

doi:10.13756/j.gtxyj.2025.240181.

专题:纪念创刊50周年

陈希,杨志雄,汪静丽,等. 编码超表面产生太赫兹涡旋波及可逆波束切换[J]. 光通信研究, 2025(6): 240181.

Chen X, Yang Z X, Wang J L, et al. Terahertz Vortex Wave Generation and Reversible Beam Switching based on Coding Metasurface[J]. Study on Optical Communications, 2025(6): 240181.

编码超表面产生太赫兹涡旋波及可逆波束切换

陈希^{1,2}, 杨志雄², 汪静丽², 陈鹤鸣²

(1. 江苏开放大学(江苏城市职业学院), 南京 210008; 2. 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)

摘要:【目的】太赫兹涡旋波在宽带通信、军事雷达、生物医疗和检测等领域具有广泛的应用前景,但利用传统太赫兹器件实现波束调控存在结构复杂、尺寸较大和可调谐性差等问题。针对这些问题,文章基于光敏硅的电导率可调性,提出了一种调控太赫兹波产生涡旋波及可逆波束切换的编码超表面。【方法】该超表面为3层结构,其顶层是金属-光敏硅复合结构,中间层为二氧化硅层,底部为金属层。编码超表面所产生的波束形式是由组成其的编码超表面单元按照一定编码序列排列而决定的。通过改变光敏硅电导率,可以实现单元性质的改变,进而在同一编码超表面上呈现相反的编码序列。通过调控太赫兹波可以实现涡旋波的产生及可逆波束的切换。【结果】仿真结果表明,通过改变光敏硅的电导率,同一编码超表面在两种不同的编码序列下均可以产生反射幅度较高的涡旋波束,且拓扑荷数相反,实现了拓扑荷数分别为 $l=1$ 的涡旋波束以及 $l=-1$ 的可逆波束。【结论】文章以产生应用前景较好的涡旋波为例设计了相关编码序列,产生了太赫兹涡旋波及可逆波束切换,在一定程度上提高了编码超表面调控太赫兹波的能力。这对太赫兹涡旋波通信及信息处理具有重要意义。

关键词: 编码超表面; 编码序列; 光敏硅; 可逆波束切换

中图分类号: O436 **文献标志码:** A

Terahertz Vortex Wave Generation and Reversible Beam Switching based on Coding Metasurface

CHEN Xi^{1,2}, YANG Zhixiong², WANG Jingli², CHEN Heming²

(1. Jiangsu Open University, Nanjing 210008, China; 2. College of Electronic and Optical Engineering & College of Flexible Electronics (Future Technology), Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

Abstract: 【Objective】 Terahertz vortex waves have a wide range of applications in the fields of broadband communications, military radar, biomedicine and detection, etc. However, the realization of beam modulation using traditional terahertz devices suffers from structural complexity, large size and poor tunability. To solve these problems, this paper proposes a terahertz coding metasurface that can modulate terahertz waves to achieve reversible beam switching. The design is based on the tunable conductivity of photosensitive silicon. 【Methods】 The metasurface has a three-layer structure. Its top layer is metal photosensitive silicon composite structure, middle layer is the silicon dioxide layer, and the bottom layer is the metal layer. The beamform generated by the coding metasurface is determined by the coding metasurface units and coding sequence. By changing the conductivity of the photosensitive silicon, the change in the unit properties can be realized, and then the opposite coding sequence on the same coded metasurface are presented. The modulation of the terahertz wave can realize vortex wave generation and reversible beam switching. 【Results】 Simulation results show that the same coded metasurface can produce vortex beams with higher reflection amplitude and opposite topological charges under two different coding sequences. A vortex beam with topological charge $l=1$ and a reversible beam with $l=-1$ are realized by adjusting the conductivity of the photosensitive silicon. By adjusting the conductivity of photosensitive silicon on the same coding metasurface, the reversible beamform switching is achieved. 【Conclusion】 This paper takes the generation of vortex beams with good application prospects as an example to design relevant coding sequences, achieving the generation of terahertz vortex beams and reversible beam switching, which improves the ability of the coding metasurface to manipulate terahertz waves to a certain extent. This is of great significance for terahertz vortex beam communication and information processing.

