫米波频段验证了波束分裂与偏转功能。2022年,Fu等[27]提出了反射型液晶太赫兹1 bit可编程超表面,实现了太赫兹异常反射和波束偏转调控。2024年,Shen等[28]进一步提出液晶多比特太赫兹可重构超表面,实现了太赫兹波束的精细调控和多种波束调节功能。上述研究证实液晶可调编码超表面具有良好的可重构调控能力,然而现有研究功能形式相对单一,面向液晶可调太赫兹器件的多功能集成设计仍需进一步探索。

本文设计了一种基于金属—液晶—金属反射型结构的编码超表面,通过外加偏压改变液晶分子取向以实现对太赫兹波的主动调控。在远场调控方面,通过切换不同的编码序列,实现了0.680 THz处的波束偏转、双光束方向切换以及双光束至四光束的重构;在近场成像方面,基于该结构在不同偏压状态下的反射幅值差异,在0.524 THz处实现了"T""H""Z"字母图案的近场重构。该设计提高了液晶可调太赫兹编码超表面的调控能力,为多功能集成太赫兹器件的设计提供了一种思路。

2 基本原理与整体设计

2.1 液晶可调单元设计

本文所设计的液晶可调太赫兹编码超表面

及其单元结构示意图如图1所示。金属十字谐振结构和金属背板分别制作于300 μm厚的石英基底上，聚酰亚胺(PI)取向层旋涂于金属层表面，两PI层之间填充100 μm厚的液晶层，形成金属—液晶—金属型反射单元结构，如图1(b)所示。

液晶材料选用向列相型液晶，[其分子呈棒状结构，具有明显的介电各向异性，长轴与短轴方向介电常数分别为$\varepsilon_{//}$和$\varepsilon_{\perp}$。其介电各向异性也表现为折射率各向异性，当入射太赫兹波的电场方向平行于液晶分子长轴时，液晶表现出非寻常光折射率n_e；当电场方向垂直于液晶分子长轴时，表现出寻常光折射率n_o。非寻常光折射率和寻常光折射率与相应方向的介电常数之间满足$n_e \approx \sqrt{\varepsilon_{//}}$、$n_o \approx \sqrt{\varepsilon_{\perp}}$，双折射率为$\Delta n = n_e - n_o$[29]。通过外加偏置电场可以改变液晶分子的取向，进而改变液晶层的介电响应，调节单元反射相位和反射幅值。未施加偏压时，液晶分子的取向平行于金属层表面的PI层，如图1(d)所示。此时，相对介电常数张量矩阵可表示为[11]：

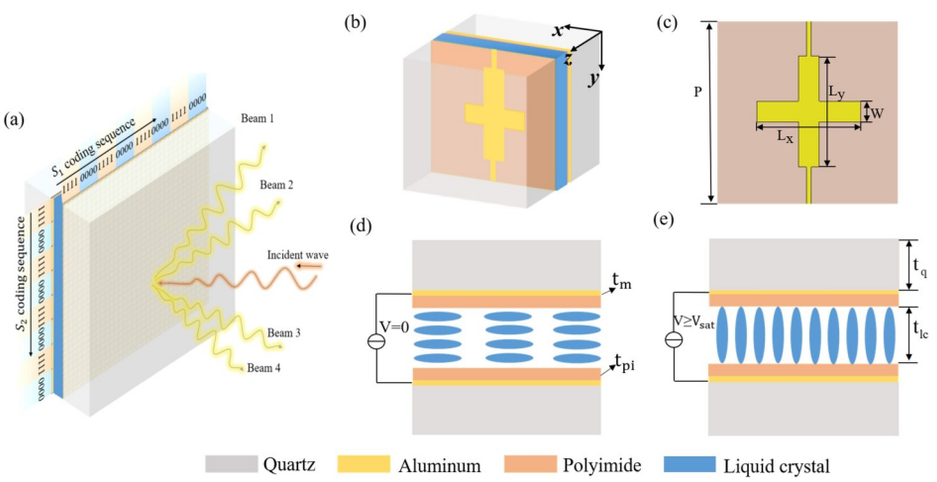


图1　液晶可调太赫兹编码超表面及单元结构图。(a)编码超表面整体示意图；(b)三维单元结构示意图；(c)十字金属谐振结构示意图；(d)未偏压态单元结构侧视图；(e)偏压态单元结构侧视图。

Fig. 1　Schematic of the liquid-crystal-tunable terahertz coding metasurface and unit-cell structure. (a) Overall view of the coding metasurface; (b) Three-dimensional structure of the unit cell; (c) Schematic of the cross-shaped metallic resonator; (d) Side view of the unit cell in the unbiased state; (e) Side view of the unit cell in the biased state.

$$\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_{//} & & \\ & \varepsilon_{\perp} & \\ & & \varepsilon_{\perp} \end{pmatrix}. \tag{1}$$

施加偏压后，液晶分子长轴在电场作用下逐渐发生偏转。偏压增加至饱和电压时，分子趋于沿电场方向排列，如图1(e)所示。此时相对介电常数张量矩阵表示为[11]：

$$\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_{\perp} & & \\ & \varepsilon_{\perp} & \\ & & \varepsilon_{//} \end{pmatrix}. \tag{2}$$

对于沿z方向入射的电磁波，液晶的有效介电常数可表示为介电常数张量在z轴方向的分量。随着偏置电压的增加，液晶分子长轴在电场作用下发生取向偏转，使有效介电常数从$\varepsilon_{\perp}$连续变化至$\varepsilon_{//}$。有效介电常数的变化会引起电磁响应频率的偏移，在谐振附近引起显著的相位变化，从而实现器件相位响应的电调控[30]。

基于上述理论，本研究采用CST Microwave Studio对所设计单元进行全波仿真。液晶材料选用HFUT-HB01[30-32]，介电常数分别为$\varepsilon_{//}$=3.65，$\varepsilon_{\perp}$=2.55，正切损耗tan σ=0.02，驱动电压设置为10V[30-31]。相应的非寻常光折射率$n_e \approx$1.91、寻常光折射率$n_o \approx$1.60，双折射率$\Delta n \approx$0.31，表明该液晶具有明显的折射率各向异性，其分子取向变化能够改变单元的电磁响应。上层十字金属谐振结构如图1(c)所示，周期p为300 μm，横向臂长L_x=170 μm，纵向臂长L_y=180 μm，臂宽w=34 μm，两侧连接线宽度为8 μm，金属层厚度t_m=1 μm及PI层厚度t_{pi}=5 μm

如图1(d)所示。仿真过程中,分别采用液晶未偏压态和饱和偏压态对应的介电常数张量建立单元模型。结果表明,该单元结构在特定频点处两种状态满足1 bit编码要求,为后续超表面阵列设计提供基础。

2.2 编码原理与边缘电场分析

本文基于交叉条形电极的行列编码方式构建了32×32的液晶可调太赫兹编码超表面阵列,其整体结构如图1(a)所示。该阵列由上、下两层相互正交的金属电极组成,上层沿x方向、下层沿y方向各设置32个独立电极,其控制状态对应的编码序列分别记为S_1和S_2,共同决定超表面阵列的编码分布。相邻电极之间设有5 μm的间隔,便于实现电极的独立偏压控制。

交叉条形电极编码的基本原理是通过上、下两层电极在交叉区域的共同作用,来实现阵列单元编码状态的调控。对于1 bit编码超表面,上、下电极层的编码值均为"0"或"1",阵列单元等效编码状态由所在位置上、下电极层编码值的模二加运算确定。当两层编码值相同时,上、下电极层处于相同偏置状态,液晶层内电场近似为零,单元保持初始反射状态;当两层编码值不同时,上、下电极层间存在偏置电压,液晶分子取向发生改变,液晶层处于电场调控状态[33]。阵列中第(m, n)个单元的上、下电极层编码值分别记为S_1(m)和S_2(n),其真值关系如表1所示。

表1 交叉区域单元的真值表

Tab. 1 Truth table of the electrode-crossing unit

S_1(m)	S_2(n)	S_1(m)⊕S_2(n)	Bias state
0	0	0	Unbiased state
1	0	1	Biased state
0	1	1	Biased state
1	1	0	Unbiased state

电极间隔产生的边缘电场会对器件性能产生一定的影响,在此对电极间隔电场进行分析。本文设计的32×32交叉电极结构具有周期性与对称性,为清晰呈现其电场分布,选取局部4×4交叉电极区域的电场进行详细表征说明。仿真中,对上、下两层金属电极中相邻电极分别设置0V和10V电压,结果如图2所示。结果表明,该电场主要集中在相邻电极间隔区域以及十字形电极边缘局部区域,远离电极边缘后逐渐减弱,如图2(a)所示;下层金属电极的电场主要集中于5 μm间隔附近,并由电极边缘向周围区域扩展,如图2(b)所示;上层金属电极的电场主要分布在十字形电极边缘及连接线附近,上下层电极存在电势差的交叉区域单元边缘电场较强,电势相近的交叉区域单元边缘电场较弱,如图2(c)(d)所示。由此可见,边缘电场会影响电极间隔及十字形电极边缘附近的局部电场分布,但阵列内部电极仍能形成用于分区调控的电场分布。

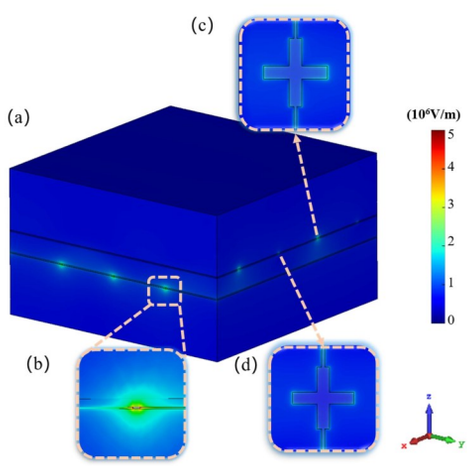


图2 交叉电极结构间的电场分布。(a)三维结构电场分布;(b)5 μm间隔局部电场分布;(c)十字形电极区域较强电场分布;(d)十字形电极区域较弱电场分布。

Fig. 2 Electric field distribution in the crossed-electrode structure. (a) Three-dimensional structural and electric-field distribution; (b) Local electric-field distribution at the 5μm gap; (c) Relatively strong electric-field distribution in the cross-shaped electrode region; (d) Relatively weak electric-field distribution in the cross-shaped electrode region.