Key words: coding metasurface; coding sequence; photosensitive silicon; reversible beam switching

0 引言

太赫兹涡旋波在宽带通信、军事雷达、生物医疗

和检测等领域具有广泛的应用前景^[1-6]。编码超表面在电磁波的振幅和相位调控方面具有极高的灵活性,能够实现对入射波的灵活调控,有效地解决了目

收稿日期:2024-08-21; 修回日期:2024-11-18; 纸质出版日期:2025-12-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(62371255,61571237);校级科研平台:物联网智能感知技术研究与应用中心(22-LYPT-Z08)

作者简介:陈希(1986-),女,江苏苏州人。讲师,博士,主要研究方向为新型光电子和太赫兹器件。

通信作者:汪静丽,副教授。E-mail:jlwang@njupt.edu.cn

© Editorial Office of Study on Optical Communications. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

前缺乏尺寸小、结构简单并且能够灵活调控太赫兹波的器件的问题^[7-11],但是,编码超表面仅能调控太赫兹波产生某一种波束形式,有一定的局限性。光敏硅(Si)作为电导率可调的材料,将其应用到超表面领域,可以实现对太赫兹波的更多调控,文献[12]提出了基于空间编码结构光源的2 bit光控可编程太赫兹超表面,解决了现有光控超表面功能单一等问题;文献[13]提出了基于Si的多功能可重构超表面,通过改变Si的电导率,实现了超表面的极化转化、吸波和波束调控等多种功能。然而,上述文献均不能产生太赫兹涡旋波及可逆波束切换。文献[14]提出了基于编码相位梯度超表面产生多波束多模态太赫兹涡旋波,但不能实现太赫兹涡旋波的可逆波束切换。

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

式中: $f_c(\theta, \varphi)$ 为编码超表面单个单元的远场函数, θ 和 φ 分别为任意方向上的俯仰角和方向角; i 为虚数单位; $k_0=2\pi/\lambda_0$ 为自由空间的波数, λ_0 为真空中的波长。编码超表面的方向系数 $Dir(\theta, \varphi)$ 则为

$$Dir(\theta, \varphi) = \frac{4\pi |f(\theta, \varphi)|^2}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} |f(\theta, \varphi)|^2 \sin \theta d\theta d\varphi}. \quad (2)$$

由式(1)和式(2)可知,在给定编码序列的情况下,编码超表面能够灵活调控电磁波产生所需的波束形式。并且随着bit数的提高,其调控电磁波的灵活度也随之不断提高,有望用于多种场景^[11]。

2 编码超表面单元结构的设计与仿真

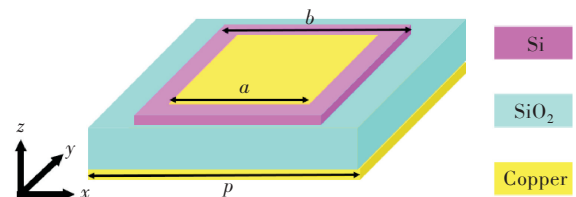
本文设计的编码超表面单元结构如图1所示。单元由3层结构组成,顶层为沿边嵌入电导率 S 可变的Si的金属(Copper)方形结构,其中金属方形长度为 a ,含Si部分的矩形长度为 b ,厚度均为 $t=0.2\ \mu\text{m}$,中间层为厚度 $h=30\ \mu\text{m}$ 的二氧化硅(SiO_2)层,介电常数为3.9,底层厚度为 $t=0.2\ \mu\text{m}$ 的金属结构,单元的边长 $p=200\ \mu\text{m}$ 。其中Si的电导率 S 可随泵浦光能量的变化而改变,本文将 S 分别设置为0和500 000 S/m,以实现Si在介质态和金属态间的切换,进而改变单元的性质^[9]。本文设计了两个具有不同结构参数的编码超表面单元A和B,并利用其Si的特殊性质,设计了编码分别为0、1、2和3的单元,分别用不同颜色的方块表示,单

本文提出将Si应用于编码超表面上,从而实现在同一编码超表面上,通过改变Si的特性,进而改变编码序列形式,且可利用该编码超表面调控太赫兹波产生太赫兹涡旋波及可逆波束切换,这种太赫兹涡旋波及可逆波束切换在未来的太赫兹通信等领域有着广泛的应用前景。

1 编码超表面远场散射理论

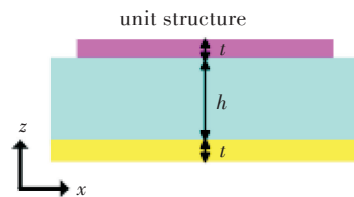
以 $N \times N$ 个尺寸相同且边长为 D 的1 bit编码超表面单元构成的编码超表面为例,每个编码超表面单元为‘0’或‘1’,相位差为 180° ,并且将位于 (m, n) 处的单元相位响应表示为 $\varphi(m, n)$,当平面波垂直入射至编码超表面时,其远场散射函数 $f(\theta, \varphi)$ 为^[15]

元结构参数以及相应的电导率如表1所示。此外,全文建模仿真均利用了CST电磁仿真软件。



(a) 编码超表面单元结构三维图

(a) Three dimensional diagram of the coding metasurface



(b) 编码超表面单元结构截面图

(b) Cross-sectional diagram of the coding metasurface unit structure

图1 编码超表面单元结构

Figure 1 Structure of coding metasurface unit

表1 编码超表面单元结构参数

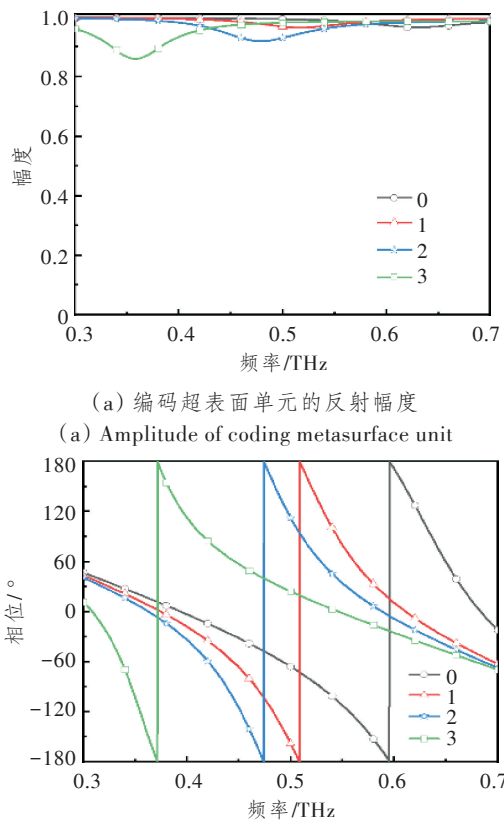
Table 1 Parameters of coding metasurface unit structure

编码超表面 单元	参数				编码	颜色	
	$a/\mu\text{m}$	$b/\mu\text{m}$	$S/\text{S/m}$				
A	100.0	165.0	0	500 000	0	3	
B	121.7	131.5	0	500 000	1	2	

由于编码超表面单元是中心对称的,因此对于正交极化波(x 和 y 极化波)的入射,其电磁响应相同,本文仅以 y 极化波入射为例进行分析。在0.3~0.7 THz频率范围内入射 y 极化波,对编码超

表面单元 0、1、2 和 3 进行仿真分析。其单元的反射幅度及相位如图 2 所示。由图可知,设计的编码超表面单元反射幅度均较高,且 0、1、2 和 3 编码超表面单元间的相位差依旧相差 90°,满足了 2 bit 编码超表面单元设计条件。其中 0 和 3 编码超表面单元是 A 单元在不同电导率下分别表现出的不同编码形式 0 和 3。1 和 2 编码超表面单元是 B 单元在不同电导率下分别表现出的不同编码形式 1 和 2。

因此仅需设计结构参数不同的两个编码超表面单元 A 和 B,通过改变 Si 的电导率,即可实现编码分别为 0、1、2 和 3 的 2 bit 编码超表面单元。在将这些编码超表面单元按照一定的编码序列组成编码超表面后,通过电导率的改变,即可改变编码序列,从而产生新的波束形式。



(a) 编码超表面单元的反射幅度
(a) Amplitude of coding metasurface unit
(b) 编码超表面单元的反射相位
(b) Phase of coding metasurface unit
图 2 编码超表面单元反射幅度及相位