2.3 编码超表面调控原理

编码超表面的波束偏转源于阵列表面反射相位分布对太赫兹波前的调制。如图1(a)所示,当平面波沿-z轴方向入射时,不同编码单元引入的反射相位在远场区域相干叠加,形成特定方向的散射波束。根据广义斯涅尔定律,非均匀相位分布会在界面处产生附加相位梯度,使反射波束偏离镜面反射方向,从而实现对远场波束方向的调控[22]。

对于由M×N个单元组成的编码超表面，其远场散射函数可表示为[34]：

$$f(\theta,\varphi)=f_e(\theta,\varphi)\sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N}\exp\{-i[\varphi(m,n)+\frac{2\pi}{\lambda}\mathrm{D}\sin\theta\varphi\left(m-\frac{1}{2}\right)\cos+\left(n-\frac{1}{2}\right)\sin\varphi]\},\quad(3)$$

式中，$f_e(\theta,\varphi)$为单个单元远场函数，D是单元尺寸；θ和φ是任意方向的俯仰角和方位角；φ(m,n)表示位置(m,n)单个单元的相位。

对于1 bit编码单元，φ(m,n)取0或π两种相位，(“0”和“π”并非指相位的绝对数值，而是强调两个单元之间的相位差为π)。因此，通过改变两种编码单元的排布方式，可调节阵列表面的等效相位梯度，从而控制波束偏转方向。当编码序列沿x或y方向呈周期性排列时，主波束的偏转角可表示为[35]：

$$\theta=\sin^{-1}\left(\frac{\lambda}{\Gamma}\right),\quad(4)$$

式中，λ和Γ分别为自由空间波长和编码序列周期。由公式(4)可知，编码周期越小，反射波束偏转角越大；编码周期越大，偏转角越小。

结合交叉电极编码方式，设编码序列S_1和S_2的周期分别为Γ_1和Γ_2，则主波束的方位角和俯仰角可分别表示为[33]：

$$\begin{cases}\varphi=\pm\arctan\left(\dfrac{\Gamma_1}{\Gamma_2}\right)\\ \theta=\arcsin\left(\lambda\sqrt{\dfrac{1}{\Gamma_1^2}+\dfrac{1}{\Gamma_2^2}}\right)\end{cases},\quad(5)$$

式中，φ表示反射波束在超表面平面内的方位角，θ表示反射波束偏离法线方向的俯仰角。由公式(5)可知，空间波长固定时，改变Γ_1和Γ_2可以调节主波束的偏转方向和偏转角度。

3　仿真与分析

本文研究了在y线性极化波沿-z方向垂直入射条件下的单元响应与阵列功能。首先，分析了超表面单元在不同偏压状态下的反射性能；然后构建不同编码阵列，分别对远场波束调控和近场图案成像进行仿真分析。

3.1　远场波束调控分析

液晶可调超表面单元在不同偏压状态下的反射幅值与反射相位分别如图3(a)(b)所示。在0.680 THz处，未偏压态和偏压态的反射幅值均大于0.8，且二者相位差约为180°，满足1 bit编码对较高反射幅值和相位差为π的要求。将未偏压态和偏压态分别定义为编码“0”和编码“1”，方便后续阵列相位编码设计。

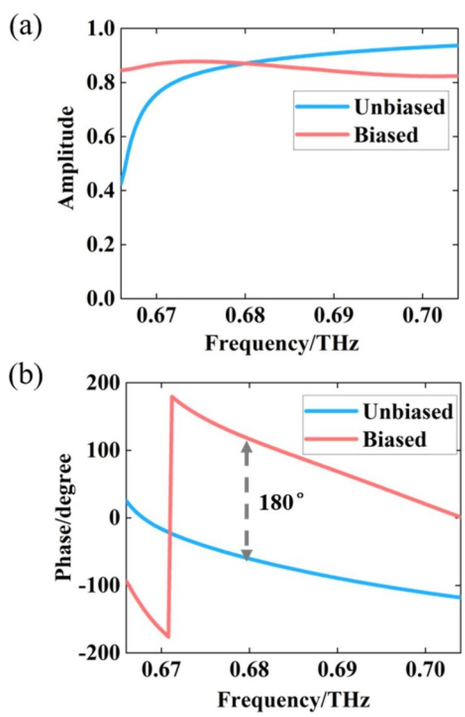


图3　不同偏压状态下的反射性能。(a)反射幅值图；(b)反射相位图。

Fig. 3　Reflection performance under different bias states. (a) Reflection amplitude; (b) Reflection phase.

为了分析编码序列周期对远场波束偏转的影响，仿真中将下层电极编码序列设置为$S_2=(0)_y$，上层电极编码序列S_1分别设置为$(0)_x$、$(10)_x$、$(1100)_x$及$(11110000)_x$(下标字母表示编码序列的排布方向，括号内数字表示一个周期内的编码状态)。当$S_1=(0)_x$时，阵列整体处于相同编码状态，无附加相位梯度产生，反射波束呈现垂直单光束，如图4(a)所示。当S_1设置为$(10)_x$、$(1100)_x$和$(11110000)_x$时，阵列表面会产生不同强度的等效相位梯度，使反射波束发生不同角度的偏转。其中，$S_1=(10)_x$对应的相位梯度最大，

主波束偏转角约为46.5°，如图4(b)所示；随着编码序列周期增大，$S_1=(1100)_x$对应的主波束偏转角减小至约20.5°，如图4(c)所示；$S_1=(11110000)_x$对应的主波束偏转角进一步减小至约10.3°，如图4(d)所示。因此，改变编码序列周期可以实现对远场反射波束偏转角度的有效调控。

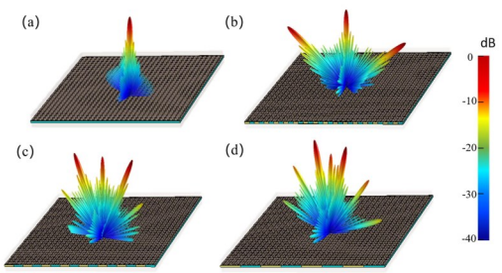


图4 不同S_1周期编码序列下的远场结果。(a)$S_1=(0)_x$对应的远场示意图；(b)$S_1=(10)_x$对应的远场示意图；(c)$S_1=(1\ 100)_x$对应的远场示意图；(d)$S_1=(11\ 110\ 000)_x$对应的远场示意图。

Fig. 4 Far-field scattering results under different S_1 periodic coding sequences. (a) Far-field scattering result for $S_1=(0)_x$; (b) Far-field scattering result for $S_1=(10)_x$; (c) Far-field scattering result for $S_1=(1100)_x$; (d) Far-field scattering result for $S_1=(11\ 110\ 000)_x$.

以11110000周期编码序列为例，分析单层编码序列对反射波束偏转方向的影响。当上层金属电极编码序列设置为$S_1=(11110000)_x$、下层金属电极编码序列设置为$S_2=(0)_y$时，阵列编码分布如图5(a)所示，橙色和蓝色模块分别表示偏压态编码“1”和未偏压态编码“0”，每个方格代表4×4个同状态单元，表征完整阵列规模32×32。此时，阵列等效相位梯度沿x方向分布，反射波束呈现x方向的双光束，如图5(b)所示。当上层金属电极编码序列设置为$S_1=(0)_x$、下层金属电极编码序列设置为$S_2=(11110000)_y$时，阵列编码分布如图5(c)所示，等效相位梯度转为y方向，反射波束形成沿y方向的双光束，如图5(d)所示。上、下电极编码状态的切换实现了远场双光束在x与y方向之间的转换。

为进一步提升器件的多波束调控能力，在此采用上下两层电极同时编码的方式。与单层电极编码相比，该方式需分别设置和控制两组电极，其电极布线及系统集成的复杂度会相应增加，但能够实现更加灵活的阵列调控。当两层金属电极编码序列分别设置为$S_1=(11110000)_x$、$S_2=(11110000)_y$时，经模二加法运算形成棋盘阵列编码分布，如图6(c)所示。此时，超表面的反射相位在x、y两个正交方向均呈周期性变化，反射波束由单层电极编码时的双光束分布转变为四个对称分布的主波束，其方位角φ位于45°，135°，225°和315°附近，俯仰角θ约为14.5°，结果如图6(f)所示。在保持两层编码序列周期一致的条件下，改变序列周期可以进一步调节四光束的俯仰角。

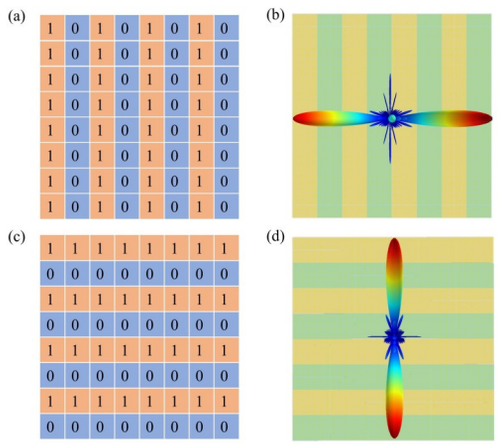


图5 阵列编码分布及远场示意图。(a)$S_1=(11\ 110\ 000)_x$，$S_2=(0)_y$对应的阵列编码分布；(b)x方向双波束远场示意图；(c)$S_1=(0)_x$，$S_2=(11\ 110\ 000)_y$对应的阵列编码分布；(d)y方向双波束远场示意图。

Fig. 5 Array coding distributions and corresponding far-field patterns. (a) Array coding distribution for $S_1=(11\ 110\ 000)_x$ and $S_2=(0)_y$; (b) x-direction dual-beam far-field result; (c) Array coding distribution for $S_1=(0)_x$ and $S_2=(11\ 110\ 000)_y$; (d) y-direction dual-beam far-field result.

类似地，当上、下两层金属电极设置不同周期编码序列时，可以实现太赫兹波束的多种调控特性。以$S_1=(11110000)_x$、$S_2=(1100)_y$为例，经模二加法运算得到对应的阵列编码分布，如图7(a)所示。由于S_1与S_2编码周期不同，x、y方向上的相位梯度不再相等，四个主波束偏离45°、135°、225°和315°的对称方位，其理论方位角φ分别约为63.4°、116.6°、243.4°和296.6°。远场仿真结

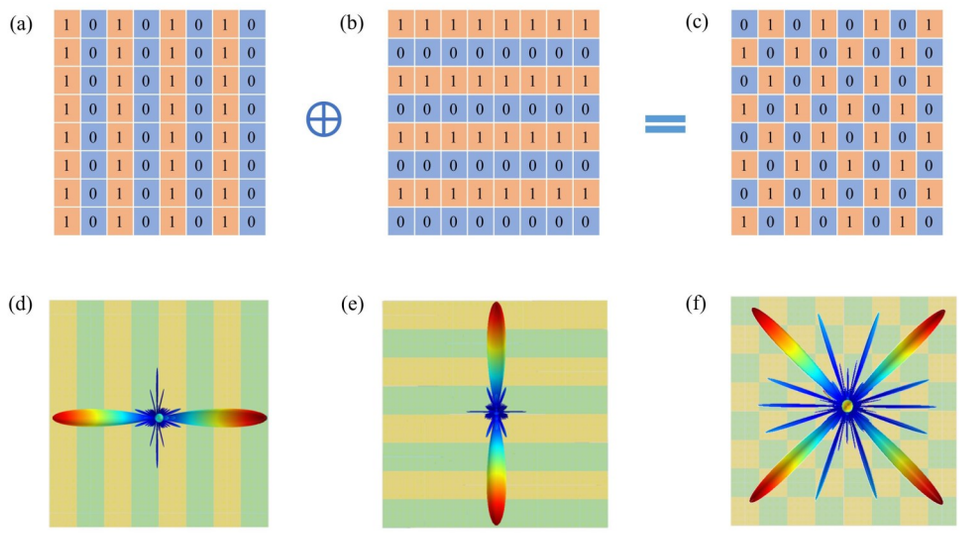


图6　阵列编码分布及远场示意图。(a)$S_1=(11\ 110\ 000)_x$、$S_2=(0)_y$对应的阵列编码分布；(b)$S_1=(0)_x$、$S_2=(11\ 110\ 000)_y$对应的阵列编码分布；(c)$S_1=(11\ 110\ 000)_x$、$S_2=(11\ 110\ 000)_y$对应的阵列编码分布；(d)$S_1=(11\ 110\ 000)_x$、$S_2=(0)_y$对应的远场示意图；(e)$S_1=(0)_x$、$S_2=(11\ 110\ 000)_y$对应的远场示意图；(f)$S_1=(11\ 110\ 000)_x$、$S_2=(11\ 110\ 000)_y$对应的远场示意图。