Figure2 Amplitude and phase of coding metasurface unit

3 编码超表面序列的设计及仿真结果分析

将编码超表面单元组成编码超表面后,可以产生一定的波束形式,其中决定波束形式的关键因素则为编码序列。本文通过改变 Si 的电导率,在同一编码超表面上,实现了编码序列的改变,从而在同一

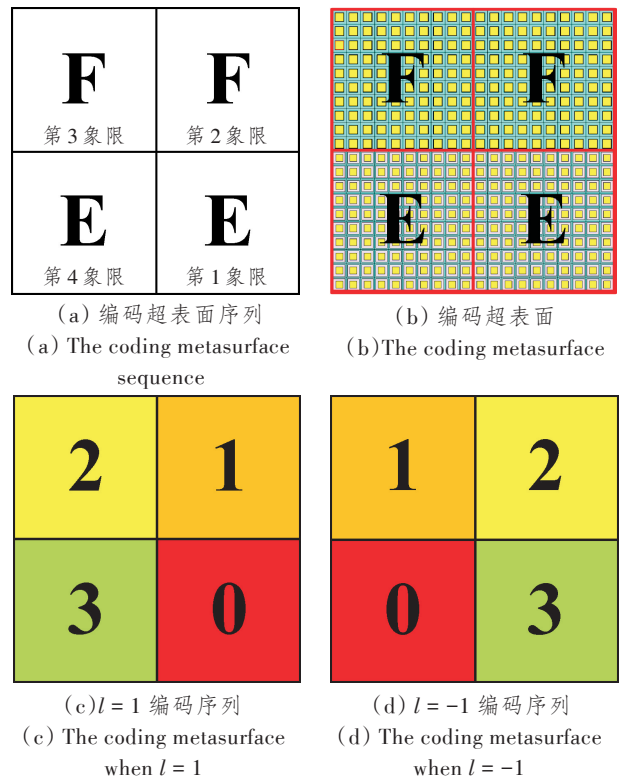
太赫兹编码超表面上实现了涡旋波束的产生及可逆波束切换。

太赫兹涡旋波在通信领域有着广泛的运用前景,并且不同拓扑荷数的涡旋波可以携带不同的信息,因此在同一编码超表面上产生两种不同的拓扑荷数涡旋波可以进一步提高其信息容量^[11]。只要将编码超表面单元按照一定的编码序列排列,即按照一定的相位分布,就可将其转化为具有不同拓扑荷数 l 的涡旋波束,其相位分布为^[16-17]

$$\varphi(x, y) = l \arctan(y/x), \quad (3)$$

式中, $\varphi(x, y)$ 为本文所提编码超表面在平面坐标系 (x, y) 位置处的相位。

如图 3(a)所示, 10×10 个编码超表面单元 A 组成了超级子单元 E; 10×10 个编码超表面单元 B 则组成了超级子单元 F; 将 E 和 F 按 2×2 的大小进行编码序列排列,组成了如图 3(b)所示的编码超表面。由于 A 和 B 单元通过改变 Si 的电导率分别可以在编码 0 和 3 以及编码 1 和 2 之间切换,因此每个象限的 E 和 F 分别也可以在编码 0 和 3 以及编码 1 和 2 之间切换。当图 3(a)所示的第 1、2、3 和 4 象限分别编码为 0、1、2 和 3 时,即可组成图 3(c)所示的编码序列,根据式(3)可以产生拓扑荷数为 $l=1$ 的涡旋波束;当图 3(a)所示的第 1、2、3 和 4 象



(a) 编码超表面序列
(a) The coding metasurface sequence
(b) 编码超表面
(b) The coding metasurface
(c) $l=1$ 编码序列
(c) The coding metasurface when $l=1$
(d) $l=-1$ 编码序列
(d) The coding metasurface when $l=-1$

图 3 编码超表面及序列

Figure 3 The coding metasurface and the sequence

限分别编码为 3, 2, 1, 0 时, 即可组成图 3(d) 所示的编码序列, 则理论上可以产生拓扑荷数为 $l = -1$ 的涡旋波束。可见, 在同一编码超表面上, 通过改变 Si 的电导率, 可以实现与涡旋波束拓扑荷数相反的可逆波束切换。