Fig. 6　Array coding distributions and corresponding far-field patterns. (a) Array coding distribution for $S_1=(11\ 110\ 000)_x$ and $S_2=(0)_y$; (b) Array coding distribution for $S_2=(0)_y$ and $S_2=(11\ 110\ 000)_y$; (c) Array coding distribution for $S_1=(11\ 110\ 000)_x$ and $S_2=(11\ 110\ 000)_y$; (d) Far-field pattern for $S_1=(11\ 110\ 000)_x$、$S_2=(0)_y$; (e) Far-field pattern for $S_1=(0)_x$、$S_2=(11\ 110\ 000)_y$; (f) Far-field pattern for $S_1=(11\ 110\ 000)_x$、$S_2=(111\ 10\ 000)_y$.

果如图7(b)所示，四光束方位角分别为63.8°、116.8°、243.3°和296.8°，俯仰角θ为23.8°，与理论计算结果基本一致。该结果表明，当上、下两层金属电极同时设置不同周期编码序列时，反射波束可根据S_1与S_2的周期编码序列产生不同方位和俯仰角的散射波束分布。

综上，在0.680 THz处，采用单层电极编码改变序列周期，可调节双光束的偏转角度；切换上层或下层电极的编码状态，可实现双光束从x方向切换至y方向的调控。进一步，对上、下两层电极同时编码，可形成沿x和y两个正交方向变化的阵列编码分布，实现双光束至四光束的重构，通过改变两层编码序列周期可进一步调节四光束的方位角和俯仰角，实现多方位、多角度的太赫兹波束调控。

3.2　近场图案成像分析

根据能量守恒关系，超表面对入射电磁波的吸收率可表示为[36]：

$$A(\omega)=1-T(\omega)-R(\omega)\,, \tag{6}$$

式中，$A(\omega)$、$T(\omega)$和$R(\omega)$分别表示吸收率、透射率和反射率。对于金属背板型反射单元，金属背板能够有效抑制电磁波透射，可近似认为$T(\omega)\approx 0$，因此$A(\omega)\approx 1-R(\omega)$。其中，反射率与反射幅值的关系为$R(\omega)=\left|r(\omega)\right|^2$，那么吸收率与反射幅值的关系为$A(\omega)\approx 1-\left|r(\omega)\right|^2$。不同单元吸收状态所对应的反射幅值差异可用于近场图案的幅值编码，高、低反射幅值状态分别对应目标区域和背景区域，通过二者的空间排布形成预设图案[37]。

不同偏压状态下单元的反射幅值及偏压态吸收率分别如图8(a)(b)所示。在0.524 THz处，偏压态吸收率约为98.4%，表明入射太赫兹波几乎被完全吸收，呈现低反射状态；未偏压态则呈现较高的反射幅值。两种状态的反射幅值差大于0.8，为近场图案成像中目标区域与背景区域形成可辨识的幅值差异提供了基础。

基于反射幅值差异，本文构建了字母“T”“H”“Z”字母图案的幅值编码分布。其中，字母成像区域对应未偏压态单元，非字母区域对应偏压态单元。为分析近场成像效果，在z=855 μm处设置近场观测平面，并提取反射电场强度分布。仿真结果如图9所示，观测平面上的近场强

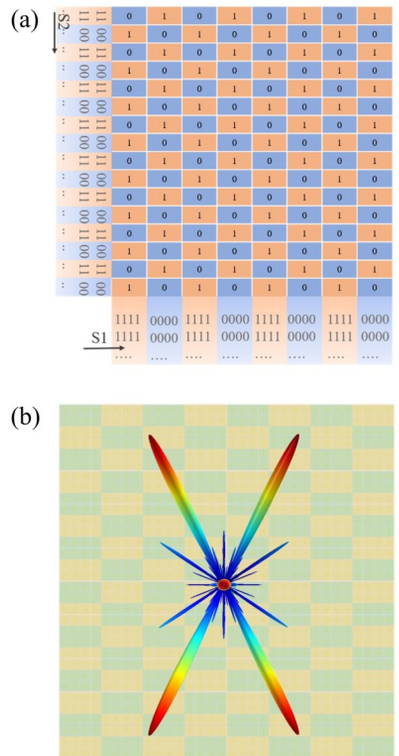


图7 阵列编码分布及远场示意图。(a)S_1=(11 110 000)$_x$、S_2=(1 100)$_y$对应的阵列编码分布;(b)S_1=(11 110 000)$_x$、S_2=(1 100)$_y$编码序列的远场示意图。

Fig. 7 Array coding distributions and corresponding far-field patterns. (a) Array coding distribution for S_1=(11 110 000)$_x$ and S_2=(1 100)$_y$; (b) Far-field result for the coding sequence with S_1=(11 110 000)$_x$ and S_2=(1 100)$_y$.