仿真结果表明, 按照图 3(c) 排列编码超表面单元所构成的编码超表面可以产生如图 4(a) 所示的中心幅度为 0、四周幅度较高的涡旋波, 其相位分布如图 4(b) 所示, 满足了顺时针旋转相位覆盖 360° , 构成了拓扑荷数为 $l = 1$ 的涡旋波。采用图 3(d) 所示编码序列的编码超表面则可以产生如图 4(c) 所示的涡旋波, 其相位分布如图 4(d) 所示, 满足了逆时针相位覆盖 360° , 构成了拓扑荷数为 $l = -1$ 的涡旋波。由图可知, 同一编码超表面在两种不同的编码序列下均可以产生反射幅度较高的涡旋波束, 且拓扑荷数相反, 实现了涡旋波束的可逆波束切换。

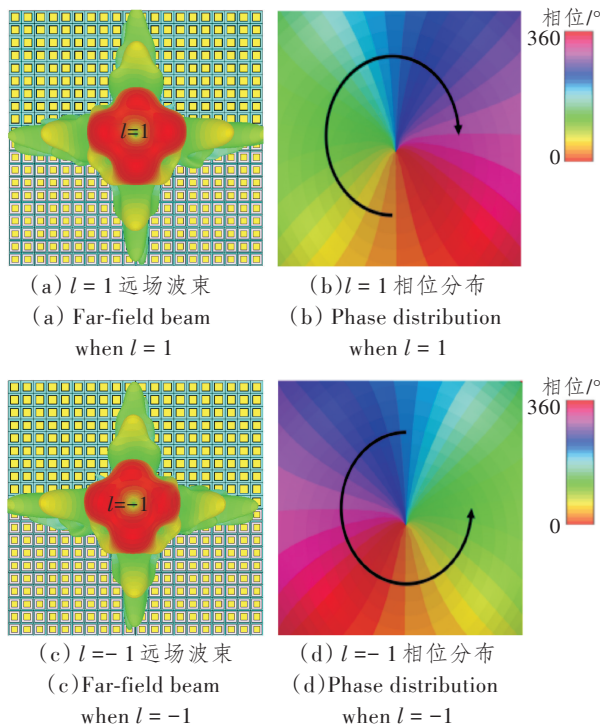


图4 远场波束和相位分布

Figure4 Far-field beam and phase distribution

综上, 本文利用 Si 的电导率可调特性, 实现了在同一编码超表面上, 通过改变编码超表面的编码序列, 增加了编码超表面的波束调控范围, 从而实现了产生太赫兹涡旋波及可逆波束切换。

4 结束语

编码超表面由编码超表面单元按照一定的编码序列组成, 通常在设计完成后仅能调控太赫兹波产

生某种特定的波束形式。本文基于 Si 的特殊性质, 设计出了 2 bit 的编码超表面单元。通过将编码超表面单元有序排列组成编码超表面, 可以在同一编码超表面上, 通过改变 Si 的电导率, 来改变编码超表面的编码序列, 从而实现编码序列的反向排列, 进而实现可逆波束切换。一般而言, 只要合理设计编码序列, 利用本文所提编码超表面可以产生任意所需的波束形式, 且依据 Si 的电导率可调, 即可实现所产生的任意波形的可逆波束切换。而本文以产生应用前景较好的涡旋波为例, 设计了相关编码序列, 产生太赫兹涡旋波及可逆波束切换, 一定程度上提高了编码超表面调控太赫兹波的能力, 而太赫兹涡旋波及可逆波束切换在太赫兹通信和信息处理中具有重要的应用价值。

参考文献:

- [1] Song H J, Lee N. Terahertz Communications: Challenges in the Next Decade [J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2021, 12(2): 105–117.
- [2] Yang X, Pi Y, Liu T, et al. Three-Dimensional Imaging of Space Debris with Space-based Terahertz Radar [J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(3): 1063–1072.
- [3] 张海君, 陈安琪, 李亚博, 等. 6G 移动网络关键技术 [J]. 通信学报, 2022, 43(7): 189–202.
Zhang H J, Chen A Q, Li Y B, et al. Key Technologies of 6G Mobile Network [J]. Journal on Communications, 2022, 43(7): 189–202.
- [4] Li X, Wei W, Yang X. Multi-Functional Terahertz Metasurface for a Vortex Beam, Multi-Channel Focusing, Polarization Conversion, and Broadband Absorption based on Vanadium Dioxide [J]. Applied Optics, 2024, 63(7): 1695.
- [5] Shao L, Li Z, Feng J, et al. Transmissive Metasurface for Multi-Channel and Full-Polarization Modulation of Electromagnetic Wavefronts [J]. Photonics Research, 2023, 11(2): 245–251.
- [6] 叶东, 李俊瑶, 李宗辰, 等. 基于分数涡旋光束的偏振奇点传输特性研究 [J]. 激光技术, 2024, 48(2): 261–267.
Ye D, Li J Y, Li Z C, et al. Study of Propagation Characteristics of Polarization singularities based on Fractional Vortex Beams [J]. Laser Technology, 2024, 48(2): 261–267.
- [7] Li J, Zhang Y, Li J, et al. Frequency-Switchable VO₂-based Coding Metasurfaces at the Terahertz

- Band[J]. *Optics Communications*, 2020, 458: 124744.
- [8] 束耀辉, 汤一铭, 李泽坤. 基于人工表面等离子元的超宽带带通滤波器[J]. *光通信研究*, 2025(2): 230186.
Su Y H, Tang Y M, Li Z K. An Ultra Wideband Bandpass Filter based on Spoof Surface Plasmon Polaritons[J]. *Study on Optical Communications*, 2025(2): 230186.
- [9] 林樾, 苏君, 范志强, 等. 可重构微波光子多波束形成技术研究[J]. *激光技术*, 2024(5): 719–725.
Lin Y, Su J, Fang Z Q, et al. Study of Reconfigurable Microwave Photonics Multi-Beamforming Technology [J]. *Laser Technology*, 2024(5): 719–725.
- [10] 朱潜, 田翰闾, 蒋卫祥. 电磁超表面对辐射波的调控与应用[J]. *光电工程*, 2023, 50(9): 230115.
Zhu Q, Tian H W, Jiang W X. Manipulations and Applications of Radiating Waves Using Electromagnetic Metasurfaces [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2023, 50(9): 230115.
- [11] 范辉颖, 罗杰. 无反射电磁超构表面研究进展[J]. *光电工程*, 2023, 50(9): 47–68.
Fan H Y, Luo J. Research Progress of Reflectionless Electromagnetic Metasurfaces [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2023, 50(9): 47–68.
- [12] Wei J, Qi Y, Zhang B, et al. Research on Beam Manipulate and RCS Reduction based on Terahertz Ultra-wideband Polarization Conversion Metasurface [J]. *Optics Communications*, 2022, 502: 127425.
- [13] 戴耀威, 陈聪, 高鹏, 等. 基于空间编码结构光源的 2 bit 光控可编程太赫兹超表面 [J]. *光学学报*, 2023, 43(11): 247–256.
Dai Y W, Chen C, Gao P, et al. 2 bit Optically Controlled Programmable Terahertz Metasurface based on Spatially Encoded Structured Light [J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(11): 247–256.
- [14] 任佳慧, 李九生. 基于光敏硅的多功能可重构超表面 [J]. *光学学报*, 2023, 43(11): 236–246.
Ren J H, Li J S. Multifunctional Reconfigurable Metasurface based on Photosensitive Silicon [J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(11): 236–246.
- [15] 孙文俊, 汪静丽, 尹亮, 等. 基于编码相位梯度超表面产生多波束多模态太赫兹涡旋波 [J]. *光学学报*, 2024, 44(16): 1624001.
Sun W J, Wang J L, Yin L, et al. Generating Multi-beam Multimodal Terahertz Vortex Beams based on Coding Phase Gradient Metasurface [J]. *Acta Optica Sinica*, 2024, 44(16): 1624001.
- [16] Xie J, Guo H, Zhuang S, et al. Polarization-Controllable Perfect Vortex Beam by a Dielectric Metasurface [J]. *Optics Express*, 2021, 29(3): 3081–3089.
- [17] 李晓楠, 周璐, 赵国忠. 基于反射超表面产生太赫兹涡旋波束 [J]. *物理学报*, 2019, 68(23): 285–291.
Li X N, Zhou L, Zhao G Z. Terahertz Vortex Beam Generation based on Reflective Metasurface [J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68(23): 285–291.