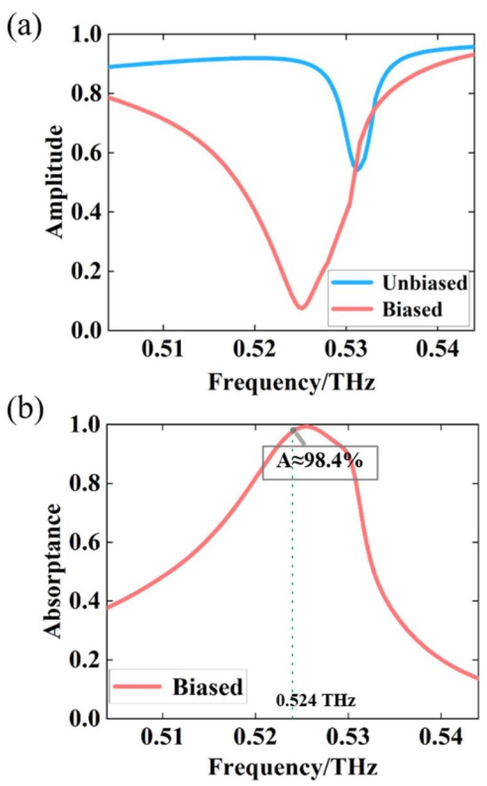


图8 反射幅值与吸收特性。(a)不同偏压状态的反射幅值;(b)偏压态吸收率。

Fig. 8 Reflection amplitude and absorption characteristics. Reflection amplitude under different bias states; (b) absorptivity of the biased state.

度分布能够重构预设的“T”“H”“Z”字母图案,表明该超表面可通过幅值编码实现太赫兹近场图案成像。

为分析目标图案的近场成像结果,采用目标区域与背景区域平均强度差异的对比度评价方法[38],定义平均电场幅值对比度C_M:

$$C_M=\frac{\overline{|E|}_{\text{target}}-\overline{|E|}_{\text{background}}}{\overline{|E|}_{\text{target}}+\overline{|E|}_{\text{background}}}, \tag{7}$$

其中,$\overline{|E|}_{\text{target}}$和$\overline{|E|}_{\text{background}}$分别为目标图案区域与背景区域的平均电场幅值。$C_M$越大,目标区域与背景区域的平均电场幅值差异越显著,目标图案的可辨识度越高。

基于上述CST仿真的“T”“H”“Z”近场图案

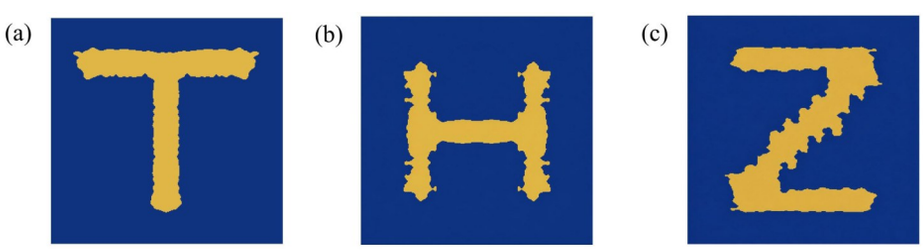


图9 在0.524 THz处,“T”“H”“Z”图案的仿真近场成像图像。(a)“T”成像结果;(b)“H”成像结果;(c)“Z”成像结果。

Fig. 9 Simulated near-field imaging results of the “T”, “H”, and “Z” patterns at 0.524 THz. (a) “T” imaging result; (b) “H” imaging result; (c) “Z” imaging result.

成像结果，分别计算目标图案区域与背景区域的平均电场幅值，并得到对应的平均电场幅值对比度C_M，结果如表2所示。

其中，三种近场重构图案对应的C_M分别为0.461、0.459、0.479，三者对比度值差异较小，表明不同形状图案的近场重构具有较好的一致性。$\overline{|E|}_{\text{target}}$与$\overline{|E|}_{\text{background}}$差值约为1，表明两区域之间存在可分辨的幅值差异。受有限阵列尺寸、单元幅值调制范围等因素影响，重构图案存在一定的背景场干扰和幅值不均匀现象，但所设计的超表面仍能在不同目标图案下形成稳定的C_M，且目标区域可有效分辨，能够实现不同目标图案的近场重构。

综上所述，所设计的液晶可调太赫兹编码超表面不仅能够基于相位调制在0.680 THz处实现远场光束偏转，还能够基于反射幅值差异在0.524 THz处实现近场图案成像。两种功能均基于液晶介电参数变化引起的超表面单元电磁响应调控，通过编码阵列实现功能重构。由于两种功能分别利用反射相位和反射幅值进行调控，且对应不同工作频点和编码方式，近场图案成像功能不会对波束调控功能产生明显影响。相较于仅具有波束调控功能的器件，该超表面引入近场图案成像功能，可在数字图像重构、信息安全显示等领域发挥优势[39-40]，具有更高的功能集成度和信息承载能力。

为了进一步说明本文所设计的液晶可调编码超表面的功能特点，在此将其与已有相关工作从调控材料、可调性、远场波束形式和近场成像功能进行了对比，如表3所示。

表2　不同近场重构图案的成像对比度结果

Tab. 2　Contrast results of different near-field reconstructed patterns

Pattern	$\overline{\lvert E\rvert}_{\text{target}}$	$\overline{\lvert E\rvert}_{\text{background}}$	C_M
T	1.561	0.576	0.461
H	1.454	0.539	0.459
Z	1.540	0.542	0.479

表3　编码超表面的设计及性能对比

Tab. 3　Design and performance comparison of coding metasurfaces

Metasurface	Liquid crystal	Tunable	Beam forms	Near−field imaging
[41]	No	Yes	—	Yes
[27]	Yes	Yes	Two	—
[33]	Yes	Yes	Two/Four	—
Our work	Yes	Yes	Two/Four	Yes

其中，文献[41]提出了基于石墨烯的可重构太赫兹超表面反射镜，主要侧重于太赫兹成像功能。文献[27]设计了液晶集成反射式1 bit可编程太赫兹超表面，通过改变编码序列实现了远场双光束调控，体现了液晶材料在太赫兹波束动态调控中的应用价值。文献[33]进一步提升了液晶可编程超表面的波束调控能力，但未涉及近场图案成像功能。本文利用液晶介电常数随偏压变化的特性实现对太赫兹波的动态调控，并通过合理切换阵列编码分布，实现了波束偏转、双光束方向切换、双光束至四光束重构以及字母图案近场重构，拓展了液晶可调太赫兹超表面的功能应用范围。

4　结　　论

本文设计了一种基于交叉条形电极行列编码方式的液晶可调太赫兹编码超表面。当太赫兹平面波垂直入射到超表面时，通过切换上、下金属电极的编码状态，可重构阵列编码分布，在不同工作频点处实现远场波束调控和近场图案成像。在0.680 THz处，该结构实现了最大46.5°的波束偏转及不同波束形态的主动调控；在0.524 THz处，利用不同偏压状态下的反射幅值差异，在z=855 μm处实现了“T”“H”“Z”字母图案的空间成像。该设计进一步提升了液晶可调超表面的功能集成能力，在太赫兹通信与成像领域具有重要应用前景。

参 考 文 献：

[1] JIANG W, ZHOU Q H, HE J G, *et al*. Terahertz communications and sensing for 6G and beyond: A comprehensive review[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2024, 26(4): 2326-2381.

[2] FU Y, LI Y B, FU X J, *et al*. A dual-broadband liquid-crystal programmable metasurface and its application in terahertz wireless communications[J]. *Engineering*, 2026,59:352-363.

[3] RICHARD J T, EVERITT H O. Millimeter wave and terahertz synthetic aperture radar for locating metallic scatterers embedded in scattering media[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2017, 7(6): 732-740.

[4] 刘康, 武烘萱, 易俊,等. 单光子计数太赫兹雷达直接探测方法与性能研究[J]. 雷达学报, 2024,13(4): 904-916.
LIU K, WU H X, YI J, *et al*. Research on direct detection method and performance of single-photon counting terahertz radar[J]. *Journal of Radars*, 2024, 13(4): 904 - 916. (in Chinese)

[5] QI X, BERTLING K, TORNIAINEN J, *et al*. Terahertz in vivo imaging of human skin: Toward detection of abnormal skin pathologies[J]. *APL Bioengineering*, 2024, 8(1):016117.

[6] KATYBA G M, CHERNOMYRDIN N V, DOLGANOVA I N, *et al*. Terahertz endoscopy of hard-to-access objects in the context of neoplasms diagnosis - A review[J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2025, 6: 58.

[7] LI J X, LI X R, YARDIMCI N T, *et al*. Rapid sensing of hidden objects and defects using a single-pixel diffractive terahertz sensor[J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 6791.

[8] KUBOTA M, KINOSHITA Y, HIROKAWA S, *et al*. In-line multi-wavelength non-destructive pharma quality monitoring with ultrabroadband carbon nanotubes photo-thermoelectric imaging scanners[J]. *Light: Science & Applications*, 2025, 14: 306.

[9] LIU Y P, HAO Y M, QU S N. Carbon nanotube photo-thermoelectric imagers enhance the non-destructive quality monitoring[J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2025, 6: 82.

[10] HOLLOWAY C L, KUESTER E F, GORDON J A, *et al*. An overview of the theory and applications of metasurfaces: The two-dimensional equivalents of metamaterials[J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2012, 54(2): 10-35.

[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] CHEN B W, WANG X R, LI W L, *et al*. Electrically addressable integrated intelligent terahertz metasurface[J]. *Science Advances*, 2022, 8(41): eadd1296.

[13] SHEN D F, LAN F, WANG L Y, *et al*. Sub-terahertz transmissive reconfigurable intelligent surface for integrated beam steering and self-OOK-modulation[J]. *Light: Science & Applications*, 2025, 14: 13.

[14] HE J J, CHEN R K, LI Y F, *et al*. Graphene metalens with dynamic focusing and plane focusing in the terahertz range[J]. *Applied Optics*,2021,60(20):5752-5758.

[15] AIETA F, GENEVET P, KATS M A, *et al*. Aberration-free ultrathin flat lenses and axicons at telecom wavelengths based on plasmonic metasurfaces[J]. *Nano Letters*, 2012, 12(9): 4932-4936.

[16] HE C, SONG Z. Terahertz graphene metasurfaces for cross-polarized deflection, focusing, and orbital angular momentum[J]. *Optics Express*, 2022, 30(14): 25498-25508.

[17] REN B, FENG Y X, TANG S, *et al*. Dynamic control of THz polarization modulation and multi-channel beam generation using a programmable metasurface[J]. *Optics Express*, 2021, 29(11): 17258-17268.

[18] 孙华燕,陈哲,许永平,等. 基于二氧化钒的反射型功能可重构太赫兹偏振转换超表面[J]. 光学学报,2026,46(2):363-376.
SUN H Y, CHEN Z, XU Y P, *et al*. Vanadium dioxide-based reflective functionally reconfigurable terahertz polarization conversion metasurface[J]. *Acta Optica Sinica*, 2026, 46(2): 363-376. (in Chinese)

[19] LIU H, GAO Z, CHEN C, *et al*. Tunable full-space metasurfaces for multiple terahertz wavefront manipulation and holographic imaging[J]. *Optics Communications*, 2025, 574: 131063.

[20] MA J Y, REN J L, ZHANG J H, *et al*. Quantum imaging using spatially entangled photon pairs from a nonlinear

metasurface[J]. *eLight*, 2025, 5: 2.

[21] ZHUANG Z P, ZHOU X, ZENG H L, *et al*. Overcoming intrinsic dispersion locking for achieving spatio-spectral selectivity with misaligned bilayer metagratings[J]. *eLight*, 2025, 5: 13.

[22] 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.

[23] 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-e218.

[24] 申彦春, 徐雅倩, 胡伟. 可调谐太赫兹液晶超表面[J]. 液晶与显示, 2025, 40(3): 407-423.
SHEN Y C, XU Y Q, HU W. Overview of active terahertz metasurface devices based on liquid crystal[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2025, 40(3): 407-423. (in Chinese)

[25] 申彦春, 王金兰, 王巧莲, 等. 基于液晶的太赫兹波前调控器件研究进展[J]. 液晶与显示, 2020, 35(7): 762-775.
SHEN Y C, WANG J L, WANG Q L, *et al*. Progress of liquid crystal based terahertz wavefront modulators[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2020, 35(7): 762-775. (in Chinese)

[26] WANG Q, ZHANG X G, TIAN H W, *et al*. Millimeter-wave digital coding metasurfaces based on nematic liquid crystals[J]. *Advanced Theory and Simulations*, 2019, 2(12): 1900141.

[27] FU X J, SHI L, YANG J, *et al*. Flexible terahertz beam manipulations based on liquid-crystal-integrated programmable metasurfaces[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(19): 22287-22294.

[28] SHEN Z, LI W L, JIN B B, *et al*. A liquid crystal-based multi-bit terahertz reconfigurable intelligent surface[J]. *APL Photonics*, 2024, 9(1): 016109.

[29] HABIBPOURMOGHADAM A, CHICHKOV B N, CALÀ LESINA A. Optical self-tuning of ferroelectric metasurfaces infiltrated with nematic liquid crystals via photovoltaic effect[J]. *Advanced Optical Materials*, 2025, 13(20): 2500532.

[30] 王腾宇. 基于可编程液晶超表面的全空间太赫兹波调控技术研究[D]. 南京:南京林业大学,2025.
WANG T Y. Study of full-space terahertz wave modulation based on programmable liquid crystal metasurface [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2025. (in Chinese)

[31] WANG T Y, TENG Y, LI C, *et al*. A liquid-crystal-based programmable metasurface for full-space terahertz beam steering[J]. *Journal of Applied Physics*, 2025, 138(3): 033105.

[32] LIU C X, YANG F, JI J T, *et al*. Liquid crystal-based terahertz programmable metasurface with Fano resonance for two-dimensional beam steering[J]. *Optics Communications*, 2025, 578: 131483.

[33] LI W L, CHEN B W, HU X Y, *et al*. Modulo-addition operation enables terahertz programmable metasurface for high-resolution two-dimensional beam steering[J]. *Science Advances*, 2023, 9(42): eadi7565.

[34] 杨悦,雷树杰,武斌,等. 基于二氧化钒的多频点可调太赫兹编码超表面[J]. 激光与光电子学进展, 2026, 63(5): 583-594.
YANG Y, LEI S J, WU B, *et al*. Vanadium oxide-based multi-frequency tunable terahertz-coded metasurfaces [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2026, 63(5): 583 - 594. (in Chinese)

[35] LIU S, CUI T J, ZHANG L, *et al*. Convolution operations on coding metasurface to reach flexible and continuous controls of terahertz beams[J]. *Advanced Science*, 2016, 3(10): 1600156.

[36] LANDY N I, SAJUYIGBE S, MOCK J J, *et al*. A perfect metamaterial absorber[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(20): 207402.

[37] 李银飞, 杨晟凡, 李明星, 等. 受古铜币灵感设计的太赫兹多波束调控反射编码超表面[J]. 无线电工程, 2024, 54(11): 2640-2648.
LI Y F, YANG Y F, LI M X, *et al*. Terahertz multi-beam modulation reflection-coding metasurface inspired by Chinese ancient copper coins [J]. *Radio Engineering*, 2024, 54(11): 2640-2648. (in Chinese).

[38] TILLOTSON E, MCHUGH J, HOWARTH J, *et al*. Scanning electron microscopy imaging of twist domains in transition metal dichalcogenide heterostructures[J]. *ACS Nano*, 2024, 18(50): 34023 - 34033.

[39] YUAN H, ZHONG Z Q, ZHANG Y H, *et al*. Multi-channel image encryption based on an all-dielectric

metasurface incorporating near-field nanoprinting and far-field holography[J]. *Advanced Optical Materials*, 2023, 11(17): 2300352.

[40] HE Y X, ZHAO H, NAN T, *et al*. Terahertz encryption with a polarization-sensitive metasurface[J]. *Nanophotonics*, 2026, 15(9): e70123.

[41] HOSSEININEJAD S E, ROUHI K, NESHAT M, *et al*. Reprogrammable graphene-based metasurface mirror with adaptive focal point for THz imaging[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 2868.

作者简介：



杨　悦，女，博士，讲师，2021年于天津大学获得博士学位，主要从事电磁波调控及超表面设计的研究。E-mail: yangyue194@tju.edu.cn



戴海涛，男，博士，教授，2005年于复旦大学获得博士学位，主要从事液晶光电子器件的研究。E-mail: htdai@tju.edu.cn



武　斌，男，硕士，教授，2002年于北京航空航天大学获得硕士学位，主要研究方向为嵌入式与光电集成技术光通信专用芯片及光电子器件与集成。E-mail: wubin@tcu.edu.cn